

**CAPITOLO I****RICHIAMI SUI FONDAMENTI****1.1 Aspetti generali****1.11 Prove e misure**

Ogni elemento di un impianto elettrico è caratterizzato da un insieme di proprietà fisiche (geometriche, meccaniche, termiche, elettriche; ecc.) che ne determinano il comportamento nelle diverse condizioni d'impiego. Molte delle grandezze, da cui dipendono queste proprietà, possono essere determinate attraverso delle misure, eseguibili nei vari momenti della vita di un apparecchio, in particolare al termine della sua costruzione, prima d'iniziare il servizio.

I valori misurati hanno tuttavia scarso significato se non sono confrontati con quelli necessari per un corretto funzionamento nello specifico impiego, cui l'apparecchio è destinato: non è sempre facile e spesso nemmeno possibile definire completamente questi requisiti, poiché non sempre si può conoscere a fondo l'influenza di tutti i diversi fattori, e poiché ci si deve, nella maggior parte dei casi, limitare a misure "esterne" all'apparecchio, che non ne compromettano la successiva utilizzazione.

E' chiaro, ad ogni modo, che la garanzia di soddisfacente funzionamento di un apparecchio non può discendere che dalla constatazione che esso soddisfa a determinati requisiti prefissati. Ne segue che una prova è qualcosa di diverso da una semplice misura: questa ha l'unico scopo di porre in relazione una grandezza fisica con un numero, che ne esprime il valore, in un opportuno sistema di unità. Una prova consiste invece in un insieme di misure, eseguite su un oggetto, allo scopo di accertare, in condizioni ben definite, se esso corrisponda, o meno, ad una determinata ipotesi. In sede di collaudo, queste ipotesi coincidono con le garanzie che il costruttore ha fornito, precisandole, in genere, all'atto dell'ordinazione. Nel caso delle misure in esercizio, si vuole invece controllare una macchina od un impianto, durante il loro funzionamento, per verificare se essi corrispondano alle necessità del servizio, nella rete o nel sistema di cui fanno parte, restando entro i limiti delle prestazioni da essi ammissibili. Altri controlli si eseguono sulle macchine o sugli apparecchi giudicati difettosi, per individuare e localizzare le cause del guasto.

Si distinguono, in questi processi, principi diversi: in alcuni casi si assume una determinata rappresentazione schematica dell'oggetto in prova (p. es. il circuito equivalente per un trasformatore, la capacità equivalente di un isolamento ecc.) e se ne misurano i parametri caratteristici (come, per gli esempi precedenti, rispettivamente, la reattanza di cortocircuito, l'angolo di perdita ecc.). In altri casi, si parte dalla considerazione di un particolare tipo di funzionamento -di regime o transitorio- a cui l'apparecchio può trovarsi sottoposto in esercizio, e ci si propone di simularlo convenientemente (riproducendo, ad esempio, le condizioni termiche o di sovratensione più pericolose) per giudicare il comportamento dell'oggetto in prova. L'aderenza alla realtà delle varie schematizzazioni può talvolta essere verificata mutando convenientemente le condizioni di prova: in altri casi, tale verifica discende solo da un'adeguata esperienza, che abbia permesso di riscontrare una precisa corrispondenza fra determinate proprietà, verificate in sede di prova, ed il relativo comportamento in esercizio. I diversi tipi di prove non sono perciò, in ogni caso, fine a se stessi; essi sono dei processi mediante i quali si ottengono delle informazioni, generalmente in forma quantitativa, sulle proprietà dell'oggetto

## CAPITOLO I - Generalità

provato. Nell'economia generale di un sistema produttivo, nel quale si prevede, e successivamente si attua, l'utilizzazione di un determinato oggetto, queste informazioni concorrono a chiudere una catena di processi, che tende alla conoscenza ed al perfezionamento del sistema.

Il grafico di fig. 1.111 dà un'idea schematica di come possono svilupparsi questi processi, nel caso, molto semplice, dell'ordinazione di un apparecchio da parte di un utilizzatore (per esempio una società elettrica) ad un costruttore. Dopo la sua costruzione, l'apparecchio viene provato, per verificare la sua corrispondenza ai dati di progetto (prove di officina), ovvero alle nuove caratteristiche esso studiate (prove di ricerca). Gli apparecchi destinati al cliente sono sottoposti al collaudo, i cui risultati determinano o meno l'accettazione dell'oggetto commissionato; esso viene poi posto in servizio, dove è sottoposto alle verifiche di esercizio. Lo schema può, naturalmente, essere molto più complesso; un costruttore, ad esempio, diviene a sua volta utilizzatore nei riguardi delle materie prime che intende impiegare, e così via.

E' importante mettere in evidenza che tutto ciò non avviene, in genere né automaticamente né istantaneamente; spesso, anzi, fra l'ordinazione di un apparecchio e l'acquisizione dei risultati di esercizio possono intercorrere periodi di tempo molto lunghi; è uno dei compiti del tecnico seguire lo sviluppo delle decisioni, prese in sede di studio e di progetto, fino alle loro conseguenze corrispondenti al comportamento in servizio.

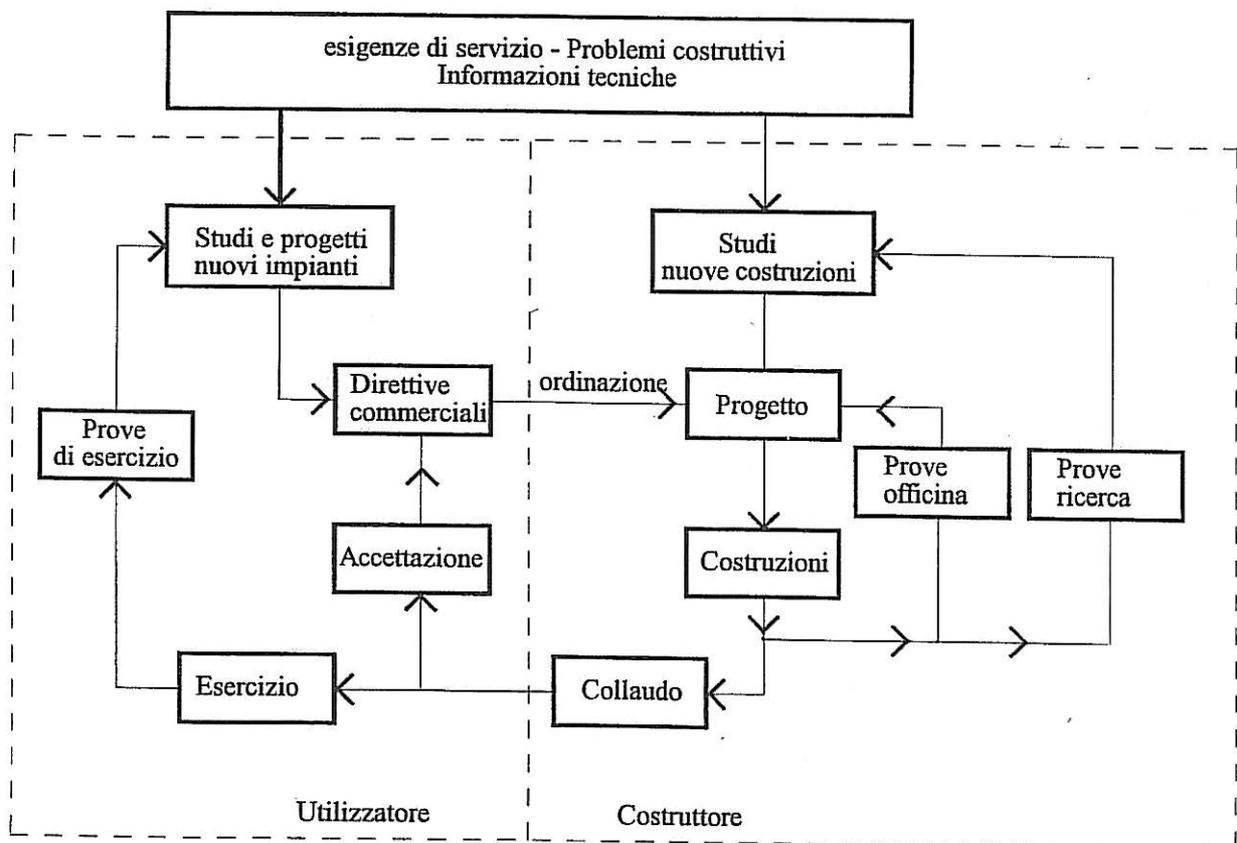


fig. 1.111

## CAPITOLO I - Generalità

1.12 Tipi di prove

Un aspetto importante delle prove sulle macchine e sugli apparecchi destinati agli impianti elettrici, è costituito dal loro costo; una prova rappresenta sempre un onere economico, sia per l'attrezzatura occorrente per eseguirla, sia per il tempo e per il lavoro che richiede. Essa può inoltre risultare di particolare peso economico se condiziona fortemente il progetto e la costruzione dell'oggetto da provare o se può avere come conseguenza un suo danneggiamento o addirittura la sua distruzione.

Di fronte a questi oneri, si presume in genere il vantaggio di un migliore funzionamento in esercizio; ne segue che la valutazione della necessità e delle conseguenze di una determinata prova non spetta solo al tecnico che la esegue, ma anche e maggiormente a quelli impegnati nell'ordinazione, nel progetto, nella costruzione e nell'esercizio dell'apparecchio in questione.

Alcune prove, che hanno lo scopo di determinare le caratteristiche generali di un determinato tipo di apparecchio, possono essere limitate ad un prototipo (prove di omologazione); altre, che hanno lo scopo di controllare alcuni elementi fondamentali del progetto e dell'esecuzione generale dell'apparecchio (ad esempio i materiali impiegati) possono essere eseguite su un numero limitato di esemplari di una fornitura (prove di tipo); altre prove che hanno lo scopo di verificare l'esecuzione dei singoli apparecchi sono eseguite su tutti gli esemplari forniti (prove di accettazione). Non sempre è facile far distinzione fra i predetti tipi di prova: spesso, per ragioni pratiche per esempio nella fornitura di numerosissimi pezzi nominalmente uguali, come gli isolatori di una linea è conveniente eseguire le prove su un numero limitato di esemplari (prove su campione) che viene assunto come rappresentativo dell'insieme, secondo opportuni procedimenti statistici.

In termini generali è molto importante saper valutare se una prova è effettivamente necessaria, se condiziona il progetto richiedendo, di fatto, una esecuzione particolare sicuramente più costosa di quella standard e se il maggior costo trova un ritorno sul piano della sicurezza di esercizio. Sul lato del costruttore è fondamentale la lettura attenta del capitolato di fornitura e la valutazione corretta del senso e dell'impegno delle prove richieste per evitare di dover affrontare costi che in taluni casi possono essere dello stesso ordine di quello della macchina.

A prescindere dalla specializzazione e dalle competenze, non sono assolutamente da sottovalutare le problematiche di ordine meccanico e termico che spesso sono molto più rilevanti di quelle strettamente elettriche: si pensi, ad esempio, alle sollecitazioni elettrodinamiche nei quadri di bassa tensione ed ai conseguenti problemi di tenuta meccanica delle sbarre, alla tenuta al vuoto ed alla pressione della cassa di un trasformatore di potenza o all'effetto del tiro dei conduttori sui contatti di un sezionatore.

1.13 Apparecchiatura per le prove

La possibilità di eseguire correttamente una determinata prova, ovvero la scelta fra più metodi diversi per la stessa prova, è determinata dalle attrezzature disponibili e dalla precisione richiesta. L'attrezzatura necessaria comprende, in generale, oltre agli strumenti di misura veri e propri, delle sorgenti di alimentazione, degli organi di regolazione, di connessione ecc..

Le caratteristiche di tali apparecchiature possono avere diretta influenza sui risultati delle prove stesse, poiché possono modificare le condizioni in cui esse sono eseguite; basti ad esempio pensare all'importanza che può avere la presenza di armoniche in una sorgente che dovrebbe essere sinusoidale, o di una dissimmetria in un sistema polifase e così via.

## CAPITOLO I - Generalità

In particolare, la potenza della sorgente e le dimensioni di tutti gli organi del circuito impiegato per la prova devono essere commisurate alle necessità del carico; questo può essere di durata limitata al tempo necessario per la lettura di alcuni strumenti o può richiedere un lungo periodo di regime, come ad esempio per una prova termica. Varie considerazioni di sicurezza, di stabilità, di riscaldamenti localizzati ecc., consigliamo di utilizzare ogni apparecchiatura entro opportuni limiti di tensione e di corrente; tutto ciò fa parte del problema dell'organizzazione e del progetto di una prova, che è uno dei principali compiti di un ingegnere addetto ad un laboratorio, compito per il quale sono necessarie buona preparazione tecnica ed esperienza pratica.

Per gli apparecchi di misura impiegati, dovrà essere tenuto conto dei presumibili valori delle grandezze da misurare e della precisione richiesta. Questa è in generale legata alle tolleranze previste per i valori garantiti; tenendo conto dell'onere economico che l'introduzione di una maggior precisione può comportare, si ritiene in genere sufficiente una misura che garantisca errori non superiori a 1/5 o ad 1/10 delle tolleranze ammesse. Talvolta si ricorre ad una maggior precisione nelle misure per poter sfruttare a proprio favore una parte delle tolleranze, risparmiando nella costruzione della macchina. Ciò può farsi, ad esempio, sui trasformatori per i quali la progettazione e l'esecuzione possono essere molto curate, così da prevedere con notevole esattezza il risultato.

#### 1.14 Sorgenti di alimentazione

Un laboratorio addetto al collaudo di macchine o di apparecchiature elettriche deve necessariamente essere dotato di sorgenti di f.e.m. di natura e caratteristiche diverse.

Le sorgenti di f.e.m. continua possono essere costituite da batterie di accumulatori, quando siano necessarie tensioni di valore costante, prive di irregolarità e funzionanti per tempi limitati; le tensioni difficilmente superano qualche centinaio di volt, le correnti qualche decina di ampere. Le dinamo sono impiegabili in un più esteso campo di potenze, con il vantaggio di una maggior facilità di regolazione; dinamo speciali possono fornire anche tensioni fino a qualche migliaio di volt o correnti fino a parecchie migliaia di ampere. La stabilità di questi generatori può essere molto spinta, ricorrendo a regolatori automatici; le armoniche, presenti sulla tensione e provenienti dal collettore, possono essere eventualmente filtrate.

Il raddrizzamento della tensione di rete a frequenza industriale fornisce un ottimo mezzo per disporre economicamente di potenze, anche rilevanti, in corrente continua.

L'impiego di raddrizzatori a semiconduttore permette costruzioni semplici e compatte; la regolazione può essere fatta, entro certi limiti, sia agendo sulla tensione alternata di alimentazione, sia parzializzando la conduzione (se i raddrizzatori sono comandabili come innesco) a scapito però di un elevato contenuto di armoniche. Particolarmente compatti sono gli alimentatori switching, dove la tensione di rete viene prima raddrizzata e poi convertita ad alta frequenza; per gli alimentatori industriali bisogna comunque considerare il fatto che i carichi che si devono alimentare sono spesso fortemente induttivi per cui devono essere previste protezioni in caso di manovra errata o di interruzione della rete.

Valori opportuni di tensione e corrente a frequenza industriale possono essere ottenuti dalla rete di distribuzione di energia elettrica, mediante l'interposizione di adatti trasformatori. La regolazione avviene mediante autotrasformatori o regolatori ad induzione, con modalità diverse a seconda delle esigenze della prova; a livelli bassi di tensione si possono ancora utilizzare contatti striscianti (spazzole o rulli di carbone) mentre, a partire dalla media tensione, si devono impiegare commutatori sotto carico con camera di interruzione e dispositivi per lo smorzamento delle sovratensioni. I regolatori ad induzione hanno il vantaggio di non avere

## CAPITOLO I - Generalità

contatti striscianti; la tensione in uscita può raggiungere un valore doppio di quella di alimentazione.

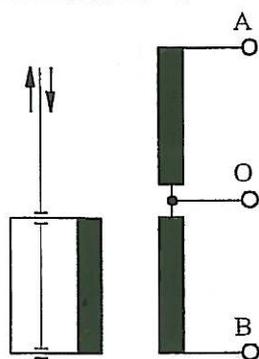


Fig. 1.1141

Per le grosse potenze esistono anche soluzioni che consentono la regolazione senza alcun contatto (regolatore Thoma): la macchina ha la struttura di un autotrasformatore con una bobina secondaria mobile che abbraccia metà dell'avvolgimento ed è in corto circuito.

Quando questa bobina è in corrispondenza della seconda metà dell'avvolgimento, la tensione in uscita  $V_{BO}$  corrisponde alla tensione residua dovuta alla reattanza di dispersione mentre, nella posizione superiore, praticamente tutta la tensione applicata si trasferisce sull'uscita. La regolazione avviene pertanto spostando la bobina mobile tra queste posizioni estreme. La macchina non presenta una reattanza costante e pertanto può essere difficile prevedere l'effetto di una variazione della posizione della bobina mobile.

In generale, le tensioni concatenate sono sufficientemente sinusoidali; non sempre possono considerarsi tali le tensioni stellate. Spesso la causa di deformazioni nell'onda di tensione è legata alla limitata potenza degli organi di regolazione ed all'assorbimento di correnti deformate per la saturazione di parti ferromagnetiche.

In alcuni casi si provvede all'alimentazione dei circuiti di prova mediante gruppi motore-alternatore. La regolazione avviene allora sull'eccitatrice dell'alternatore, con sistemi anche automatici, che possono garantire elevata stabilità: la forma d'onda può risultare particolarmente buona, se la costruzione dell'alternatore è stata curata a questo proposito. Il gruppo motore-alternatore può essere a velocità regolabile (cioè formato da un motore a c.c.) se si vogliono ottenere frequenze industriali diverse da quella della rete di alimentazione. L'alternatore è in genere dimensionato in modo da poter fornire un'elevata potenza reattiva, dato che spesso è questa che limita l'utilizzazione della rete di alimentazione. Nonostante lo sviluppo dell'elettronica di potenza le alimentazioni sono comunque ottenute, quasi sempre, con macchine rotanti che assicurano una forma d'onda prossima alla sinusoidale e comunque non generano disturbi ad alta frequenza che interferiscono pesantemente nei casi in cui debba essere effettuata una diagnostica sull'apparecchiatura in prova.

D'impiego sempre più frequente, anche per apparecchi destinati ad impianti a frequenza industriale, sono metodi di misura che richiedono sorgenti di f.e.m. di bassa tensione a frequenza variabile entro ampi limiti; la loro potenza d'uscita deve essere commisurata al valore del carico ed alle distorsioni ammissibili per la forma d'onda.

Nella gestione della sala prove non sono assolutamente da sottovalutare le disponibilità di potenza connesse alla cabina di alimentazione ed il prelievo di energia che, con la modalità di fatturazione in vigore attualmente, comporta un onere collegato al massimo prelievo nel quarto d'ora: su questa base viene computata una eventuale penale se il prelievo è superiore ai limiti di contratto. Le prove che richiedono potenze elevate per tempi relativamente lunghi vanno quindi programmate tenendo conto anche di questi vincoli che in taluni casi potrebbero rendere conveniente l'acquisizione temporanea di generatori autonomi quali i gruppi elettrogeni.

### 1.15 Grandezze da misurare

Le grandezze elettriche da misurare, nel corso delle prove su macchine od apparecchi elettrici, sono sostanzialmente tensioni, correnti e potenze in sistemi a corrente continua, od alternata sinusoidale, monofasi o trifasi; per queste misure si impiegano correntemente strumenti di laboratorio (di classe 0,5 o 0,2) nelle prove di collaudo e di controllo, di

precisione inferiore nelle misure in esercizio. Le frequenze che interessano sono normalmente 50 Hz, ma anche 60 Hz per apparecchiature destinate all'esportazione ed in taluni casi 162/3 per sistemi destinati alla trazione ferroviaria.

L'attrezzatura necessaria per una "sala prove" consiste generalmente in una serie di strumenti adatti per le portate più usuali, con un'adeguata scorta di derivatori, resistori addizionali, trasformatori di misura, per comprendere i presumibili campi d'impiego. Queste apparecchiature devono essere in numero sufficiente per consentire, ad esempio, misure simultanee su carichi trifasi, con schema Aron o Barbagelata, senza dover interrompere il carico per commutare gli strumenti.

Gli strumenti di maggior precisione devono essere corredati della loro tabella di taratura, in modo che sia possibile eseguirne un controllo periodico, che in qualche caso è esplicitamente richiesto. Devono anche essere noti i consumi strumentali nelle varie condizioni d'impiego, anche se questo aspetto ha perso molta della sua rilevanza, per il diffondersi della strumentazione elettronica che ha, di norma, una impedenza molto alta, per lo meno alle frequenze di interesse industriale.

Le più usuali grandezze meccaniche da misurare durante il collaudo di macchine elettriche sono rappresentate da coppie, velocità angolari e potenze meccaniche trasmesse da alberi in rotazione; esse possono essere rilevate su appositi strumenti indicatori o registratori o, trasformate convenientemente in grandezze elettriche, su strumenti elettrici di vario tipo (vedi 1.3).

Nelle prove termiche, si dovranno misurare soprattutto temperature di corpi, sia solidi che liquidi od aeriformi (vedi 3.2); queste misure sono talvolta integrate da determinazioni di pressioni e di portate per i fluidi refrigeranti.

Fra le altre grandezze, che è spesso necessario misurare durante una prova ricordiamo le condizioni ambientali (temperatura, pressione, umidità ecc.) quando queste hanno influenza sul comportamento dell'oggetto in prova (vedi 1.6).

Negli impianti di produzione di energia le misure sono in genere molto più numerose, poiché comprendono tutti i parametri che concorrono al buon esercizio dei generatori idraulici, termici, elettrici ecc. Si devono perciò misurare pressioni, livelli, portate di fluidi, temperature di organi vari, posizione degli apparati di regolazione (paratie, valvole ecc.), condizioni degli ausiliari ecc.

Spesso le grandezze da misurare sono variabili nel tempo con andamenti periodici o transitori: per determinarne i valori istantanei, esse devono essere registrate, utilizzando, in relazione al campo di frequenze interessato:

- strumenti registratori, per fenomeni lenti, che si svolgono cioè nell'ambito di parecchi minuti fino ad alcune ore;
- registratori veloci, a scrittura diretta, per fenomeni che contengono frequenze fino a qualche decina di periodi al secondo;
- oscillografi elettromagnetici, che consentono la registrazione, in genere fotografica, di fenomeni con frequenze fino a qualche migliaio di periodi al secondo ;
- oscillografi a raggi catodici, per l'osservazione e la registrazione fotografica di fenomeni a frequenze superiori.

Per registrazioni multicanale di lunga durata sono ancora in uso registratori a nastro magnetico.

La registrazione, richiedendo una successiva lettura del tracciato, riduce sempre la precisione della misura; l'errore di lettura dipende sia dalle dimensioni della traccia rispetto alle

## CAPITOLO I - Generalità

elongazioni, sia dalle deformazioni che il supporto può avere per effetto di umidità, sforzi meccanici ecc.; esso è generalmente dell'ordine di qualche percento.

Per la registrazione di un numero finito anche molto grande di punti di misura, si possono utilizzare strumenti numerici: questo sistema si sta imponendo in parallelo con lo sviluppo dei personal computer e consente sia di ottenere elevata precisione e facilità di lettura, sia di poter direttamente utilizzare i risultati per successive elaborazioni (per esempio calcolo dei valori medi, analisi statistiche ecc.). I registratori di ultima generazione sono in genere ibridi, ossia hanno la visualizzazione e stampa su carta ma la misura e memorizzazione sono digitali e le informazioni possono essere prelevate direttamente dalla memoria.

Gli elementi caratteristici di tali sistemi numerici sono:

1. la risoluzione  $R$  (normalmente data come numero di bit);
2. la velocità di campionamento (o il suo inverso, ossia l'intervallo di tempo tra due campioni successivi);
3. la profondità di memoria, ossia il numero massimo di campioni che possono essere immagazzinati e che, a sua volta, determina la durata della registrazione, per una fissata velocità di campionamento.

Con velocità di campionamento basse (fino a qualche MS/s) sono possibili risoluzioni di 12 o 14 bit (l'ampiezza dell'intervallo di quantizzazione è  $1/2^R$ ); per frequenze maggiori si scende a 10 o a 8 bit.

In relazione alle velocità di campionamento va anche il costo dei banchi di memoria necessaria; memorie molto veloci (logiche ECL) sono in genere costose mentre per tempi di accesso di centinaia di ns sono sufficienti memorie di PC per cui il costo è decisamente ridotto. In generale l'ingombro necessario viene valutato in Byte (8 bit) per cui una macchina da 10 bit occupa per ogni campione comunque 2 Byte.

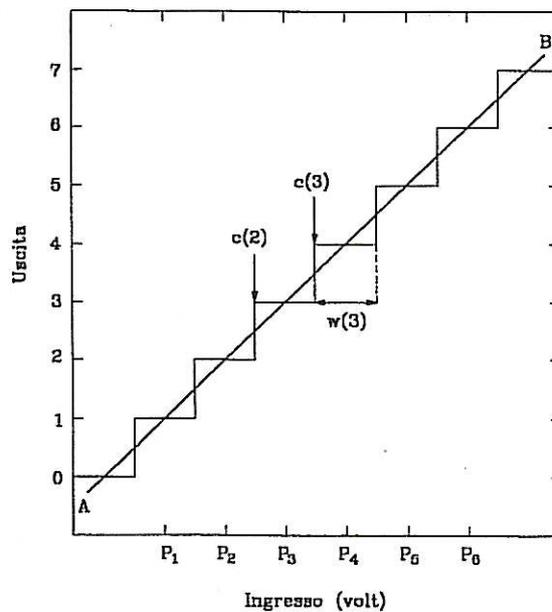


Figura 1.151 - Caratteristica di quantizzazione di un convertitore numerico ideale a 3 bit che mostra le soglie di transizione  $c(2)$  e  $c(3)$ , il passo di campionamento corrispondente all'uscita  $w(3) = w_0$ , il valore di tensione associato a ciascun codice  $p(k)$  e la retta AB che congiunge i punti medi dei passi di campionamento.

I convertitori più veloci sono in generale del tipo "flash" e la conversione viene fatta contemporaneamente per tutti i livelli; quando il tempo di conversione superi le possibilità del convertitore è possibile usarne due o più in parallelo, facendo in modo che i comandi siano opportunamente sfasati nel tempo.

Non bisogna comunque confondere la precisione con la risoluzione: quest'ultima è il limite cui la prima può tendere, quando vengano eliminate tutte le altre sorgenti di incertezza; infatti, oltre al convertitore A/D vero e proprio esiste il contributo dei vari attenuatori o amplificatori, la deriva dello zero, le varie forme di non-linearità integrale o differenziale (fig. 1.151, 1.152 e 1.153), la stabilità a breve e lungo termine, la stessa risposta in frequenza.

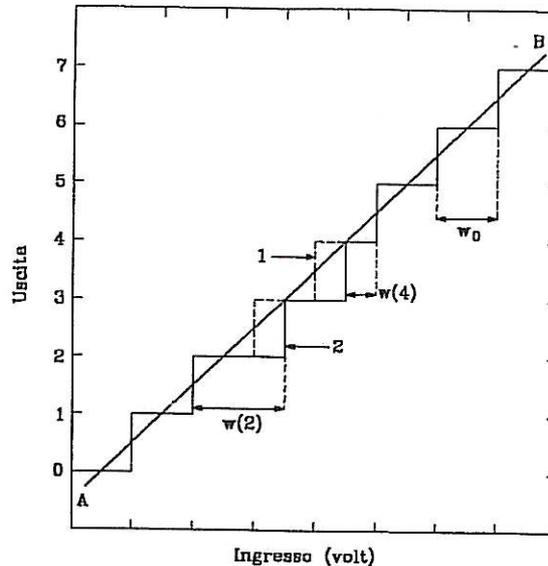


Figura 1.152 - Non-linearità differenziale statica  $d(k)$

Curva 1: caratteristica di quantizzazione di un convertitore numerico ideale a 3 bit.

Curva 2: caratteristica di quantizzazione di un convertitore numerico a 3 bit i cui livelli 2, 3 e 4 presentano  $d(k)$  elevate

In genere pertanto l'incertezza può essere pari a 3 ÷ 4 volte la risoluzione. Per molte applicazioni è importante anche il livello del rumore del convertitore che comunque, se è elevato, può vanificare i vantaggi di una risoluzione elevata. Tecniche di questo tipo sono attualmente utilizzate e si stanno sempre più diffondendo anche per apparecchiature tradizionali (ad esempio multimetri e wattmetri), taluni dei quali sono disponibili anche con caratteristiche di precisione molto spinte.

Questi strumenti sono di solito programmabili, ossia le loro funzioni ed i campi di misura possono essere impostati direttamente da calcolatore. Per questo è necessaria una interfaccia che sia presente in entrambi e che, gestita da un apposito programma, consenta lo scambio di informazioni tra le due macchine.

Lo scambio può talvolta avvenire nei due sensi (da calcolatore verso macchina e viceversa) o in un verso solo (da calcolatore verso macchina). Il tipo di interfaccia può essere diverso ma le caratteristiche fondamentali fanno riferimento alla trasmissione di tipo seriale o parallelo.

Le porte seriali (denominate comunemente RS232) normalmente disponibili di serie sui PC, sono abbastanza lente e mal si prestano quando debbano essere inviate serie di dati consistenti.

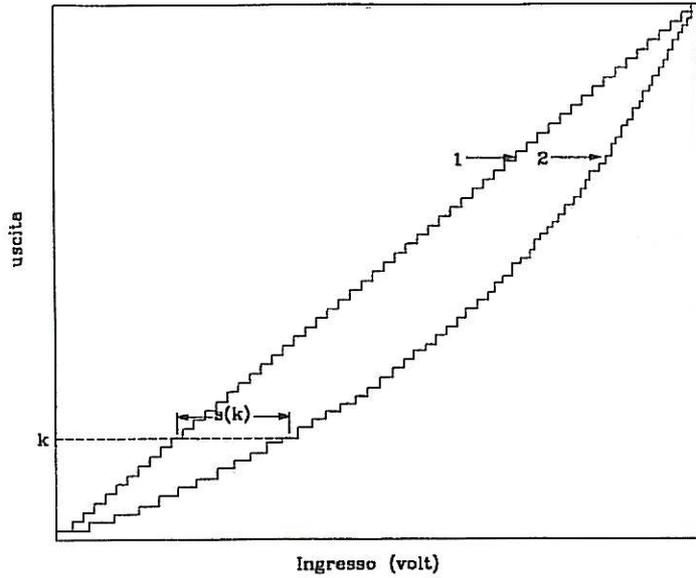


Figura 1.153 - Non-linearità integrale  $s(k)$   
 Curva 1: caratteristica di trasferimento di un convertitore numerico ideale a 6 bit.  
 Curva 2: caratteristica di trasferimento di un convertitore numerico a 6 bit non lineare.

Tra le interfacce parallele quella che ha guadagnato maggior diffusione, al punto da diventare uno standard, è la IEEE 488 (HP GPIB - General Purpose Interface Bus) che è presente nella maggior parte delle apparecchiature di misura di tipo numerico.

Richiede una analogica scheda da installarsi nel computer ed un programma, che normalmente può essere compilato in uno specifico linguaggio di programmazione, che è in grado di assicurare la configurazione del sistema e la decodifica dei messaggi che si possono scambiare. Di solito si possono gestire sino a 15 apparecchi (il numero può essere anche aumentato con soluzioni particolari); ad ognuno è assegnato un indirizzo costituito da 5 bit. La connessione tra le varie unità avviene per mezzo di un cavo la cui struttura

(compresa quella del connettore) è normalizzata (fig. 1.154).

Un esempio di possibile configurazione è riportato nella fig. 1.155 dove, sotto il controllo del computer, si può effettuare la taratura automatica di uno strumento pilotando un alimentatore a frequenza variabile, misurando la tensione applicata ed eventualmente stampando i risultati.

Il programma può inviare messaggi alle varie periferiche e prelevare i dati da queste. Il programmatore opera ad un livello abbastanza elevato e la traduzione in comandi di basso livello avviene a mezzo del software; esistono anche ambienti di sviluppo dedicati, con notevoli facilitazioni per la programmazione che può avvenire anche con modalità esclusivamente grafiche (ad esempio LABVIEW®).

Le macchine predisposte o dotate di questo tipo di interfaccia hanno al loro interno tutto un sistema di commutazione che non può essere più affidato a contatti azionati manualmente: anche quando esiste la possibilità di un intervento diretto, tutti gli interruttori sono azionati da un sistema di relè o di encoder il

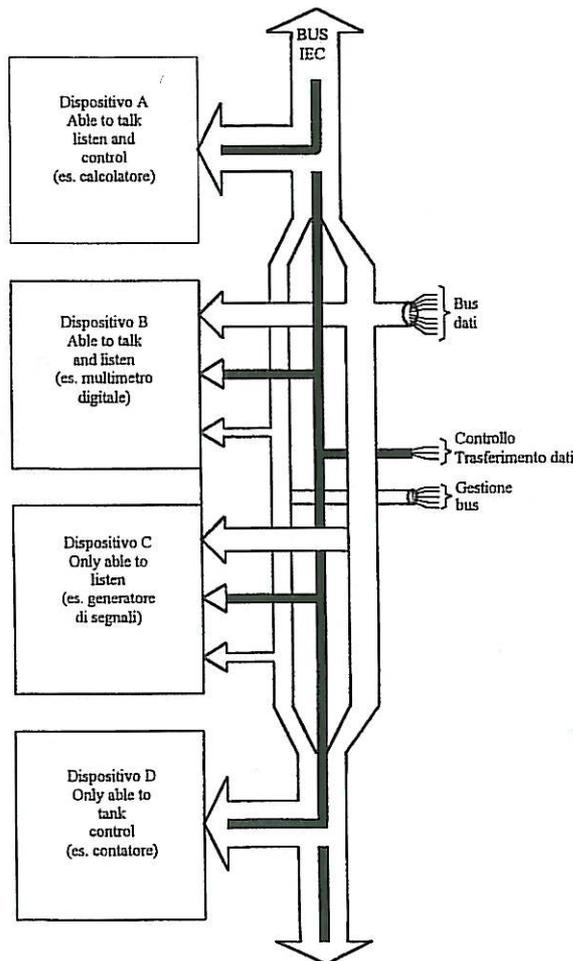


Fig. 1.154

cui stato può essere riconosciuto ed azionato anche dal microprocessore che sovrintende alla comunicazione.

Per quanto i vari costruttori abbiano parzialmente uniformato i linguaggi, è da notare che l'interfaccia assicura solo una costanza della parte fisica del collegamento per cui non è sempre immediato stabilire il colloquio perché il tipo di linguaggio varia sempre con i diversi strumenti e, per uno specifico strumento, varia con il costruttore; attualmente si trovano sempre più spesso i set di comando completi disponibili in librerie che possono essere richiamate integralmente nei programmi di sviluppo.

Particolare cura deve essere posta nella scelta di questa interfaccia quando la mole di dati da scambiare sia notevole (registrazioni di transitori di lunga durata) e quando si voglia procedere ad una analisi sostanzialmente in linea. Devono allora essere ottimizzate le risorse del microprocessore che da un lato sovrintende al processo di acquisizione e dall'altro deve al tempo stesso effettuare i calcoli legati alla valutazione della grandezza di interesse.

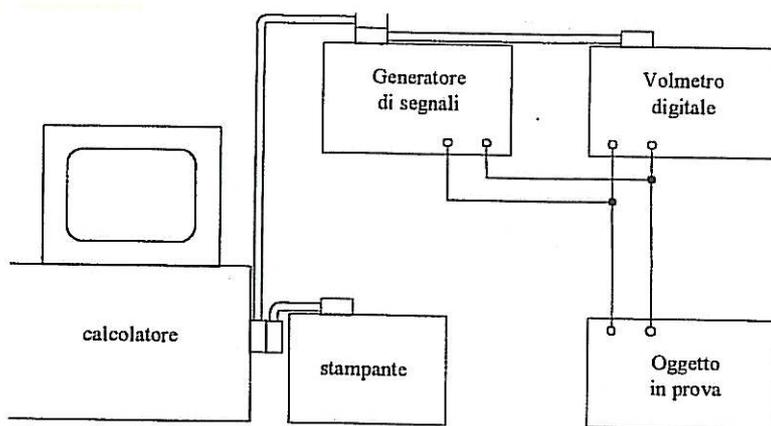


Fig. 1.155

I grossi vantaggi si hanno per prove ripetitive (prove di routine o di collaudo su macchine, condotte con procedure ben definite) o per prove di lunga durata, in cui sia richiesto un rilevamento periodico di tutta una serie di dati (ad esempio i valori di temperatura in un numero anche rilevante di punti).

In modo analogo possono essere effettuate anche procedure di calibrazione complesse controllando il calibratore da un lato e lo strumento in prova dall'altro senza intervento diretto da parte dell'operatore. Naturalmente vanno previsti accorgimenti e controlli tali da assicurare la corretta e sicura esecuzione delle procedure; in particolare, con riferimento al caso citato si dovrà aver cura di impostare prima la portata dello strumento e poi la tensione in uscita dal calibratore per evitare danneggiamenti e comunque di assicurarsi che in caso di guasti o di interruzione della procedura il generatore di tensione sia messo in condizioni di sicurezza.

Sono disponibili schede di acquisizione che possono essere montate direttamente all'interno del PC di cui condividono il bus: il nucleo del sistema è allora costituito da uno o più convertitori analogico-digitali che, sotto la supervisione di un microprocessore, scambiano i dati acquisiti con l'unità centrale.

Questa parte residente viene di solito integrata con un numero variabile di componenti esterni che possono inglobare i vari sistemi di condizionamento del segnale ed un eventuale disaccoppiamento galvanico per evitare che sovratensioni provenienti dal campo possano interessare l'unità di acquisizione. A seconda dei casi l'unità esterna può accettare ingressi analogici o digitali e sotto la supervisione di un adeguato software può anche interagire con il

## CAPITOLO I - Generalità

processo mediante uscite sia analogiche che digitali che possono pilotare regolatori o interruttori.

Nel caso di grandezze variabili lentamente (ad esempio temperature) si possono associare ad un unico convertitore molti sensori che vengono commutati alternativamente secondo una sequenza prefissata (multiplexer - vedi fig. 1.156). Il software si presta agevolmente anche a correggere eventuali non-linearità e a tener conto di caratteristiche diverse dei sensori, utilizzando diverse costanti di taratura.

Nel caso di sistemi più complessi è possibile far ricorso a strumentazione particolare concepita specificatamente per lavorare in integrazione con un calcolatore; si tratta in questo caso di strumenti modulari che richiedono uno specifico contenitore con alimentatore; gli strumenti nascono in forma di scheda e vengono inseriti direttamente in questo contenitore che fornisce l'alimentazione ed il bus su cui avviene lo scambio dei dati.

Vi sono standard diversi, anche a seconda degli ambienti (CAMAC, VXI); in generale sono maggiormente impiegati per sistemi dedicati, tanto più che i singoli strumenti non sono impiegabili singolarmente, al di fuori di detto contenitore.

Sistemi ancora più complessi possono richiedere soluzioni specifiche che tipicamente includono un calcolatore di processo (tipicamente replicato in schema ridondante per assicurare la funzionalità in caso di guasto della prima unità), una o più elementi di intelligenza distribuita con funzioni di gestione ed acquisizione di tutta una serie di dati locali con una molteplicità di ingressi analogici e digitali (stati). L'unità centrale interroga ciclicamente le periferiche salvo che in caso di anomalie queste ultime hanno la possibilità di interrompere la sequenza chiedendo con priorità di inviare un messaggio.

Particolare attenzione va posta ai problemi di compatibilità elettromagnetica che potrebbero danneggiare il sistema o fornire false indicazioni; importante è anche la gestione delle sequenze di intervento nel caso di guasti reali sull'impianto o nello stesso sistema di acquisizione.

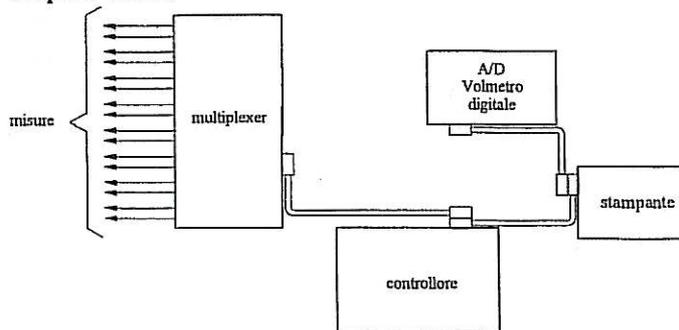


Fig.1.156

Negli impianti critici e di fondamentale importanza il concetto di "fail safe" ossia gli interventi devono essere congegnati in modo tale che l'impianto venga messo comunque in condizioni di sicurezza; da non sottovalutare anche il sistema di temporizzazione che, per i normali calcolatori, non è estremamente preciso e che quindi potrebbe rendere impossibile il riconoscimento dell'evento all'origine di un guasto.

Per ottenere incertezze inferiori al ms tutti i riferimenti temporali interni devono essere periodicamente sincronizzati con un impulso inviato dall'unità centrale. Le misure che provengono dal campo sono in genere tutte disaccoppiate galvanicamente con sistemi elettroottici o a trasformatore; spesso i collegamenti tra le varie isole sono effettuati ad anello in fibra ottica. Questi sistemi, pur essendo basati su processori usuali, sono in genere molto più flessibili e potenziati e vengono sviluppati sullo specifico impianto.

La vasta diffusione di strumentazione numerica rende ora molto semplici operazioni che in passato potevano richiedere strumentazione dedicata o che di fatto erano fattibili solo in linea di principio. Disponendo dei valori campionati è molto agevole, ad esempio, il passaggio dal dominio del tempo a quello della frequenza (serie o trasformata di Fourier); è pertanto possibile l'analisi armonica di segnali periodici per l'individuazione delle componenti o la stessa elaborazione dei segnali nel dominio del tempo per la valutazione di grandezze derivate

(integrali, derivate, medie, filtraggi etc.) o più frequentemente, il valore efficace della grandezza o la stessa potenza ottenuta mediando su un periodo i valori dei prodotti istantanei della tensione e della corrente.

Ovviamente queste elaborazioni, essendo ottenute con specifici algoritmi o programmi sono indipendenti dal sistema di registrazione stesso e possono essere modificate e/o integrate se le necessità cambiano, senza per questo richiedere altra strumentazione dedicata. Vantaggi non secondari, soprattutto quando le prove siano ripetitive e chiaramente definite, possono derivare anche dal fatto che, se la procedura è gestita completamente da calcolatore, alla fine è molto agevole predisporre il rapporto di prova in forma definitiva ed eventualmente immagazzinare i risultati in una banca dati direttamente accessibile, in rete locale, sia ai progettisti per un confronto con i dati di progetto dati che ai responsabili della sala prove, nel caso si ripresentasse una macchina con caratteristiche analoghe.

### 1.16 Norme e convenzioni

Gli schemi equivalenti o le condizioni di prova di un determinato apparecchio derivano ovviamente dallo studio teorico e sperimentale del suo funzionamento. E' però possibile, in molti casi, assumendo ipotesi o modalità d'esecuzione diverse, pervenire a risultati tra loro non comparabili. Dati i notevoli interessi economici e le responsabilità giuridiche che possono essere conseguenti all'esecuzione di un collaudo, è evidente che deve sussistere un accordo preventivo tra il costruttore (od, in generale, il venditore) e l'utilizzatore (o acquirente) dell'apparecchio, sia per definire le garanzie che l'acquirente ha il diritto di esigere e controllare, sia le modalità con cui tale controllo deve avvenire. Per esempio, i valori della potenza perduta per effetto Joule in un conduttore, percorso da una data corrente, sono diversi a seconda della temperatura a cui si trova il conduttore; la tenuta di un isolamento ad un dato valore di tensione, dipende dal tempo durante cui essa è applicata ecc.

Anche nello specificare le prove richieste per macchine elettriche si deve tener presente che si tratta di apparati con notevoli problematiche anche di tipo meccanico e/o ambientale e quindi non si deve assolutamente trascurare questi aspetti per una visione dei problemi orientata esclusivamente all'ambito elettrico. Basta solo citare l'impatto sulla durata della verniciatura o della zincatura e gli effetti termici e meccanici legati ad un corto circuito per rendersi conto che questi problemi non sono assolutamente trascurabili.

Nella maggior parte dei casi, gli accordi tra costruttore ed utilizzatore avvengono sulla base delle Norme emanate, per incarico del Consiglio Nazionale delle Ricerche, dal Comitato Elettrotecnico Italiano (CEI).

La legge 1 marzo 1968 n. 186 impone che tutti i materiali, le apparecchiature, i macchinari, le installazioni e gli impianti elettrici ed elettronici siano realizzati e costruiti "a regola d'arte" e riconosce tale qualifica a quelli eseguiti secondo le Norme del CEI.

Queste Norme sono il risultato del lavoro comune di tecnici qualificati, rappresentanti i diversi interessi e competenze (cioè costruttori, esercenti, laboratori, enti pubblici ecc.); stampate in fascicoli separati per ogni tipo di oggetto, esse contengono le definizioni più importanti per la sua ordinazione, determinano le modalità con cui devono essere eseguite le prove di collaudo, i requisiti di carattere generale, le tolleranze sui valori garantiti ecc..

Si avrà spesso occasione di far riferimento a queste norme, la cui considerazione è necessaria per rendere una prova riproducibile, cioè per far sì che lo stesso oggetto sia giudicato in modo analogo, in laboratori diversi. Esse però, proprio in quanto contengono delle convenzioni, possono essere modificate, senza alterare il principio della prova stessa.

Inoltre, l'evoluzione stessa della tecnica porta a periodiche revisioni e modifiche delle norme nazionali, specie quando un simile lavoro, svolto in sede internazionale dalla

## CAPITOLO I - Generalità

International Electrotechnical Commission (IEC) porta ad un accordo tra i tecnici di diversi paesi, per l'emanazione di norme comuni, internazionalmente valide, sui diversi argomenti.

Nel processo di realizzazione della Comunità Europea ed in relazione alla libera circolazione delle merci questo aspetto di normazione è andato assumendo una importanza particolare; è stato istituito il CENELEC che opera a livello comunitario e che provvede a recepire, o se del caso a promuovere autonomamente, una attività di normazione in ambito elettrotecnico o elettronico.

Di solito vengono recepite le Norme IEC ma esiste un'attività autonoma in settori specifici, come quelli legati alla compatibilità elettromagnetica. Quando una Norma venga recepita dal CENELEC essa diventa vincolante per tutti i paesi membri della comunità che devono recepirla senza possibilità di modifiche. Le Norme che hanno questo stato sono classificate come Norme Europee (ad esempio la Norma IEC 529 relativa al grado di protezione degli involucri (IP) classificata come CEI 70-1 diventa EN60529).

La validità di una specifica Norma in ambito extraeuropeo è in qualche modo legata alla forza industriale dei paesi che la utilizzano: nel settore specifico (elettrico ed elettronico) le Norme IEC trovano ampia applicazione mentre in altri settori (ad esempio quello petrolifero) sono generalmente diffuse Norme di provenienza statunitense.

### 1.161 Tarature

Si va diffondendo la necessità di produrre secondo standard qualitativi prefissati che richiedono una codifica molto precisa dello stesso modo di produzione. In quest'ottica le varie fasi non sono più lasciate ad iniziative volontaristiche o di buona volontà personale ma vengono codificate in un manuale che diviene vincolante per tutti gli addetti coinvolti. Questi vengono quindi responsabilizzati sulle operazioni e/o controlli che devono svolgere e di cui sono poi ritenuti responsabili. La struttura addetta al controllo qualità viene di norma svincolata dalla produzione e risponde solo alla direzione generale.

In quest'ambito la parte misure assume un ruolo significativo non solo per verificare specifici prodotti ma anche per dimostrare che le caratteristiche del prodotto non stanno subendo variazioni significative.

Le procedure da seguire sono tipicamente ricondotte alle Norme ISO 9000: uno dei requisiti inderogabili per la strumentazione e la prova di aver effettuato tarature periodiche che garantiscano la riferibilità ossia il confronto, attraverso una catena metrologica ininterrotta ai campioni primari detenuti dall'IEC - Istituto Elettrotecnico Nazionale G. Ferraris di Torino (o da altri Istituti primari per la metrologia meccanica). In questo modo, quando si disponga anche della valutazione dell'incertezza, è possibile stabilire se misure effettuate sulla stessa grandezza in tempi o luoghi diversi, con strumentazioni diverse, siano compatibili, ossia possano essere assunte come rappresentazione della stessa grandezza.

Nel caso in cui questo non si verifichi la grandezza può essere cambiata o possono essere cambiate le grandezze di influenza.

In generale si ritiene che strumentazione elettronica e/o elettromeccanica con parti in movimento o soggette a deriva debba essere tarata ad intervalli non superiori all'anno; tempi più lunghi sono accettabili per trasformatori di corrente o di tensione per i quali non sono prevedibili variazioni significative nel tempo dal momento che il rapporto è sostanzialmente legato al numero di spire: in questo caso la taratura può essere effettuata ad intervalli non superiori a 5 anni. Le tarature possono costituire un costo non trascurabile; in taluni casi la situazione può essere ulteriormente aggravata dalla necessità di avere due sistemi di misura se si vuole continuare il ciclo delle prove anche durante l'assenza di un sistema.

## CAPITOLO I - Generalità

La necessità di tarature periodiche ha inoltre influito in modo pesante sul tipo di strumentazione utilizzata determinando un passaggio radicale a strumenti di misura elettronici: rispetto a quelli tradizionali questi consentono infatti la possibilità di acquisizione automatica senza intervento continuo dell'operatore e l'impiego di calibratori programmabili elettronici. Questi però hanno scarse capacità di carico e, a meno di non usare un ulteriore amplificatore di potenza tarato, sono in grado di erogare solo su strumentazione ad alta impedenza e non su strumenti di tipo elettrodinamico. Un ulteriore vantaggio della strumentazione recente è dato inoltre dal fatto di incorporare un microprocessore che gestisce le varie funzioni, compresa la stessa visualizzazione del risultato della misura: la taratura può pertanto tradursi nella riscrittura delle costanti di taratura presenti in una memoria non volatile, senza alcun intervento di regolazione sulla parte circuitale.

Per quanto riguarda la misura di potenza nei sistemi industriali trifase sono ormai comuni apparecchi che incorporano tre canali isolati galvanicamente tra loro, ciascuno con un ingresso di tensione ed uno di corrente. Ciascun canale può elaborare il valore efficace della tensione e della corrente e la potenza associata al loro prodotto. Le connessioni dei canali possono essere qualsiasi (Aron, 3 wattmetri o altro). I sistemi sono sia del tipo analogico con visualizzazione numerica ( wattmetri a divisione di tempo) o a campionamento. In quest'ultimo caso vi sono due convertitori A/D con un processore matematico dedicato (DSP) che valuta i valori efficaci di ciascuna grandezza e la potenza ad esse associata per via di calcolo. Per strumentazione industriale le tensioni massime di impiego possono arrivare intorno al kV con capacità di gestire direttamente correnti sino a 50 A; l'ingresso è realizzato con trasformatori (ad annullamento di flusso). Si trovano attualmente versioni che possono accettare anche correnti a valor medio diverso da zero: in questo caso l'ingresso è costituito da uno shunt che può essere realizzato anche con bande passanti molto elevate o da una sonda a effetto Hall.

L'impedenza di ingresso del canale di tensione può essere molto elevata (fino a 10 M $\Omega$  in parallelo a 15 pF) così da rendere assolutamente trascurabili i consumi. La banda passante del sistema può essere anche molto elevata così da consentire non solo la misura in condizioni di alimentazione sinusoidale ma anche quella in condizioni fortemente deformate (inverter a PWM).

L'incertezza, per questa strumentazione, deve essere valutata con cura e normalmente viene espressa come una frazione fissa del fondo scala cui va aggiunta una percentuale della lettura. Per wattmetri di buona qualità l'espressione può essere del tipo

$$\varepsilon = \pm (0,1 \% \text{ f.s.} + 0,1 \% \text{ lettura})$$

Non va comunque trascurato il possibile effetto del basso fattore di potenza del carico che, quando scenda sotto 0,1 può contribuire con un ulteriore termine significativo.

### 1. 17 Valori nominali

Ogni apparecchio è caratterizzato dai valori di alcune sue grandezze (tensione, corrente, frequenza ecc.) che sono detti valori nominali e che servono per designarlo (per esempio un interruttore da 30 kV, 300 A; un trasformatore da 3.000 kVA ecc.). La definizione rigorosa del significato di tali valori è riportata dalle singole norme; essi sono generalmente i valori a cui si deve fare riferimento durante le prove, per le varie garanzie, e non sempre coincidono con i valori di esercizio. E' importante notare che le implicazioni pratiche possono essere rilevanti: ad esempio, per un trasformatore di potenza la tensione nominale si riferisce normalmente al funzionamento a vuoto mentre per quelli di piccola potenza si conviene di

## CAPITOLO I - Generalità

darla a carico; per i motori la potenza nominale è quella meccanica resa all'albero e non quella elettrica assorbita.

Non sempre le diverse grandezze nominali sono fra loro indipendenti; ad esempio, in un sistema trifase con potenza nominale  $P_n$  e tensione (concatenata)  $V_n$ , sono determinate anche:

$$\text{- la corrente nominale } I_n = \frac{P_n}{\sqrt{3}V_n}$$

- l'impedenza nominale (per fase della stella equivalente)

$$Z_n = \frac{V_n}{\sqrt{3}I_n} = \frac{V_n^2}{P_n}$$

relazioni analoghe si hanno per sistemi monofase.

### 1.18 Valori relativi

Molto spesso è comodo esprimere i valori delle diverse grandezze (tensioni, potenze, impedenze, ecc.) nelle varie condizioni di funzionamento o di prova, con il loro rapporto rispetto al corrispondente valore nominale.

Il risultato è un valore adimensionale (valore relativo); se esso è molto piccolo, si esprime spesso in percentuale.

I valori relativi o percentuali sono molto pratici, per confrontare situazioni simili in sistemi con valori nominali diversi (p. es. la tensione di corto circuito di un trasformatore da distribuzione è intorno al 4%, indipendentemente dalla sua potenza e tensione nominali). Si può inoltre facilmente vedere che, mentre per definire il valore assoluto, ad esempio, di una tensione in un sistema trifase, occorre precisare se essa è concatenata o di fase, i corrispondenti valori relativi sono identici, se il sistema è simmetrico, se riferiti alla grandezza nominale omologa.

Le Norme relative ai diversi tipi di macchine spesso invitano esplicitamente a presentare i risultati ottenuti in questo modo; questi risultati possono essere anche utilizzati, con qualche avvertenza, nel calcolo dei circuiti che può risultare notevolmente semplificato.

## 1.2 Misure di grandezze elettriche

### 1.21 Misure di resistenza

Una delle misure più comuni, nelle prove su macchine od apparecchi destinati ad impianti elettrici, è quella della resistenza di buoni conduttori (avvolgimenti, linee elettriche ecc.) con ordini di grandezza molto vari, ma più spesso inferiori a qualche ohm.

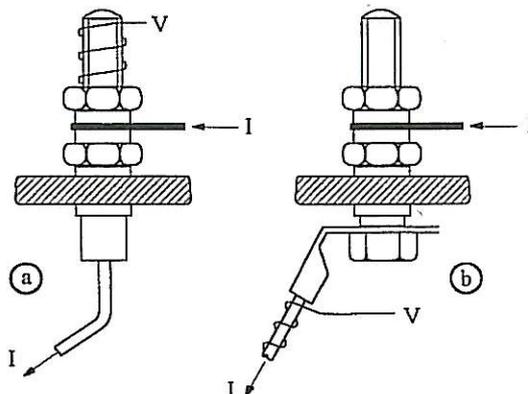


Fig. 1. 2 11

Queste misure vengono generalmente eseguite con metodo voltamperometrico, limitando l'impiego di metodi di zero (doppio ponte) ai casi in cui sia richiesta un'elevata precisione ovvero qualora si debbano misurare resistenze tanto piccole (inferiori al milliohm) da non rendere pratico l'uso degli strumenti, comunemente adattati per cadute di tensione non inferiori alle decine di millivolt.

La misura dovrà in ogni caso evitare, mediante la opportuna inserzione degli strumenti, le resistenza di contatto in serie alla resistenza da misurare; le connessioni voltmetriche vengono perciò eseguite, spesso utilizzando appositi puntali, in zone che non siano influenzate dai contatti amperometrici (fig. 1. 2 11 ).

Le resistenze di contatto rappresentano anche degli elementi anomali, cioè con comportamento non lineare in funzione della corrente; nel caso di fig. 1.211 b) è perciò, in generale, opportuno porre la connessione voltmetrica a valle del contatto a pressione formato dal bullone, anche se questa resistenza di contatto fa parte del circuito interno dell'apparecchio in prova. Non così in fig. 1.211 a) dove la connessione interna è saldata.

Nelle misure di resistenza su circuiti fortemente induttivi, come nel caso di avvolgimenti, il collegamento voltmetrico viene eseguito con puntali anche allo scopo di inserire e disinserire lo strumento quando il circuito è a regime, evitando le sovratensioni transitorie. Per l'alimentazione del circuito di misura conviene far ricorso a schemi a corrente costante (in pratica adoperando valori elevati della f.e.m. E con una resistenza in serie R corrispondentemente elevata) (fig. 1.212); occorre però che anche il voltmetro abbia una resistenza interna che non sia troppo piccola rispetto ad R.

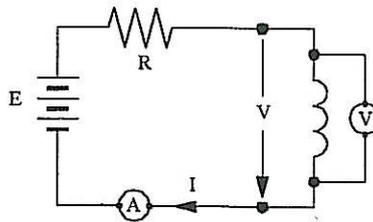


Fig. 1.212

Nel caso di trasformatori di potenza, capita abbastanza frequentemente che il valore di corrente continua utilizzato per la misura sia sufficiente a provocare la saturazione del nucleo. In questo caso l'induttanza cala bruscamente e si riduce la costante di tempo dell'avvolgimento.

1.22 Misure di resistenza in circuiti trifasi (IMPORTANTE)

Nei circuiti trifasi simmetrici, in cui non sia accessibile il centro stella, si misura il valore della resistenza  $R_m$  fra due terminali di linea; qualunque sia lo schema di connessione del circuito interno, ci si può sempre riportare al valore della resistenza per fase della stella o del triangolo equivalente, mediante le relazioni (fig. 1.221):

$$R_Y = \frac{1}{2} R_m ;$$

$$R_{\Delta} = \frac{3}{2} R_m .$$

controllare: a me risulta  $\frac{2}{3} R$

$R_m$  = Resistenza misurata tra due linee

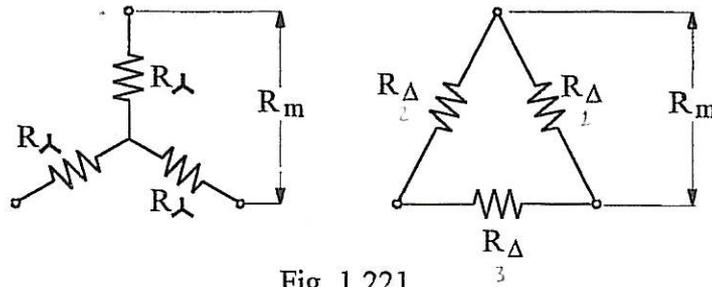


Fig. 1.221

$$R_m = R_{20} // (R_{2\Delta} + R_{3\Delta})$$

$$= \frac{R_{2\Delta} \cdot (R_{2\Delta} + R_{3\Delta})}{R_{2\Delta} + R_{2\Delta} + R_{3\Delta}}$$

$$= \frac{R_{2\Delta} R_{2\Delta} + R_{2\Delta} R_{3\Delta}}{R_{2\Delta} + R_{2\Delta} + R_{3\Delta}}$$

Se  $R_{2\Delta} = R_{1\Delta} = R_{3\Delta} = R_{\Delta}$  Allora

$$\frac{R^2 + R^2}{3R} = \frac{2R^2}{3R}$$

$$= \frac{2R}{3}$$

(NOTA: TOGETTA !!!)

E' facile verificare come, data una terna simmetrica di correnti di linea, di valore I, queste relazioni conducano allo stesso valore della potenza dissipata:

$$P = 3R_Y I^2 = 3R_{\Delta} \left( \frac{I}{\sqrt{3}} \right)^2 = \frac{3}{2} R_m I^2$$

Qualora le resistenze, misurate alle tre coppie di morsetti, risultassero fra loro poco diversa, conviene assumere per  $R_m$  la media delle tre misure. È in ogni caso sempre possibile calcolare, dai tre valori misurati, le resistenze dei tre rami della stella o del triangolo dissimmetrico equivalente.

**1.23 Riporto ad una temperatura di riferimento**

La resistenza di un conduttore varia con la sua temperatura; il valore contrattuale della resistenza o delle perdite deve perciò essere definito ad una prefissata temperatura di riferimento  $t_f$  (p. es. temperatura ambiente normale di 20 °C; temperatura convenzionale di 75 °C per gli avvolgimenti ecc.).

Il valore  $R_m$ , misurato alla temperatura  $t_m$ , viene riportato alla temperatura  $t_f$  mediante la relazione:

$$R_f = R_m \frac{\frac{1}{\alpha} + t_f}{\frac{1}{\alpha} + t_m} = R_m \left( 1 + \frac{\frac{1}{\alpha} + t_f}{\frac{1}{\alpha} + t_m} \right)$$

dove  $1/\alpha$  (inverso del coefficiente di temperatura) viene assunto convenzionalmente pari a 235 per il rame, 225 per l'alluminio.

La temperatura  $t_m$ , alla quale si esegue la misura, deve essere determinata direttamente; essa può assumersi pari alla temperatura dell'ambiente in cui si trova la resistenza, se questa è in equilibrio termico quando non è percorsa da corrente (ossia se è rimasta per un tempo sufficientemente lungo a riposo in un ambiente a temperatura costante); ciò si può controllare verificando che il valore della resistenza non si modifica nel tempo. Per assicurarsi che il valore della corrente impiegato nella misura non provochi apprezzabili riscaldamenti nella resistenza da misurare, occorre calcolare il salto termico necessario allo smaltimento del calore prodotto; spesso esso può semplicemente desumersi dal valore della corrente nominale di servizio (tipicamente si scelgono valori inferiori al 10% della corrente nominale).

**1.24 Misure di potenza**

## CAPITOLO I - Generalità

Le misure di potenza, in sede di collaudo, non riguardano tanto i valori delle potenze entranti od uscenti da una determinata macchina o linea - valori che maggiormente interessano in sede di esercizio- quanto quelli delle potenze perse nelle varie trasformazioni e trasporti di energia.

La determinazione diretta del rendimento di una macchina:

$$\eta = \frac{P_u}{P_a}$$

attraverso la misura della potenza assorbita  $P_a$  e di quella erogata  $P_u$ , è conveniente solo nel caso di rendimenti relativamente bassi (dell'ordine dello 80% o inferiori) quali si ritrovano oggi solo nelle piccole o piccolissime macchine elettriche. Negli altri casi, le incertezze delle due misure - sommandosi nel rapporto- possono dare risultati troppo incerti sul valore del rendimento. In generale, viene data una tolleranza sulla differenza del valore del rendimento rispetto a 1 (o rispetto a 100, se espresso in valore percentuale) piuttosto che sul valore assoluto. Ciò equivale a dare una tolleranza sul valore relativo delle potenze perse  $P_p$ ; è infatti:

$$1 - \eta = \frac{P_a - P_u}{P_a} = \frac{P_p}{P_a}$$

Appaiono perciò convenienti tutti i metodi indiretti, attraverso i quali si determinano separatamente tutte le potenze perse per prefissate condizioni di funzionamento. Questa determinazione è spesso semplificata mediante la separazione delle perdite in più termini, determinabili con misure semplici e separate (per esempio: perdite per effetto Joule, perdite meccaniche, perdite a vuoto ecc.). Non sempre è però valido il principio della sovrapposibilità delle perdite (vedi 1.25 e 1.26).

In alcuni casi è possibile far funzionare due macchine uguali, in modo che si scambino una determinata potenza, fornendo loro complessivamente solo le perdite delle due macchine (vedi 3.33). In questo caso alcune Norme ammettono che si determinino le perdite di ogni macchina, come metà della totale potenza fornita.

### 1.25 Perdite a vuoto ed in cortocircuito nelle reti in c.c.

Si consideri una rete lineare in c.c. (fig. 1.251 a), della quale è messo in evidenza il ramo  $k$ , che contiene la f.e.m.  $E_k$  ed è percorso dalla corrente  $I_k$ ; per il principio di sovrapposizione degli effetti, tale corrente può pensarsi come la somma della corrente  $I_{k0}$ , che esiste nel ramo  $k$  quando è presente la f.e.m.  $E_k$  ma la corrente ai morsetti A,B è nulla (fig. 1.251 b), e di quella  $I_{ki}$  dovuta ad un generatore che produce la corrente  $I$  fra i morsetti A,B, in assenza della f.e.m.  $E_k$  (fig. 1.251 c)).

Applicando il principio di reciprocità fra le condizioni di fig. 1.25 1 a) e c), si ha :

$$(1.251) \quad E_k I_{ki} = E_0 I = (R + R_i) I^2$$

essendo  $R$  la resistenza interna della rete vista dai morsetti A,B.

CAPITOLO I - Generalità

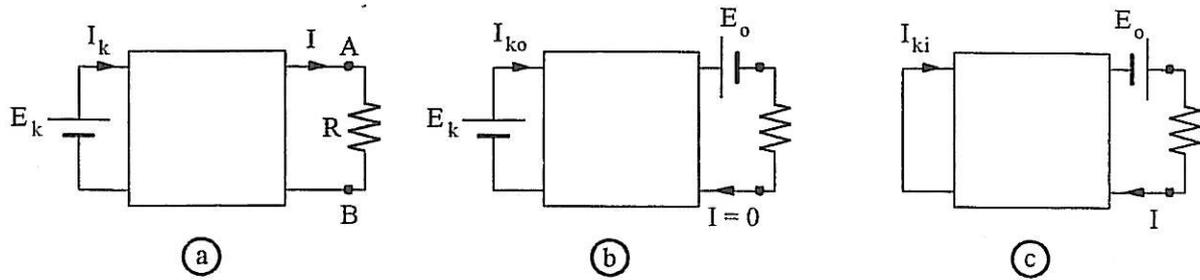


fig. 1.251

Sovrapponendo le due condizioni di fig. 1.251 b) e c), si ha la rete di fig. 1.251 a), per la quale si ha dunque:

- 1) una potenza generata da  $E_k$  con la corrente  $I_k$  pari dunque alla potenza dissipata nella rete, quando i morsetti A,B sono aperti;
- 2) una potenza generata da  $E_k$  con la corrente  $I_{ki}$  data dalla (1.251);
- 3) una potenza utilizzata sulla resistenza R, pari a  $RI^2$ .

Ne segue che la potenza dissipata nell'interno della rete di fig. 1.251 a) è la somma della potenza dissipata a vuoto (morsetti A,B aperti), più la potenza dissipata nella resistenza equivalente R percorsa dalla corrente I. Questo principio può estendersi a più sorgenti contemporanee nonché ad un generico doppio bipolo (fig. 1.252) è infatti:

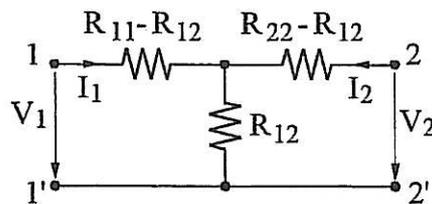


fig. 1.252

$$V_1 = R_{11}I_1 + R_{12}I_2$$

$$V_2 = R_{12}I_1 + R_{22}I_2$$

la potenza dissipata nel doppio bipolo risulta:

$$P_p = V_1 I_1 + V_2 I_2 = R_{22} I_2^2 + R_{12} I_1 I_2 + R_{11} I_1^2 = \frac{(V_1 - R_{12} I_2)^2}{R_{11}} +$$

$$+ \frac{2R_{12}(V_1 - R_{12} I_2) I_2}{R_{11}} + R_{22} I_2^2 = \frac{V_1^2}{R_{11}} + \left( R_{22} - \frac{R_{12}^2}{R_{11}} \right) I_2^2 = P_{01} + P_{cc2}$$

## CAPITOLO I - Generalità

Essa è perciò la somma della potenza  $P_{01}$  assorbita ai morsetti 1,1' sottoposti alla tensione  $V_1$ , con i morsetti 2,2' aperti, e della potenza  $P_{cc2}$  assorbita ai morsetti 2,2' alimentati dalla corrente  $I_2$ , con i morsetti 1,1' cortocircuitati.

## 1.26 Perdite a vuoto e in cortocircuito nelle reti in c.a.

Le dimostrazioni del precedente paragrafo non valgono, in generale, per la potenza complessa di una rete in c.a. sinusoidale. Per un doppio bipolo, si ricava infatti:

$$(1.261) \quad P_p = P_{op} + P_{cc2} + \dot{V}_1 \dot{I}_2 \left( \frac{\dot{Z}_{12}}{\dot{Z}_{11}} - \frac{\dot{V}_{12}}{\dot{Z}_{11}} \right)$$

che si riduce alla semplice espressione del paragrafo precedente solo nel caso in cui  $\dot{Z}_{11}$  e  $\dot{Z}_{12}$  siano simili (se il loro rapporto è cioè un numero reale) ossia quando la tensione a vuoto ai morsetti 2,2' è in fase con la tensione applicata ai morsetti 1,1'.

Questa condizione è spesso verificata con sufficiente approssimazione da permettere la sovrapposibilità delle perdite a vuoto ed in cortocircuito, per la determinazione delle perdite totali.

Si noti tuttavia che, se fra le impedenze  $\dot{Z}_{11}$  e  $\dot{Z}_{12}$  esiste una piccola differenza di fase  $\delta$ , l'ultimo termine della (1.261) diviene:

$$\dot{V}_1 \dot{I}_2 \left( \frac{\dot{Z}_{12}}{\dot{Z}_{11}} - \frac{\dot{V}_{12}}{\dot{Z}_{11}} \right) \cong \dot{V}_{20} \dot{I}_2 j2\delta = j2\delta P_2$$

e poiché contiene la potenza complessa in uscita  $P_2$ , può risultare sensibile rispetto agli altri due.

Nel caso di un trasformatore di potenza, l'angolo  $\delta$  (sfasamento a vuoto fra tensione primaria e f.e.m. secondaria) può essere dell'ordine di  $10^{-3} \div 10^{-4}$ ; esso può essere più sensibile nel caso di una lunga linea di trasporto di energia ad alta tensione.

Non bisogna tuttavia dimenticare che le relazioni precedenti presuppongono la linearità del sistema e cadono perciò in difetto quando questa venga a mancare (per esempio nel caso di perdite per effetto corona, di effetti di saturazione nei circuiti magnetici ecc.).

## CAPITOLO I - Generalità

## 1.3 Misure di grandezze non elettriche

## 1.31 Trasduttori

Durante i collaudi delle macchine elettriche, ed ancor più nel controllo e nell'esercizio degli impianti elettrici, è spesso necessario ricorrere alla misura di grandezze fisiche non elettriche (spostamenti, forze, velocità, temperature ecc.). Diversi esempi di tali misure saranno riportati nei singoli capitoli interessati.

Giova tuttavia ricordare come la maggior parte di queste misure venga effettuata con l'interposizione di un convertitore il quale fornisce in uscita un segnale elettrico, più facile da trasportare, smistare, amplificare; ecc. e più comodo per la successiva conversione in un'indicazione, analogica o numerica. Gli organi che effettuano questa conversione sono detti trasduttori; essi possono genericamente rappresentarsi come in figura 1.311, in quanto il loro compito è quello di stabilire una relazione fra il segnale  $x$  d'entrata (grandezza non elettrica) e quello  $y$  d'uscita (tensione o corrente elettrica).

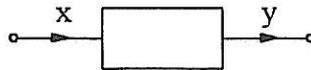


Fig. 1.311

I più comuni tipi di trasduttori possono essere classificati in base al loro principio di funzionamento: un primo gruppo comprende i trasduttori in cui le grandezze d'entrata e di uscita sono parametri della stessa potenza, che viene trasformata nell'interno del trasduttore stesso: ne sono esempi tipici i generatori tachimetrici, le termocoppie ecc.; il trasduttore può, in questo caso, essere rappresentato da un vero e proprio generatore equivalente.

In altri casi, la grandezza d'entrata comanda un parametro proprio di una sorgente indipendente, per esempio la resistenza o l'induttanza di un ramo di un circuito a ponte; l'azione può essere prodotta direttamente dalla grandezza da misurare (p. es. la resistenza varia per effetto della temperatura da misurare) o attraverso l'interposizione di un azionamento meccanico (come lo spostamento di un cursore su un reostato).

Un gruppo a parte è costituito dai sistemi in cui si effettua una compensazione, manuale o più spesso automatica (a retroazione) fra la grandezza da misurare ed un'altra grandezza simile, ottenuta dall'uscita mediante un convertitore, che trasforma una grandezza elettrica in una non elettrica della stessa natura di quella da misurare (fig. 1.312). Oltre ai trasduttori di tipo analogico, in cui l'uscita è una grandezza fisica variabile con continuità al variare della grandezza d'entrata, si hanno anche i trasduttori numerici, la cui uscita è costituita da un valore numerico, necessariamente discreto.

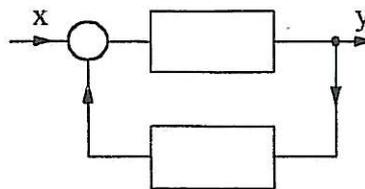


fig. 1.312

## 1.32 Caratteristiche dei trasduttori

## CAPITOLO I - Generalità

Per l'applicazione di un qualsiasi tipo di trasduttore, occorre conoscerne, oltre al principio di funzionamento, le principali caratteristiche, che possono essere così raggruppate:

- a) caratteristiche d'ingresso e d'uscita
- b) caratteristiche di trasferimento, statiche e dinamiche;
- c) caratteristiche ambientali.

I principali parametri, nei riguardi dell'ingresso e dell'uscita di un trasduttore, sono costituiti dai valori limiti (massimi ed eventualmente minimi) che possono essere assunti dalle rispettive grandezze; molto spesso vengono indicati i valori nominali (ovvero le portate) e le eventuali possibilità di sovraccarico. I valori minimi possono essere imposti dai disturbi o dai rumori di fondo cui l'apparecchio è soggetto.

Oltre a ciò, occorre in molti casi precisare quale sia l'effetto di carico che il trasduttore esercita sugli elementi che lo precedono, o che può essere esercitato sul trasduttore dagli elementi che lo seguono nella catena che costituisce il sistema di misura. Questo effetto viene generalmente definito attraverso un valore di impedenza propria, d'ingresso o d'uscita, per le parti elettriche, o parametri analoghi per le parti non elettriche. Riservando ai paragrafi successivi un più dettagliato esame delle caratteristiche di trasferimento, ricordiamo l'importanza delle caratteristiche ambientali costituite dai valori limiti di temperatura, umidità, vibrazioni ecc. entro cui il trasduttore conserva la sua capacità di operare, con prestazioni specificate o senza danni permanenti.

Quando, come nel caso dei grossi impianti, il trasduttore sia parte di un sistema complesso, il cui arresto, anche temporaneo, è fonte di notevoli oneri economici, ha rilevante importanza la continuità del suo funzionamento e la sua durata di vita. Si tende oggi a definire, per un trasduttore, un "grado di affidabilità", come la probabilità che esso ha di funzionare correttamente senza guastarsi.

### 1.33 Caratteristiche statiche di trasferimento

La relazione che intercorre, in condizioni di regime stazionario, fra le grandezze d'entrata e d'uscita può, in generale, essere una funzione qualsiasi purché definita, in modo biunivoco, entro una limitata fascia d'incertezza. E' tuttavia preferibile che questa relazione risulti di semplice proporzionalità, per poter introdurre nelle misure solo dei fattori costanti e utilizzare strumenti indicatori a scala lineare, facilmente intercambiabili. Si può allora parlare di un fattore di conversione (o di trasduzione) ovvero semplicemente di costante strumentale propria del trasduttore; nel caso invece di una relazione non lineare occorre definire, punto per punto la tangente alla curva che esprime la relazione fra le grandezze d'entrata e di uscita (sensibilità).

In ogni caso, però, un trasduttore possiede caratteristiche ben definite solo se la variazione del segnale d'ingresso, rispetto ad una determinata posizione d'equilibrio stazionario, risulta superiore ad un certo limite (detto d'insensibilità o di discriminazione, o soglia di mobilità); oltre alla minima variazione del segnale d'ingresso percettibile in uscita, è spesso necessario definire anche la minima variazione che risulta misurabile, con specificate condizioni limiti d'errore (potere di risoluzione); tutte queste grandezze possono essere espresse in valore assoluto o, più spesso, in valore relativo rispetto al valore misurato o rispetto al fondo scala o portata dell'apparecchio.

Assegnata ad un trasduttore la sua costante nominale - ossia quel fattore per cui deve essere moltiplicata l'indicazione d'uscita per ottenere la grandezza d'entrata - ogni deviazione da questa, dovuta alle varie condizioni di funzionamento, è fonte di un errore (errore statico)

## CAPITOLO I - Generalità

composto di più termini sistematici e di un insieme di termini fortuiti. A seconda della loro origine, le varie componenti dell'errore assumono nomi diversi; ricordiamo ad esempio:

- l'errore di linearità (integrale o differenziale) legato alle deviazioni del rapporto  $x/y$  o  $\Delta x/\Delta y$  dai valori nominali;
- l'errore di conformità, che è quello che si commette nell'assumere per un dato trasduttore il valore della costante nominale (per esempio, per taratura inesatta);
- gli errori di reversibilità, legati ad effetti di isteresi.

Oltre ai sopraricordati errori, esistono naturalmente le diverse grandezze d'influenza (temperatura, posizione, campi esterni ecc.) e gli errori fortuiti dovuti a disturbi esterni, a giochi meccanici, a rumore interno, ad errori di lettura ecc..

In ambito industriale è abbastanza comune trovare dei trasduttori che forniscono un'uscita in corrente continua (tipicamente  $4 \pm 20$  mA). La relazione che collega il segnale di ingresso all'uscita è garantita alla sola condizione che la resistenza complessiva dell'anello di collegamento non superi un determinato valore (qualche centinaio di ohm).

Il vantaggio di operare in corrente consiste nel fatto che il segnale che si ottiene non dipende dalla sezione dei conduttori o dalla variazione di resistenza con la temperatura; in aggiunta il sistema di misura ha una impedenza relativamente bassa e quindi è difficilmente influenzato da disturbi. Ovviamente, per riportare il segnale in tensione è sufficiente inserire una resistenza tarata.

#### 1.34 Caratteristiche dinamiche

In moltissimi casi, e soprattutto quando fanno parte di sistemi di controllo, i trasduttori sono sottoposti a grandezze variabili nel tempo; assumono allora importanza le loro caratteristiche dinamiche, ossia le relazioni che essi stabiliscono fra grandezze d'entrata e d'uscita di forma qualsiasi.

Se il trasduttore si comporta come un sistema lineare, queste relazioni possono essere sintetizzate con la funzione di trasferimento  $G(p)$ , rapporto fra le L-trasformate dei segnali d'entrata e d'uscita. Questa funzione può essere convenientemente descritta, e ricavata anche sperimentalmente, mediante il modulo e la fase della sua espressione complessa  $G(j\omega)$ , in regime sinusoidale, in un opportuno campo di valori della pulsazione  $\omega$  del segnale d'ingresso. Per una rappresentazione quantitativa sintetica, dalla curva del modulo  $G(\omega)$ , possono essere individuati vari parametri caratteristici, quale la banda passante  $B_k$ , in cui il valore di  $G$  si è ridotto di  $k$  dB sotto un valore di riferimento, la pulsazione  $\omega_r$  dove si presenta un massimo, nonché il valore  $M_r$  di questo ecc. (fig. 1.341); alcuni punti caratteristici possono anche essere individuati sul diagramma delle fasi.

Alcune caratteristiche del sistema (tempo di ritardo, tempo di salita ecc.) possono anche essere ricavate dalla risposta del sistema ad una funzione a scalino (fig. 1.342).

In pratica, nella maggior parte dei trasduttori, si cerca di ricondursi a sistemi lineari con funzione di trasferimento del primo o del secondo ordine, per le quali esistono relazioni ben definite fra i parametri sopraindicati. E' ad ogni modo importante ricordare come, per ottenere una risposta che si adegui rapidamente alla grandezza d'ingresso, occorra avere sistemi a larga banda o con piccole costanti di tempo.

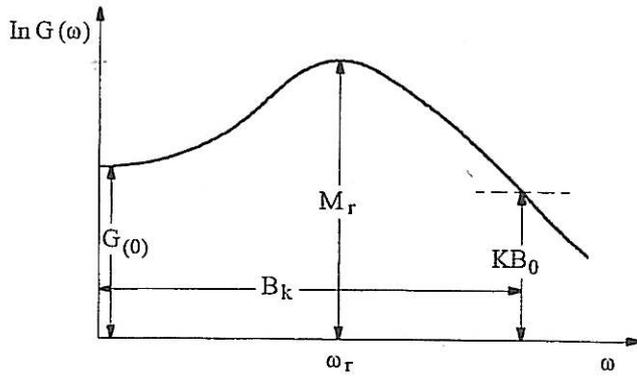


fig. 1.341

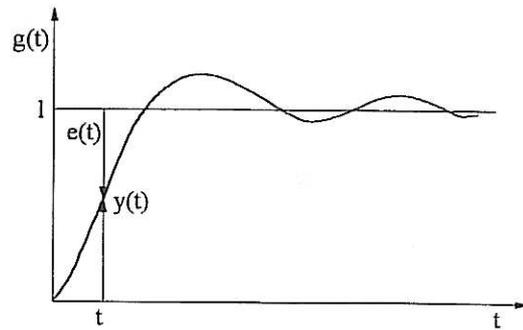


fig. 1.342

La precisione dinamica, cioè la capacità di seguire le rapide variazioni del segnale d'entrata, può essere espressa con opportuni indici di qualità, funzioni dello scarto istantaneo  $e(t)$  fra il valore misurato, applicando al segnale d'uscita  $y(t)$  la costante nominale dello strumento  $C_n$ , e il vero valore della grandezza d'entrata  $x(t)$ ; si assume generalmente per  $x(t)$  la forma di uno scalino unitario e si calcola l'errore secondo indici del tipo:

$$I = \int_0^{\infty} e^2(t) dt$$

ovvero:

$$I = \int_0^{\infty} |e(t)|(t) dt$$

che possono ricavarsi dalla conoscenza della risposta del sistema alla funzione a scalino.

Questa procedura è soddisfacente se gli ingressi sono classificabili come tipologia e si fa riferimento a parametri specifici: se l'andamento è composito, può essere necessario caratterizzare il trasduttore facendo ricorso all'integrale di convoluzione che consente di prevedere l'andamento dell'uscita per un ingresso di tipo qualsiasi, nota che sia la risposta al gradino (o all'impulso).

### 1.35 Esempi di trasduttori

Data la varietà d'impieghi previsti, esiste un gran numero di tipi di trasduttori, basati su differenti principi fisici, o con differenti caratteristiche costruttive. Ci si limiterà pertanto ad indicare alcuni dei casi più importanti.

Per i trasduttori che sono stati catalogati nel primo gruppo, quelli cioè che operano principalmente una conversione d'energia, sono particolarmente utilizzati gli effetti termoelettrici, piezoelettrici e fotoelettrici, oltre naturalmente alla conversione per via elettromagnetica di energia meccanica in elettrica.

L'effetto termoelettrico consente, come è noto, di ottenere, in un circuito formato da due materiali diversi, una f.e.m. funzione della differenza di temperatura fra le due giunzioni (vedi 3.26). La relazione fra f.e.m. e temperatura può ritenersi lineare in opportuni intervalli di valori, con ordini di grandezza di qualche decina di  $\mu V/^\circ C$ . La misura della f.e.m. può essere

CAPITOLO I - Generalità

eseguita con strumenti per c.c. o, per rendersi indipendenti dalla resistenza interna della termocoppia e dei collegamenti, con metodi potenziometri.

L'effetto piezoelettrico produce cariche elettriche sulle superfici di un cristallo di dielettrico sottoposto ad azioni meccaniche di compressione o trazione; il materiale più usato è il quarzo, tagliato in opportune direzioni rispetto agli assi principali dei suoi cristalli. La tensione prodotta, per lo spostamento di tali cariche, sulla capacità propria del cristallo, deve essere misurata con sistemi ad alta impedenza d'entrata ( $> 10^{13} \Omega$ ). Valori tipici del rapporto di conversione sono dell'ordine della frazione di volt per newton.

L'effetto fotoelettrico si manifesta in uno strato semiconduttore montato fra due supporti metallici, di cui uno trasparente alla luce, quando esso viene colpito da una radiazione luminosa; la f.e.m., che si presenta a vuoto sui terminali metallici, è funzione all'incirca logaritmica dell'illuminazione.

La conversione di energia per via elettromagnetica trova applicazione nei generatori tachimetrici (vedi 1.44) in cui si realizza una sorgente di f.e.m. continua o alternata, il cui valore (e nel caso di alternata, anche la frequenza) è legato alla velocità di rotazione del generatore. Lo stesso principio può essere utilizzato anche direttamente, per la misura della velocità di corpi conduttori, inducendo su essi delle f.e.m., mediante opportuni campi magnetici.

Nel campo delle grandezze che possono influenzare un parametro elettrico, ad esempio il valore di una resistenza, ricordiamo, oltre naturalmente alla temperatura, gli sforzi meccanici, l'illuminazione, il contenuto di umidità o il contenuto in sali, per un elettrolita.

In seguito ad uno sforzo meccanico di trazione, un filo conduttore si allunga e si restringe di sezione, aumentando la sua resistenza; in alcuni materiali la sollecitazione provoca anche modifiche nella struttura metallica, con cambiamenti anche nella resistività.

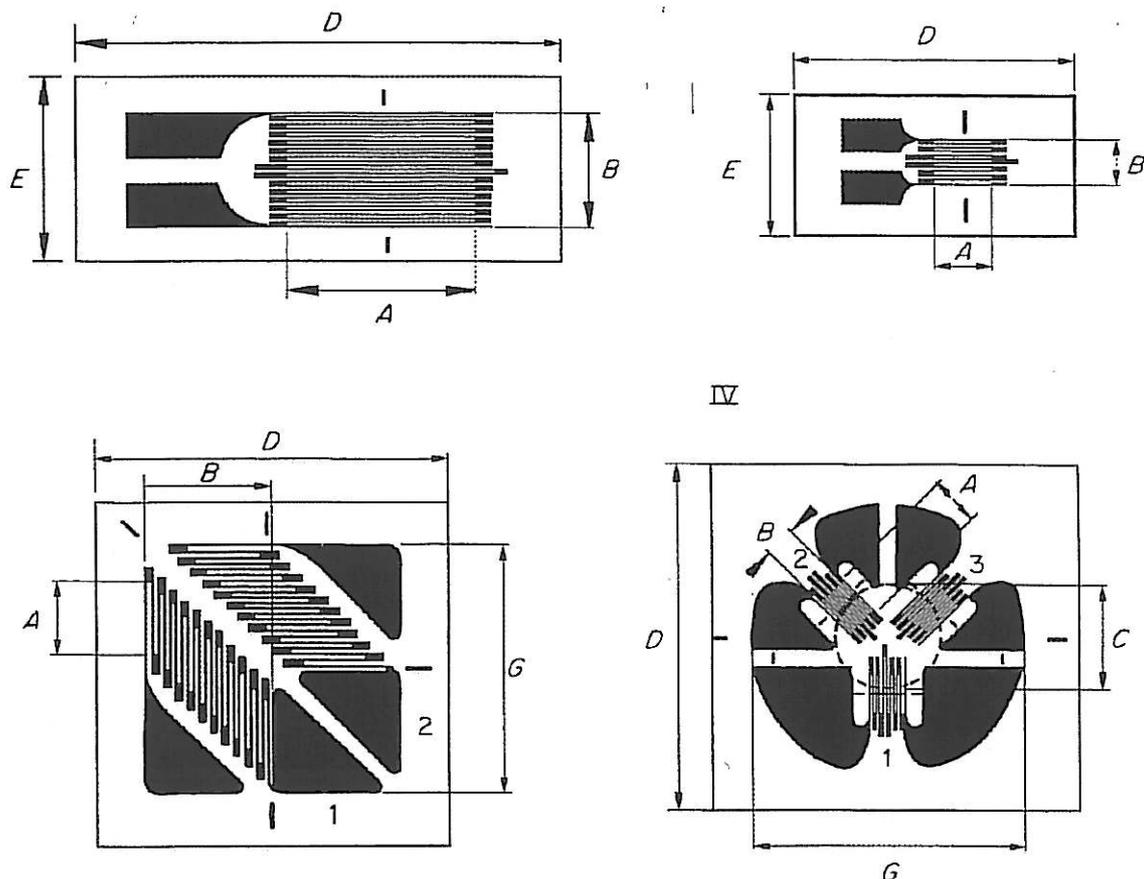


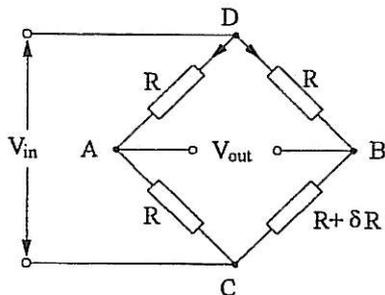
fig. 1.351

CAPITOLO I - Generalità

Si hanno così estensimetri (o strain-gages) metallici, in costantana, nichel, nichelcromo, in cui il rapporto fra le variazioni relative di resistenza e di lunghezza ( $\delta R/R/\delta L/L$ ) raggiunge valori da 2 a 10; valori superiori si ottengono con estensimetri a semiconduttori, in cui esiste un elevato effetto piezoresistivo.

Questi estensimetri sono normalmente montati su un supporto isolante (fig. 1.351) per essere applicati all'elemento di cui si vuol misurare la deformazione o lo sforzo meccanico, che è proporzionale a tale deformazione; il supporto ed il montaggio devono essere curati in modo che gli sforzi siano trasmessi senza effetti elastici o plastici. Le variazioni di resistenza che si misurano sono dell'ordine di qualche per mille; occorrono perciò particolari artifici perché esse non siano mascherate da variazioni di temperatura dell'estensimetro. La misura si esegue generalmente con metodi di ponte e, frequentemente, a ponte sbilanciato, andando a misurare, previa amplificazione, la tensione sulla diagonale dell'indicatore di zero. In queste condizioni è fondamentale la stabilità dell'alimentazione che interviene direttamente nell'espressione della tensione in uscita.

Con riferimenti alla figura 1.352 in cui è mostrato un ponte in cui il valore di un ramo è variato di  $\delta R$ , la tensione di uscita  $V_{AB}$  è legata a quella di alimentazione da una relazione:

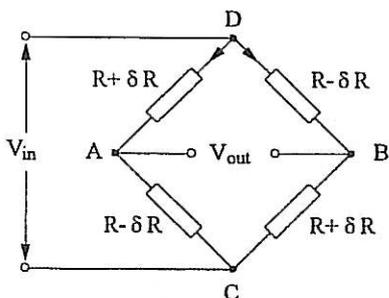


$$V_{AB} = V \frac{\delta R}{4R + 2\delta R}$$

Fig. 1.352

e se  $\delta R$  è abbastanza piccolo ( $\delta R/R < 5\%$ ) si può ritenere che esista una relazione di proporzionalità con  $V_{AB} = V \frac{\delta R}{4R}$

Se i rami variabili sono due (opposti come BC e AD se entrambe le resistenze aumentano o adiacenti se una aumenta ed una diminuisce - oppure quattro - (fig. 1.353)) - si ottengono rispettivamente relazioni del tipo:



$$V_{AB} = V \frac{\delta R}{2R} \quad (\text{due lati variabili})$$

$$V_{AB} = V \frac{\delta R}{R} \quad (\text{quattro lati variabili})$$

Fig. 1.353

Si nota come la sensibilità cresca con il numero di rami interessati e come si possa estendere il campo di linearità. In fig. 1.354 vengono riportati il valore e l'andamento della tensione di

CAPITOLO I - Generalità

uscita da un ponte per le diverse configurazioni prese in considerazione, nell'ipotesi di una tensione di alimentazione pari a 10 V e di resistenze  $R = 100 \Omega$ .

Per ovviare agli inconvenienti della continua e per aumentare la sensibilità del rivelatore di zero si sono anche utilizzati amplificatori in alternata con frequenze fino a qualche kHz.

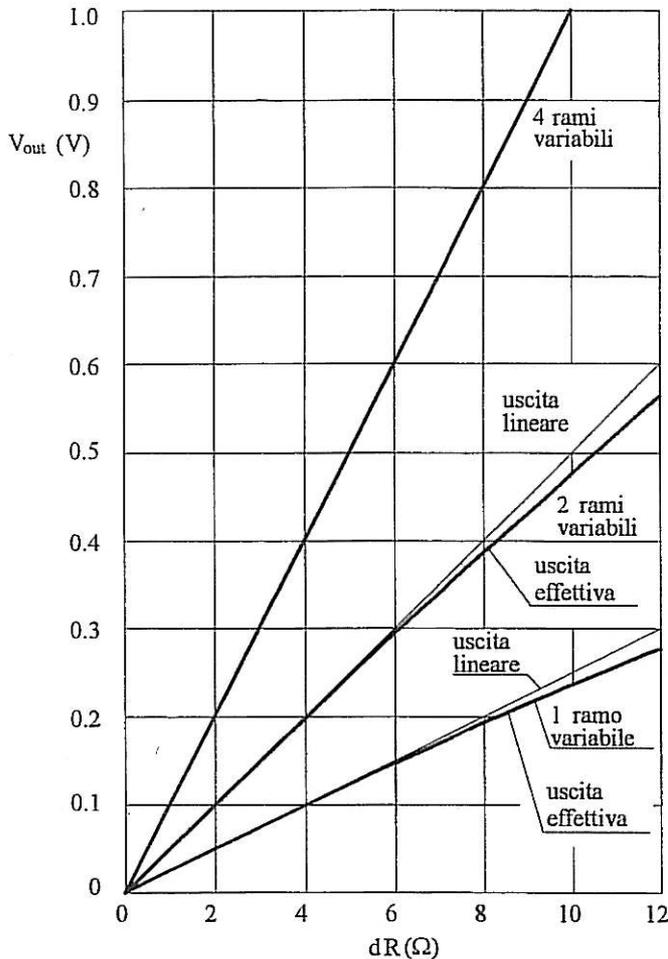


Fig. 1.354

In questo caso devono essere curati gli elementi parassiti ma la cosa non è particolarmente critica per gli estensimetri che hanno una costruzione sostanzialmente antiinduttiva.

E' poco probabile che i ponti possano essere bilanciati già inizialmente, in assenza di sollecitazione, per le tolleranze nella costruzione degli stessi estensimetri ; è quindi normale procedere ad un riduzione dell'offset con schemi del tipo indicato in fig. 1.355.

Permangono ovviamente i problemi nel caso in cui il sistema di estensimetri debba essere installato a distanze apprezzabili dal punto di misura: le resistenze dei collegamenti entrano allora direttamente nelle equazioni di equilibrio e possono essere compensate in alcuni casi solo parzialmente (Fig. 1.356a) ed in altri completamente (Fig. 1.356b).

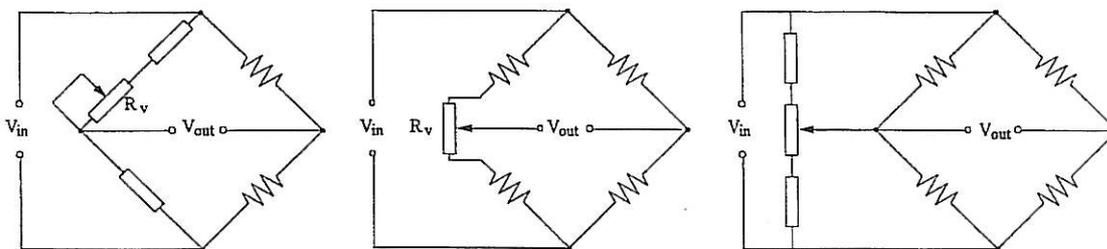
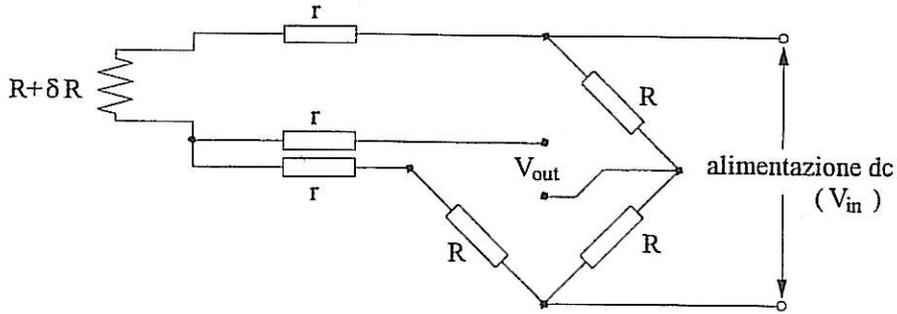


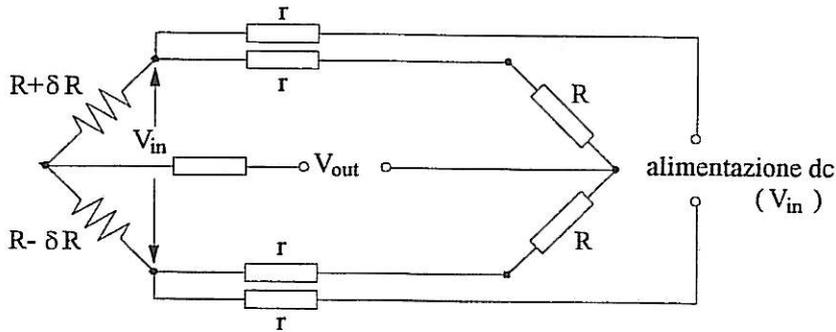
Fig. 1.355

*Compenso  
parziale*



(a)  $V_{out} = V_{in} \delta R / [4(R+r)+2dR]$

*Compenso  
Totale*



(b)  $V_{out} = V_{in} \delta R / 2R$

Fig. 1.356

Su questi principi possono essere basate le celle di carico con le soluzioni indicate di seguito (cella di carico a trave o ad anello) in cui si utilizzano 4 estensimetri disposti opportunamente per realizzare una configurazione a ponte con le caratteristiche indicate prima.

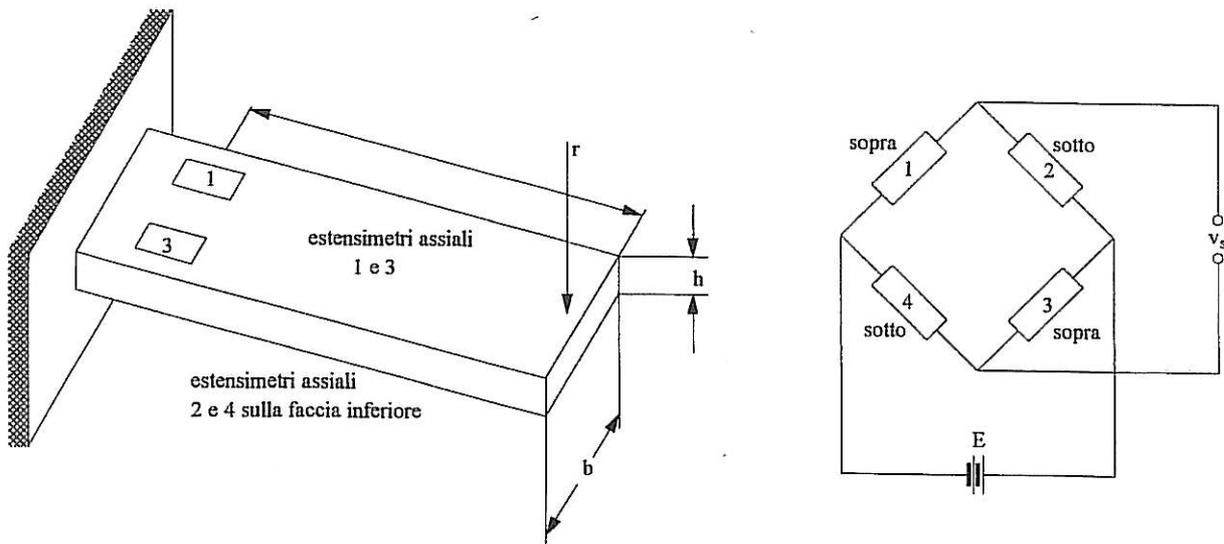


Fig. 1.357

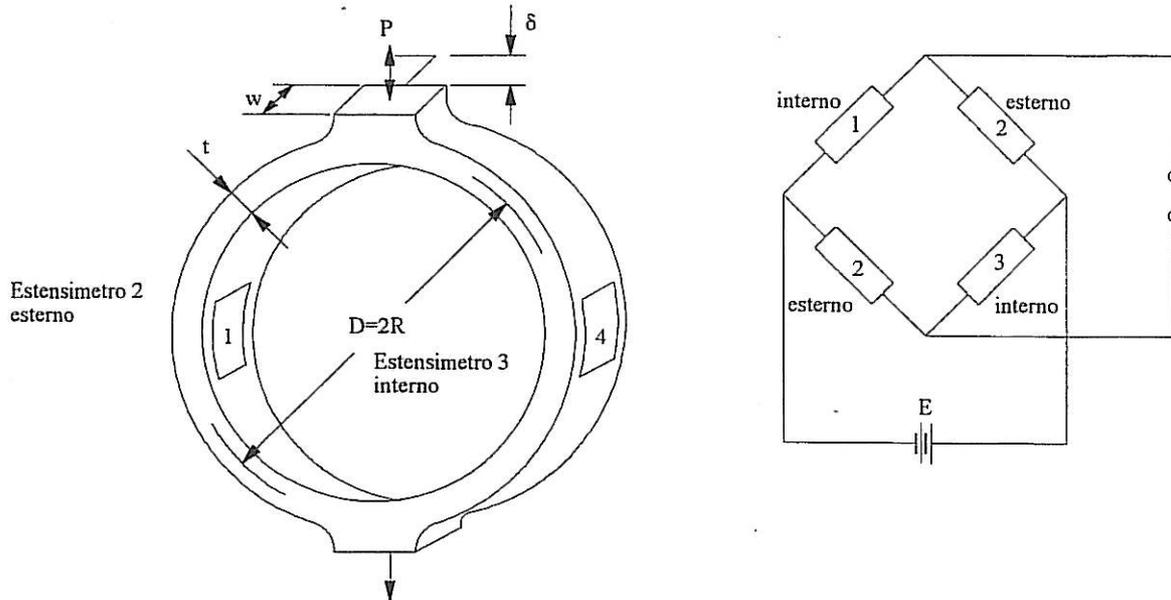


fig. 1.358

Le dimensioni fisiche della cella dipendono dalla portata (la forza massima che può essere misurata rispettando le specifiche metrologiche e, ovviamente, quelle strutturali).

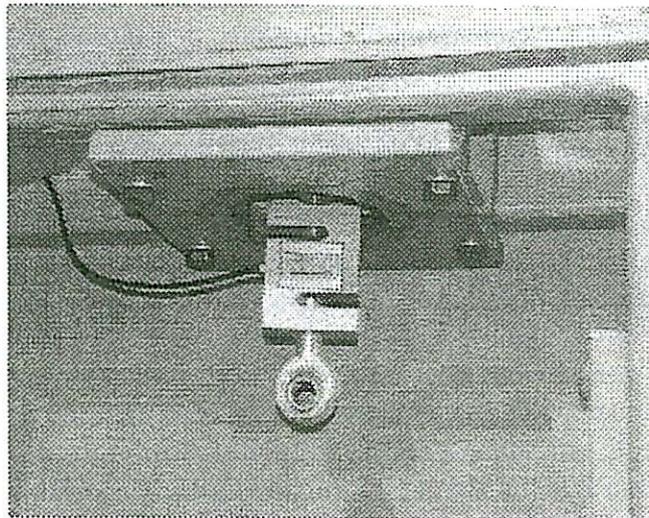


Fig. 1.359 Cella di carico inserita in macchina per prove di trazione

In quasi tutti i materiali semiconduttori la resistività diminuisce all'aumentare dell'illuminazione a cui essi sono sottoposti; tale fenomeno è particolarmente notevole nel selenio, nel silicio ed in alcuni zolfuri ed alogenuri metallici. La relazione fra resistività e flusso luminoso è complessa e dipende, oltre che dal materiale, dalla sua temperatura e dalla lunghezza d'onda della radiazione incidente.

### 1.36 Trasduttori di posizione

Assai usati sono quei trasduttori che utilizzano, come segnale d'ingresso, la posizione di un organo mobile, con moto lineare o rotatorio; questo può essere infatti costituito dalla parte

mobile di uno strumento indicatore, che misura una grandezza qualsivoglia. La posizione può esser facilmente trasformata in un valore di resistenza, di auto o mutua induttanza o di capacità. Il trasduttore più semplice, da questo punto di vista, è il potenziometro, a moto lineare o circolare (fig. 1.361), mediante il quale può realizzarsi una relazione posizione-resistenza di tipo lineare o, con opportuni artifici costruttivi, di altro tipo desiderato. *(Esageratamente)* Si usano prevalentemente potenziometri a filo metallico, avvolti su supporto isolante, in modo da ottenere i voluti valori di resistenza totale con filo di sezione non piccolissima e con adeguata possibilità di smaltimento termico. Questa costruzione comporta errori di linearità, nel passaggio fra spire (generalmente dell'ordine dello 0,5% in casi speciali anche 0,1%) e corrispondenti limitazioni al potere di risoluzione. Per migliorare questi due fattori si usano potenziometri a moto elicoidale, avvolti su più giri.

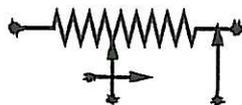


fig. 1.361

Il contatto strisciante, le variazioni della resistenza di contatto, le varie cause di discontinuità del resistore danno inoltre origine, durante il movimento, ad un rumore, che si sovrappone al segnale utile e che limita la velocità ammissibile per lo spostamento del cursore.

L'induttanza di un avvolgimento può variare in funzione della posizione assunta da una parte del suo circuito magnetico, in pratica, della posizione di un'ancora mobile di materiale ferromagnetico che modifica le dimensioni di un traferro; per piccoli spostamenti, la variazione può ritenersi pressoché lineare. Spesso si associano due avvolgimenti, per i quali l'induttanza rispettivamente aumenta e diminuisce al variare della posizione dell'ancora (fig. 1.362). Questi due avvolgimenti costituiscono i due lati adiacenti di un ponte o sono inseriti in altri metodi di zero o differenziali.

Impiego limitato hanno i sistemi a variazione di capacità, normalmente ottenuti per rotazione di un'armatura rispetto all'altra o per moto di un materiale, ad elevata costante dielettrica, fra armature fisse; questi metodi presentano in genere elevata impedenza d'uscita e sensibilità ai disturbi esterni.

Di ampia applicazione sono invece quei trasduttori che convertono uno spostamento, lineare od angolare, in una variazione di mutua induttanza (spesso chiamati LVDT – Linear variable differential transformers); essi hanno pregi di flessibilità d'impiego, di precisione, di potere di risoluzione che li rendono assai diffusi soprattutto nei sistemi di controllo automatico.

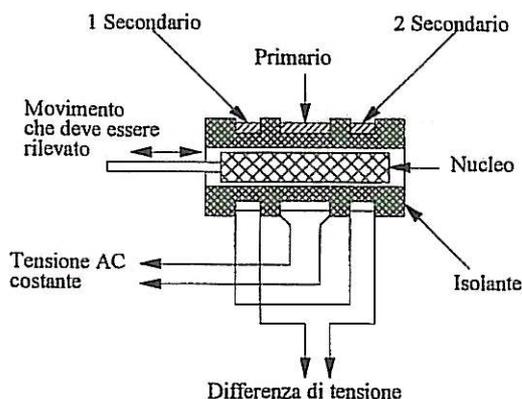


fig. 1.362

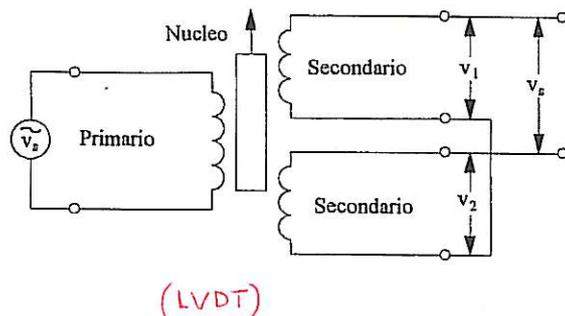
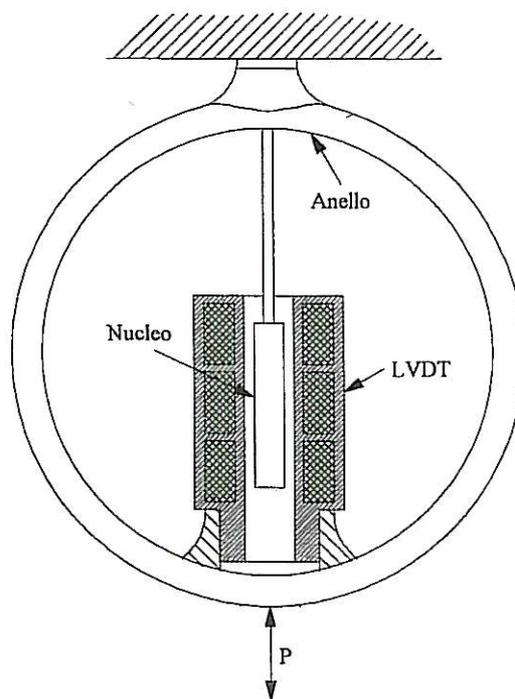


fig. 1.363

## CAPITOLO I - Generalità

Uno schema di principio è illustrato in fig. 1.363 ; lo spostamento del nucleo, rispetto ad una posizione di simmetria, rende fra loro diverse in ampiezza le f.e.m. indotte nei due secondari e fa quindi apparire sull'uscita una tensione della stessa frequenza e fase della tensione di alimentazione. Limitando lo spostamento del nucleo, si possono ottenere buone caratteristiche di linearità e di risoluzione; occorre tuttavia qualche artificio per eliminare le tensioni residue che si presentano, per accoppiamenti capacitivi o per altre cause, anche in condizioni di simmetria. La tensione di alimentazione è tipicamente compresa tra 5 e 15 V, mentre la frequenza utilizzata è compresa, a seconda dei casi, tra 50 Hz e 25 kHz.

Le migliori condizioni di sensibilità si ottengono tra 1 e 5 kHz e variano tra 0,02 e 0,2 V/mm. Per il funzionamento servono un oscillatore ed un demodulatore per convertire la tensione in uscita in una continua che può essere letta direttamente. Nel caso in cui vengano utilizzati per applicazioni dinamiche, la frequenza di alimentazione deve essere molto superiore (almeno 10 volte) alla frequenza massima delle armoniche presenti. Trasformatori del tipo indicato possono essere usati per ottenere celle di carico analoghe a quelle illustrate con gli estensimetri (Fig. 1.364).



CELLA DI CARICO  
BASATA SU LVDT  
(segnale di uscita sinusoidale)

Fig. 1.364

Il sincro è costituito da uno statore con tre avvolgimenti uguali, disposti a  $120^\circ$  fra loro, collegati generalmente a stella, e da un rotore con un avvolgimento unico. Quando l'avvolgimento rotorico è alimentato da una tensione alternata di pulsazione  $w$ , nei tre avvolgimenti statorici si inducono trasformatoricamente f.e.m. della stessa pulsazione e, praticamente, della stessa fase, ma di valore diverso, a seconda della posizione relativa delle fasi statoriche rispetto al rotore. La terna di valori di queste f.e.m. è funzione quindi della posizione angolare del rotore, rispetto ad un riferimento, posto sull'asse di un avvolgimento.

Se ora colleghiamo gli avvolgimenti statorici del sincro con quelli di un secondo, identico al precedente (fig. 1.364) si crea in questo un flusso alternativo che risulta praticamente della stessa direzione, rispetto agli avvolgimenti statorici, di quello esistente nel primo sincro.

Sincro  
il secondo sincro rileva  
l'angolo del primo

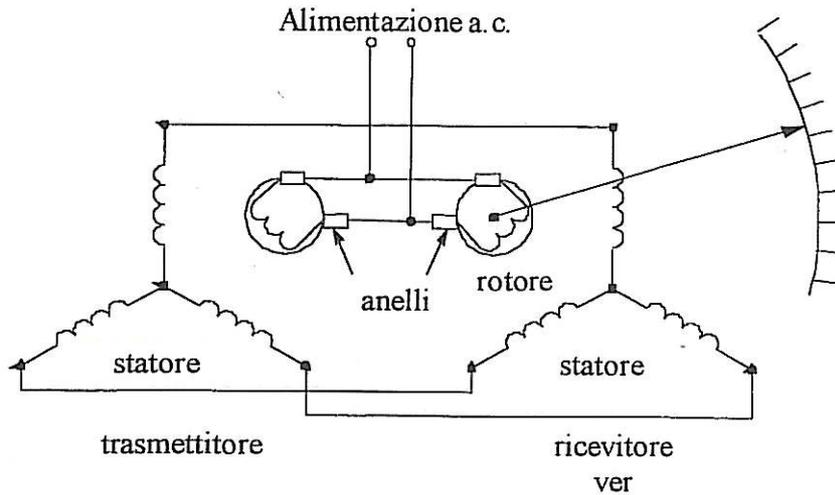


fig. 1.364

Nell'avvolgimento di rotore del secondo sincro si induce pertanto una f.e.m. proporzionale al coseno dell'angolo esistente fra gli assi rotorici. I sincro possono essere utilizzati anche come misuratori a distanza di posizione angolare. Infatti, collegando in parallelo anche i due rotori, il secondo assume ovviamente la stessa posizione del primo; quando questo si sposta, si induce nel secondo una f.e.m. che lo riporta in fase; il movimento può essere convenientemente indicato su un quadrante.

#### 1.4 Misure di velocità angolare

##### 1.41 Principi di misura

Per tutte le macchine rotanti, generatrici ed utilizzatrici, ha particolare importanza la misura della velocità angolare  $\omega$  (in rad/s) ovvero della corrispondente velocità di rotazione  $n$  (in giri al minuto); fra le due grandezze esiste la relazione:

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} = 0,105n$$

- nelle normali applicazioni  $n$  è compreso fra alcune decine e qualche migliaio di giri al minuto.

La misura può avvenire in base a due differenti criteri:

- a) misura diretta della velocità di rotazione (tachimetri);
- b) conteggio del numero dei giri in un prefissato intervallo di tempo (contagiri).

Questi due principi differiscono fra loro innanzitutto per la diversa possibilità di seguire le variazioni di velocità istantanea; nel primo caso essa è limitata solo dalle caratteristiche dinamiche del sistema di misura, che ha, come segnale d'entrata proprio la velocità istantanea; nel secondo caso l'indicazione dello strumento fornisce solo la velocità media nell'intervallo di tempo utilizzato per il conteggio. I contagiri, d'altra parte, hanno spesso il vantaggio di poter

## CAPITOLO I - Generalità

conservare l'indicazione per un tempo lungo a piacere, dopo la misura; il metodo di conteggio, specie se eseguito su cifre elevate, ha inoltre in genere il pregio di una maggiore precisione. A seconda delle apparecchiature utilizzate per la misura, distingueremo i dispositivi puramente meccanici da quelli che si servono di trasduttore per convertire la velocità da misurare in una grandezza elettrica (generalmente ampiezza o frequenza di una tensione); un cenno a parte meritano gli stroboscopi, che utilizzano metodi ottici.

## 1.42 Tachimetri e contagiri meccanici

I tachimetri meccanici più diffusi si basano sull'azione della forza centrifuga su una o più masse, montate eccentricamente rispetto ad un asse, condotto in rotazione tramite rotismi dall'albero di cui si vuole misurare la velocità; l'espansione di tale sistema di masse è contrastata da una molla ed assume perciò una posizione di equilibrio, funzione univoca della velocità di rotazione. La scala, che risulterebbe tendenzialmente quadratica, può essere linearizzata da un'opportuna forma del sistema mobile (fig. 1.42 1).

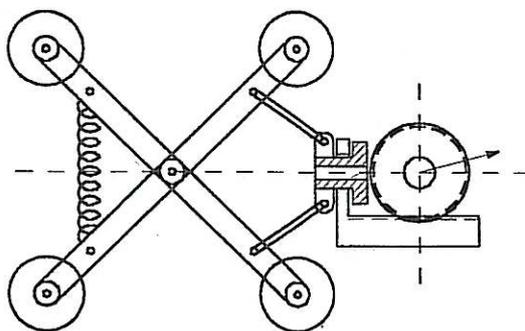


fig. 1.421

La portata dello strumento può essere variata, modificando opportunamente il rapporto dei rotismi. L'asse principale dello strumento viene direttamente accoppiato all'albero di cui si misura la velocità; nei tachimetri ad innesto temporaneo l'accoppiamento avviene per attrito tramite punte di gomma (fig. 1.422) alle quali l'operatore stesso fornisce lo sforzo di compressione ed il centraggio. Il sistema costituisce un piccolo carico (dell'ordine delle frazioni di watt) per l'albero rotante.

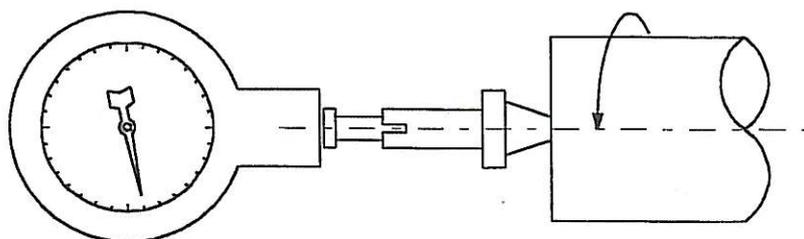


fig. 1.422

La precisione ottenibile da tali strumenti è dell'ordine dell'1%.

I contagiri constano essenzialmente di un asse, che viene trascinato in rotazione dall'albero rotante, ed il cui moto viene trasmesso ad un numeratore, a cifre o ad indice, mediante opportuni rotismi. L'innesto ed il disinnesto di tali rotismi avviene su comando esterno, e si misura contemporaneamente l'intervallo di tempo durante il quale il dispositivo resta in azione.

## CAPITOLO I - Generalità

Nei tipi più comuni l'innesto del dispositivo di conteggio avviene manualmente, mentre il distacco è affidato ad un sistema ad orologeria, dopo un tempo prefissato, che determina la costante strumentale. Sempre più comuni sono contagiri elettronici in cui la velocità è derivata dal conteggio degli impulsi generati da un sistema rotante costituito da un disco su cui sono ricavati alternativamente settori trasparenti ed opachi con tecniche di fotoincisione. Gli impulsi vengono generati da un sistema fotodiiodo- fotoricettore, contati e riferiti ad un intervallo di tempo ottenuto con oscillatori al quarzo. Esistono sistemi che consentono anche la misura della velocità di rotazione senza contatto con l'albero, basati sulla emissione di luce laser che viene riflessa da un bollino riflettente collegato preventivamente all'albero in rotazione.

## 1.43 Tachimetri ad induzione

I tachimetri più semplici e diffusi si basano su uno strumento da induzione (fig. 1.43 1) : un magnete permanente (1) è trascinato in movimento solidalmente con l'albero a velocità di rotazione  $n$ ; nel traferro del circuito magnetico può muoversi una campana (o tamburo) di alluminio (2). Durante il moto del magnete, le correnti indotte nella campana tendono a trascinarla in rotazione, con una coppia proporzionale alla velocità angolare; la posizione di equilibrio, fornita dalla reazione della molla (3), risulta perciò direttamente proporzionale alla velocità di rotazione  $n$ . La scala ha generalmente un'ampiezza di  $270^\circ$ , ma vi sono esempi di tachimetri con scale di ben  $720^\circ$  (due giri dell'indice).

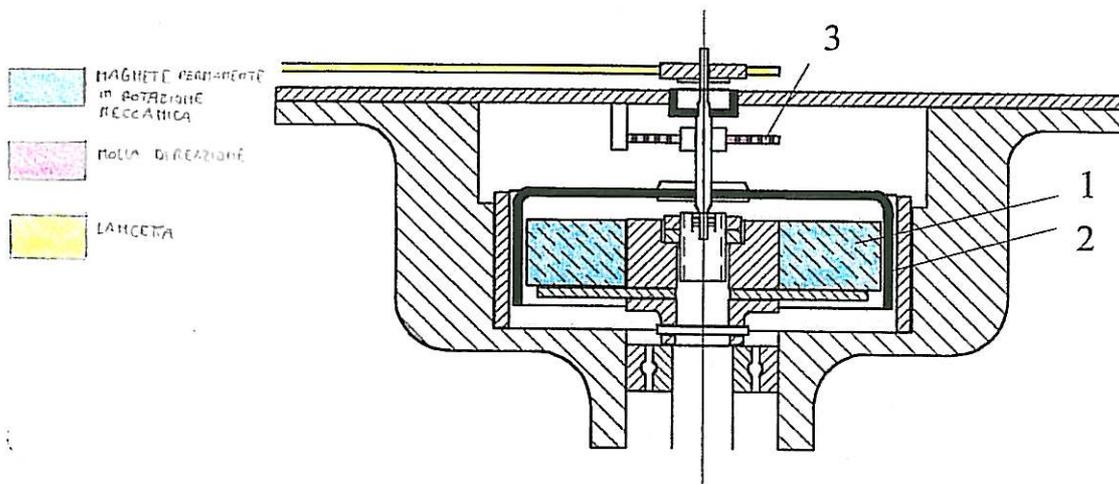


fig. 1.43 1

La coppia motrice è proporzionale alla corrente indotta, e perciò dipende anche dalla resistenza offerta dalla campana; lo strumento è perciò piuttosto sensibile alle variazioni di temperatura ambiente e deve essere compensato, mediante un derivatore di flusso in materiale termomagnetico. Talvolta, date le notevoli coppie che possono essere disponibili, si esegue il tamburo in manganina che, pur avendo resistività e peso specifico maggiori dell'alluminio, ha il vantaggio di variazioni trascurabili di resistività con la temperatura.

La potenza assorbita da un simile tipo di strumento può andare dalla frazione di watt fino a qualche watt; essa è nella maggior parte dissipata in calore nella campana.

La precisione ottenibile è dell'ordine di  $+1\%$ ; un errore aggiuntivo può essere prodotto, a velocità elevata, dal trascinarsi prodotto dall'aria nel traferro.

## 1.44 Generatori tachimetrici

## CAPITOLO I - Generalità

GENERATORI TACHIMETRICI

Come trasduttori, che convertono la velocità di rotazione di un albero in una grandezza elettrica, si possono usare generatori di f.e.m. continua o alternata; in entrambi, infatti, la f.e.m. a vuoto è, a eccitazione costante, direttamente proporzionale al numero dei giri al minuto; in più, nei generatori di tensione alternata, si ha una frequenza univocamente legata al numero dei poli e alla velocità di rotazione. Per disporre di un'eccitazione costante, sia i generatori in c.c. che quelli in c.a. sono del tipo a magnete permanente.

I generatori a c.c. hanno il vantaggio di consentire la misura della tensione indotta con strumenti di piccolo consumo; non si hanno perciò sensibili errori dovuti alla reazione d'indotto del generatore, né alle sue resistenze interne o a quelle degli eventuali collegamenti, né alle loro variazioni con la temperatura.

Per contro, la presenza del collettore, necessariamente con un numero limitato di lamelle, comporta, oltre alla necessità di una periodica manutenzione, la presenza di una componente alternata sovrimposta alla continua, variazioni di f.e.m. dovute all'usura delle spazzole, che modificano la loro posizione, irregolarità per vibrazioni delle spazzole stesse ecc. I generatori tachimetrici a dinamo omopolare evitano in parte tali inconvenienti, ma forniscono tensioni troppo modeste (frazioni di volt) per gli usi più comuni.

La tensione fornita da una dinamo tachimetrica è generalmente dell'ordine di alcuni volt, al massimo di qualche decina di volt; la potenza resa va da qualche mW a qualche watt.

**Esempio**

Si riportano di seguito le specifiche di una dinamo tachimetrica:

Tensione nominale a 1000 g/1'	20 V
Tensione a vuoto a 1000 g/1'	20,3 V
Corrente nominale	10 mA
Corrente max ammessa	200 mA
Velocità massima	7500 g/1'
Resistenza d'indotto a 25 °C	26 Ω
Costante di tempo elettrica	0,7 ms
Grado di protezione	IP44
Peso	1,7 kg
Momento d'inerzia	1,2 kg.cm <sup>2</sup>
Ondulazione – Valore picco-picco	≤ 1%
Ondulazione – Valore efficace	≤ 0,4%
Errore di linearità	≤ 0,2%
Errore di reversibilità	± 0,1%
Tolleranza sulla tensione	± 3 %
Variazione della tensione con la temperatura	-0,02 % /°C
Classe di isolamento	B
N° poli	4
N° cave	33
N° lamelle	33
Eccitazione a magneti permanenti tipo	ALNICO

Le cave rotoriche sono inclinate e le spazzole sono in lega metallica (carboargento).

Si noti come la tolleranza sulla tensione sia molto elevata in relazione al valore dei termini di incertezza: ovviamente questa rappresenta una specifica costruttiva che, per la specifica

## CAPITOLO I - Generalità

dinamo, può essere migliorata notevolmente effettuando una taratura e determinando pertanto l'effettivo fattore di scala.

I generatori tachimetrici in c.a. sono più semplici e più robusti di quelli in c.c. non avendo avvolgimento rotante (fig. 1.441); la loro tensione di uscita, generalmente dell'ordine di alcuni volt, è però più sensibile agli effetti del carico, in particolare per la reazione d'indotto. La misura si eseguisce con strumenti magnetoelettrici a raddrizzatore.

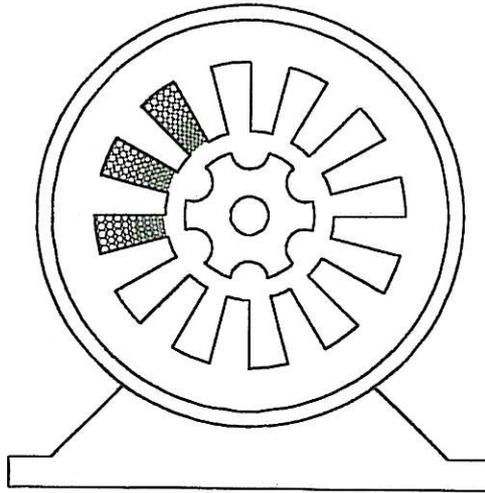


fig. 1.441

Per applicazioni che richiedono alte velocità di risposta, si utilizzano anche generatori a capacità variabile (fig. 1.442); il circuito elettrico di principio è raffigurato in fig. 1.443; la tensione  $v$ , misurata generalmente attraverso uno strumento elettronico, risulta:

$$v = RI = ER \frac{dC}{dt} = ER \frac{dC}{d\alpha} \frac{d\alpha}{dt}$$

Questa tensione è dunque proporzionale alla velocità angolare  $d\alpha/dt$ ; la costante di proporzionalità dipende dalla forma delle due armature, fissa e mobile.

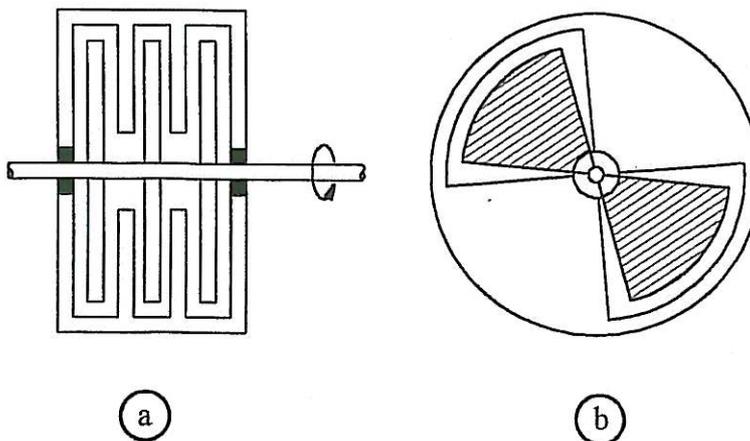


fig. 1.442

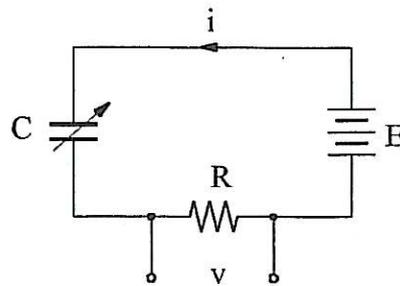


fig. 1. 443

### 1.441 Ruote dentate

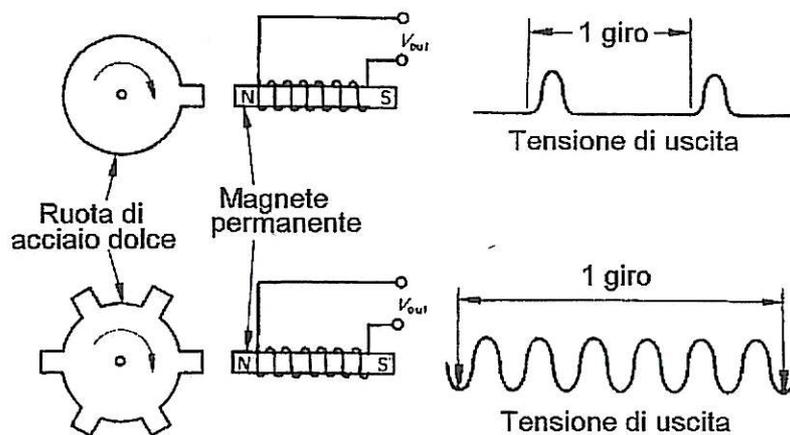


fig. 1.4411

E' possibile ottenere un'indicazione di velocità usando il dispositivo indicato in figura 1.4441 insieme con un contatore; la variazione di riluttanza associata al successivo passaggio dei denti causa una variazione del flusso generato dal magnete permanente e quindi induce una f.e.m. nella bobina.

Si ottiene un sistema estremamente robusto che si presta anche ad applicazioni in ambienti ostili (presenza di umidità, polvere etc.); talvolta è detta anche ruota fonica perché le frequenze che si ottengono sono tali da entrare nel campo dell'udibile. La lettura può essere digitale (numero di impulsi) o analogica: il valore efficace della tensione in uscita dipende infatti, una volta fissate le dimensioni dei denti e la distanza dal magnete, dalla velocità di rotazione.

### 1.442 Encoder

Gli encoder (fig. 1.4421) sono costituiti da un disco di vetro accoppiato solidalmente con l'albero di cui si vuole determinare la posizione e/o velocità angolare. Il disco è suddiviso in settori, ciascuno dei quali, con un opportuno alternarsi di zone trasparenti ed opache, riproduce un'informazione numerica codificata. In questo caso si parla di encoder assoluti. Se il disco con l'alternarsi di zone chiare e scure genera semplicemente degli impulsi, si parla di encoder incrementali. Questi sono i più comuni e meno costosi; la determinazione della velocità o della posizione avviene ad opera di una scheda che contiene un contatore, tipicamente bidirezionale. E' anche necessario che l'encoder fornisca due segnali

opportunamente sfasati per poter distinguere tra i due possibili sensi di marcia. La risoluzione massima ottenibile negli encoder incrementali ottici è di qualche migliaio di passi per giro.

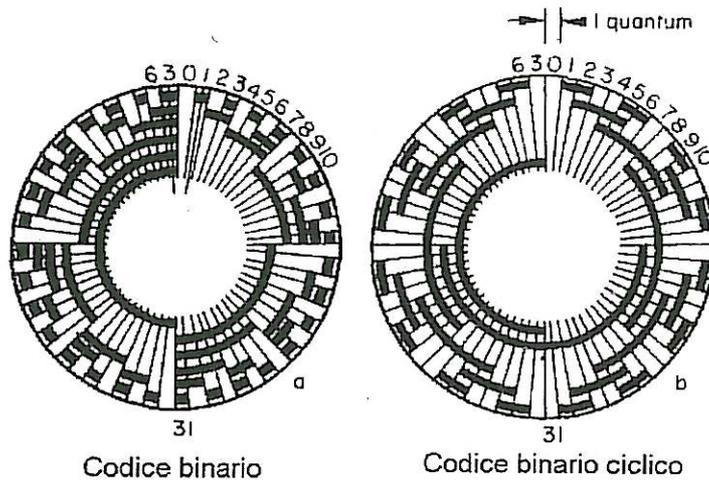


Fig. 1.4421

1.45 Applicazioni dei generatori tachimetrici a c.a.

I generatori tachimetrici sono spesso costruiti indipendentemente dal resto del sistema di misura di cui fanno parte; essi portano l'indicazione della tensione a vuoto, della frequenza e della impedenza interna riferite ad un certo numero di giri al minuto (usualmente 1000). Possono essere monofasi, ma più spesso bifasi o trifasi.

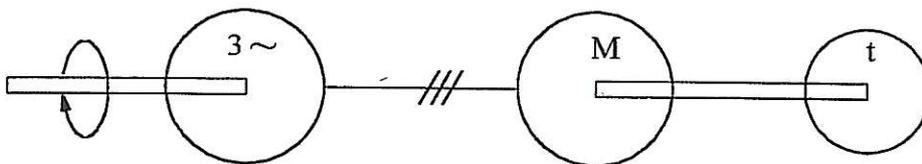


fig. 1.451

Un generatore tachimetrico trifase (o bifase) può essere accoppiato, distanza, con un analogo ricevitore, che funziona da motore sincrono e che trascina un tachimetro elettrico. Questo sistema non risente, entro ampi limiti, delle cadute di tensione dovute ai collegamenti (fig. 1.451)

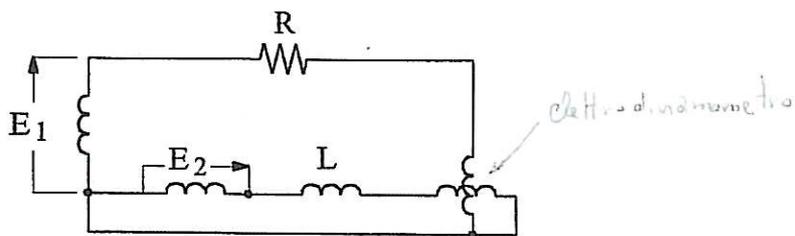


fig. 1.452

Con un generatore bifase si utilizza spesso lo schema di fig. 1.452: uno strumento elettrodinamico è alimentato, sulle due bobine, da due avvolgimenti del generatore, tramite,

## CAPITOLO I - Generalità

rispettivamente, un'induttanza e una resistenza. La corrente in una bobina è perciò praticamente costante in valore e a  $90^\circ$  con la tensione indipendentemente dal numero dei giri del generatore; la corrente nell'altra bobina è in fase con la sua tensione e di valore proporzionale ad essa.

L'indicazione risulta perciò proporzionale al numero dei giri e dipende dal senso di rotazione.

### 1.46 Contagiri elettronici

Il principio dei contagiri elettronici è simile a quello dei contagiri meccanici; esso si basa sul conteggio del numero di volte al minuto in cui si verifica un certo evento, comandato dalla rotazione dell'albero, generalmente trasformato in un impulso elettrico.

I tipi di contagiri sono molto numerosi, potendo l'impulso elettrico essere generato sia per via meccanica (chiusura ed apertura di contatti), che per via ottica (intercettamento di un raggio luminoso) o per via elettromagnetica (f.e.m. indotta in una bobina fissa da un magnete rotante). Questi metodi hanno in comune il pregio di non richiedere praticamente potenza sull'albero in rotazione e di poter variare la portata dell'apparecchio di misura, modificando il numero d'impulsi generati per un giro dell'albero.

Anche la misura della frequenza degli impulsi può eseguirsi in molti modi diversi; i tipi più semplici di indicatori a lamelle, o a carica e scarica di condensatori mediante sistemi meccanici (fig. 1.461) sono ormai usati

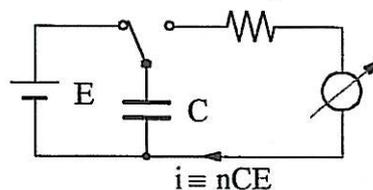


fig. 1.461

praticamente per gli apparecchi più grossolani; essi risultano inadatti per frequenze superiori ad un centinaio di periodi al secondo.

Più usati sono dei sistemi elettronici a multivibratore che, per ogni impulso in entrata, forniscono un impulso in uscita, di area costante; la corrente media, misurata in uscita, è perciò proporzionale al numero d'impulsi nell'unità di tempo.

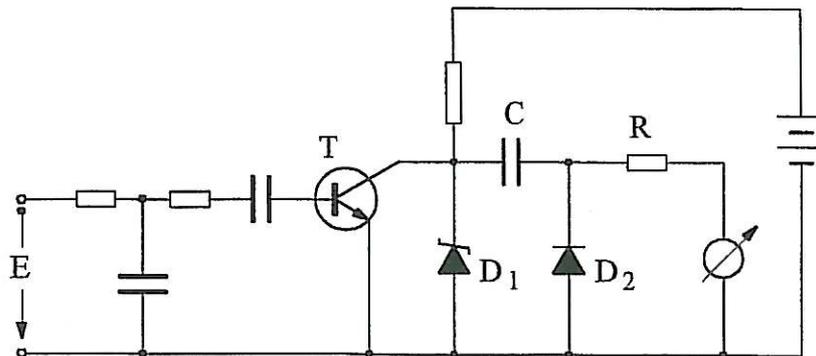


fig. 1.462

Un circuito semplice è mostrato in fig. 1.462; il condensatore C è, in condizioni di riposo, (quando T non conduce), caricato a tensione costante, imposta dalla caratteristica del diodo

CAPITOLO I - Generalità

Zener  $D_1$ ; quando un impulso positivo, proveniente dall'ingresso E, sblocca il transistor T, il condensatore C si scarica attraverso di esso e del diodo  $D_2$ ; lo strumento misura perciò una corrente pari alla carica ricevuta da C nell'unità di tempo e quindi proporzionale al numero di impulsi in entrata.

Apparecchiature più precise si servono di strumenti contatori numerici.

**1.47 Stroboscopi**

L'osservazione stroboscopica di un corpo in rotazione è una osservazione intermittente periodica, che può realizzarsi sia attraverso un disco rotante forato, sia utilizzando lampi di luce intermittenti.

Si consideri un qualsiasi moto periodico di periodo T, come ad esempio la posizione angolare  $\varphi$  di un riferimento su un albero in rotazione alla velocità angolare:

$$\omega = \frac{2\pi}{T}$$

l'angolo  $\varphi$ , ovvero in generale la fase della fondamentale del moto, rispetto ad un'origine arbitraria, risulta:

$$\varphi = \omega(t - kT) \quad \text{con} \quad kT \leq t < (k+1)T$$

quando sussistono m riferimenti o posizioni identiche, la pulsazione del fenomeno risulta m volte maggiore.

• Illuminando l'albero rotante con: lampi di luce intervallati del tempo  $T_s$ , la differenza di fase fra due immagini successive risulta costante e pari a:

$$\Delta\varphi = 2\pi \frac{T_s - T}{T}$$

*Periodo dello stroboscopo*

*Periodo del moto periodico da osservare*

potendo i lampi di luce essere considerati come funzioni impulsive che rivelano solo il valore istantaneo della posizione (fig. 1.471).

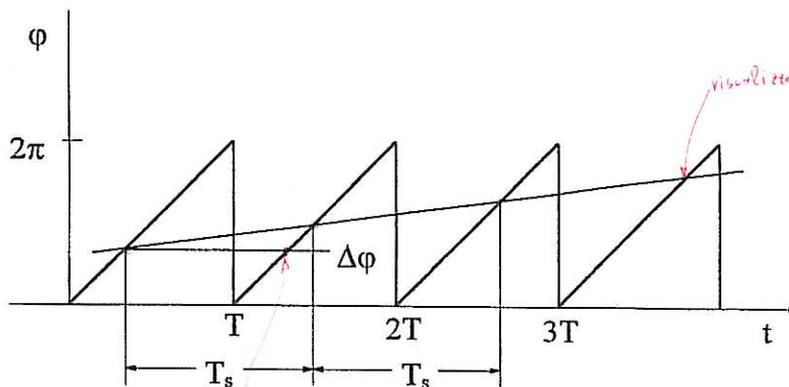


fig. 1.471

La posizione del riferimento appare quindi variabile come se fosse in movimento con una legge periodica di frequenza:

$$f_a = \frac{\Delta\phi}{2\pi T_s} = f - f_s$$

frequenza del moto
— frequenza dello strabismo

frequenza apparente

pari alla differenza fra la frequenza  $f$  del moto e quella  $f_s$  dei lampi di luce. Perché il moto sia osservabile, occorre tuttavia che la frequenza del moto apparente risulti inferiore al limite cosiddetto di visione cosciente, che è quel valore, posto a circa 2 p/s, oltre il quale l'effetto d'integrazione delle immagini e l'inerzia, caratteristici degli organi della vista, rendono impossibile seguire un fenomeno periodico.

Se si osservano  $M$  immagini, che si ripetono dopo  $N$  periodi di moto (con  $M$  e  $N$  numeri interi irriducibili) si può attribuire al moto la frequenza:

$$f_a = f - \frac{N}{M} f_s$$

la frequenza del moto apparente può anche risultare negativa, ossia il verso del moto risulta contrario a quello del moto reale.

In particolare, il riferimento appare immobile quando la frequenza del suo moto apparente sia nulla, ovvero quando sia (vedi fig. 1.472):

$$f = \frac{N}{M} f_s$$

Periodi di moto
— numero immagini

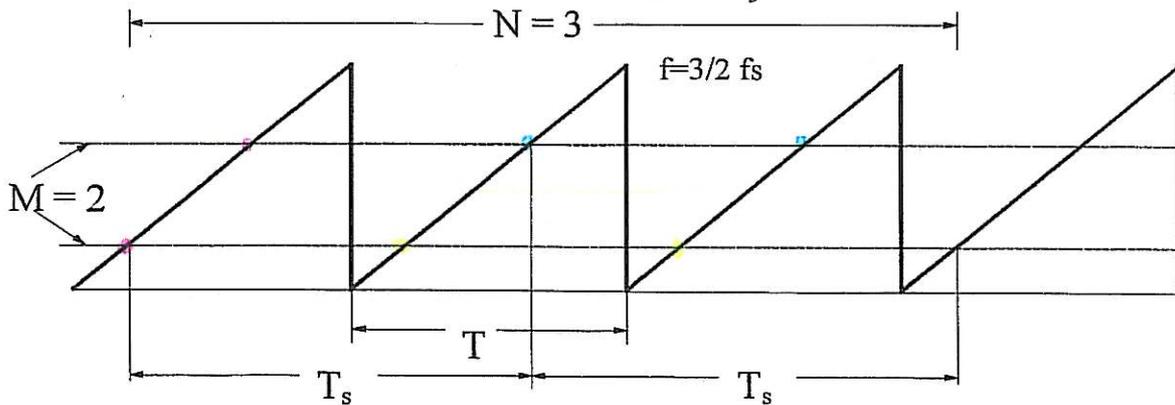


fig. 1.472

questa relazione può essere soddisfatta per più valori di  $N$  e  $M$ . Tuttavia l'occhio riesce a distinguere come persistenti solo le immagini che si presentino con una frequenza non inferiore a circa 10 p/s, ossia per le quali sia:

$$\frac{f_s}{M} \geq 10$$

Se quindi, regolando la frequenza  $f_s$  della sorgente di luce intermittente, si riesce ad ottenere una singola immagine apparentemente ferma ( $M=1$ ), si ha:

$$f = N f_s$$

numero di immagini nel periodo

## CAPITOLO I - Generalità

per evitare ambiguità, nel caso in cui possa esistere incertezza sul valore di  $N$ , ossia quando non è già sufficientemente noto a priori il valore della frequenza da misurare, si diminuisce (od aumenta) gradualmente la frequenza  $f$ , fino al successivo valore  $f'_s$ , per il quale l'immagine appare nuovamente immobile. È allora:

$$f = (N \pm 1) f'_s$$

← periodo del fenomeno in osservazione.

e perciò :

$$f = \frac{\pm f_s f'_s}{f_s - f'_s}$$

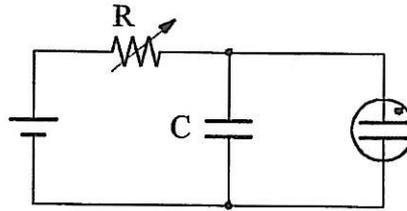


fig. 1.473

Le stesse relazioni valgono naturalmente riportando, anziché le frequenze, i corrispondenti valori del numero di giri e di impulsi luminosi, nell'unità di tempo.

Gli stroboscopi oggi maggiormente in uso si basano su lampi di luce forniti da lampade a scarica (a vapori di mercurio o a gas rari) secondo lo schema di fig. 1.473; la regolazione della costante di tempo RC dà luogo alla frequenza  $f_s$  voluta.

Circuiti più complessi con un generatore indipendente d'impulsi di comando, controllato da un quarzo, consentono una buona precisione ( $\epsilon \approx 0,1\%$ ) nella lettura del valore di  $f_s$  ed anche la sincronizzazione con sorgenti esterne con frequenza da qualche decina a qualche migliaio di periodi al secondo.

L'osservazione stroboscopica consente anche di rilevare irregolarità del moto (pendolazioni, vibrazioni, scorrimenti ecc.) rallentando i fenomeni alla frequenza del moto apparente.

Sistemi stroboscopici molto semplici, con frequenza doppia di quella della rete di alimentazione, si possono realizzare con lampade fluorescenti od anche ad incandescenza, con bassa inerzia termica (lampade a bassa potenza e tensione elevata).

## 1.5 Misure di coppia e di potenza meccanica

### 1.51 Freni e motori di trascinamento

Per assorbire la potenza meccanica prodotta da un motore, si deve disporre un freno, che trasformi tale potenza, generalmente in calore; a seconda del principio utilizzato per la conversione, si distinguono i freni ad attrito, a fluido, elettromagnetici e le dinamo freno.

Nei freni ad attrito, su una puleggia solidale con l'albero motore in alcuni casi semplicemente sulla parte terminale di esso agisce per strisciamento un organo frenante, vincolato alla parte fissa del motore, con la possibilità di una limitata regolazione di posizione. I tipi più semplici sono a cinghia (fig. 1.511) o a ceppi (fig. 1.512); essi sono utilizzabili per velocità angolari non troppo elevate e per potenze modeste, ma possono raggiungere qualche chilowatt con adeguati

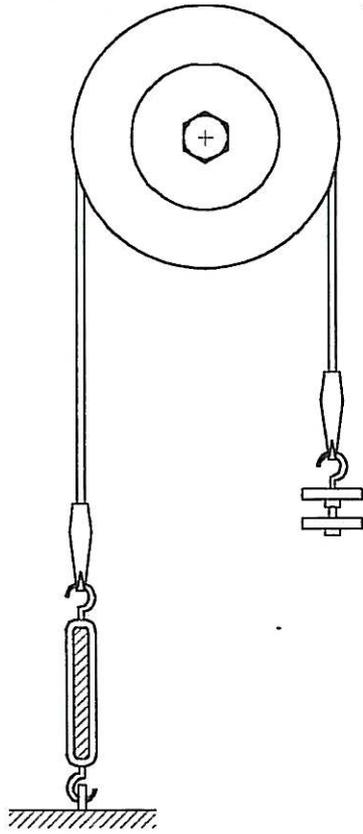


Fig. 1.511

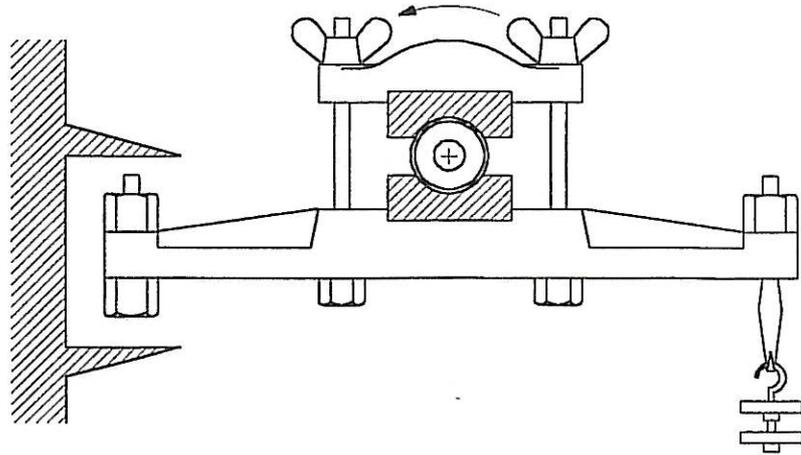


Fig. 1.512

sistemi di raffreddamento; la temperatura della superficie strisciante deve infatti mantenersi entro limiti ristretti, per evitare le variazioni del coefficiente d'attrito.

I freni a fluido funzionano praticamente come pompe che forniscono energia meccanica ad una corrente d'acqua (freni idraulici) o d'aria (mulinelli).

I tipi più semplici sono i mulinelli, particolarmente adatti per motori veloci; essi differiscono da una vera e propria soffiante ad elica, per l'eliminazione della spinta assiale, ottenuta in alcuni tipi mediante pale rettangolari normali al moto (fig.

1.513) in altri con pale orientate alternativamente in sensi opposti (fig. 1.514). La potenza che essi assorbono cresce col cubo della velocità di rotazione, secondo coefficienti che dipendono dalla forma delle pale, dalla loro distanza dall'asse (regolabile nella disposizione di figura 1.513) o dalla loro inclinazione, nel caso di fig. 1.514.

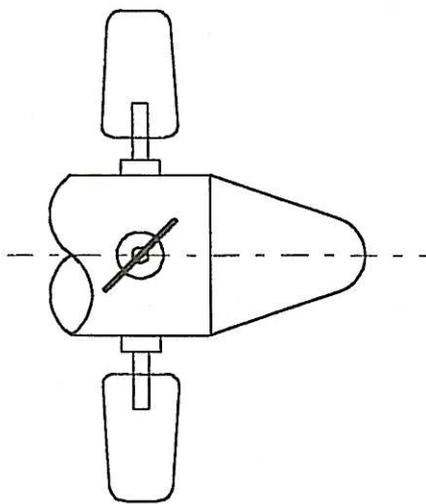


fig. 1.513

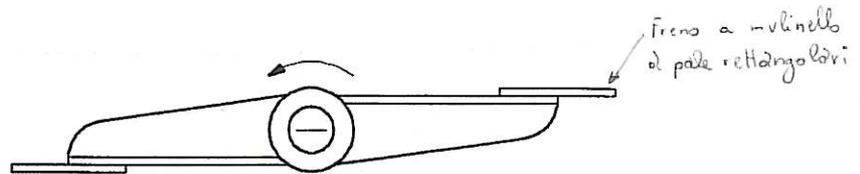


fig. 1.514

Nei freni idraulici, l'energia ceduta all'acqua può essere dissipata all'esterno (per attrito o per caduta libera); più spesso viene dissipata nell'interno del freno stesso, per attrito, ragione per

## CAPITOLO I - Generalità

cui occorre provvedere ad un adeguato raffreddamento, mediante il ricambio dell'acqua (mediamente 25 litri all'ora per kW).

Si hanno diversi tipi costruttivi: il freno Renzi (fig. 1.515) è costituito da uno o più dischi rotanti sottili, muniti di fori o di palette, che ruotano fra dischi fissi; l'acqua è immessa al centro ed estratta attraverso un condotto d'altezza regolabile, che consente, variando lo spessore dell'anello di liquido in rotazione, di variare la potenza assorbita.

Nel freno Froude (fig. 1.516) e suoi derivati, il disco rotante è fornito di cave che risultano più o meno affacciate ad analoghe cave statoriche; la vorticosità che si crea, in senso sia radiale che trasversale, accentua l'effetto frenante. Il controllo della potenza può essere ottenuto anche facendo variare la pressione all'interno della camera.

La regolazione avviene variando la posizione delle cave statoriche, montate su due cuffie mobili, rispetto a quelle di rotore.

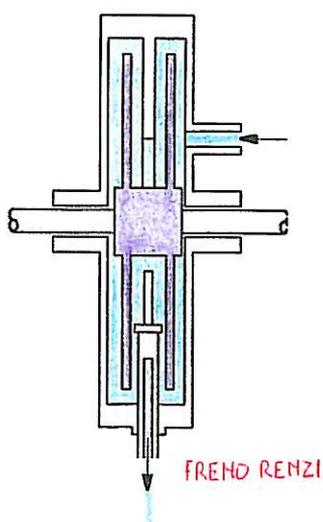


Fig. 1.515

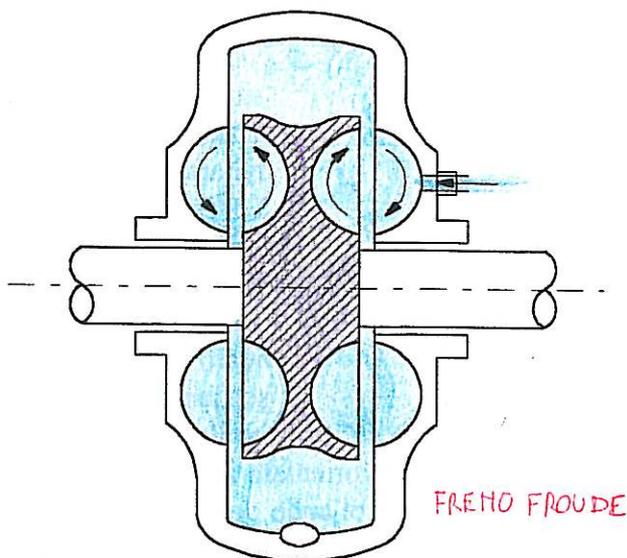


Fig. 1.516

Anche per i freni idraulici la potenza assorbita varia pressoché col cubo della velocità di rotazione; essi si costruiscono normalmente per potenze fino a qualche centinaio di kW, ma esistono realizzazioni speciali con potenza fino a 100 MW, ovviamente dotati di adeguati mezzi per il raffreddamento dell'acqua di circolazione. Le caratteristiche principali sono l'inerzia ridotta e la capacità di frenare grandi potenze in rapporto alle dimensioni.

I freni elettromagnetici più comuni constano (fig. 1.517) di un disco di rame, solidale con l'albero motore, che viene fatto ruotare nel campo prodotto da un elettromagnete; la rotazione dà luogo ad una dissipazione di energia, per effetto delle correnti indotte nel disco; la regolazione della coppia frenante si esegue regolando la corrente di eccitazione dell'elettromagnete. Il sovrariscaldamento del disco ne limita l'impiego a potenze non superiori ai 10 kW; per motori di piccola potenza e molto veloci, possono essere sensibili anche le perdite per ventilazione. Molto problematico risulta il funzionamento prolungato quale quello che può essere necessario per effettuare una prova termica.

Una dinamo freno è, in pratica, una macchina che assorbe energia meccanica e la trasforma in elettrica, dissipandola poi in un resistore o convertendola in altra forma opportuna. Viene generalmente preferita una macchina a corrente continua, che può funzionare in un ampio campo di numero di giri e la cui potenza di uscita può essere regolata agendo sull'eccitazione, che è di solito indipendente.

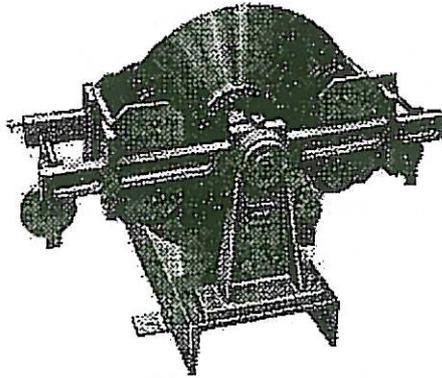


fig. 1.517

Si utilizzano talvolta come freni anche macchine a c.a. a velocità variabile (per esempio tipo Schrage) che restituiscono l'energia assorbita alla rete trifase di alimentazione.

Sia i motori a c.a. a velocità variabile che le macchine a corrente continua possono anche servire come motori di trascinamento per convertire energia elettrica in meccanica e tenere in rotazione macchine generatrici. L'accoppiamento fra macchine motrici ed operatrici avviene preferibilmente mediante giunto in presa diretta; se il montaggio e l'allineamento degli alberi è ben curato, questo sistema dà il moto più regolare ed esente da vibrazioni. L'accoppiamento ad ingranaggi è poco pratico e perciò raramente usato; si utilizza invece talvolta l'accoppiamento con cinghie, che consente, tramite opportune pulegge, il funzionamento delle due macchine nei rispettivi campi di velocità più convenienti. Le cinghie danno però spesso luogo a oscillazioni periodiche nella potenza assorbita, ad irregolarità nei moto ecc..

Molto usati sono recentemente freni del tipo elettromagnetico in cui la coppia frenante viene ottenuta per variazione di riluttanza del circuito magnetico (fig. 1.518). La parte rotante è costituita da un disco di materiale ferromagnetico sagomato a razze le cui estremità ruotano nel campo magnetico prodotto da una bobina alimentata da un generatore di corrente continua regolabile e disposta sulla periferia esterna dello statore. Lo statore è costruito in materiale ferromagnetico massiccio: la pulsazione di flusso che si viene a determinare al passaggio delle razze determina correnti indotte sia a statore che a rotore. Per la particolare realizzazione vengono ad essere privilegiate quelle di statore, dal momento che questo può essere raffreddato ad acqua con maggiore efficienza e riduzione di ingombri. Il limite è dato, oltre che dal sistema di raffreddamento, anche dalla necessità di non raggiungere a rotore la temperatura di Curie per il ferro utilizzato, temperatura che per altro è molto alta ( $\approx 770\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).

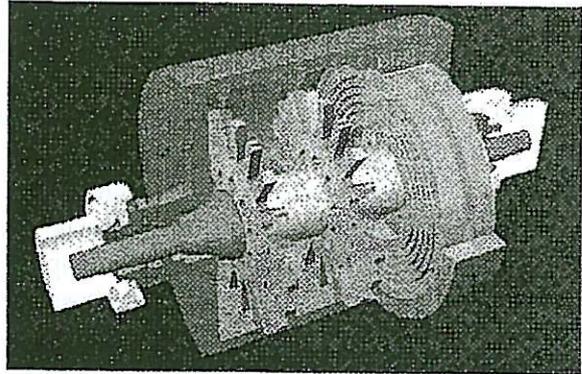
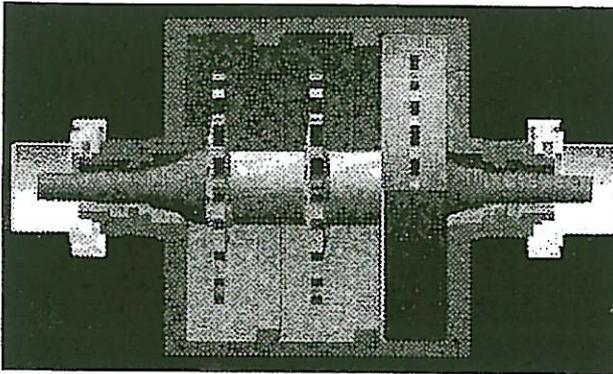
Con questa tecnica si possono ottenere freni con potenze dissipate di qualche centinaio di kW, eventualmente ricorrendo a soluzioni costruttive con rotori multipli affiancati all'interno dello stesso statore; si possono raggiungere comunque potenze intorno al MW con una precisione notevole della regolazione.

Il raffreddamento può essere effettuato con acqua fluente (per le potenze più basse) o con sistemi chiusi e ricorrendo eventualmente ad una torre di raffreddamento per i valori più alti. Le soluzioni costruttive per questi tipi di freno sono spesso tagliate sulle esigenze dei motori a scoppio (bilanciamento del rotore sino a  $12000 \div 18000$  giri, possibilità di collegare al freno il motorino di avviamento etc.): spesso l'alimentatore può essere programmato a funzionare in anello chiuso per realizzare particolari andamenti di coppia (costante o variabile con legge quadratica al variare della velocità, quest'ultima relazione essendo tipica dell'attrito di tipo fluidodinamico su un corpo in movimento). Nell'ambito industriale collegato allo sviluppo, elaborazione e riparazione di motori a scoppio l'uso di freni di questo tipo è molto diffuso: non

DETA ANCHE  
TEMPERATURA  
AUTENTICA

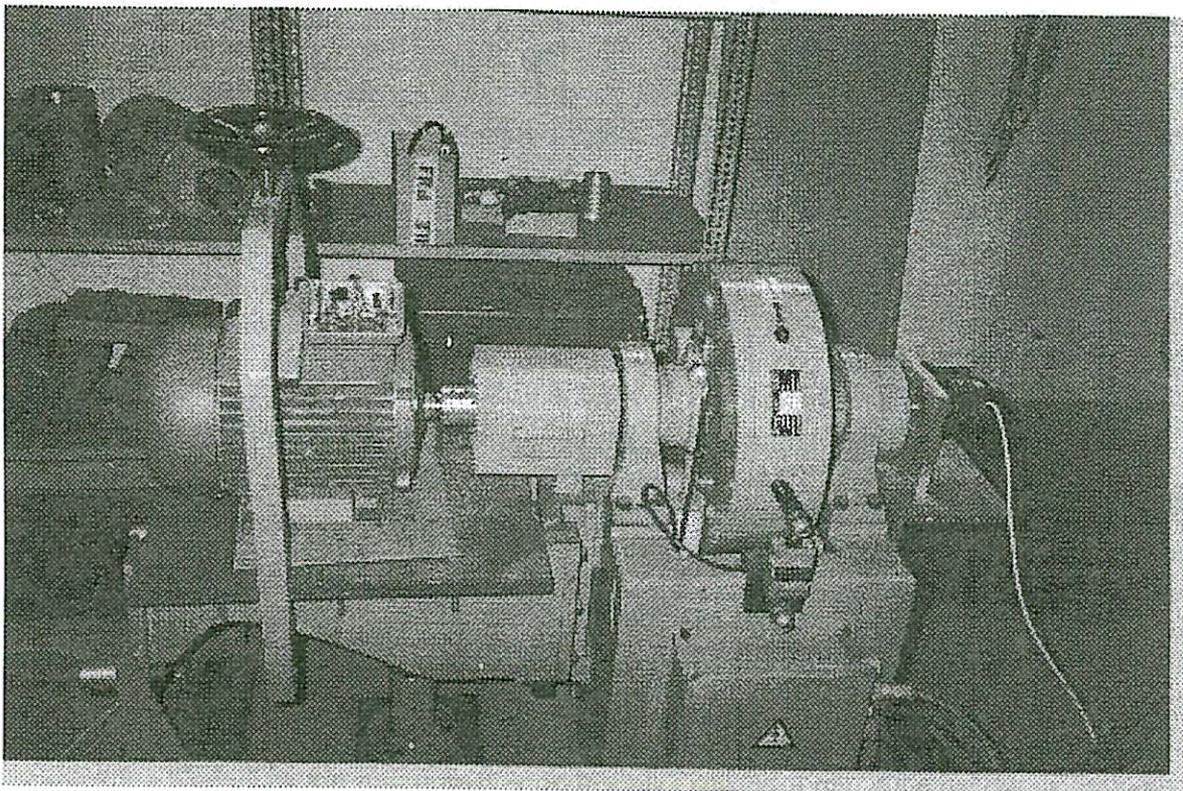
non si pongono problemi di disponibilità di potenza, generata direttamente dal motore in prova e vi sarebbero comunque grossi problemi ad immetterla in rete in modo saltuario per cui si preferisce dissiparla; i freni elettromagnetici di nuova generazione, con le dimensioni ridotte e la facilità di regolazione si adattano perfettamente ai requisiti richiesti.

Per quanto riguarda applicazioni specifiche dei motori elettrici, quali la determinazione della coppia di spunto, è da notare che la maggior parte dei freni sin qui elencati, compreso quello a correnti parassite, non sono in grado di fornirla direttamente perché non si sviluppa alcuna coppia a rotore fermo. Per determinare la coppia di spunto è pertanto necessario bloccare meccanicamente il rotore allo statore e misurare la coppia di reazione che questo viene a sviluppare.

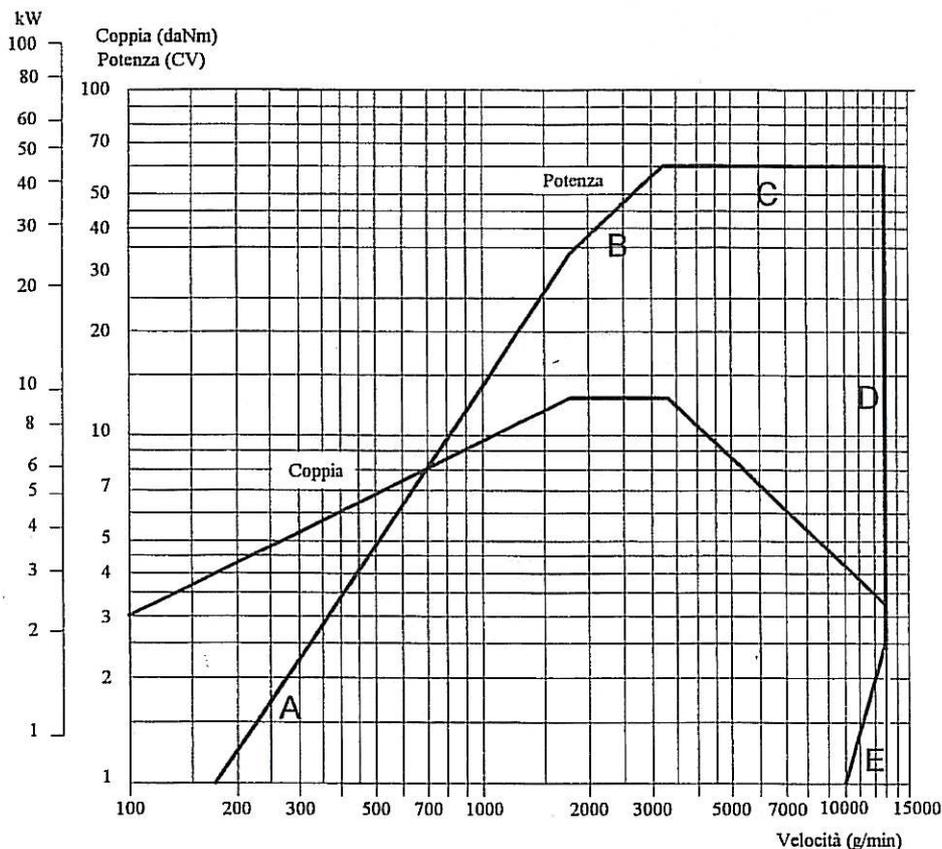


Freno a variazione di riluttanza

fig. 1.518



In Fig. 1.519 sono riportati gli andamenti tipici della coppia e della potenza dissipabile ed i campi in cui un freno può essere utilizzato entro specifiche di incertezza accettabili. La coppia massima ottenibile in corrispondenza della massima corrente di eccitazione dipende ovviamente dalla velocità e con essa la potenza (la dipendenza dalla velocità è tendenzialmente quadratica). E' naturalmente più difficile frenare motori lenti che motori veloci: alle velocità più elevate, con basse potenze, può essere rilevante l'incertezza associata al sistema di misura che, se è dimensionato per le massime coppie che si possono verificare, potrebbe non avere risoluzione sufficiente per le coppie molto basse caratteristiche della zona a bassa potenza ed elevato numero di giri.



- A,B : limite di coppia dovuto all'eccitazione  
 C : limite di potenza  
 D : limite di velocità (cuscinetti, equilibratura)  
 E : limite di sensibilità

fig. 1.519

Un altro tipo di freno usato per potenze abbastanza basse è quello ad isteresi. Il principio costruttivo è illustrato in Fig. 1.520. La bobina crea un campo magnetico nella zona delle espansioni polari in cui si trova una coppa fatta di materiale ferromagnetico. La particolare configurazione magnetizza le parti in senso opposto per cui, se si viene ad avere un moto relativo, nel passaggio da una zona di influenza alla successiva si deve invertire la magnetizzazione con conseguente dissipazione per isteresi. Esiste anche un contributo per correnti parassite che è però modesto. Questo tipo di freno è in grado di fornire una coppia anche da fermo e pertanto non è necessario bloccare meccanicamente il rotore quando si vuol determinare la coppia di spunto. La dissipazione è in massima parte concentrata nella coppa

rotante per cui vi sono limiti collegati alle possibilità di smaltimento (che può essere migliorato con sistemi di raffreddamento forzato). Per il modo con cui nasce l'azione frenante (isteresi), la coppia dipende molto poco dalla velocità di rotazione.

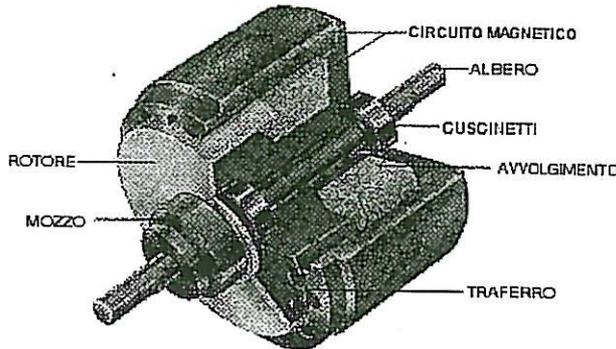


Fig. 1234

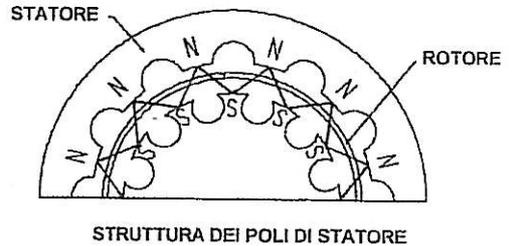


Fig. 1234

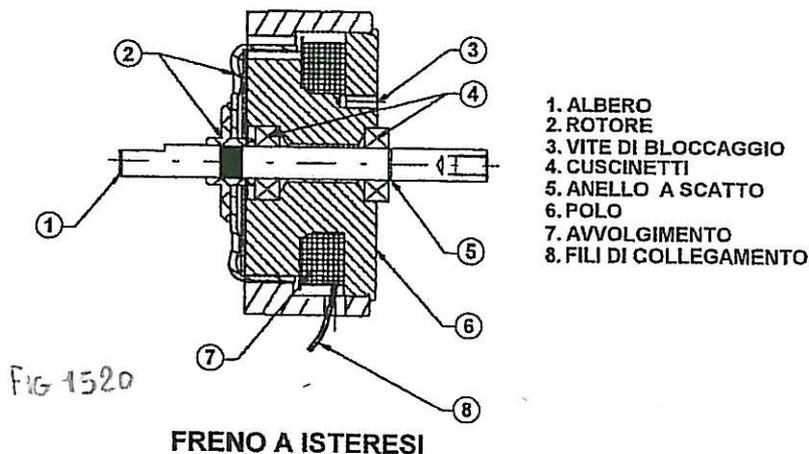


Fig. 1520

FRENO A ISTERESI

Fig. 1234

1.52 Misura della coppia di reazione

In tutti i freni (o i motori), esiste un collegamento (meccanico, idraulico, elettromagnetico) fra la parte rotante e quella fissa, che consente la creazione della coppia resistente (o motrice); per reazione, sulla parte fissa, si esercita una coppia uguale e contraria, che tenderebbe a trascinare lo statore in moto con il rotore. La misura di questa coppia di reazione - misura eseguita su un organo fisso e non su un albero rotante consente di determinare la coppia trasmessa dalla macchina in prova.

A questo scopo, la parte fissa del freno o del motore viene resa libera di ruotare di un piccolo angolo, ed opportunamente contrappesata, a vuoto, in modo da tenerla in equilibrio (fig. 1.521). Tale equilibrio viene ristabilito, in rotazione, spostando della lunghezza L, lungo un braccio, dei pesi p noti. La coppia è fornita dal prodotto:

$$C = pL$$

forza peso per la distanza del polo (braccio)

in kgm, se p è in kg e L in metri.

## CAPITOLO I - Generalità

Per una misura esatta, occorre evitare le coppie che non esercitano la loro reazione sullo statore; per esempio, in una dinamo freno, le coppie dovute all'aria di ventilazione vengono comprese nella misura solo se la macchina è di tipo chiuso.

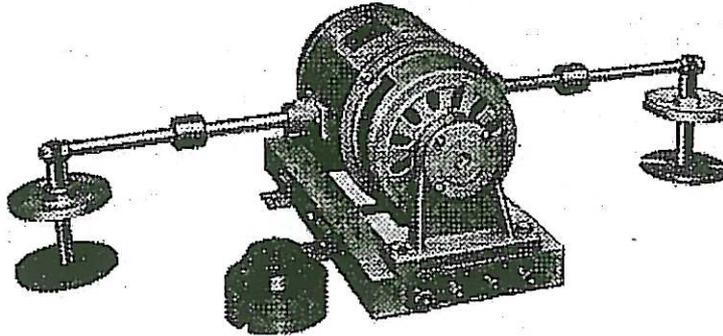


fig. 1.521

Uno dei requisiti più importanti di un dinamometro per la misura della coppia di reazione, è la sua sensibilità, che deve risultare sufficientemente elevata (incertezze dell'ordine di 0,3-0,5%) rispetto alla coppia da misurare; tale sensibilità dipende soprattutto dalle cause di attrito (e perciò spesso anche la parte oscillante è montata su cuscinetti a sfere separati da quelli della parte rotante). Una eccessiva sensibilità rende però il dinamometro di difficile lettura ed influenzato dalle eventuali irregolarità del moto.

Oltre che con il metodo del contrappeso che è un metodo di zero la misura della coppia può avvenire attraverso misuratori di forza, applicati a distanza nota dall'asse; in questo settore si sono avuti tutti gli sviluppi propri dei sistemi di pesatura e le realizzazioni più recenti prevedono l'impiego di celle di carico con possibilità di trattare poi direttamente in forma numerica il segnale ottenuto. La possibilità di applicare dei pesi a distanza nota viene comunque mantenuta perché in questo modo è possibile effettuare una taratura od una verifica dell'intero sistema di misura con riferimento alle unità fondamentali.

Se all'albero è accoppiato anche un trasduttore di velocità (dinamo tachimetrica o ruota dentata) è possibile con semplici elaborazioni ottenere automaticamente anche la potenza.

### 1.53 Torsiometri

La misura della coppia trasmessa da un albero può anche essere eseguita determinando la torsione che un tratto dell'albero stesso, di caratteristiche note, subisce per effetto degli sforzi di torsione. L'angolo di torsione, fra due sezioni a distanza  $L$ , finché le sollecitazioni restano nel limite elastico, è infatti proporzionale alla coppia trasmessa  $C$ :

$$\delta = \frac{L}{GJ} C$$

dove  $G$  è il modulo di elasticità trasversale (dell'ordine di  $8 \cdot 10^3$  kg/m<sup>2</sup> per l'acciaio) e  $J$  il momento d'inerzia della sezione dell'albero ( $J = \pi d^4/32$  per albero a sezione circolare di diametro  $d$ ).

Il tratto dell'albero su cui si esegue la misura può essere rappresentato da un cilindro pieno in acciaio nel caso di coppie elevate fino a ridursi ad una semplice molla di torsione, per motori molto piccoli.

La misura dell'angolo  $\delta$  può essere eseguita con una semplice osservazione stroboscopica di un disco graduato rispetto ad un indice, solidali rispettivamente con l'uno e l'altro estremo del tratto  $L$  (fig. 1.531); si possono usare sistemi fotoelettrici, in cui la luce trasmessa da una sorgente ad una cellula fotoelettrica è intercettata da due dischi, provvisti di fenditure che si sovrappongono quando uno dei due dischi si sposta rispetto all'altro ecc..

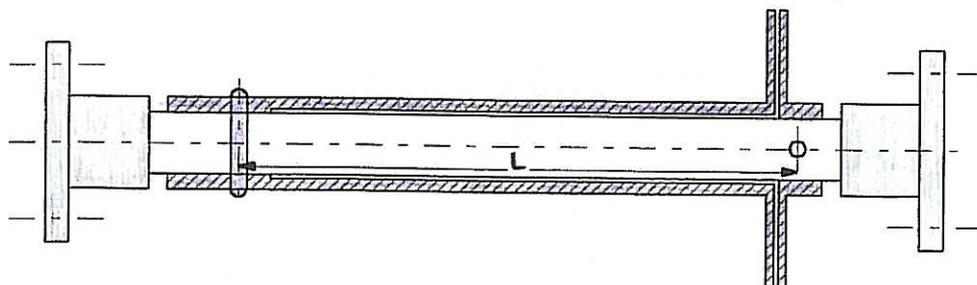


fig. 1.531

Fra i vari metodi elettrici (sonde di posizione, induttive o capacitive) uno dei sistemi più impiegati è costituito da due generatori tachimetrici (fig. 1.532), con  $p$  coppie polari, montati alle due estremità della lunghezza  $L$  considerata; essi producono tensioni di ugual valore  $E$  che, in assenza di coppia trasmessa, risultano fra loro in fase; la loro differenza risulta perciò nulla; in presenza dello spostamento angolare  $\delta$  si ha invece una tensione differenza (fig. 1.533):

$$E_d = 2E \operatorname{sen} p \frac{\delta}{2} \cong Ep\delta$$

La misura del rapporto  $E_d/E$ , con uno strumento a bobine incrociate, o dell'integrale di  $E_d$  nel tempo ( $E_d$  ha modulo e frequenza proporzionali alla velocità angolare) consentono di risalire al valore della coppia.

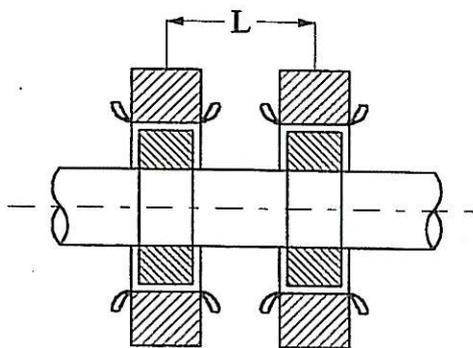


fig. 1.532

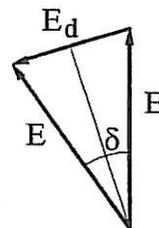


fig. 1.533

Altri metodi sfruttano la variazione di permeabilità magnetica con la deformazione meccanica (fenomeno inverso della magnetostrizione). I metodi più semplici usano giunti di materiali speciali in cui tale effetto è notevole (leghe invar), per formare il circuito magnetico di bobine d'induttanza, inserite in un ponte in c.a. che si squilibra in seguito alla torsione.

Utilizzando lo stesso fenomeno, che è presente anche nei comuni acciai, si possono realizzare dei misuratori di coppia, da montare su un albero rotante senza doverlo modificare. Benché essi possano assumere forme costruttive diverse, il principio di funzionamento è illustrato nella

## CAPITOLO I - Generalità

disposizione di fig. 1.534. Accostando alla superficie dell'albero le espansioni A,B di un elettromagnete, alimentato in c.a., questo chiude il suo flusso interessando l'albero stesso. In condizioni di isotropia, fra i punti C,D non esiste tensione magnetica; se invece l'albero è sottoposto a torsione, la permeabilità aumenta nella direzione della sollecitazione a trazione e diminuisce nella direzione normale, che è soggetta a compressione. Nasce perciò fra i punti C,D una tensione magnetica che può essere rivelata da un avvolgimento disposto fra C e D, montato su un opportuno nucleo ferromagnetico.

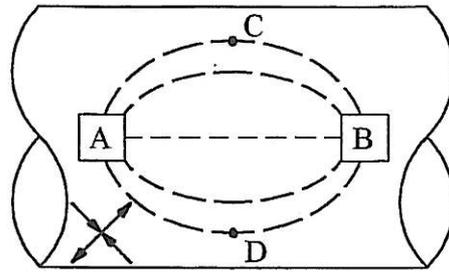


fig. 1.534

Si ottiene così in uscita una tensione, che può essere dell'ordine di alcuni volt, indipendente - entro certi limiti - dalla velocità di rotazione. Le caratteristiche del materiale che costituisce l'albero - in particolare

Le sue proprietà meccaniche e l'isteresi magnetica possono influenzare la misura; tuttavia in questo, come negli altri dispositivi simili, la taratura può essere facilmente eseguita in condizioni statiche.

Esistono metodi basati sull'impiego di estensimetri per la determinazione dello stato di sollecitazione dell'albero; l'alimentazione del ponte può essere effettuata con spazzole e contatti striscianti, con le limitazioni tipiche di questo sistema, o mediante un trasformatore rotante del tipo indicato in figura; un adeguato oscillatore operante a frequenze di qualche kHz alimenta lo statore del trasformatore il cui secondario è montato sull'albero. Analogamente il segnale prelevato dalla seconda diagonale viene trasferito al secondo avvolgimento di statore e da questo al rivelatore (fig. 1.536).

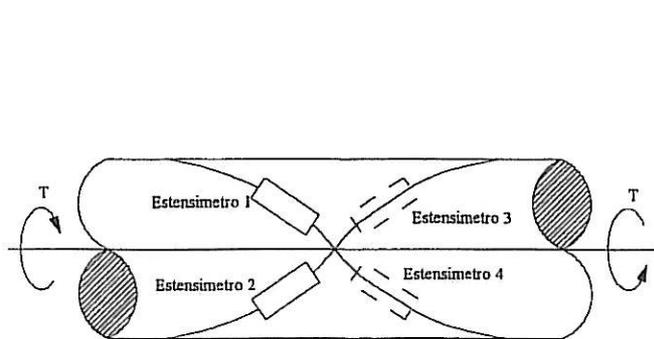


Fig. 1.535

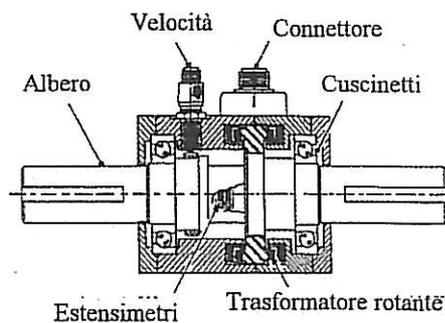


Fig. 1.536

Particolare cura deve essere posta nei montaggi dei torsimetri perché la necessità di riprodurre fedelmente le coppie, anche in condizioni dinamiche, impedisce tipicamente l'impiego di giunti elastici: per evitare danni ai cuscinetti l'allineamento degli alberi deve essere molto spinto.

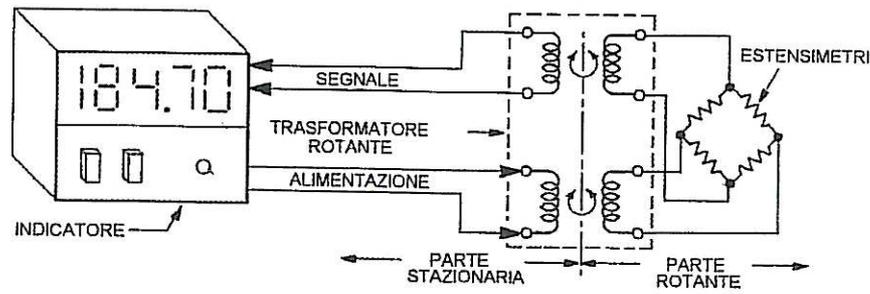


fig. 1.536

1.54 Metodi di accelerazione e rallentamento

Quando una macchina ruota con velocità angolare  $\omega$  variabile nel tempo, per l'equilibrio delle coppie, si ha:

(1.541)

$$J \frac{d\omega}{dt} + C_p = C_m$$

essendo  $J$  il momento d'inerzia della parte rotante,  $C_p$  la coppia frenante dovuta alle varie cause di perdite,  $C_m$  la coppia motrice. Dalla (1.541) discende un semplice metodo per la misura della coppia utile  $C_u$  di un motore (metodi di accelerazione):

$$C_u = C_m - C_p = J \frac{d\omega}{dt}$$

ovvero della coppia frenante dovuta alle perdite (metodo di rallentamento):

$$C_p = -J \frac{d\omega}{dt}$$

in assenza di coppia motrice.

Per il primo metodo, si avvia il motore, registrando i valori della sua accelerazione angolare  $dn/dt$ , per vari valori della velocità di rotazione  $n$ ; la coppia utile può così essere determinata per i diversi valori di  $n$  desiderati. Nel secondo metodo si porta il motore in rotazione a velocità superiore a quella per cui si vuole determinare la coppia frenante, e si misura la  $dn/dt$  durante il rallentamento. Questi metodi sono particolarmente applicabili nel caso di macchine con periodo di avviamento o rallentamento sufficientemente lungo.

*accelerazione angolare.*

La determinazione della  $dn/dt$  può farsi, in primo luogo, misurando la velocità angolare in più istanti successivi e ricavandone la derivata graficamente (fig. 1.541); in altri casi, il segnale di uscita di una dinamo tachimetrica viene differenziato con un circuito RC e misurato direttamente o registrato oscillograficamente. Per ricavare il valore della coppia incognita, è necessario conoscere il valore del momento d'inerzia  $J$  della parte rotante, rispetto al suo asse. Esso è talvolta dato dal costruttore o valutato sui dati geometrici e fisici della macchina (o

meglio è indicato, di consuetudine, il  $PD^2 = 4 J)^1$ ; può essere anche determinato dal periodo proprio di oscillazione del rotore, con metodi adatti però solo alle piccole macchine; può infine essere ricavato da una ulteriore prova di accelerazione o rallentamento, quando sia aggiunta una coppia frenante nota.

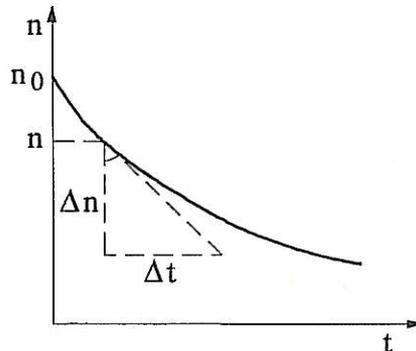


fig. 1.541

1.55 Misura di potenze meccaniche

La potenza meccanica trasmessa da un albero in rotazione si ricava dai valori della coppia C trasmessa e dalla velocità angolare  $\omega$ , dalla relazione:

(1.551)

$$P = C\omega;$$

se, anziché le unità SI, si utilizzano per le coppie i kgm e per le velocità i giri al minuto, la potenza in watt risulta espressa dalla:

(1.552)

$$P = 1,03 Cn.$$

Per la misura della potenza P possono essere impiegati separatamente i vari metodi di misura di coppie e di velocità di rotazione, illustrati nei precedenti paragrafi. In alcuni casi è possibile ottenere direttamente una combinazione delle due misure tale da dare un'indicazione

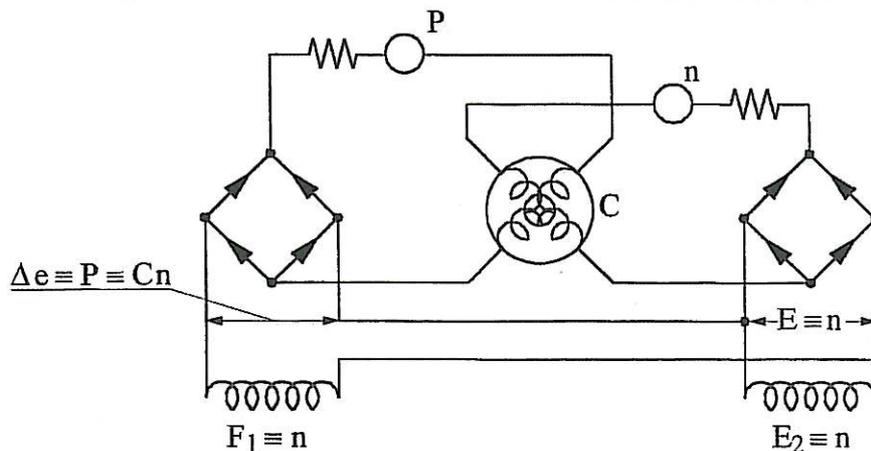


fig. 1.551

<sup>1</sup>  $PD^2$ , con P peso del sistema e D diametro d'inerzia, viene detto momento dinamico. Se viene espresso in [kg forza · m<sup>2</sup>] vale la relazione indicata dato che il momento d'inerzia  $\xi$ , in unità SI, [kg massa · m<sup>2</sup>] e quindi, dal punto di vista numerico, peso e massa si equivalgono. Se invece  $PD^2$  viene dato in unità SI si ha:  $PD^2 = 4gJ$ .

## CAPITOLO I - Generalità

proporzionale a P.

La fig. 1.551 mostra una tale combinazione, che utilizza due generatori tachimetrici, montati a distanza L su un albero.

Altri metodi diretti per la misura della potenza sono quelli del motore tarato e quello calorimetrico.

### 1.56 Metodo del motore tarato CALCOLO DELLA POTENZA

La potenza richiesta da una macchina, per essere mantenuta in rotazione, può essere determinata, anziché sull'albero, sul motore di trascinamento, quando ne sia noto il rendimento; questo metodo, come si vedrà in seguito, può applicarsi convenientemente alla misura sia delle perdite meccaniche che di quelle di origine elettrica nelle macchine rotanti. In generale, si usa come motore di trascinamento un motore a corrente continua, per la facilità di regolarne la velocità e la potenza entro ampi limiti; l'eccitazione è mantenuta separata, in modo che la potenza di eccitazione non sia compresa nel computo del rendimento; anche altri avvolgimenti di eccitazione serie possono essere esclusi dalla misura, con lo schema di fig. 1.561.

Le altre perdite del motore, nelle condizioni di funzionamento (tensione, corrente, numero di giri) devono essere note, in modo da poter assegnare al motore il valore più prossimo al vero del suo rendimento; se sono possibili condizioni diverse di alimentazione dovrebbero essere privilegiate quelle in cui sono prevalenti le perdite fisse rispetto a quelle dipendenti dalla temperatura (tensione più alata possibile in modo da avere poca corrente e quindi minor influenza della variazione di resistenza dell'avvolgimento o della caduta sulle spazzole)

in tal caso, la potenza meccanica P fornita sull'albero vale:

$$P_m = \eta VI$$

e si ricava dalle letture di tensione e di corrente e dal controllo del numero dei giri.

Il metodo è particolarmente conveniente e preciso nella misura delle potenze perse dalle macchine rotanti, in quanto il motore di trascinamento risulta di potenza pari a qualche per cento della potenza nominale della macchina in prova; eventuali errori nella determinazione delle perdite del motore di trascinamento risultano così di secondo ordine nel calcolo del rendimento della macchina in prova.

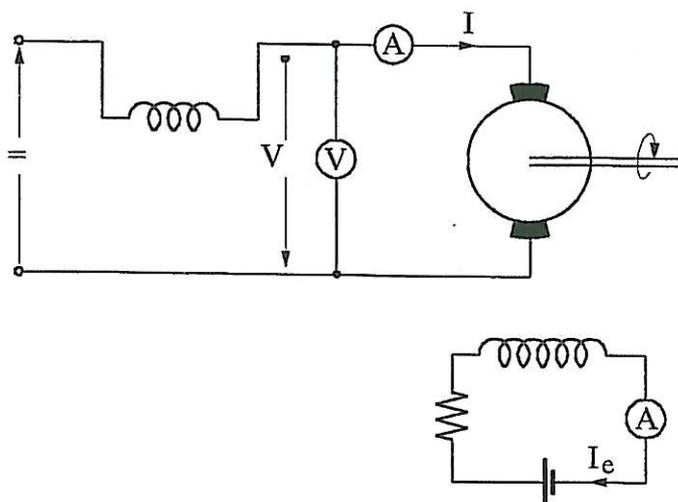


fig. 1.561

## CAPITOLO I - Generalità

Il diverso ordine di grandezza delle due macchine può invece introdurre incertezze nella misura della potenza elettrica d'ingresso, che comprende anche gli scambi di energia cinetica dovuti a variazioni, anche piccole, di velocità di rotazione del complesso. È pertanto necessario mantenere tale velocità il più possibile uniforme, ed eseguire più letture, specie della corrente assorbita dal motore.

Se invece il motore di trascinamento ha potenza dello stesso ordine di grandezza di quella della macchina in prova, conviene farlo funzionare a tensione prossima alla nominale e a corrente ridotta, limitando così le perdite dovute alla corrente di carico, perdite che per la presenza di spazzole, per gli effetti delle perdite addizionali ecc., sono di più incerta valutazione.

### 1.57 Misura delle perdite con metodo calorimetrico

La determinazione di una potenza, sia meccanica che elettrica, può eseguirsi, in linea di principio, trasformandola in calore e misurando le variazioni di energia termica del fluido di raffreddamento. Questo metodo è, in genere, meno preciso degli altri, specie per piccole potenze, poiché a parte la precisione propria delle misure termiche è difficile convogliare tutto il calore prodotto in un unico fluido refrigerante; esso può però essere preferibile nei casi in cui sia già naturalmente disposto il raffreddamento, per dissipare potenze dell'ordine delle decine o centinaia di kW. Esempi tipici sono le misure di perdite nei supporti dei grossi turboalternatori che sono predisposti a circolazione d'olio o nei grossi reattori in serie o in derivazione che hanno fattori di potenza estremamente bassi e raffreddamento forzato.

Il metodo si basa sulla misura del flusso termico del fluido refrigerante, ad equilibrio raggiunto, secondo la semplice relazione:

$$P = c Q \Delta\theta$$

in cui  $c$  è il calore specifico (J/kg°C) del fluido impiegato,  $Q$  la portata in peso (kg/s) e  $\Delta\theta$  il suo salto di temperatura fra entrata e uscita. Per l'acqua è  $c = 4,18 \cdot 10^3$ , per l'olio  $c = 1,88 \cdot 10^3$ ; più complesso è il calcolo del calore specifico per i gas, poiché esso varia con la temperatura.

La misura della portata può essere eseguita, molto semplicemente riempiendo, per un tempo noto, un contenitore che viene poi pesato; per le misure di maggior precisione si ricorre a contatori di portata la cui indicazione, che è in unità di volume, deve poi essere moltiplicata per il peso specifico, alla temperatura media di utilizzazione. Anche per la misura della portata, i liquidi sono da preferirsi ai gas, che richiedono attrezzature più complesse e meno precise.

La differenza di temperatura viene misurata con opportuni termometri o, preferibilmente, direttamente come squilibrio di due sonde termometriche poste rispettivamente in entrata e in uscita e facenti capo ad un circuito potenziometrico (sonde termoelettriche) o ad un ponte di Wheatstone (sonde resistive). Grande cura deve essere posta, dati i limitati valori del salto termico, normalmente in gioco, nel misurare la temperatura media del fluido, favorendovi il rimescolamento dei vari filetti, prima delle sezioni di misura.

L'impiego del metodo presuppone che il sistema sia a regime termico e che non scambi altro calore con l'ambiente esterno. Ogni superficie disperdente fra l'esterno e la macchina in prova o il tratto di circuito di raffreddamento interessato alla misura, deve essere possibilmente isolato termicamente con adeguate coperture (in feltro, lana di vetro ecc.). La correzione dovuta al calore disperso all'esterno può anche essere valutata dai valori delle superfici interessate e dalla loro temperatura, tenendo conto di un opportuno coefficiente di trasmissione del calore ( $10 \div 12 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$ ); data l'incertezza di questo coefficiente è opportuno che la correzione sia piccola, rispetto alla potenza da misurare.

## CAPITOLO I - Generalità

1.6 Condizioni ambientali

## 1.61 Definizione delle condizioni ambientali

Diverse caratteristiche delle macchine o degli apparecchi elettrici risultano influenzate dalla temperatura, pressione, umidità o, in generale, dallo stato dell'atmosfera circostante; basta pensare alla possibilità di smaltimento del calore, alla tensione di scarica di un isolatore ecc.. Non è sempre possibile effettuare delle correzioni per riportare i valori misurati a condizioni di riferimento ma, comunque, si dovrebbe almeno prendere nota comunque delle condizioni che potenzialmente possono avere un effetto anche per consentire il confronto nel caso di prove ripetute in condizioni diverse.

È quindi in generale buona norma pratica il rilevare, prima di ogni prova, almeno la temperatura dell'ambiente, che è la grandezza che ha, generalmente, maggior influenza sul comportamento sia degli strumenti che degli oggetti in prova. Nel caso di prove particolari come ad esempio le prove di tensione in aria ecc. i valori delle condizioni ambientali devono essere misurati con la dovuta cura, seguendo le modalità e le prescrizioni indicate nelle norme, come sarà accennato in seguito.

Tuttavia bisogna tener presente che anche i processi termici ed in particolare la convezione naturale sono influenzati dalla densità dell'aria per cui, di solito, si ritiene che i dati siano validi per macchine installate sino a 1000 m di altezza. Per altitudini superiori si tratta di valutare sia la tenuta dielettrica che le stesse possibilità di smaltimento termico.

Lasciando da parte le misure di temperatura, per le quali si rimanda al cap. 3°, si farà qui un breve cenno alle più usuali misure di pressione e di umidità atmosferica; per le misure in condizioni particolari (per esempio in celle di condizionamento) l'apparecchiatura di misura sarà ovviamente più complessa.

1.62 Misura della pressione atmosferica

La pressione atmosferica è, fra le condizioni ambientali, la più semplice da definire e misurare, in quanto essa è praticamente uniforme in un ambiente, anche di dimensioni considerevoli, in assenza di rilevanti moti di aria.

La misura si esegue con un barometro, che può essere del tipo a mercurio o metallico. Il barometro a mercurio è formato, com'è noto, da un tubo di vetro verticale, chiuso all'estremità superiore, in cui è fatto il vuoto; esso comunica, all'altro estremo, con una vaschetta contenente mercurio (fig. 1.621); la pressione atmosferica agente sulla vaschetta fa equilibrio il peso della colonna di mercurio.

Per misure di precisione l'altezza della colonna di mercurio deve essere ridotta a 0°C; la correzione (-0,16‰ °C) risulta dell'ordine di 2-3 mm., ai normali valori di pressione e temperatura.

Ricordiamo che la pressione, espressa in mmHg, può essere riportata in unità SI (Pascal), moltiplicandone il valore per 133,3 (760 mm Hg = 101,3 kPa).

I barometri metallici si basano invece sulla misura della deformazione di un recipiente metallico, in cui è stato fatto internamente il vuoto; la loro precisione è limitata ma, in generale, sufficiente per le misure correnti.

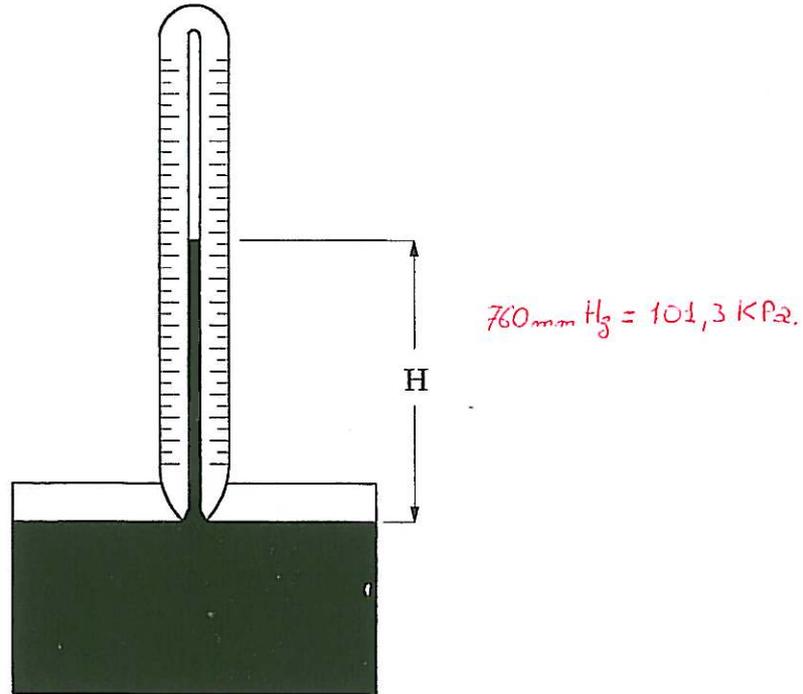


fig. 1. 62 1

### 1.63 Misure di umidità

Nell'aria atmosferica è sempre presente una certa quantità di vapor d'acqua, quantità che può essere espressa dalla massa di vapore per metro cubo di aria, in determinate condizioni di temperatura e di pressione (umidità assoluta).

Torna però spesso comodo rapportare tale valore  $m$  alla massa  $m_0$  che si troverebbe nello stesso volume d'aria in condizioni di saturazione (umidità relativa); il valore di  $m_0$  può essere determinato in funzione della sola temperatura ambiente, mediante l'uso di apposite tavole o diagrammi (fig. 1.631); l'umidità relativa, espressa in percento, è perciò data da:

$$u = \frac{m}{m_0} \cdot 100$$

Per la misura di  $m$  si possono usare igrometri (o psicrometri) a condensazione o ad assorbimento.

Le misure sono sempre piuttosto delicate; la presenza stessa dell'operatore può alterare lo stato d'umidità intorno all'apparecchio di misura; se vi sono differenze di temperatura fra un punto e l'altro dell'ambiente - per effetto ad esempio di sorgenti di calore o di pareti fredde - le condizioni di umidità possono variare sensibilmente da un punto all'altro.

Particolarmente difficile è la realizzazione di condizioni con umidità molto alta (sopra il 90%), soprattutto se si impone la condizione che non vi sia condensazione: bastano differenze di temperatura di pochi decimi di grado perché questo sia vanificato.

Di norma, durante una prova, occorre far attenzione affinché il pezzo in prova non abbia temperatura molto diversa, in particolare più bassa, dell'ambiente, per evitare su di esso condensazioni d'umidità: l'effetto è particolarmente sensibile per le superfici isolanti per le quali si verrebbe a stabilire una distribuzione del potenziale intermedia tra quella governata dalle costanti dielettriche e quella delle resistività, con effetti talora imprevedibili.

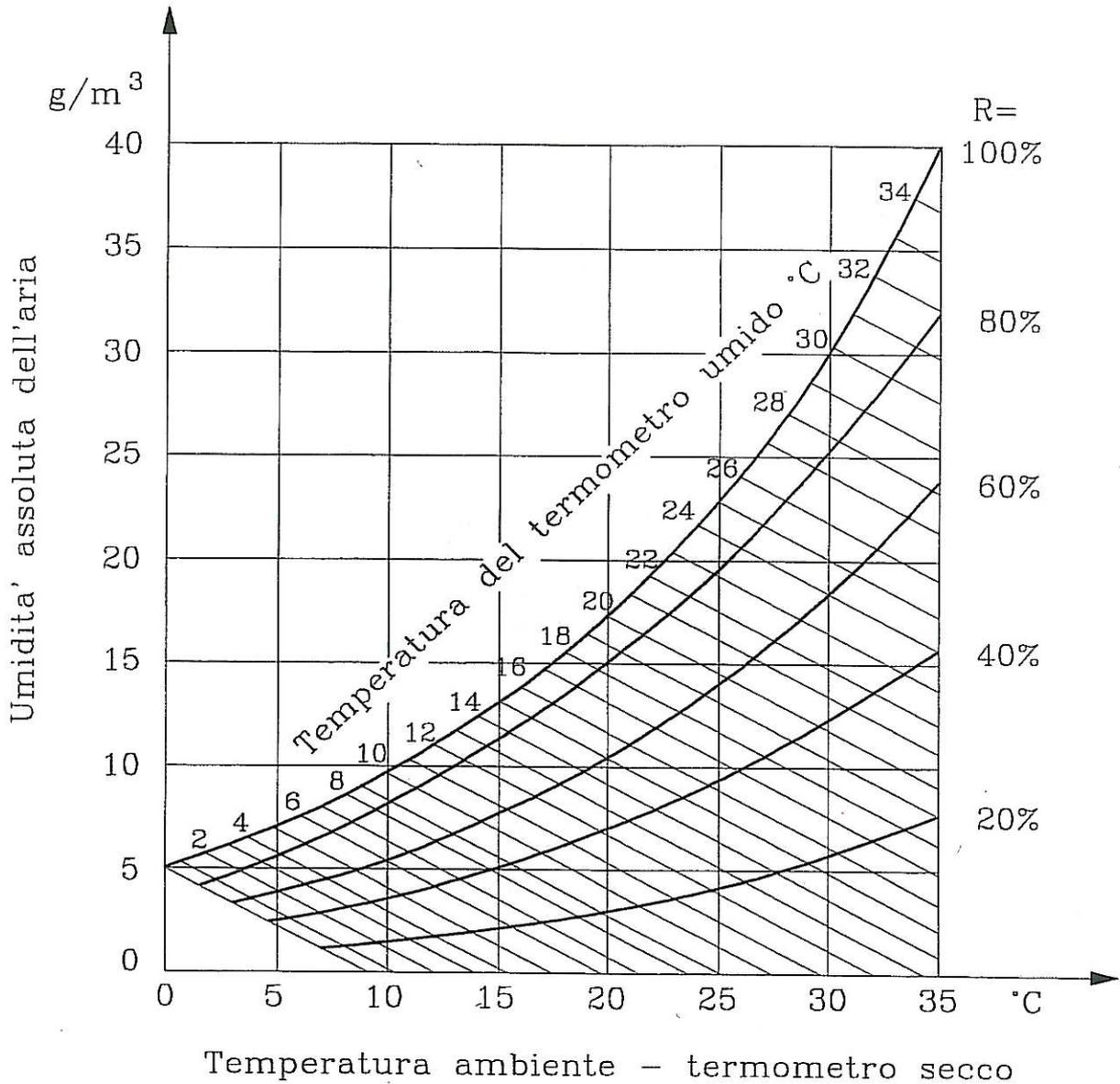


fig. 1.631

### 1.64 Igrometri

Il principio degli igrometri a condensazione è quello di misurare l'abbassamento di temperatura necessario alla saturazione e condensazione del vapor acqueo presente nell'aria ambiente; tale tipo di igrometro è preciso ma di uso piuttosto delicato e viene utilizzato praticamente solo per la taratura di altri strumenti.

Più semplice, anche se meno preciso, è l'igrometro a calza; in esso si hanno due termometri (fig. 1.641) uno con il bulbo libero, l'altro coperto da una calza di tessuto, parzialmente immersa in acqua, che lo mantiene bagnato. Investito da una corrente d'aria, il termometro a bulbo bagnato indica una temperatura  $t_b$  inferiore a quella  $t_a$  del termometro asciutto, per effetto dell'evaporazione dell'acqua dalla calza.

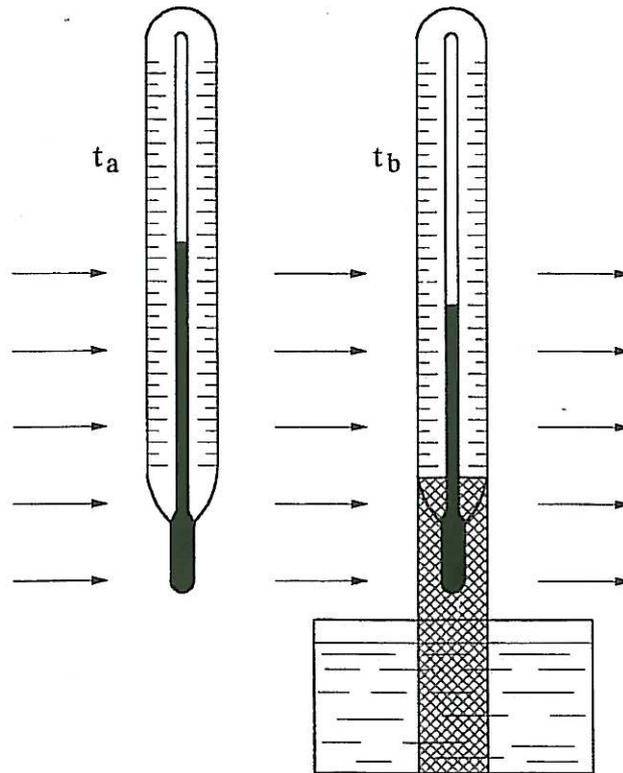


fig. 1.641

Dai valori di  $t_a$  e della differenza  $(t_a - t_b)$ , in base ad alcune ipotesi semplificative, è possibile ricavare il valore dell'umidità contenuta nella corrente d'aria che investe i termometri. I valori sono dati in tabelle, per i singoli apparecchi.

Con buona approssimazione i valori di umidità assoluta  $h$  si possono ottenere dalle letture dei termometri a bulbo asciutto e bagnato  $t_a$  e  $t_b$  e del barometro ( $b$  – espresso in kPa) usando la seguente formula semplificata:

$$h = \frac{1322 \cdot \exp\left[\frac{17,3t_b}{237 + t_b}\right] - 1,4(t_a - t_b)b}{273 + t_b}$$

*h = umidità assoluta*

Molta importanza, sui valori indicati, può avere la velocità della corrente d'aria che deve essere mantenuta al di sopra di un limite minimo (in genere 2 m/s) con l'ausilio di ventilatori. Il dispositivo può essere reso più compatto se la sonda contiene, anziché due termometri a mercurio, come in figura, due trasduttori elettrici di temperatura (per esempio due termistori, vedi 3.25).

Assai diffusi nell'uso pratico sono gli igrometri ad assorbimento, che si basano sull'allungamento che delle fibre subiscono per effetto dell'umidità relativa (igrometri a capello). L'allungamento, opportunamente amplificato con dispositivi meccanici, comanda il movimento dell'indice su una scala graduata e tarata.

La pressione e l'umidità atmosferica sono, insieme alla temperatura, le grandezze fisiche meglio definite e misurabili per rappresentare le condizioni ambientali. Vi sono però molti altri parametri, che possono influire sul funzionamento di linee od apparecchiature elettriche, spesso di meno facile definizione o misura.

## CAPITOLO I - Generalità

La velocità del vento può, ad esempio, essere determinata abbastanza facilmente mediante anemometri; essi sono sostanzialmente dei mulinelli la cui velocità di rotazione sta in rapporto ben definito con la velocità del vento; anche la misura della direzione del vento non comporta particolari difficoltà. L'influenza del vento è abbastanza ovvia nel caso di strutture meccaniche (compresi i conduttori delle linee aeree). Sono state notate influenze apprezzabili anche nel caso di archi in aria, il cui allungamento può essere condizionato dalla direzione e dall'intensità del vento.

Vari sistemi sono stati ideati per la misura dell'intensità della pioggia (in millimetri di precipitazione, per unità di tempo che possono andare dal minuto alla giornata, secondo le necessità della misura). Essi constano generalmente di aperture di sezione nota attraverso cui si raccoglie l'acqua piovana facendola pervenire ad un recipiente graduato o ad un dispositivo che ne registra il volume.

Le prove sotto pioggia sono fondamentali per verificare la tenuta degli isolamenti esterni e, di fatto, condizionano la forma degli isolatori e la loro alettatura (che non sarebbe necessaria per installazioni all'interno). L'effettuazione di prove ripetibili presuppone la realizzazione di un sistema di ugelli in grado di bagnare in modo uniforme l'oggetto in prova: il requisito è tanto più complicato quanto più grande è lo stesso oggetto. Il laboratorio deve essere ovviamente provvisto di scarichi a pavimento ed avere dimensioni adeguate per accogliere tutte le apparecchiature necessarie. L'acqua, che può provenire dalla rete idrica, deve essere trattata per assicurare la necessaria resistività come indicato di seguito. La prova è considerata di tipo, per cui può essere effettuata solo su un campione.

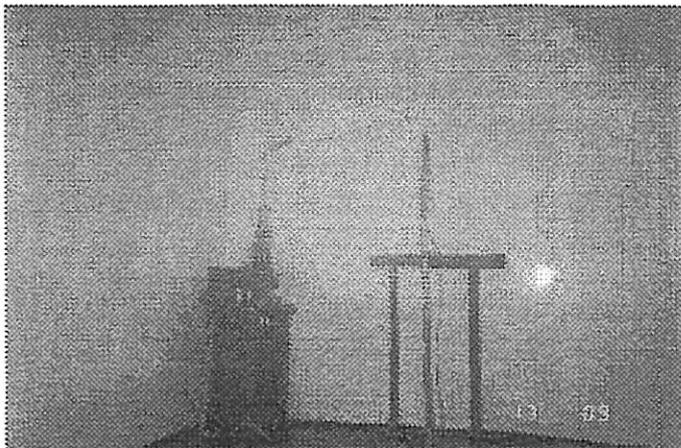
Le modalità di prova e l'intensità della precipitazione sono indicate nella Tabella seguente.

<i>Valore medio della precipitazione su tutte le misure</i>	
- componente verticale	da 1 a 2 mm/min
- componente orizzontale	da 1 a 2 mm/min
Limiti per ogni singola misura e pe ogni singola componente	$\pm 0,5$ mm/min dalla media
Temperatura dell'acqua	Temperatura ambiente $\pm 15$ °C
Resistività dell'acqua	$100 \pm 15$ $\Omega\text{m}$

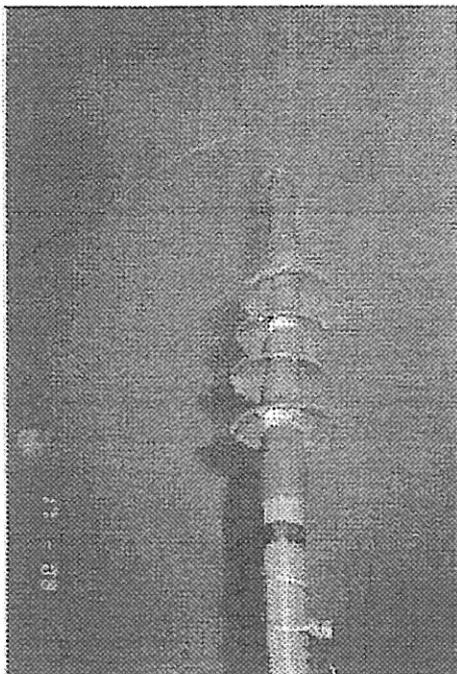
La misura della precipitazione viene effettuata con un contenitore avente due camere con due aperture di uguale sezione (una laterale ed una superiore) che consente di raccogliere l'acqua dalle due direzioni ortogonali. Le quantità dovrebbero essere sostanzialmente uguali. Va verificata la costanza del tasso di precipitazione ad altezze diverse lungo i supporti isolanti, soprattutto se questi sono di grosse dimensioni.

Assai difficile è invece dare delle misure quantitative della precipitazione nevosa (la cui densità è molto variabile), del grado di nebbia, dell'intensità del deposito di rugiada, della presenza di pulviscolo atmosferico, in generale dannoso agli isolamenti superficiali, e così via. Molto spesso si usano, per tali grandezze, metodi di confronto; occorre pertanto osservare con cura il significato di una simile misura prima di poterla mettere in relazione con altre, eseguite in altre località o con modalità diverse.

Per la definizione del tipo di prove è importante conoscere l'ambiente in cui avviene l'installazione: climi tropicali (alte temperature ed umidità) o molto freddi possono porre problemi, anche se di tipo diverso. In entrambi i casi ci possono essere problemi di condensa quando vi sono variazioni di temperatura e la cosa è più critica se vi sono delle apparecchiature elettroniche, come accade ormai comunemente.



Camera a nebbia salina



Terminale di cavo in prova

Nei climi freddi è spesso sufficiente riscaldare l'ambiente con adeguati resistori, inseriti da un dispositivo di controllo dell'umidità relativa; nei climi caldi questo tipo di intervento spesso non è possibile perché occorrerebbe arrivare a temperature non compatibili con il corretto funzionamento dell'elettronica.

La prova in nebbia salina tende a valutare la capacità di un sistema isolante di funzionare in un ambiente contaminato da presenza di sale, come in prossimità delle coste; viene anche utilizzata per la simulazione dei contaminanti industriali.

Nelle figure che seguono vengono illustrate una camera a nebbia con il trasformatore di alimentazione e la situazione di un terminale di cavo dopo la prova, superata con successo. Si nota come sotto le alette vi siano consistenti depositi di sale.

Molto spesso si usano, per tali grandezze, metodi di confronto; occorre pertanto osservare con cura il significato di una simile misura prima di poterla mettere in relazione con altre, eseguite in altre località o con modalità diverse.

Non sono assolutamente da sottovalutare le prove di tipo meccanico che spesso, anche per apparecchiature elettriche, costituiscono l'aspetto più critico, come ad esempio per i sezionatori; in questo caso si tratta di verificare che le forze o le coppie necessarie per la manovra non varino in modo considerevole nel corso delle manovre che vengono effettuate. Un aspetto che viene verificato è anche la resistenza del circuito principale, per analizzare il comportamento dei contatti all'usura.

La simulazione del funzionamento in condizioni di ghiaccio e la necessità di stabilire il contatto con sicurezza sono fondamentali elementi per garantire un funzionamento affidabile per stazioni che spesso sono telecomandate.

Considerazioni molto specialistiche richiede la simulazione di eventi particolari, ma in talune aree non proprio infrequenti, come i terremoti, data anche la struttura snella di molte apparecchiature, quali sezionatori ed interruttori. Gli stessi relè Bucholz hanno dato in taluni casi grossi problemi intervenendo per le sollecitazioni subite dal galleggiante ed mettendo fuori uso interi stabilimenti anche in presenza di scosse di entità modesta.

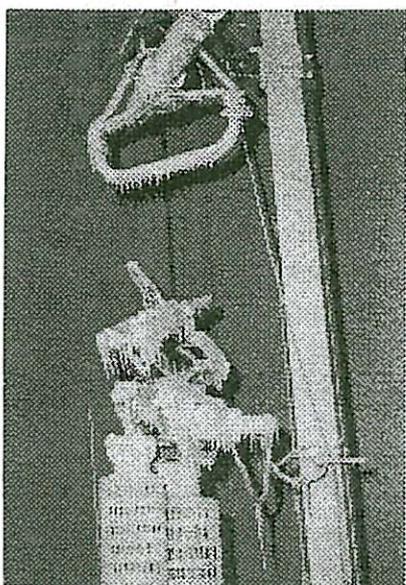
Altro aspetto da non sottovalutare sono le condizioni di inquinamento che certamente possono modificare l'aspetto della carpenteria esposta ed anche ridurne l'efficienza protettiva in tempi molto brevi.

Va comunque ricordato che, nella specifica delle prove richieste, possono diventare rilevanti anche tutta una serie di grandezze che hanno un significativo impatto ambientale e che, alla

CAPITOLO I - Generalità

fine, possono persino condizionare l'esecuzione della macchina. Sotto questo profilo, molto importanti sono le misure di rumore, la misura delle vibrazioni e la stessa analisi degli oli isolanti per trasformatori, in relazione ai possibili contenuti di PCB.

Per motori ed apparecchiature di uso generale (plafoniere, faretti, quadri etc.) è molto importante, anche ai fini antinfortunistici, la protezione offerta contro i contatti diretti con parti in tensione e contro la penetrazione di acqua e/o polvere. Questo aspetto è di primaria importanza per apparecchiatura installata all'esterno o in ambienti industriali con condizioni ambientali pesanti.



Prova sotto ghiaccio di sezionatore

Esistono in questo caso prove particolari per caratterizzare lo stato di protezione offerto dagli involucri, di solito denominato convenzionalmente con il codice IPXX, dove le due cifre stanno ad indicare, in una scala crescente da zero a 6 per i corpi solidi e da zero ad 8 per l'acqua, il grado di protezione.

A titolo indicativo si riporta in Tabella il significato dei vari codici. Sono previste procedure particolari per la verifica delle caratteristiche, ad esempio la pressione dell'acqua nel caso dei getti, le dimensioni degli ugelli, le dimensioni e la struttura di un "dito di prova" etc..

Un grado di protezione elevato (IP68) caratterizza apparecchiature stagne che possono essere quindi immerse in acqua permanentemente.

Ancora più particolare è il caso delle apparecchiature destinate ad operare in locali con rischio di esplosione ed incendio: la loro criticità è certamente superiore a quanto visto prima per gli effetti che potrebbero essere indotti da una scintilla all'interno della carcassa metallica. In questo caso le prove e le certificazione possono essere effettuate solo da laboratori autorizzati.

TABELLA

Grado di protezione	Corpi solidi	Acqua
0	Nessuna protezione	Nessuna protezione
1	Protetto contro corpi solidi di dimensioni maggiori di 50 mm	Protetto contro le gocce che cadono verticalmente
2	Protetto contro corpi solidi di dimensioni maggiori di 12 mm	Protetto contro le gocce che cadono verticalmente con l'oggetto inclinato fino a 15°
3	Protetto contro corpi solidi di dimensioni maggiori di 2,5 mm	Protetto contro la pioggia con inclinazione fino a 60°
4	Protetto contro corpi solidi di dimensioni maggiori di 1 mm	Protetto contro l'acqua spruzzata da tutte le direzioni
5	Protetto contro la polvere	Protetto contro getti potenti
6	Totalmente protetto contro la polvere	Protetto contro gli effetti dell'immersione
7	-----	Protetto contro gli effetti dell'immersione
8	-----	Protetto contro gli effetti della sommersione

1. IEC N. 529 (1976): Classification of degrees of protection provided by enclosures".

CAPITOLO II

CARATTERISTICHE DI FUNZIONAMENTO DELLE MACCHINE ELETTRICHE

2.1 Prove sui trasformatori (27/06/1997)

2.11 Schema equivalente di un trasformatore

Un trasformatore monofase o trifase simmetrico, a due avvolgimenti, può, come è noto, riportarsi allo schema equivalente di fig. 2.111; il trasformatore ideale, presente in tale schema, ha come rapporto di trasformazione il rapporto fra i numeri di spire dei due avvolgimenti e le reattanze  $X_{1d}$  e  $X_{2d}$  sono le loro reattanze di dispersione; i valori della resistenza e della reattanza del secondario sono moltiplicati per il quadrato del rapporto di trasformazione, per essere riferiti al primario.

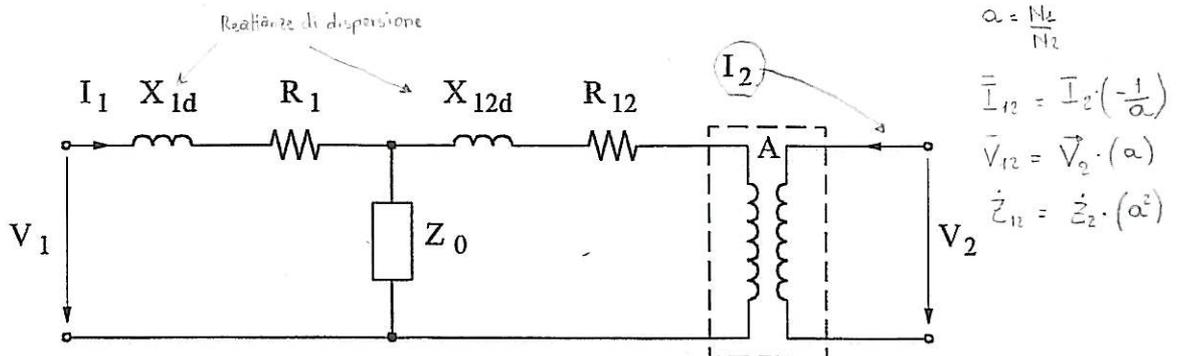


fig. 2.111

Per i trasformatori utilizzati negli impianti di energia, gli ordini di grandezza dei diversi parametri sono in generale tali da poter ridurre lo schema equivalente a quello semplificato di fig. 2.112, dove l'impedenza serie  $Z_c$  è piccola rispetto a quella derivata  $Z_0$ . Rappresentando l'impedenza  $Z_0$  con un'induttanza in parallelo ad una resistenza (fig. 2.113), lo schema risulta, in prima approssimazione, indipendente dal valore della frequenza di alimentazione fino a quei valori per cui intervengono gli effetti delle capacità proprie degli avvolgimenti; come tale, questo schema può essere utilmente impiegato anche nello studio dei transitori intorno alle frequenze industriali. Per frequenze a partire da quelle audio bisogna considerare le capacità tra avvolgimenti e quelle tra strati e spire del singolo avvolgimento: l'andamento del rapporto con la frequenza può allora presentare una serie di picchi corrispondenti ai diversi modi possibili di risonanza.

Ogni avvolgimento di trasformatore è caratterizzato, dal punto di vista funzionale, dalla sua tensione nominale  $V_n$  (tensione a vuoto fra fasi) e dalla sua corrente nominale  $I_n$ ; da questi valori viene calcolata la potenza nominale, rispettivamente pari a  $V_n I_n$  o a  $\sqrt{3} V_n I_n$ , a seconda che l'avvolgimento sia monofase o trifase.

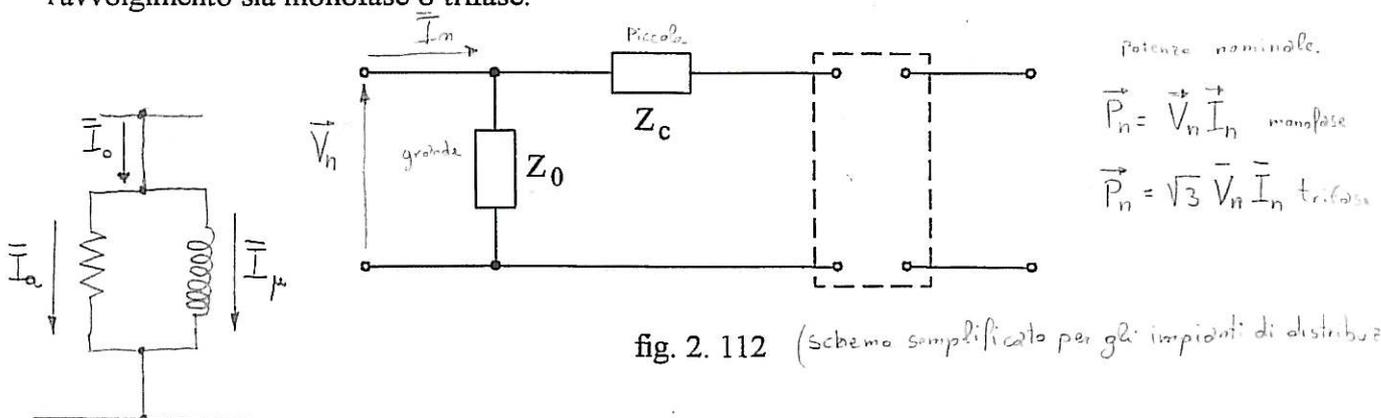


fig. 2.112 (schema semplificato per gli impianti di distribuzione)

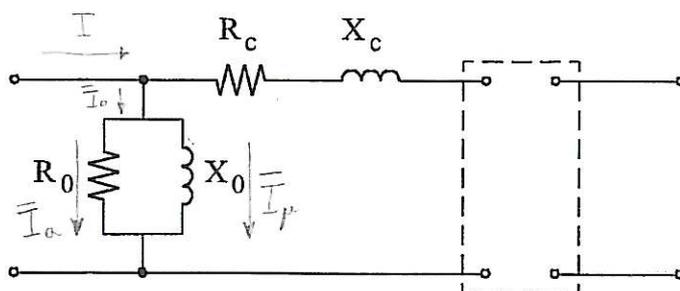


fig. 2.113

Questi valori, a cui vanno riferite le misure e le garanzie, servono anche, come già accennato in 1.17, come base per il calcolo dei valori relativi o percentuali delle diverse grandezze corrente a vuoto, tensione di c.c. ecc. ; in tal modo, le grandezze di collaudo di un trasformatore assumono lo stesso valore, a qualunque dei due avvolgimenti siano riferite e indipendentemente dal lato su cui sono state rilevate.

## 2.12 Determinazione del rapporto di trasformazione

Per definire il trasformatore ideale, che compare negli schemi equivalenti sopra illustrati, è sufficiente la determinazione del suo rapporto di trasformazione; essa viene generalmente eseguita, in base alle semplificazioni che hanno condotto allo schema di fig. 2.112, mediante la misura del rapporto fra le tensioni a vuoto dei due avvolgimenti. Per conoscere completamente le caratteristiche della macchina è però necessaria anche la determinazione del senso (relativo) di avvolgimento, ovvero della polarità nei trasformatori monofasi o del gruppo, in quelli trifasi.

La misura del rapporto di trasformazione si può eseguire facilmente mediante due letture voltmetriche contemporanee, sui morsetti omologhi dei circuiti di alta e di bassa tensione, eventualmente mediante l'impiego di trasformatori di misura.

Il trasformatore è alimentato da un lato, con l'altro avvolgimento a vuoto (fig. 2.21); le precisioni del metodo è limitata dalle incertezze dovute ai due strumenti; si assume in generale il valore medio risultante da più letture.

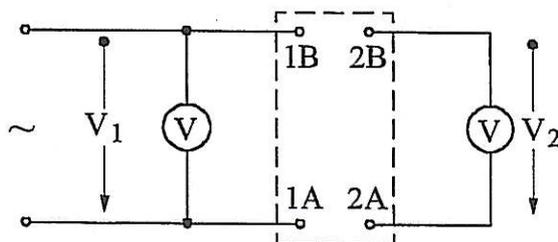


fig. 2.121

Se le tensioni dei due avvolgimenti non sono troppo diverse fra loro, si può procedere al controllo della polarità connettendo insieme due morsetti omologhi (1A, 2A, o 1B, 2B, fig. 2.122) e misurando la tensione fra l'altra coppia di morsetti; in caso di polarità addittiva (sottrattiva) essa risulta la somma (differenza) tra i valori di  $V_1$  e  $V_2$ . Un metodo analogo può essere impiegato anche per misure sui trasformatori trifasi.

La misura più precisa del rapporto di trasformazione, in avvolgimenti monofasi o trifasi, si esegue mediante metodi potenziometrici o di proiezione; essi consentono anche di determinare la polarità e il gruppo in via del tutto generale.

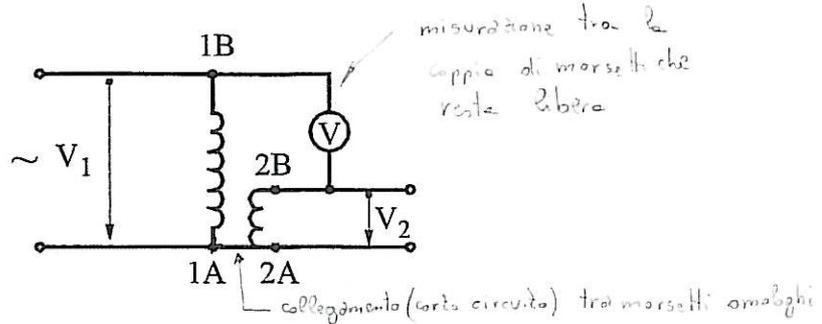


fig. 2.122

Lo schema di principio del metodo di proiezione è illustrato in figura 2.123: lo strumento, che è un elettrodinamometro, segna zero quando le correnti  $\dot{I}_f$  e  $\dot{I}_m$ , che percorrono le sue bobine sono fra loro in quadratura, ossia quando è:

$$V_{0A} = V_1 \frac{r}{R} = V_2 \cos \gamma$$

avendo supposto  $\dot{I}_f$  in fase con  $\dot{V}_1$  e  $\dot{I}_m$  in fase con la differenza  $V_2 - V_{0A}$  (fig. 2.124).

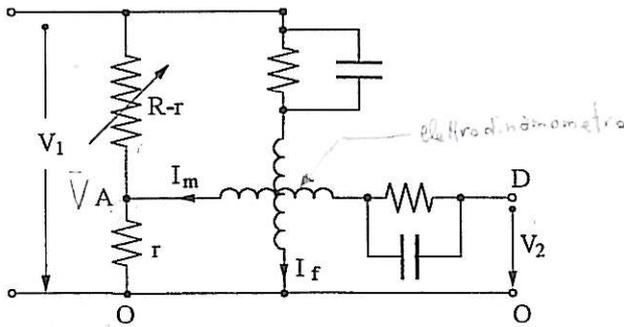


fig. 2.123 (METODO DI PROIEZIONE)

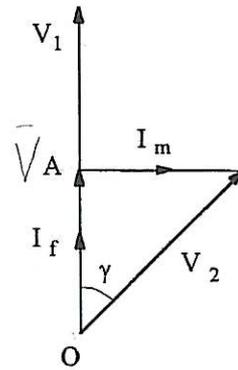


fig. 2.124

DAL FATTORE DI TENSIONE

$$\begin{aligned} \bar{V}_0 &= \frac{V_2 (r)}{R-r+r} \\ &= \frac{V_2}{R} r \\ &= V_2 \frac{r}{R} \end{aligned}$$

Usualmente, si legge direttamente sull'apparecchio il rapporto  $R/r$ ; si ha allora:

$$\alpha = \frac{R}{r} = \frac{V_1}{V_2 \cos \gamma}$$

$$\begin{aligned} \frac{V_2 r}{R} &= V_2 \cos \gamma \\ \frac{V_2}{V_2 \cos \gamma} &= \frac{R}{r} \end{aligned}$$

Per un trasformatore monofase, o per un trifase in cui si possa eseguire la misura separatamente per le diverse colonne, si ha  $\cos \gamma = 1$  e il valore di  $\alpha$  coincide con quello del rapporto di trasformazione  $A$ ; lo schema di misura è riportato in fig. 2.125; l'alimentazione del trasformatore e dell'apparecchio si effettua, a tensione convenientemente bassa ( $\sim 100-200$  volt) dal lato A.T.; se, per raggiungere l'equilibrio, occorre scambiare i morsetti di b.t., la polarità è additiva.

Nel caso più generale di un trasformatore trifase, è bene procedere ad una alimentazione trifase dell'avvolgimento A.T., in modo che non vi siano incertezze sulla distribuzione dei flussi nelle singole colonne del nucleo; presa come riferimento la tensione  $V_{AB}$  fra due fasi dell'avvolgimento

alimentato, la misura del rapporto A, eseguita su una fase della b.t., dà a seconda del suo indice orario rispetto alla fase AB le seguenti letture:

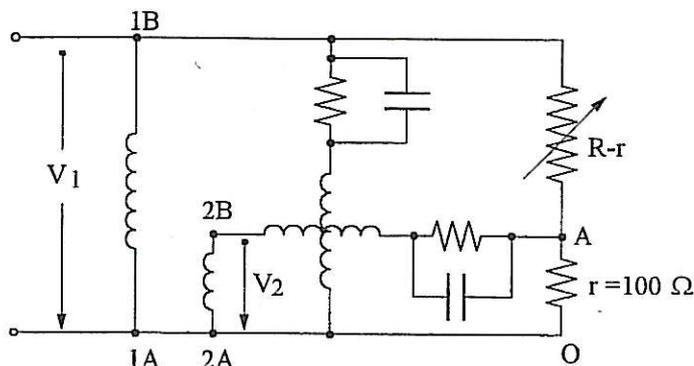


fig. 2. 125

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$\frac{2}{\sqrt{3}} A$	2A	$\infty$	-2A	$-\frac{2}{\sqrt{3}} A$	-A	$-\frac{2}{\sqrt{3}} A$	-2A	$\infty$	2A	$\frac{2}{\sqrt{3}} A$	A

Poiché il gruppo è individuato dall'indice i della prima fase, alla seconda corrisponderà l'indice (i + 4), alla terza (i + 8); è facile perciò costruire una tabella, da cui si ricava univocamente il gruppo dalla successione dei valori delle tre letture, eseguite in ordine ciclico sulle tre fasi della b.t., lasciando fisso il riferimento dell'A.T.; il valore del rapporto di trasformazione A si deduce poi dai valori delle letture stesse.

In molti casi di produzione in serie, si può procedere alla misura per confronto con un trasformatore di caratteristiche note; in mancanza di adatta attrezzatura, si può riconoscere la polarità (ed anche il gruppo) dai segni delle indicazioni transitorie di un voltmetro, inserito sull'avvolgimento b.t., quando si inserisca o disinserisca una f.e.m. continua, di segno noto, sull'altro avvolgimento. Nel caso in cui la strumentazione utilizzata sia in grado di fornire solo il rapporto delle tensioni e non lo sfasamento relativo (si veda ad esempio un misuratore commerciale di concezione recente riportato in Appendice 1), si può procedere al controllo del gruppo sfruttando una serie di relazioni che intercorrono tra le tensioni misurabili tra il diversi morsetti, quando un terminale dell'avvolgimento di alta tensione venga connesso a quello corrispondente della bassa; nella Tabella seguente vengono riportate, per il caso più comune di gruppo 11 le relazioni indicate ed un esempio di applicazione.

Indice orario	Collegamento	Diagramma vettoriale di tensione connettendo 1U con 2U	Leggere le tensioni tra i morsetti: 1W-2W 1W-2V 1V-2W 1V-2V
11			<b>Condizioni di accettabilità</b>
			$1W-2W < 1W-2V$
			$1W-2W = 1V-2W$
			$1V-2V < 1W-2V$
			$1V-2W = 1V-2V$
			$1W-2V > 1V-2W$
$1V-2N = T1 - T2 / 1.732$			

Per il gruppo 5 valgono le relazioni seguenti:

Indice orario	Collegamento	Diagramma vettoriale di tensione connettendo 1U con 2U	Leggere le tensioni tra i morsetti: 1W-2W 1W-2V 1V-2W 1V-2V
5			<b>Condizioni di accettabilità</b>
			$1W-2W > 1W-2V$
			$1W-2W = 1V-2W$
			$1V-2V > 1W-2V$
			$1V-2V = 1V-2W$
			$1W-2V < 1V-2W$
$1V-2N = T1 + T2 / 1.732$			

L'alimentazione deve essere trifase, effettuata sull'avvolgimento di alta tensione e con valori bassi (circa 100 – 150 V).

Si noti che in alcuni casi, il rapporto fra le tensioni a vuoto, determinato con metodi a bassa tensione, può differire da quello rilevabile a piena tensione; ciò può accadere quando la caduta provocata dalla corrente a vuoto nella reattanza di dispersione primaria sia di valore non trascurabile, rispetto alla tensione di alimentazione; tale è, ad esempio, il caso dei trasformatori di misura.

Sui valori del rapporto di trasformazione è ammessa dalle norme una tolleranza pari al minore fra i due valori seguenti:

- a) lo 0,5% del valore nominale;
- b) 1/10 della tensione percentuale di cortocircuito.

Questi requisiti sono in generale richiesti su una sola presa (presa principale, normalmente la presa media); spesso, per piccole differenze di rapporto fra una presa e l'altra, sono necessarie maggiori tolleranze. La condizione è comunque molto stringente, anche per l'incertezza che verrebbe ad essere richiesta per l'apparecchiatura di misura. Il senso di tali limitazioni è comunque associato alla necessità di limitare la corrente di circolazione, nel caso di due macchine in parallelo: se questa eventualità non si presenta, scostamenti anche maggiori del rapporto non hanno implicazioni di ordine pratico perché la fluttuazione della rete è molto maggiore di quella che può essere imputata al rapporto.

2.1 Prova a vuoto TRAVA È.

Scopo della prova a vuoto è quello di determinare le caratteristiche dell'impedenza  $Z_0$  dello schema equivalente, ossia di misurare la corrente assorbita a vuoto e le corrispondenti perdite, ai valori nominali di tensione e di frequenza. La prova è quindi costituita da una semplice misura su un carico monofase o trifase, a basso fattore di potenza (figg. 2.131-2.132); un trasformatore trifase a vuoto è raramente un carico simmetrico, specie nei trasformatori a tre colonne con flussi vincolati; in questo caso si assume per la corrente la media dei tre valori (efficaci) letti sulle tre fasi. Quando il fattore di potenza sia inferiore a 0,1 è conveniente l'uso di tre wattmetri inseriti verso un centro stella reale o fittizio (fig. 2.133) poiché tale schema consente un maggior sovraccarico dei wattmetri e quindi la riduzione degli errori di lettura.

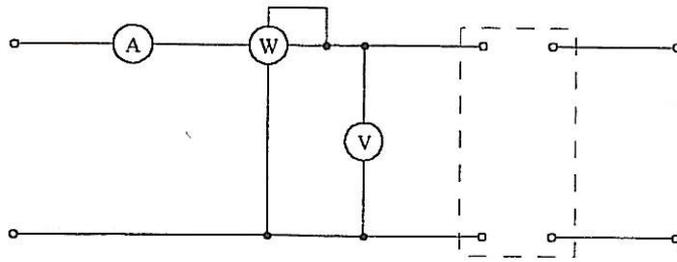


fig. 2.131

Lavorando con tolleranze ristrette sui valori delle perdite, si tiene in generale conto dei consumi degli strumenti e spesso anche dei trasformatori di misura (che possono essere dell'ordine di una decina di W). L'imprecisione maggiore è tuttavia dovuta alle incertezze della misura di tensione; un errore dello 0,5% sulla tensione può infatti comportare, in conseguenza della non linearità della curva di magnetizzazione, oltre l'1% di errore sulle potenze o oltre il 5% sulle correnti. Un errore sistematico in più sulla potenza si verifica quando le tre tensioni concatenate non siano perfettamente uguali, e si assuma come riferimento la loro media.

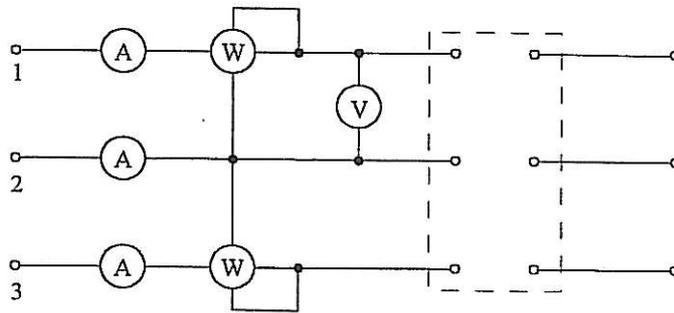


fig. 2.132

Il valore delle perdite a vuoto, che sono sostanzialmente perdite nel ferro del nucleo magnetico, è influenzato dalla forma d'onda della tensione applicata. Se un trasformatore è privo di avvolgimenti a triangolo, non è possibile riportare le perdite misurate con tensioni deformate a quelle che si sarebbero misurate con tensioni (di fase) sinusoidali; in questo caso è dunque necessario provvedere ad una forma d'onda il più possibile prossima alla sinusoidale.

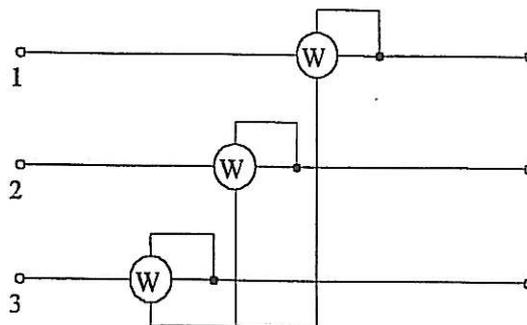


fig. 2.133

Quando esiste un avvolgimento a triangolo, il flusso delle singole colonne ha praticamente la forma imposta dalle tensioni concatenate; le perdite per isteresi sono funzione del valor massimo dell'induzione, deducibile come è noto dal valor medio della f.e.m. indotta (o, più semplicemente, anche della tensione applicata); dal valore efficace di questa tensione dipendono invece le perdite per correnti parassite. Se  $k$  è il rapporto fra le letture di un voltmetro a valore efficace e di un voltmetro a valore medio (con la scala tracciata in valore efficace per onde sinusoidali, cioè moltiplicata per 1,11), le perdite  $P$  riferite ad un'onda sinusoidale di tensione si deducono dalle perdite misurate  $P_m$  mediante la relazione:

$$P = \frac{P_m}{p_i + k^2 p_p}$$

	LAMINAZIONE A CALDO	LAMINAZIONE A FREDDO
$p_i$	0,7	0,5
$p_p$	0,3	0,5

per la quota  $p_i$  di perdite per isteresi si assume, nei lamierini laminati a caldo, il valore di 0,7; per la quota  $p_p$  di perdite parassite si ha quindi il valore 0,3. Per lamierini laminati a freddo si assume:  $p_p = p_i = 0,5$ . Il valore delle perdite deve essere riferito alla tensione letta sul voltmetro a valore medio<sup>(1)</sup>.

Il non tener conto della deformazione esistente nei flussi comporta un errore, nella valutazione delle perdite, pari a:

$$\epsilon = \frac{P_m - P}{P} = p_i + k^2 p_p - 1 = (k^2 - 1) p_p \cong 2\epsilon_k p_p$$

$\epsilon_k$  SI RACCOLLE SU LAMINAZIONE FREDDA.

essendo  $\epsilon_k = k-1 \ll 1$ ; nel caso, molto comune, in cui sia  $p_p = 0,5$ , l'errore percentuale commesso è semplicemente pari alla differenza percentuale fra le letture dei due voltmetri.

Poiché dipendono dalla forma del flusso nella colonna, a parità di tensione applicata, i valori delle perdite a vuoto possono essere diversi, qualora si connetta in modo diverso uno degli avvolgimenti anche se non alimentato in modo da chiudere o no un triangolo; analogamente, le misure eseguite con e senza filo neutro, quando questo sia accessibile, danno risultati diversi.

A parte ciò, la misura della corrente e delle perdite a vuoto può essere eseguita su uno qualunque degli avvolgimenti, a seconda della maggiore o minor facilità di alimentazione; la misura viene eseguita per diversi valori della tensione di alimentazione, intorno al valore nominale, in modo da poter poi ricavare, per interpolazione grafica (fig. 2.134) i valori corrispondenti alle condizioni di garanzia. Sono anche spesso richiesti i valori di corrente e perdita a vuoto in corrispondenza a  $1,1 V_n$ . Spesso vi sono anche delle specifiche relative alle perdite a  $1,1 V_n$  (almeno in termini relativi rispetto alle perdite a  $V_n$ ): il senso è tipicamente quello di forzare il costruttore a lavorare con valori ragionevoli di induzione per limitare la corrente di inserzione che potrebbe provocare lo scatto dell'interruttore di protezione a causa dell'elevato valore che può assumere in caso di saturazione.

**1 Esempio**

Su un nucleo di materiale laminato a freddo si ottengono le seguenti misure:

Voltmetro elettrodinamico o TRMS : 380 V;  
 Voltmetro a raddrizzatore o a valore medio : 390 V;  $P_m = 715$  Watt. Si ha:

$$k = \frac{380}{390} = 0,974; \quad P = \frac{715}{0,5 + 0,949 \cdot 0,5} = 733$$

Perdita misurata

valore delle perdite a vuoto a 390 V.

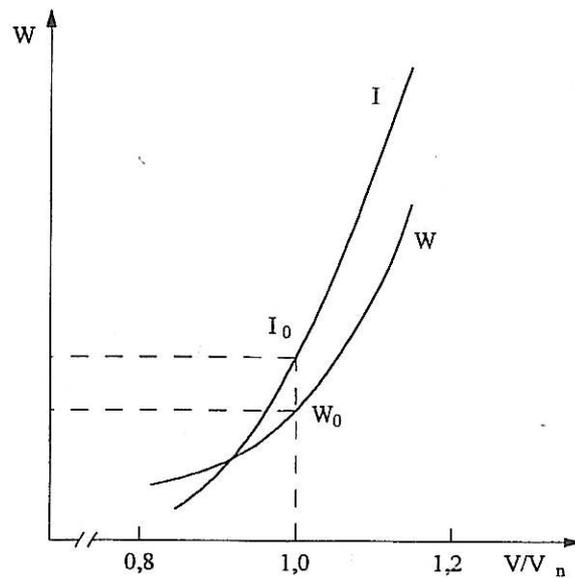


fig. 2.134

2.14 Prova in cortocircuito TR.DVA 2c

Questa prova ha lo scopo di determinare le caratteristiche dell'impedenza serie  $Z_c$  dello schema equivalente di fig. 2.112, in modo da calcolare le cadute di tensione da vuoto a carico e quella parte di perdite che è legata alla corrente di carico (perdite nel rame).

La prova si esegue con normali misure di potenza, ai morsetti di uno degli avvolgimenti in generale, per comodità, quello a tensione più elevata ponendo in cortocircuito i terminali dell'altro (fig. 2.141). Quando la corrente dell'avvolgimento cortocircuitato sia di valore elevato, occorre evitare che la connessione di cortocircuito dia luogo a sensibili perdite, per resistenza propria e per effetto del flusso che essa produce.

L'impedenza di cortocircuito costituisce generalmente un carico lineare e, per i trasformatori trifasi, simmetrico; il suo fattore di potenza può andare, come ordine di grandezza, da 0,3, per i trasformatori da distribuzione, a 0,05 per grosse macchine.

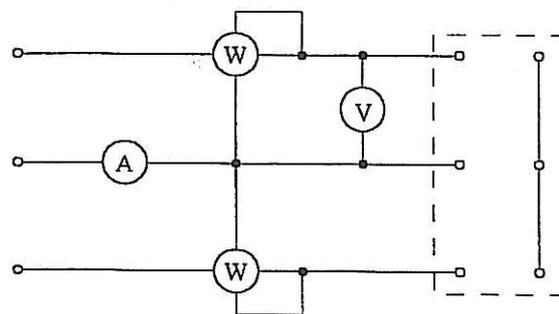


fig. 2.141

Data la linearità del sistema, sono in genere sufficienti due o tre punti di misura, anche a valori di corrente diversi dal nominale; da queste misure si ricavano i valori della resistenza e della reattanza di cortocircuito o, preferibilmente, i valori relativi delle componenti, ohmica e reattiva, della tensione di cortocircuito, riferiti ai valori nominali della tensione e della corrente.

In pratica, misurati V, I e P e determinati i valori di

$$v = \frac{V}{V_n}; \quad i = \frac{I}{I_n}; \quad \cos \varphi_c = \frac{P}{\sqrt{3}VI}$$

per il riporto a  $I_n$  si ha:

$$v' = \frac{v}{i} = Z_c \quad v'_r = p = v' \cos \varphi_c = r; \quad v'_x = v' \sin \varphi_c = x$$

La presenza dell'impedenza  $Z_0$ , in parallelo alla  $Z_c$ , è normalmente trascurabile; le norme considerano la possibilità di tenerne conto, in particolare agli effetti delle perdite, quando il valore della tensione di cortocircuito superi il 25%.

2. 15 Separazione e riporto delle perdite

Le perdite nel rame sono funzione della temperatura dell'avvolgimento; questa deve essere quindi nota e costante durante le prove, evitando che col permanere della corrente a valori prossimi alla nominale possa variare durante le misure. La temperatura dell'avvolgimento si fa generalmente coincidere con la temperatura ambiente, lasciando la macchina a riposo per un tempo sufficientemente lungo.

Per convenzione, le perdite nel rame e la relativa resistenza equivalente vanno riferite ad una temperatura di 75°C; il valore di riferimento viene aumentato con l'aumento delle temperature massime ammissibili per il funzionamento delle macchine (per macchine a secco con sistemi di isolamento adatti a funzionare a temperature più elevate di quella dell'olio – classe F, H, C – viene fissata a 115°C).

Quando la misura è eseguita a temperatura diversa da quella di riferimento come è nella maggior parte dei casi occorre effettuare il riporto delle perdite a questa temperatura. Per far ciò, occorre separare le perdite per effetto Joule, che essendo del tipo  $RI^2$  crescono linearmente con la temperatura, dalle perdite addizionali che, essendo all'incirca inversamente proporzionali alla resistività, e crescono all'aumentare della temperatura. La separazione dei due valori di perdita si fa determinando, mediante misure di resistenza, la potenza dissipata per effetto Joule nei due avvolgimenti ed attribuendo alle perdite addizionali la restante quota di perdite nel rame, dedotte dalla prova in cortocircuito, a parità di corrente. Il riporto alla temperatura di riferimento comporta di moltiplicare le perdite per effetto Joule per il coefficiente:

$$(2.151) \quad k_t = \frac{1/\alpha + t_r}{1/\alpha + t_m}$$

*temperatura di riferimento*

*temperatura misurata*

già visto in 1.23, e di dividere le perdite addizionali per lo stesso coefficiente<sup>2</sup>.

$\frac{1}{\alpha} = 235$  per RAME  
 $\frac{1}{\alpha} = 225$  per ALLUMINIO

2 **Esempio**

Si siano determinati i seguenti valori, alla corrente nominale:

- Perdite per effetto Joule, dedotte dalle misure di resistenza eseguite a 15°C = 496 W;
- Perdite nel rame, dedotte dalla prova in c.c., eseguita a 20°C = 552 W.

Le perdite Joule a 20°C risultano:

$$\frac{234,5 + 20}{234,5 + 15} \cdot 496 = 506W$$

*Perdite per effetto joule*

$P \cdot k_t = P_2$

*quale alla temperatura di riferimento*

Le perdite addizionali a 20° sono perciò (552-506) = 46 W; il coefficiente  $k_t$  fra 20 e 75° vale 1,215. Si ha perciò a 75°C una potenza persa nel rame pari a  $1,215 \cdot 506 + 46/1,215 = 615 + 38 = 653$  W.

Le perdite addizionali sono anche proporzionali al quadrato della frequenza; ciò consente di evitare la separazione delle perdite, eseguendo le misure alla temperatura  $t_m$  e alla frequenza  $f$ , diversa dalla frequenza nominale  $f_n$ , e pari a:

*temperatura di riferimento*

$$k_t = \frac{t + t_f}{2t + t_m}$$

$$f = \frac{f_n}{k_t}$$

dove  $k_t$  è il coefficiente di riporto dalla temperatura  $t_m$  a quella di riferimento, dato dalla (2.151). Moltiplicando poi le perdite misurate per  $k_t$ , si ottiene il valore delle perdite totali alla temperatura  $t_f$  e alla frequenza  $f_n$ . In seguito al riporto delle perdite alla temperatura di riferimento, si modifica il valore della resistenza equivalente ossia la componente resistiva della tensione di cortocircuito; il modulo di quest'ultima varia, in generale, di poco <sup>(3)</sup>

2.16 Misura delle resistenze degli avvolgimenti

La misura delle resistenze si esegue, con metodo voltamperometrico o di ponte, secondo quanto indicato in 1.21.

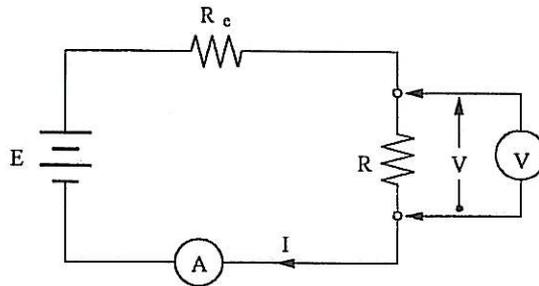


fig. 2.161

Si tratta, come è ovvio, di piccole resistenze fortemente induttive; la costante di tempo propria di un avvolgimento si può infatti facilmente calcolare dai valori relativi della corrente a vuoto  $i_0$  e delle perdite nel rame  $p_c$  <sup>(4)</sup> e risulta dell'ordine di parecchi secondi, fino a diverse migliaia di secondi, indipendentemente dai valori delle tensioni e correnti nominali dell'avvolgimento.

<sup>(3)</sup> Se  $p$  e  $p_f$  sono le perdite, in valore relativo (o percentuale) rispettivamente alle temperature di misura e a quella di riferimento, e  $v'$  il corrispondente valore della tensione determinata dalla prova in c.c. (il tutto essendo riportato a  $I_n$ ), si ha:

$$v_x^2 = v'^2 - p^2 = v_x'^2 \quad v_r = p_f \quad \Rightarrow \quad v_{cc}^2 = v'^2 + p_f^2 - p^2;$$

<sup>(4)</sup> L'induttanza  $L_0$  di un avvolgimento monofase (praticamente corrispondente all'induttanza a vuoto) si può dedurre dalla sua tensione nominale  $V_n$  e dalla sua corrente a vuoto  $I_0 = i_0 I_n$  [con  $i_0 = (0,2-2) \cdot 10^{-2}$ ]; è infatti:

$$L_0 = \frac{V_n}{\omega I_0} = \frac{1}{\omega i_0} \frac{V_n}{I_n};$$

d'altra parte la resistenza  $R$  può essere espressa nella forma:

$$R \cong \frac{p_c}{2} \frac{V_n}{I_n} = \frac{p_c}{2} i_0 \omega L_0$$

essendo  $p_c = (0,2-2) \cdot 10^{-2}$ , la costante di tempo  $L_0/R$  può corrispondentemente assumere valori fra 1 e  $10^3$  s.

Poiché le misure devono essere fatte solo quando sono cessati i transitori d'inserzione, occorre diminuire convenientemente la costante di tempo del circuito, inserendo un'opportuna resistenza  $R_e \gg R$ , in serie sul circuito ed aumentando in proporzione la f.e.m. di alimentazione, rispetto alla caduta di tensione da misurare (fig. 2. 161 ). Inoltre, poiché ogni variazione, anche piccola, della corrente di alimentazione di origine a forti variazioni della tensione sul voltmetro, occorre curare il circuito, affinché risulti particolarmente stabile, evitando contatti incerti, sovrariscaldamenti, ecc.

Talvolta, per ridurre le variazioni di tensione sul voltmetro, dovute a transitori di corrente, si pone il secondario in cortocircuito; si ha allora lo schema equivalente di fig. 2.162, che costituisce un circuito con due costanti di tempo; in esso, a parità di corrente  $I$  impressa bruscamente, si ha una minor variazione di  $V$ , rispetto allo stesso circuito con i morsetti secondari aperti; tuttavia il transitorio si estingue con una costante di tempo che è, in prima approssimazione, quella del circuito di fig. 2.163 e perciò maggiore di quella di un solo avvolgimento perché determinata da  $L_0$  e dal parallelo delle due resistenze.

Di solito, date le diverse caratteristiche di corrente nominale e quindi di resistenza degli avvolgimenti servono due alimentazioni e strumentazione con portate abbastanza diverse.

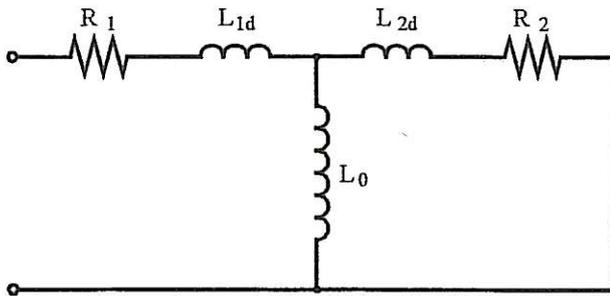


fig. 2. 162

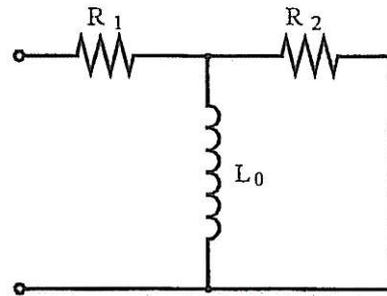


fig. 2. 163

HA UNA MINORE VARIAZIONE (OSCILLAZIONE) DI TENSIONE NEI TRANSITORI DI CORRENTE. MA IL TRANSITORIO È PIÙ LUNGO PERCHÉ MAGGIORE È LA COSTANTE DI TEMPO.

## 2.17 Rendimenti e cadute di tensione

I valori sottoposti a garanzia, sono, di solito, quelli delle perdite:

- $P_c$  dovute al carico, alla temperatura di riferimento e alla corrente nominale, dedotte dalla prova in cortocircuito;
- a vuoto,  $P_0$ , alla tensione nominale, dedotte dalla prova a vuoto.

Sui valori di tali perdite è ammessa una tolleranza dell'ordine del 15% purché le perdite totali:

$$P_p = P_0 + P_c$$

non superino di più del 10% il totale garantito (compensazione delle perdite). Con la ricerca dell'optimum di funzionamento economico delle reti si viene però spesso a dare valore diverso dal punto di vista economico alle due cause di perdita e non sono rari i casi di penalizzazioni contrattuali per i valori fuori garanzia, anche se restano entro le tolleranze. In base al valore delle perdite totali si può anche determinare il rendimento:

$$\eta = \frac{P_{\text{resa}}}{P_{\text{assorbita}}} = 1 - \frac{P_p}{P_a}$$

La potenza assorbita  $P_a$  è data alla tensione nominale, alla corrente nominale, o sue frazioni  $\beta$  (in genere 1/4, 1/2, 3/4), e con un fattore di potenza prefissato (in genere 1 o 0,8).

Se sono dati i valori relativi  $p_0$  e  $p_c$  delle perdite, rispettivamente nel ferro e nel rame, rispetto alla potenza apparente nominale, alla frazione  $\beta$  della corrente di carico e con fattore di potenza  $\cos\varphi$ , il rendimento vale:

$$\eta = 1 - \frac{p_0 + \beta^2 p_c}{\beta \cos \varphi + p_0 + \beta^2 p_c}$$

Per il calcolo delle cadute di tensione, si fa riferimento ai seguenti dati:

- caduta percentuale resistiva  $v_r$ , alla temperatura di riferimento e alla corrente nominale, determinata dalla componente ohmica della tensione di cortocircuito;
- caduta induttiva  $v_x$ , determinata analogamente alla  $v_r$ , dalla componente reattiva della tensione di cortocircuito;
- fattore di potenza del carico (generalmente 1 o 0,8 in ritardo).

La caduta di tensione  $\Delta v$  È data, in valore percentuale, dalla relazione:

$$(2.171) \quad \Delta v = v_r \cos \varphi + v_x \sin \varphi + \frac{[v_x \cos \varphi - v_r \sin \varphi]^2}{200}$$

L'ultimo termine è in genere piccolo, ma può non essere trascurabile per trasformatori che abbiano un basso fattore di potenza in cortocircuito, e in corrispondenza a un fattore di potenza unitario del carico (figura 2.171).

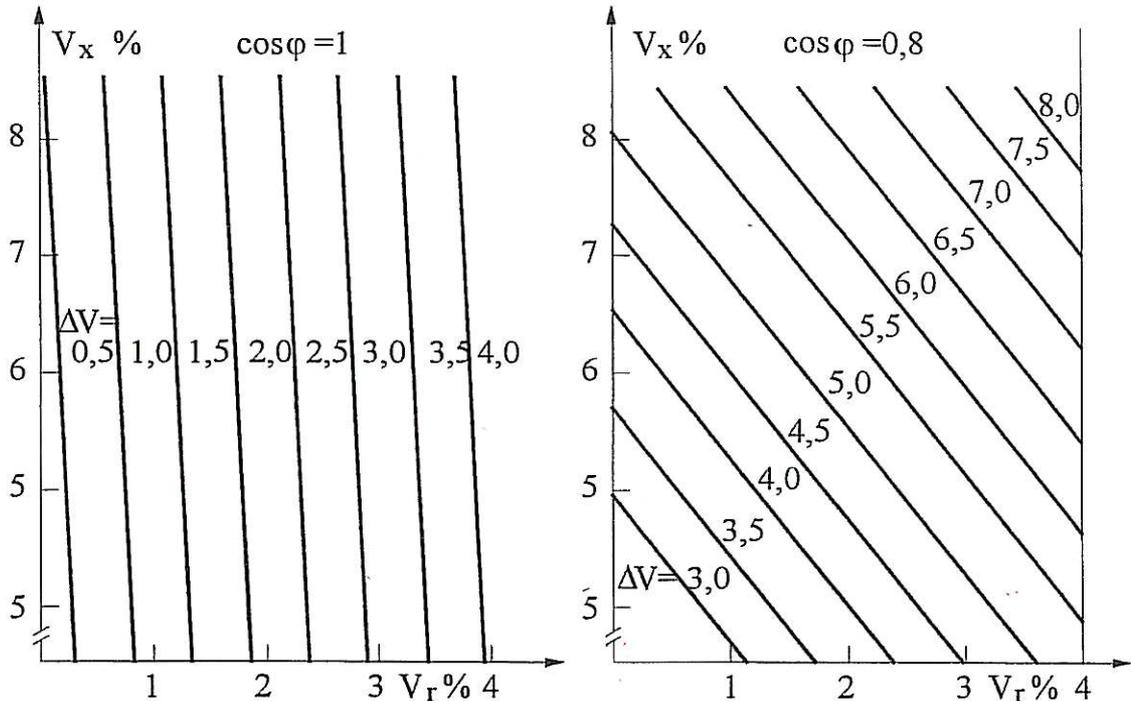


fig. 2.171

### 2.18 Perdite addizionali nelle casse

Nelle prove a vuoto ed in cortocircuito di un trasformatore completo vengono misurate anche le perdite dovute ai flussi dispersi che investono le strutture meccaniche, ed in particolare la cassa; ciò vale specialmente per macchine che abbiano notevoli reattanze di cortocircuito, o forti dissimmetrie negli avvolgimenti.

Queste perdite possono mettersi in evidenza con misure dentro e fuori cassa; poiché rappresentano sempre una piccola frazione delle perdite totali, tale determinazione è però piuttosto incerta. Esse possono però talvolta dar luogo a riscaldamenti localizzati della cassa stessa o di tiranti o bulloni. Nei casi più gravi (per esempio, di deficiente isolamento dei bulloni pressapacco) il riscaldamento può provocare anche un progressivo estendersi del difetto fino ad un vero e proprio guasto della macchina. Le perdite addizionali nelle strutture in acciaio variano con la corrente, secondo un esponente che è stato determinato sperimentalmente intorno a 2,3-2,5 e con la radice quadrata della temperatura.

### 2.19 Misura dell'impedenza alla sequenza zero

Un trasformatore trifase presenta le stesse caratteristiche, a vuoto ed in cortocircuito, sia che venga alimentato da una terna di tensioni simmetriche dirette, che da una terna di tensioni simmetriche inverse; si modifica solo il gruppo di trasformazione, che se vale  $i$  per una terna diretta (in cui cioè le tensioni di fase si susseguano nell'ordine scelto per i terminali del trasformatore), vale  $(12 - i)$  per una terna di sequenza inversa. L'impedenza che un avvolgimento presenta di fronte ad

una terna di sequenza zero è finita solo nel caso in cui esso sia provvisto di neutro; in tal caso può essere misurata con una semplice misura voltamperometrica, riunendo insieme i tre morsetti d'ingresso (fig. 2.191).

Il valore dell'impedenza alla sequenza zero di una fase è ovviamente triplo di quello risultante dalle misure.

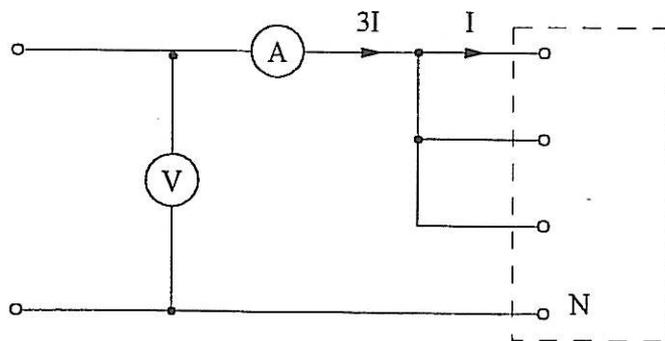


fig. 2.191

Se il trasformatore ha un avvolgimento collegato a triangolo, questo risulta un cortocircuito per le tensioni indotte di sequenza zero e l'impedenza dell'avvolgimento si riduce praticamente a quella di cortocircuito. Se è possibile, si misura in questo caso la corrente che circola nell'interno del triangolo.

Se invece tutti gli avvolgimenti sono collegati a stella, le correnti di sequenza zero che circolano nell'avvolgimento primario sono solo magnetizzanti; l'impedenza alla sequenza zero coincide con l'impedenza a vuoto se i flussi delle tre fasi possono richiudersi separatamente (nuclei indipendenti, a cinque colonne ecc.); nel caso di flussi vincolati, essa risulta invece molto più bassa poiché il flusso risultante si chiude in aria e nella cassa, dando anche luogo a perdite elevate.

**Esempio**

Si consideri un trasformatore trifase con connessione stella/stella con neutro e nucleo a flussi vincolati, come nelle costruzioni usuali, con le seguenti caratteristiche:

$P_n = 150 \text{ kVA}$ ,  $V_1 = 10 \text{ kV}$ ,  $V_2 = 400 \text{ V}$ ,  $I_{2n} = 216,5 \text{ A}$ ,  $Z_{2n} = 1,067 \Omega$

La sua impedenza alla sequenza zero si colloca tra quelle associabili ai due casi meglio definiti relativi alle macchine con un triangolo e a quelle a stella con flussi liberi. Nel primo caso sarebbe

$x_0 = x_c \cong 0,04 \div 0,06$  mentre nel secondo

$x_0 \cong 50 \div 100$ , ovviamente in termini relativi.

La reattanza alla sequenza zero per la macchina in oggetto può essere orientativamente stimata intorno a 1 pu.

Nel caso specifico si sono misurati, con lo schema di Fig. 2.191

V (V)	I (A)	$X_0$ (mΩ)
9,7	41	709,8
15,4	69,4	665,7
21,1	103,6	611,0
25,1	131,1	574,4
30,4	170,0	536,5

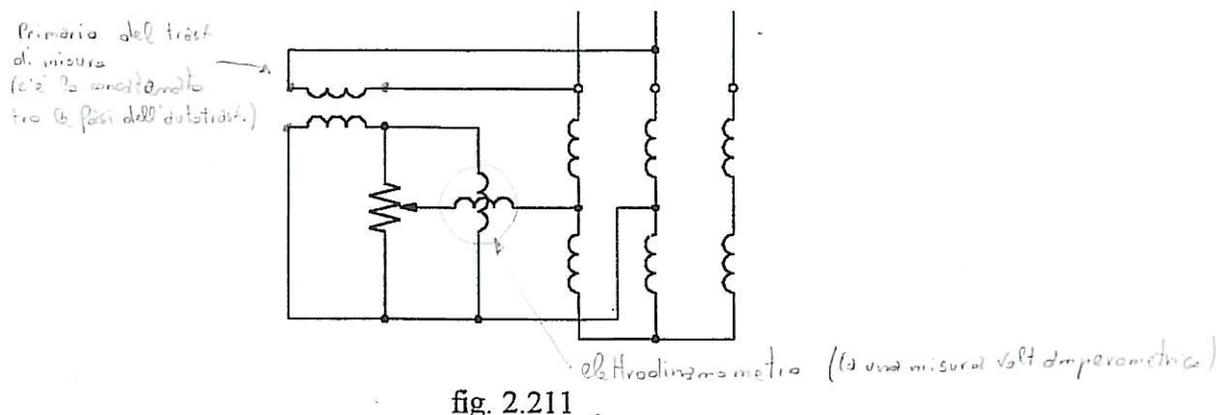
$$\frac{V}{I} \cdot 3 = X_0$$

In termini relativi risulta pertanto  $x_0 \cong 0,5 \text{ pu}$ . Si nota che anche se una parte del percorso del flusso è in aria, la presenza della cassa non laminata introduce una notevole non linearità nella caratteristica. L'alimentazione richiede un trasformatore con caratteristiche non proprio comuni (tensione bassa e corrente elevata); deve essere inserito un TA e, ovviamente, non si può salire molto con la tensione perché già a questi livelli la corrente nel neutro è prossima alla nominale.

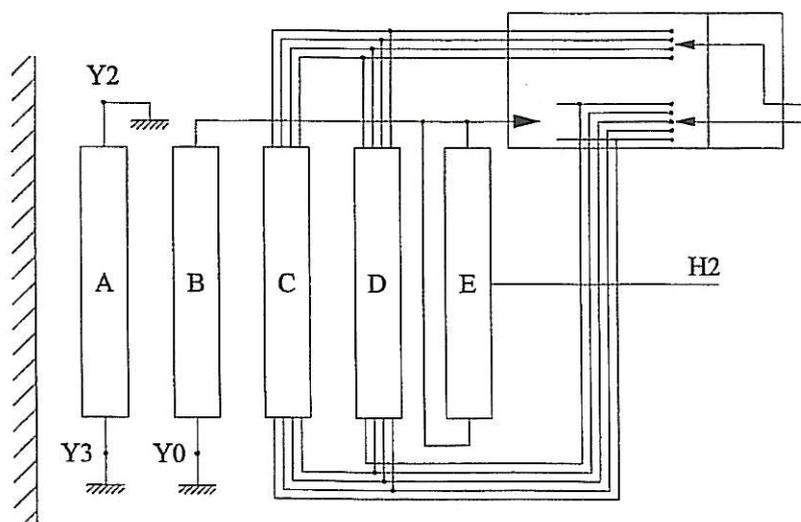
2.2 Prove sui trasformatori speciali

2.21 Prove sugli autotrasformatori

Le prove sugli autotrasformatori non differiscono, in linea di principio, da quelle dei normali trasformatori a due avvolgimenti separati; la presenza di continuità elettrica fra primario e secondario impone tuttavia alcune cautele, per esempio nella misura del rapporto, dove può essere in qualche caso necessaria la presenza di un trasformatore d'isolamento a rapporto noto (fig. 2.211), a meno che non si decida di misurare il rapporto su ciascuna colonna.



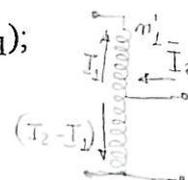
La realizzazione costruttiva dell'autotrasformatore ed in particolare la disposizione geometrica degli avvolgimenti non differisce da quella di un trasformatore: in particolare l'avvolgimento serie viene avvolto in modo da essere concentrico con quello derivato, come mostrato nella figura seguente.



Qualche difficoltà di ordine pratico può sorgere nella prova in cortocircuito, che può presentarsi con valori di tensione piuttosto bassi, non sempre comodi per il corretto impiego degli strumenti di misura e per le possibilità di alimentazione.

In tal caso, conviene considerare il trasformatore, che per semplicità si considera monofase, composto, anziché di  $n_1$  spire primarie e  $n_2$  spire secondarie, dei seguenti due avvolgimenti:

- avvolgimento derivato (o comune) di  $n_2$  spire, percorse dalla corrente  $(I_2 - I_1)$ ;



CAPITOLO II – Trasformatori

- avvolgimento serie, di  $n'_1$  spire, percorse dalla corrente  $I_1$ , essendo ovviamente:

$$n'_1 = n_1 - n_2$$

come illustrato in fig. 2.2 12. È allora, per l'uguaglianza delle f.m.m. :

$$(2.211) \quad \frac{I_2 - I_1}{I_1} = \frac{n_1}{n_2} = \frac{V_{1n} - V_{2n}}{V_{2n}}$$

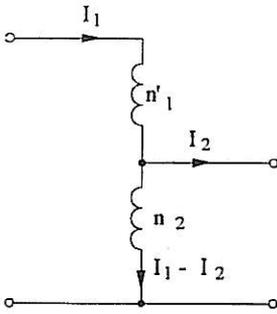
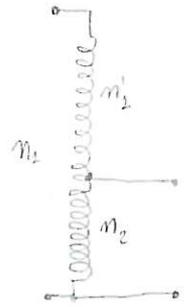


fig. 2.212

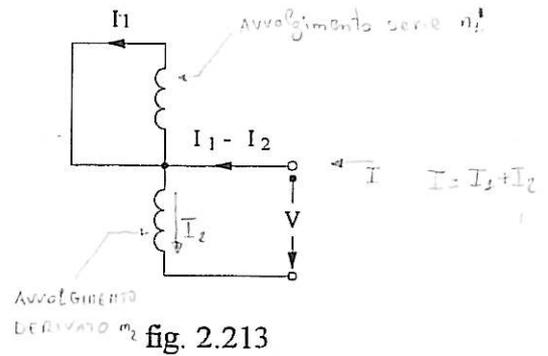


fig. 2.213

Questa distinzione è utile, per esempio, anche per il calcolo delle perdite per effetto Joule; infatti i due avvolgimenti, così definiti, sono percorsi ciascuno da un'unica ben determinata corrente; essendo inoltre di resistenza fra loro molto diversa, anche le misure di resistenza possono essere eseguite in modo più corretto.

In base a questa distinzione, la prova in cortocircuito può essere eseguita secondo lo schema di fig. 2.213, chiudendo l'avvolgimento serie e alimentando quello derivato.

Le correnti che percorrono i vari tratti di avvolgimento sono identiche a quelle che si ottengono con la prova in cortocircuito, secondo lo schema di fig. 2.214, e perciò le potenze attive e reattive messe in gioco sono le medesime. Si ha allora:

$$V(I_2 - I_1) = V_{c1} I_1$$

e perciò la tensione di cortocircuito, riferita al totale avvolgimento primario  $V_{c1}$  risulta:

$$V_{c1} = \frac{n_1}{n_2} V = \frac{V_{1n} - V_{2n}}{V_{2n}} V$$

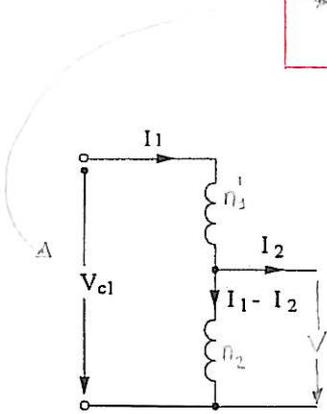


fig. 2.214

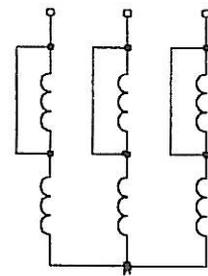


fig. 2.215

Questo schema permette quindi l'esecuzione della prova in cortocircuito a valori di tensione maggiori (e a correnti corrispondentemente minori) di quanto richiederebbe lo schema normale<sup>5</sup>.

Se invece la reattanza di dispersione fra gli avvolgimenti non è piccola (come accade, per esempio negli autotrasformatori di grande potenza usati per l'interconnessione delle reti) i due schemi non danno lo stesso risultato, non essendo più vera la (2.211) per entrambi i casi: tuttavia, per questo tipo di macchine, non ci sono problemi particolari connessi ai valori di tensione che sono normalmente tali da richiedere tensioni di prova dell'ordine di diversi kV.

Per gli autotrasformatori trifasi, provati come trasformatori, il cortocircuito è eseguito separatamente sulle varie fasi, come è indicato nella fig. 2.215.

2.22 Trasformatori a più avvolgimenti

Specie per grosse macchine, è frequente il caso di trasformatori con tre avvolgimenti, per i quali, come è noto, lo schema equivalente assume la forma di fig. 2.221. Fra le correnti circolanti nei tre rami sussiste la relazione vettoriale:

$$\dot{I} = \dot{I}_2 + \dot{I}_3$$

che comporta un'analogia relazione fra le potenze complesse dei tre avvolgimenti; questi possono avere perciò potenze (apparenti) nominali fra loro diverse, che conducono a valori diversi delle correnti e delle impedenze di riferimento.

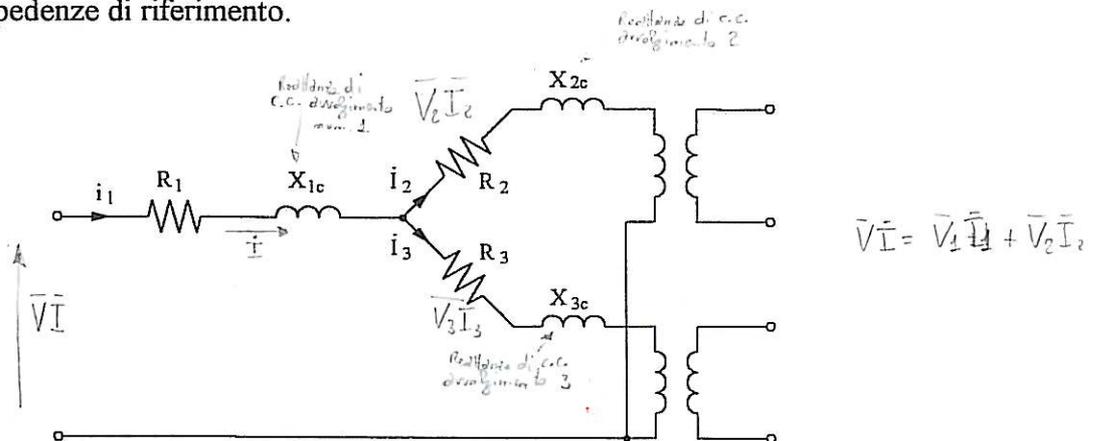


fig. 2.221

<sup>5</sup> Esempio

Si abbia un autotrasformatore monofase da 20 kVA, 220/200 V ( $I_{1n} = 90.9$ ;  $I_{2n} = 100$  A;  $v_{cc} = 2\%$ ). Nello schema di fig. 2.214 si avrebbe:

$$V_{c1} = \frac{2}{100} 220 = 4,4V \qquad I_1 = 90,9A$$

in quello di fig. 2.213:

$$I = 100 - 90,9 = 9,1A \qquad V = 4,4 \frac{200}{220 - 200} = 44V$$

valori che consentono l'uso di strumenti più comuni.

Mentre nulla si modifica nei riguardi delle prove a vuoto, che possono essere eseguite su uno qualunque degli avvolgimenti, per le misure dei rapporti di trasformazione e per le prove in cortocircuito è necessario considerare le tre possibili coppie di avvolgimenti (A.T./m.t., m.t./b.t., A.T./b.t.) come se si trattasse di tre separati trasformatori a due avvolgimenti.

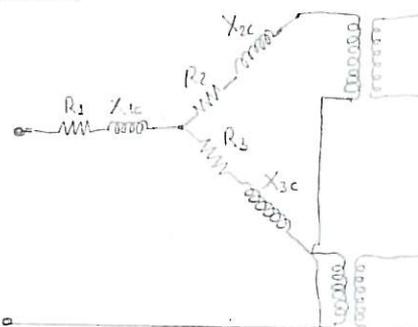
Le prove dei rapporti, eseguite singolarmente sulle coppie di avvolgimenti, con il terzo a vuoto, danno in genere risultati strettamente concordanti fra loro, talché una di esse può anche essere omessa; più importanti sono le prove di cortocircuito binario, poiché esse permettono, in linea di principio, la separazione delle reattanze e resistenze dei singoli avvolgimenti.

Siano infatti  $X_{12}$ ,  $X_{23}$ ,  $X_{31}$  i tre valori delle reattanze di cortocircuito, ottenuti separatamente nelle tre prove di cortocircuito fra gli avvolgimenti 1 e 2, 2 e 3, 3 e 1, rispettivamente, e riferiti tutti ad uno stesso avvolgimento; se, anziché le reattanze, si vogliono utilizzare i valori relativi delle componenti reattive delle tensioni di c.c., essi vanno ovviamente riferiti tutti allo stesso valore di potenza nominale. È facile vedere che le reattanze  $X_{1c}$ ,  $X_{2c}$ ,  $X_{3c}$ , che compaiono nello schema equivalente possono essere ricavate dalle precedenti, mediante le relazioni:

$$X_{1c} = \frac{1}{2}(X_{12} + X_{31} - X_{23})$$

$$X_{2c} = \frac{1}{2}(X_{12} + X_{23} - X_{31})$$

$$X_{3c} = \frac{1}{2}(X_{31} + X_{23} - X_{12})$$



Analoghe relazioni si possono istituire per le resistenze equivalenti: esse si compongono sia delle parti dovute alle resistenze dei singoli avvolgimenti, quali possono essere dedotti da misure in corrente continua, naturalmente riportate ad uno stesso avvolgimento, sia di una resistenza equivalente aggiuntiva  $R$ , che tiene conto delle perdite addizionali. È tuttavia da tener presente che, durante la prova in cortocircuito fra i due avvolgimenti estremi (il più interno e il più esterno), anche quello intermedio risulta investito da flusso ed è quindi sede di perdite addizionali che, con il procedimento sopra indicato, vengono invece attribuite agli altri due avvolgimenti. Ciò può comportare addirittura di attribuire, col calcolo, ad un avvolgimento, delle perdite addizionali negative; ciò non comporta alcun inconveniente, poiché nella determinazione delle perdite e delle cadute di tensione gli avvolgimenti non vanno mai considerati singolarmente, ma sempre almeno a coppie e la diversa distribuzione delle perdite addizionali non influenza il risultato totale.

È tuttavia possibile, per maggior aderenza fisica dello schema equivalente, separare le perdite addizionali dei singoli avvolgimenti.

### 2.23 Perdite addizionali nei trasformatori a tre avvolgimenti

Consideriamo, per semplicità, uno schema equivalente formato solo da resistenze, tutte riferite ad un solo avvolgimento; sia inoltre designato con l'indice 2 l'avvolgimento intermedio. Per tener conto delle perdite addizionali che si hanno nell'avvolgimento 2, quando sono alimentati gli avvolgimenti 1 e 3, è necessario introdurre una resistenza equivalente  $R'_{2a}$  disposta come in fig. 2.231; la  $R'_{2a}$  compare infatti solo nelle misure in cortocircuito binario fra gli avvolgimenti 1 e 3 e non influenza le resistenze che si misurano nelle prove fra 1 e 2 e fra 2 e 3.

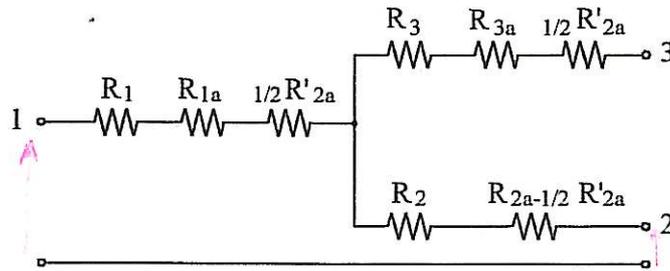


fig. 2.23 1

Il calcolo delle perdite addizionali nell'avvolgimento 2, quando sono percorsi da corrente solo gli avvolgimenti 1 e 3, può farsi facilmente, una volta note le sue caratteristiche costruttive (numero, forma, dimensioni dei conduttori in senso assiale e radiale ecc.) tenendo conto della distribuzione uniforme dell'induzione nel suo spessore (fig. 2.232 a). È tuttavia da osservare che anche le perdite addizionali proprie dell'avvolgimento 2 quando esso è alimentato, dipendono dagli stessi parametri costruttivi, con la differenza che la distribuzione dell'induzione lungo il suo spessore è, in questo caso, lineare (fig. 2.232 b).

Fra le resistenze equivalenti alle perdite addizionali in questi due casi cioè fra i valori di  $R'_{2a}$  e di  $R_{2a}$  sussiste perciò una certa relazione si può dimostrare<sup>(1)</sup>, che, escludendo il caso in cui l'avvolgimento 2 sia costituito da una sola piattina, si ha, con un'approssimazione del +5%, più che sufficiente per questi calcoli:

$$R'_{2a} = 3R_{2a}$$

Le resistenze che risultano dalle prove di cortocircuito binario sono quindi:

$$R_{12} = R_1 + R_2 + R_{1a} + R_{2a}$$

$$R_{23} = R_2 + R_3 + R_{2a} + R_{3a}$$

$$R_{13} = R_3 + R_1 + R_{3a} + R_{1a} + 3R_{2a}$$

queste relazioni consentono, una volta note  $R_1$ ,  $R_2$  e  $R_3$  mediante le misure in corrente continua, di valutare le  $R_{1a}$ ,  $R_{2a}$ ,  $R_{3a}$ .

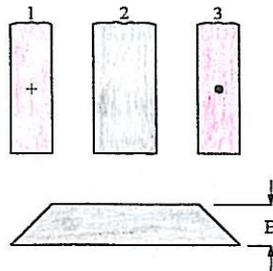


fig. 2.232 a

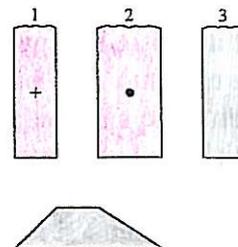


fig. 2.232 b

(1) Se  $m$  è il numero dei conduttori dell'avvolgimento 2 si ha:

$$R'_{2a} = 3R_{2a} \frac{1}{1 - \frac{1}{15m^2}}$$

Il metodo può risultare conveniente per discriminare un eventuale avvolgimento con valori anomali delle perdite addizionali; con trasformatori ben costruiti, eventuali differenze rispetto ai valori di progetto possono essere mascherate dall'incertezza dei calcoli, che comportano molte operazioni di differenza fra termini dello stesso ordine di grandezza. È tuttavia da notare che una simile possibilità non esiste, per i trasformatori a due avvolgimenti.

### Esempio

Dalle misure in cortocircuito binario e in corrente continua, si sono ottenuti i seguenti valori di resistenza, tutti riportati allo stesso avvolgimento (in milliohm):

$$\begin{array}{ll} R_{12} = 1,06 & R_1 = 0,32 \\ R_{23} = 1,15 & R_2 = 0,34 \\ R_{31} = 1,79 & R_3 = 0,49 \end{array}$$

si ha allora, dalle (2.231):

$$\begin{array}{l} R_{12a} = R_{1a} + R_{2a} = 0,40 \\ R_{23a} = R_{2a} + R_{3a} = 0,32 \\ R_{31a} = R_{1a} + R_{3a} + 3R_{2a} = 0,98 \end{array}$$

da cui:

$$\begin{array}{l} R_{2a} = 0,98 - (0,40 + 0,32) = 0,26 \\ R_{1a} = 0,40 - 0,26 = 0,14 \\ R_{3a} = 0,32 - 0,26 = 0,06 \end{array}$$

con il metodo del par. 2.22 si avrebbe invece:

$$\begin{array}{l} R_{1a} = \frac{1}{2}(0,40 + 0,32 + 0,98) - 0,32 = 0,53 \\ R_{2a} = -0,13 \quad ; \quad R_{3a} = 0,45 \end{array}$$

SACIARRE PARAGUARO

### 2.24 110 Trasformatori per gruppi raddrizzatori. Misura delle perdite

Nei trasformatori da impiegarsi in unione con gruppi raddrizzatori si può in generale assumere che le perdite nel ferro, in condizioni di normale esercizio, coincidano praticamente con quelle determinate con una prova a vuoto, in regime sinusoidale.

La stessa cosa non può dirsi per le perdite nel rame, dato che, in servizio, le correnti, sia primaria che secondaria, non sono sinusoidali ma si avvicinano, almeno teoricamente, a forme d'onda rettangolari, ricche di armoniche. Una simile forma d'onda dà luogo a perdite addizionali elevate e perciò ad una resistenza equivalente maggiore sia di quella che può essere misurata in corrente continua, sia di quella che può determinarsi dalle perdite in regime sinusoidale alla frequenza fondamentale; le perdite addizionali sono anche funzione della distribuzione spaziale della f.m.m. delle varie fasi.

Sono stati fatti alcuni tentativi di misurare le perdite complessive di un gruppo trasformatore-raddrizzatore, a regime nominale di carico o con cortocircuito a valle del raddrizzatore. Il primo metodo è assai complesso ed impreciso, specie con moderni raddrizzatori ad alto rendimento; nel secondo la forma delle correnti anodiche risulta molto diversa da quella di funzionamento, a meno di non intervenire opportunamente sull'angolo di commutazione dei raddrizzatori.

Si preferiscono perciò dei metodi equivalenti basati su delle misure in cortocircuito in corrente sinusoidale, di valore efficace pari a quello dell'onda di corrente rettangolare ideale, con angolo di sovrapposizione nullo. Questa forma d'onda ideale non sussiste in realtà, in servizio, poiché la reattanza del trasformatore smorza le armoniche più elevate e riduce perciò il valore efficace della corrente risultante. Questo errore in più compensa però abbastanza bene l'errore in meno che viene commesso per il fatto di misurare le perdite addizionali alla sola fondamentale; il principio è perciò accettato, con qualche variante sul metodo di applicazione, da tutte le principali norme.

I valori efficaci delle correnti secondarie ideali dei diversi schemi di collegamento si ottengono facilmente, per un dato valore  $I$  della corrente continua, dalla relazione:

$$I_2 = \frac{I}{\sqrt{p}}$$

dove  $p$  è il numero di anodi, in assenza di bobine di assorbimento (più in generale  $I_2 = \sqrt{360/\vartheta}$  se  $\vartheta$  è l'angolo di conduzione). Le correnti primarie si ottengono, a parte il rapporto di trasformazione  $k$ , dall'equilibrio delle amperspire. Per esempio nello schema di fig. 2.241 si ha:

$$I_2 = \frac{I}{\sqrt{6}} \quad I_1 = k \frac{I}{\sqrt{2}} \quad (\text{corrente di fase})$$

$$I_{11} = kI \sqrt{\frac{2}{3}} \quad (\text{corrente di linea})$$

e la potenza dissipata in condizioni di normale funzionamento vale:

$$P = 6R_2 I_2^2 + 3R_1 I_1^2 = [R_2 + k^2 R_1] I^2$$

Determinati tali valori, è possibile indicare una (o più) prove in cortocircuito, dalle quali sia possibile ricavare la potenza perduta in servizio nominale.

Per esempio, lo schema già citato di fig. 2.241 ha come molti altri schemi due avvolgimenti secondari accoppiati con lo stesso primario; la corrente di fase primaria ha perciò durata doppia e quindi a parte il rapporto spire valore efficace  $\sqrt{2}$  volte maggiore.

Se si esegue un cortocircuito su metà degli avvolgimenti secondari

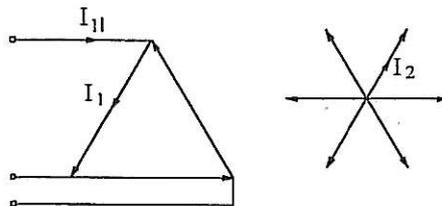


fig. 2.241

(uno per fase, come in fig. 2.242) e si invia nel primario una corrente sinusoidale di valore pari al nominale, si ha nel secondario una corrente  $\sqrt{2}$  maggiore di quella del funzionamento teorico ma, essendo interessati solo metà degli avvolgimenti, la potenza perduta globale corrisponde a quella nel funzionamento ideale.

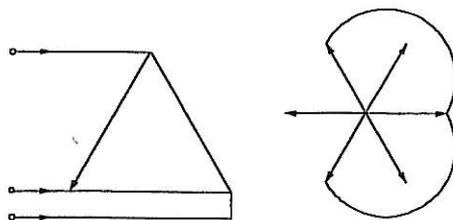


fig. 2.242

Per far percorrere le fasi dalla corrente voluta, in condizioni di cortocircuito, cioè di carico trifase simmetrico in regime sinusoidale, occorre che la corrente di linea sia ovviamente  $\sqrt{3}$  volte maggiore, cioè pari a  $kI$ ; se la prova è eseguita al valore nominale della corrente di linea, le perdite misurate sono i  $2/3$  delle perdite di funzionamento.

Tutto il valore delle perdite misurate viene riportato direttamente alla temperatura di riferimento.

Un altro metodo consiste nel misurare la potenza dissipata in un cortocircuito globale, con corrente primaria di valore pari alla nominale; misurando le resistenze primaria e secondaria, si possono separare le perdite addizionali che vanno poi riportate alla temperatura di riferimento. A queste si aggiungono poi le perdite per effetto Joule dedotte dai valori delle resistenze e dai valori nominali delle correnti ideali dei vari avvolgimenti. Le diverse combinazioni di cortocircuito da utilizzarsi sono riportate dalle singole norme. Per schemi complessi possono essere necessarie due o anche tre prove di cortocircuito parziale.

### 2.25 Reattanza di commutazione e caduta di tensione

Per la determinazione diretta della reattanza che interviene nella commutazione fra due anodi consecutivi, si procede in genere ad una misura di impedenza dal lato secondario, alimentando i due terminali corrispondenti agli anodi interessati e chiudendo in cortocircuito gli avvolgimenti primari; se esistono gruppi di avvolgimenti secondari identici e fra loro in parallelo od in serie durante il funzionamento, i vari gruppi corrispondenti devono essere fra loro connessi anche durante la prova.

I valori dell'impedenza (o della reattanza) misurati, divisi per due, costituiscono l'impedenza (reattanza) di commutazione fra fase e neutro. Per alcuni schemi, che non hanno interconnessioni fra fasi diverse, la reattanza può essere anche dedotta dalla stessa prova in cortocircuito che serve per la misura delle perdite.

La tensione continua a carico dipende in modo più o meno complesso dalle reattanze di commutazione e dal loro effetto sull'angolo di sovrapposizione nella conduzione di due anodi successivi; per questa ragione, la misura della caduta di tensione si esegue generalmente con carico reale. Data la non linearità della caduta con il carico, le norme fanno riferimento non alla tensione a vuoto ma a quella esistente con carico pari al 5% del nominale. Questa caduta comprende ovviamente anche l'effetto del raddrizzatore.

Per il trasformatore si fornisce anche il valore della tensione di cortocircuito, determinato con modalità analoghe a quelle degli altri tipi.

### 2.26 Trasformatori a corrente costante 170

In un trasformatore a corrente costante si invertono, per dualità, i significati delle prove di tensione e di corrente; si ha perciò una prova a corrente nominale, per la determinazione delle perdite nel rame, costanti al variare del carico; una prova a vuoto a tensione variabile, per la determinazione delle perdite nel ferro, variabili con il carico. Per queste prove si usano disposizioni ed accorgimenti del tutto analoghi a quelli in uso per i trasformatori a tensione costante.

perdite nel ferro, variabili con il carico. Per queste prove si usano disposizioni ed accorgimenti del tutto analoghi a quelli in uso per i trasformatori a tensione costante.

In questi trasformatori è la corrente secondaria che varia leggermente, in funzione del carico, tra un valore minimo  $I_m$  e un valore massimo  $I_M$ , mantenendo costante la corrente primaria; poiché queste variazioni sono dovute alla presenza della corrente magnetizzante, che non è lineare, la determinazione di tali valori è preferibilmente eseguita con un carico reale; essa potrebbe calcolarsi in base allo schema equivalente di fig. 2.261 se fosse nota la f.e.m.  $E$  da produrre a carico, il che richiederebbe la determinazione separata della reattanza di dispersione secondaria  $X_{12}$

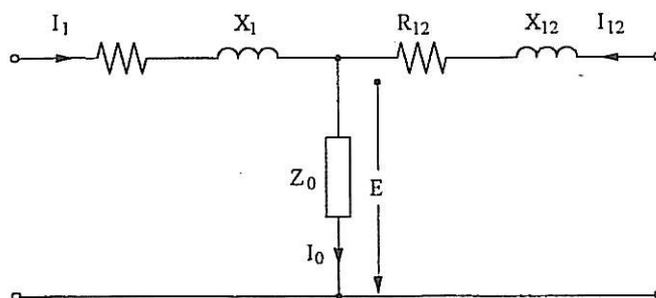


fig. 2.261

La variazione relativa di corrente è calcolata come metà dello scarto fra il valore minimo e il massimo rispetto al valore medio, cioè:

$$(2.261) \quad \Delta I\% = \frac{I_M - I_m}{I_M + I_m} 100$$

## 2.27 Trasformatori autoregolatori 110

I trasformatori autoregolatori, normalmente del tipo a bobina mobile, sono caratterizzati da un funzionamento a tensione primaria costante, corrente secondaria (e perciò anche primaria) costante e reattanza di dispersione variabile col carico.

Il rapporto di trasformazione a vuoto è di conseguenza variabile con la distanza delle bobine; generalmente si fornisce il valore corrispondente alla posizione di distanza minima.

Le variazioni di corrente, dalle condizioni di cortocircuito a pieno carico, si possono rilevare con una prova su carico reale; durante la prova la bobina assume posizioni diverse e la corrente passa da un valore minimo  $I_m$  a un valore massimo  $I_M$ . Si calcola in corrispondenza la variazione di corrente con relazione analoga alla (2.261). Questo scarto può essere regolato, in sede di messa a punto, agendo sui contrappesi.

Qualora non sia possibile eseguire la prova a carico reale, il secondario può essere posto in cortocircuito; variando la tensione primaria, la bobina mobile assume posizioni diverse, fra il minimo e il massimo della sua corsa, in corrispondenza alle quali viene misurato il valore assunto dalla corrente secondaria.

Anche per la determinazione del rendimento, è preferibile una prova diretta, dato che la potenza di queste macchine non è mai molto elevata, né il loro rendimento molto alto. Essa consente di tenere in giusto conto le perdite addizionali dovute ai flussi dispersi, che costituiscono una parte importante delle perdite totali a carico.

Queste perdite addizionali sono variabili con la posizione della bobina mobile, e devono perciò essere determinate nella posizione corrispondente al pieno carico nominale. Quando tale posizione sia nota, esse possono essere anche ricavate da una prova in cortocircuito con la bobina mobile bloccata.

Quando la posizione corrispondente al pieno carico non sia nota da una prova diretta, essa può ricavarsi approssimativamente da misure di reattanza di dispersione (in cortocircuito); si ha infatti

che il carico di tali trasformatori è prevalentemente ohmico per cui il loro diagramma vettoriale a carico assume la forma di fig. 2.271. In tale diagramma si possono introdurre i valori nominali di  $I_2$ ,  $V_2$  e i valori misurati di  $Z_C$  e  $V_Z$  in funzione della posizione della bobina.

Per valutare la distanza della bobina si tenga presente che essa va misurata fra i centri delle rispettive f.m.m., ossia vale:

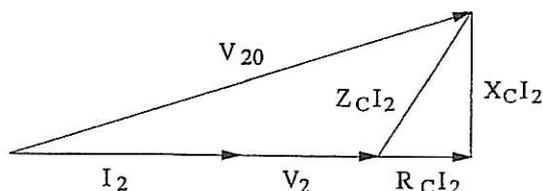


fig. 2.271

$$\Delta = h + \frac{h_1 + h_2}{3}$$

secondo formule sperimentali, trattandosi di bobine in genere larghe e sottili, il fattore 3 potrebbe essere ridotto a 2,5.

Si può anche ammettere che la reattanza e le perdite addizionali varino con una legge ben definita, o convenzionale, in funzione della distanza, ovvero del fattore (proporzionale al quadrato del flusso disperso):

$$\alpha = 1 - \frac{V_2^2}{V_{20}^2}$$

essendo rispettivamente  $V_{20}$  e  $V_2$  le tensioni secondarie, a vuoto e a carico, nella posizione considerata.

La prova si esegue quindi con il trasformatore in cortocircuito alimentato a tensione e corrente nominali lasciando libere le bobine di assumere la posizione corrispondente; dalla perdita misurata  $P_m$  si detraggono:

- le perdite  $P_0$  a vuoto, a tensione nominale;
- le perdite  $P_1$  per effetto Joule nel rame primario e secondario; la differenza va attribuita alle perdite addizionali e riportata alla posizione (incognita) della bobina con carico nominale, moltiplicandola per il fattore  $\alpha$ , corrispondente alla tensione secondaria nominale (si noti che è  $\alpha = 1$ , in cortocircuito).

Altre formule, basate su ipotesi differenti, danno risultati leggermente diversi; possono, in particolare, avere influenza sul valore delle perdite addizionali, i termini dovuti al flusso che investe la cassa, nei trasformatori in olio.

2.3 Prove sui motori asincroni 05/05/2007 AVERA STUDIO VIA GARFANI

2.31 Circuiti equivalenti

Come è noto, le caratteristiche di funzionamento di un motore asincrono possono dedursi dal suo diagramma circolare, ricavato sulla base di un circuito equivalente del tipo di fig. 2.311 o simili. Per un motore con avvolgimento rotorico ad anelli o con gabbia di scoiattolo

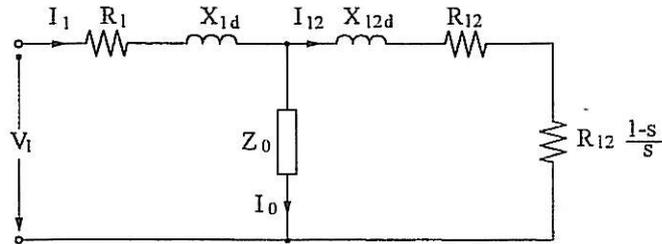


fig. 2.311

a sbarre semplici e non profonde, il circuito equivalente viene, in prima approssimazione, ridotto a quello di fig. 2.312 i cui elementi possono essere ricavati da prove a vuoto (a scorrimento  $s = 0$ ) e in cortocircuito ( $s = 1$ ).

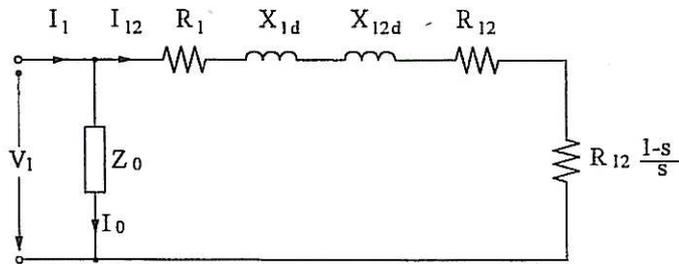


fig. 2.312

CORRETTA DI CORTO CIRCUITO (DIREBBE ESSERE VERTICALE CON  $\vec{I}_1$  NELLA QUADRANTE  $s=1$  APPROX. CC.)

Supposte note, in grandezza e fase, le correnti  $I_0$  e  $I_c$ , riferite alla tensione nominale  $\hat{V}$ , si ha infatti che gli estremi dei vettori  $I_0$  e  $I_c$  rappresentano due punti del diagramma circolare cercato, il cui centro è situato sulla parallela all'asse orizzontale passante per il vertice di  $I_0$  (vedi fig. 2.313).

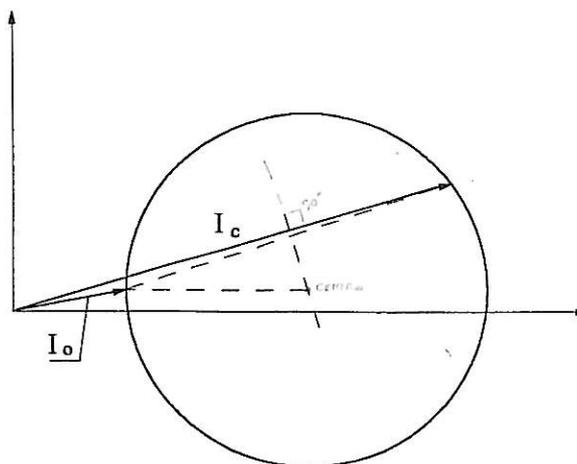


fig. 2.313

- Per costruire il diagramma circolare
- 1) Trovare  $\vec{I}_a$  e  $\vec{I}_p$
  - 2) Tracciare  $\vec{I}_0 = \vec{I}_a + \vec{I}_p$
  - 3) Fare ( $s=1$ ) e tracciare  $\vec{I}_c$  che in questo caso è  $\vec{I}_c$
  - 4) Portare la parallela alla verticale passante per il vertice di  $\vec{I}_0$
  - 5) Tracciare la  $\perp$  a  $\vec{I}_c$  trovando il centro della circonferenza

MOTORI ASINCRONI



Lo schema equivalente di fig. (2.312) è naturalmente solo approssimato e tanto più adatto a rappresentare il comportamento della macchina, quanto maggiore è l'impedenza a vuoto  $Z_0$ , rispetto all'impedenza propria (resistenza e reattanza di dispersione) dell'avvolgimento statorico. Ci si può avvicinare maggiormente allo schema più completo di fig. 2.311, mediante il circuito equivalente di fig. 2.314, che contiene, a valle dell'induttanza di dispersione primaria, la reattanza:

$$X_0 = X_1 - X_{1d} = (1 - \sigma_1) X_1$$

essendo:  $X_1$  = reattanza totale dell'avvolgimento statorico;  
 $X_{1d}$  = reattanza di dispersione dell'avvolgimento statorico rispetto a quello rotorico;  
 $\sigma_1$  = coefficiente di dispersione.

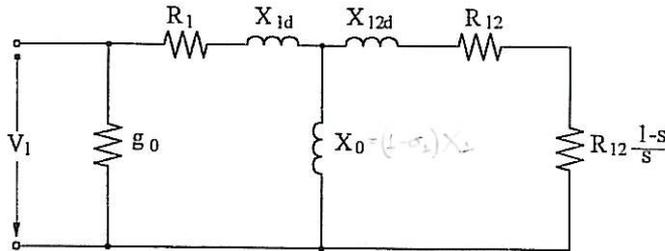


fig. 2.314

La conduttanza  $g_0$ , che tiene conto delle perdite a vuoto, viene invece, per semplicità, supposta a monte del circuito primario.

2.32 Prova a vuoto

La prova a vuoto consiste nella misura della corrente e della potenza assorbita dal motore, a tensione e frequenza nominali, quando sull'albero non è applicato alcun carico (fig. 2.321).

Il sistema è praticamente simmetrico, con fattore di potenza intorno a 0,1 - 0,2; il motore, tuttavia, presenta, rispetto alle eventuali tensioni di sequenza inversa un'impedenza prossima a quella di cortocircuito ossia molto bassa rispetto all'impedenza alla sequenza diretta; basta perciò una piccola dissimmetria nelle tensioni di alimentazione - dissimmetria che a volte può essere provocata dall'inserzione stessa degli strumenti di misura -- per far assorbire al motore una corrente di sequenza inversa non trascurabile che può condizionare la scelta delle portate amperometriche. Occorre inoltre proteggere le amperometriche degli strumenti dagli effetti termici e meccanici delle correnti transitorie all'atto dell'avviamento.

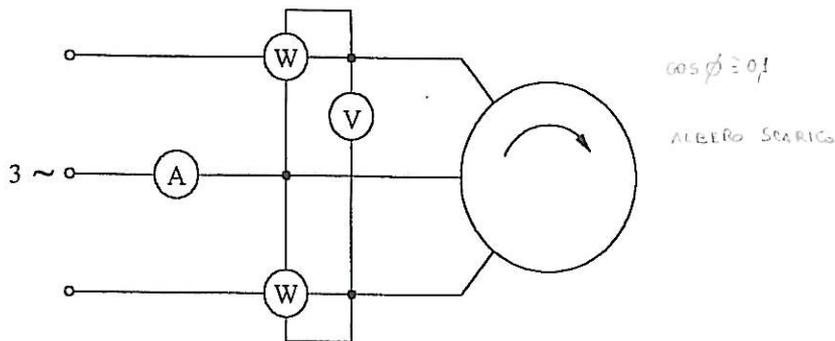


fig. 2.321

## MOTORI ASINCRONI

Per rappresentare correttamente le grandezze del circuito equivalente, la corrente  $I_0$  dovrebbe essere determinata, in valore e fase, in condizioni di scorrimento nullo, e cioè col motore rotante alla velocità di sincronismo; questa velocità non viene però in realtà raggiunta, per la presenza delle perdite meccaniche di attrito ai cuscinetti e di ventilazione. Queste perdite devono perciò essere separate da quelle che esistono nell'impedenza a vuoto, cioè dalle perdite nel ferro statorico.

La separazione delle perdite può essere ottenuta, misurando la potenza elettrica assorbita dal motore, non caricato, con differenti valori della tensione applicata; le perdite meccaniche si ottengono estrapolando i valori delle perdite totali, fino a tensione zero. In pratica, si evitano valori troppo bassi di tensione, per i quali la macchina tende a rallentare, alterando il suo funzionamento; si riportano i valori delle potenze misurate in funzione della tensione o, preferibilmente, del suo quadrato, in modo da ottenere una curva assai prossima ad una retta (fig. 2.322), la cui intersezione con l'asse  $V = 0$  fornisce il valore delle sole perdite meccaniche. Per una migliore estrapolazione, conviene spesso depurare i valori di potenza dalle perdite nel rame statorico, dovute alla corrente a vuoto.

## PROVA A VUOTO

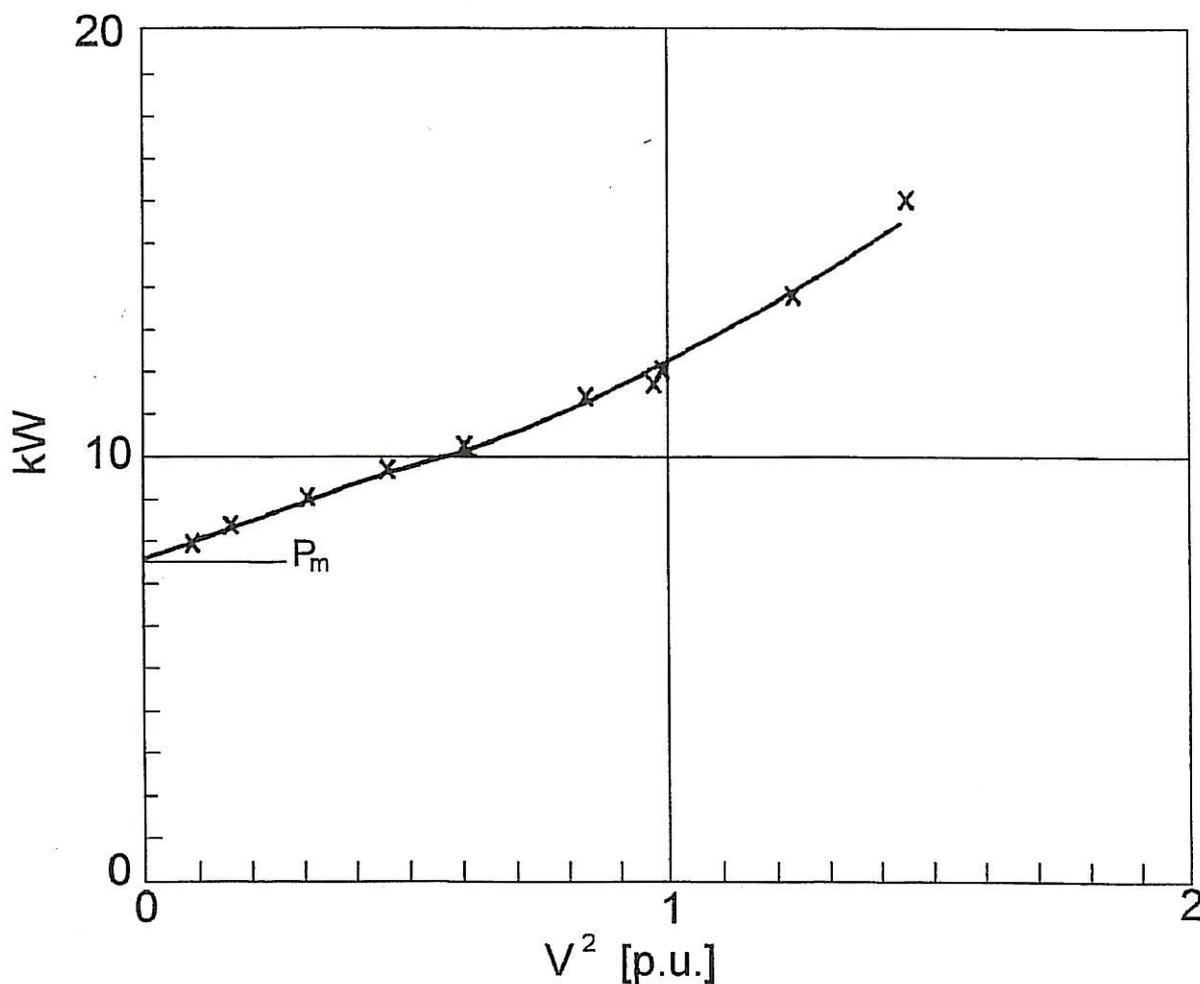


Fig. 2.322

Un altro metodo per la separazione delle perdite, utilizzabile per grosse macchine a rotore avvolgimento, consiste nell' eseguire le misure di potenza assorbita dalla macchina rotante a vuoto, prima e dopo l'apertura dei circuiti rotorici.

MOTORI ASINCRONI

A circuito rotorico aperto, non si ha praticamente più nella macchina coppia trasmessa e la potenza che si misura corrisponde alle sole perdite nello statore; tuttavia il rotore, lasciato a se stesso, rallenta gradualmente di velocità rispetto al campo rotante statorico, assorbendo di conseguenza una certa potenza per perdite nel ferro. La misura va fatta perciò molto rapidamente e solo con macchine la cui inerzia sia sufficientemente elevata da non provocare sensibili rallentamenti, prima che si possano eseguire le letture degli strumenti. Il valore delle perdite meccaniche, dedotto per differenza, è inoltre più affetto dalle incertezze delle misure e dagli errori strumentali che non col metodo di estrapolazione.

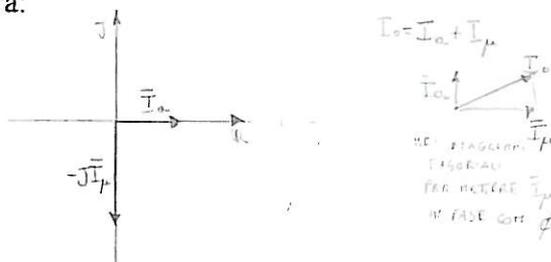
Le perdite meccaniche devono in ogni caso essere determinate quando i supporti e i cuscinetti hanno raggiunto l'equilibrio termico, e con la macchina rotante nel senso prefissato, quando questo sia indicato. Quando sono noti i valori  $P_m$  e  $P_f$ , rispettivamente delle perdite meccaniche e nel ferro, si ricavano le corrispondenti componenti attive della corrente assorbita; in particolare la corrente  $I_0$ , a scorrimento nullo, ha come componente attiva:

$$I_a = \frac{P_f}{\sqrt{3}V}$$

si ammette invece che la componente reattiva della corrente,  $I_\mu$  dedotta dalle misure, non sia influenzata dalla presenza delle perdite meccaniche. Si ha allora:

$$I_0 = I_a - jI_\mu$$

PERCHÉ È STATO PESSO SUL PIANO DI GAUSS



definita in grandezza e fase.

2.35 Misure di resistenza e di rapporto di trasformazione

La misura della resistenza degli avvolgimenti di statore si esegue con le modalità già descritte nei precedenti paragrafi; altrettanto dicasi per quella del rotore, nel caso di motori ad anelli. Per il riporto della resistenza rotorica al primario, è necessario determinare anche il rapporto di trasformazione fra i due avvolgimenti, dalla misura delle tensioni a vuoto, a macchina ferma, con circuito rotorico aperto.

La misura può essere eseguita mediante due voltmetri, dato che non è necessaria la precisione richiesta per i trasformatori; l'alimentazione deve però in ogni caso essere trifase, assumendo come risultato della misura il valore medio sulle tre fasi o la media di più letture eseguite su una stessa fase in diverse posizioni angolari del rotore rispetto allo statore.

Si nota tuttavia come il valore del rapporto delle tensioni a vuoto risulti diverso, a seconda che si alimenti il rotore o lo statore; detto infatti a il rapporto di trasformazione del trasformatore ideale di fig. 2.33 1, alimentando il primario con la tensione  $V_1$  si ha:

Fattori di trasformazione

$$\bar{I}_{12} = -\frac{1}{a} \bar{I}_2$$

$$\bar{V}_{12} = a \bar{V}_2$$

$$\bar{Z}_{12} = a^2 \bar{Z}_2$$

ALIMENTAZIONE AL PRIMARIO

$$V_2 = \frac{1}{a} V_1 \frac{(1-\sigma_1)X_1}{X_1} = \frac{(1-\sigma_1)}{a} V_1;$$

$$a = \frac{H_1}{H_2}$$

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{a}{(1-\sigma_1)}$$

DA CUI

$$a = \frac{V_1}{V_2} (1-\sigma_1)$$

alimentando il secondario con la tensione  $V_2$ , si ha, analogamente:

ALIMENTAZIONE AL SECONDARIO

$$V_1' = aV_2'(1-\sigma_2)$$

$$\Rightarrow a = \frac{V_1'}{V_2'(1-\sigma_2)}$$

da cui:

MOTORI ASINCRONI

$$\begin{cases} a = \frac{V_2}{V_2'} (1 - \sigma_2) \\ a = \frac{V_1'}{V_1'} (1 - \sigma_1) \end{cases}$$

Moltiplicando  
perché  
perché

$$\frac{V_1 V_1'}{V_2 V_2'} = a^2 \frac{1 - \sigma_2}{1 - \sigma_1} \cong a^2$$

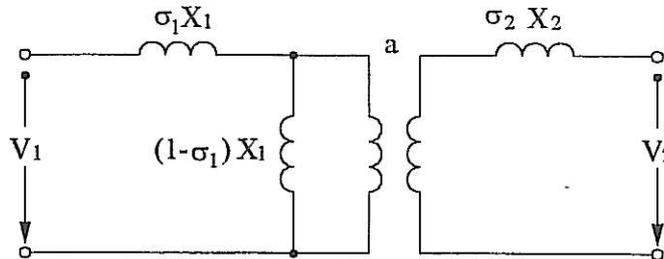


fig. 2.331

Conviene perciò assumere come misura del rapporto di trasformazione la media geometrica dei due rapporti misurati.

Inoltre, poiché i coefficienti di dispersione variano con il valore della tensione applicata, le misure devono essere eseguite intorno alla tensione nominale.

Facendo invece il rapporto:

$$\frac{V_2 V_1'}{V_1 V_2'} = (1 - \sigma_1)(1 - \sigma_2) \cong 1 - \sigma$$

coeff. di dispersione.

si può anche avere un'indicazione del valore del coefficiente di dispersione globale  $\sigma$ .

**2.34 Prova a rotore bloccato**

Questa prova - equivalente, per molti aspetti, alla prova in cortocircuito per un trasformatore - si esegue bloccando meccanicamente il rotore, in modo da impedirne la rotazione, e misurando tensione, corrente e potenza assorbite in tali condizioni. Si tratta in genere di un carico simmetrico, a fattore di potenza non troppo piccolo (0,3 - 0,5).

Il circuito non è invece lineare, poiché le reattanze di dispersione degli avvolgimenti dipendono dalla saturazione del circuito magnetico, specie nei denti. Se si volesse perciò determinare veramente il valore della corrente di cortocircuito, le misure dovrebbero essere eseguite applicando alla macchina la tensione nominale; sarebbe però necessario evitare un eccessivo riscaldamento eseguendo le misure nel giro di pochi secondi. In Fig. 2.341 sono riportate le misure della corrente assorbita per diversi valori di tensione ed il punto estrapolato alla tensione nominale.

Per la determinazione più corretta degli elementi del circuito equivalente - ossia per rappresentare la macchina nella zona del suo normale funzionamento - la misura dovrebbe invece essere eseguita intorno al valore della corrente nominale.

E' poi opportuno, specie con motori ad anelli, verificare, modificando la posizione angolare del

rotore nell'ambito di un passo polare, se la corrente assorbita dipende dalla posizione del rotore stesso; in tal caso si blocca il rotore in una posizione intermedia fra quelle che danno luogo a un massimo e ad un minimo o si assumono i valori medi di più letture, eseguiti coi rotore in posizioni diverse lungo un passo polare.

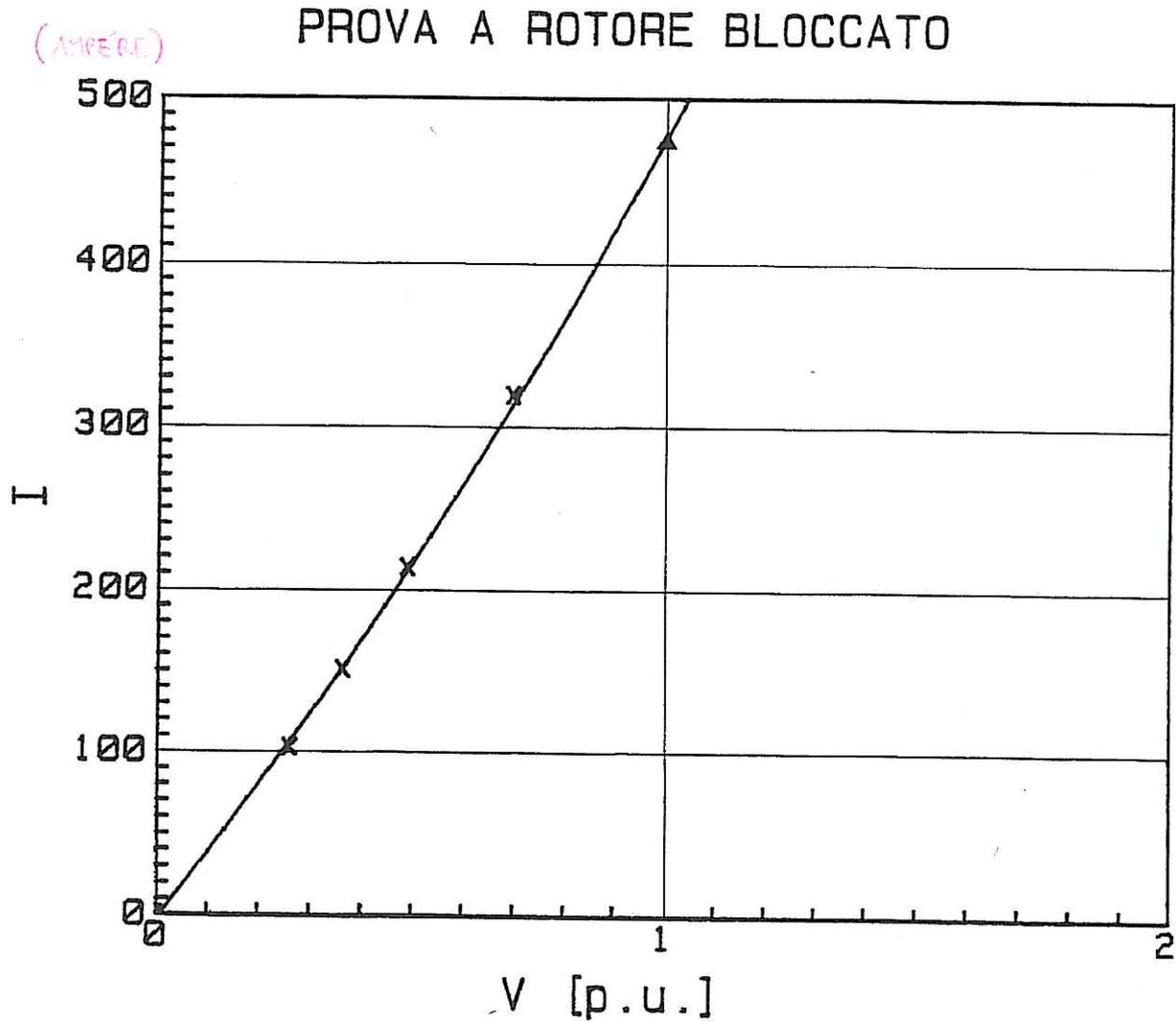


Fig. 2.341

Dalla potenza misurata a rotore bloccato, si può desumere la totale resistenza ( $R_1 + R_{12}$ ) del circuito equivalente; questa resistenza viene riportata alla temperatura di riferimento con il procedimento visto in 1.25. Dato però che parte della potenza viene dissipata nel ferro di rotore e, in ogni caso, con correnti alla frequenza di alimentazione, il valore della  $R_{12}$  risulta, in generale, errato in eccesso. Eseguito tale riporto, si potranno avere entrambe le componenti della impedenza in c.c. e quindi ricavare la corrente di cortocircuito  $I_c$ , alla temperatura voluta, e alla tensione nominale.

Nelle condizioni di rotore bloccato, può anche essere misurata direttamente la coppia che tende a trascinare in rotazione il motore (coppia di spunto); il suo valore dipende dalla tensione applicata: se risulta impossibile eseguire la prova alla tensione nominale, i valori misurati vengono riportati generalmente mediante una relazione quadratica (vedi 2.32). Poiché il valore della coppia può anche variare leggermente in funzione della posizione del rotore, se ne assume convenzionalmente il valore minimo. Le Norme americane suggeriscono, in mancanza di una misura diretta, di valutare la coppia di spunto dalla potenza  $P_c$ , dissipata nel motore, detratte le perdite per effetto Joule nello statore, mediante la relazione:

$$C = \frac{0,90}{1,03n_s} (P_c - 3R_1 I^2)$$

perdite nel ferro e tabacco + 0 addizionali

velocità di sincronismo  
giri al secondo

MOTORI ASINCRONI

il coefficiente 0,9 serve a tener conto delle perdite nel ferro statorico e delle perdite addizionali; le coppie sono in kgm, con le potenze espresse in watt e la velocità di sincronismo  $n_s$  in giri al minuto.

2.35 Costruzione del diagramma circolare semplificato (Heyland)

In base agli elementi dedotti dalle prove a vuoto ed a rotore bloccato, si può tracciare direttamente il diagramma circolare nella sua forma semplificata. Sono infatti noti, dai risultati di queste due prove, il punto  $A_0$  a scorrimento zero e quello  $A_1$  a scorrimento uno; il centro del cerchio giace inoltre sulla parallela all'asse delle ascisse, tracciata per il punto a scorrimento zero; la costruzione segue pertanto da note regole geometriche (fig. 2.351).

Scelta una scala arbitraria  $I(A/cm)$  per le correnti, in modo da rendere agevolmente tracciabili sia la corrente a vuoto che quella di cortocircuito, nel diagramma, che è riferito alla tensione nominale  $V_n$ , risulta anche fissata la scala delle potenze:

$$P(W/cm) = \sqrt{3} V_n I$$

Le potenze rese si leggono, in tale scala, per un generico punto di funzionamento  $A$ , a partire dalla retta  $A_0 A_1$  (retta delle potenze); per lo stesso punto sono direttamente ricavabili il valore della corrente primaria  $I_1$  (segmento  $OA$ ) e quello della corrente rotorica, riportata allo statore  $I_{12}$  (segmento  $A_0 A$ ); il fattore di potenza si deduce dall'ordinata del punto di incontro del segmento  $OA$  con l'arco di cerchio di raggio scelto come unità, per la scala arbitraria dei  $\cos\phi$ .

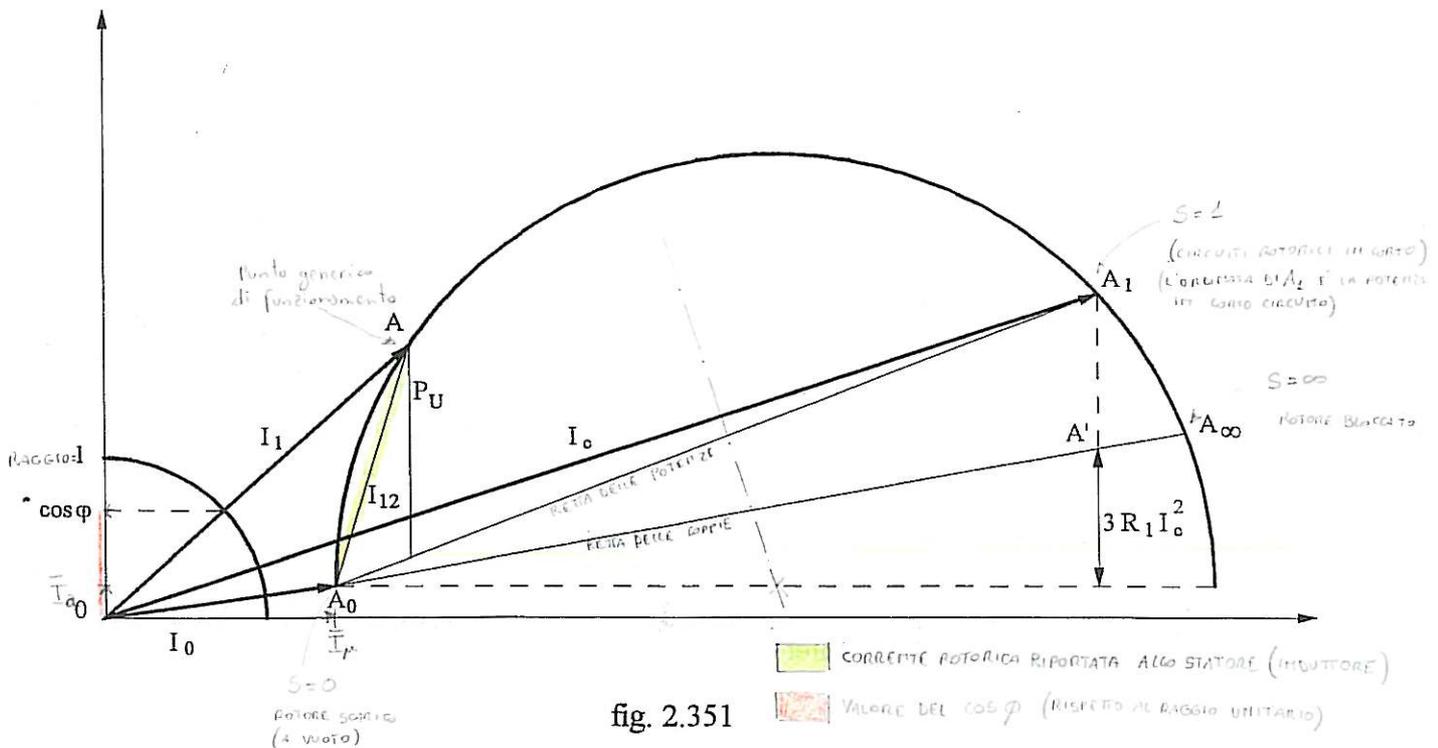


fig. 2.351

Dallo stesso diagramma potrebbe anche dedursi il rendimento, ma la sua lettura è, in generale, troppo incerta per potervi basare un collaudo. Il diagramma può essere completato con la determinazione del punto  $A_\infty$ , a scorrimento infinito, che consente il tracciamento della retta delle coppie ( $A_0, A_\infty$ ), e delle scale per lo scorrimento. A tale scopo si detraggono dall'ordinata del punto  $A_1$ , che rappresenta la potenza assorbita in cortocircuito, le perdite nel ferro e quelle per effetto Joule nello statore ( $3R_1 I_c^2$ ), calcolate per la corrente  $I_c$  di cortocircuito e per la temperatura di riferimento; il punto  $A'$ ,

MOTORI ASINCRONI

così individuato, appartiene alla retta delle coppie; queste si leggono, in corrispondenza al generico punto A, con la scala:

$$C(\text{kgm/cm}) = \frac{\sqrt{3} V_n I}{1,03 n_s}$$

Lo scorrimento si determina mediante costruzioni geometriche (figura 2.352), in genere non molto precise per i valori di normale funzionamento (preso S, punto a caso sulla circonferenza, lo si congiunge con A<sub>0</sub>, A<sub>∞</sub> ed A, punto in corrispondenza al quale si vuole ricavare lo scorrimento. Si traccia per A<sub>1</sub> la parallela ad A<sub>∞</sub>S e su questa si determina s).

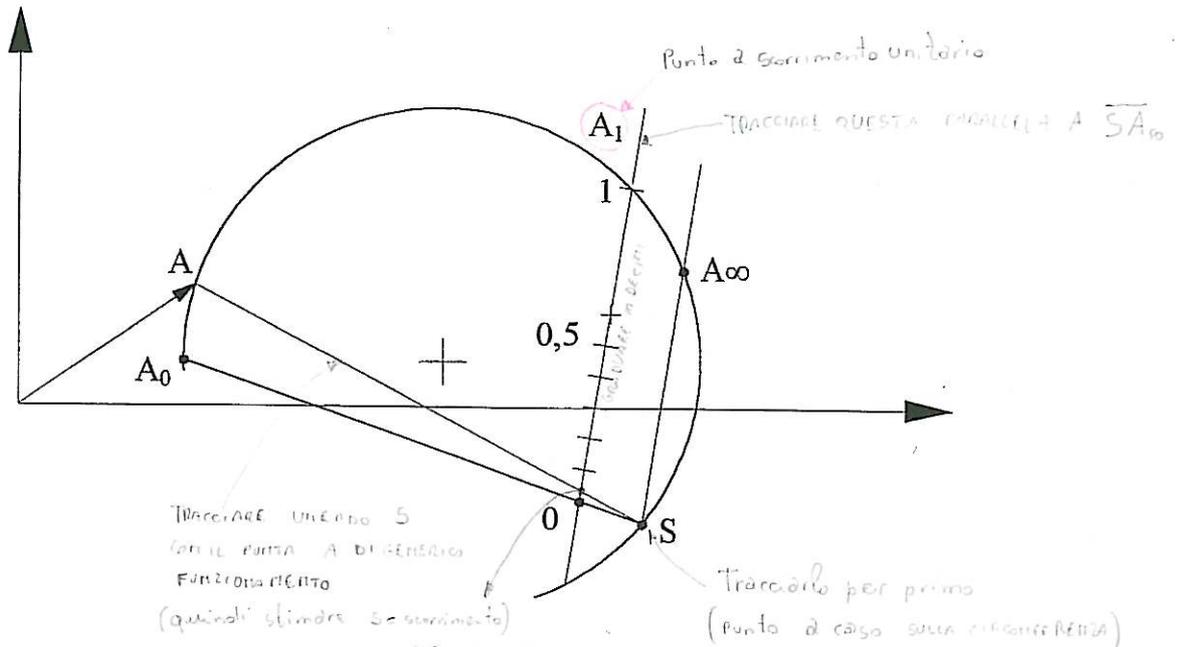


Fig. 2.352

Per quanto il diagramma circolare contenga, in teoria, tutti gli elementi che caratterizzano il funzionamento di un motore, su di esso possono essere letti con sufficiente attendibilità solo i valori delle correnti (statorica e rotorica), delle potenze assorbite e relativi fattori di potenza, delle potenze meccaniche utili e della coppia relativa; non sono invece deducibili in modo corretto né i valori del rendimento, né quelli dello scorrimento, né la ripartizione delle perdite nel rame fra rotore e statore.

2.36 Tracciamento del diagramma circolare più corretto (Ossanna)



Se si considera lo schema equivalente di fig. 2.311<sup>4</sup> si perviene a dimostrare che il luogo della corrente assorbita è ancora una circonferenza, di diametro:

$$D = \frac{2(1-\sigma) E}{\sigma + r^2 2X_1}$$

e che il centro nel punto di coordinate:

MOTORI ASINCRONI

$$x_m = \frac{1+\sigma}{\sigma+r^2} \frac{E}{2X_1}; \quad y_m = \frac{2r}{\sigma+r^2} \frac{E}{2X_1}$$

COORDINATE DEL CENTRO DELLA CIRCONFERENZA DI DIAMETRO D

dove si è posto:

$$X_1 = X_{1d} + X_0; \quad X_{12} = X_{12d} + X_0; \quad r = \frac{R_1}{X_1};$$

$$\sigma = 1 - \frac{X_0^2}{X_1 X_{12}}$$

COEFFICIENTE DI DISPERSIONE

E = tensione stellata

Non tutti questi valori sono determinabili mediante misure dirette; tuttavia le (2.361) ci dicono che il centro giace su di una retta, tracciata a partire dall'origine O', con inclinazione:

$$\tan \alpha = \frac{y_m}{x_m} = \frac{2r}{1+\sigma} \cong \frac{2R_1}{X_1} \cong \frac{2R_1 I_0}{E}$$

che può essere ricavata dalla misura diretta della resistenza statorica  $R_1$  e della corrente a vuoto  $I_0$  (fig. 2.361).

In base alle semplificazioni adottate, occorre però tener presente che l'origine delle coordinate O' differisce da quella delle correnti O, per la presenza della componente dovuta alle perdite nel ferro.

In base sempre allo schema assunto, si può dimostrare che la corrente corrispondente al punto  $s=\infty$  incontra la circonferenza ad un'ordinata

$$y'_m = \frac{2r}{\sigma(1+r^2)} \frac{E}{2X_1} = \left( 1 + \frac{r^2(1-\sigma)}{\sigma(1+r^2)} \right) y_m \cong y_m$$

*coeff. di dispersione*

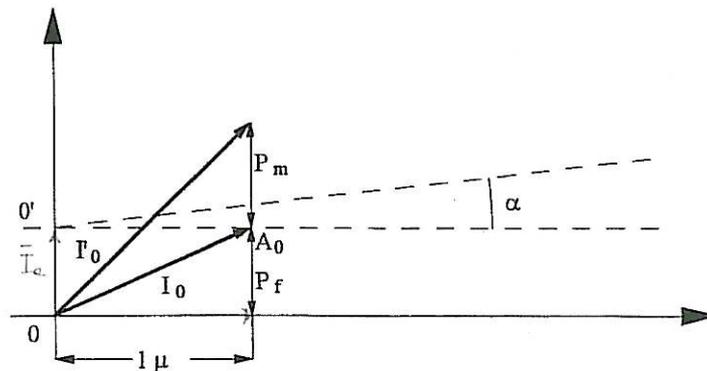


fig. 2.361

Questa relazione permette la determinazione del centro del cerchio, qualora sia nota la corrente a scorrimento infinito; poiché tale condizione è irrealizzabile, si può assumere che tale corrente incontri il cerchio nel punto di mezzo del segmento tracciato sulla verticale dal punto  $A_0$ , a scorrimento zero, fino ad incontrare la corrente di cortocircuito  $I_c$  (fig. 2.362); ciò corrisponde a supporre divise in parti uguali le perdite nel rame, fra statore e rotore. Le regole sopraenunciate, assieme alla conoscenza dei punti  $A_0$  e  $A_\infty$ , consentono il tracciamento.

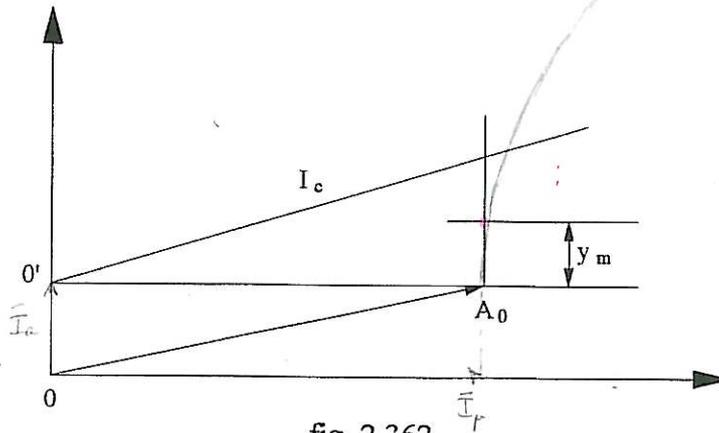


fig. 2.362

ALLA PAG. 100 DEL 05/01/2002 (UNA SIVA A VIGNOVA)

Il diagramma circolare così ricavato ha un diametro più piccolo di quello che si sarebbe determinato in base alla costruzione indicata al par. 2.35; l'errore che si commette dipende dal coefficiente di dispersione e vale all'incirca:

$$\eta = \sigma \left[ \frac{1}{2} + \left( \frac{R_1}{X_{1d} + X_{12d}} \right)^2 \right];$$

le grandezze che intervengono in questa relazione possono essere ricavate dalla conoscenza dei parametri costruttivi della macchina, ovvero, una volta tracciato il diagramma circolare semplificato, dalle due osservazioni seguenti (fig. 2.363):

a) il coefficiente di dispersione  $\sigma$  vale, approssimativamente:

$$\sigma = \frac{I_\mu}{I_\mu + D} \leftarrow \text{Diametro}$$

b) il fattore  $R_1/(X_{1d} + X_{12d})$  è l'inclinazione ( $\tan\beta$ ) della retta delle coppie.

Il valore di  $\sigma$  è normalmente compreso fra il 2 e il 10%, quello di  $\tan\beta$  fra 0,1 e 0,3.

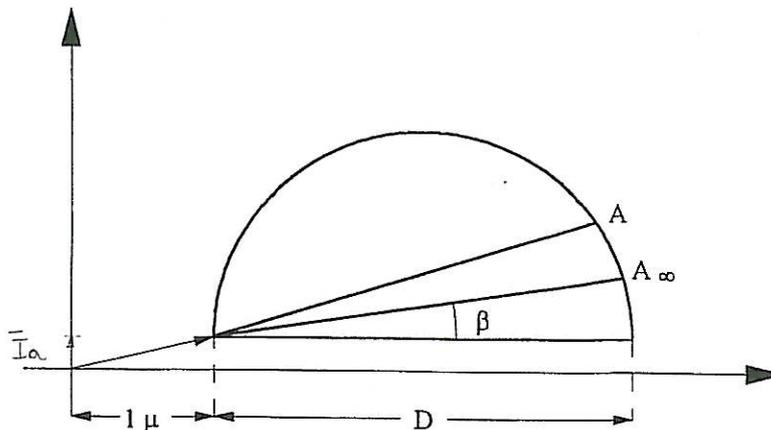


fig. 2.363

MOTORI ASINCRONI

2.37 Determinazione del rendimento

Il flusso delle potenze assorbite e perdute è rappresentato in fig. 2.371. I vari termini possono essere determinati per ogni condizione di funzionamento dalla prova a vuoto (con relativa separazione delle perdite), nonché dalla conoscenza dei valori delle resistenze e delle correnti statoriche e rotoriche, nella condizione di funzionamento richiesta.

Questi valori possono ricavarsi per una macchina a rotore avvolto dalle misure di resistenza in corrente continua (e del relativo rapporto di trasformazione), nonché dalle indicazioni fornite dal diagramma circolare; per i motori a gabbia devono invece essere ricavati con una prova supplementare al freno.

Infatti, pur non conoscendo né la resistenza né la corrente del rotore, la potenza in esso dissipata può essere dedotta dalla relazione:

$$P_p = sP_r$$

attraverso una misura dello scorrimento, nelle condizioni di carico desiderato, ed una valutazione della potenza  $P_r$  trasmessa al rotore come differenza fra la potenza entrante e tutte le precedenti cause di perdita. Come si vede nel diagramma di fig. 2.371, alle perdite per effetto Joule nello statore vengono aggiunte le perdite addizionali, valutate convenzionalmente - in mancanza di migliori determinazioni - come lo 0,5 % della potenza nominale assoluta, alla corrente nominale  $I_n$ , e variabili, per altri valori della corrente, con legge quadratica. Alle perdite per effetto Joule nel rotore sono aggiunte le perdite nelle  $m$  spazzole, quando esse siano inserite durante il normale funzionamento, valutando una caduta di 0,3 V per ciascuna di esse.

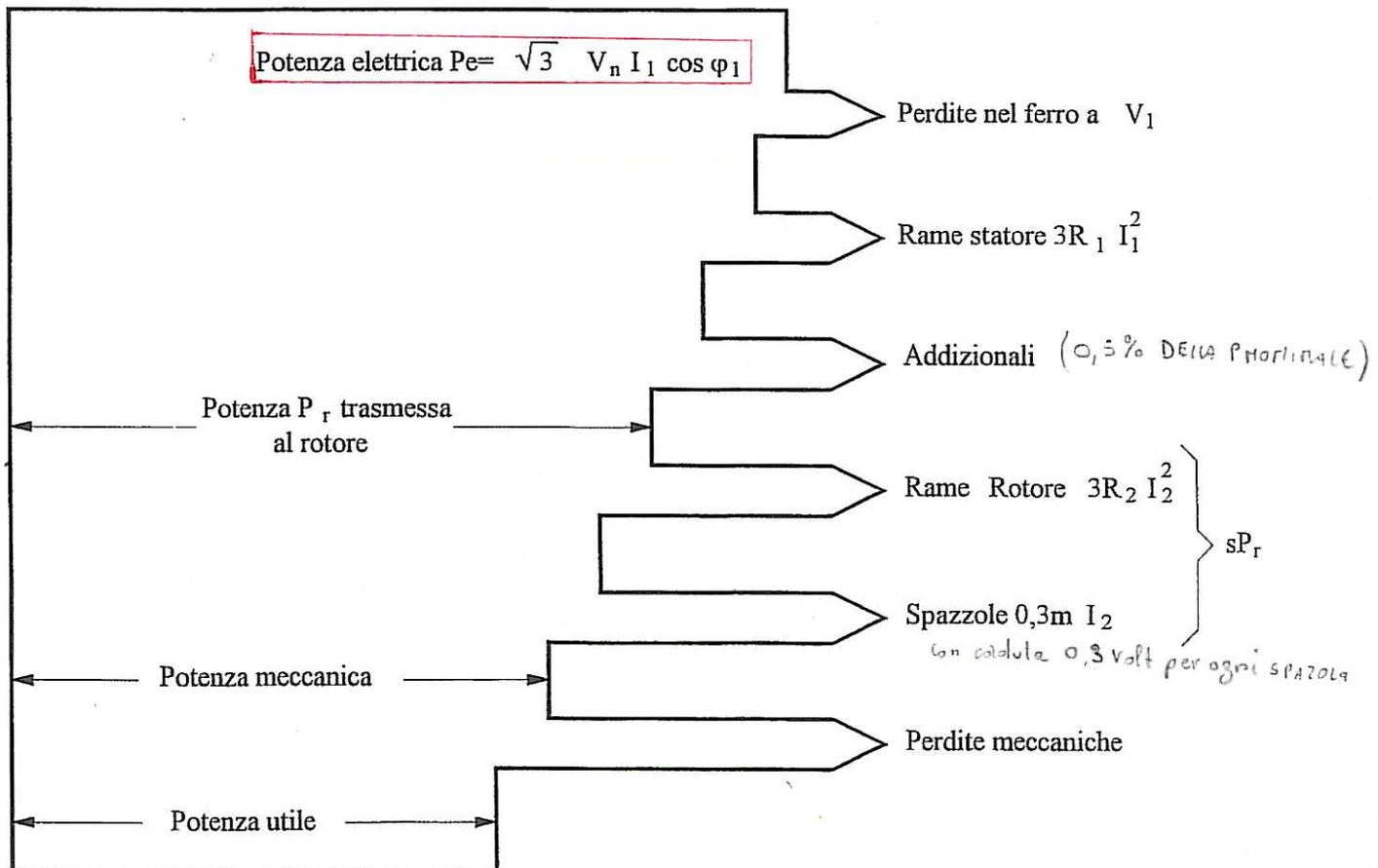
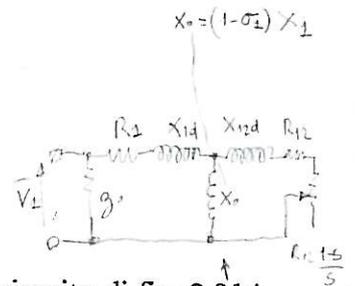
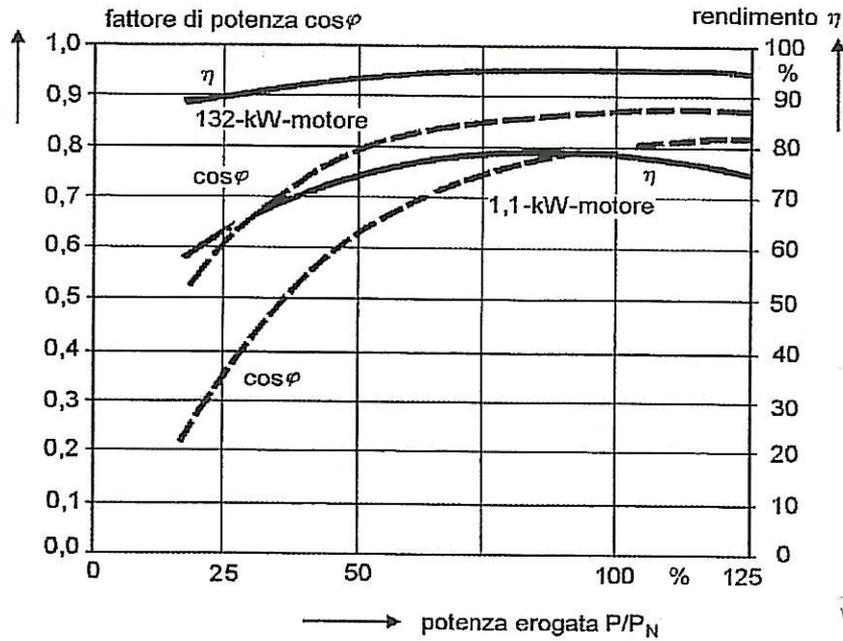


fig. 2.371

MOTORI ASINCRONI

Tutti i valori calcolati sono sempre riportati alla temperatura di riferimento.

In particolare, quando nella misura dello scorrimento a carico la macchina non abbia raggiunto la temperatura di regime, anche il valore dello scorrimento letto a temperatura ambiente deve essere riportato alla temperatura di riferimento, moltiplicandolo per lo stesso fattore  $k_t$ , usato al par. 1.25 per i riporti delle resistenze.



Il tracciamento del diagramma circolare altro non è che la soluzione grafica del circuito di fig. 2.314, soluzione che può essere trovata, punto per punto, anche analiticamente - e con particolare rapidità con i moderni mezzi di calcolo - per i motori con rotore avvolto.

Si abbiano, in base alle specifiche e alle misure precedentemente illustrate, i valori dei seguenti parametri:

- $E_n$  = tensione di fase nominale
- $R_1$  = resistenza statorica alla temperatura di riferimento;
- $R_{12}$  = resistenza rotorica, riportata allo statore, alla temperatura di riferimento;
- $X_0$  = reattanza di magnetizzazione (dalla prova a vuoto);
- $X_1 + X_{12}$  = reattanza di dispersione, ricavata dalla prova in cortocircuito; la suddivisione fra statore e rotore avviene generalmente secondo i dati di progetto o, in mancanza, in parti uguali.

Scelto un valore dello scorrimento  $s$ , si procede al calcolo delle seguenti grandezze:

$$\frac{R_{12}}{s} + jX_{12} = \dot{Z}_{12} \quad ; \quad \frac{1}{\dot{Z}_{12}} = G_2 - jB_2 \quad ; \quad \dot{Y} = G_2 - j\left(B_2 + \frac{1}{X_0}\right) \quad ;$$

$$\frac{1}{\dot{Y}} = R + jX \quad ; \quad Z_c = R + R_1 + j(X + X_1) = R_e + jX_e \quad ;$$

si arriva quindi a:  $I_1 = \frac{E_n}{Z_c} \quad ; \quad \cos\phi_1 = \frac{R_e}{Z_c} \quad ;$

e da questi dati si procede, per il calcolo del rendimento, come più sopra indicato.

Il metodo può anche essere utilizzato per motori con rotore a gabbia, ricavando la  $R_{12}$  dalle perdite in cortocircuito.

Le condizioni di funzionamento  $P_1$ ,  $I_1$ , alla tensione nominale  $V_n$ , possono anche essere ricavate da una prova a carico alla tensione ridotta  $V_r$ , a cui si misurano le grandezze  $P_r$ ,  $I_r$  e da una prova a vuoto, in cui si determina la corrente magnetizzante  $I_{\mu r}$  alla tensione  $V_r$ . Si ammette infatti che sia:

$$\dot{I}_1 - \dot{I}_{\mu} = \left( \dot{I}_r - \dot{I}_{\mu r} \right) \frac{V_n}{V_r}$$

(vedi fig. 2.372) e

$$P_1 = P_r \left( \frac{V_n}{V_r} \right)^2$$

mentre si assume valido lo scorrimento  $s$ , misurato a tensione ridotta.

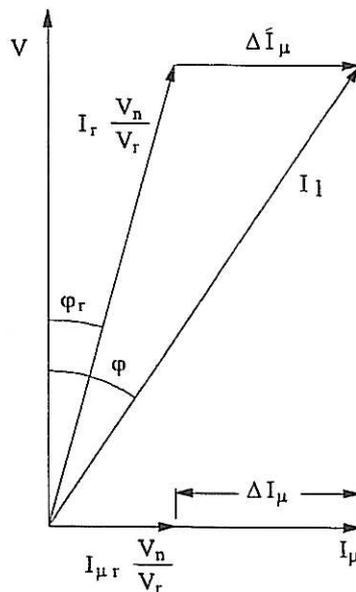


fig. 2.372

Con questa procedura, sia pur con qualche semplificazione, si arriverebbe a provare un motore di potenza esuberante rispetto al freno a disposizione.

### 2.38 Determinazione delle perdite addizionali

Per il miglioramento delle caratteristiche di un motore è spesso utile poter conoscere le sue perdite addizionali, intendendo come tali quelle che si verificano nel funzionamento della macchina, in più di quelle determinate con la prova a vuoto e di quelle corrispondenti alle perdite per effetto Joule nello statore e nel rotore. Queste perdite sono soprattutto legate alle irregolarità della distribuzione a carico delle f.m.m. di statore e di rotore (armoniche di dentatura, flussi dispersi, ecc.). Un primo metodo, consigliato anche dalle Norme americane per le macchine con rotore avvolto, consiste

## MOTORI ASINCRONI

nell'eccitare il rotore con una corrente continua (fig. 2.381) e nel trascinarlo in moto alla velocità di sincronismo. Si misura la corrente indotta in una fase dello statore, posto in cortocircuito, regolando l'eccitazione rotorica fino ad ottenere il valore  $I$  di corrente voluto. La differenza di potenza richiesta al motore di trascinamento per mantenere in rotazione la macchina, con e senza la corrente di eccitazione, va spesa nelle perdite statoriche per effetto Joule ( $3R_1I^2$ ) più le perdite addizionali. È naturalmente importante conoscere la temperatura dell'avvolgimento statorico, in modo da calcolare correttamente il valore della resistenza  $R_1$ .

Un metodo simile può essere pensato anche per il rotore, eccitando lo statore con corrente continua e trascinando il rotore ad una velocità di rotazione  $n$  tale che sia:

$$n = sn_s$$

se  $s$  è lo scorrimento nelle condizioni in cui si vogliono determinare le perdite. In questo caso, se non si può determinare la corrente rotorica (come avviene nelle macchine a gabbia) si deve regolare il valore della corrente di eccitazione fino a produrre lo stesso flusso per polo che sarebbe prodotto in c.a. alla tensione  $V$ ; questo controllo essendo lungo e incerto, il metodo è scarsamente utilizzato.

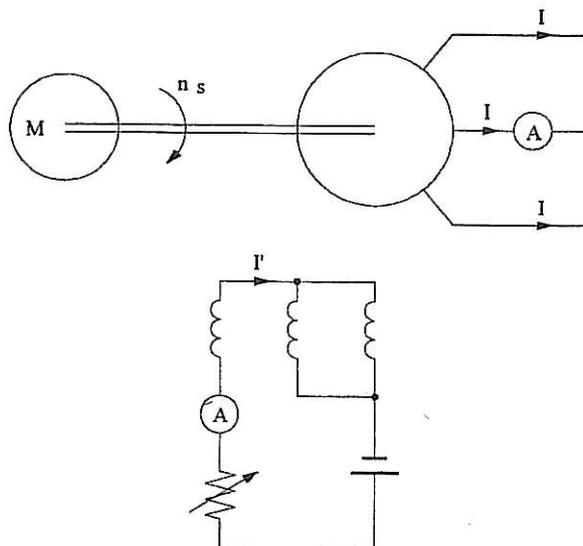


fig. 2.381

Le perdite addizionali  $P_b$ , dovute ai flussi prodotti dalle correnti statoriche nel ferro e nel rame dello statore stesso, possono essere determinate con una prova sul solo statore, in assenza di rotore (prova a rotore sfilato); devono essere però presenti tutte le parti metalliche (come gli scudi, i cuscinetti, ecc.) che possono essere sede di perdite. Per eseguire la misura, si invia nello statore una terna di correnti trifasi di valore  $I$  e si misura la potenza assorbita, che risulta:

$$P_s = 3R_1I^2 + P_b$$

anche qui, per una determinazione abbastanza accurata delle  $P_b$ , occorre conoscere il valore della resistenza  $R_1$  alla temperatura di prova. Accanto alla prova sopra indicata, si esegue, specie per motori a gabbia, la prova detta "a scorrimento due", per determinare le altre perdite addizionali.

Lo statore viene alimentato da un sistema di tensioni trifasi, di valore regolabile, mentre il rotore, cortocircuitato, viene fatto ruotare a velocità di sincronismo, in senso contrario al campo statorico, per mezzo di un opportuno motore; in genere la tensione primaria si regola in modo da ottenere sullo

MOTORI ASINCRONI

statore la corrente nominale. In queste condizioni si esegue la misura delle potenze assorbite sia sul lato elettrico  $P$ , sia sul lato meccanico  $P$ .

Il fondamento del metodo sta nel fatto che, nelle condizioni di scorrimento due, la potenza dissipata nel rotore è fornita per metà dalla sorgente trifase che alimenta lo statore, e per metà dal motore di trascinamento ( $R_2(1-s)/s = -R_2/2$ ), per cui si elimina nella loro differenza. In realtà la potenza elettrica  $P_e$  comprende:

- a) le perdite per l'effetto Joule nello statore alla corrente  $I_1$  di misura ( $3R_1I_1^2$ );
- b) le perdite dovute alla fondamentale del flusso statorico che possono ritenersi praticamente uguali a quelle determinate nella prova a rotore sfilato  $P_b$ .
- c) metà delle perdite nel rotore (perdite per effetto Joule, perdite nel ferro e addizionali).

Si ha allora il terzo termine:

$$P_c = P_e - 3R_1I_1^2 - P_b$$

La potenza meccanica  $P_m$  comprende:

- a') le perdite meccaniche per attrito e ventilazione  $P_m$  già note dalla prova a vuoto;
- b') metà delle perdite nel rotore, uguale a  $P_c$ ;
- c') le perdite addizionali, nel rotore e nello statore, dovute ai flussi di dentatura che, non essendo alla frequenza di alimentazione, non sono comprese nella potenza  $P_c$ .

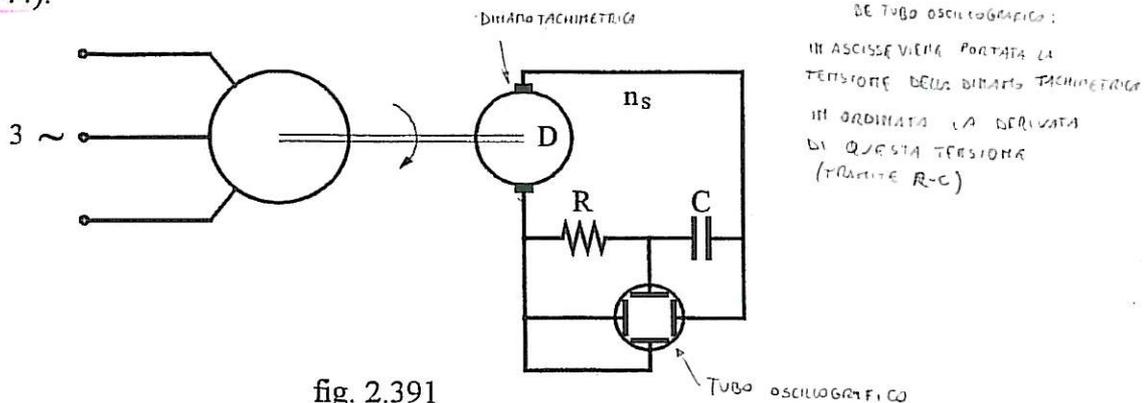
Si ha allora, per le perdite addizionali indicate in c):

$$P_{c'} = P_r - P_m - P_c$$

In realtà il metodo è solo approssimato, perché trascura le perdite nel ferro alla tensione di alimentazione e le perdite nel rame di rotore alla frequenza  $2f$  della f.e.m. indotta. Tuttavia l'esperienza ha dimostrato che fra queste cause di errore c'è una certa compressione, purché la corrente assorbita stia fra l'80 e il 150% del suo valore nominale.

2.39 Caratteristica coppia - velocità

Dal diagramma circolare si può facilmente risalire alla caratteristica coppia-velocità del motore; essa tuttavia non è in grado di mettere in evidenza eventuali irregolarità di funzionamento del motore ed in particolare l'esistenza di insellamenti dovuti a campi armonici o di dentatura. In tal caso, è utile provvedere direttamente al rilievo della caratteristica, punto per punto, mediante una prova di accelerazione (vedi 1.44).



## MOTORI ASINCRONI

La registrazione può essere eseguita sullo schermo di un tubo oscillografico; sulle ascisse viene portata la tensione prodotta da una dinamo tachimetrica e sulle ordinate la sua derivata, ottenuta mediante un circuito a resistenza e capacità (fig. 2.391) od opportuni amplificatori operazionali.

La taratura dell'oscillogramma è immediata, quando siano noti i valori della velocità di sincronismo e della coppia massima (fig. 2.392). Questa è da preferirsi alla coppia di spunto, dato che la registrazione non può essere particolarmente fedele nell'istante iniziale, a causa della presenza delle diverse costanti di tempo nella dinamo e negli apparecchi di misura associati (amplificatori ecc.). Tale costante di tempo non può essere ridotta al disotto di certi limiti, per evitare le irregolarità nell'andamento della derivata, dovute soprattutto alle discontinuità del collettore della dinamo tachimetrica. Per applicazioni molto delicate, si utilizzano dinamo tachimetriche omopolari o si inseriscono filtri opportunamente dimensionati.

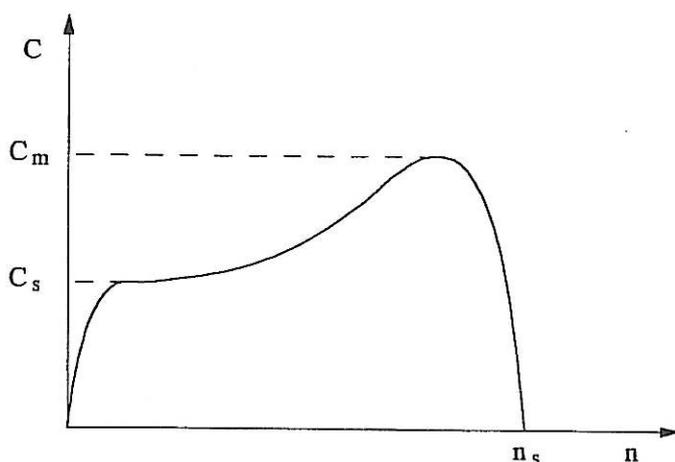
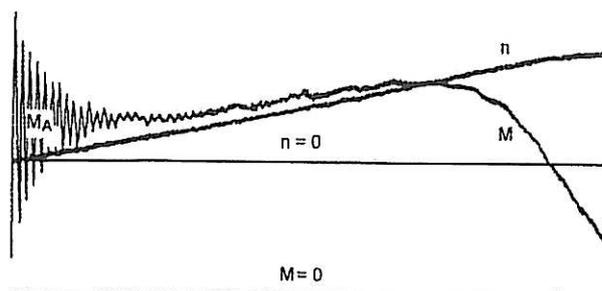


fig. 2.392

La caratteristica coppia-velocità può anche essere rilevata direttamente al freno; spesso per tali prove è necessario ridurre la tensione ad una frazione della nominale; non sempre, a causa della saturazione; è però lecito fare il riporto delle coppie secondo il quadrato della tensione; ad ogni modo tale riporto è cautelativo, poiché fornisce valori di coppia inferiori al reale.

Disponendo di un registratore digitale, il rilievo si traduce nella registrazione della tensione in uscita dalla dinamo tachimetrica con successiva elaborazione dei risultati: la coppia essendo proporzionale alla derivata della tensione fornita dalla stessa dinamo, è sufficiente, in linea di principio, determinare la differenza tra campioni successivi immagazzinati nella memoria. Normalmente è però necessario effettuare un filtraggio, anche abbastanza pesante, per eliminare vari tipi di rumore presenti nella registrazione della tensione, lo stesso rumore di quantizzazione e le oscillazioni presenti che si presentano soprattutto all'origine, dovute all'accoppiamento, più o meno elastico, tra la dinamo tachimetrica ed il motore (Fig. 2.393 e Fig. 2.394).



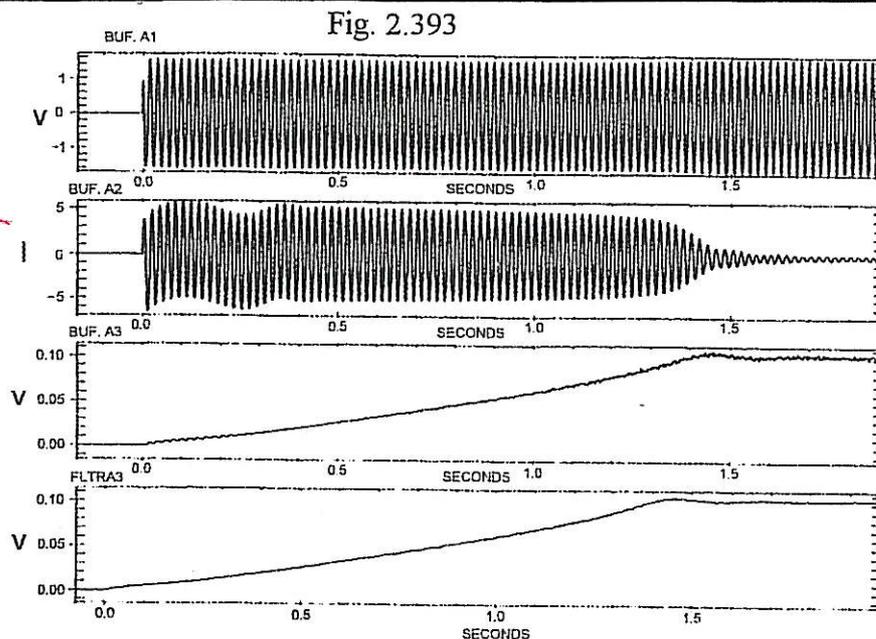


Fig. 2.394

La determinazione dello scorrimento, durante la prova a velocità prossime al sincronismo, si esegue facilmente con metodi stroboscopici, che consentono la misura diretta della velocità relativa fra rotore e campo statorico, se lo stroboscopio è sincronizzato con la frequenza  $f$  della rete che alimenta il motore.

In questo caso la velocità di sincronismo corrisponde ad una frequenza  $f/p$  del moto, se  $p$  è il numero di coppie polari; ponendo  $f_s = f$ , si vede facilmente, per quanto detto in 1.47, che è:

$$M = p$$

ossia appaiono tante immagini dello stesso riferimento quante sono le coppie polari. Queste immagini si muovono con una frequenza apparente corrispondente allo scorrimento.

Spesso è opportuno ricorrere ad una misura della frequenza  $f$  della f.e.m. indotta nel rotore, frequenza che sta nel rapporto  $s$  con la frequenza di alimentazione; trattandosi di frequenze molto basse (dell'ordine del periodo al secondo, o frazioni) si usano strumenti magnetolettrici a zero centrale, di cui si contano le oscillazioni in un minuto. Lo strumento può essere un amperometro, inserito nel circuito rotorico, ovvero un voltmetro (o un millivoltmetro) derivato fra gli anelli o su un tratto di albero, investito dal flusso disperso di rotore; essere infine un voltmetro, collegato ad una bobina, che viene collocata in prossimità degli avvolgimenti di rotore.

Il tracciamento della caratteristica coppia-scorrimento di un motore asincrono può anche avvenire, in base alla conoscenza della sua coppia massima  $C_m$  e dello scorrimento  $s_m$  a cui essa si verifica, secondo la relazione:

$$\frac{C}{C_m} = \frac{2}{\frac{s}{s_m} + \frac{s_m}{s}}$$

come indicato in fig. 2.393).

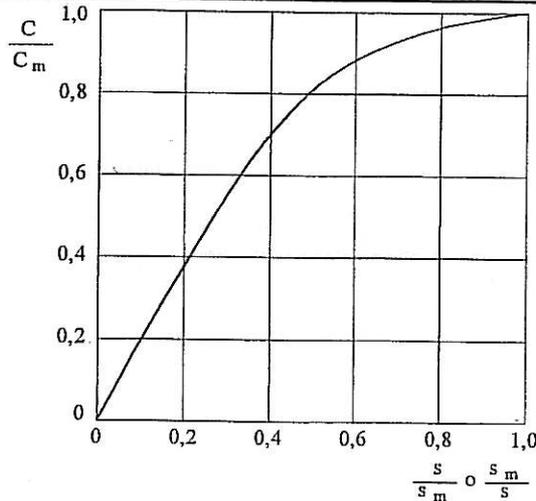


fig. 2.395

2.310 Motori a doppia gabbia

(09/05/2007) r.p.l.l.

Non tutti i motori asincroni possono essere rappresentati con uno schema semplice del tipo di quelli illustrati dalle figg. 2.311 e 2.314, che danno luogo ad un diagramma circolare della corrente assorbita, al variare dello scorrimento. Il caso più importante di motori con diagramma non circolare è rappresentato dai motori a doppia gabbia o a gabbia semplice a sbarre profonde; per essi lo schema equivalente può, con alcune semplificazioni, ricondursi a quello di fig. 2.3101, che dà luogo ad un diagramma di corrente assorbita del quarto ordine in  $s$

fig. 2.3101

Per il rilievo della caratteristica di questi motori è conveniente il tracciamento diretto del diagramma della corrente assorbita, in funzione della velocità, caricando opportunamente la macchina, eventualmente alimentata a tensione ridotta.

Quando ciò non sia possibile, il tracciamento si esegue riconducendo lo schema equivalente di fig. 2.3101, in quello di fig. 2.3102, dove gli elementi  $R$  e  $X'$  sono funzione della frequenza ( $f' = sf$ ) della f.e.m. indotta nel rotore, per i vari valori dello scorrimento  $s$ ; questi elementi possono quindi determinarsi, in prima approssimazione, mediante una prova a rotore bloccato, alla frequenza  $f'$ .

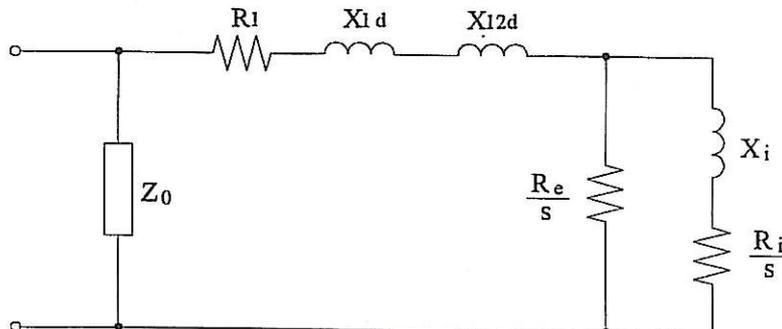


fig. 2.3101

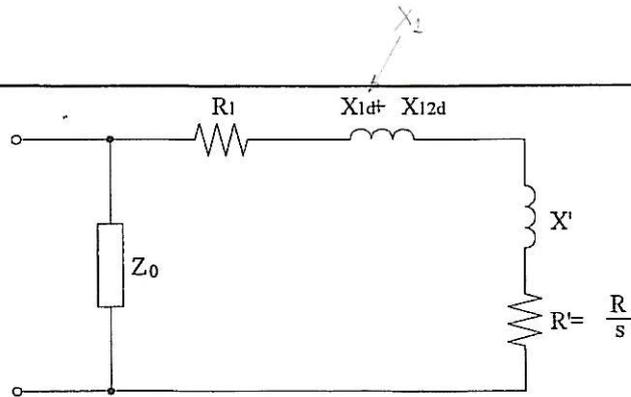


fig. 2.3102

Una volta determinati i valori di:

$$sR' = R = Z_c \cos \varphi_c - R_1$$

$$X_t = X_1 + X_{12} + X' = Z_c \sin \varphi_c$$

per i diversi valori della frequenza  $f'$ , a cui si misura la  $Z_c$ , si può, per inversione, tracciare il diagramma delle correnti assorbite, con le curve delle potenze e delle coppie (fig. 2.3103).

La maggior difficoltà del metodo sta nell'estrapolazione dei valori di  $R$  e di  $X_t$  per i bassi valori dello scorrimento, non essendo possibile eseguire misure attendibili a frequenze molto basse. Il valore limite di  $R$ , per  $s = 0$ , si può ricavare dalla misura dello scorrimento a vuoto  $s_0$  e dalla conoscenza delle perdite meccaniche  $P_m$ , essendo:

$$R_0 = \frac{3E_2^2 s_0}{P_m}$$

la misura è piuttosto delicata, essendo  $s$  dell'ordine di  $10^{-4}$  e influenzato dalle coppie parassite (per isteresi, di dentatura ecc.); come valore della

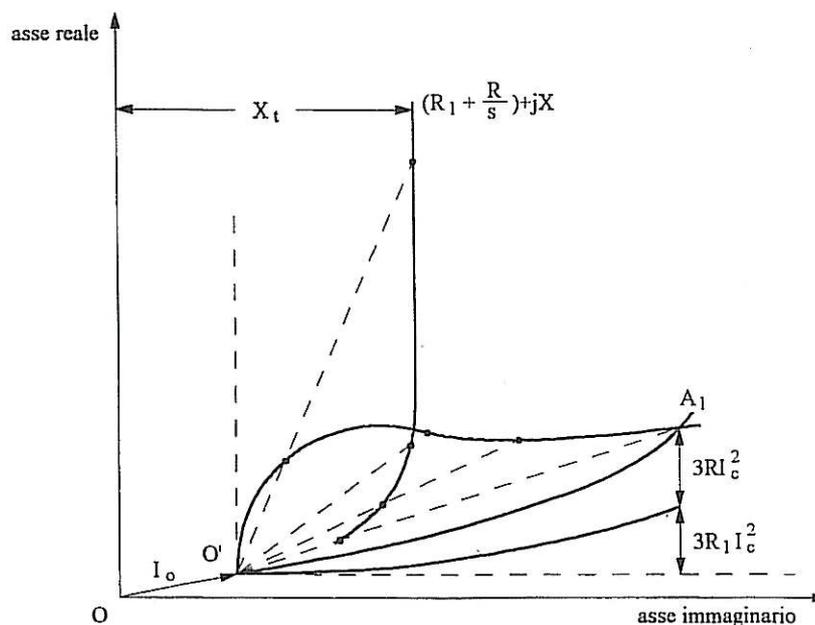


fig. 2.3103

## MOTORI ASINCRONI

f.e.m.  $E_2$  si può assumere la :

$$E_2 = V - XI_0$$

essendo  $I_0$  la corrente a vuoto e  $X$  il valore della reattanza estrapolato per  $s = 0$ .

Più difficile è l'estrapolazione del valore di  $X_t$  ; per questo scopo conviene tracciare la curva di  $X_t/s$  ed estrapolarla, per  $s = 0$  secondo una curvatura sempre crescente (fig. 2.3104).

Per maggior esattezza, nel calcolo dell'impedenza di corto circuito  $Z_c$  occorre tener conto della presenza, in parallelo, della reattanza a vuoto.

I valori a cui tendono  $R$  e  $X_t$ , per  $s$  tendente a zero, possono anche servire a tracciare un diagramma circolare per un motore "equivalente" al motore a doppia gabbia, nel campo del funzionamento da vuoto a carico.

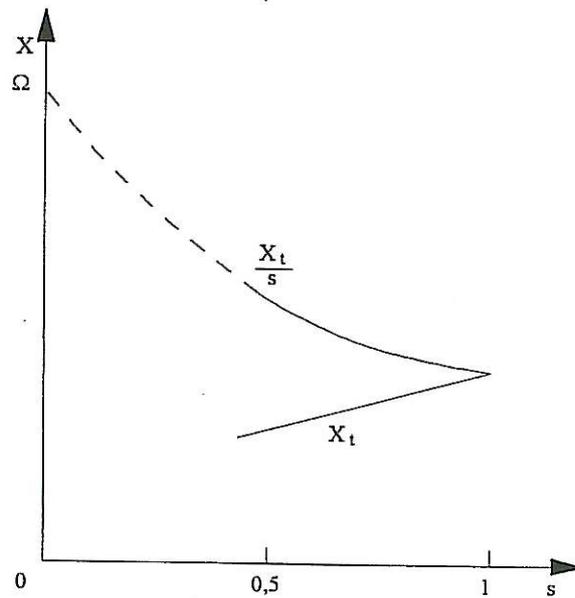


fig. 2.3104

## 2.4 Prove su macchine a corrente continua

Le macchine a corrente continua sono attualmente meno diffuse che in passato, per l'evoluzione di sistemi di controllo direttamente applicabili agli asincroni. Sono macchine che hanno limitazioni di tipo elettromeccanico, legate soprattutto alla pratica impossibilità di lavorare a tensioni elevate per la presenza del collettore su cui è applicata l'intera tensione: trattandosi di un organo costituito da lamelle metalliche isolate tra loro sulla cui superficie si verificano condizioni non ottimali per la tenuta alla tensione (tracce di polverino metallico dovuto alle spazzole, temperature elevate e possibili scintillamenti) non è prevedibile che la tensione possa salire oltre i valori attualmente in uso (qualche kV).

Ai livelli bassi (frazioni di kW), si trovano soluzioni convenienti anche rispetto agli stessi asincroni ottenute mediante l'impiego di magneti permanenti e quindi con una semplificazione drastica della costruzione.

### 2.41 Messa a punto di una macchina a c.c.

Prima di procedere alle prove di una macchina a corrente continua è necessario assicurarsi del suo corretto funzionamento, al fine di evitare risultati non soddisfacenti, che potrebbero richiedere la ripetizione delle prove stesse.

I controlli più comuni sono i seguenti:

- a) senso di rotazione: esso in generale unico ed imposto all'inclinazione dell'asse delle spazzole rispetto alla normale del collettore; convenzionalmente, si indica rispetto ad un osservatore che guardi la macchina dal lato della sporgenza dell'albero<sup>(1)</sup>; quando non è specificato, si intende generalmente il senso orario per le dinamo e antiorario per i motori;
- b) controllo del traferro, sotto i poli principali e sotto quelli ausiliari: si esegue con spessori calibrati che assicurino una precisione di almeno 0,1 mm;
- c) magnetizzazione dei poli: se la macchina non possiede un magnetismo residuo, essa non può autoeccitarsi; si provvede in tal caso a fornire una magnetizzazione preliminare con una sorgente separata;
- d) ordine corretto dei poli induttori: esso viene controllato mediante l'ago di una bussola o, più semplicemente, osservando l'attrazione di una sbarretta di ferro dolce fra due poli consecutivi; in alcuni casi, può risultare più semplice seguire direttamente il senso di percorrenza degli avvolgimenti. In analogo modo si può controllare la successione degli eventuali poli ausiliari e la loro corrispondenza al senso prefissato di rotazione;
- e) uniformità dei poli, per evitare la presenza di spire in cortocircuito; se si misura la caduta di tensione nei diversi tratti del circuito induttore, percorsi in serie dalla stessa corrente continua, è sufficiente una differenza dell'ordine di qualche per cento, fra due poli, per sospettare la presenza di un cortocircuito; un miglior controllo può eseguirsi sulle macchine a induttore laminato, con un'alimentazione in corrente alternata poiché in tal caso la presenza di un cortocircuito su un polo produce una notevole riduzione della sua caduta di tensione.

<sup>(1)</sup> Nel caso di doppia sporgenza dell'albero, dalla parte dell'albero di maggior diametro o da quella opposta al collettore, se gli alberi hanno ugual diametro.

La regolazione più importante, e che può maggiormente influire sulle caratteristiche di funzionamento, tuttavia quella delle posizione spazzole; quando non sia diversamente disposto, si tratta di ricercare la posizione dell'asse neutro, ricerca che può avvenire in base a principi e procedimenti diversi.

Il sistema più semplice si basa sul rilievo della f.e.m. transitoria, indotta, a macchina ferma, da una variazione del flusso induttore; il segno di questa f.e.m. che si determina con un voltmetro (o millivoltmetro), collegato alle lamelle del commutatore sotto una coppia di spazzole, si inverte quando le spazzole oltrepassano l'asse neutro.

Un altro metodo consiste nell'alimentare in corrente continua il solo indotto; la macchina tende a funzionare da motore serie, con il campo longitudinale fornito dalla reazione d'indotto; spostando le spazzole in direzione contraria al moto, l'asse neutro si determina come il punto limite fra posizioni che danno opposti versi di rotazione. Questa prova conveniente per macchine nuove, che non possiedano ancora un magnetismo residuo; in caso diverso esso va annullato attraverso cicli successivi di magnetizzazione ad ampiezze decrescenti, di segno alterno.

Quando non sia prescritto che le spazzole debbano stare sull'asse neutro, la loro posizione viene determinata in modo da non avere scintillamenti al collettore, nel passaggio da vuoto a carico. Alcune norme prevedono delle prove di commutazione, con carichi del 150% rispetto al nominale e con brusche variazioni di carico.

#### 2.42 Misura delle resistenze

In una macchina a corrente continua può essere necessario rilevare separatamente i valori delle resistenze dell'indotto, dei vari circuiti di eccitazione - serie, derivato ecc. - e dei circuiti ausiliari: poli ausiliari, spire di compensazione: si tratta infatti di circuiti che possono avere caratteristiche molto diverse per i diversi valori di corrente che devono portare. In generale, tuttavia, trattandosi di circuiti stazionari, non vi sono problemi particolari che li diversifichino da quelli delle macchine già considerate (valori ohmici spesso molto piccoli ed induttanze elevate).

La resistenza di contatto fra spazzole e collettore deve sempre essere esclusa dalla misura per le sue caratteristiche di dipendenza dalla corrente.

La misura della resistenza di indotto può farsi, indipendentemente dal tipo di avvolgimento, inviando nell'indotto una corrente continua  $I$  e misurando la caduta di tensione a valle di una coppia di spazzole di opposto segno (fig. 2.421); ciò presuppone però che la corrente si ripartisca uniformemente nelle vie interne, il che può non essere vero se esistono altre coppie di spazzole; nel caso in cui non sia possibile fare diversamente, si cura che il contatto di dette spazzole sia il migliore possibile e si assume come caduta di tensione la media dei valori misurati per coppie di lamelle, distanti fra loro un passo polare, poste sull'asse delle spazzole (fig. 2.422).

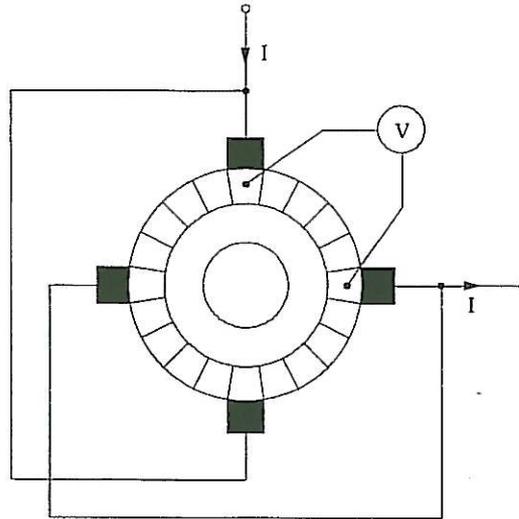
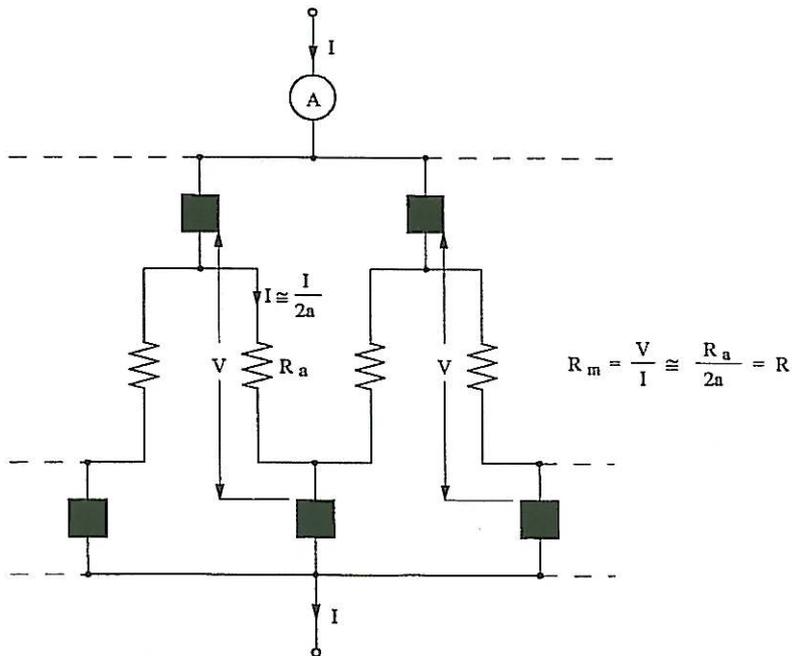


fig.2.421

Il metodo invece pienamente valido se esiste una sola coppia di spazzole (avvolgimento ondulado o embricato a due poli).



$$R_m = \frac{V}{I} \cong \frac{R_a}{2n} = R$$

$P =$  numero poli

$2P =$  coppie polari

Fig. 2.422

Per un avvolgimento embricato (con  $2p > 2$ ), sprovvisto di collegamenti equipotenziali, lo stesso procedimento di misura può essere adottato eseguendo la misura fra due punti diametrali del collettore, sollevando tutte le spazzole (fig. 2.423); il valore della resistenza d'indotto  $R$ , in funzionamento normale, è pari al valore misurato diviso per il quadrato del numero  $p$  di coppie di poli (che è uguale al numero delle file di spazzole).

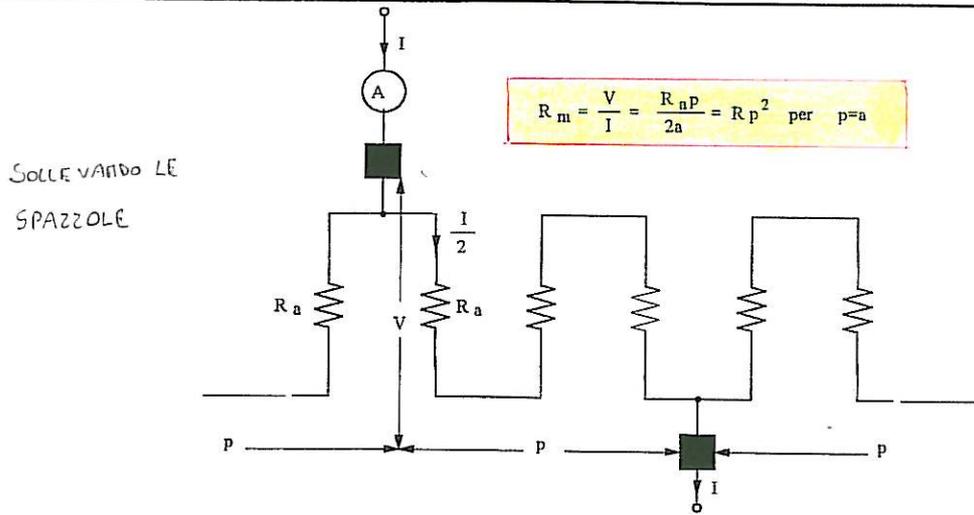


fig. 2.423

Con ciò si ha anche il vantaggio di misurare un valore  $p^2$  volte maggiore di  $R$ , il che è conveniente, dato il basso valore che ha usualmente tale resistenza.

Per un avvolgimento embriacato, con collegamenti equipotenziali, il valore della resistenza equivalente di indotto può essere assunto pari al valore misurato (fig. 2.424).

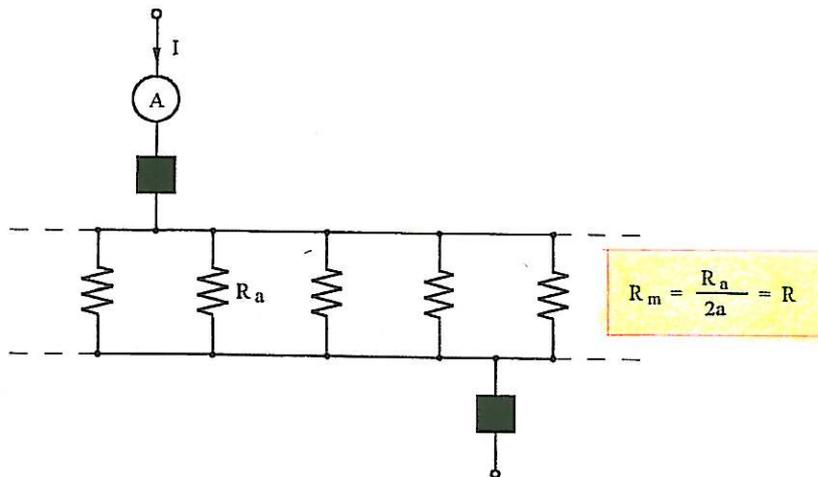


fig. 2.424

Per controllare l'esistenza dei collegamenti equipotenziali, basta verificare se la resistenza misurata fra due lamelle distanti un semipasso polare risulta uguale a quella misurata fra due punti diametrali. Talvolta la resistenza da misurare ha un valore tanto piccolo, da essere difficilmente misurabile: alcune Norme consentono, in questo caso, di impiegare i valori dati in progetto dal costruttore.

**2.43 Rilievo della curva a vuoto**

La prova a vuoto, ossia il rilievo della caratteristica che lega il valore della f.e.m. indotta al valore della corrente di eccitazione, serve sia per il tracciamento delle altre curve caratteristiche del funzionamento della macchina, sia per la determinazione delle sue perdite a vuoto (nel ferro e meccaniche).

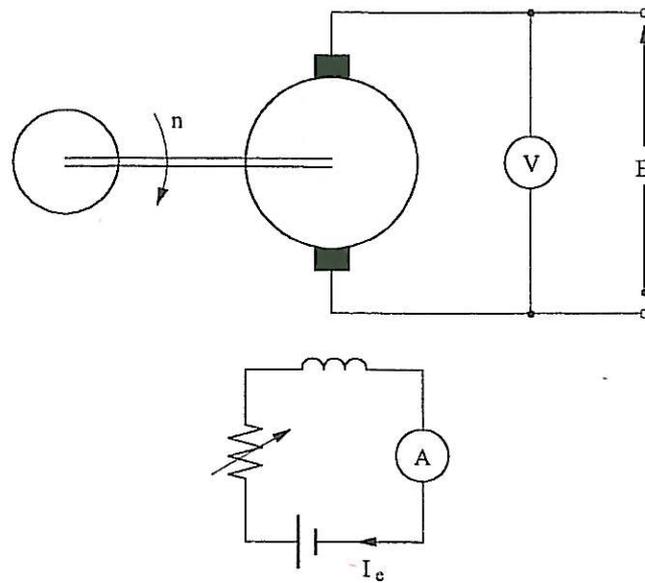


fig. 2.431

Qualunque sia lo schema di eccitazione, la prova viene condotta alimentando separatamente i circuiti di eccitazione, mediante una sorgente di tensione continua ausiliaria, regolabile. La misura viene condotta secondo lo schema di fig. 2.431; il motore di trascinamento fa ruotare la macchina in prova, preferibilmente alla sua velocità nominale  $n$ ; in caso di misure a velocità di rotazione  $n'$ , diversa da  $n$ , i valori della f.e.m. misurata vanno corretti moltiplicandoli per il rapporto  $n/n'$ .

Partendo da valori sufficientemente bassi della corrente di eccitazione, la caratteristica  $E, I_e$  viene tracciata per valori prima gradualmente crescenti, fino al 120-150% del valore nominale, e poi gradualmente decrescenti; le due curve possono differire fra loro per l'isteresi del circuito magnetico; normalmente si fa la media fra le due curve (fig. 2.432).

Il motore di trascinamento fornisce le perdite meccaniche - per attrito e per ventilazione - a cui si aggiungono le perdite nel ferro, variabili con il valore della f.e.m. indotta. E' perciò possibile procedere alla separazione diretta dei due tipi di perdita, con misure di potenza assorbita sull'albero con e senza eccitazione.

Quando non sia disponibile un motore di trascinamento, o non si sia in grado di misurare la potenza meccanica da esso fornita, le determinazioni precedenti possono essere eseguite facendo funzionare

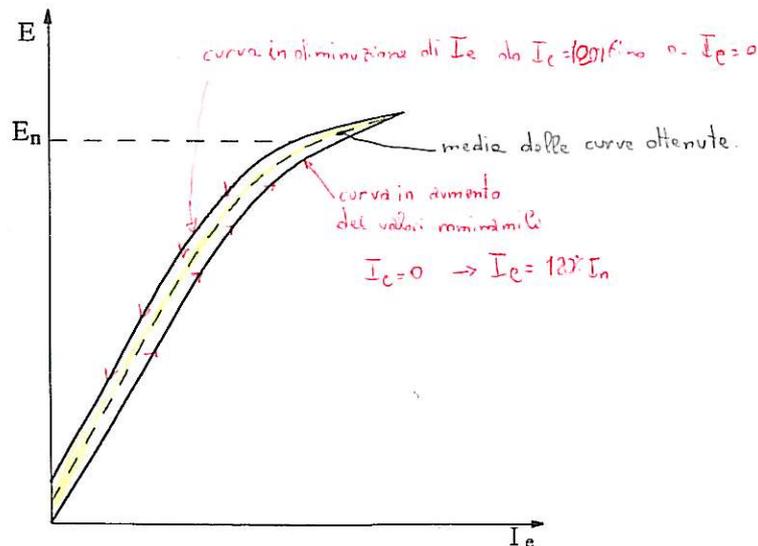


fig. 2.432

la macchina come motore a vuoto (fig. 2.433), alimentato da una sorgente di tensione regolabile, in modo da mantenere, per ogni valore della corrente di eccitazione, il numero di giri nominale.

La procedura deve essere condotta con regolarità e possibilmente in modo monotono, per evitare di passare da un ramo all'altro della caratteristica di magnetizzazione.

La potenza assorbita in tali condizioni dalla sorgente di alimentazione rappresenta le perdite nella macchina; generalmente le perdite nel circuito d'indotto e nelle spazzole, se la corrente assorbita è notevolmente inferiore alla nominale, risultano trascurabili; in ogni caso se ne può tener conto come sarà indicato in seguito. La separazione delle perdite avviene in modo analogo a quello descritto per i motori asincroni.

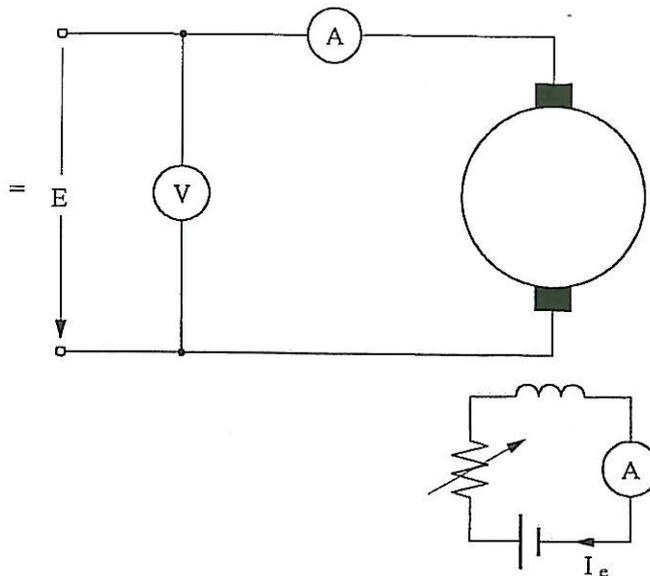


fig. 2.433

#### 2.44 Curve caratteristiche 09/09/2007 VIA JACOBI

Le curve caratteristiche di una macchina a corrente continua esprimono le relazioni che intercorrono fra le varie grandezze elettriche (tensione  $V$ , corrente d'indotto  $I$ , corrente d'eccitazione  $I_e$ ) e meccaniche (numero di giri al minuto  $n$ , e coppia  $C$ ).

Per i generatori, si assume generalmente  $n$  come costante e non interessa l'andamento della coppia; si hanno perciò le seguenti curve caratteristiche :

- caratteristica di carico ( $V, I_e$ ) con corrente d'indotto costante;
- caratteristica esterna ( $V, I$ ) a eccitazione costante;
- caratteristica di regolazione ( $I, I_e$ ) a tensione costante.

Viceversa, per i motori si assume generalmente costante la tensione applicata e si considerano le seguenti curve, tutte ad eccitazione costante:

- caratteristica elettromeccanica della velocità ( $n, I$ );
- caratteristica elettromeccanica della coppia ( $C, I$ );
- caratteristica meccanica ( $n, C$ ).

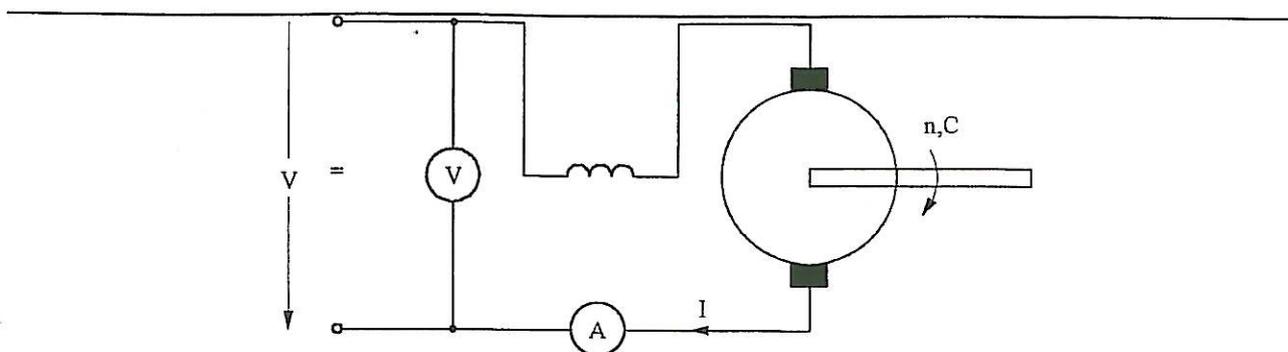


fig. 2.441

Quando la macchina non è eccitata in modo indipendente, la dizione "a eccitazione costante" sta a significare che non si interviene sul circuito di eccitazione durante il tracciamento della caratteristica; le curve risultano perciò molto diverse, a seconda dello schema di eccitazione della macchina.

Tutte le curve caratteristiche sono definite alla temperatura convenzionale di riferimento ovvero in condizioni di regime termico.

Il tracciamento delle caratteristiche più importanti viene, in genere, eseguito attraverso misure dirette, sottoponendo la macchina ad un carico variabile, fino alla sua potenza nominale o ad un sovraccarico specificato. Ciò è possibile in quanto, per le note limitazioni elettromeccaniche, la potenza delle macchine a corrente continua non mai tanto grande da rendere proibitiva tale prova; il metodo diretto fornisce inoltre risultati molto migliori di quelli desunti dalle prove indirette, per la difficoltà di rappresentare correttamente l'effetto della reazione d'indotto. Alcuni schemi di principio sono riportati nelle figg. 2.441 e 2.442. La sorgente di alimentazione elettrica, nel caso di un motore, (meccanica, nel caso di una dinamo) deve essere in grado di poter fornire la potenza richiesta a tensione (numero dei giri) costante; la potenza resa deve essere assorbita da un freno (da un resistore) a velocità (tensione) variabile, secondo le caratteristiche della macchina in prova, consentendo un certo campo di regolazione. Le modalità di realizzazione del carico saranno maggiormente dettagliate nel cap. 3.

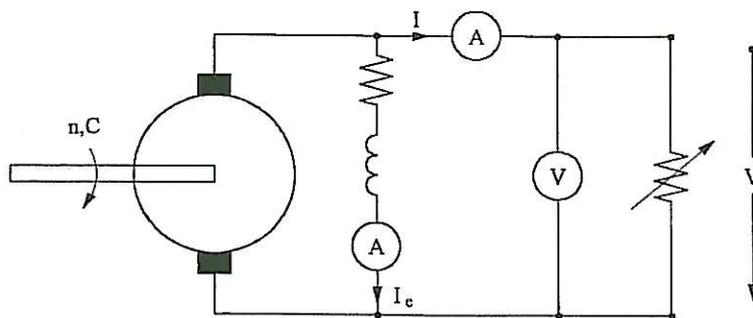


fig. 2.442

Per il tracciamento delle curve caratteristiche a eccitazione costante, si regola il sistema in modo da fornire le condizioni nominali di tensione, corrente, velocità di rotazione; si varia quindi solo il carico, rilevando per ogni punto velocità, coppia e corrente d'indotto per i motori, tensione e corrente per le dinamo.

I valori della velocità a vuoto  $n_0$  e a carico  $n_c$ , nel caso dei motori (le tensioni  $V_0$  e  $V_c$  per i generatori) ricavati da questa prova, servono a definire la variazione percentuale di velocità (o di tensione):

$$\Delta n\% = 100 \frac{n_0 - n_c}{n_c} \quad ; \quad \Delta V\% = 100 \frac{V_0 - V_c}{V_c}$$

MOTORE DINAMO

Le variazioni del carico devono essere eseguite dopo che la macchina ha raggiunto le condizioni di regime termico, in modo abbastanza rapido da non modificare apprezzabilmente tali condizioni.

2.45 Tracciamento indiretto delle caratteristiche di una dinamo

Le curve caratteristiche, esterna e di regolazione, di una dinamo, possono anche essere ricavate, con qualche semplificazione, da una prova unica, cioè dalla determinazione di un punto della caratteristica di carico, possibilmente alla corrente nominale.

Si consideri ad esempio una dinamo ad eccitazione indipendente; sia tracciata la curva a vuoto, che può anche pensarsi come facente parte della famiglia delle caratteristiche di carico (a  $I = 0$ ); sia anche noto il punto P, (fig. 2.451) a carico (tensione  $V_c$ , corrente  $I_n$ ).

La f.e.m. che deve essere generata dalla macchina, nelle condizioni di carico è:

$$E = V_c + RI_n ;$$

essa è rappresentata sul diagramma dal segmento OQ, essendo  $OP = V_c$  e tracciando il segmento  $PQ = RI_n$ , si trascura, per il momento, la caduta sulle spazzole, che è un termine costante.

La f.e.m. è generata dalla combinazione delle amperspire dovute alla corrente di eccitazione  $I_e$  con quelle dovute alla reazione d'indotto; poiché la relazione fra f.e.m. ed eccitazione è rappresentata dalla curva a vuoto, il segmento QM rappresenta l'effetto delle amperspire di reazione d'indotto (rapportato alle spire dell'eccitazione principale).

  CURVA A VUOTO  
  CURVA A  $I_n$

DINAMO  
 ECCITAZIONE  
 INDIPENDENTE

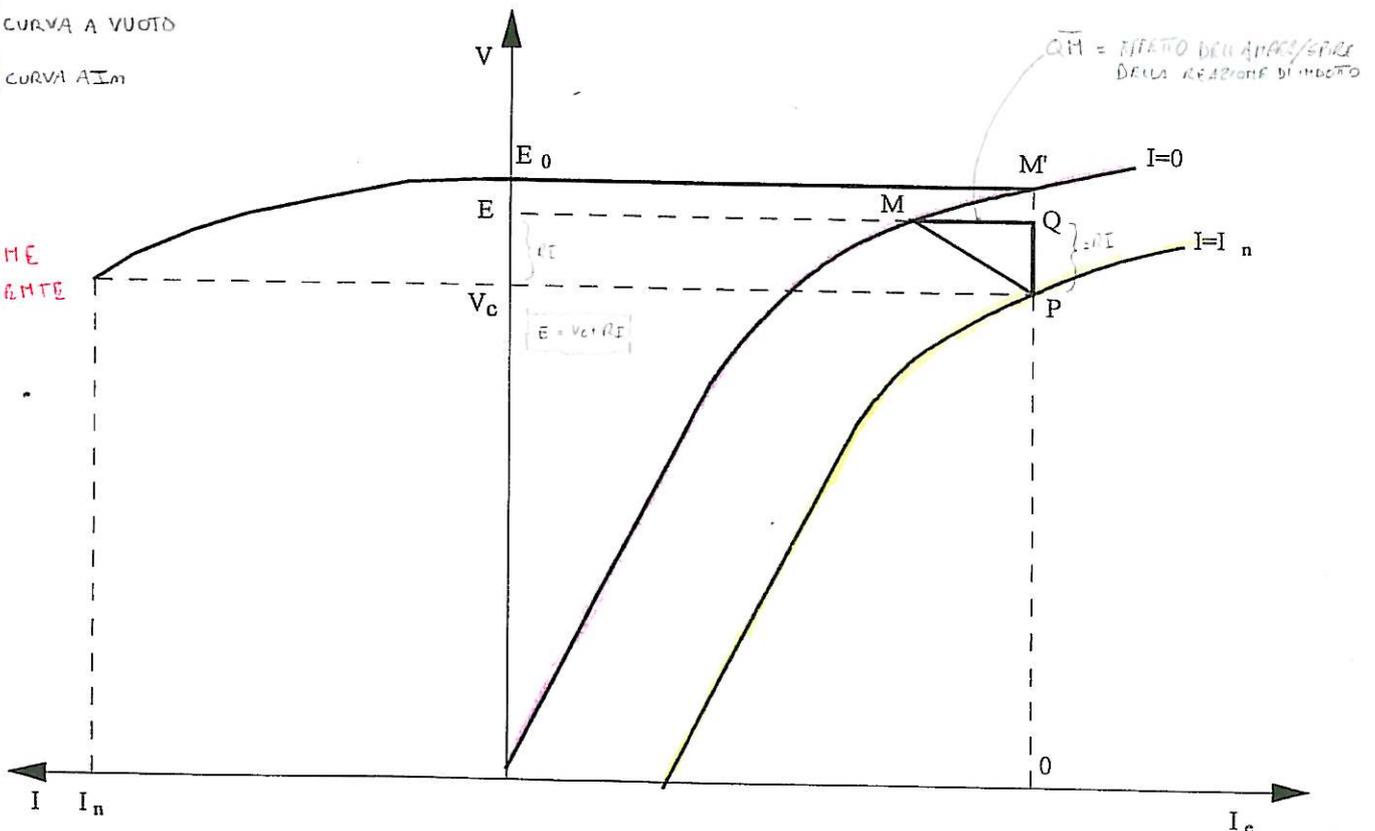


fig. 2.451

I segmenti PQ e QM sono proporzionali al valore della corrente  $I_n$ ; tale risulta quindi anche il segmento PM, che risulta quello meglio definito, dal punto di vista operativo, per le condizioni di vincolo sui due estremi.

Per trovare il valore della tensione V che corrisponde ad una frazione specificata della corrente di carico è sufficiente tracciare una parallela a PM tale che la lunghezza del segmento intercettato tra la caratteristica a vuoto e la retta verticale OP sia pari alla frazione voluta di PM; si ottiene così la tensione per quello specifico valore di corrente e se il procedimento viene ripetuto si ottiene l'intera caratteristica di carico, che parte dal punto M', per  $I = 0$ , e raggiunge il punto P, per  $I = I_n$ .

Se si ripete il tracciamento per altre condizioni di tensione a carico, il triangolo PQM può modificarsi, in quanto l'effetto di una parte della reazione d'indotto (cioè della sua componente trasversale) dipende dalla saturazione del circuito magnetico principale.

Questo tracciamento, che è immediato per una macchina ad eccitazione indipendente, può essere eseguito anche per macchine con diverso sistema di eccitazione, tenendo conto delle relazioni imposte appunto da tale sistema; la fig. 2.452 mostra ad esempio il caso di una dinamo con eccitazione in derivazione; il triangolo PQM è, come nel caso precedente, ricavato da una prova a carico nominale; la retta OA è la caratteristica del circuito di eccitazione (la sua inclinazione è pari alla resistenza di tale circuito). Al variare della corrente I, il triangolo PQM si sposta, mantenendo il punto P sulla retta OA, il punto M sulla caratteristica a vuoto mentre il segmento MP è proporzionale alla corrente d'indotto.

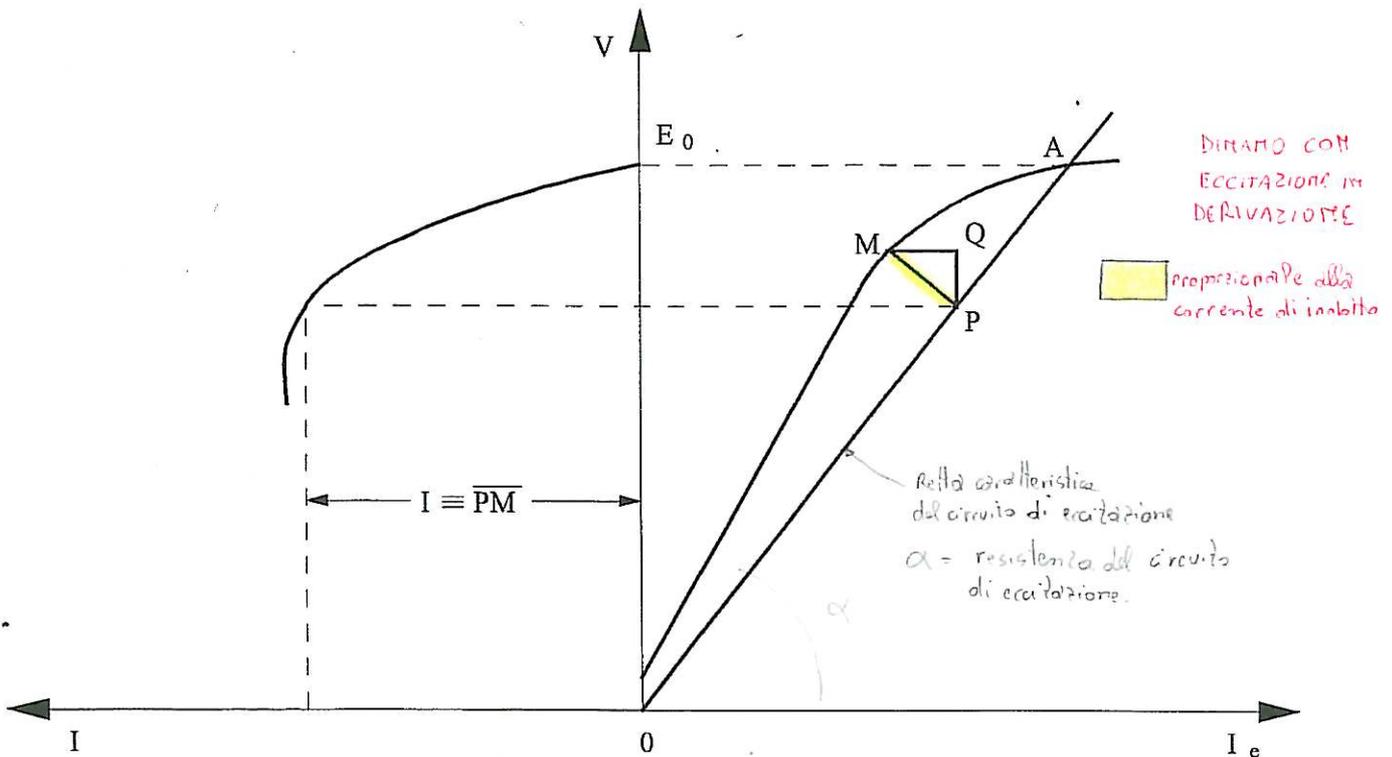


fig. 2.452

2.46 Tracciamento indiretto delle caratteristiche di un motore

Il ragionamento fatto per le dinamo può facilmente estendersi al caso di un motore, alimentato a tensione V costante, del quale si ricerca la variazione di velocità da vuoto a carico. Si consideri ancora una macchina ad eccitazione indipendente (fig. 2.461); partendo dalla caratteristica a vuoto a velocità di rotazione  $n_0$ , dal punto di ordinata V, si traccia il triangolo PQM, ricavato mediante la conoscenza di un punto della caratteristica a carico della macchina funzionante come dinamo a

MACCHINE A C.C.

velocità  $n_0$ ; con questa prova è stato determinato ovviamente anche il coefficiente della reazione di indotto.

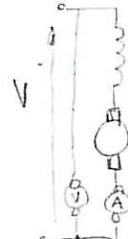
La f.e.m.  $E_c$ , che il motore fornisce, a carico, allora:

$$E_c = V - RI_n$$

e per fornire tale f.e.m. con l'eccitazione risultante  $OA$ , la macchina deve rallentare e passare alla velocità:

VELOCITÀ  
A  
CARICO

$$n_c = \frac{AM}{AB} n_0$$



DL  
MOTORE A  
ECCITAZIONE  
INDIPENDENTE  
VELOCITÀ

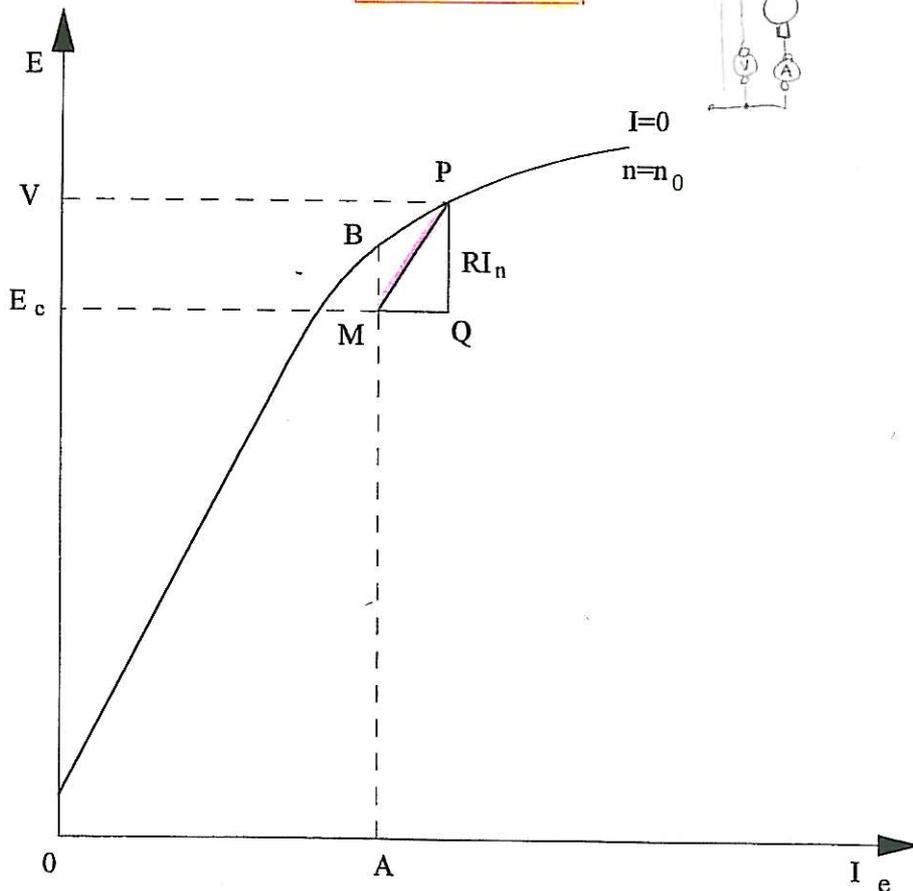


fig. 2.461

Si può così determinare l'andamento della velocità in funzione dei vari valori della corrente  $I$ , a cui risulta proporzionale il segmento  $PM$ .

Il ragionamento è condotto in modo analogo anche per gli altri tipi di eccitazione; in particolare, per i motori con eccitazione in serie, dove la corrente di carico coincide con quella di eccitazione, si riscontra facilmente che, all'aumentare di  $I$ , i punti  $P$  e  $M$  si spostano su due rette, l'una a  $V =$  costante e l'altra dedotta dalla prima per lo spostamento del segmento  $PM = I$ , partenti dallo stesso punto; anche qui la velocità si desume dal rapporto fra i segmenti  $AM$  e  $AB$  (fig. 2.462).

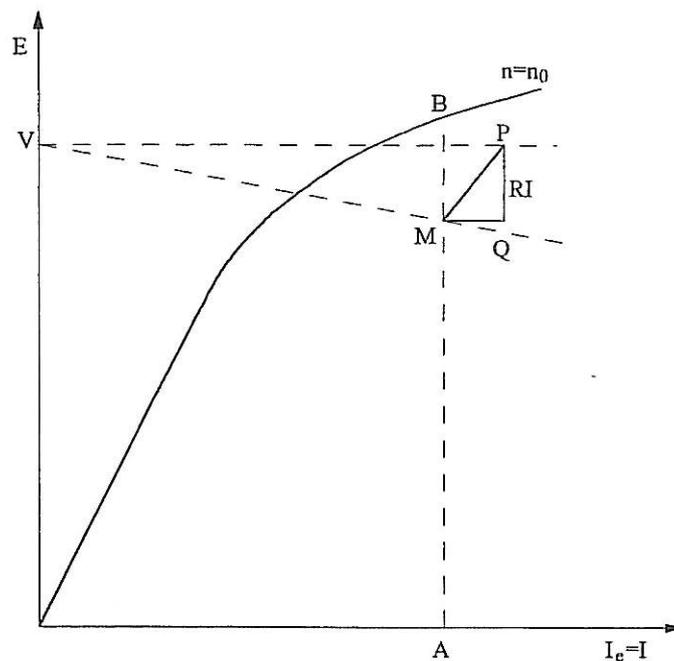


fig. 2.462

2.47 Determinazione del rendimento

Le perdite da considerarsi, per il calcolo del rendimento di una macchina a corrente continua, sono le seguenti:

DALLA PROVA A VUOTO

- a) perdite a vuoto
- b) perdite meccaniche,
- c) perdite per effetto Joule nell'avvolgimento d'indotto
- d) perdite addizionali e nelle spazzole,
- e) perdite degli avvolgimenti di eccitazione e ausiliari (reostato di eccitazione).

Questi vari termini vengono determinati separatamente, per ogni condizione di funzionamento, dai risultati della prova a vuoto (perdite nel ferro e meccaniche) nonché dalla conoscenza delle resistenze delle varie parti (riportate alla temperatura di riferimento) e delle correnti che le percorrono. I valori di queste correnti (d'indotto, di eccitazione) si ricavano dalle curve caratteristiche, per il punto di funzionamento considerato.

Alle perdite per effetto Joule nell'indotto vanno aggiunte: le perdite addizionali, valutate convenzionalmente nello 0,5% della potenza nominale per macchine compensate e 1 % per macchine non compensate (esse variano col quadrato della corrente); le perdite nelle spazzole, valutate, in modo approssimativo, calcolando un volt di caduta per ogni spazzola di carbone o grafite, 0,3 V per ogni spazzola a contenuto metallico.

valute } 1 Volt spazzole grafite  
          } 0,3 V spazzole metallica

2.5 Prove di comportamento in transitorio delle macchine a c.c.

2.51 Parametri caratteristici

In molte applicazioni, le macchine a corrente continua sono chiamate a funzionare in transitorio, in particolare quando fanno parte di un sistema di regolazione; basta pensare alle applicazioni delle

dinamo come eccitatrici dei generatori sincroni, a un lato, e a quelle dei motori a c.c. come attuatori nei regolatori che richiedono forte potenza a velocità variabile (laminatoi, cartiere, ecc.).

Se si considera una macchina a c.c. durante i suoi transitori, essa può con qualche semplificazione, ricondursi allo schema di fig. 2.511, rappresentato dalle equazioni:

$$\begin{cases} v_e = R_e i_e + L_e \frac{di_e}{dt} \\ v_a = R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + \omega M i_e \end{cases}$$

$$v_L = \frac{d\Phi}{dt}$$

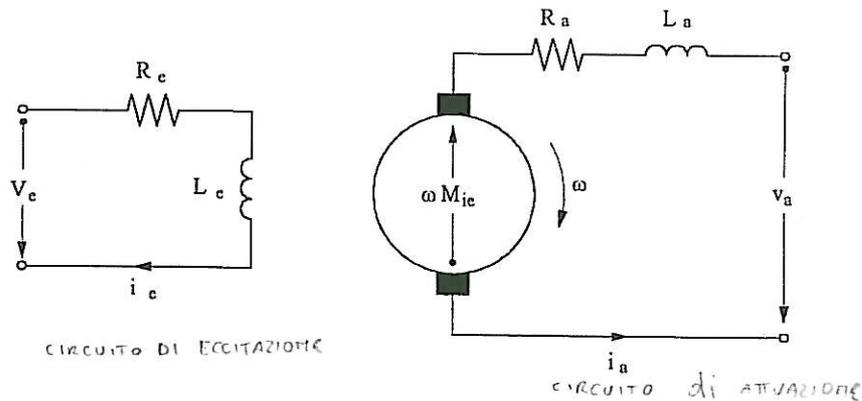


fig. 2.511

Dette equazioni presuppongono un comportamento lineare della macchina, trascurandone la saturazione, non tengono conto degli effetti di eventuali correnti parassite nei materiali ferromagnetici, e ammettono la commutazione lineare semplice, con le spazzole sull'asse neutro; l'induttanza  $L_a$  che vi compare perciò quella dell'indotto, in corrispondenza a tale posizione delle spazzole.

Le tensioni  $v_a$  e  $v_e$  e le relative correnti sono ulteriormente legate fra loro tramite i principi di Kirchhoff, scritti per la particolare connessione delle eccitazioni (in serie, in derivazione, ecc.); per la completa soluzione del transitorio sussistono inoltre due altre relazioni, l'una che lega la coppia motrice ai valori dei flussi e delle correnti nella macchina, l'altra che esprime l'equilibrio delle coppie motrice, resistente e d'inerzia.

Per quanto ci interessa è sufficiente osservare che i parametri elettrici che intervengono nel transitorio sono:

- le resistenze  $R_e$  e  $R_a$  rispettivamente dei circuiti di induttore e di indotto;
- il coefficiente  $M$  che è ricavabile dalla f.e.m. a vuoto della macchina ( $E = \omega M I_e$ ) per una velocità angolare nota, e per una corrente di eccitazione costante;
- l'induttanza  $L_e$  propria del circuito di eccitazione;
- l'induttanza  $L_a$  propria del circuito di indotto, con le spazzole poste sull'asse neutro.

### 2.52 Misura dell'induttanza di armatura

La misura dell'induttanza  $L_a$  può farsi molto semplicemente a macchina ferma alimentando l'indotto con tensione a frequenza industriale; sia escluse ogni eventuale circuito di eccitazione serie, per evitare che la macchina tenda a girare come motore serie.

## MACCHINE A C.C.

Si deve avere particolare cura per evitare il sovrariscaldamento delle spazzole e del collettore; in alcuni casi, conviene sostituire le spazzole con blocchetti di rame della stessa larghezza, o alimentare direttamente l'indotto dalle prese del commutatore, cortocircuitando lo stesso numero di lamelle che cortocircuitato dalle spazzole.

La misura può essere fatta solo con voltmetro e amperometro essendo in generale trascurabile il contributo della resistenza.

La misura può inoltre essere eseguita alimentando il circuito di induttore, in modo da saturare il circuito magnetico principale.

### 2.53 Misura dell'induttanza del circuito di eccitazione.

L'induttanza del circuito di eccitazione è in genere elevata e variabile con la frequenza, per effetto delle correnti parassite indotte nei materiali ferromagnetici; per la sua determinazione si utilizzano perciò in genere dei transistori relativamente lenti.

Due schemi sono dati in fig. 2.531; nel primo l'eccitazione, resa indipendente, viene alimentata bruscamente da una sorgente di resistenza trascurabile; nel secondo si cortocircuita la sorgente di alimentazione; in entrambi i casi il circuito di alimentazione regolato in modo da produrre, a regime, la corrente di eccitazione  $I_e$  che si ha a carico nominale.

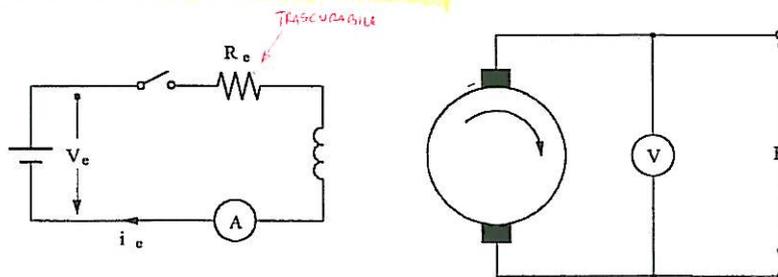


fig. 2.531 a)

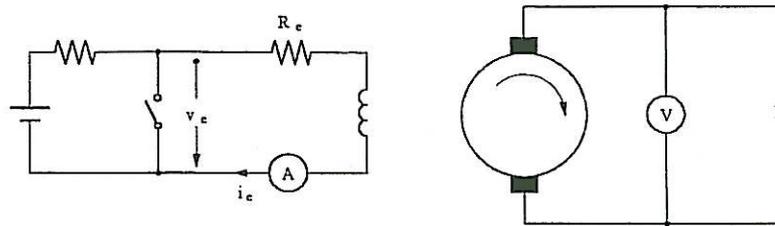


fig. 2.531 b)

La corrente di eccitazione (e corrispondentemente la tensione indotta) variano nel transitorio secondo una legge esponenziale (fig. 2.532) per cui è rispettivamente:

$$\left[ \frac{dI_e}{dt} \right]_{t=0} = \frac{V_e}{L_e} \quad \text{con} \quad V_e = \text{tensione di eccitazione a regime}$$

ovvero:

$$\left[ \frac{dE}{dt} \right]_{t=0} = \frac{V_c}{L_c} \cdot \frac{E_0}{I_{c0}} \quad \text{con} \quad E_c = \text{f.e.m. indotta a regime}$$

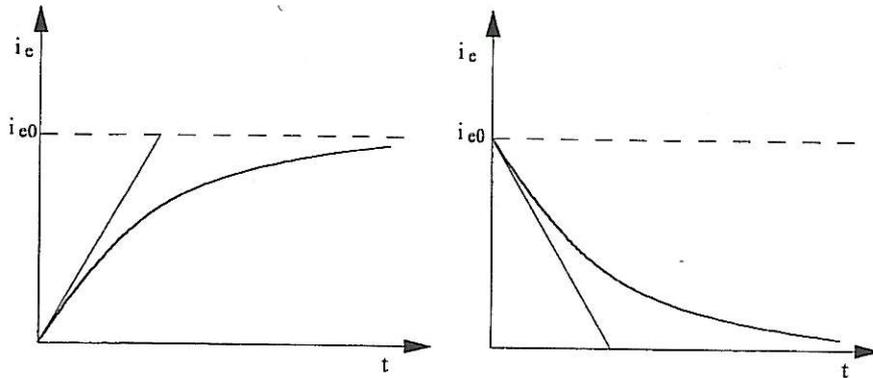


fig. 2.532

La misura della f.e.m. indotta  $E$  è più semplice ma può essere falsata dalla presenza del magnetismo residuo. Per la determinazione del transitorio occorre evidentemente procedere ad una registrazione oscillografica con una taratura sia sui valori della grandezza letta ( $I_c$  o  $E$ ) sia sui tempi.

2.54 Risposta di una eccitatrice

Una caratteristica particolarmente importante nei riguardi delle eccitatrici delle macchine sincrone è la rapidità con la quale esse rispondono ad un transitorio; in particolare si vuole caratterizzare la velocità con la quale aumenta la tensione fornita dall'eccitatrice quando viene escluso tutto il reostato di campo  $R$  dalla dinamo eccitatrice.

Poiché il circuito d'indotto è, nel suo funzionamento, chiuso sull'induttore della macchina sincrone, che possiede un'induttanza molto elevata, si può, nella prova, considerare la dinamo a circuito aperto.

In generale, la macchina è regolata per dare, con  $R$  inserito, tensione e corrente nominali sulla resistenza di carico  $R$ ; corrispondentemente essa raggiunge a regime, con  $R$  disinserito, una tensione massima, che viene definita "tensione di ceiling" per il carico considerato.

La prova viene eseguita a velocità nominale, determinando oscillograficamente l'andamento della tensione di uscita  $V_a$  che si ottiene cortocircuitando il reostato  $R_c$  (fig. 2.541).

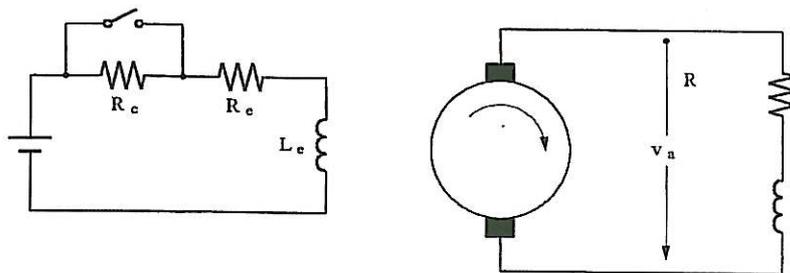


fig. 2.541

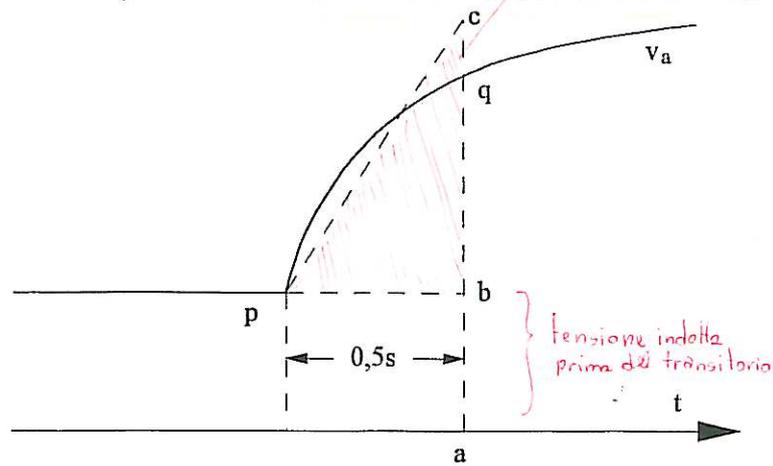


fig. 2.542

Convenzionalmente la variazione di tensione viene valutata dopo 0,5 secondi come quel segmento bc che dà luogo al triangolo pbc di area uguale al triangolo mistilineo pqb (fig. 2.542).

La risposta dell'eccitatrice (in V/s) è il doppio di tale variazione; si definisce rapporto di risposta il rapporto fra il valore della risposta e quello del segmento ab (tensione indotta prima del transitorio); esso ha le dimensioni dell'inverso di un tempo, ed è generalmente dell'ordine di  $(0,5 - 1) \text{ s}^{-1}$ .

Hatz

## 2.6 Curve caratteristiche di una macchina sincrona

### 2.61 Curve a vuoto e in cortocircuito

La determinazione della curva a vuoto di una macchina sincrona, e cioè della caratteristica che lega la f.e.m. a vuoto alla corrente di eccitazione, può essere eseguita con le stesse modalità indicate per le macchine a corrente continua.

La macchina viene trascinata in rotazione, alla velocità nominale  $n_0$  da un motore esterno (fig. 2.611); la verifica della velocità può farsi anche controllando la frequenza della f.e.m. indotta; qualora la velocità di rotazione  $n$  sia diversa dalla nominale  $n_0$ , il valore della f.e.m. è riportato alla velocità nominale, moltiplicando il valore misurato per il rapporto  $n_0/n$ .

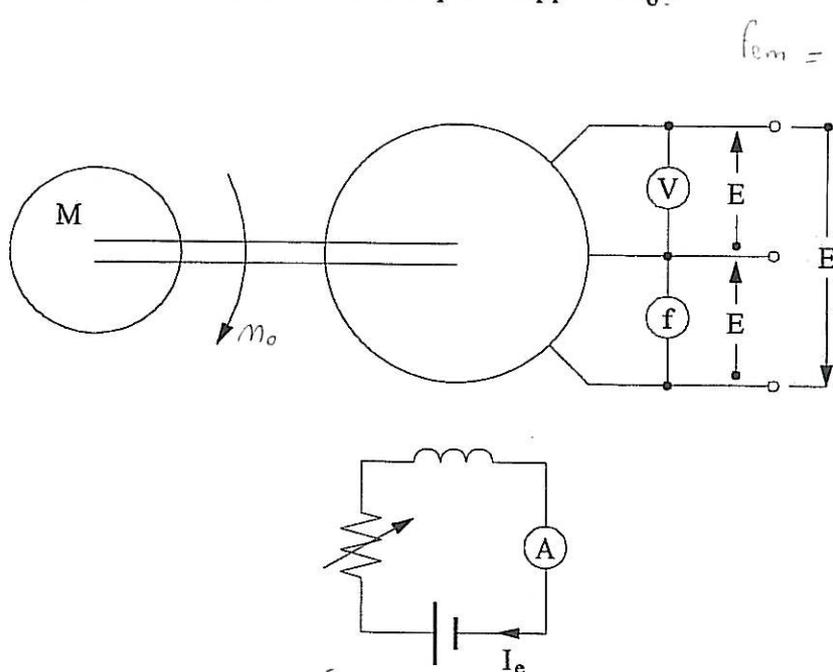


fig. 2.611

Anche qui è necessario procedere gradualmente, per valori prima crescenti e poi decrescenti della corrente di eccitazione; data l'ampiezza del traferro, l'effetto del magnetismo residuo è però meno sentito che nelle macchine a c.c. (fig. 2.612); dove esiste, si consiglia di spostare parallelamente a se stesse tutte le curve rilevate, per farle partire da zero. La prima parte della caratteristica è lineare (caratteristica di traferro) per il prevalere della riluttanza del percorso in aria rispetto alla parte nel ferro, i cui effetti si fanno sentire quando l'induzione aumenta. Le grandezze derivate in condizioni di funzionamento che fanno riferimento a questo tratto della caratteristica (in pratica, a tensione ridotta) sono dette non sature.

Tenuto conto delle taglie dei sincroni di impiego comune, è ovvio che tutte le grandezze vanno rilevate con l'impiego di adeguati trasformatori di tensione e di corrente; le tensioni, tuttavia, non sono mai molto elevate (rientrano sempre nel campo della media tensione), per i problemi connessi all'isolamento in cava. Gli avvolgimenti ed i collegamenti esterni sono abbastanza impegnativi anche sotto l'aspetto meccanico per le correnti in giuoco.

Le macchine sono comunque un carico oneroso per qualsiasi rete o regolatore di tensione perché l'impedenza caratteristica e quindi le varie grandezze che ad essa sono correlate sono decisamente basse: è quindi molto improbabile che, in sede di prova, la tensione di alimentazione non risenta in modo pesante della presenza del carico.

## SINCRONI

**Esempio**

Generatore sincrono trifase

$$P_n = 100 \text{ MVA} \quad V_n = 24 \text{ kV} \quad I_n = 2406 \text{ A} \quad Z_n = 5,76 \Omega$$

La potenza fornita dal motore di trascinamento (se esso è stato opportunamente tarato) può servire alla determinazione delle perdite a vuoto, separabili - nei modi già illustrati - nelle perdite meccaniche e perdite del ferro.

La caratteristica di cortocircuito, che rappresenta i valori della corrente di cortocircuito in funzione della corrente di eccitazione, è praticamente una retta, per effetto dell'azione smagnetizzante della reazione d'indotto che evita la saturazione del circuito magnetico.

Lo schema di prova è illustrato in fig. 2.613; la macchina, chiusa in cortocircuito, è trascinata in rotazione alla sua velocità nominale ed eccitata gradatamente fino a raggiungere la corrente nominale. La potenza assorbita all'asse comprende le perdite meccaniche, valutabili quando la corrente di c.c. è nulla, e le perdite dovute al carico (per effetto Joule e addizionali nell'avvolgimento di indotto).

Le perdite totali dovute al carico si ammettono talvolta indipendenti dalla temperatura dell'avvolgimento.

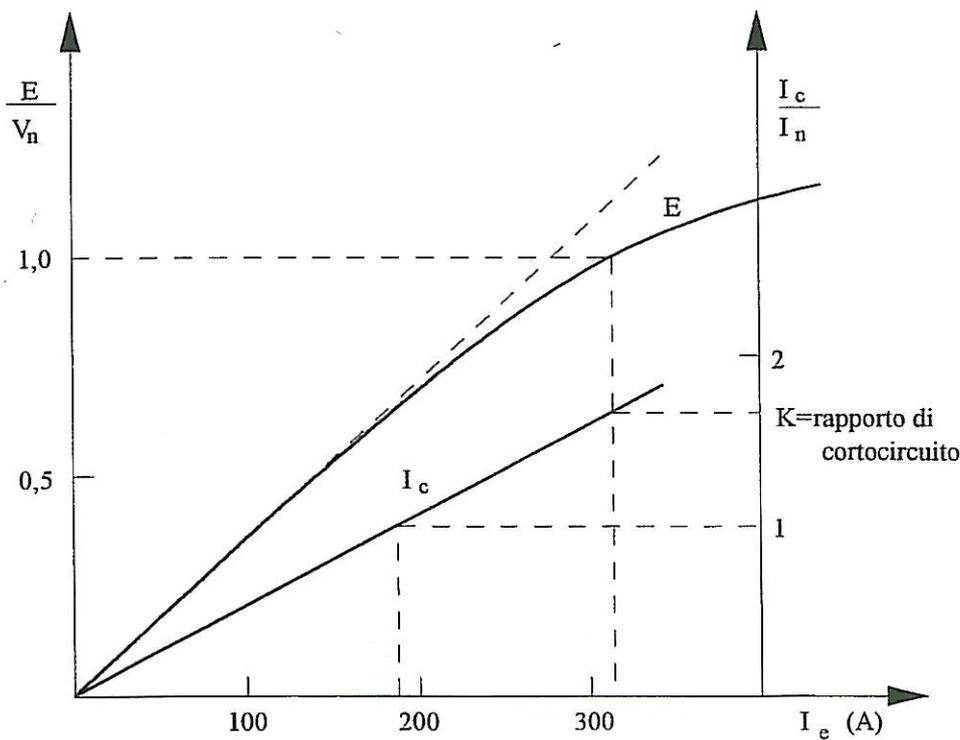


fig. 2.612

Quando non sia disponibile un motore di trascinamento, la prova a vuoto può essere realizzata facendo funzionare la macchina come motore sincrono a vuoto, regolando l'eccitazione in modo che la corrente assorbita sia minima; deve essere comunque disponibile per la prova un motore di lancio, non necessariamente elettrico, che porti in rotazione il sincrono fino alla velocità nominale ed un dispositivo per effettuare il parallelo con la rete, che chiuda l'interruttore nel momento in cui le tre tensioni fornite dalla macchina sono uguali in modulo e fase con quelle della rete.

## SINCRONI

La potenza elettrica assorbita corrisponde alle perdite a vuoto (nel ferro e meccaniche); sono generalmente trascurabili le perdite dovute alla circolazione di corrente, e di esse si può tenere adeguato conto.

Variando la tensione di alimentazione, e corrispondentemente l'eccitazione, in modo da assorbire corrente minima (ossia a  $\cos\varphi = 1$ ), si possono tracciare vari punti della caratteristica a vuoto.

Per la prova in c.c., in assenza di motore tarato, ci si può basare sul fatto che la caratteristica é, entro ampi limiti, indipendente dalla velocità di rotazione, dato il prevalere della reattanza interna della macchina: al diminuire della velocità variano pertanto proporzionalmente sia la f.e.m. interna che la stessa reattanza con il risultato che la corrente rimane costante.

La macchina viene allora portata in rotazione, come motore e viene poi staccata dall'alimentazione e chiusa in cortocircuito.

I punti della caratteristica sono rilevati durante il rallentamento, almeno finché la velocità non sia scesa sotto il 10-20% della nominale.

Le perdite dovute alla corrente possono essere misurate col metodo di rallentamento (vedi 1.54); in questo caso, il metodo può applicarsi, indipendentemente dalla conoscenza del momento di inerzia della macchina perché può essere eseguito il confronto con una prova a eccitazione nulla (sole perdite meccaniche, note dalla prova a vuoto).

Prova in corto circuito

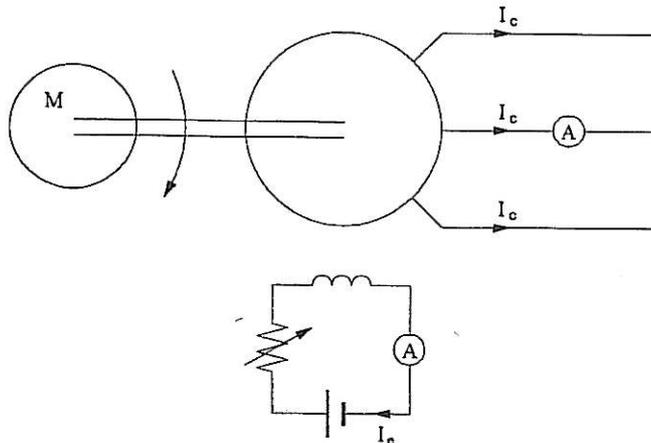


fig. 2.613

Le due grandezze, tensione a vuoto e corrente di cortocircuito trifase sono spesso riportate, in valore assoluto o relativo, sullo stesso diagramma (fig. 2.612) in funzione della corrente di eccitazione.

## 2.62 Caratteristica a $\cos\varphi = 0$

Per poter suddividere gli effetti della reattanza di dispersione (detta anche di Potier)  $X_p$  da quelli della reazione d'indotto, è necessario il tracciamento della caratteristica tensione ai morsetti - corrente di eccitazione, a valore costante della corrente di carico  $I$  - preferibilmente pari al valore nominale - con fattore di potenza del carico nullo.

Per ottenere questa caratteristica occorre disporre di una reattanza variabile (fig. 2.621) o - come spesso è possibile - di una macchina sincrona ausiliaria (fig. 2.622); per rilevare un punto della caratteristica stessa che spesso è sufficiente - basta disporre di una reattanza induttiva fissa o di poter inviare potenza reattiva induttiva su una rete trifase.

SINCRONI

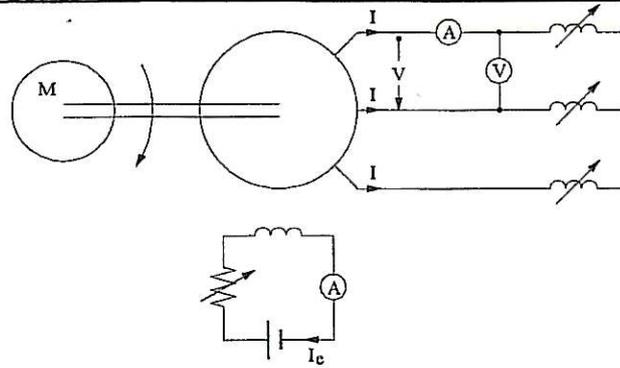


fig. 2.621

In queste condizioni l'angolo fra f.e.m. e correnti di carico risulta prossimo a  $90^\circ$  e la caduta reattiva relativa alla reattanza di dispersione  $X_p$  si somma algebricamente alla tensione  $V$  (fig. 2.623); la f.m.m. dovuta alla reazione d'indotto si somma pure algebricamente alla f.m.m. prodotta dall'induttore  $A_m$ .

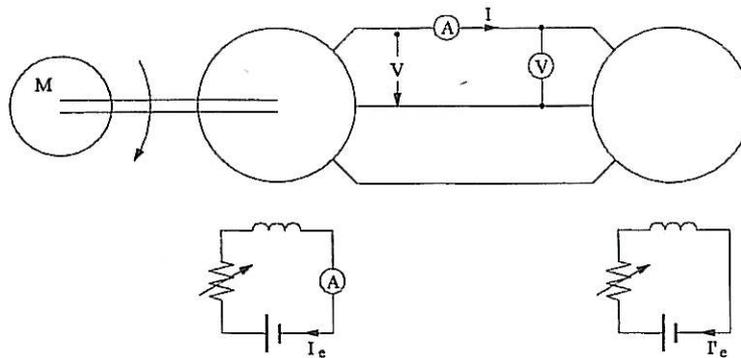
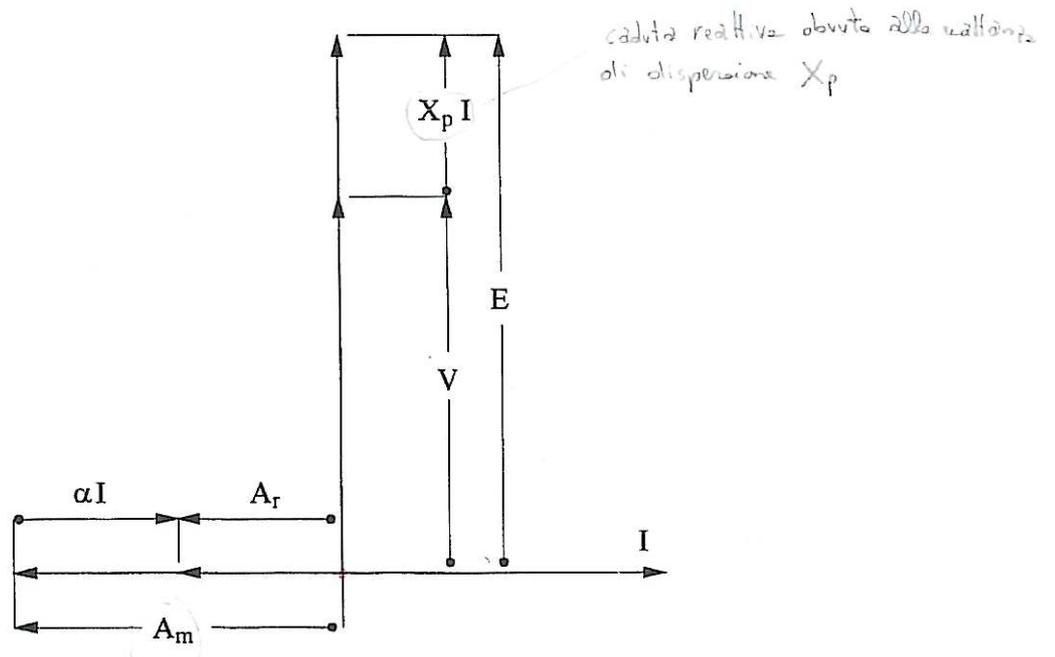


fig. 2.622



*caduta reattiva dovuta alla reattanza di dispersione  $X_p$*

*forza magnetica motrice dovuta all'autoinduttore.*

fig. 2.623

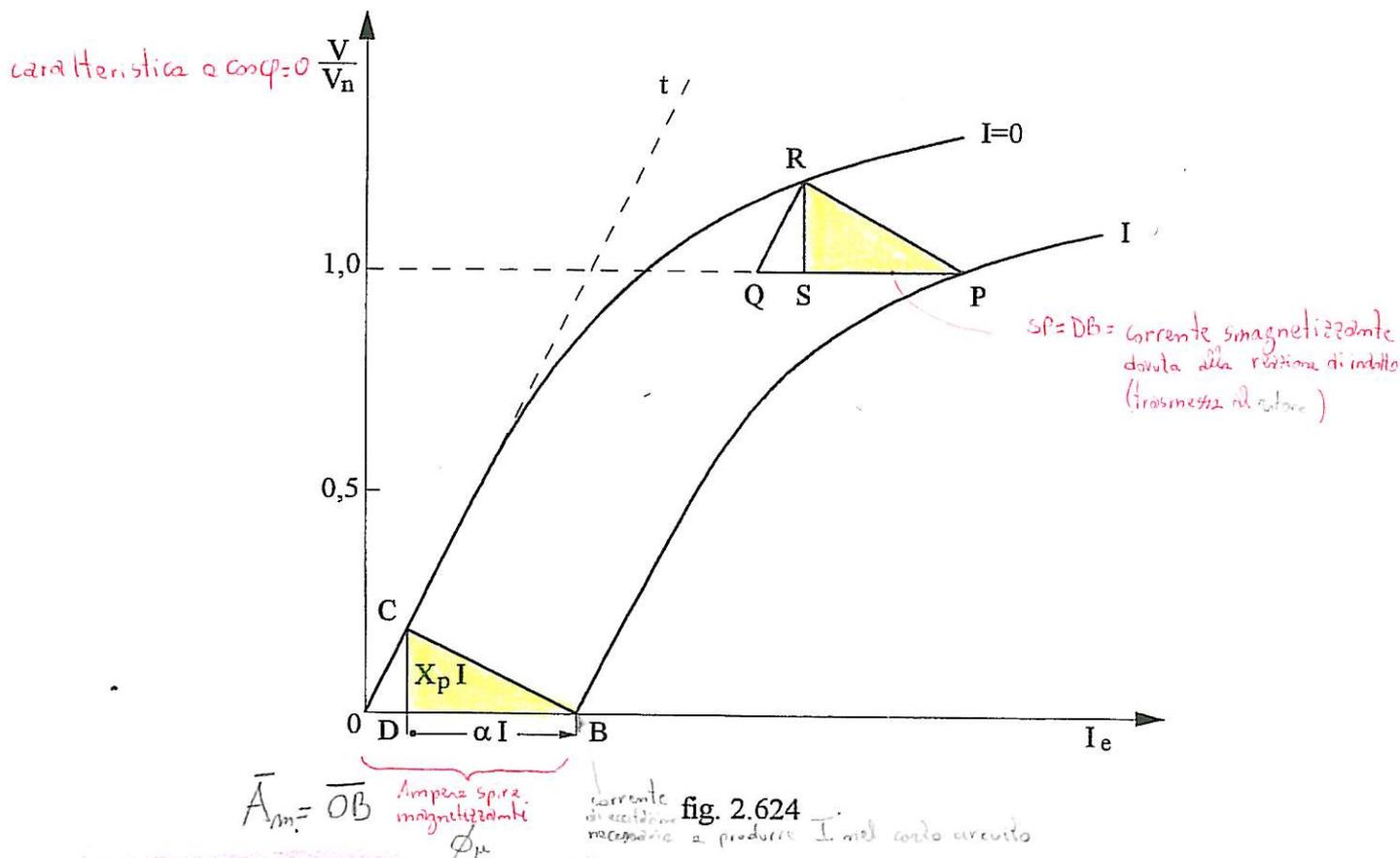
SINCRONI

La caratteristica a  $\cos\phi = 0$  ha la forma di fig. 2.624; il punto B corrisponde alla corrente di eccitazione necessaria a produrre, in cortocircuito, la corrente I; anche la curva a vuoto può considerarsi un caso particolare delle curve a  $\cos\phi = 0$ .

In pratica si può disporre del solo punto P rilevato sulla curva, (p. es. a tensione nominale) e, ovviamente, del punto B, ottenuto dalla caratteristica di cortocircuito, per lo stesso valore di corrente che compete a P. Da ciascuno di questi punti, utilizzando gli stessi termini per la reazione d'indotto e per la caduta dovuta alla reattanza, deve essere possibile arrivare alla caratteristica a vuoto. Ciò si ottiene utilizzando gli elementi noti del triangolo OBC, ossia il segmento OB e l'angolo in O. Prendendo quindi  $PQ = OB$ , e una retta QR, parallela alla caratteristica di traferro  $Ot$ , si può costruire il triangolo PRS = BCD che rappresenta il triangolo di Potier.

Infatti, in cortocircuito, il segmento OB rappresenta, in opportuna scala, le amperspire magnetizzanti  $A_m$ ; il valore della f.e.m.  $E = X_p I$  (essendo  $V = 0$ ) deve trovarsi sulla curva a vuoto; ciò deve valere identicamente anche partendo dal punto P; con la costruzione fatta il segmento  $DB = SP$  rappresenta la corrente smagnetizzante dovuta alla reazione d'indotto - riportata all'avvolgimento di eccitazione.

I lati del triangolo RSP sono ovviamente proporzionali al valore della corrente per cui sono stati ricavati.



2.63 Determinazione delle caratteristiche a carico

Per definire il comportamento della macchina in determinate condizioni di carico, ( $V, I, \cos\phi$ ) occorre determinare i valori della corrente di eccitazione necessaria a mantenere la tensione nominale ai morsetti, in funzione del carico, o delle cadute di tensione, da vuoto a carico, a pari eccitazione.

Il calcolo può eseguirsi per via grafica, una volta che, col metodo illustrato nel precedente paragrafo, si sia determinato per la corrente I, il valore della caduta  $XI$  e della corrente smagnetizzante  $aI$ , ciascuna nella opportuna scala (delle tensioni concatenate e delle correnti di eccitazione, rispettivamente) (fig. 2.63 1).

*caduta dovuta alla reattanza di dispersione*

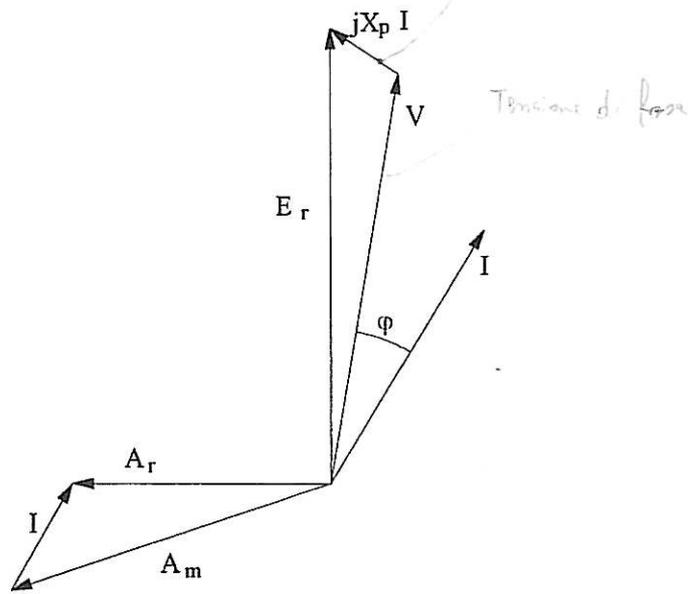


fig. 2.631

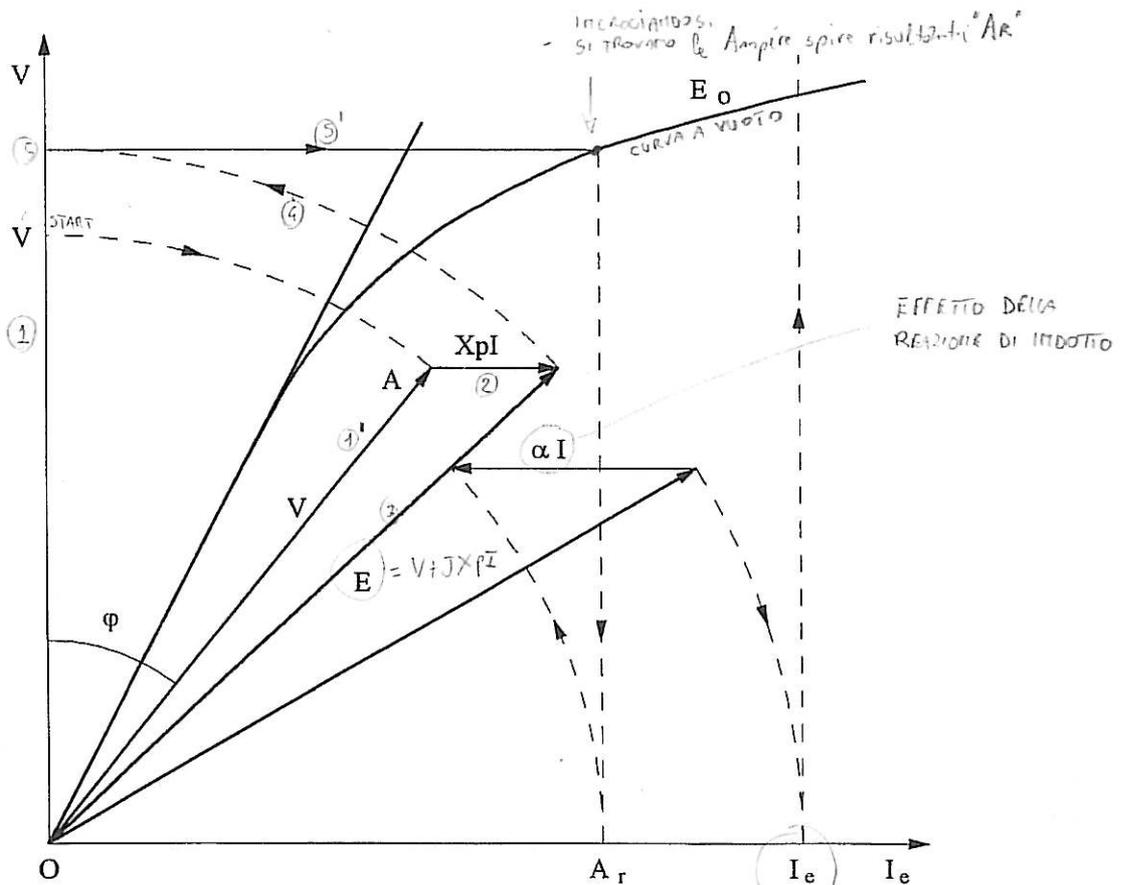


fig. 2.632

*VALORE DELLA CORRENTE DI ECCITAZIONE  $I_E$*

Per tener conto degli sfasamenti fra  $V$  e la costruzione può essere eseguita sul piano  $V, I$ , secondo quanto indicato in fig. 2.632:

Si riporta il segmento  $OA$ , di valore  $V$  (nella scala delle ordinate inclinato di un angolo  $\varphi$  rispetto alla verticale; ad esso si somma il segmento orizzontale  $X_p I$  in modo da ottenere il valore della f.e.m.  $E$ .

*Ar = Ampere spira  
risultanti*

Da questo risale, passando per la curva a vuoto, al valore delle amperspire risultanti  $A_r$ , che vengono riportate in fase con  $E$ ; l'effetto della reazione d'indotto è allora rappresentato dal segmento orizzontale di valore  $\alpha I$  (nella scala delle ascisse) cosicché si può agevolmente ricavare il valore della corrente di eccitazione  $I_c$  per il carico prefissato, alla quale corrisponde la tensione a vuoto  $E_0$ .

2. 64 Effetto della saturazione

In generale si ammette che la reattanza di dispersione sia indipendente dalla saturazione, in quanto il percorso delle linee di flusso è per gran parte in aria; si ammette inoltre che la f.m.m. risultante dipenda solo dal valore del flusso al traferro e sia perciò influenzata dalla saturazione, trascurando però le variazioni di flusso disperso nell'induttore. Si trascura inoltre l'effetto della f.m.m. d'indotto sulla forma del flusso risultante di traferro; questo effetto - dovuto allo spostamento angolare fra le f.m.m. d induttore e d indotto e alla loro diversa distribuzione spaziale - può avere una certa importanza per macchine a poli salienti, per le quali un diagramma più corretto può essere determinato mediante le valutazioni delle reattanze secondo i diversi assi (vedi par. 2.74).

Per tener conto della saturazione, le norme AIEE suggeriscono una variante al metodo del precedente paragrafo, considerando la macchina non saturata (caratteristica di traferro). Ad essa si aggiunge, sulla f.m.m. risultante  $A_r$ , una f.m.m. supplementare  $\Delta$ , pari alla differenza di ascissa fra la curva a vuoto e quella di traferro, in corrispondenza al valore della f.e.m. risultante  $E_r$ .

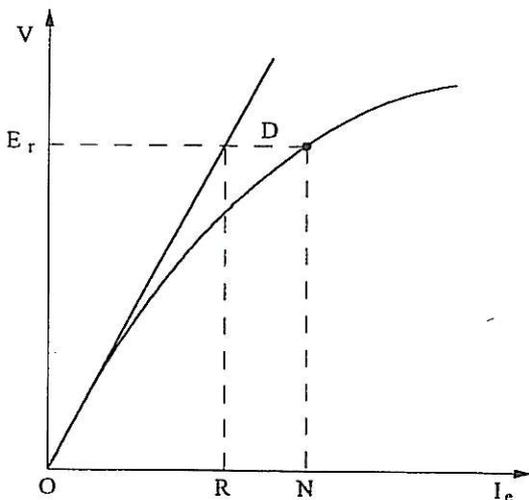
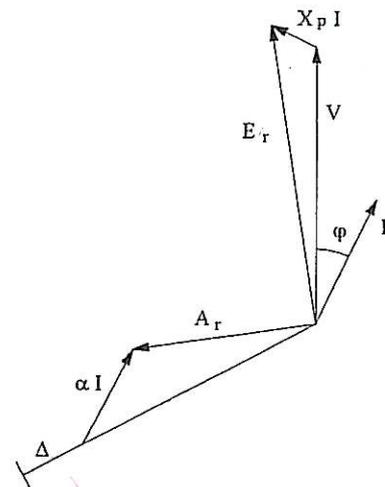


fig. 2.641



*Delta = differenza di ascissa fra la curva a vuoto e la caratteristica di traferro*

fig. 2.642

2. 65 Valutazione approssimata delle caratteristiche a carico

Per determinare, in modo rapido e semplice, le correnti di eccitazione necessarie, può talvolta essere utile il ricorso alla determinazione della reattanza sincrona  $X_d$ , il cui valore praticamente coincide con quello dell'impedenza sincrona:

$$Z_s = \frac{E_0}{I_c}$$

cioè del rapporto fra f.e.m. a vuoto e corrente di cortocircuito, a pari eccitazione. La f.e.m. totale  $E_t$  si ricava allora dal diagramma di fig. 2.651:

SINCRONI

$$E_t^2 = V^2 + (X_d I)^2 - 2VX_d I \cos(90 + \varphi); \quad \text{teorema di Carnot}$$

la f.m.m. necessaria si ottiene dal valore della corrente di eccitazione corrispondente a  $E_t$  sulla curva a vuoto.

Poiché tale metodo da valori in eccesso, esso può essere corretto tenendo conto di un fattore  $k$  (fattore di saturazione) che si ricava dal rapporto delle ascisse della curva a vuoto e di traferro (fig. 2.641):

$$k = \frac{ON}{OR} >$$

Sulla caratteristica reale, i flussi sono  $1/k$  volte, e le riluttanze  $k$  volte il valore che competerebbe alla caratteristica non saturata; si considera allora una reattanza sincrona saturata:

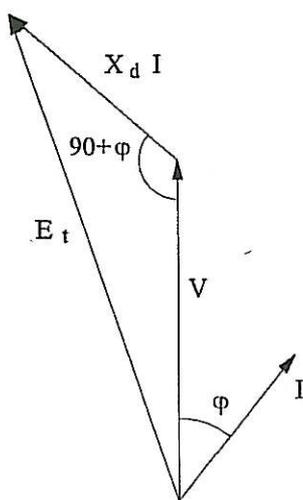


fig. 2.651

$$X_{d \text{ sat}} = X_p + \frac{X_{d \text{ traf}} - X_p}{k}$$

assumendo per  $k$  il valore corrispondente al flusso risultante al traferro (cioè quello della  $E$ ).

Questo metodo viene utilizzato per calcoli approssimati, quando non sia possibile una determinazione diretta della curva a  $\cos\varphi = 0$ . In questi casi la reattanza di dispersione può essere determinata con una misura di induttanza statorica, in assenza di rotore, o mediante il calcolo, dai dati costruttivi della macchina.

2. 66 Valutazione delle perdite

Per il calcolo del rendimento convenzionale sono da valutare:

- Prova a vuoto { a) le perdite meccaniche, per attrito e ventilazione, a velocità nominale;
- b) le perdite nel ferro a vuoto, a tensione e frequenza nominali;
- Prova in carico { c) le perdite per effetto Joule negli avvolgimenti di indotto, alla temperatura di riferimento;
- d) le perdite addizionali;
- e) le perdite negli avvolgimenti di induttore, inclusi i reostati e le eccitatrici se direttamente accoppiate, a tensione e potenza nominali e le perdite elettriche alle spazzole.

1 Volt spazzole in grafite  
0,3 Volt spazzole in metallo

## SINCRONI

Le perdite a) e b) si desumono, come già indicato, da una prova a vuoto; le perdite c) e d) dalla prova in cortocircuito e dalla misura delle resistenze degli avvolgimenti.

Le perdite totali possono anche essere determinate con un funzionamento in condizioni nominali di velocità, tensione e corrente, a fattore di potenza nullo. La potenza necessaria può essere fornita da un motore tarato o dalla rete di alimentazione (nel qual caso però la misura si deve eseguire con strumenti adatti a un basso fattore di potenza). La misura va in ogni caso eseguita quando la macchina raggiunge la temperatura di regime.

Per le perdite di induttore, si deve far riferimento al valore di corrente di eccitazione misurato in una prova diretta o valutato dalla caratteristica a  $\cos\varphi = 0$ , come indicato nei precedenti paragrafi.

## 2.67 Angolo di coppia

Nella macchina sincrona funzionante a carico, assume notevole interesse l'angolo di coppia  $\beta$  esistente fra la f.e.m.  $E_0$ , prodotta dalla macchina stessa, e la tensione  $V$  ai suoi morsetti. Questo angolo interviene, come è noto, nelle espressioni della potenza attiva e reattiva scambiata fra macchina e rete; esso non può superare, in condizioni di regime od in transitorio, valori limiti oltre i quali il funzionamento diviene instabile. La determinazione dell'angolo di coppia può quindi interessare sia nel funzionamento a regime, per regolare gli scambi di potenza, sia in transitorio, per studiare le pendolazioni e le eventuali instabilità della trasmissione. La misura consiste nel confronto, meccanico od elettrico, fra la posizione del rotore, che determina la fase della f.e.m.  $E_0$ , e la fase della tensione  $V$  ai morsetti della macchina. Per poter effettuare questo confronto, occorre che le grandezze  $E_0$  e  $V$  siano trasformate in grandezze omogenee (tensioni sinusoidali, impulsi di tensione, posizioni meccaniche); ciò da origine ad una grande varietà di schemi di misura, con diverse caratteristiche di precisione e di risposta in transitorio.

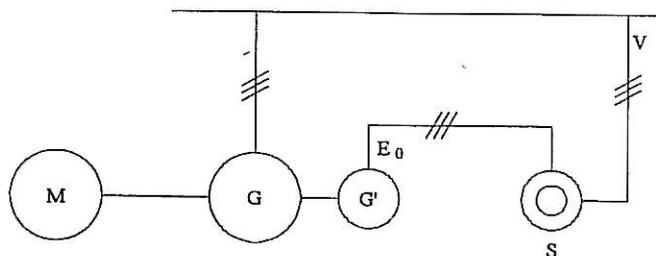
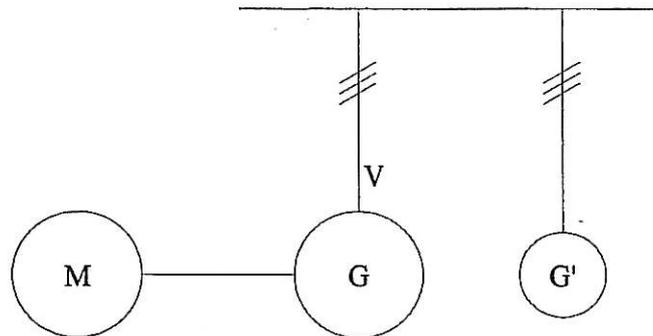


fig. 2.671

Il confronto diretto più semplice si ha calettando sullo stesso asse del generatore in prova un piccolo generatore trifase  $G'$ , con lo stesso numero di coppie polari, la cui f.e.m. è sempre in fase con la  $E_0$  (fig. 2.671). Il confronto di fase con la tensione  $V$  può allora essere eseguito con metodi elettrici, che assicurino la misura della differenza di fase, indipendentemente dai valori delle tensioni ed eliminando, quanto meno riducano, gli effetti di eventuali armoniche. Fra i vari metodi, citiamo l'impiego del selsyn differenziale, ossia di un motore trifase a rotore avvolto  $S$ , alimentato rispettivamente, sullo statore e sul rotore, dalle due sorgenti di f.e.m. da confrontare. Il rotore assume una posizione angolare che dipende dalla relazione di fase fra le due sorgenti: questo dispositivo può essere anche convenientemente tarato, a macchina ferma, con due f.e.m. la cui differenza di fase può essere variata a piacere. Per ottenere una posizione angolare legata alla fase della tensione  $V$  ai morsetti della macchina in prova, si può far ricorso ad una macchina ausiliaria  $G'$ , di piccola potenza, alimentata dalla stessa tensione (fig. 2.672); anche questa macchina deve avere lo

## SINCRONI

stesso numero di coppie polari della macchina in prova. Il confronto fra le posizioni angolari istantanee delle due macchine può farsi con metodi ottici o meccanicamente, con l'impiego di sincro.



fg.2.672

## 2.7 Reattanze e costanti di tempo

### 2.71 Corrente di corto circuito della macchina sincrona

Ponendo in cortocircuito brusco trifase un generatore sincrono, inizialmente a vuoto, la corrente che circola negli avvolgimenti risulta composta essenzialmente dei seguenti termini (fig. 2.711):

- una corrente sinusoidale permanente di valore  $I_c$ ; questo valore può anche essere rilevato in cortocircuito permanente e - come si è detto nel par. 2.65 - ad esso corrisponde la reattanza sincrona;
- una corrente sinusoidale transitoria, di valore iniziale  $(I'_c - I_c)$ , decrescente con legge esponenziale a costante di tempo  $T'_d$  dell'ordine del secondo; alla presenza della corrente  $I_c$  corrisponde la esistenza di una reattanza transitoria  $X'_d$
- una corrente sinusoidale iniziale (subtransitoria), di valore iniziale  $(I''_c - I'_c)$ , decrescente con legge esponenziale a costante di tempo  $T''_d$  dell'ordine dei centesimi di secondo; alla presenza della corrente  $I'_c$  corrisponde la esistenza di una reattanza subtransitoria  $X''_d$
- una corrente unidirezionale, smorzata con legge esponenziale a costante di tempo  $T_a$  dell'ordine di alcune frazioni di secondo: il suo valore iniziale è  $I_c \cos \delta$  dove  $\delta$  è l'angolo formato dall'asse della fase di statore rispetto all'asse di rotore, nell'istante iniziale del cortocircuito.

Le correnti nelle tre fasi differiscono per il diverso valore della componente unidirezionale, che dipende, come si è detto, dalla posizione delle singole fasi nell'istante di cortocircuito; le altre componenti formano invece in ogni istante dei sistemi trifasi simmetrici.

La corrente di eccitazione ha pure, in conseguenza del cortocircuito, un transitorio unidirezionale che si estingue con costante di tempo  $T'_d$ , a cui è sovrapposta una corrente sinusoidale a frequenza di rete smorzata con costante di tempo  $T_a$ .

Le componenti subtransitoria e transitoria sono associate alle reazioni che si vengono a stabilire nei circuiti rotorici a fronte del flusso variabile provocato dal cortocircuito: nella prima fase il contributo più significativo della reazione viene dagli smorzatori mentre in quella successiva rimane il circuito di eccitazione.

Il cortocircuito, per poter dare origine ad un andamento regolare delle varie componenti, deve essere effettuato con un interruttore, eventualmente modificato dal momento che deve poter effettuare la chiusura ma non necessariamente l'apertura sotto carico (per questo è spesso detto

## SINCRONI

chiuditore), con una sincronizzazione tra gli istanti di chiusura dei poli contenuta entro 15 gradi elettrici.

### 2.72 Analisi di un oscillogramma di cortocircuito

Per ricavare, da un oscillogramma rappresentante la corrente di cortocircuito brusco, i valori delle varie correnti e relative costanti di tempo, occorre procedere per via grafica, separando le componenti alternative da quella unidirezionale e rappresentandole in scala semilogaritmica per una migliore estrapolazione.

Il procedimento riesce agevole se, anziché sui valori rilevati nei singoli periodi, si procede su curva continua, involuppo dei valori di cresta; numerando progressivamente, partendo da 1, i vari massimi (positivi e negativi) si ottengono direttamente due curve come indicato in fig. 2.721.

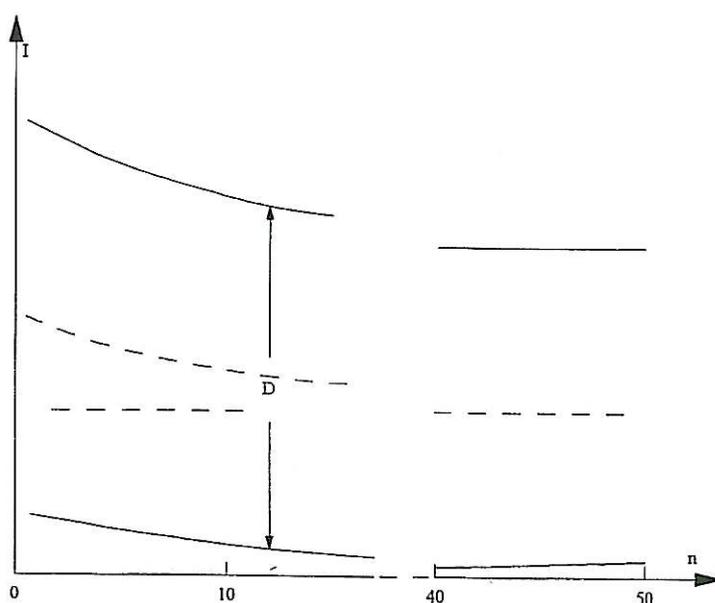


fig. 2.721

Nelle ascisse è riportato il numero d'ordine del massimo (tutti pari quelli di un segno e tutti dispari quelli di segno opposto, per costruzione), nelle ordinate il valore della corrente, in valore relativo rispetto alla corrente nominale, o in un'altra opportuna scala.

Qualunque sia l'origine scelta per le ordinate, in ogni punto la distanza  $D$  fra le due curve rappresenta il doppio del valore dell'involuppo della componente alternativa (che tende ad un valore costante); la curva media rappresenta invece i valori istantanei della componente unidirezionale, se le ordinate vengono valutate rispetto al valore limite cui la curva tende asintoticamente.

Si riporti ora, in un diagramma semilogaritmico la differenza fra la componente alternativa e il suo valore finale  $I_c$  (fig. 2.722): essa risulta composta da una retta (che esprime i valori istantanei della componente transitoria  $(i'_c - i_c)$  che si raccorda nei primi periodi con una curva; la differenza fra i valori di questa curva e quelli della retta - riportata anch'essa in scala logaritmica - danno i valori istantanei della componente subtransitoria  $(i''_c - i'_c)$ , che devono pure risultare su una retta.

Per valutare i valori massimi delle diverse componenti occorre estrapolare le due rette all'istante iniziale del cortocircuito; poiché, sulla scala scelta, un intervallo unitario corrisponde a mezzo periodo, e l'ascissa 1 al primo massimo, si determina facilmente sull'oscillogramma l'ascissa di riferimento, tra il punto 0 e il punto 1 (si noti che il primo quarto della forma d'onda può risultare distorto per la presenza della componente unidirezionale).

SINCRONI

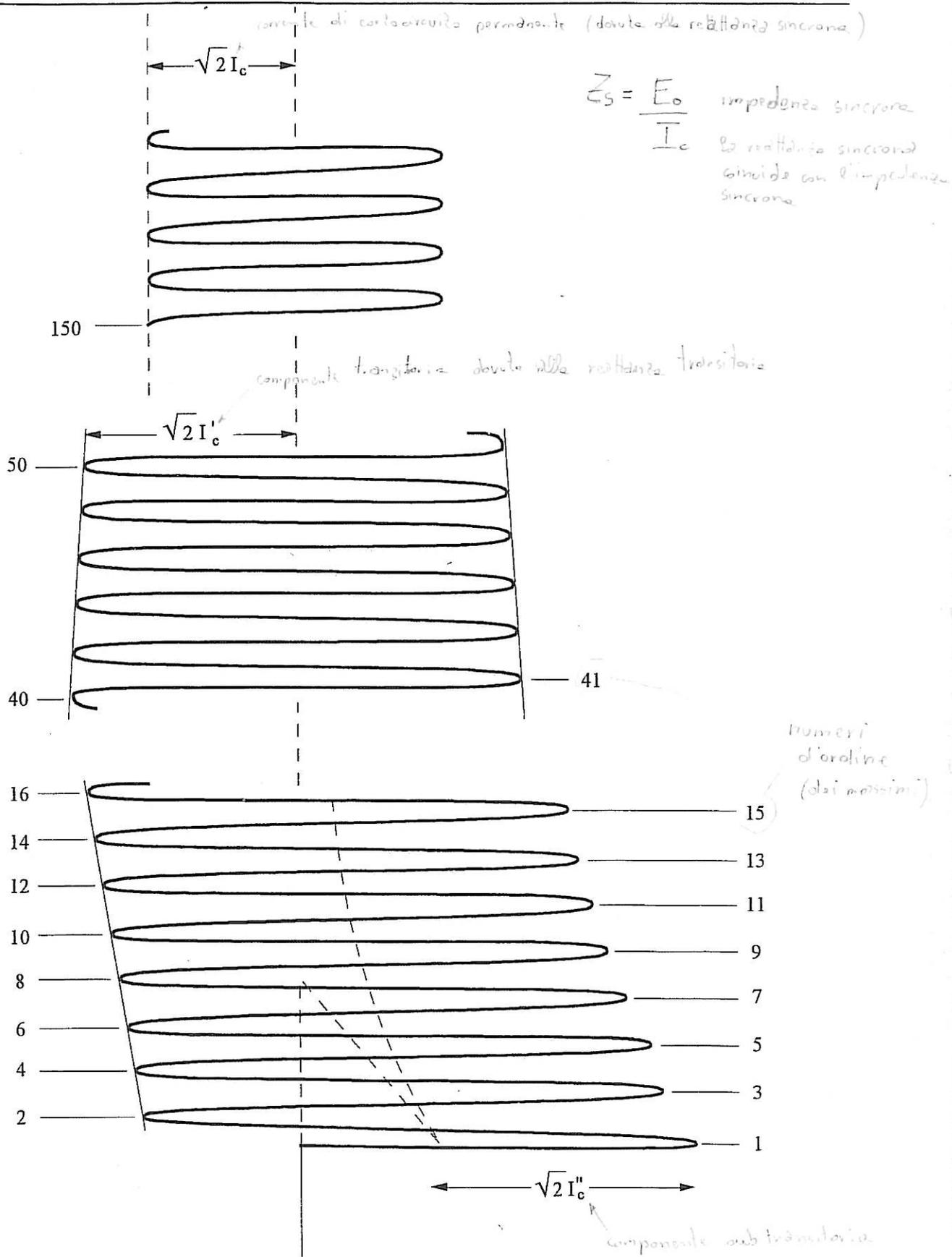


fig. 2711

SINCRONI

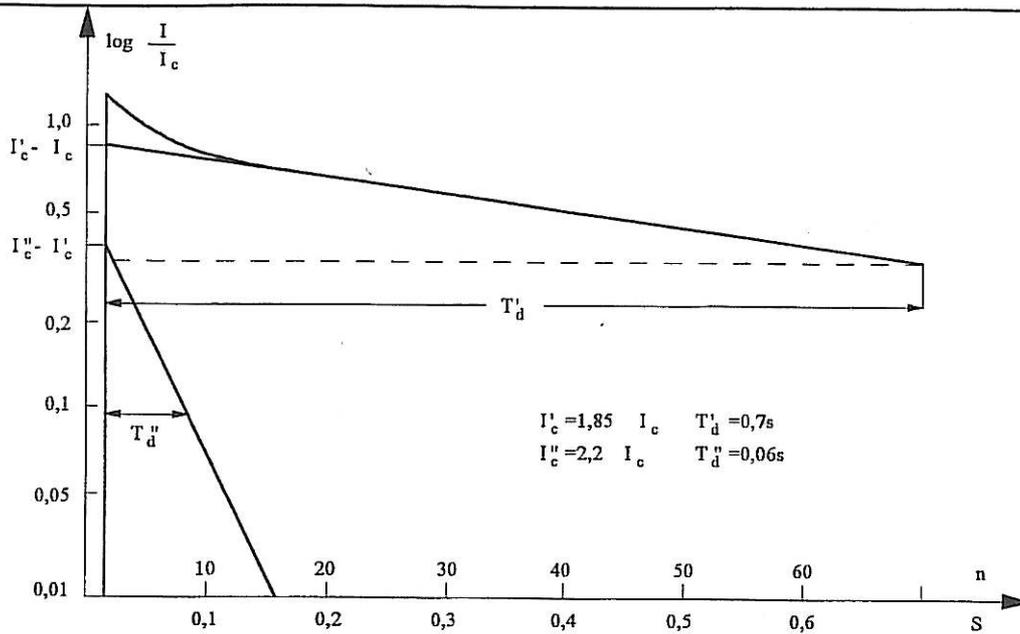


fig. 2.722

I valori determinati per estrapolazione delle rette sull'ascissa di riferimento, sono i valori iniziali ( $I''_c - I_c$ ) e ( $I'_c - I_c$ ), da cui si ricavano i corrispondenti valori di  $I''_c$  e  $I'_c$ ; la costante di tempo è - per definizione - l'intervallo di tempo fra due punti le cui ordinate stiano fra loro nel rapporto  $1/e = 0,368$ ; poiché sulla scala semilogaritmica si hanno delle rette, la costante di tempo si può valutare fra due punti qualsiasi le cui ordinate stiano fra loro in tale rapporto o, con semplici passaggi, dall'intervallo di tempo  $\Delta t$  fra due punti qualsiasi con un rapporto noto  $k$  fra le ascisse:

$$T = \frac{\Delta t}{\ln k}$$

(fig. 2. 723).

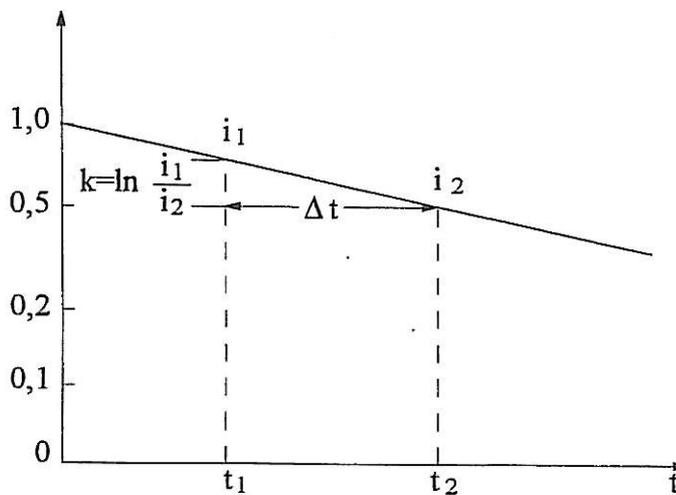


fig. 2.723

## SINCRONI

---

In modo del tutto analogo si ricavano il valore iniziale e la costante di tempo della componente unidirezionale.

Queste determinazioni grafiche non sono mai, per loro natura, molto precise; su di esse influiscono inoltre la presenza della componente a frequenza doppia, le deformazioni dovute a fenomeni di saturazione o isteresi nella macchina e negli apparecchi di misura, gli effetti di una non simultanea chiusura del c.c. Questi errori, particolarmente sensibili sulla misura della reattanza subtransitoria, si riducono facendo la media di più valori, ricavati da fasi diverse, poiché essi dipendono dall'angolo  $\delta$ .

## 2.73 Reattanze delle macchine sincrone SCHEMIO 11 FIG. 6.10 2002 QUINDI CON ROTORE A POLI SPORGENTI

Il comportamento di una macchina sincrona anisotropa è diverso, per correnti che producano una distribuzione di flusso simmetrico rispetto all'asse polare (o asse diretto) ovvero rispetto ad un asse a  $90^\circ$  con esso (o asse in quadratura). Anche per macchine a rotore liscio, la presenza dell'avvolgimento di eccitazione e la dissimmetria di eventuali smorzatori possono rendere utile tale distinzione.

Tenendo conto di ciò e di quanto detto per le reattanze sincrone, transitorie e subtransitorie, si definiscono:

- **Reattanza sincrona diretta  $X_d$  (in quadratura  $X_q$ )**: è la reattanza che una macchina sincrona presenta, rispetto ad una terna di tensioni di sequenza positiva, a frequenza nominale, in regime permanente, nel caso in cui la distribuzione del flusso, dovuto a tale terna di tensioni, sia simmetrica rispetto all'asse diretto (in quadratura). **Detta reattanza corrisponde al flusso prodotto dalla corrente d'indotto, a macchina cioè diseccitata, in assenza di saturazione.**
- **Reattanza transitoria diretta  $X'_d$  (in quadratura  $X'_q$ )**: è la reattanza che una macchina sincrona presenta all'atto dell'applicazione di una terna di tensioni di sequenza positiva, a frequenza nominale - prescindendo dalle componenti subtransitorie - quando la distribuzione del flusso, dovuto a tale terna di tensioni, sia simmetrico rispetto all'asse diretto (in quadratura). **La reattanza transitoria diretta corrisponde alla reattanza di dispersione fra gli avvolgimenti di induttore e di indotto; la reattanza transitoria in quadratura è invece, non essendovi avvolgimenti secondo tale asse, uguale alla corrispondente reattanza sincrona  $X_q$ .**
- **Reattanza subtransitoria diretta  $X''_d$  (in quadratura  $X''_q$ )**: è la reattanza che una macchina sincrona presenta all'atto dell'applicazione di una terna di tensioni di sequenza positiva, a frequenza nominale, quando la distribuzione del flusso, dovuto a tale terna di tensioni, è simmetrica rispetto all'asse diretto (in quadratura).

**La reattanza subtransitoria corrisponde alla reattanza di dispersione dell'avvolgimento d'indotto rispetto a tutti i circuiti di rotore, secondo l'asse considerato; detti circuiti comprendono, oltre agli smorzatori, tutti i circuiti sede di corrente indotta.**

Si considerano inoltre le seguenti grandezze utili a definire il funzionamento della macchina in condizioni di guasto:

- **Reattanza alla sequenza inversa ( $X_2$ )**: è la reattanza che una macchina sincrona presenta rispetto ad una terna di tensioni (o di correnti) di sequenza inversa.
- **Reattanza alla sequenza zero ( $X_0$ )**: è la reattanza che una macchina sincrona presenta rispetto ad una terna di tensioni o correnti di sequenza zero.

Tutte queste reattanze sono usualmente espresse per fase della stella equivalente o, preferibilmente, in valori relativi; esse possono tutte praticamente confondersi con le rispettive impedenze, essendo predominanti rispetto ai termini resistivi.

Alcuni valori tipici delle grandezze sopra definite sono riportati nella tabella 2.73. Non tutti questi valori possono essere scelti indipendentemente; si dimostra, ad esempio, che la reattanza di Potier, ricavata dalla prova a  $\cos\varphi = 0$ , ha valore compreso fra quelli di  $X'_d$  e  $X''_d$  e tanto più prossima al primo quanto più elevato è il grado di saturazione dell'induttore.

Tabella 2. 73 **IMPORTANTE** (VALORI TIPICI DI REATTANZA)

		turbogeneratori	generatori con smorzatori	motori sincroni	Note
<b>- Reattanze</b>					
sincrona diretta	$x_d$	0,95 - 2,00	0,75 - 1,45	0,80 - 1,50	si tende a diminuirla, per aumentare la stabilità, ma ciò aumenta il costo
sincrona in quadratura	$x_q$	0,92 - ,80	0,40 - 1,00	0,60 - 1,10	
transitoria diretta	$x'_d$	0,12 - 0,28	0,20 - 0,40	0,25 - 0,45	
subtransitoria diretta	$x''_d$	0,07 - 0,17	0,13 - 0,35	0,20 - 0,40	un suo aumento riduce lo sfruttamento dei materiali della macchina
subtransitoria in quadratura	$x''_q$	0,10 - 0,20	0,11 - 0,28	0,30 - 0,50	0,4÷0,9 in assenza di smorzatori
sequenza inversa	$x_2$	0,07 - 0,17	0,13 - 0,35	0,25 - 0,45	0,35÷0,65 in assenza di smorzatori
sequenza zero di Potier	$x_0$ $x_p$	0,01 - 0,10 0,07 - 0,21	0,02 - 0,21 0,17 - 0,40	0,04 - 0,27	
<b>- Resistenze:</b>					
di fase (c.c.)	$r$	0,0015-0,005	0,003-0,020		
di fase (c.a.)	$r$	0,003-0,008	0,003-0,015		
sequenza inversa	$r_2$	0,025-0,045	0,012-0,090		
<b>- Costanti di tempo:</b>					
di induttore transitoria	$T'_d$	2,8 - 9,2	1,5 - 9,5		Aumenta con la potenza Aumenta con la potenza
subtransitoria	$T''_d$	0,4 - 1,8	0,5 - 3,3		
di induttore in c.c.	$T_a$	0,02 - 0,05	0,01 - 0,05		
		0,04 - 0,35	0,03 - 0,25		

2.74 Misura della reattanza sincrona diretta e in quadratura

ALSI 14-05-2007

$$X_d \cong Z_0 = \frac{E_0}{I_c}$$

Il valore della reattanza sincrona può - secondo la definizione - essere determinato con una misura voltamperometrica, alimentando la macchina con una sorgente esterna, con rotore diseccitato e ruotante in sincronismo.

Tuttavia è preferibile ricavare il valore della reattanza sincrona diretta dalle caratteristiche a vuoto e in cortocircuito; se alla corrente di eccitazione  $I_{e0}$  necessaria ad avere a vuoto, sulla caratteristica di traferro, la tensione nominale  $V_n$ , corrisponde, in cortocircuito, la corrente permanente  $I_0$ , (fig. 2.741), la reattanza  $X_d$  vale:

è molto  
a rapporto

$$\frac{V_{21}}{\sqrt{3}} = \bar{E}_0$$

$$X_d = \frac{V_n}{\sqrt{3}I_0}$$

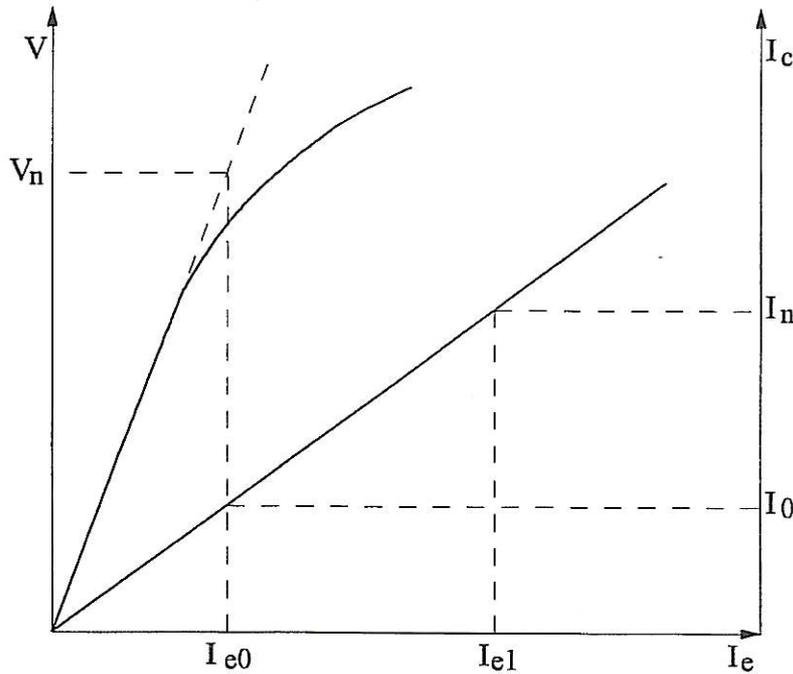


fig. 2.741

In cortocircuito infatti, data la prevalenza della reattanza, la distribuzione del flusso d'indotto è praticamente simmetrica secondo l'asse diretto.

Poiché è spesso conveniente dare i valori relativi, è sufficiente misurare sulla caratteristica in c.c. la corrente di eccitazione  $I_{e1}$  corrispondente alla corrente nominale  $I_n$ ; è infatti:

$$x_d = \frac{I_n \sqrt{3} X_d}{V_n} = \frac{I_n}{I_0} = \frac{I_{e1}}{I_{e0}}$$

Essendo questi valori presi su due rette, la determinazione può aver luogo a qualsiasi frazione nota della tensione o corrente nominale. Per la misura della reattanza sincrona in quadratura non è possibile prevedere una alimentazione permanente con distribuzione del flusso in quadratura - che non sarebbe stabile; è perciò necessario alimentare la macchina con una terna di tensioni simmetriche dirette, a frequenza nominale, facendo ruotare la macchina diseccitata, con un piccolo scorrimento rispetto alla velocità nominale, p. es. mediante un motore asincrono di adeguata potenza.

In tal caso la macchina presenta alla terna di tensioni impresse ora la reattanza sincrona diretta, ora quella trasversa, con una frequenza pari a quella di scorrimento. Registrando oscillograficamente la tensione impressa e la corrente assorbita si ottengono dei valori che passano tra un minimo e un massimo (fig. 2.742); il rapporto:

$$X = \frac{V}{\sqrt{3}I}$$

## SINCRONI

passa da un valore massimo  $X_d$  (corrente minima, tensione massima) sull'asse diretto a un valore minimo  $X_q$  (tensione minima, corrente massima) sull'asse in quadratura.

Si può anche rilevare la posizione istantanea relativa del campo d'indotto rispetto al rotore, registrando la tensione indotta negli avvolgimenti di campo, tensione che è nulla quando il flusso concatenato è massimo, cioè sull'asse diretto.

La tensione di alimentazione va tenuta abbastanza bassa ( $\leq 0,3 V_n$ ) sia per evitare coppie sincronizzanti dovute alla dissimmetria del rotore, sia per limitare il riscaldamento degli smorzatori; lo scorrimento deve essere piccolo ( $\leq 1\%$ ), per limitare le correnti negli smorzatori, che possono creare sovrariscaldamenti e, con la loro reazione, falsare i valori delle correnti d'indotto. Oltre ad avere fluttuazioni nella corrente assorbita, fluttua in opposizione anche la tensione; l'effetto è dovuto alla caduta sull'impedenza interna del regolatore che difficilmente è trascurabile in relazione a quella della macchina in prova.

Si verificano talvolta situazioni in cui le letture successive in corrispondenza all'asse diretto sono significativamente diverse: si tratta dell'effetto del magnetismo residuo la cui azione si combina algebricamente con le f.m.m. statoriche. In questo caso si conviene di assumere il valore medio o, in casi estremi, di ripetere la misura, procedendo preventivamente ad una smagnetizzazione della macchina.

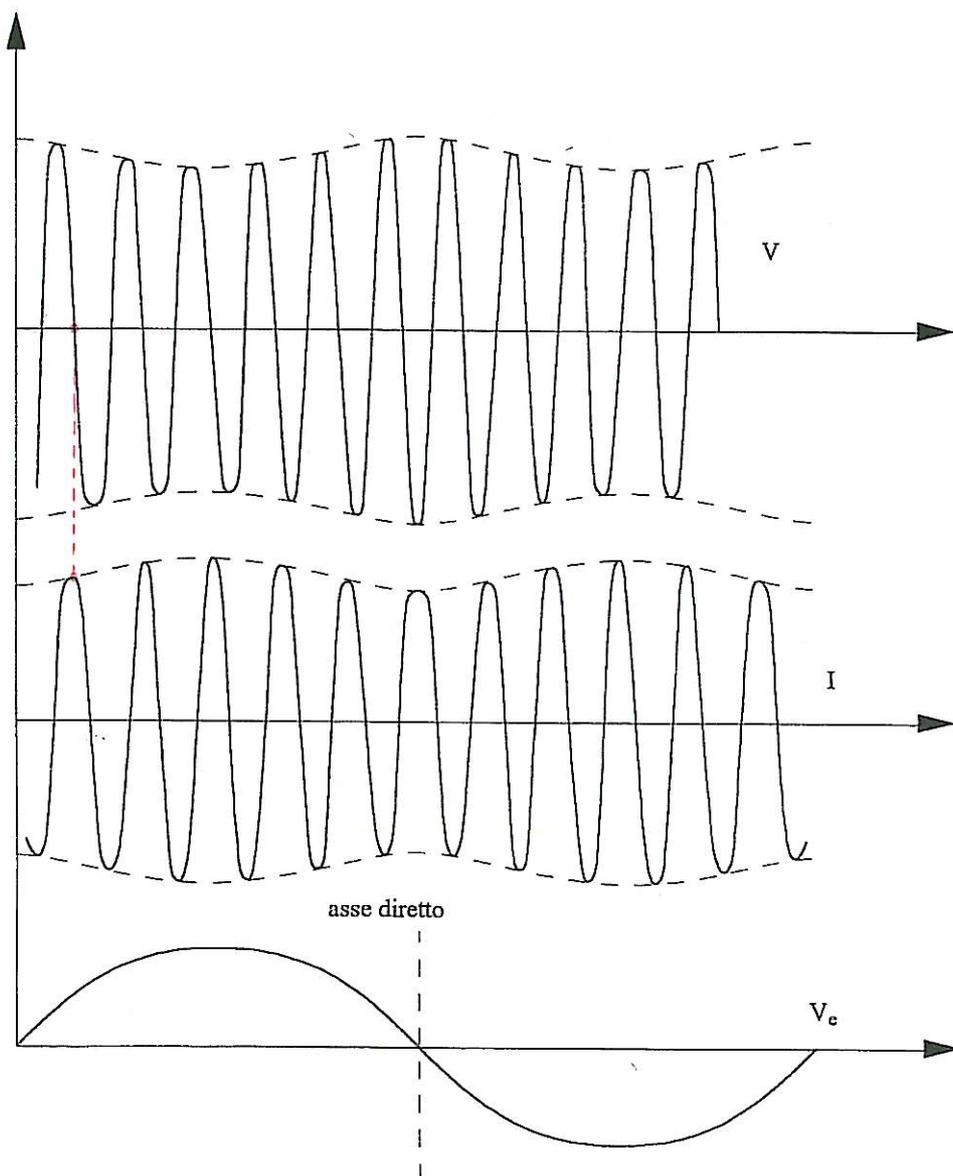


fig. 2.742

## SINCRONI

La reattanza  $X_q$  si può anche determinare dal valore della corrente massima che si ottiene dalla macchina funzionante da motore a vuoto, con controeccitazione, prima della perdita di passo. Infatti una macchina sincrona anisotropa a vuoto, diseccitata o con valori dell'eccitazione sufficientemente bassi, ha due posizioni di stabilità ( $dC/d\beta > 0$ ). Al crescere della corrente di eccitazione, si passa ad un solo punto stabile, per  $\beta = 0$ . La condizione di passaggio corrisponde all'annullarsi della coppia sincronizzante  $dC/d\beta$ , per  $\beta = \pi$  e comporta:

$$V = X_q I$$

La prova va eseguita più volte a tensione costante, con la macchina collegata in parallelo alla rete, rilevando i valori della corrente assorbita, a mano a mano che si varia l'eccitazione; questa viene prima ridotta a zero e poi invertita di segno ed aumentata gradualmente. Si registra il valore di corrente immediatamente precedente la perdita di passo, per la quale il rotore slitta di un polo, con una brusca diminuzione nella corrente assorbita.

### 2.75 Misura della reattanza transitoria

La determinazione della reattanza transitoria diretta avviene normalmente attraverso un oscillogramma della corrente di cortocircuito brusco. Per evitare alla macchina sollecitazioni eccessive, essa viene eccitata in modo da ottenere, a vuoto, una tensione del 20-40% della nominale e bruscamente cortocircuitata curando la contemporaneità di chiusura delle tre fasi (in genere si deve stare entro i 15 gradi elettrici).

Per l'analisi descritta al paragrafo 2.72, è sufficiente rilevare l'oscillogramma di corrente su una sola fase; è tuttavia buona regola eseguire la registrazione almeno su due fasi per evitare di dover ripetere la prova, nel caso in cui esistano irregolarità nell'oscillogramma, abbastanza facili a verificarsi nei primi istanti, per la diversa ampiezza che può assumere la componente unidirezionale.

La presenza di questa componente unidirezionale può anche alterare il funzionamento dei trasformatori di corrente, quasi sempre necessari dato il valore della corrente da registrare; essi possono saturarsi deformando anche l'andamento della componente alternata.

Prima della chiusura del cortocircuito è necessario eseguire la misura della tensione a vuoto  $V_0$  e della corrente di eccitazione  $I_e$ , il cui valore serve a rilevare, sulla caratteristica in cortocircuito, il valore della corrente di cortocircuito permanente  $I_c$ , che costituisce la taratura dell'oscillogramma. In esso le elongazioni sono usualmente lette, per comodità, come valori massimi, mentre i valori della corrente sono naturalmente riportati come valori efficaci.

La reattanza transitoria diretta si ricava dal rapporto:

$$X'_d = \frac{V_0}{\sqrt{3}I_c}$$

o, in valore relativo:

$$x'_d = \frac{v_0}{i_c}$$

La reattanza transitoria in quadratura si assume uguale alla corrispondente reattanza sincrona.

### 2.76 Misura delle reattanze subtransitorie

## MISURA DELLE REATTANZE SUBTRANSITORIE

La reattanza subtransitoria diretta può essere misurata, in modo analogo a quello descritto nel paragrafo precedente, da un oscillogramma della corrente di cortocircuito brusco trifase.

Essa può tuttavia misurarsi direttamente, come la reattanza di dispersione della macchina rispetto a tutti gli avvolgimenti di rotore, quando questo è disposto con il suo asse secondo l'asse del flusso statorico.

Ciò può facilmente realizzarsi in molti casi, posizionando il rotore, a macchina ferma, creandovi un campo statorico alternativo e non rotante.

La misura diviene allora una misura voltamperometrica in c.a. monofase purché la frequenza sia sufficiente a indurre le correnti di reazione nei circuiti rotorici (ciò è largamente soddisfatto da una alimentazione a 50 Hz) e purché la distribuzione del campo statorico, fissa nello spazio, sia corrispondente a quella che si ha in funzionamento trifase simmetrico.

E' però sufficiente rappresentare un solo istante del funzionamento normale, potendo assumere che la distribuzione del campo statorico sia di forma costante nel tempo; ciò può farsi con un'alimentazione monofase molto semplicemente in uno dei due modi illustrati in fig. 2.761a) e 2.762a).

Di solito viene preferito il primo, per ragioni di impedenza offerta dalla macchina. Si ottiene:

$$\omega L = \frac{V'}{I'} = \frac{\sqrt{3} V}{2I \sqrt{3}} = \frac{V}{2I}$$

$I'$  e  $V'$  sono i valori della corrente e della tensione equivalenti nel funzionamento trifase (fig. 2.771 b).

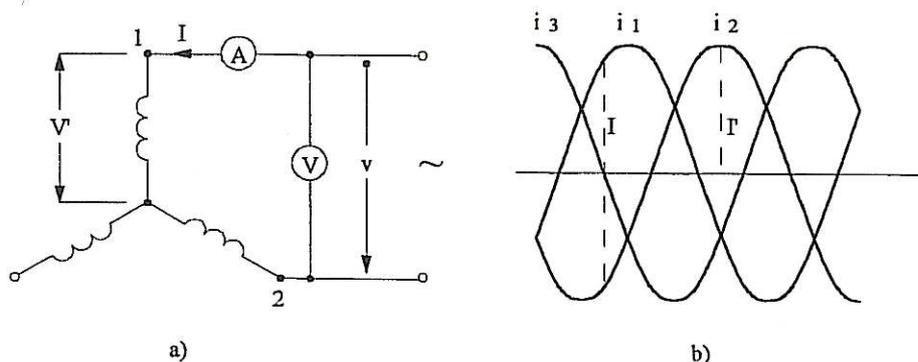


fig. 2.761

Per la fig. 2.772 è invece:

$$\omega L = \frac{2 V}{3 I}$$

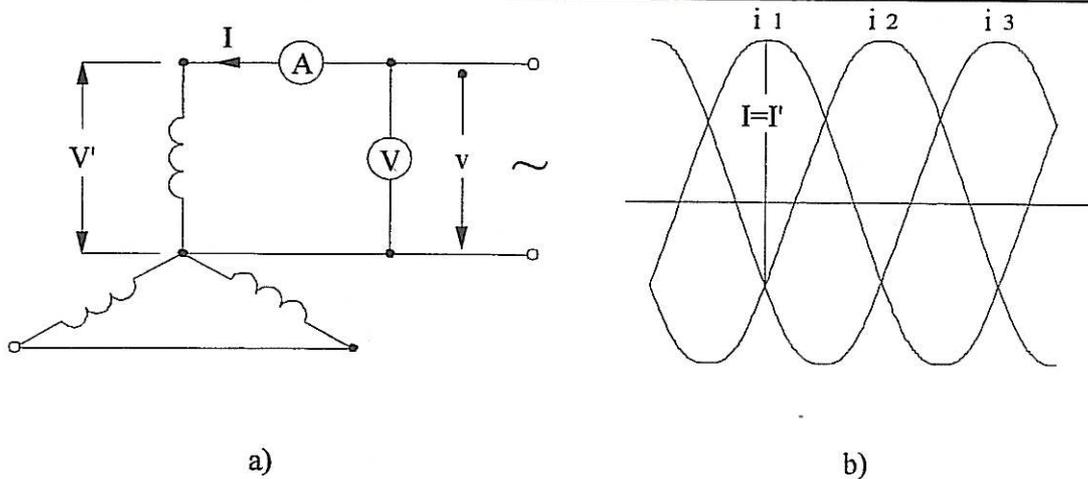


fig. 2.762

Le stesse considerazioni possono farsi per la reattanza subtransitoria in quadratura, ponendo all'asse del campo indotto normale all'asse dell'induttore.

2.77 Metodo di Dalton Cameron

Non sempre è facile posizionare il rotore in modo da misurare le reattanze  $X_d''$  e  $X_q''$  : si dimostra tuttavia che, sotto ipotesi semplificative ma usualmente soddisfatte, la reattanza misurata varia in funzione della posizione angolare  $\delta$  del rotore con una legge del tipo:

$$\omega L(\delta) = K + M \cos 2\delta = \omega \frac{L_d' + L_q'}{2} + \omega \frac{L_q' - L_d'}{2} \cos 2\delta$$

Eseguendo perciò la misura sulle tre fasi ruotando ciclicamente l'alimentazione, si ricavano tre valori di reattanza (A,B,C) che si collegano facilmente alla formula appena scritta.

$$\begin{aligned} A &= K + M \cos 2\delta \\ B &= K + M \cos(2\delta + 120) \\ C &= K + M \cos(2\delta + 240) \end{aligned}$$

Essendo sempre valide le relazioni

$$\begin{aligned} \cos 2\delta + \cos(2\delta + 120) + \cos(2\delta + 240) &= 0 \quad \text{e} \\ \cos^2 2\delta + \cos^2(2\delta + 120) + \cos^2(2\delta + 240) &= 3/2 \end{aligned}$$

con semplici considerazioni geometriche si ottiene (fig. 2.773):

$$\begin{aligned} K &= \frac{A + B + C}{3} \\ M &= \pm \sqrt{\frac{2}{3}(A^2 + B^2 + C^2 - 3K^2)} \end{aligned}$$

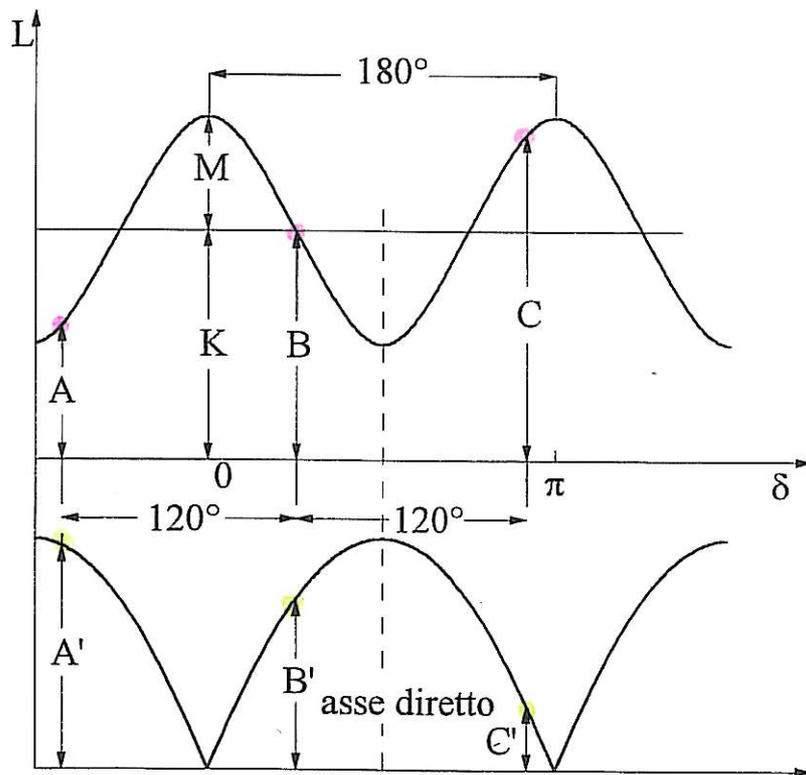


fig. 2.773

Per evitare incertezze nei segni, (potendo essere  $X_d'' > X_q''$  nel caso di gabbia sull'asse in quadratura di resistenza molto bassa, per lo smorzamento della componente inversa), in corrispondenza di ciascuna misura (A, B o C) si misura contemporaneamente anche la corrente indotta nel circuito di eccitazione, corrente che ha il suo massimo quando il campo statorico è orientato secondo l'asse diretto.

Confrontando tra loro le correnti indotte in corrispondenza dei valori massimo e minimo delle reattanze misurate, si può dedurre quale di queste sia più prossima alla reattanza di asse diretto e quindi decidere il segno da prendere. Con le ipotesi fatte, si assume M positivo, se la curva di  $\omega L$  ha un minimo in corrispondenza all'asse diretto, negativo, in caso contrario.

Conseguentemente si ha:

$$X_d'' = K - M$$

$$X_q'' = K + M$$

Come già detto, la misura si esegue alimentando, con una opportuna sorgente sinusoidale monofase, la macchina ferma, con il rotore in cortocircuito. Nei turboalternatori, la presenza di correnti indotte nel rotore può dar luogo a riscaldamenti pericolosi; la prova deve perciò essere condotta con corrente sufficientemente bassa.

## 2.78 Misura della reattanza alla sequenza inversa

SINCRONI

MISURA DELLA REATTANZA ALLA SEQUENZA INVERSA

Per determinare la reattanza alla sequenza inversa è necessario alimentare la macchina con una terna di tensioni di sequenza inversa; questa condizione può essere ottenuta senza l'intervento di una sorgente esterna, dissimmettizzando il circuito di uscita della macchina stessa, tenuta in rotazione alla sua velocità nominale.

Il sistema di fig. 2.781 è infatti equivalente ad una macchina sincrona alimentata da una terna dissimmetrica che rispetti le condizioni:

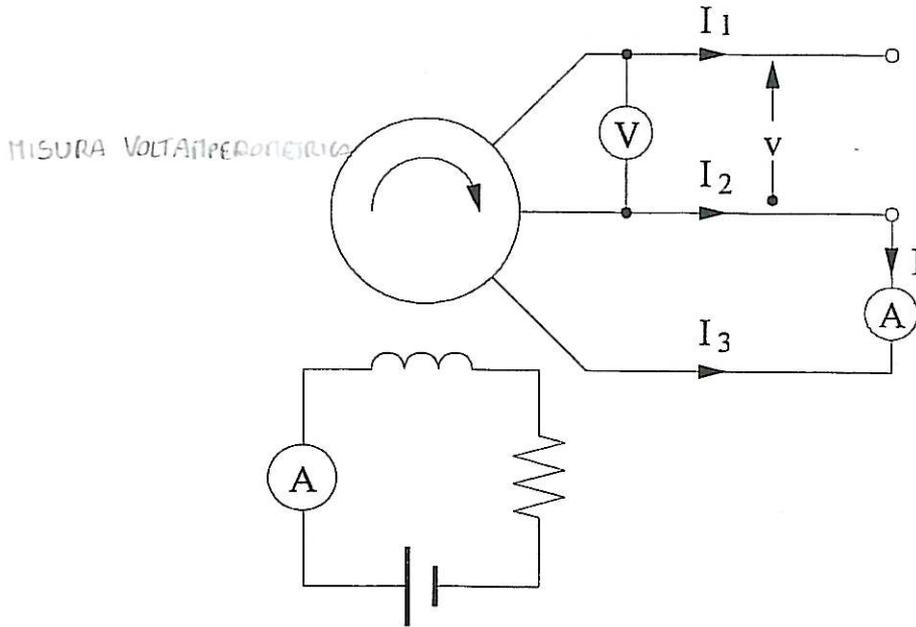


fig. 2.781

$$\begin{aligned} \dot{I}_1 &= 0 & \dot{I}_2 &= -\dot{I}_3 = \dot{I} \\ \dot{E}_2 &= \dot{E}_3 \end{aligned}$$

DUE FASI IN CORTO E UNA LIBERA

è quindi:

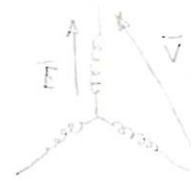
$$\dot{E}_i = \frac{\dot{E}_1 + \alpha^2 \dot{E}_2 + \alpha \dot{E}_3}{3} = \frac{\dot{E}_1 - \dot{E}_2}{3} = \frac{\dot{V}}{3}$$

$\alpha = \frac{3}{2}j$

$$\dot{I}_i = \frac{\dot{I}_1 + \alpha^2 \dot{I}_2 + \alpha \dot{I}_3}{3} = \frac{(\alpha^2 - \alpha) \dot{I}_2}{3} = -j \frac{\dot{I}}{\sqrt{3}}$$

L'impedenza alla sequenza inversa si ricava perciò come:

$$Z = \frac{\dot{E}_i}{\dot{I}_i} = j \frac{\dot{V}}{\sqrt{3} \dot{I}}$$



$\bar{V} = \bar{E} V_3$

La parte immaginaria dell'impedenza  $Z_i$  può essere dedotta da una lettura wattmetrica W (fig. 2.782).

## SINCRONI

L'indicazione del wattmetro corrisponde a:

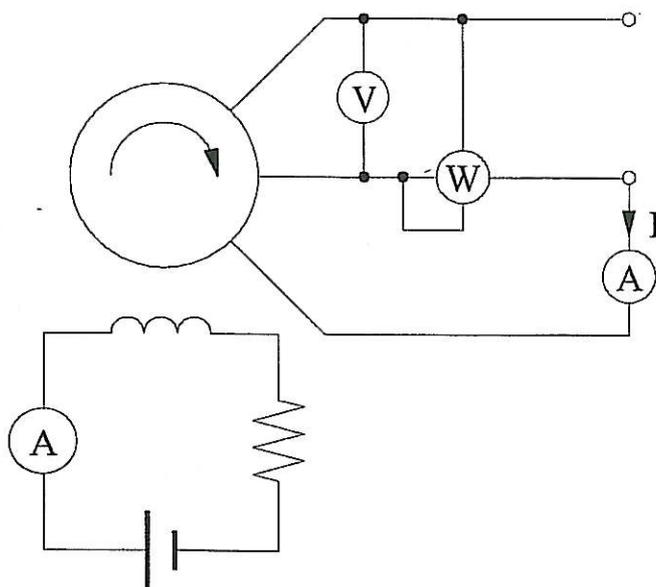
$$W = V \cdot I = 3 E_i \cdot j\sqrt{3} I_i = 3\sqrt{3} X_2 I_i^2$$

da cui si ottiene

$$X_2 = \frac{W}{\sqrt{3} I^2}$$

(2.782)

La parte reale della  $Z_i$ , se pure può dar luogo a perdite non indifferenti, risulta in genere piccola rispetto alla  $X_2$ ; tuttavia fra i due valori determinati in base alla (2.781) e alla (2.782) può esistere una sensibile differenza. Ciò è dovuto al fatto che una corrente sinusoidale di sequenza inversa induce una corrente sinusoidale di frequenza doppia nel circuito di rotore e quindi una f.e.m. di terza armonica nello statore; viceversa, se è applicata una terna di tensioni sinusoidali, la terza armonica compare nelle correnti.



MISURA

WATTMETRICA

(MISURA LA SOLA FONDAMENTALE)

fig. 2.782

Dette  $X_d''$  e  $X_q''$  le reattanze subtransitorie secondo i due assi, si può dimostrare che con la (2.782), che misura la sola fondamentale, si ha:

$$X_2 = \frac{X_d'' + X_q''}{2}$$

(2.783)

nel caso di corrente sinusoidale è:

$$X_2 = \frac{2X_d''X_q''}{X_d'' + X_q''}$$

(2.784)

nel caso di tensioni sinusoidali.

## SINCRONI

Qualora si usi invece la (2.781), che considera i valori efficaci, comprendendo anche le armoniche, si ha rispettivamente:

*misura voltamperometrica*

$$X_2 = \frac{1}{2} \sqrt{(X_d'' + X_q'')^2 + (X_q'' - X_d'')^2}$$

ovvero:

$$X_2 = \frac{\sqrt{2} X_d'' X_q''}{\sqrt{X_d''^2 + X_q''^2}}$$

Esempio

Essendo  $x_d'' = 0,35$  e  $x_q'' = 0,70$  si hanno rispettivamente i seguenti valori di  $x_2$ :

- con corrente	misura voltamperometrica	$x_2 = 0,54$	$\frac{x_d'' \cdot x_q''}{(x_d'' + x_q'')}$
	misura wattmetrica	$x_2 = 0,53$	
- con tensione	misura voltamperometrica	$x_2 = 0,44$	
	misura wattmetrica	$x_2 = 0,47$	

Allo scopo di prevedere le grandezze in gioco in una misura del tipo sopra indicato, si ricorda che la corrente permanente, per un cortocircuito fra due fasi, partendo dalla tensione a vuoto  $V$ , vale:

$$I_{c2} = \frac{V}{X_d + X_2}$$

Una volta nota la reattanza  $X_d$ , la  $X_2$  potrebbe essere ricavata per differenza; in valore relativo, il calcolo può condursi sulle correnti  $I_{e1}$  e  $I_{e2}$  che sono necessarie per ottenere la corrente nominale rispettivamente in cortocircuito trifase o bifase (fig. 2.783):

$$x_2 = \frac{\sqrt{3} I_{e2} - I_{e1}}{I_{e0}}$$

a differenza fra due termini molto vicini rende però poco precisa questa determinazione.

Durante la prova si possono avere perdite relativamente elevate specie nei rotor lisci; la prova viene preferibilmente eseguita con correnti ridotte e in ogni caso di breve durata; la potenza meccanica richiesta sull'albero comprende, oltre alle perdite meccaniche, un termine che vale  $(R_d + R_i) I^2$ , se  $I$  è la corrente che circola nel cortocircuito ed  $R_d$  e  $R_i$  i valori delle resistenze equivalenti per fase, rispettivamente alla sequenza diretta e inversa.

SINCRONI

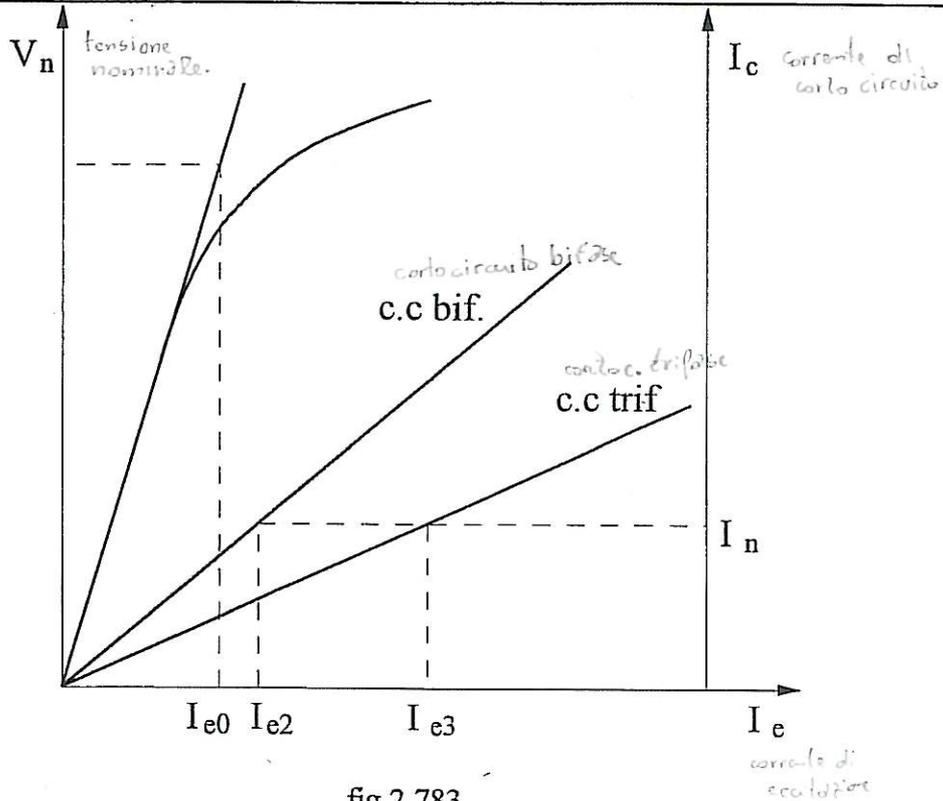


fig.2.783

2.79 Reattanza alla sequenza zero

La misura della reattanza, che una macchina sincrona presenta ad una terna di correnti di sequenza zero, si può determinare facendo percorrere le tre fasi, in serie, dalla stessa corrente I, mediante un'alimentazione esterna ( fig. 2.791).

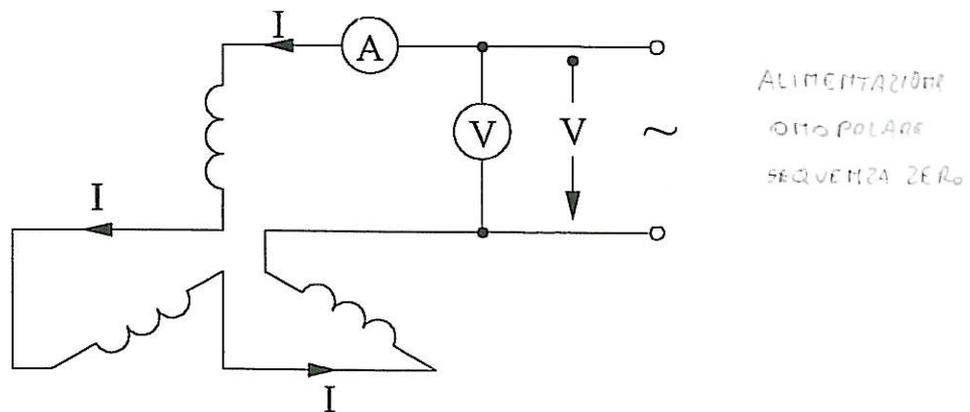


fig. 2.791

Poiché tale corrente non genera flusso concatenato con i circuiti di rotore, le condizioni di questo sono, in linea di principio, indifferenti; per convenzione, si assume il valore misurato con rotore, cortocircuitato, ruotante al sincronismo; tuttavia risultati analoghi si ottengono con rotore fermo o anche in assenza di rotore. La reattanza di sequenza zero risulta:

$$X_0 = \frac{V}{3I}$$

DI VALORE SOLITAMENTE MOLTO PICCOLO

SINCRONI

il suo valore è usualmente molto piccolo, per cui lo schema di fig. 2.791 è preferibile a quello di fig. 2.792, che richiede una tensione 3 volte minore e corrente 3 volte maggiore.

Volendo evitare l'alimentazione da una sorgente esterna, si può utilizzare lo schema di fig. 2.793; in esso è:

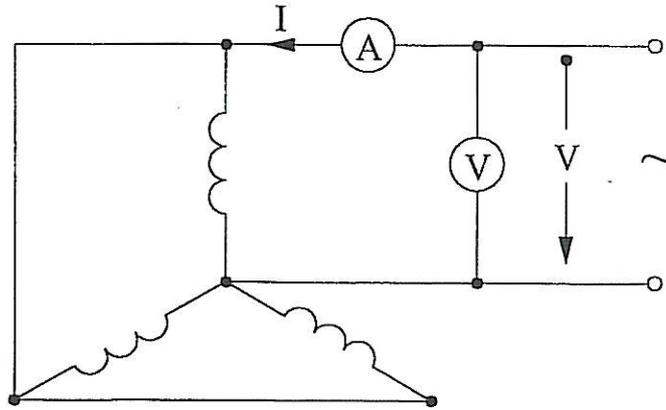


fig. 2.792

$$\begin{aligned} \dot{E}_1 &= \dot{V} & \dot{E}_2 &= \dot{E}_3 = 0 \\ \dot{I}_1 &= 0 & \dot{I}_2 + \dot{I}_3 &= \dot{I} \end{aligned}$$

e quindi:

$$\dot{I}_0 = \frac{1}{3}(\dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_3) = \frac{\dot{I}}{3}$$

$$\dot{E}_0 = \frac{1}{3}(\dot{E}_1 + \dot{E}_2 + \dot{E}_3) = \frac{\dot{V}}{3}$$

per cui risulta:

$$\dot{X} = \frac{\dot{E}_0}{\dot{I}_0} = \frac{\dot{V}}{\dot{I}}$$

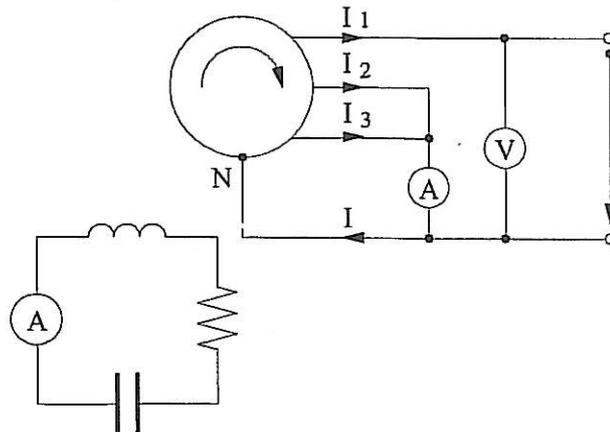


fig. 2.793

## SINCRONI

La macchina deve ruotare a velocità nominale; anche in questo caso, poiché circolano anche correnti di sequenza inversa, si deve sorvegliare l'eventuale sovrariscaldamento del rotore, specie nel caso di rotori lisci.

## 2.710 Costanti di tempo

Ad ogni componente non permanente - transitoria, subtransitoria, unidirezionale - della corrente di cortocircuito, compete, come si è visto, una costante di tempo, che viene determinata, nei modi indicati dal par. 2.72

Oltre a queste costanti di tempo, si usa per caratterizzare una macchina sincrona la costante di tempo transitoria a vuoto  $T_{d0}$  relativa alla variazione della tensione a vuoto secondo l'asse diretto, quando viene cortocircuitato bruscamente l'induttore (fig. 2:701).

Anche per questo transitorio i valori ottenuti dall'oscillogramma (di tensione) vengono riportati in scala semilogaritmica e analizzati con il metodo esposto al par. 2.72.

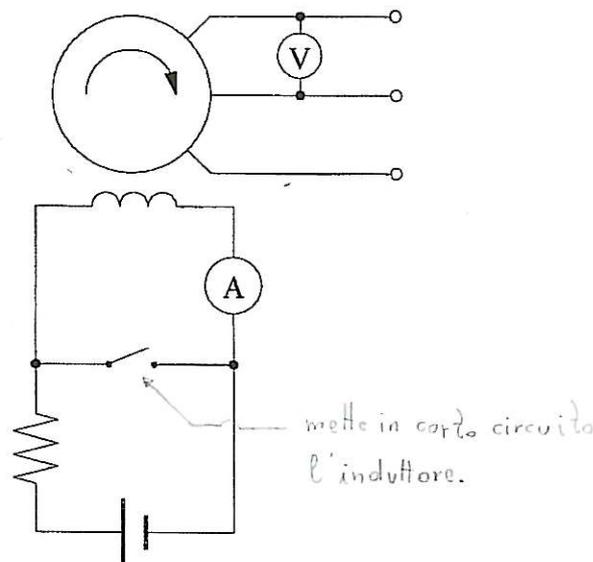


fig. 2.701

## BIBLIOGRAFIA

- CEI 2-5 (1980) - Norme per la determinazione sperimentale delle grandezze delle macchine sincrone trifasi.

## CAPITOLO III

## PROVE TERMICHE

## 3.1 Natura e scopo delle prove

## 3.11 Le leggi di decadimento termico degli isolanti

La potenza dissipata nell'interno di una macchina o di un apparecchio elettrico provoca un riscaldamento delle sue varie parti. E' ovvio sia che debba porsi un limite alle temperature ammissibili per i diversi organi, sia che, in relazione a tali temperature, debba essere controllata sperimentalmente la capacità di smaltimento del calore prodotto, poiché essa costituisce un fattore fondamentale per il buon comportamento in esercizio.

Fra i vari effetti nocivi della temperatura (deformazioni, peggioramento delle proprietà meccaniche ecc.) il più importante - per la maggior parte dei casi - consiste nel deterioramento dei materiali isolanti. In tutti i dielettrici, ma in particolare in quelli che contengono composti organici, si svolgono delle complesse reazioni chimiche (ossidazione, idrolisi, polimerizzazione, rottura delle catene di polimerizzazione, liberazione di prodotti gassosi, ecc.). In conseguenza di tali reazioni gli isolanti divengono rigidi e fragili, si deformano in modo non uniforme, danno luogo a porosità e fessure che facilitano l'assorbimento di umidità negli strati interni; diminuiscono così le qualità meccaniche e, benché in misura molto minore, quelle elettriche, fino a che, per effetto quasi prevalentemente meccanico, si ha la rottura o lo sfaldamento del materiale, con conseguente cedimento anche elettrico.

In questi fenomeni giocano un ruolo preponderante gli agenti chimici esterni, ma - come in tutte le reazioni chimiche - la velocità della reazione è sostanzialmente legata alla temperatura. Si possono, a questo scopo, definire vari parametri per valutare quantitativamente "l'invecchiamento" di un dielettrico (alterazioni delle proprietà meccaniche, di quelle elettriche, di composizione chimica, di peso, ecc.) e la corrispondente "durata"  $D$  di vita; la relazione che meglio rappresenta il decadimento di un isolante risulta del tipo:

(3.111)

$$\log D = a + \frac{b}{T}$$

con  $a$  e  $b$  costanti proprie del materiale e  $T$  temperatura assoluta. In un grafico per cui la scala verticale sia logaritmica e quella orizzontale sia formulata nei termini del reciproco della temperatura assoluta, i dati dovrebbero pertanto disporsi secondo una retta. La formula è largamente usata in pratica per estrapolare i risultati delle prove accelerate di vita eseguite ad alta temperatura per prevedere la vita del materiale a temperature più basse.

La figura 3.111 riporta ad esempio la durata di vita (ore necessarie a ridurre la rigidità dielettrica a 10 kV/mm) in funzione della temperatura, per una vernice isolante.

La (3.111) non è altro che una estensione della legge (di Arrhenius) sulla velocità delle reazioni chimiche ed è bene verificata sia dalle prove su campioni di materiali isolanti, sia dalle statistiche dei funzionamento in esercizio.

Per non entrare nel dettaglio delle prove di invecchiamento artificiale, è sufficiente rilevare che, nel campo delle temperature normali di funzionamento, la "durata di vita" di un isolante può dimezzarsi per un innalzamento di temperatura dell'ordine di 5 - 10°C.

## PROVE TERMICHE

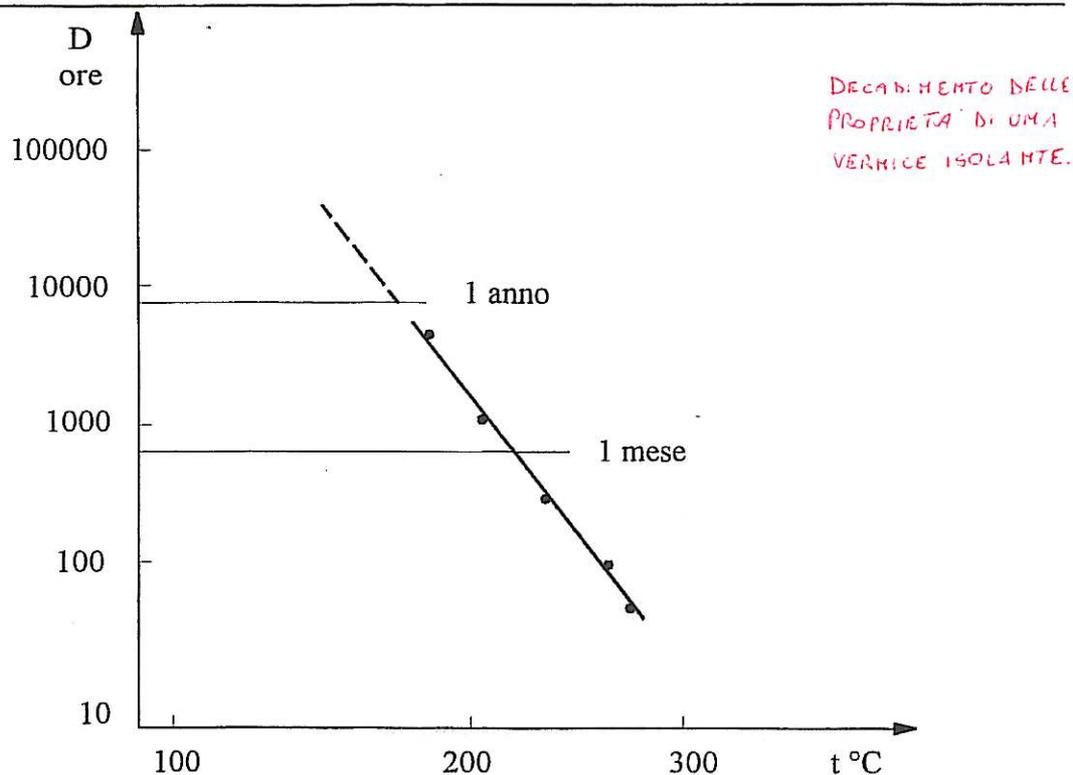


fig. 3.111

### 3.12 Classificazione degli isolanti

In base alle considerazioni precedenti, gli isolanti sono stati classificati dalla IEC a seconda della loro massima temperatura di funzionamento, risultante da prove comparative

Queste classi risultano dalla tabella 3.121 nella quale sono riportati anche alcuni esempi di materiali appartenenti alle singole classi; si tenga però presente che la classificazione avviene in base non alle caratteristiche chimiche, ma al risultato di determinate prove convenzionali. In presenza di composti, leganti od impregnanti, si possono avere perciò risultati molto diversi da quelli propri dei singoli componenti. Si ricorda inoltre che i valori di temperatura possono essere modificati scegliendo altri criteri per la valutazione della "durata di vita" del materiale.

Oltre al grafico di Arrhenius relativo alla durata termica, vengono spesso considerati i seguenti indici:

- Indice di temperatura TI  
numero corrispondente alla temperatura (in °C) relativa ad una determinata vita termica, normalmente di 20 000 ore
- Indice di temperatura relativa RTI  
indice di temperatura di un materiale in una prova comparativa, con le stesse modalità, di un materiale di riferimento.
- Intervallo di dimezzamento HIC  
numero corrispondente all'intervallo di temperatura (in °C) che esprime in dimezzamento del tempo di fine vita considerato alla temperatura di TI o di RTI.

## PROVE TERMICHE

Tabella 3. 12 1

Classe termica	Temperatura °C	Materiali tipici	Impregnazione
Y	90	Cotone, carta, legno, PVC, gomma naturale vulcanizzata	Nessuna
A	105	Cotone, carta, legno, smalti all'acetato di cellulosa	Oli minerali o sintetici
E	120	Smalti a base di resine poliviniliche. Poliesteri	
B	130	Amianto, mica, fibra di vetro	Gommalacca, asfalto, resine sintetiche, poliesteri, resine epossidiche.
F	155	Amianto, mica, fibra di vetro	Resinoidi alchilici, epossidici, poliesteri a stabilità termica elevata.
H	180	Amianto, mica, fibra di vetro, elastomeri di silicone	Resine silconiche
C (*)	180	Mica, quarzo, porcellana, vetro	Leganti inorganici (vetro, cemento).

(\*) La classe C è adesso sostituita da Classi termiche caratterizzate da un numero corrispondente alla massima temperatura di funzionamento (Classe 200, 220, 250).

### 3.13 Temperature di riferimento e sovratemperature

Una volta definita la massima temperatura assoluta a cui può funzionare l'isolante, occorre considerare che essa risulta dalla somma di tre termini:

- la temperatura dell'ambiente in cui l'apparecchio funziona;
- il salto di temperatura medio fra le varie parti dell'apparecchio e l'ambiente;
- la differenza fra la temperatura massima e quella media nell'interno dell'apparecchio stesso.

Sia in sede di esercizio che durante una prova, la temperatura dell'ambiente in cui l'apparecchio funziona (e che sarà meglio definita in seguito), è, nella maggior parte dei casi, imposta da condizioni esterne, in generale non costanti.

Lo smaltimento di calore determina il salto di temperatura fra l'apparecchio e l'ambiente (sovratemperatura); questa sovratemperatura è pressoché indipendente dalla temperatura ambiente ed è questa perciò la grandezza che le norme impongono di controllare nelle prove termiche. Quando sia possibile, la sovratemperatura da misurare è quella riferita al punto dove essa è massima; se ciò non è possibile, si dovrà tener conto, nel fissare i limiti di sovratemperatura media, di un adeguato margine. Per esempio, nelle norme trasformatori, facendo riferimento ad una temperatura massima ambiente di 40°C, si impone che la sovratemperatura dell'olio, misurata nel punto più caldo, sia di 50°C; la sovratemperatura media del rame degli avvolgimenti (con isolamento in classe A) sia di 60° se immersi in olio e di 55° se in aria.

## PROVE TERMICHE

L'olio infatti dà una maggiore uniformità di temperatura, per cui, rispetto ai 105°C della classe A, si possono tenere solo 5 gradi di margine fra temperatura media e temperatura massima. Se si misura, nei trasformatori in aria, la sovratemperatura nei vari punti, il limite ammesso per il punto più caldo sale infatti a 65°C.

In generale, per le condizioni dell'aria ambiente si assumono le seguenti convenzioni:

temperatura massima:	40°C	
temperatura media giornaliera:	30°C	media annuale: 20°C
temperatura minima:	-5°C	(per interno
	-25°C	(per esterno);

nei paesi tropicali le temperature massime sono assunte in generale, di 10°C più elevate. Per la temperatura dell'acqua di raffreddamento si assume normalmente il valore di 25°C.

Le convenzioni precedenti ammettono che la trasmissione di calore sia indipendente dai valori assoluti dalle temperature; si limita però in genere la validità della prova a temperature ambiente maggiori di 10° (per l'aria) o 5° (per l'acqua).

### 3.14 Definizione della temperatura ambiente

La misura della sovratemperatura di una macchina va eseguita con riferimento alla temperatura ambiente che si verifica durante la prova. Per convenzione, si definisce "temperatura ambiente di riferimento":

- per le macchine a ventilazione naturale: la temperatura del locale in cui la macchina è installata;
- per le macchine a ventilazione forzata (o autoventilate) che prendono l'aria da un ambiente diverso da quello in cui la macchina è installata: la temperatura dell'aria all'entrata della macchina
- per le macchine raffreddate ad acqua: la temperatura dell'acqua all'entrata del refrigerante.

Il valore della temperatura ambiente varia in genere durante la prova, specie se non si è provvisto un efficace smaltimento dell'aria riscaldata dalla macchina stessa, sia per ragioni meteorologiche, quando le prove durano diverse ore. E' perciò necessario, come sarà indicato più avanti, disporre per la misura della temperatura ambiente di una adeguata costante di tempo, approssimativamente pari a quella della macchina in prova.

## 3.2 Misura delle temperature

### 3.21 Fondamenti

Come è noto; la scala delle temperature ha per unità il grado Celsius, i praticamente determinato dall'intervallo di temperatura fra due punti fissi, quello di fusione del ghiaccio, assunto come zero, e il punto di ebollizione dell'acqua, assunto pari a 100°.

Nel campo delle temperature che interessano le apparecchiature elettriche, si utilizzano per la misura termometri diversi, basati sui seguenti principi:

- dilatazione di solidi o liquidi;
- variazione della resistenza di un conduttore elettrico;
- effetto termoelettrico.

La misura di una temperatura con metodi ottici è applicata in casi speciali, per temperature elevate, come ad esempio nelle caldaie. Una delle caratteristiche particolari che la misura della temperatura presenta è la difficoltà di trasportare la grandezza da misurare da un punto all'altro; occorre perciò spesso che la "sonda", o elemento sensibile, sia introdotto nel punto in cui si vuole misurare la temperatura e la trasformi poi in un'altra grandezza, di più facile trasporto per la successiva misura.

### 3.22 Termometro a mercurio

Il tipo più comune e più preciso di termometro a dilatazione è quello a mercurio, che ha un campo d'impiego da -35 a +700°C; esso è costituito da un bulbo, da cui si diparte un capillare, costituito in vetro con particolari caratteristiche di stabilità. La lettura viene eseguita in corrispondenza alla posizione assunta, per dilatazioni, dal mercurio interno; i termometri migliori sono graduati in modo da poter leggere il decimo e in qualche caso il centesimo di grado, ma la precisione dalla misura dipende sia dalla buona taratura della scala che dalla esecuzione di alcune correzioni, quali quelle per la colonna sporgente e per la depressione dello zero, correzioni che - nella misura sulle macchine elettriche - possono comportare errori di qualche decimo di grado (\*).

Il mercurio è sostituito dall'alcool, quando si temano forti campi magnetici variabili, che possano provocare riscaldamenti nel mercurio; questi termometri sono però in genere meno precisi di quelli a mercurio, specie intorno ai 40-60°C non avendo l'alcool la stessa legge di dilatazione del mercurio e dei gas perfetti.

Talvolta la dilatazione del mercurio è usata per creare una pressione, che può essere trasmessa a distanza e misurata, su un quadrante, dalla posizione di un indice dotato di molla antagonista. Tali termometri, pur avendo una compensazione per la differenza di temperatura fra il bulbo e la colonna di trasmissione della pressione, hanno una precisione che supera raramente qualche percento.

### 3.23 Termometri metallici a dilatazione.

Una sbarretta metallica, che abbia la lunghezza  $l_0$  alla temperatura  $t_0$ , subisce, alla temperatura  $t$ , un allungamento:

$$dl = \delta l_0 (t - t_0)$$

- \* il coefficiente di dilatazione  $\delta$  [in  $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ], va da 1 per l'invar a circa 13 per il nichel e 24 per l'alluminio.

I termometri lineari sono formati da un tubo e da una sbarra concentrici, saldati ad un'estremità (fig. 3.231); i materiali sono scelti in modo da avere coefficienti di dilatazione fra loro molto diversi.

Le bilame sono formate da due strisce piatte di materiali diversi, saldate fra loro; per la differenza di dilatazione, le strisce si incurvano al variare della temperatura con una deflessione

\* Se la colonna di mercurio si trova in un ambiente a temperatura  $t_a$  per una lunghezza di  $N$  divisioni, il valore letto  $t_b$  deve essere aumentato della quantità

$$\Delta n = 1,6 \times 10^{-4} (t_b - t_a) N$$

Con  $t_b - t_a \leq 50^{\circ}\text{C}$   $\Delta n/N \leq 0,8\%$ .

PROVE TERMICHE

che è proporzionale alla temperatura stessa. Le bilame sono costruite in varie forme, dritte, ad U, ad elica, a spirale, con grande varietà di dimensioni; giocando su queste si possono infatti ottenere caratteristiche di risposta più o meno rapide.

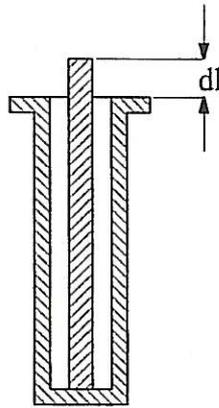


fig. 3.231

La precisione e la riproducibilità delle misure sono legate alle qualità elastiche dei materiali, che devono funzionare sempre nel campo delle deformazioni reversibili; ciò ha portato a studiare, nei moderni termometri, leghe speciali al Fe-Ni.

La precisione raggiungibile è dell'ordine di  $\pm 1\%$ . Questi termometri presentano anche il pregio di un'elevata sovraccaricabilità.

3.24 Termometri elettrici a resistenza

Come è noto, la resistenza di un conduttore varia con la temperatura seguendo una legge del tipo:

$$R_t = R_0(1 + \alpha t)$$

essendo  $R_0$  la resistenza a  $0^\circ\text{C}$ . Quando il conduttore ha la temperatura  $t'$  si ha:

$$R_{t'} = R_0(1 + \alpha t')$$

da cui si ottiene :

$$\Delta t = t' - t = \left( \frac{1}{\alpha} + t \right) \frac{R_{t'} - R_t}{R_t}$$

Questo principio è largamente usato per determinare la sovratemperatura media di un avvolgimento, mediante misura della sua resistenza alla temperatura ambiente  $t$  e alla temperatura di regime  $t'$ .

Come si riconosce dalla 3.241, la misura del salto di temperatura non dipende inoltre da un eventuale errore sulla misura della temperatura iniziale  $t$ , che invece può avere influenza sul valore assoluto della temperatura  $t'$ . Il valore misurato per  $\Delta t$  è invece direttamente legato alla differenza relativa fra le due misure di resistenza, per le quali - specie se eseguite con

CATENE DI MARCO 12/05/2007  
 (muscolo artificiale basato l'azione  
 di fibre che generano ad eccitazione  
 elettrica per effetto Joule  $P=RI^2$ )

FIBRE MARCOVIANE  
 (singole catene lineari vincolate  
 di capi articolati; la sommità  
 del dente delle fibre marcoviane  
 definisce la contrazione del  
 muscolo marcoviano.

Tale contrazione potrà comportare  
 • Un avvicinamento dei capi  
 articolati (contrazione marcoviana  
 di tipo isotonica)

• Un aumento  
 volumetrico  
 del fascio  
 di fibre  
 marcoviane  
 senza avvicinamento  
 dei capi articolati  
 della contrazione marcoviana  
 (isotonica)

Problemi che:  
 piccole fibre hanno  
 piccola resistenza  
 quindi piccole  
 dissipazioni e ad  
 un'impedenza piccola  
 in tensione  
 soluzioni: concentrare  
 costruire le fibre con  
 leghe scaldate con  
 elettrica e con  
 grande  $K$  elastica

## PROVE TERMICHE

metodo voltamperometrico - è necessario evitare gli errori di carattere fortuito (come ad esempio gli errori di lettura o la differenza fra due scale diverse) più di quelli a carattere sistematico [per esempio dovuti alla costante dello shunt usato].

Un'incertezza di  $\pm 1\%$  nella misura della differenza comporta una incertezza di  $\pm 2.5^\circ\text{C}$  sul valore di  $\Delta t$ . La [3.241] inoltre è utilizzata nei termometri a resistenza, con elementi sensibili (sonde) in platino o nichel e misura della resistenza con metodo potenziometrico o di ponte.

Il nichel ha un coefficiente  $\alpha$  ( $\sim 6,3 \cdot 10^{-3}/^\circ\text{C}$ ) leggermente maggiore di quello del rame ( $\sim 4,2 \cdot 10^{-3}/^\circ\text{C}$ ), e del platino ( $3,9 \cdot 10^{-3}/^\circ\text{C}$ ). Questi ultimi sono tuttavia più stabili e più facilmente ottenibili allo stato puro, il che consente di avere resistenze riproducibili e sufficientemente lineari nell'intervallo fra 0 e  $100^\circ\text{C}$ . Il materiale opportunamente invecchiato, è disposto in forma di filo sottile, avvolto su un supporto isolante, a formare resistori di qualche centinaio di ohm (il più comune, con valore di  $100 \Omega$  a  $0^\circ\text{C}$  è denominato convenzionalmente Pt100); dalle dimensioni del supporto e dalla massa del filo dipende la costante di tempo della sonda termometrica.

Trattandosi di misurare delle variazioni di resistenza, il metodo più opportuno è quello di ponte, mediante il quale si può ottenere una sensibilità sufficiente a valutare il decimo di grado. La corrente nel sensore non deve superare qualche mA per evitare errori dovuti all'auto riscaldamento.

Lo schema di fig. 3.241 è spesso modificato in quello di fig. 3.242, con  $b = c$  in modo da eliminare l'influenza dei conduttori di collegamento, che risultano uguali, come resistenza e come temperatura, quando siano formati da due conduttori identici, intrecciati fra loro; i sensori devono essere a tre fili.

Talvolta, per rendere più spedita la misura, si ricorre ad una lettura dello squilibrio sul rivelatore di zero (in modo analogo a quanto già visto per gli estensimetri); per avere una buona precisione, occorre allora che la f.e.m. di alimentazione sia rigorosamente costante; se le variazioni di resistenza non sono molto piccole, la scala non risulta lineare.

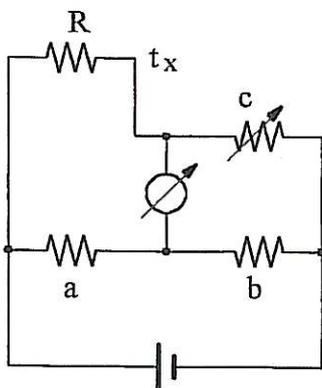


fig. 3.241

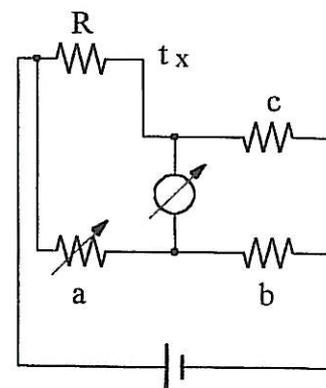


fig. 3.242

Per ovviare al primo inconveniente si può ricorrere a un dispositivo logometrico (fig. 3.243) o a controlli su resistori noti; per ridurre l'effetto del secondo, giova un'opportuna scelta dei valori delle resistenze a, b e c.

## PROVE TERMICHE

Le misure con potenziometro, che possono dare sensibilità dell'ordine dei millesimi di grado, sono eseguite più raramente, di solito per scopi di taratura, in laboratorio.

La corrente che percorre la sonda durante la misura può alterarne la temperatura, se essa non è in buone condizioni di equilibrio termico con l'ambiente.

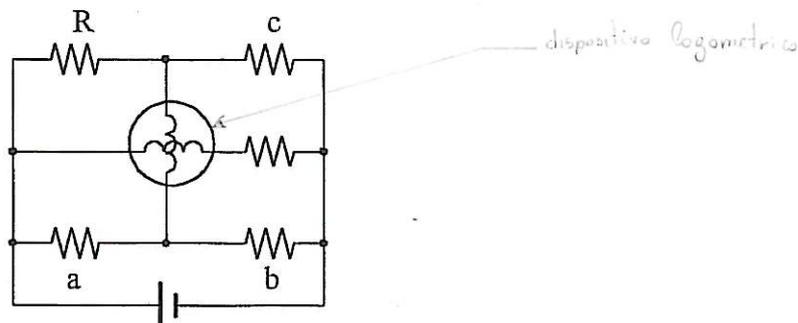


fig. 3.243

I sistemi automatici di acquisizione impiegano talvolta direttamente un multimetro per la lettura della tensione ed una disposizione a quattro fili per evitare completamente il problema della resistenza dei collegamenti: in questo caso non è tuttavia possibile utilizzare uno strumento a basso costo perché per arrivare a risoluzione (e non necessariamente un'incertezza) di 1/10 di grado è necessario avere risoluzioni di 400 ppm.

### 3.25 Termistori

I materiali semiconduttori possono avere una resistenza che diminuisce al crescere della temperatura assoluta T, con una legge del tipo:

$$R_t = R_0 e^{b \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)}$$

per questi materiali si definisce un "coefficiente di temperatura" alla temperatura T (usualmente  $298^\circ\text{K} = 25^\circ\text{C}$ ):

$$\alpha_T = \frac{1}{R} \frac{dR}{dT} = -\frac{b}{T^2}$$

che è dell'ordine da 1 a  $2 \cdot 10^{-2}/^\circ\text{C}$ . Questi materiali (termistori) posseggono dunque una maggiore sensibilità, in particolare alle basse temperature. I termistori possono avere una deriva nel tempo, soprattutto se non sufficientemente protetti dagli agenti atmosferici o da temperature troppo elevate; essi hanno anche l'inconveniente di non essere facilmente riproducibili e perciò intercambiabili anche se per i tipi più recenti e di un certo pregio questo aspetto ha subito notevoli miglioramenti. Tuttavia i loro pregi di sensibilità, di piccolo ingombro, di rapida risposta, (costante di tempo fino all'ordine di secondi) li rendono molto pratici per misure industriali. La deriva viene limitata da un opportuno invecchiamento artificiale.

## PROVE TERMICHE

Per l'impiego di sistemi di linearizzazione automatica ad opera dei sistemi di calcolo, si può utilizzare l'equazione di Steinhart-Hart:

$$1/T = A + B(\ln R) + C(\ln R)^3$$

con

- T in Kelvin,
- R = resistenza del termistore
- A, B, C costanti ottenute selezionando tre dati sulla curva del termistore e risolvendo il sistema delle tre equazioni risultanti.

Se i tre punti coprono almeno 100 °C lo scarto è tipicamente minore di 0,2 °C.

Un esempio di applicazione è riportato di seguito.

SERIE N.	44004 - 44033	44007 - 44034	44006 - 44031
Res (Ω) @ 25 °C	2252	5000	10000
Temperatura (°C)	Resistenza (Ω)		
-80	1660k	3685k	3558k
-70	702,3k	1560k	1694k
-60	316,5k	702,9k	845,9k
-50	151,0k	335,3k	441,3k
-40	75,79k	168,3k	239,8k
-30	39,86k	88,53k	135,2k
-20	21,87k	48,56k	78,91k
-10	12,46k	27,67k	47,54k
0	7355	16,33k	29,49k
10	4482	9951	18,79k
20	2814	6247	12,26k
30	1815	4029	8194
40	1200	2663	5592
50	811,3	1801	3893
60	560,3	1244	2760
70	394,5	875,7	1990
80	282,7	628,1	1458
90	206,1	458,2	1084
100	152,8	339,6	816,8
110	115,0	255,4	623,5
120	87,7	194,7	481,8
130	67,8	150,3	376,4
140	53,0	117,4	297,2
150	41,9	92,70	237,0

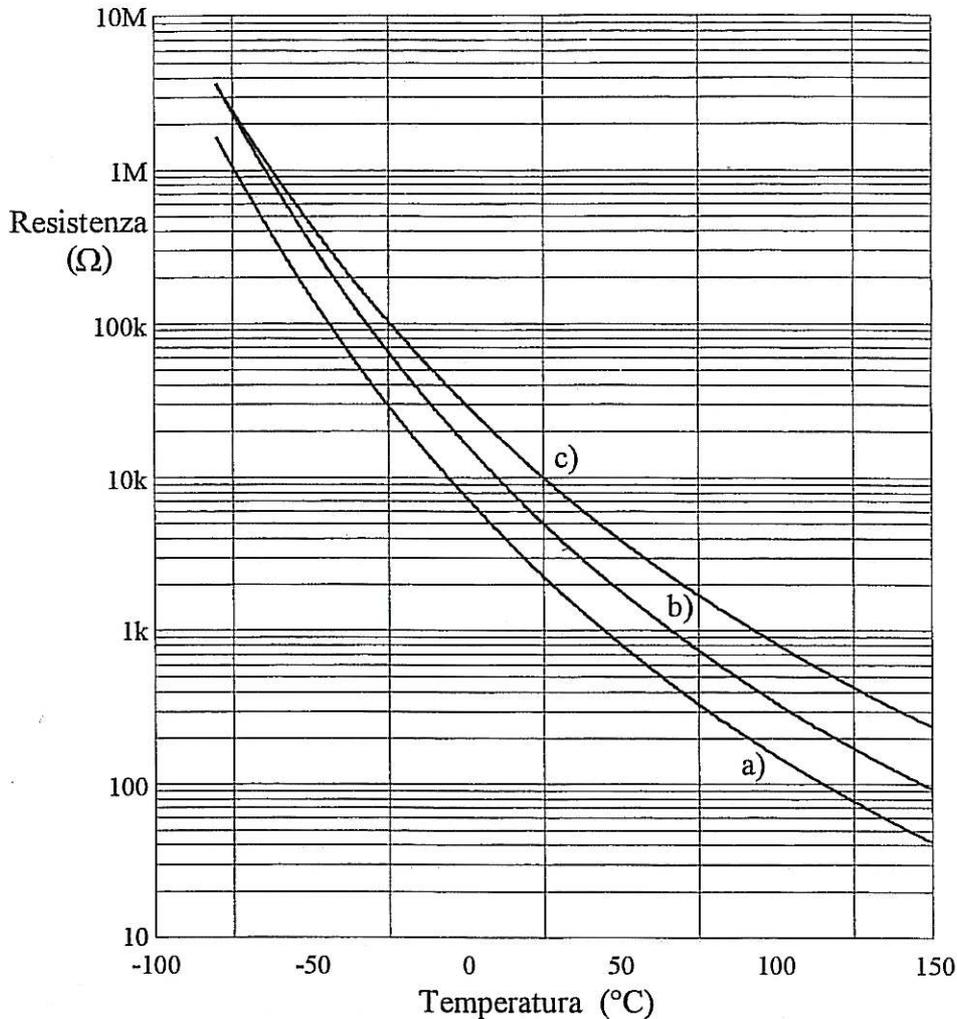
### TABELLA DEI COEFFICIENTI DELL'EQUAZIONE DI STEINHART-HART

(ottenuti utilizzando i valori di resistenze alle temperature di  $T_1 = -25$  °C,  $T_2 = 25$  °C,  $T_3 = 75$  °C)

Serie n.	44004 - 44033	44007 - 44034	44006 - 44031
Res (Ω) @ 25 °C	2252	5000	10000
A	$1,47126 \cdot 10^{-3}$	$1,28620 \cdot 10^{-3}$	$1,02833 \cdot 10^{-3}$

## PROVE TERMICHE

B	$2,37711 \cdot 10^{-4}$	$2,35999 \cdot 10^{-4}$	$2,39265 \cdot 10^{-4}$
C	$1,03740 \cdot 10^{-7}$	$0,93493 \cdot 10^{-7}$	$1,56114 \cdot 10^{-7}$

**Resistenza dei termistori al variare della temperatura**

- a) serie 44004 - 44033, 2252 Ω @ 25 °C  
 b) serie 44007 - 44034, 5 kΩ @ 25 °C  
 c) serie 44006 - 44031, 10 kΩ @ 25 °C

I problemi più gravi con i termistori sono associati alla deriva che può verificarsi per permanenze prolungate alle massime temperature, in qualche caso addirittura al di sotto dei massimi consentiti. I valori elevati delle resistenze rendono trascurabili gli effetti dei collegamenti; possono essere molto piccoli e quindi consentire misure su oggetti di dimensioni modeste ed avere al tempo stesso una costante di tempo molto piccola. Sono mediamente molto fragili e quindi devono essere montati con cura per evitarne il danneggiamento; sono disponibili spesso in esecuzioni personalizzate, associati ad attacchi con rondelle o con predisposizione per collegamenti stabili a parti di macchina.

3.26 Coppie termoelettriche

## PROVE TERMICHE

**COPPIE TERMOELETTICHE**

Come è noto, se in un circuito elettrico, formato da materiali diversi; le giunzioni non si trovano alla stessa temperatura, nasce una f.e.m. il cui valore dipende dalla differenza di temperatura esistente fra le giunzioni e dalla natura dei materiali che le costituiscono. Le "coppie termoelettriche" più usate sono costituite da giunzioni di ferro (o rame) e costantana o di leghe speciali (Chromel-Alumel) ad alta stabilità e riproducibilità; esse hanno f.e.m. dell'ordine di 40-60  $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$  e campo d'impiego da -250 a circa 1000 $^\circ\text{C}$ . In ambito commerciale sono denominate da una lettera e spesso esiste anche una codifica dei colori degli accessori e degli isolamenti dei singoli fili. Per questi valgono specifiche rigide per quanto riguarda la purezza della composizione.

**SENSIBILITÀ A 25 °C DEI DIVERSI TIPI DI TERMOCOPPIA**

Termocoppia Tipo	Coeff. di Seebeck $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$	Sens. per 0,1 °C $\mu\text{V}$
<b>E</b> <i>Chromel-Costantana</i>	61	6,1
<b>J</b> <i>Ferro - Costantana</i>	52	5,2
<b>K</b> <i>Chromel - Alumel</i>	40	4,0
<b>R</b> <i>Pt - Pt con 13% Rodio</i>	6	0,6
<b>S</b> <i>Pt - Pt con 10% Rodio</i>	6	0,6
<b>T</b> <i>Rame - Costantana</i>	41	4,1

Alcune termocoppie speciali (a semiconduttore, p. es. al carburo di silicio) hanno f.e.m. più elevate, dell'ordine di 250  $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ . In pratica, lo stesso apparecchio di misura viene utilizzato come giunzione fredda di riferimento. Infatti, la f.e.m. non è influenzata dalla presenza di altri metalli nel circuito, purché le loro giunzioni siano a temperatura costante, com'è schematizzato nella fig. 3.261 per l'insieme del circuito a valle dei morsetti 1.1'.

Se le connessioni sono lunghe, è necessario curare che i punti 1.1' siano alla stessa temperatura (fig. 3.262); poiché questa non può coincidere con quella del misuratore, si scelgono i fili di materiale opportuno (p. es. rame al positivo, costantana al negativo per la coppia Chromel-Alumel) in modo da compensare le relative f.e.m. e poter considerare la temperatura  $t'$  come riferimento. Questa compensazione può avvenire nell'ordine di qualche grado; qualora manchino i cavi di compensazione è sempre importante curare di riconoscere quale sia il punto al quale va attribuito il ruolo di "giunzione fredda".

La f.e.m. prodotta da una termocoppia può essere misurata sia con metodo di zero sia con uno strumento indicatore, a lettura diretta.

## PROVE TERMICHE

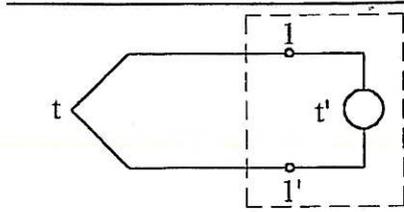


fig. 3.261

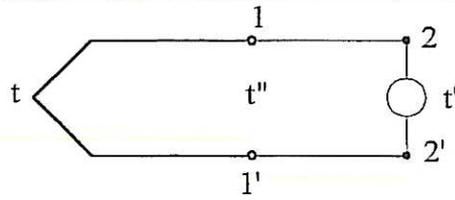


fig. 3.262

## 3.27 Termometri a termocoppia

Per le misure di precisione si impiega il metodo potenziometrico, che ~~è~~ ha il vantaggio di misurare la f.e.m. a vuoto della termocoppia, indipendentemente dalla sua resistenza interna e da quella dei collegamenti; la precisione è assicurata dal riferimento a pile campioni od altre sorgenti di riferimento.

I potenziometri utilizzati sono in genere quelli specialmente costruiti per piccole f.e.m. ; essi possono essere provvisti di circuiti di compensazione per la temperatura della giunzione fredda, che è la temperatura interna dell'apparecchio.

Il metodo potenziometrico viene utilizzato non solo per misure di laboratorio, ma anche in molti dispositivi indicatori o registratori, a servomotore o interamente elettronici; questi provvedono, in genere, anche alla linearizzazione delle uscite, per la lettura diretta su strumenti numerici. Se la coppia termoelettrica viene chiusa su un milliamperometro, questo è attraversato dalla corrente:

$$i = \frac{E(t - t')}{R_{AB} + R_c + R_g}$$

in cui:

- $R_{AB}$  è la resistenza interna della termocoppia, che è generalmente dell'ordine di qualche ohm;
- $R_c$  è la resistenza dei fili di giunzione e delle loro connessioni: essa è generalmente dell'ordine di alcuni decimi di ohm per metro;
- $R_g$  è la resistenza interna dello strumento; essa deve essere dello stesso ordine di grandezza delle precedenti per la massima utilizzazione della potenza fornita dalla termocoppia.

Per evitare gli errori dovuti alle variazioni delle diverse resistenze con la temperatura, spesso si fa la  $R_g$  predominante rispetto alle altre resistenze e costante (lo strumento è perciò anche un millivoltmetro); si possono adottare inoltre dispositivi di compensazione più complessi, che comprendono la compensazione anche delle variazioni di temperatura dello strumento.

Ogni termocoppia deve, in conseguenza, essere tarata con il suo strumento e con i suoi cavi di collegamento.

## 3.28 Termocolori (MOLTO IMPORTANTE)

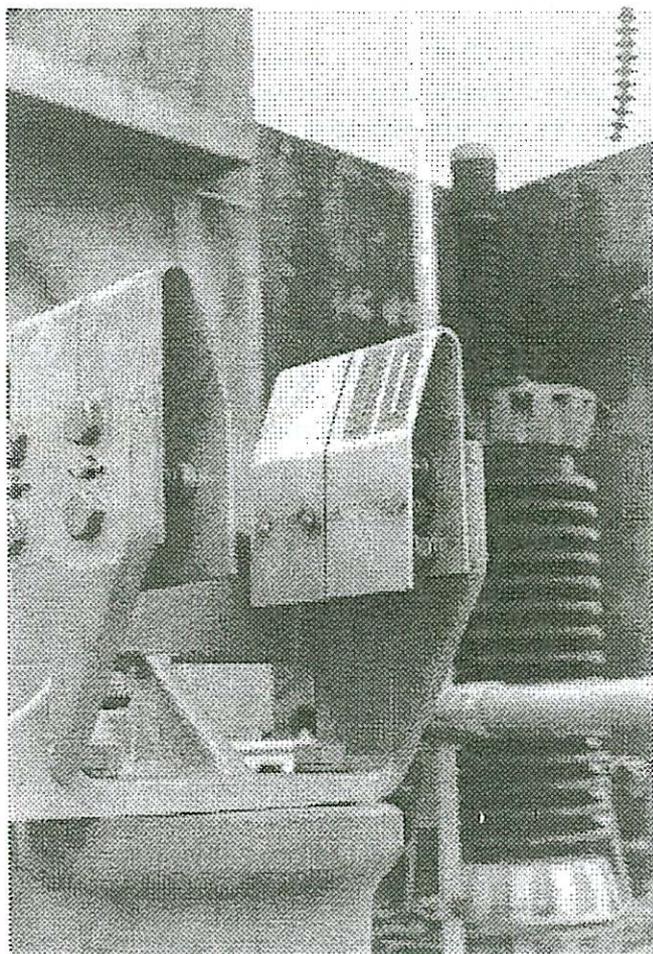
## PROVE TERMICHE

## I TERMOCOLORI

I termocolori sono sostanze che hanno la proprietà di cambiare colore quando sono riscaldati al di sopra di una determinata temperatura; il cambiamento è molto marcato (p. es. rosa-blu, bianco-bruno, verde bianco) ed è irreversibile. Essi vengono usati pertanto per osservare, in qualsiasi momento, se la temperatura, durante un certo periodo di funzionamento, ha superato un limite prefissato.

Esistono termocolori diversi, nel campo da 40 a 1500°C intervallati di 20 gradi per i livelli inferiori, di 100 per quelli superiori; alcuni hanno più punti di passaggio a differenti colori. Il valore di taratura è valido per riscaldamento prolungato (p. es. 30 minuti); per riscaldamenti istantanei (1÷2 s) si hanno tabelle di taratura a valori più elevati. La precisione è dell'ordine di qualche grado - ed è influenzata da un'eccessiva presenza di umidità.

I termocolori sono molto utili per rilevare la temperatura massima raggiunta in una prova termica in punti altrimenti inaccessibili; si



deve tuttavia far attenzione, nell'interpretare i risultati, per oggetti che abbiano durante la prova forti gradienti termici, agli effetti di equalizzazione che si verificano dopo cessato il carico termico.

Nella foto riportata si notano due strisce di termocolori utilizzati per la valutazione della temperatura massima raggiunta dai contatti di un sezionatore durante una prova di tenuta alla corrente di cortocircuito della rete. Si noti come la striscia abbia cambiato colore e l'altra no, ad indicazione del fatto che i due campi di temperatura erano complementari.

### 3.29 Alcune osservazioni sulle misure di temperatura

La condizione ideale per una misura di temperatura sarebbe di poter introdurre la sonda termometrica in un mezzo omogeneo a regime termico; poiché così non è, si ha in generale che la temperatura della sonda è la risultante degli scambi termici (per convezione, conduzione e irraggiamento) con le varie parti

dell'ambiente che la circonda.

Per misurare la temperatura di un determinato oggetto è quindi necessario aumentare il coefficiente di trasmissione termica fra l'oggetto e la sonda; se l'oggetto è un mezzo liquido o aeriforme, ciò si ottiene semplicemente con un'agitazione di esso, che aumenta la convezione. Se è un solido (p. es. una parete) la sonda deve essere ben aderente ad essa, legata eventualmente con stagnola o altro mezzo che assicuri una più ampia e sicura superficie di contatto.

Negli oggetti di dimensioni ridotte, occorre inoltre curare che la sonda termometrica non influenzi lo smaltimento di calore; ciò è tanto più facilmente realizzabile quanto più la sonda è piccola e minore è lo spessore di isolante interposto fra essa e il punto di misura. In

## PROVE TERMICHE

alcuni casi la stagnola che si dispone attorno alla sonda ha anche lo scopo di ricostituire una superficie disperdente.

Una sonda termometrica (termocoppia, resistenza termometrica ecc.) costituisce un esempio di trasduttore che converte la grandezza da misurare - temperatura - in una grandezza elettrica di uscita. Come già si è osservato in 1.22, per ogni trasduttore si può in generale definire una costante di tempo (eventualmente in forma generalizzata) che costituisce un indice del ritardo con cui la grandezza di uscita segue le variazioni della grandezza d'entrata. Come nei circuiti elettrici la costante di tempo è direttamente proporzionale alla capacità del sistema di immagazzinare energia e inversamente proporzionale alla possibilità di dissipazione, così nei fenomeni termici, come meglio si vedrà in 3.41, essa è direttamente proporzionale alla capacità termica e inversamente alla potenza dissipata a regime per un salto di temperatura unitario.

La sonda termometrica viene spesso immersa in un apposito pozzetto, adatto ad isolarla dalla pressione e dal contatto del fluido di cui si misura la temperatura.

La costruzione di questo pozzetto deve essere accurata sia dal punto di vista meccanico, sia da quello termico (specie per misure in caldaia o condotte ad alta temperatura) assicurando buona trasmissione fra fluido e sonda e piccola dispersione all'esterno.

Il dimensionamento del pozzetto influisce notevolmente sulla costante di tempo del sistema di misura, che può andare da pochi secondi fino a qualche decimi di secondi. In alcuni casi è desiderabile una costante di tempo molto piccola (dell'ordine della frazione di secondo), il che si ottiene riducendo le dimensioni della sonda e curandone la trasmissione col mezzo circostante (agitazione del liquido o del gas).

In altri casi, come per esempio nella misura della temperatura ambiente durante la prova di una grossa macchina elettrica, è conveniente una costante di tempo termica dell'ordine di quella della macchina stessa (alcune ore), in modo da non registrare le fluttuazioni di temperatura che non sono risentite dalla macchina in prova. Per ottenere ciò si immerge la sonda in un recipiente, di volume  $v$  e superficie esterna  $S$  pieno di un liquido con calore specifico  $c$  (per unità di volume) si ha:

$$T = \frac{cv}{kS}$$

dove  $k$  è il coefficiente di trasmissione globale del calore della superficie  $S$ .

Se si ha un cilindro di diametro  $d$  e altezza  $h$ , non tenendo conto delle superfici di base, fissando  $k = 8 \text{ W/m}^2\text{°C}$ , e scegliendo olio minerale ( $c = 1,4106 \text{ J/m}^3\text{°C}$ ) si ha:

$$d = 23 \cdot 10^{-6} T \left[ \begin{array}{l} \text{se } T \text{ è in secondi} \\ \text{d in m} \end{array} \right] \quad \text{ovvero} \quad d = 8,2 T \left[ \begin{array}{l} \text{d in cm} \\ \text{T in ore} \end{array} \right];$$

per ottenere le condizioni di smaltimento termico che si sono fissate, la superficie esterna del recipiente deve preferibilmente essere scura e non levigata.

Per l'acqua il diametro risulta circa un terzo del valore dato per l'olio si deve però evitare l'evaporazione, con un leggero strato di olio sulla sua superficie libera.

### 3.29 Termometri particolari

La maggior parte dei sensori illustrati non consentono l'impiego su parti portate a tensioni elevate (avvolgimenti di trasformatori). Esistono soluzioni sviluppate recentemente che prevedono l'impiego di fibre ottiche alla cui estremità viene collegato un sensore ricoperto da

## PROVE TERMICHE

un fosforo. Un impulso laser viene inviato lungo la fibra ad eccitare il fosforo che emette poi per fotoluminescenza in una gamma di frequenze leggermente più bassa. Il tempo impiegato dall'impulso per decadere è strettamente collegato alla temperatura cui si trova il sensore e può essere misurato agevolmente. La non linearità del sistema è normalmente corretta impiegando una tabella immagazzinata nel microprocessore che gestisce la misura. La fibra può essere cordata insieme all'avvolgimento ed il sensore può essere posizionato nei punti più significativi. L'incertezza è dell'ordine di 2°C senza accorgimenti particolari.

### 3.3 Metodi per la realizzazione del carico

#### 3.3.1 Metodi con carico reale

La prova termica di una macchina (o di un apparecchio) comporterebbe il suo funzionamento con il carico nominale continuativo, fino a che le varie parti non abbiano assunto le loro temperature di regime. Ciò è possibile, quando la macchina in prova si trova installata in una rete in grado sia di fornire le necessarie alimentazione (elettriche o meccaniche) sia di assorbire le potenze prodotte (meccaniche per i motori, elettriche per i generatori e i trasformatori).

Il problema è tanto più complesso quanto maggiore è la potenza della macchina ed è perciò particolarmente notevole per le grosse macchine sincrone e per i grossi trasformatori. In generale poi una rete elettrica non assorbe potenza costante e le condizioni di prova non risultano perciò sempre governabili. Ovviamente il problema non è di facile soluzione neanche nel caso in cui i motori in prova non siano elettrici ma a scoppio. In questo caso non sussiste il problema delle alimentazioni perché la macchina utilizza l'energia fornita dal carburante; non è però agevole la frenatura perché non è proponibile l'immissione in rete, in modo del tutto saltuario, di potenze anche rilevanti. In questo campo di applicazioni sono perciò in uso i freni con caratteristiche più spinte, sia dal punto di vista delle potenze che delle velocità.

Per piccoli generatori (fino a qualche kW) è possibile realizzare un carico provvisorio su resistori metallici di valore opportuno; lo schema (fig. 3.3 11) può servire per la prova sia di un motore M che di un generatore G. Quando le potenze siano più rilevanti (fino a diverse migliaia di kW) il carico può essere costituito da resistori ad acqua: in una vasca o in un cilindro pieni d'acqua (fig. 3.312) sono immersi degli elettrodi metallici, regolabili in posizione; la potenza viene dissipata in riscaldamento dell'acqua (fino a temperature inferiori a 60-70° per evitare ebollizioni localizzate e conseguente instabilità della resistenza); l'acqua è continuamente rinnovata da una attiva circolazione ( $\approx 0,3$  l/minuto per kW).

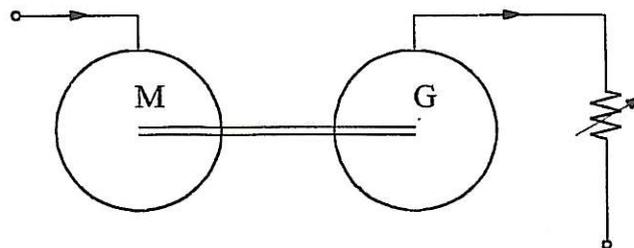


fig. 3.3 11

## PROVE TERMICHE

Una certa regolazione del carico può avvenire attraverso una regolazione di portata: quanto questa è maggiore, tanto minore è il riscaldamento e di conseguenza tanto più elevata è la resistività dell'acqua.

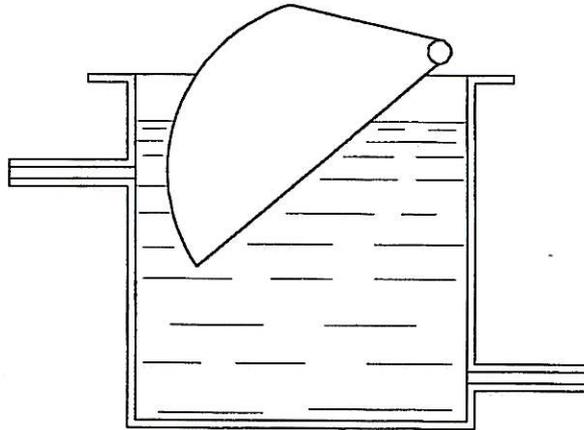


fig. 3.312

Nel caso di tensioni elevate, i resistori possono essere tubolari, disposti con due elementi fra loro in parallelo elettricamente e in serie idraulicamente (fig. 3.313).

Minori difficoltà sussistono per i carichi in c.a., in quanto può sempre adattarsi la tensione richiesta dal carico a quella fornita dalla macchina, mediante trasformatori; abbastanza semplice è anche la realizzazione del fattore di potenza voluto, mediante l'inserzione di un carico reattivo (vedi 3.32).

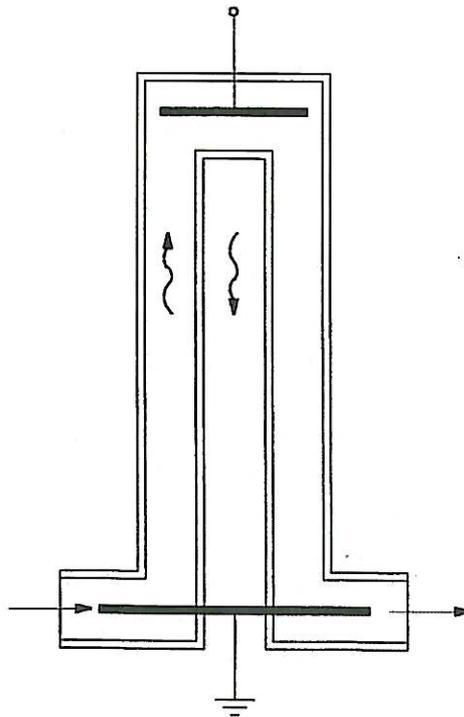


fig. 3.313

### 3.32 Metodi con carico reattivo

## PROVE TERMICHE

Per le macchine in corrente alternata, è possibile effettuare una prova con carico puramente reattivo, in modo da non richiedere alla sorgente di alimentazione che la potenza attiva dovuta alle perdite (fig. 3.321).

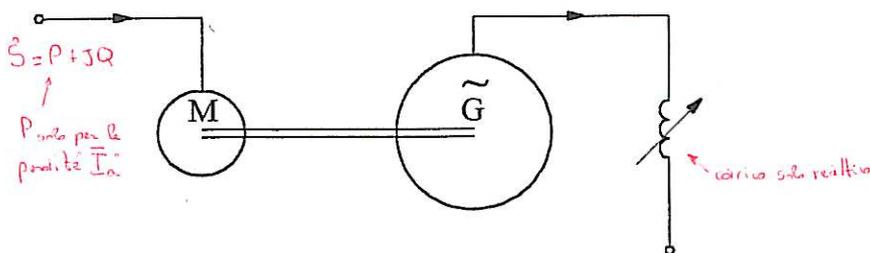


fig. 3.321

In particolare, per una macchina sincrona, la potenza reattiva può essere scambiata con la rete di distribuzione, senza la necessità di avere un motore primo (a parte quello di lancio necessario per fare il parallelo); la macchina funziona in questo modo da condensatore (o induttore) rotante (figura 3.322).

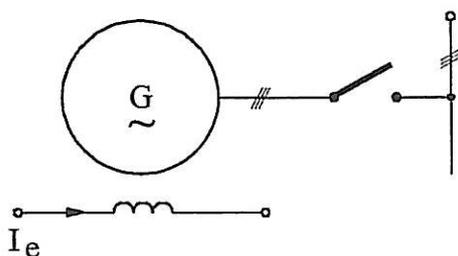


fig. 3.322

In questi casi, se si fa funzionare la macchina alla tensione e corrente nominali, non si riproducono le condizioni esistenti in una prova a carico nominale; infatti le cadute di tensione sono assai diverse, a carico puramente reattivo in anticipo o in ritardo, rispetto alla condizione nominale ( $\cos\varphi = 0,8$  in ritardo). Le correnti di eccitazione di un generatore, in corrispondenza della corrente nominale, risultano perciò diverse; anche per un trasformatore, a tensione primaria costante, si possono avere differenze sulle perdite nel ferro nelle varie condizioni.

Per le macchine sincrone queste difficoltà possono essere superate eseguendo due serie di misure, l'una a eccitazione nominale, per riscontrare il sovrariscaldamento dei circuiti induttori, l'altra a tensione e corrente nominali predeterminare la sovratemperatura del ferro e degli avvolgimenti di indotto. Si ha in questo modo un errore, dovuto alla non contemporaneità delle varie perdite, che risulta però generalmente accettabile.

Relativamente più semplice è la prova di elementi sostanzialmente reattivi (reattori, condensatori, compensatori sincroni); in questi casi si compensa l'assorbimento di potenza reattiva mediante una potenza di segno contrario, disponendo in parallelo (o in serie) all'elemento in prova una reattanza di opposto segno.

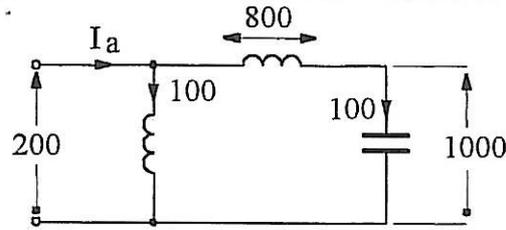


fig. 3.323

La fig. 3.323 mostra, per esempio, il circuito di prova di un condensatore di media tensione 1000V-100 kVA, partendo da una sorgente a bassa tensione (200 V). La sorgente deve erogare solo la corrente attiva assorbita al complesso.

### 3.33 Metodi a recupero e circolazione di energia

Si può osservare che, dovendo far assorbire alla macchina in prova una certa potenza per poi restituirla sotto altra forma, il bilancio energetico può essere pareggiato, a parte le perdite, restituendo alla rete di alimentazione la potenza prodotta. Con ciò si viene ad assorbire dalla rete la sola potenza perduta nelle varie trasformazioni, pur facendo funzionare la macchina in prova alla potenza nominale.

La forma più elastica di recupero di energia è quella attraverso l'interposizione di un intero gruppo generatore-motore (fig. 3.331); esso può servire per le prove, indifferentemente, di una delle quattro macchine dell'insieme (motore sincrono o asincrono, dinamo, motore c.c., generatore in c.a.) che però devono essere tutte previste per la piena potenza. La regolazione dei carichi avviene per mezzo dei circuiti di eccitazione. In impianti moderni la conversione continua alternata e viceversa può essere affidata a gruppi statici di raddrizzamento o ad inverter rispettivamente (fig. 3.332).

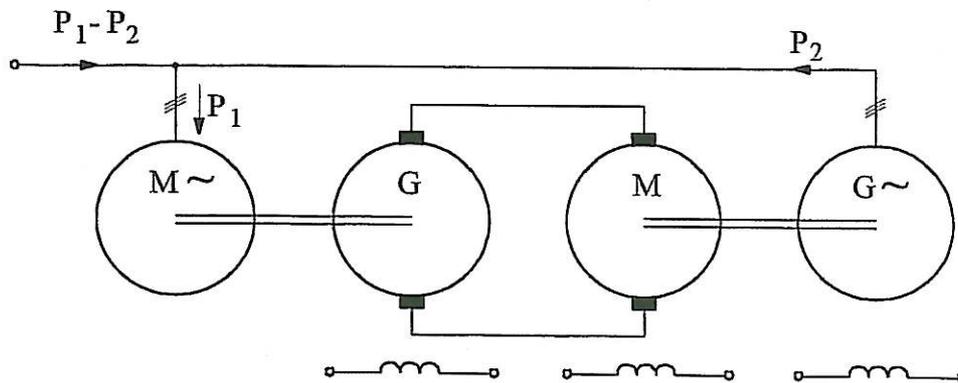


fig. 3.33 1

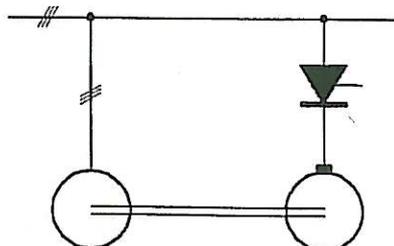


fig.3.332

Schemi più semplici, ma meno flessibili, si hanno con due sole macchine, che sono spesso due macchine eguali, una delle quali funziona da generatore e una da motore (metodo di circolazione); la potenza perduta dalle due macchine può essere fornita per via elettrica (fig. 3.333) o per via meccanica (fig. 3.334). Possiamo distinguere casi differenti per i diversi tipi di macchine:

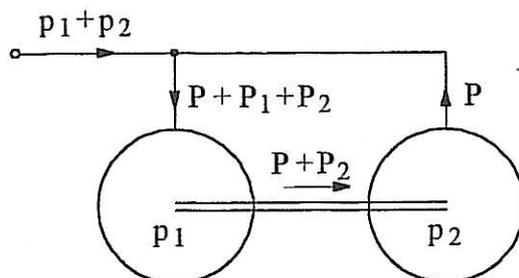


fig. 3.333

- nelle macchine sincrone, regolando l'eccitazione, si possono avere solo scambi di potenza reattiva; per avere scambi di potenza attiva sarebbe necessario calettare gli alberi con uno spostamento angolare; spesso perciò le due macchine non sono nemmeno accoppiate meccanicamente, e ci si accontenta dell'assorbimento di potenza reattiva.
- per le macchine asincrone, la seconda macchina deve funzionare da generatore asincrono; ciò può ottenersi, per un dato scorrimento  $s$ , adattando fra le macchine una trasmissione (a cinghia) con rapporto  $(1 + 2s)$  tra le velocità. E' perciò preferibile ricorrere a macchine asincrone a velocità variabile (tipo Schrage) che però sono ormai molto rare.

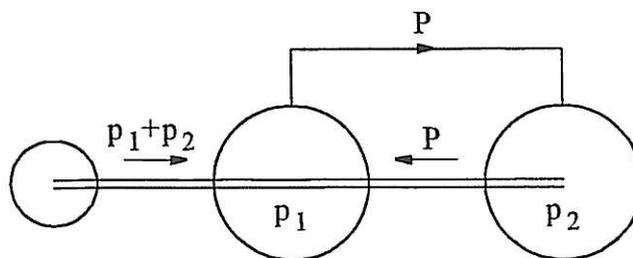
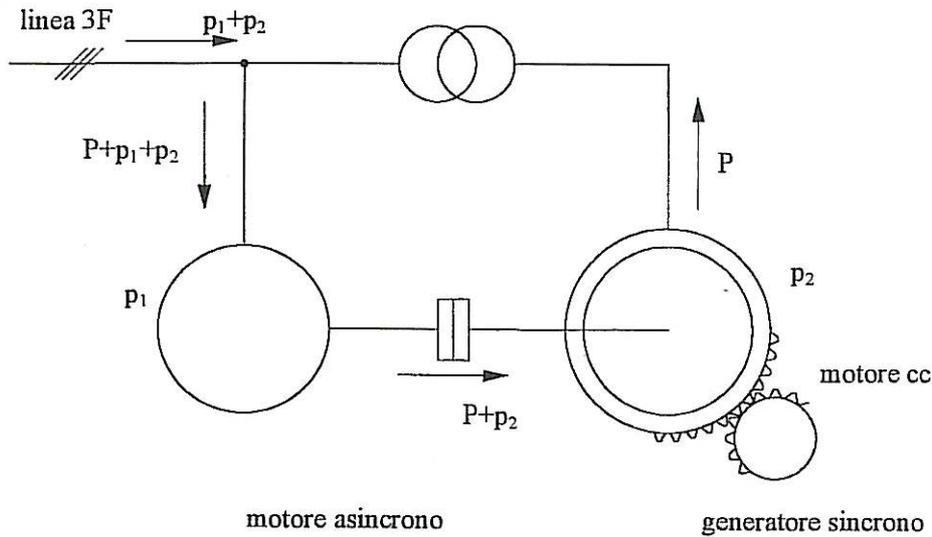


fig. 3.334

Esistono anche soluzioni che utilizzano macchine particolari come macchine sincrone il cui statore è costruito in modo tale da poter ruotare su se stesso. Quando viene collegato ad un asincrono viene fatto ruotare in senso contrario al moto del rotore ad una velocità tale da consentire il recupero in frequenza dovuto alla velocità di rotazione più bassa di quella di sincronismo. Poiché gli scorrimenti dei grossi motori sono tipicamente inferiori all'1% a pieno carico, il numero di giri da recuperare è molto modesto e quindi la velocità di rotazione è del

PROVE TERMICHE

tutto accettabile (frazioni di giro al secondo). L'alimentazione allo statore deve essere portata attraverso contatti striscianti su anelli.



➤ per i trasformatori, la potenza di alimentazione non può che essere elettrica (fig. 3.335); per avere circolazione di corrente fra i due secondari occorre che il rapporto di trasformazione sia diverso (inserendo prese diverse se i trasformatori hanno il commutatore), o inserendo un trasformatore ausiliario  $T_A$ ; in questo caso, la sorgente che alimenta i primari fornisce solo le perdite nel ferro, mentre la sorgente  $T_A$  fornisce le perdite nel rame. Per rappresentare correttamente il carico, la sorgente  $T_A$  dovrebbe essere variabile in ampiezza e fase anche se questo aspetto viene di solito ignorato.

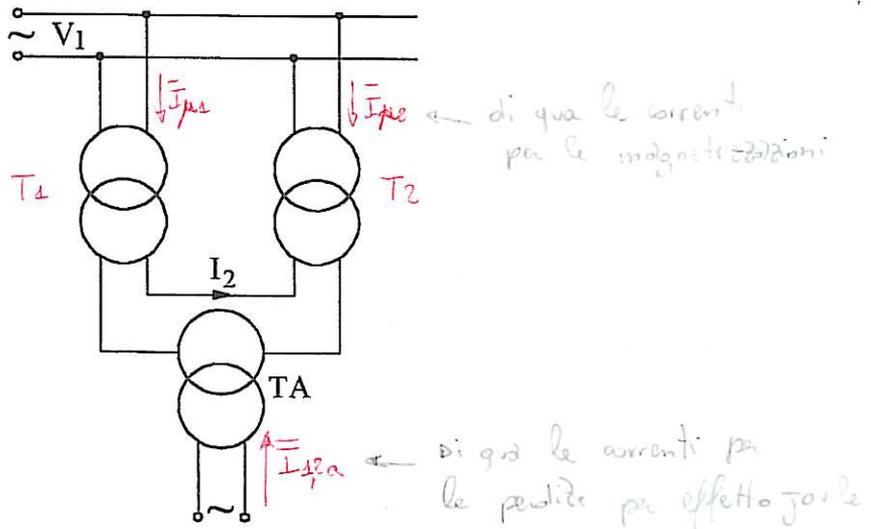


fig. 3.335

La tensione da iniettare (espressa in valore relativo) è pari a  $\Delta v = 2 z_{cc} i = 2 v_{cc}$  se si vuol fare circolare la corrente nominale. Nel caso di macchine MT con  $v_{cc} = 6\%$  si otterrebbe  $\Delta v = 12\%$  (ossia 48 V per una tensione secondaria di 400 V). Ovviamente il secondario dei trasformatori booster deve essere previsto per la corrente nominale della macchina in prova.

## PROVE TERMICHE

- d) la maggior applicabilità del metodo di circolazione si ha nel caso delle macchine a corrente continua, per le quali, regolando le eccitazioni, si possono comandare separatamente la velocità di rotazione e la potenza in gioco; la potenza totale necessaria, pari alla somma delle perdite nelle due macchine; può essere fornita per via elettrica o per via meccanica.

Nei metodi di circolazione occorre tenere presente che le due macchine lavorano in condizioni leggermente diverse per effetto delle rispettive cadute di tensione, poiché una fornisce potenza all'altra assorbendola dalla rete e viceversa. I dati dalla prova termica debbono essere riferiti alla macchina per cui sono rispettate le prestazioni nominali.

### 3.31 Metodi a carico ridotto

In generale, si cerca di evitare l'esecuzione di prove a carico notevolmente ridotto, sia perché i piccoli salti di temperatura che ne risultano sono più difficili da misurare correttamente, sia perché, essendo i coefficienti di trasmissione del calore in parte dipendenti dalla temperatura, il riporto dei valori di sovratemperatura alle condizioni di pieno carico può risultare errato.

Per esempio, nel caso dei trasformatori a circolazione naturale d'olio si è trovato che il salto di temperatura è dipendente dalla potenza dissipata  $P_d$  secondo un esponente che è tra 0,8 e 0,9, ma che può, in alcuni casi, scostarsi anche notevolmente da tale valore.

È talvolta possibile, per grandi macchine dotate di più circuiti refrigeranti esterni, effettuare la prova termica con una quota ridotta delle perdite, riducendo nella stessa proporzione anche il raffreddamento; anche in questo caso il riporto dalle temperature alla piena potenza non è però sempre effettuabile con semplici rapporti di proporzionalità.

### 3.35 Metodi a carico equivalente

In generale, la sovratemperatura assunta da una macchina, per effetto delle diverse sorgenti di calore, dipende sia dalla loro diversa intensità che dalla loro distribuzione. In un sistema lineare, in cui valga cioè la sovrapposizione degli effetti, la sovratemperatura totale di una parte potrebbe considerarsi come la somma delle sovrature parziali dovute alle differenti sorgenti; tuttavia, per una macchina elettrica, tale ipotesi è verificata solo in prima approssimazione, in quanto i coefficienti di trasmissione del calore sono funzioni della temperatura stessa.

Quando però risulta impossibile una prova termica nelle reali condizioni di esercizio, si può eseguire una prova equivalente in cui viene dissipata, in una singola parte della macchina, tutta la potenza dovuta alle perdite.

E' questo, ad esempio, il caso dei trasformatori in olio che vengono provati in cortocircuito, inviando negli avvolgimenti una corrente tale da dar luogo alle perdite totali (rame e ferro) stabilite nelle condizioni di riferimento; ciò porta ovviamente ad inviare una corrente di valore superiore alla nominale, e a regolarla man mano che l'avvolgimento si scalda e quindi aumenta la sua resistenza. E' ovvio che, a regime termico raggiunto, tale prova darà un valore corretto solo per la sovratemperatura massima dell'olio  $\vartheta_{M0}$ , mentre non saranno attendibili le sovrature assunte dagli avvolgimenti e dal nucleo.

La determinazione della temperatura degli avvolgimenti richiederebbe di portare la corrente al valore nominale per il tempo necessario a stabilizzare la loro temperatura ma è ovvio che questo comporta un abbassamento della temperatura dell'olio e quindi un errore sulla stessa temperatura dell'avvolgimento che si trova in contatto con un ambiente la cui temperatura è più bassa di quella corrispondente alle perdite complessive.

PROVE TERMICHE

Per compensare quanto detto, le norme prevedono che venga misurata, oltre alla temperatura massima dell'olio, anche quella media, corrispondente alla situazione della parte centrale dell'avvolgimento.

Questo richiede l'installazione di almeno altri quattro sensori di temperatura (due sul lato corto e due sul lato lungo della cassa) in corrispondenza dei collegamenti ai radiatori e la determinazione della temperatura media ottenuta come differenza tra quella massima e metà del salto così ottenuto.

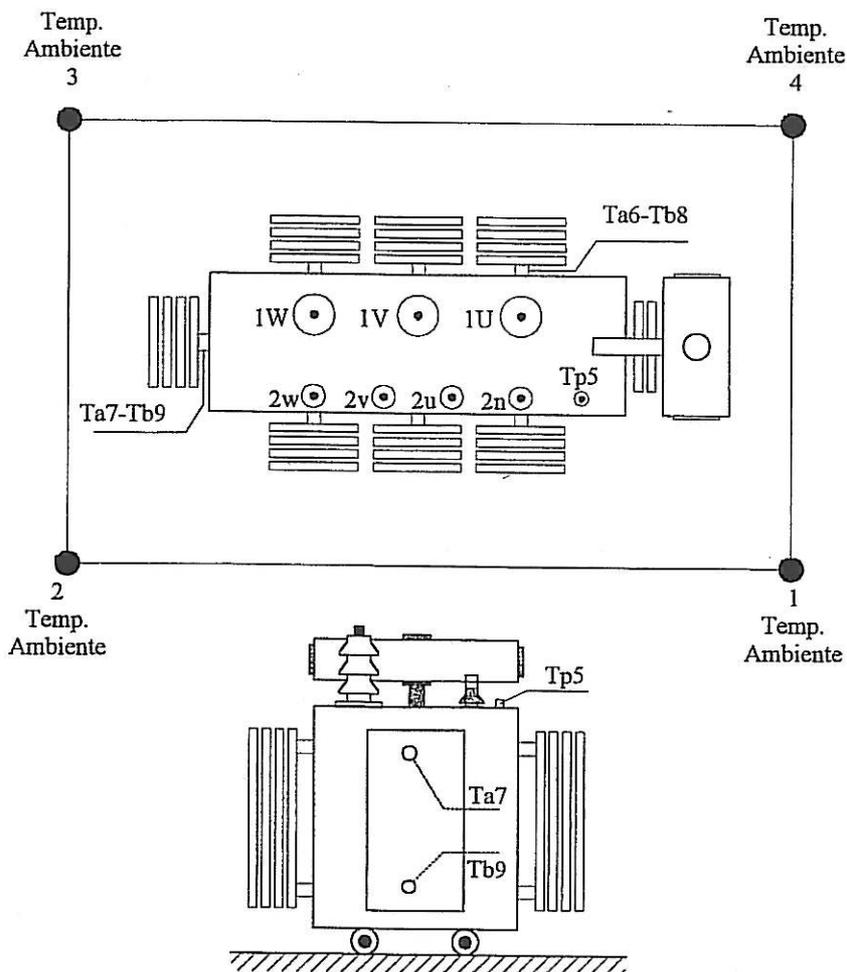


Fig. 3.351 Disposizione sonda per prova termica con carico equivalente

La sovratemperatura degli avvolgimenti in condizioni di funzionamento va corretta secondo la relazione:

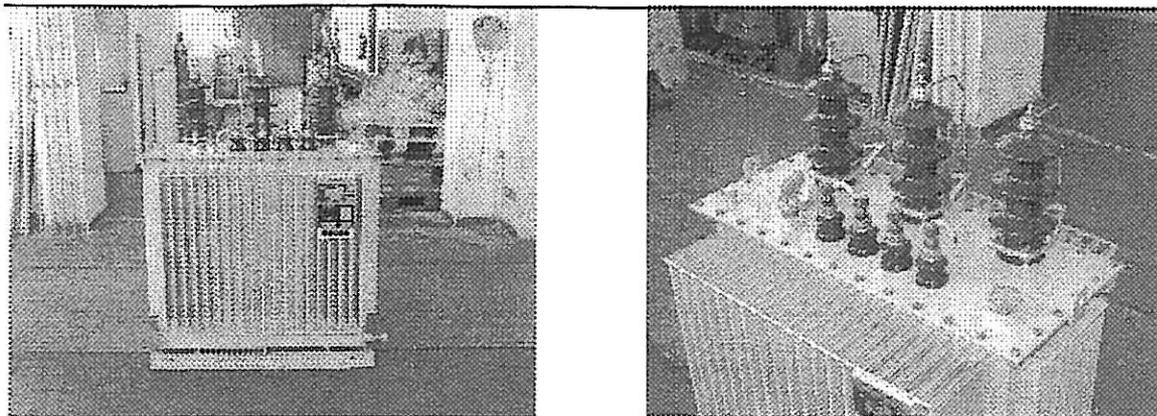
$$(3.351) \quad \vartheta_a = \vartheta_a' - \vartheta_{0m}' + \vartheta_{0m}$$

che ammette in sostanza che rimanga inalterato, nelle due condizioni, il salto termico fra avvolgimenti e olio

La disposizione tipica dei sensori è quella indicata in figura 3.531. Si notano i quattro sensori per la misura della temperatura ambiente, il quinto nel pozzetto e quattro in corrispondenza del collegamento ai radiatori (due sul lato lungo e due su quello corto della cassa).

Per casse ad onda i sensori sono applicati sul bordo superiore ed inferiore delle piegature.

## PROVE TERMICHE



Trasformatore in olio con cassa a onde

Coperchio trasformatore con pozzetto, commutatore e valvola di scoppio

Fig. 3.35.2

Analoghe a questa sono le prove a carico induttivo o in cortocircuito, per le macchine sincrone, che vanno corredate dalla prova degli induttori, alle rispettive correnti nominali. Per i grossi trasformatori, ed in particolare per le macchine a tre avvolgimenti in cui non è facile imporre la voluta distribuzione della corrente, è stata anche tentata una eccitazione in corrente continua, con opportune sorgenti separate sui vari avvolgimenti, in modo tale da dissiparvi la potenza corrispondente alle perdite totali.

**Esempio** (INDETERMINATO)

Prova a carico equivalente su un trasformatore in olio con le seguenti caratteristiche:

$P_n=2500$  kVA -  $p_0=0,2\%$  -  $p_{cc}=0,4\%$  (alla temperatura di riferimento) -  $v_{cc}=5\%$ .

$V_{1n}=20000$  V -  $V_{2n}=400$  V

Si tratta di alimentare il trasformatore in cortocircuito, preferibilmente dal lato alta tensione.

Orientativamente, la corrente da far circolare negli avvolgimenti corrisponde a:

$$I = I_n \sqrt{\frac{p_{cc} + p_0}{p_{cc}}}$$

e quindi la tensione necessaria varierà nella stessa proporzione rispetto a quella di cortocircuito.

Deve essere misurata la potenza, con inserzione usuale dei wattmetri.

Alla fine della prima prova (con le perdite totali) si è ottenuto:

$$\begin{aligned} \vartheta_{Mo} &= 55,3^\circ\text{C} && \text{(sovratemperatura massima dell'olio nel pozzetto)} \\ \vartheta_o &= 48,5 && \text{(sovratemperatura media dell'olio)} \end{aligned}$$

Ridotta la corrente e regimata la macchina con le sole perdite nel rame:

$$\begin{aligned} \vartheta'_{aA} &= 50,5^\circ\text{C} && \text{(sovratemperatura dell'avvolgimento AT)} \\ \vartheta'_{ab} &= 53,0^\circ\text{C} && \text{(sovratemperatura dell'avvolgimento bt)} \\ \vartheta'_o &= 45,5 && \text{(nuova sovratemperatura media dell'olio)} \end{aligned}$$

Si nota come l'olio si sia raffreddato di 3K per cui i valori delle sovratemperature degli avvolgimenti sull'ambiente devono essere corrette per questo calo.

Si ottiene pertanto come valore finale:

$$\begin{aligned} \vartheta_{aA} &= 50,5 - 45,5 + 48,5 = 53,5^\circ\text{C} && \text{(sovratemperatura dell'avvolgimento AT in condizioni di regime)} \\ \vartheta_{ab} &= 53,0 - 45,5 + 48,5 = 56^\circ\text{C} && \text{(sovratemperatura dell'avvolgimento bt in condizioni di regime)} \end{aligned}$$

## PROVE TERMICHE

La conduzione della prova richiede la disponibilità di una potenza attiva pari allo 0,6% della nominale (circa 15 kW), peraltro la potenza apparente è molto maggiore per la presenza della reattiva.

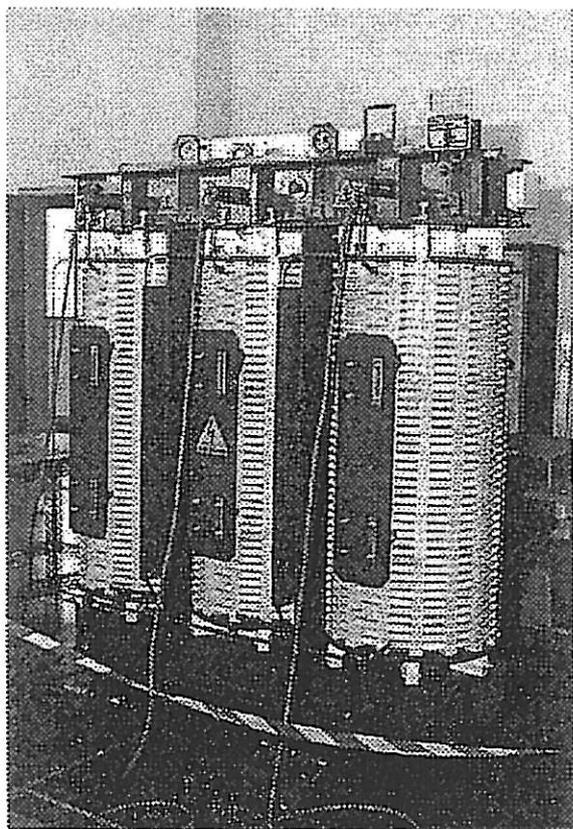
La corrente nella prima fase della prova è infatti  $1,23I_n$  e questo richiede una tensione pari a  $1,23v_{cc}$  e quindi una potenza apparente pari al 7,6% della nominale (circa 190 kVA): è normale, in queste condizioni, considerare la possibilità di rifasare per evitare di dover ricorrere a regolatori di grossa taglia.

Questo particolare aspetto diviene tanto più rilevante quanto più alta è la tensione della macchina in prova, a causa dell'aumento naturale della  $v_{cc}$ .

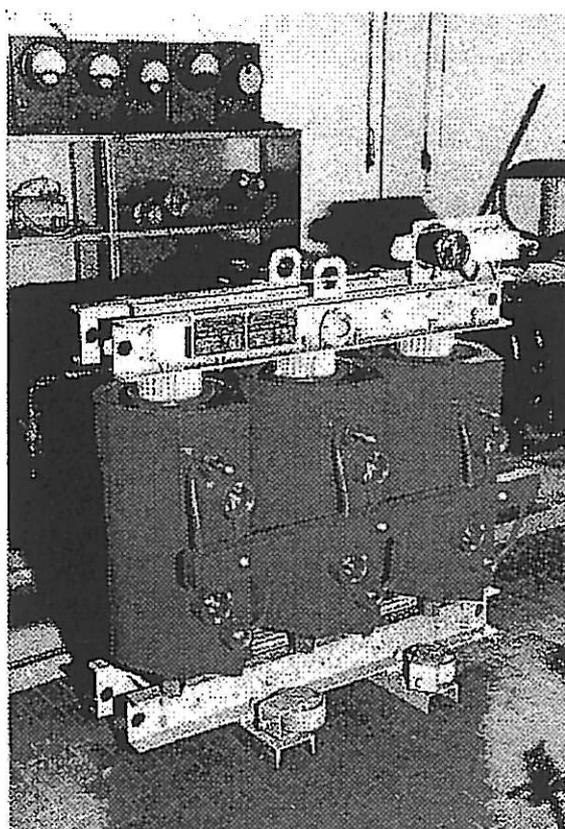
Per accelerare il raggiungimento del regime si può considerare di aumentare ulteriormente la corrente, soprattutto agli inizi della prova, quando gli avvolgimenti sono freddi.

## 3.36 Metodo a carico simulato

Il metodo a carico equivalente non è applicabile per i trasformatori a secco (fig. 3.351): gli avvolgimenti non sarebbero infatti in grado di smaltire le perdite totali senza danneggiarsi ed in aggiunta non avrebbe alcun senso la determinazione della temperatura del fluido di raffreddamento che, essendo costituito dall'aria, non ha limiti di classe.



a) Trasformatore a secco Classe H



b) Trasformatore isolato in resina epossidica

Fig. 3.351

La prova, che viene effettuata sulla base di un accordo tra le parti, prevede le fasi seguenti:

- alimentazione del trasformatore a vuoto a tensione nominale per un tempo sufficiente a raggiungere il regime termico del nucleo;
- determinazione delle sovratemperature degli avvolgimenti in questa condizione;

## PROVE TERMICHE

- messa in cortocircuito della macchina e funzionamento a corrente nominale fino al raggiungimento del nuovo regime termico;
- determinazione delle sovratemperature degli avvolgimenti in questa seconda condizione.

Le sovratemperature complessive si ottengono combinando i valori ottenuti dalle due prove con una formula del tipo:

$$\vartheta_f = \vartheta_a \left( 1 + \left( \frac{\vartheta_o}{\vartheta_a} \right)^{1,25} \right)^{0,8}$$

dove  $\vartheta_a$  e  $\vartheta_o$  sono le sovratemperature degli avvolgimenti misurate alla fine della prova in cortocircuito e di quella a vuoto. Si vede che il termine correttivo dipende dal rapporto tra le due, ossia dal contributo del riscaldamento del nucleo sugli avvolgimenti rispetto a quello indotto dal riscaldamento proprio: l'effetto è di solito poco marcato per l'avvolgimento di alta tensione mentre è più sensibile per quello di bassa che è a stretto contatto del nucleo.

Vi sono ovviamente elementi semplificativi nella formula riportata: in caso di contestazioni il metodo di riferimento è quello di circolazione (si veda 3.33) che però richiede la disponibilità di due macchine uguali (o compatibili come tensione e potenza).

### 3.37 Regolazione della potenza durante la prova.

Una differenza sostanziale fra i metodi di circolazione (o di carico diretto) e i metodi equivalenti, è che nel primo caso la regolazione avviene a potenza (ossia corrente) di uscita costante; le perdite dipendono quindi dalla temperatura (reale) assunta dalle singole parti, in particolare dagli avvolgimenti.

Nel secondo caso, si invia nelle macchine una potenza predeterminata costante (e si varia quindi la corrente di alimentazione); la differenza può essere sensibile solo se la sovratemperatura delle singole parti è molto diversa dai valori di riferimento.

### 3.38 Riporti

Anche avendo la possibilità di regolare la potenza dissipata, durante una prova termica, non è sempre possibile che essa sia eseguita agli esatti valori nominali o contrattualmente convenuti. Sorge in ogni caso quindi il problema di risalire dai valori di sovratemperatura ottenuti con le perdite  $W_p$  a quelli che si sarebbero ottenuti con altro valore  $W_n$  delle perdite. Per l'olio si ammette in generale, almeno entro i limiti che le Norme consentono per tali riporti (+ 20%):

$$\vartheta_n = \vartheta_p \left( \frac{W_n}{W_p} \right)^a$$

dove l'esponente  $a$  vale 1,00 nel caso di circolazione forzata e viene assunto pari a 0,80 nel caso di raffreddamento naturale. In questo caso, infatti, una maggior sovratemperatura consente una maggior circolazione d'aria ed un conseguente aumento del coefficiente di trasmissione del calore.

Nel caso poi, ad esempio di trasformatori in olio un simile riporto va fatto separatamente per la sovratemperatura media dell'olio e per il salto di temperatura fra il rame e l'olio medio.

## PROVE TERMICHE

Quest'ultimo viene riportato in funzione del rapporto delle correnti, nominale e di prova, elevato ad un esponente che può variare da 1,60 per circolazione d'olio naturale a 2,00 per circolazione d'olio forzata nell'interno degli avvolgimenti, secondo criteri analoghi a quanto sopra esposto.

## 3.4 Esecuzione delle prove

## 3.41 Riscaldamento e raffreddamento di un corpo omogeneo

Un corpo omogeneo, di peso  $p$  e capacità termica specifica  $c$ , in cui sia dissipata per il tempo  $dt$  la potenza  $P$ , varia di  $d\vartheta$  la sovratemperatura rispetto all'ambiente, immagazzinando l'energia  $pcd\vartheta$ ; per effetto del salto termico  $\vartheta$  si ha una cessione di calore all'esterno  $kS\vartheta dt$ , essendo  $k$  il coefficiente di trasmissione e  $S$  la superficie disperdente. Si ha quindi:

$$Pdt = cpd\vartheta + kS\vartheta dt$$

che ha come soluzione:

$$(3.411) \quad \vartheta = \vartheta_M (1 - e^{-t/T}) \quad ; \quad \vartheta_M = \frac{P}{kS} = \text{sovratemperatura di regime}$$

$$T = \frac{cp}{kS} = \text{costante di tempo termica}$$

Nel raffreddamento, a partire dalla sovratemperatura  $\vartheta_0$  (con  $P = 0$ ) si ha invece:

$$\vartheta = \vartheta_0 e^{-t/T}$$

La costante di tempo termica può essere facilmente espressa nella forma:

$$[3.412] \quad T = \frac{\vartheta_M cp}{P}$$

in funzione delle caratteristiche di regime ( $\vartheta_M$  e  $P$ ) il cui valore è - in generale - prevedibile a priori per una macchina ben costruita, e della capacità termica del corpo. Poiché la costante di tempo dipende dal rapporto  $P/p$  [perdita per unità di peso] il suo valore è pressoché indipendente dalla potenza nominale della macchina e può stimarsi da 0,5 a 2 ore per le macchine rotanti e da 1 a 4 ore per i trasformatori. Per un calcolo della capacità termica si tengano presenti i seguenti valori delle capacità termiche  $c$  (in  $J/kg^\circ C$  riferiti alla temperatura media):

rame 396;                  ferro 432;                  olio 2016.

Per un avvolgimento in rame risulta facilmente dalle (3.412):

$$T = 160 \vartheta_M / \sigma^2$$

con densità di corrente  $\sigma = 3 \text{ A/mm}^2$  e salti (rame-olio) dell'ordine di  $10^\circ C$  la costante di tempo risulta dell'ordine di pochi minuti.

## PROVE TERMICHE

## 3.42 Durata della prova

La sovratemperatura massima  $\vartheta_M$  viene teoricamente raggiunta in un tempo infinito; praticamente dopo 4 volte la costante di tempo non differisce per più del 2%, dal valore finale. Per poter considerare terminata una prova occorre in genere attendere che la sovratemperatura non vari di più di 1-2 gradi all'ora.

Quando si ammetta valida la legge esponenziale data in (3.411), si possono eseguire le misure di  $\vartheta$  ad intervalli regolari di tempo  $\Delta t$ ; si ha allora:

$$\begin{aligned}\vartheta_i - \vartheta_M &= -\vartheta_M \varepsilon^{-t/T} \\ \vartheta_{i+1} - \vartheta_i &= -\vartheta_M \varepsilon^{-t/T} \varepsilon^{-\Delta t/T}\end{aligned}$$

e quindi:

$$\vartheta_{i+1} - \vartheta_i = \vartheta_M \varepsilon^{-t/T} (1 - \varepsilon^{-\Delta t/T}) = (\vartheta_M - \vartheta_i) \cdot k$$

dove  $k$  è una costante, se è costante  $\Delta t$ .

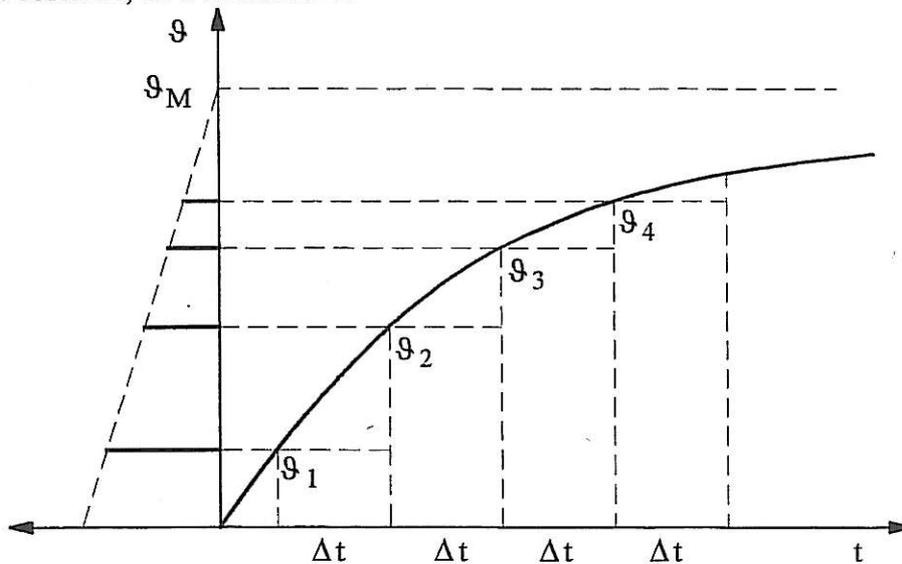


fig. 3.421

Riportando allora i valori di  $\vartheta_{i+1} - \vartheta_i$  (differenza fra due letture consecutive) in corrispondenza di  $\vartheta_i$  (prima delle due letture), si ottiene (fig. 3.421) una retta che incontra l'asse in  $\vartheta_M$ .

La costruzione va ripetuta per più punti, per evitare le incertezze dovute sia alle misure delle differenze sia alle deviazioni della curva di riscaldamento rispetto all'esponenziale. È opportuno inoltre che l'estrapolazione avvenga quando sono già estinti i transitori a costanti di tempo più piccole, ossia già in prossimità della  $\vartheta_M$ . Le Norme CEI per i trasformatori, ad esempio, l'ammettono solo quando la sovratemperatura non aumenti di più di 3°C all'ora.

## 3.43 Caratteristiche termiche delle macchine

In realtà, una macchina non può essere considerata come un corpo omogeneo: essa è composta di varie parti, di diversa costante di tempo termica, che possono scambiarsi il calore in esse prodotto.

## PROVE TERMICHE

La fig. 3.431 indica uno schema semplificato, equivalente ad un nucleo N e un avvolgimento A, sedi rispettivamente delle perdite  $P_N$  e  $P_A$ , con un raffreddamento ad olio (O) rispetto ad un ambiente esterno, la cui temperatura è presa come riferimento<sup>(1)</sup>

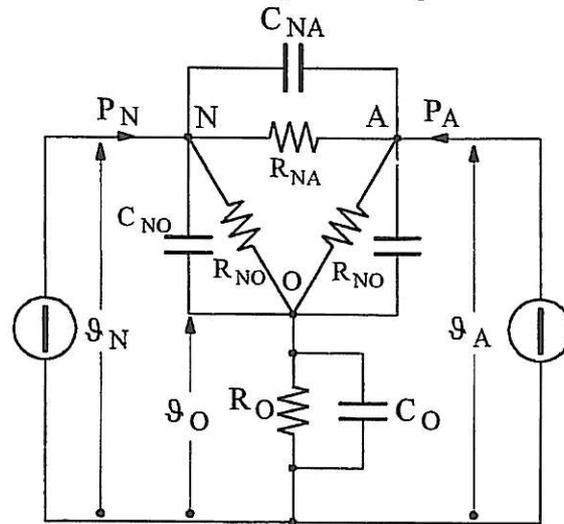


fig. 3.431

Da questo schema si può facilmente comprendere come le sovratemperature delle singole parti non crescano con leggi esponenziali semplici, specie nel tratto iniziale del transitorio; solo verso la parte finale, esauriti i transienti con minore costante di tempo, il fenomeno prende l'andamento esponenziale corrispondente alla costante di tempo maggiore.

Lo schema ovviamente si complica, qualora si voglia tenere conto del fatto che le sorgenti di calore non sono concentrate, ma distribuite, nonché della presenza di fenomeni non lineari nei singoli elementi del circuito equivalente.

### 3.44 Misure a macchina fredda

Il buon esito di una prova termica dipende dall'accurata predisposizione dei mezzi di prova e di misura. Le condizioni di funzionamento della macchina, sia per quanto riguarda le possibilità di smaltimento del calore (p. es. circolazione di refrigerante, posizione nell'ambiente ecc.) sia per quanto concerne le sorgenti di alimentazione e regolazione dovranno essere accuratamente studiate per poter condurre a termine la prova senza modifiche o interruzioni. Dovranno inoltre essere preventivamente accertati i punti sui quali si intendono eseguire le misure di temperatura, distribuendoli nelle singole parti più importanti dell'apparecchio in prova e del suo sistema di raffreddamento (temperatura ambiente, temperatura del refrigerante - aria o acqua - all'ingresso e all'uscita ecc.).

Quando si sia in presenza di recipienti contenenti olio o altro fluido che possa circolare in virtù dei salti interni di temperatura, la temperatura massima va rilevata nella zona più alta del liquido stesso; spesso - come nei cassoni dei trasformatori - si predispone, a tale scopo, un

(1) La similitudine sussiste fra le seguenti grandezze:  
 salti di temperatura = differenze di potenziale  
 flussi termici = correnti  
 resistenze termiche = resistenze elettriche  
 capacità termiche = capacità.

## PROVE TERMICHE

pozzetto accessibile dall'esterno (fig. 3.441 ) che viene riempito d'olio per facilitare lo scambio termico e nel quale viene immerso il bulbo del termometro o un altro sensore di temperatura..

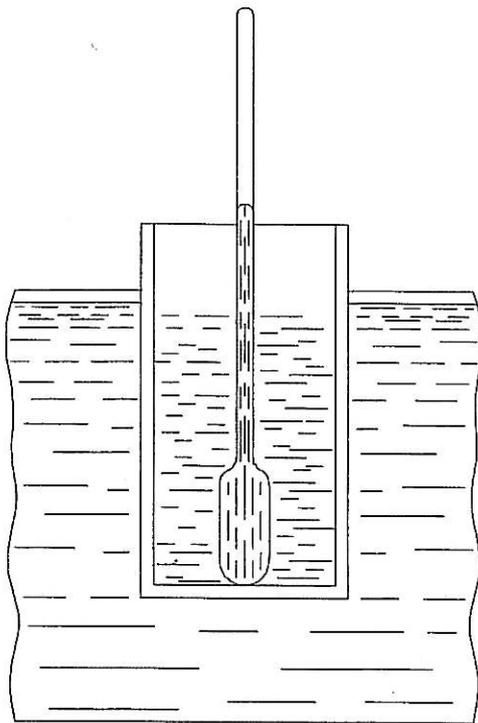


fig. 3.441

Misure di temperatura lungo le altre parti possono venir disposte sia allo scopo di rilevare la sovratemperatura massima dei singoli organi (con la ricerca dei "punti caldi") sia la distribuzione termica (ai fini per esempio del calcolo di temperature medie). Alcune sonde, anche se non perfettamente tarate, dovranno consentire una lettura anche durante la prova, per indicare quando si siano raggiunte le condizioni di regime.

Per gli avvolgimenti, si usano generalmente misure di resistenze nelle condizioni iniziale e finale (vedi 3.24). La scelta degli strumenti deve essere fatta in modo da poter leggere, possibilmente sulla stessa scala, sia le grandezze relative alla macchina fredda, sia le massime temperature prevedibili durante la prova.

La prova ha quindi inizio col rilievo delle resistenze e delle temperature iniziali delle varie parti; la macchina deve essere a temperatura ambiente, del che ci si può accertare constatando la costanza delle resistenze e delle singole temperature nel tempo.

### 3. 45 Misure dopo l'arresto del carico.

La temperatura raggiunta da ogni singola parte di una macchina al termine della prova dovrebbe essere in teoria letta prima della soppressione del carico, quando il suo valore sia arrivato a regime; ciò non è evidentemente possibile in molti casi (parti sotto tensione, organi rotanti, ecc.) mentre in altri (p. es. nella misura di sovratemperatura degli avvolgimenti con metodo voltamperometrico) occorre sostituire alla alimentazione in c.a. un'adeguata altra sorgente in c.c..

## PROVE TERMICHE

Per quanto rapidamente possa essere fatta la misura, i valori letti dopo qualche minuto dalla soppressione del carico non coincidono con quelli che si sarebbero letti a carico costante, specie se le condizioni di raffreddamento (circolazione d'olio, ventilazione naturale e forzata ecc.) permangono più o meno inalterate in tale periodo.

*Esempio*

La fig. 3.45 1 riporta, a titolo di esempio, i valori delle temperature, dedotte da misure di resistenza, alternativamete eseguite sugli avvolgimenti di A.T. e di b.t. di un trasformatore; per ogni avvolgimento si sono eseguite tre letture a breve intervallo di tempo.

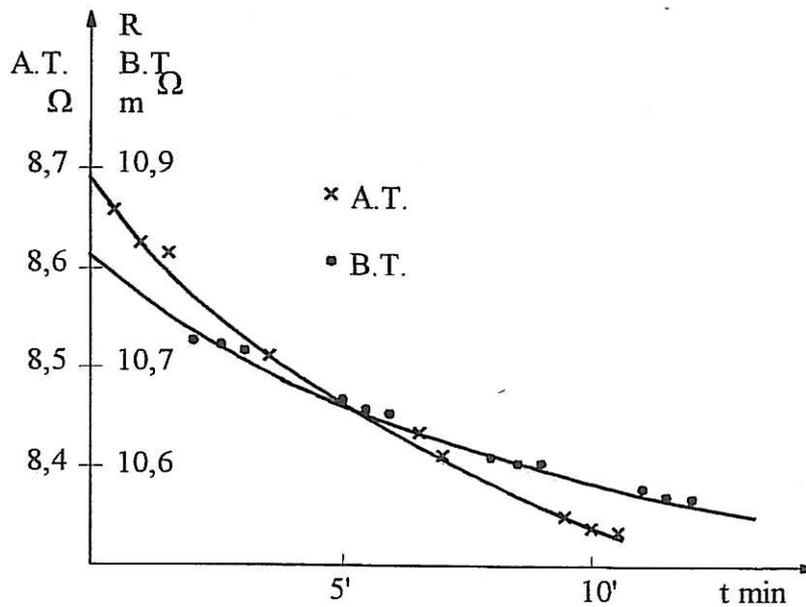


fig. 3.451

Si procede perciò in questi casi ad una serie di misure successive, in modo da rilevare l'andamento nel tempo delle temperature ed estrapolarne il valore all'istante di cessazione del carico: Tale estrapolazione si effettua prevalentemente per via grafica, assimilando l'andamento della temperatura ad una esponenziale o a una somma di esponenziali, con metodo simile a quanto indicato in 3.42.

Quando il tempo di arresto sia molto lungo - come è il caso di grosse macchine rotanti a cui non si possono applicare sistemi di frenatura - conviene evitare le misure voltamperometriche e ricorrere a rivelatori interni, precedentemente tarati e possibilmente non direttamente interessati dal flusso del refrigerante; questi rivelatori devono essere distribuiti nella macchina, a più stretto contatto termico con gli avvolgimenti (fra i due lati di matassa di una cava).

Per gli avvolgimenti dei trasformatori in olio, dalla temperatura misurata dopo il tempo  $t$  si può risalire al valore iniziale usando un'espressione approssimata del tipo:

$$\frac{\Delta\vartheta}{\vartheta_M} \cong \frac{t}{T} = \frac{tP}{cp\vartheta_M} \quad \text{ossia} \quad \Delta\vartheta = k \frac{P}{p} t$$

per cui la correzione  $\Delta\vartheta$  è esprimibile in funzione delle perdite specifiche  $P/p$  (Watt per Kg di rame) dell'avvolgimento;  $k$  non è a rigore una costante, ma se  $t$  è inferiore a 4' è dell'ordine di

## PROVE TERMICHE

0,06-0,08 (con  $t$  in minuti) la costante di tempo del sistema rame-olio essendo come si è visto in 3.41, dell'ordine di qualche minuto.

## 3.46 Misure sotto carico.

Può essere interessante poter seguire istante per istante la temperatura media di un avvolgimento percorso da corrente alternata, attraverso la misura della sua resistenza, mediante una corrente continua, sovrapposta all'alternata e separata da questa mediante opportuni artifici. Nel caso di un avvolgimento trifase a stella in c.c. (fig. 3.461) non esiste d.d.p. fra i centri stella A e B, tra cui si può quindi inserire un'alimentazione in corrente continua che faccia circolare nell'avvolgimento una corrente continua  $I$ , sufficientemente piccola, rispetto a quella esistente in corrente alternata. Per la misura della caduta di tensione sull'avvolgimento, allo scopo di evitare le resistenze di contatto, si deve ricorrere ad uno schema del tipo illustrato in fig. 3.461, che comprende tre resistori ausiliari uguali di valore noto  $r$ . Il punto C assume, a vuoto, rispetto ad A, il potenziale  $V_0 = 1/3 (R_1 I_1 + R_2 I_2 + R_3 I_3)$ , ossia  $V_0 = 1/3 RI$ , se  $R_1 = R_2 = R_3 = R$ ; il voltmetro misura invece la tensione  $V = V_0 - ri/3$ ; dalle letture di  $V$  e  $I$  si ricava dunque:

$$(3.461) \quad R = \frac{3V + ri}{I} = \left( 3 + \frac{r}{r_v} \right) \frac{V}{I}$$

dove  $r_v$  è la resistenza del voltmetro.

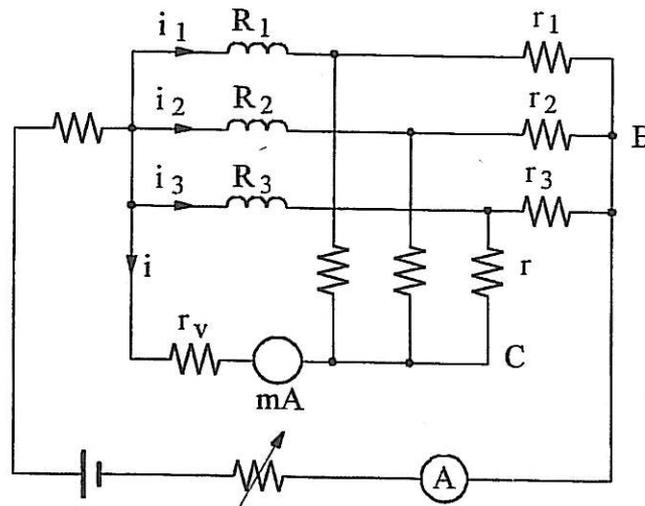


fig. 3.461

Per tenere conto del consumo voltmetrico, basta sostituire, nella (3.461) alla corrente  $I$  la corrente:

$$I' = I - i$$

Lo schema di fig. 3.462, utile nel caso di trasformatore alimentato dall'esterno, è concettualmente simile a quello di fig. 3.461 in corrente continua e ne differisce in c.a. per il fatto che le resistenze  $r_1$ ,  $r_2$ ,  $r_3$  ed  $r$  sono fortemente induttive, facendo le prime parte del

## PROVE TERMICHE

trasformatore di alimentazione, e le seconde essendo costituite dai primari di tre trasformatori di tensione.

Poiché la corrente alternata nel filo neutro non è mai nulla, anche l'amperometro deve essere corredato di un circuito filtrante che eviti il sovraccarico dello strumento; un tipo abbastanza semplice di circuito filtrante è costituito dalla inserzione di un trasformatore in rapporto 1/1 (fig. 3.463); la resistenza del primario di tale trasformatore deve essere elevata rispetto a quella dello shunt, quella del secondario va in serie alla resistenza propria dello strumento. Si dispone anche in genere un filtro con induttanza  $L$  e capacità  $C$ , per limitare la corrente alternata nella batteria.

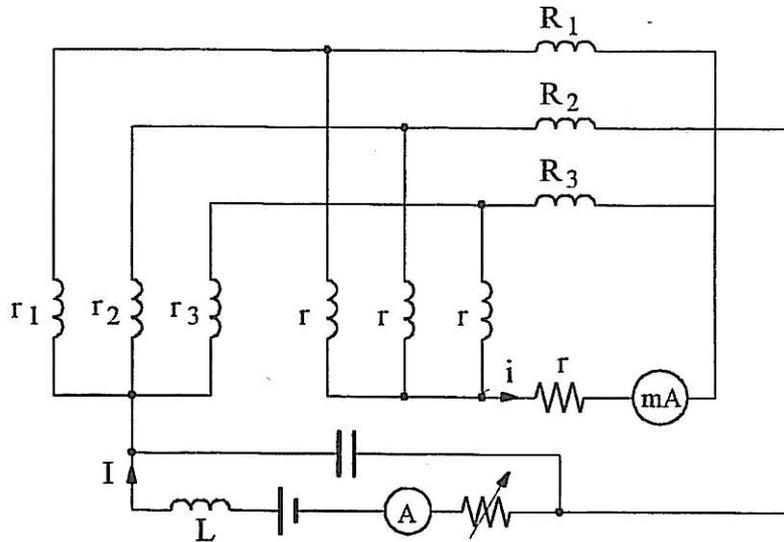


fig. 3.462

Per quanto riguarda le misure voltmetriche si può usare lo schema di fig. 3.464 che utilizza un trasformatore di tensione di induttanza primaria  $L$  e rapporto di trasformazione  $k$ . Si ha, per la tensione alternata di pulsazione  $\omega$  :

$$V_o = \frac{1 - k\omega^2 LC}{1 - \omega^2 LC} V_i$$

si può pertanto annullare la componente principale facendo  $k \omega^2 LC = 1$  ; si ricorre in genere ad aggiustamento del rapporto di trasformazione mediante un circuito potenziometrico sul secondario.

Se il neutro non esiste o non è accessibile lo schema di misura può essere quello di fig. 3.465.

La corrente continua entra da una fase e percorre le altre due in parallelo; la tensione è misurata mediante uno strumento magnetoelettrico (microamperometro) con una resistenza  $r_a$  fortemente induttiva in serie costituita generalmente da un TV). Le resistenze  $r_a$  fra le altre due fasi sono fra loro uguali.

PROVE TERMICHE

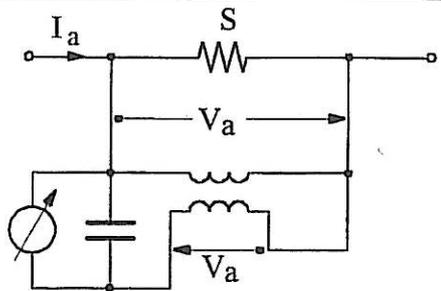


fig. 3.463

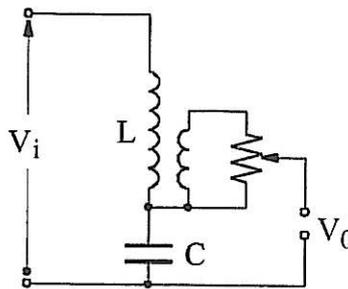


fig. 3.464

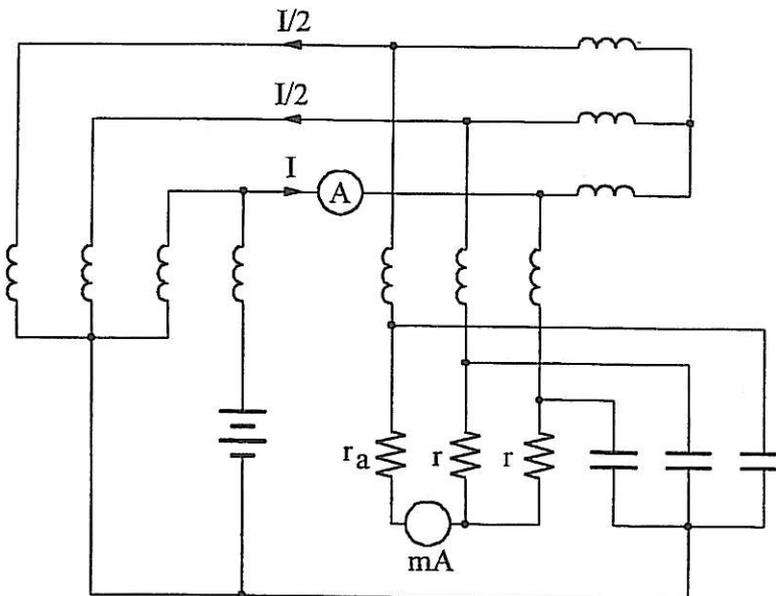


fig. 3.465

Tale schema si riconduce, in c.c., a quello di fig. 3.466, per cui è:

$$R = \frac{i}{I} \frac{2r_a + r}{3}$$

essendo la tensione a vuoto tra A e B pari a  $V_0 = \frac{3}{2} RI$  e la resistenza del voltmetro  $(r/2 + r_a)$ .

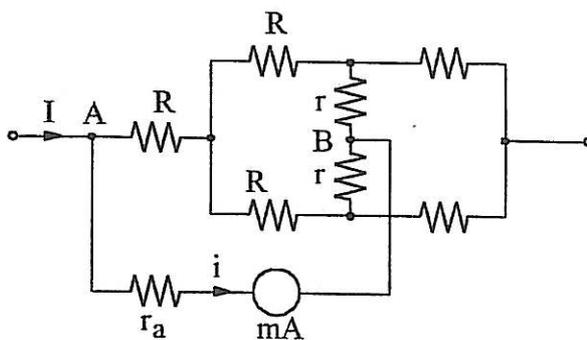


fig. 3.466

## PROVE TERMICHE

Analoghe relazioni si possono ricavare per avvolgimenti a triangolo. Questi sistemi possono anche essere utilizzati per misure sui trasformatori in esercizio, al fine di conoscere in ogni istante la temperatura degli avvolgimenti. In tal caso però gli strumenti vanno dimensionati per le correnti di cortocircuito e adeguatamente protetti. Il valore della corrente continua deve inoltre in tal caso essere sufficientemente basso da non generare effetti magnetici sensibili sul nucleo.

In esercizio, risulta spesso difficile eliminare l'effetto delle variazioni di tensione, che danno luogo a transitori con frequenze di qualche periodo o frazione di periodo al secondo, che rendono incerte le letture degli strumenti.

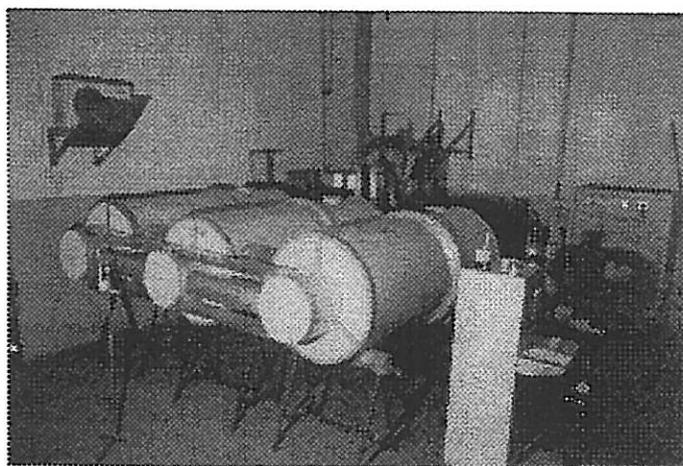
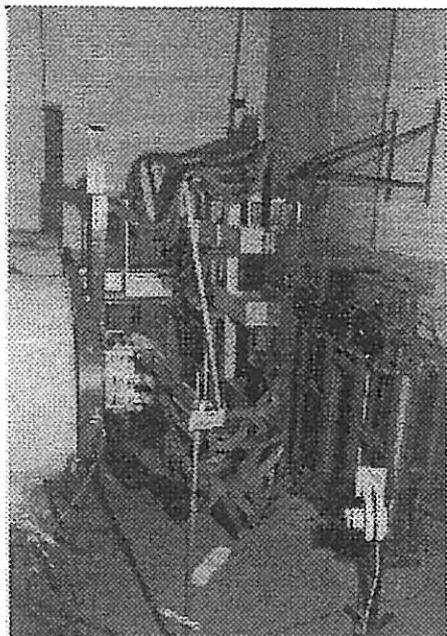
## 3.47 Misure su sezionatori, interruttori, cavi e condotti sbarra

Tutti questi componenti sono caratterizzati da valori di resistenza molto bassi (anche qualche decina di  $\mu\Omega$ ) e, spesso, da correnti nominali molto elevate. Per la prova termica è necessario realizzare una spira (se si può effettuare la prova in configurazione monofase) o un circuito completo se l'alimentazione deve essere trifase; questa configurazione è necessaria quando vi siano rilevanti campi magnetici esterni al sistema con possibilità di riscaldamento degli involucri metallici che, in queste condizioni, potrebbero falsare le misure di temperatura anche dei conduttori.

Non è comunque possibile utilizzare correnti continue perché non si evidenzerebbero gli effetti legati al ridotto spessore di penetrazione nel caso in cui i conduttori abbiano sezioni considerevoli.

I punti critici per le sovratemperature sono di solito associati ai contatti (mobili o anche imbullonati) e, dati i salti termici consentiti, non vi sono normalmente limitazioni indotte per gli isolamenti (peraltro realizzati spesso con isolatori di porcellana).

I salti consentiti dipendono dal tipo di contatto e dall'ambiente in cui vengono ad operare: nella Tabella che segue vengono riportati i salti consentiti per contatti mobili e per le giunzioni bullonate: si nota come, per i contatti di rame in aria i salti consentiti siano molto bassi mentre sono quasi doppi per contatti argentati.



Prova termica su condotto sbarre trifase costituito da tre condotti coassiali – Si notano il regolatore a spazzole ed i trasformatori di corrente.

## PROVE TERMICHE

In queste condizioni però il deposito di argento deve essere tale da non essere rimosso alla fine di un numero prefissato di manovre meccaniche.

	Valori massimi temperatura (°C)	Sovratemperatura massima (K)
<b>Contatti in rame nudo</b>		
In aria	75	35
in SF <sub>6</sub>	90	50
in olio	80	40
<b>Contatti in rame argentato o nichelato</b>		
in aria	105	65
in SF <sub>6</sub>	105	65
in olio	90	50
<b>Conessioni imbullonate in rame, leghe di rame o di alluminio nude</b>		
in aria	90	50
in SF <sub>6</sub>	105	65
in olio	100	60
<b>Conessioni imbullonate in rame, leghe di rame o di alluminio argentate o nichelate</b>		
in aria	115	75
in SF <sub>6</sub>	115	75
in olio	100	60

Le misure sono effettuate con termocoppie in stretto contatto con le parti metalliche (talvolta viene praticato un piccolo foro nel metallo per introdurre la termocoppia); l'alimentazione viene effettuata con un trasformatore che normalmente deve fornire una tensione bassa (volt o qualche decina di volt) e la corrente richiesta. Il carico costituito dalla spira ha una componente prevalente di tipo induttivo, con una parte reale modesta associata alle perdite: si può rifasare ma tipicamente solo a monte del trasformatore di alimentazione dove la tensione ha un valore non particolarmente basso. Spesso vengono usati trasformatori di riscaldamento senza il secondario che viene realizzato di volta in volta con cavi o calze di rame per adeguarlo alla portata di corrente richiesta. Per aumentare la tensione agente nella spira si possono utilizzare diversi trasformatori agenti in serie nella spira e collegati in parallelo sull'alimentazione.

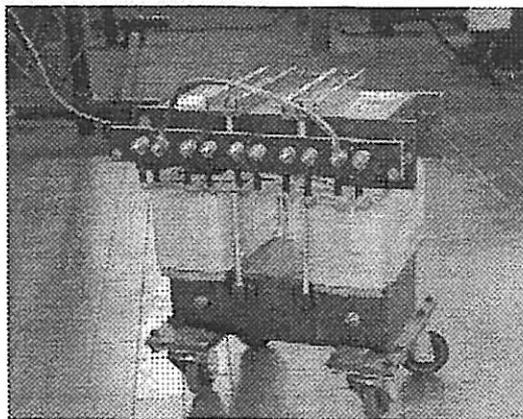


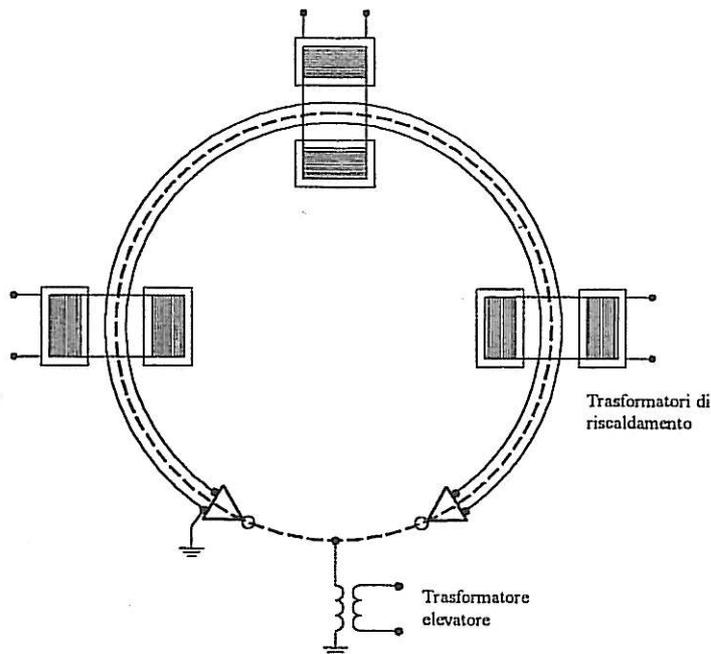
Fig. 3.47.1 Trasformatore da riscaldamento  $P = 21,6 \text{ kVA} - 5,5 \text{ V/spira}$

## PROVE TERMICHE

Vi sono soluzioni particolari in cui il nucleo del trasformatore è apribile per facilitare il passaggio nel caso di sistemi in prova con notevole lunghezza (cavi ad esempio).

Per queste prove è fondamentale limitare i gradienti di temperatura lungo i collegamenti per evitare scambi termici troppo pronunciati tra l'oggetto in prova ed il resto del circuito. Di solito si richiede che la variazione di temperatura misurata ad un metro dal contatto non superi 1 K; si deve pertanto controllare il riscaldamento dei conduttori di adduzione e questo si può realizzare, per una certa sezione, cambiando lo smaltimento verso l'ambiente (rivestendo i conduttori con un isolante termico o distanziandoli se sono formati da più elementi in parallelo).

Nel caso di quadri elettrici la maggior difficoltà consiste nella realizzazione dei carichi che portino ad una ripartizione delle correnti tra le diverse derivazioni, in modo proporzionale alle correnti nominali; si tratta di realizzare carichi reattivi, di valore non troppo elevato, per non caricare troppo l'alimentazione. Gli interruttori devono essere inseriti perché la potenza dissipata al loro interno spesso non è trascurabile.



Prova termica su cavo alimentato alla tensione nominale.

Nel caso di prove termiche su cavi per alte tensioni non sono assolutamente trascurabili le prove dielettriche, il cui valore dipende dall'angolo di perdita ( $\text{tg}\delta$ ) del materiale impiegato.

Il circuito dovrebbe pertanto prevedere la contemporanea realizzazione di una condizione in cui si hanno entrambe le sorgenti di perdita; per le alimentazioni si realizzano di solito soluzioni di tipo sintetico in cui uno spezzone di cavo, chiuso in corto circuito, viene alimentato con una serie di trasformatori del tipo prima descritto per ottenere nel conduttore centrale il valore di corrente voluto mentre un altro trasformatore applica tra conduttore e schermo la tensione di prova.

La potenza delle due sorgenti è relativamente modesta. Il valore di temperatura cui si porta il conduttore può essere controllato in modo agevole misurando la temperatura della guaina esterna, collegata a terra, dopo aver determinato il salto termico tra questa e lo stesso conduttore con una prova condotta senza applicare la tensione.

## PROVE TERMICHE

---

*Esempio*

Si supponga di avere un cavo a campo radiale con  $U_n = 400$  kV e che la spira di prova abbia un diametro di 50 metri. La tensione di prova sia 1,5 volte la tensione nominale.

Il cavo è sottoposto alla tensione stellata: la tensione di prova sarà pertanto 346,4 kV.

Assumendo una capacità di 250 pF/m, si ottiene una potenza capacitiva pari a 1,48 Mvar che deve essere fornita dal trasformatore elevatore.

L'induttanza della spira circolare può essere stimata con una formula del tipo:

$$L(H) = r\mu [ \ln(8r/a) - 2 ]$$

con  $r$  = raggio della spira ed  $a$  = raggio del conduttore del cavo.

Supponendo che il cavo abbia una corrente nominale di 1000 A ed una sezione di rame pari a 1500 mm<sup>2</sup>, si ottiene  $a = 22$  mm.

La formula fornisce pertanto  $L = 223$   $\mu$ H.

La tensione necessaria per compensare la sola caduta reattiva sarebbe pertanto

$$V = \omega LI = 70 \text{ V,}$$

da ottenersi con un adeguato numero di trasformatori distribuiti lungo la circonferenza. La potenza reattiva sarebbe di 70 kvar.

La resistenza sarebbe invece intorno ai 3 m $\Omega$  per cui la componente attiva della caduta di tensione sarebbe di 3 V con una potenza attiva di 3 kW.

Se il cavo fosse del tipo carta e olio con  $\text{tg}\delta = 2,5$  ‰ le perdite dielettriche sarebbero pari a  $Q \text{tg}\delta = 37$  kW.

La potenza reattiva del trasformatore elevatore potrebbe essere compensata con adeguati induttori.

---

Per cavi eventualmente avvolti su bobine è molto importante realizzare condizione in cui i flussi sono minimi perché in caso contrario sarebbe molto difficile disporre della tensione necessaria per far circolare la corrente: si usano pertanto alimentazioni trifase se vi sono le tre unità monofase o si alimentano due spezzoni cordati insieme facendo circolare correnti opposte.

TABELLA 1

Caratteristiche dei sensori per misure di temperatura

Sensore	Campo di misura	Incertezza (°C) (*)
Termocoppia tipo T <i>Rame - Costantana</i>	da 0°C a 370 °C -200 °C a 0 °C	±1 o 0,75 % T (**) ±1 o 1,5 % T
Termocoppia tipo K <i>NiCr - NiAl</i>	da 0°C a 1370 °C -200 °C a 0 °C	±2,2 o 0,75 % T (**) ±2,2 o 2 % T
Termocoppia tipo J <i>Fe- Costantana</i>	da 0°C a 760 °C	±2,2 o 0,75 % T (**)
Termocoppia tipo R <i>- Pt/Pt- 13% Rodio -</i>	da 0°C a 1750 °C -200 °C a 0 °C	±1,5 o 0,25 % T (**)
Termistore 2252 Ω	da -80°C a 150 °C	± 0,2 (da 0°C a 70 °C)
Termoresistenza Pt100	da -200°C a 630 °C	±[0,15+0,002T] A ±[0,3+0,002T] B

(\*) I valori valgono per le termocoppie di tipo standard. Esistono anche termocoppie con incertezze praticamente pari alla metà di quelle indicate.

(\*\*) Si applica il termine che dà l'incertezza più alta

Per i sensori al platino sono normalizzate due classi di precisione (A e B) cui corrispondono i limiti sopra riportati.

La funzione resistenza/temperatura utilizzata per i sensori al platino è tipicamente la seguente:

$$R_t = R_0 [1 + At + Bt^2 + C(t-100)t^3] \quad \text{da } -200 \text{ a } 0 \text{ °C}$$

$$R_t = R_0 [1 + At + Bt^2] \quad \text{da } 0 \text{ a } 850 \text{ °C con}$$

$$A = 3,908 02 \times 10^{-3} \text{ °C}^{-1}$$

$$B = -5,802 \times 10^{-7} \text{ °C}^{-2}$$

$$C = -4,273 50 \times 10^{-12} \text{ °C}^{-4}$$

Per la valutazione dell'incertezza complessiva, bisogna aggiungere all'incertezza del sensore anche quella dello strumento con cui si effettua la misura.

---

**BIBLIOGRAFIA**

- CEI 15-26 "Valutazione e classificazione termica dell'isolamento elettrico", Fasc. 1073, 1988.
- CEI 17-21 "Prescrizioni comuni per l'apparecchiatura di manovra e di comando ad alta tensione", Fasc. 795, 1980.
- CEI 65-8 "Sensori industriali a resistenza termometrica in platino", Fasc. 1739, 1992.
- CEI 65-11 "Termocoppie - Parte 2: Tolleranze", Fasc. 1731, 1992.
- OMEGA ENGINEERING INC. - Temperature Measurement Handbook.
- YSI Precision Thermistors, Yellow Spring Instruments, Inc., Yellow Springs, Ohio, 1977.

## CAPITOLO IV

## PROVE DI ISOLAMENTO

## 4.1 Generalità sulle prove di isolamento

## 4.1.1 Natura e scopo delle prove

Ogni macchina o apparecchio elettrico presenta, nel suo funzionamento, delle parti a potenziale diverso, convenientemente isolate; è perciò necessario controllare che le strutture isolanti siano state dimensionate e costruite in modo adatto a sopportare le prevedibili sollecitazioni derivanti dal loro funzionamento. La prova più semplice consiste nell'applicazione di tensione di valore, forma e durata specificati, fra le diverse parti, controllando che non si producano danneggiamenti o comunque alterazioni delle proprietà dielettriche isolanti.

Come regola generale, il tipo e la forma della tensione applicata dovrebbero corrispondere a quelli che intervengono nel servizio perché, in caso contrario, potrebbero aversi effetti diversi o, in qualche caso, anche controproducenti.

Vi possono tuttavia essere condizioni in cui questo non è possibile: a titolo di esempio si consideri una prova di tensione fatta su cavi di notevole lunghezza dopo posa che richiederebbe una potenza reattiva (con trasformatori adeguatamente dimensionati) non sempre disponibile, specie per prove sul campo.

Si può allora pensare di effettuare la stessa prova con tensione continua per cui il problema della potenza non si pone: tuttavia bisogna tener presente che la ripartizione della tensione applicata nel primo caso è governata dalla capacità mentre nel secondo interverrebbero, almeno a regime, le resistenze di dispersione e quindi la resistività dell'isolante, con tutte le problematiche connesse (forte dipendenza dalla temperatura, influenza di fattori esterni quali i contaminanti sui terminali etc.). Esiste comunque una fase transitoria non trascurabile in cui si passa dalla prima alla seconda distribuzione che è governata dal prodotto della resistività per la costante dielettrica ( $\rho\epsilon$ ) che, per buoni isolanti può non essere trascurabile. Il risultato potrebbe essere quindi privo di senso perché non riproduce le condizioni di funzionamento: si potrebbe arrivare anche alla conclusione che i terminali scaricano con tensione continua applicata e tengono invece regolarmente quella alternata. Valutazioni analoghe intervengono in molte altre occasioni e tra queste anche quelle relative alle tensioni impulsive, nel caso in cui si volesse sostituirle con altre, più semplici da generare, quali quelle alternate.

Per quanto riguarda la forma, le tensioni di prova per sistemi in alternata possono essere distinte in:

- a) tensioni alternate a frequenza industriale, di andamento assai prossimo alla sinusoidale;
- b) tensioni transitorie unidirezionali di breve durata (impulsive) che possono essere rappresentate da andamenti doppio-esponenziali; esse si distinguono (v. 4.31) a seconda della loro durata in impulsi di fulminazione e impulsi di manovra.

Quanto al valore da applicare, durante una prova, esso dipende dal "livello di isolamento" dell'apparecchio o della macchina in prova, in relazione alla tensione più elevata del sistema ( $U_m$ ) a cui esso può venire collegato. Un esempio di livelli d'isolamento è dato in tabella 4.11, che mette in evidenza gli elevati valori delle tensioni impulsive, rispetto a quelli a f.i. e a quelle di funzionamento fase-terra ( $U_m / \sqrt{3}$ ). In altri casi la tensione di prova è data da una relazione (in genere binomia) rispetto alla tensione  $U_m$ .

## PROVE DIELETTRICHE

$U_m$ (kV)	$U_{L.I.}$ (kV)	$U_{L.I. - Sez.}$ (kV)	$U_{L.I.}$ (kV)	$U_{L.I. - Sez.}$ (kV)	$U_{f.i.}$ (kV)	$U_{f.i. - Sez.}$ (kV)
	<b>LISTA 1</b>		<b>LISTA 2</b>			
3,6	20	23	40	48	10	12
7,2	40	46	60	70	20	23
12	60	70	75	85	28	32
17,5	75	85	95	110	38	45
24	95	110	125	145	50	60
36	145	165	170	195	70	80
52	===	===	250	290	95	110
72,5	===	===	325	375	140	160

$U_m$ (kV)	$U_{L.I.}$ (kV)	$U_{L.I. - Sez.}$ (kV)	$U_{f.i.}$ (kV)	$U_{f.i. - Sez.}$ (kV)
100	380	440	150	175
	450	520	185	210
123	450	520	185	210
	550	630	230	265
145	550	630	230	265
	650	750	275	315
170	650	750	275	315
	750	860	325	375
245	850	950	360	415
	950	1050	395	460
	1050	1200	460	530

$U_m$ (kV)	$U_{L.I.}$ (kV)	$U_{L.I. - Sez.}$ (kV)	$U_{S.I.}$ (kV)	$U_{S.I. - Sez.}$ (kV)		$U_{f.i.}$ (kV)	$U_{f.i. - Sez.}$ (kV)
300	950	950 (+170)	750	850	700 (+245)	380	435
	1050	1050 (+170)	850				
362	1050	1050 (+205)	850	950	800 (+295)	450	520
	1175		950				
420	1300	1300 (+240)	950	1050	900 (+345)	520	610
	1425	1425 (+240)	1050				
525	1425	1425 (+300)	1050	1175	900 (+430)	620	760
	1550	1550 (+300)	1175				
1175	1800	1800 (+435)	1300	1550	1100 (+625)	830	1100
	2100	2100 (+435)	1550				

$U_m$  = tensione di massima del sistema (valore efficace in kV)

$U_{f.i.}$  = tensione di tenuta a f.i. (valore di cresta /  $\sqrt{2}$ , in kV)

$U_{S.I.}$  = tensione a impulso di manovra (valore di cresta in kV)

$U_{L.I.}$  = tensione di tenuta a impulso di fulminazione (valore di cresta, in kV)

Tab. 4.11

## PROVE DIELETTICHE

Esiste un certo ventaglio di possibilità che in genere contempla, per un determinato valore di  $U_m$ , la scelta tra almeno due livelli di isolamento possibili (denominati LISTA 1 e LISTA 2 per la media tensione), a seconda del diverso grado di esposizione alle sovratensioni di origine atmosferica.

Per i livelli di tensione più elevata la scelta può essere ancora più ampia e deve essere specificata dal progettista del sistema: normalmente il livello di isolamento più elevato per una certa tensione coincide con quello più basso del livello successivo. Le tensioni di prova sul sezionamento (ovvia tra i contatti aperti) sono specificate ad un livello che mediamente è superiore del 15% rispetto a quello della prova verso terra.

## 4.12 Schema generale

Lo schema generale, per una prova d'isolamento, è illustrato in figura 4.121: esso comprende:

- una sorgente di tensione regolabile, per ottenere, partendo da valori sufficientemente bassi, il valore voluto della tensione di prova; questa sorgente è spesso dotata di uno strumento di controllo, per eseguire la regolazione secondo la modalità prefissate o prescritte;
- il generatore vero e proprio  $G$  di alta tensione (p. es. un trasformatore, per le prove con tensione alternata alla frequenza di rete); di esso è messa in evidenza l'impedenza interna  $Z$ ;
- l'oggetto in prova  $O$ , che costituisce generalmente un carico capacitivo;
- l'apparecchiatura per la misura della tensione di prova, direttamente connessa ai terminali dell'oggetto in prova; essa è generalmente formata da un divisore, di rapporto noto, a cui è collegato uno strumento, indicatore o registratore;
- un eventuale campione di riferimento (spinterometro a sfere completo dalla sua resistenza serie (vedi 4.15)) parimenti connesso ai morsetti dall'oggetto in prova.

Lo schema indicato è, con opportuno significato dei vari componenti, adatto ai diversi tipi di prova; si richiama fra l'altro l'attenzione sui transitori non desiderati, che possono sorgere in questo circuito per l'effetto di sollecitazioni esterne od interne, transitori che vanno evitati o ridotti per non aumentare le sollecitazioni esterne od interne, transitori che vanno evitati o ridotti per non aumentare le sollecitazioni sul pezzo in prova rispetto a quelle prefissate.

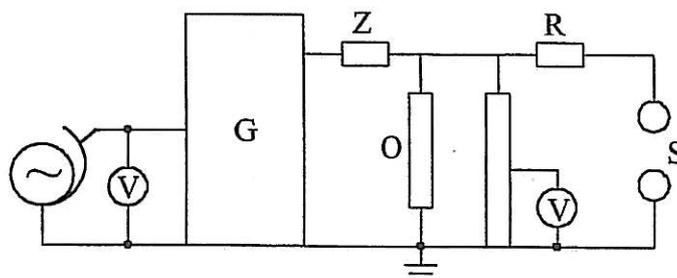


fig. 4.121

## 4.13 Requisiti del generatore

## PROVE DIELETTRICHE

La tensione necessaria per la prova viene prodotta da un opportuno generatore, che sarà ovviamente diverso a seconda del tipo di tensione voluta (permanente o transitoria, continua o alternata ecc.); indipendentemente dalla particolare struttura del generatore, si possono fissare per esso alcuni requisiti di carattere generale.

In primo luogo, il generatore deve fornire, sull'oggetto in prova, che ne costituisce il carico, la tensione della forma e valore voluti, erogando la corrente di carico richiesta, senza deformazioni o eccessive cadute di tensione. Il punto di vista tecnico non è in genere il fattore determinante per il dimensionamento, essendo in genere il servizio a durata limitata e con bassa intermittenza. E' invece necessario che il generatore abbia una "impedenza" interna sufficientemente bassa da non influenzare il risultato della prova, se si presentano dei fenomeni corona, caratterizzati da correnti di elevata intensità e breve durata. Le condizioni più gravose sono spesso determinate dal verificarsi di una scarica sull'oggetto di prova, o in parallelo ad esso, che può comportare sovracorrenti e sovratensioni sulle varie parti del generatore.

#### 4.14 Requisiti degli apparecchi di misura

Per la misura delle tensioni di prova è generalmente sufficiente garantire che l'incertezza complessiva non superi alcuni percento, dato che la variabilità delle varie grandezze d'influenza può comportare, sui valori di scarica o di tenuta di un isolamento, incertezze superiori a tale limite. Le Norme raccomandano, come limite, una incertezza globale del  $\pm 3\%$ , limite che spesso non è facile raggiungere, per effetto soprattutto di non linearità nei vari elementi, di vicinanza di altri oggetti ecc. L'errore è generalmente composto dalle incertezze sul rapporto del divisore, nelle effettive condizioni di impiego, più quelle proprie della lettura sullo strumento; per quest'ultima possono spesso essere applicate le regole generali che ne definiscono la classe e indicano le condizioni in cui non si superano determinati limiti di errore. Per il rapporto del divisore, parte della taratura può essere eseguita per confronto con elementi campioni, a tensione sufficientemente bassa; è però sempre necessario un controllo alla tensione di lavoro, con riferimento ad altre apparecchiature di cui sia nota la precisione.

#### 4.15 Spinterometro a sfere

Un campione di riferimento, abbastanza semplice anche se non molto accurato, per la misura di alte tensioni, è costituito dallo spinterometro a sfere; in senso stretto la sua validità è basata sul consenso generale che riscuote più che sul collegamento alla catena metrologica.

Esso è formato da due elettrodi sferici di cui uno al potenziale di terra (fig. 4.151) con uguale diametro  $D$ , posti a distanza regolabile  $s$ . La tensione che innesca la scarica fra le sfere è funzione di  $D$  ed  $s$ ; il suo valore è fornito, per diametri normalizzati e sulla base di precise condizioni d'impiego, da tabelle emanate dalla IEC. La tensione di scarica è diversa per le due polarità, ma dipende poco dalla forma della tensione applicata; va corretta, in funzione della densità dell'aria ambiente (e cioè della temperatura e della pressione). Esiste un effetto dell'umidità che non è stato tenuto in considerazione nella stesura delle tavole che risalgono peraltro alla fine degli anni 30; l'effetto è però modesto e quantificabile intorno al  $2\%/gm^{-3}$ .

Le prescrizioni di impiego, per spinterometri con sfere disposte orizzontalmente o verticalmente, riguardano soprattutto le distanze minime dagli oggetti estranei e quelle minime o massime  $A$  dal piano di terra; queste distanze richiedono spesso degli spazi disponibili considerevoli, con conseguente costo assai maggiore di quello dello spinterometro puro e semplice. L'incertezza delle misure viene indicata nel  $\pm 3\%$  ( $\pm 5\%$  per tensioni continue) fino a distanze  $s < 0,5 D$ ; tuttavia per diametri inferiori a 12,5 cm e tensioni inferiori a 50 kV la riproducibilità non è assicurata senza un opportuno irraggiamento delle sfere, con una sorgente radioattiva (poco usuale in un laboratorio

## PROVE DIELETTICHE

industriale) o con radiazioni ultraviolette. Esistono diversi diametri normalizzati nel campo che va da 2 fino a 200 cm; tenuto conto dei limiti di impiego relativi alla distanza, questo si traduce anche in valori diversi della massima tensione di utilizzo. Essendo il campo prodotto poco disuniforme, i gradienti medi sono intorno ai 20 kV/cm : uno spinterometro con diametro pari ad 1 m può pertanto misurare circa 1 MV alla massima distanza tra le sfere di 50 cm.

Lo spinterometro ha, finché non interviene la scarica, un assorbimento ridotto; esso però annulla la tensione al momento stesso in cui la misura. Le Norme indicano i valori della resistenza da mettere in serie allo spinterometro, per proteggere le sfere e per evitare oscillazioni con la capacità del pezzo in prova, all'atto della scarica.

Lo spinterometro può essere usato per la misura di una tensione, tenuta ad un valore prefissato, cercando la distanza massima per la quale si verifica la scarica. Più spesso è usato come campione di riferimento, per la taratura di un altro apparecchio, ponendo le sfere ad una distanza prefissata e aumentando la tensione fino ad ottenere l'innesco. La misura deve essere ripetuta più volte, in modo da ottenere risultati consistenti.

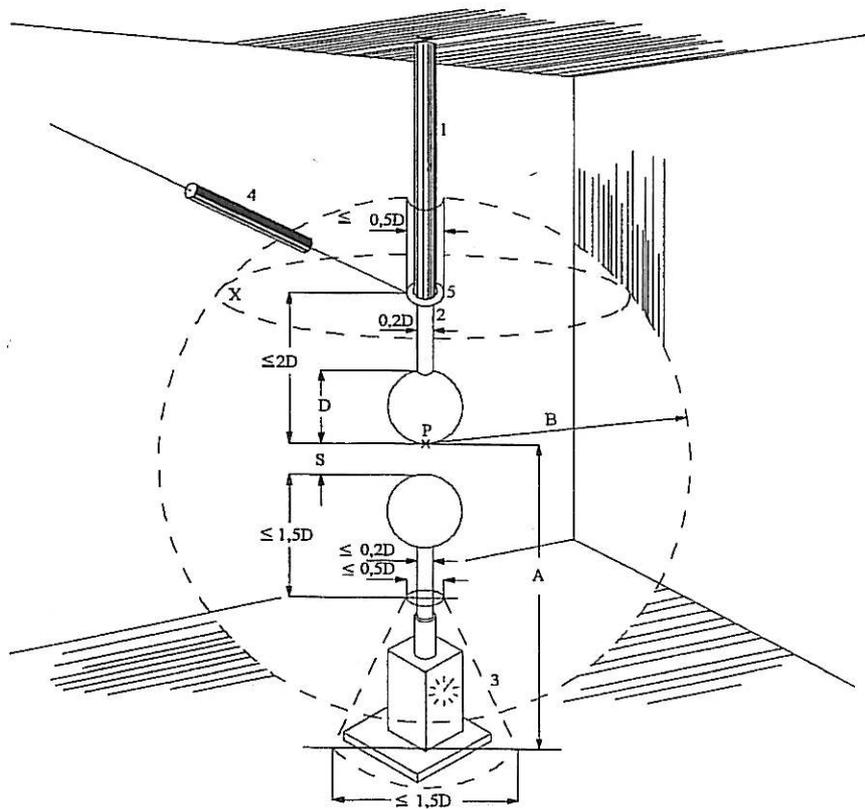


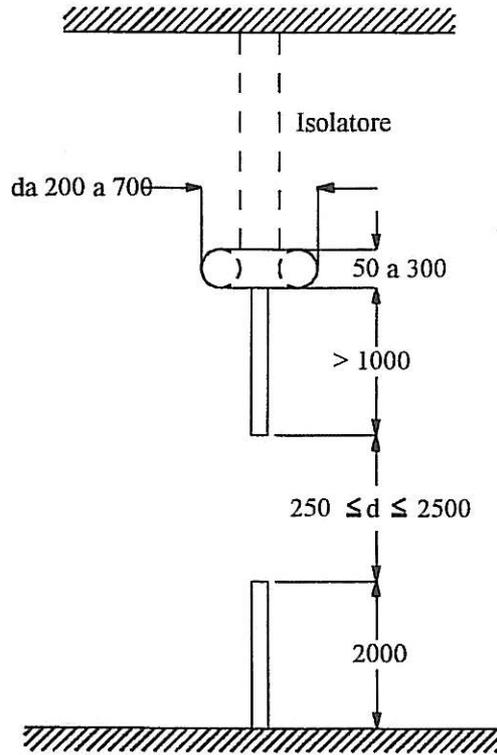
fig. 4.151

Più recentemente, per ovviare al comportamento abbastanza erratico dello spinterometro in presenza di tensioni continue, dovuto alla presenza di particelle in sospensione nell'aria che vengono attratte nella zona a campo elevato, si è introdotto l'impiego di un semplice spinterometro asta-asta per il quale, con una incertezza complessiva del  $\pm 3\%$  ( $3\sigma$ ), la tensione di scarica viene data, per entrambe le polarità, da una espressione del tipo:

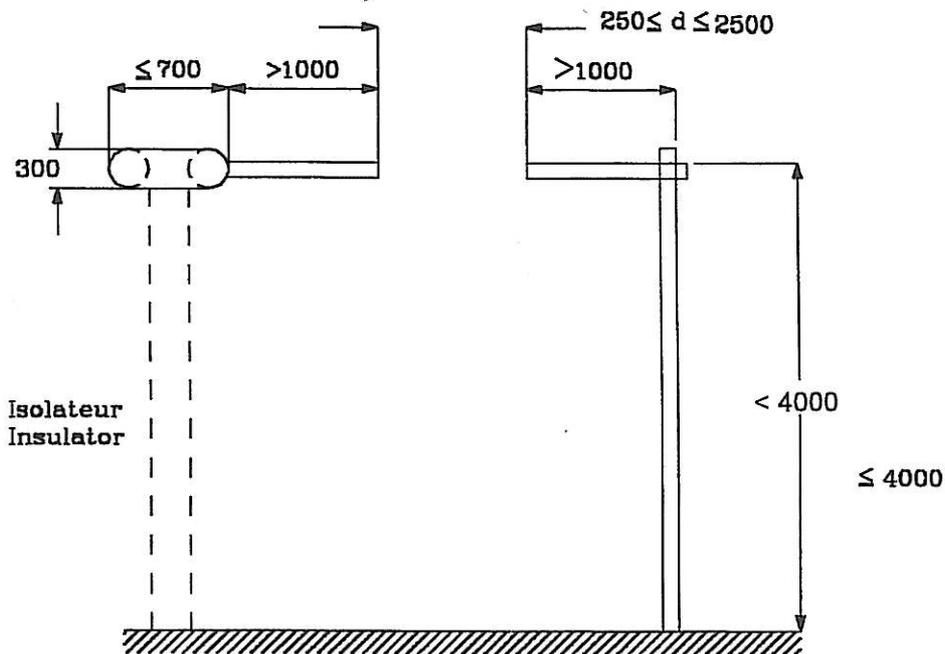
$$U_0 = 2 + 0.534 \cdot d$$

PROVE DIELETTICHE

dove  $U_0$  è in kV e  $d$  è la distanza tra gli elettrodi in mm. La disposizione sperimentale e i limiti per le dimensioni geometriche sono dati nelle figure seguenti. I dati sono validi in un campo di distanze tra 250 e 2500 mm e per un campo di umidità tra  $1 \text{ gm}^{-3}$  e  $13 \text{ gm}^{-3}$ .



Disposizione verticale di uno spinterometro asta-asta



Disposizione orizzontale di uno spinterometro asta-asta

L'impiego di spinterometri tuttavia risulta anche poco efficace nel caso in cui si debbano fare misure ripetute per la procedura abbastanza laboriosa con cui si determina la tensione di scarica: in certe condizioni il suo impiego può essere anche controproducente, dal momento che la misura va fatta con tutti gli elementi circuitali presenti, e quindi con lo stesso oggetto in prova inserito nel circuito. La tendenza attuale è pertanto quella di abbandonarlo per un uso sistematico e di utilizzarlo solo per taratura o verifica di un adeguato divisore di tensione.

#### 4.16 Divisore di tensione

Un divisore di tensione è in primo luogo definito dal suo rapporto nominale  $k_n$ , cioè dal numero (in generale assai maggiore dell'unità) per il quale bisogna moltiplicare la lettura della tensione  $V_2$ , ottenuta ai suoi morsetti di uscita (fig. 4.161) per ottenere il valore della tensione  $V_1$ , ai suoi morsetti di entrata.

Perché il rapporto effettivo del divisore  $k$  sia prossimo a  $k_n$  in un vasto campo di forme d'onda della tensione applicata, è necessario che le due

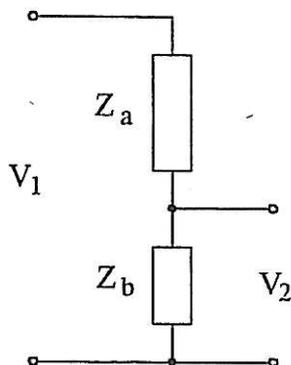


fig. 4.161

impedenze  $Z_a$  e  $Z_b$  dello schema di fig. 4.161 sinusoidali, ossia abbiano lo stesso andamento con la frequenza. Il rapporto del divisore può essere influenzato dalle condizioni ambientali, che influiscono in modo diverso su  $Z_a$  e  $Z_b$ , dagli elementi parassiti dovuti a capacità e conduttanze verso massa, resistenze e induttanze serie, ecc., da fenomeni di effluvio, che lo rendono funzione della tensione, da effetti di carico sulla bassa tensione ecc.

Uno degli effetti predominanti, anche per le dimensioni fisiche non trascurabili che il divisore deve assumere, è dato dalla capacità parassita fatta parassiti vanno considerati in prima approssimazione; ne risulta (fig. 4.162), se  $V_2 \ll V_1$ :

$$\frac{\overline{V_2}}{\overline{V_1}} = \frac{Z_b}{Z_a \left( 1 + \frac{1}{6} Z_a Y_a + \dots \right)}$$

la presenza di una capacità parassita dà quindi luogo a una costante di tempo  $R_a C/6$ , se il divisore è ohmico; ad un rapporto  $k=k_n (1 - Cd/6Ca)$  se il divisore è capacitivo.

Gli errori di un divisore sono dovuti non tanto alla presenza delle capacità parassite, di cui si può tenere conto in sede di taratura, quanto della loro componente variabile, per effetto, ad esempio, della distanza delle pareti e della presenza di oggetti estranei.

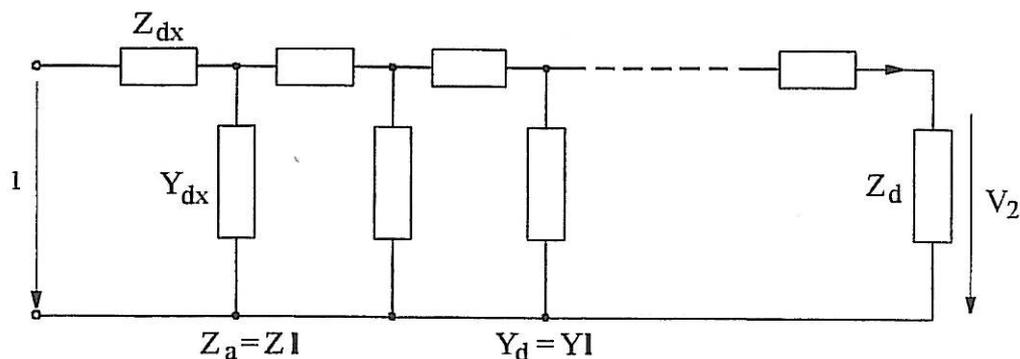


fig. 4.162

## 4.17 Condizioni dell'oggetto in prova

Nell'esecuzione di una prova dielettrica, può avere notevole importanza la disposizione dell'oggetto in prova. Per oggetti in aria, il cui campo elettrico è determinato da elettrodi di estensione limitata, rispetto alla loro distanza (come esempio gli isolatori, i sezionatori ecc.) le sollecitazioni dielettriche possono essere influenzate dalla distanza dalle pareti e dal piano di terra, dalla forma e dimensioni dei conduttori usati per i collegamenti ecc. Le Norme fissano in genere questi particolari, per ogni tipo di apparecchiatura. Ad esempio, nel caso di isolatori portanti la prova dovrebbe essere effettuata montando l'oggetto in prova su una struttura metallica che simuli quella impiegata nel normale esercizio e applicando in testa all'isolatore un conduttore che simuli la sbarra che verrà collegata; analogamente le catene di isolatori devono essere equipaggiate con la morsetteria etc.

Per isolamenti in aria, le tenute sono garantite per le condizioni atmosferiche di riferimento che per i cicli temperati sono date da:

- pressione atmosferica : 101,3 kPa (760 mmHg)
- temperatura : 20 °C
- umidità assoluta : 11 g/m<sup>3</sup>

Parametri diversi possono essere specificati per climi tropicali (tipicamente 25 °C e 15 g/m<sup>3</sup>). Le prove effettuate in condizioni diverse dalle nominali prevedono una correzione per tener conto delle mutate capacità di tenuta. In generale la tensione viene corretta per la densità relativa dell'aria e per l'umidità secondo i dati riportati nella figura seguente.

Se l'isolamento non è influenzato dalle vicende atmosferiche (ad esempio l'olio di un trasformatore o il gas di una stazione blindata in SF<sub>6</sub>) non si effettuano correzioni.

Nel caso di isolamenti solidi, liquidi o misti, è importante che essi siano pienamente efficienti, che abbiano cioè seguito i trattamenti necessari caso per caso. Ciò comporta che le prove prescritte per le macchine nuove non possano, in generale, essere ripetute con la stessa garanzia su macchine usate. La rigidità dielettrica degli isolanti generalmente diminuisce al crescere della temperatura ma, salvo casi particolari, le prove vanno eseguite a temperatura ambiente.

Per alcuni isolamenti superficiali (tipicamente isolatori da esterno), sono prescritte prove sotto pioggia o con depositi conduttori artificiali; esse sono in genere basate, più che sulla fedele riproduzione di condizioni di esercizio, sulla favorevole esperienza del materiale selezionato mediante tali tipi di prove; non è sempre possibile, perciò, estendere il significato ad apparecchiature di diverse caratteristiche, costruttive o funzionali.

Queste prove specifiche sono normalmente classificate come prove di tipo (quindi su un solo esemplare) mentre la stessa prova effettuata a secco può essere richiesta su tutti gli elementi di un lotto, per verificare l'assenza di difetti costruttivi.

## PROVE DIELETTICHE

**Esempio**

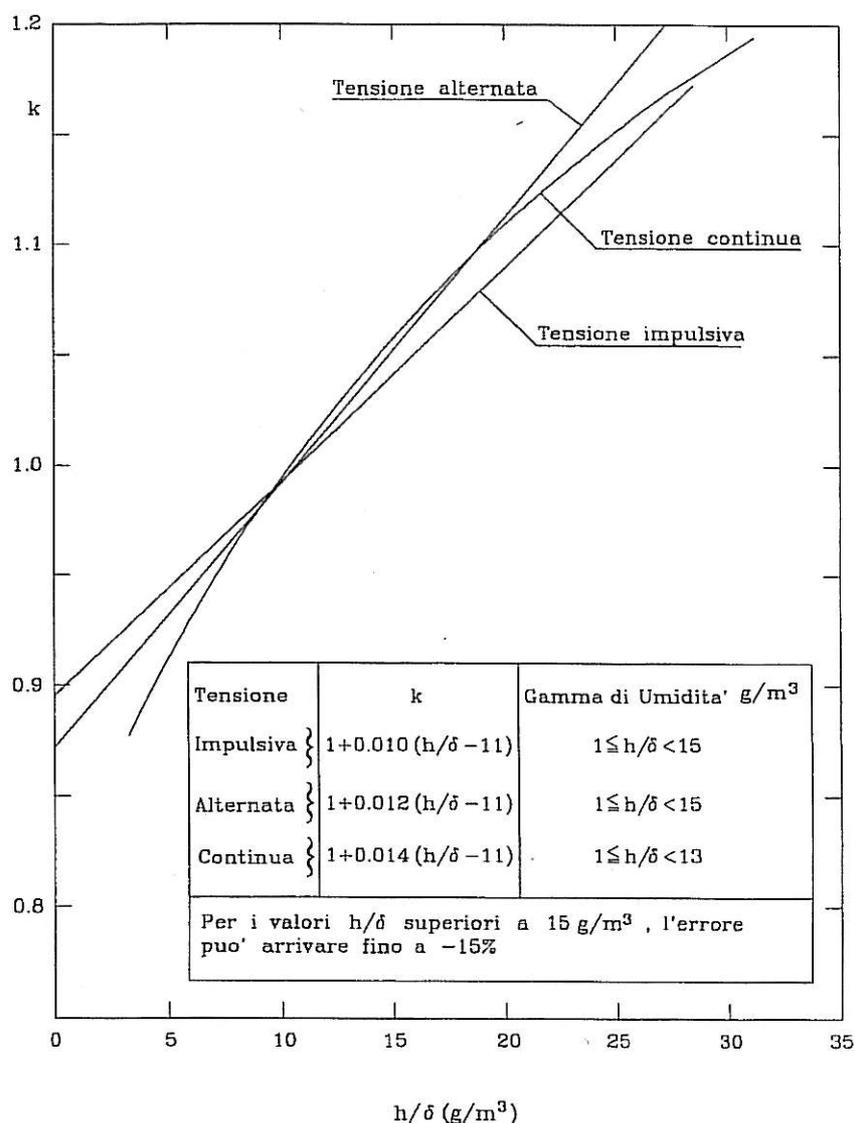
Si debba effettuare una prova di accettazione su un sezionatore con  $U_m = 145$  kV. dalla Tabella si vede che la tensione di prova a frequenza industriale è di 275 kV, nelle condizioni atmosferiche di riferimento.

Il giorno della prova le condizioni sono le seguenti:

- pressione atmosferica : 102,5 kPa (769 mmHg)
- temperatura : 18 °C
- umidità assoluta : 8 g/m<sup>3</sup>

La densità relativa è pertanto:

$$\delta = \frac{p}{p_0} \cdot \frac{T_0}{T} = \frac{102,5}{101,3} \cdot \frac{273 + 20}{273 + 18} = 1,019$$



Il coefficiente di correzione per l'umidità è pari a

$$k_u = 1 + 0,012(8/1,019 - 11) = 0,962$$

La tensione di prova diventa pertanto  $V = 275 \cdot 1,019 \cdot 0,962 = 270 \text{ kV}$

Si nota come alti valori di densità dell'aria (temperatura bassa e pressione alta) contribuiscano ad aumentare la tenuta e lo stesso vale per il contenuto di vapor d'acqua. In questo caso però si deve tener presente che non vi debbono essere condensazioni (vapore non saturo): in caso contrario il film d'acqua che si deposita sulla superficie può modificare radicalmente la ripartizione di tensione e quindi il risultato della prova.

Ovviamente, se nelle condizioni ambientali indicate si determina la tensione di scarica di un oggetto, il valore può essere riferito alle condizioni standard dividendo il valore trovato per i coefficienti di correzione.

Si noti che, per norme relative a prodotti specifici, può esserci una certa varietà nella formulazione del coefficiente di correzione per l'umidità, in dipendenza anche dalla polarità.

E' da ritenere che la correzione sia comunque abbastanza incerta, anche per la difficoltà di acquisire dati sperimentali certi in condizioni ambientali che sono difficilmente controllabili.

## 4.2 Prove dielettriche con tensioni alternate

### 4.21 Trasformatori per alte e altissime tensioni

Una tensione alternata a frequenza industriale può essere fornita dalla rete di alimentazione, o da un opportuno generatore e convertita al valore voluto tramite un trasformatore elevatore; la regolazione avviene sull'alimentazione, per mezzo di autotrasformatore a rapporto variabile o agendo sull'eccitazione del generatore.

I trasformatori elevatori si costruiscono facilmente in unità singole fino a  $500 \approx 600 \text{ kV}$ , eventualmente ricorrendo a disposizioni con nucleo isolato; per tensioni superiori si ricorre a schemi in cascata, del tipo illustrato in fig. 4.211. In esso ogni trasformatore eroga sull'avvolgimento di A.T. la potenza apparente  $VI$ ; tuttavia il primario del secondo trasformatore è alimentato dal terziario del primo, che assorbe perciò dall'alimentazione la potenza  $2VI$ .

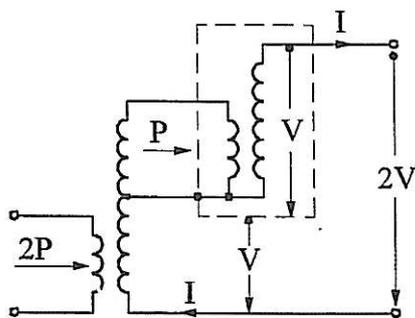


fig. 4.211

Analizzando lo schema equivalente di due trasformatori in cascata (fig. 4.2 12) ci si può rendere conto che essi non si distribuiscono in parti uguali la tensione a carico a causa delle diverse cadute (o sopraelevazione) di tensione; se il carico è capacitivo, questo effetto può essere corretto

PROVE DIELETTRICHE

facendo assorbire ad ogni trasformatore una conveniente potenza reattiva (con traferro nel nucleo o con reattore regolabile in parallelo).

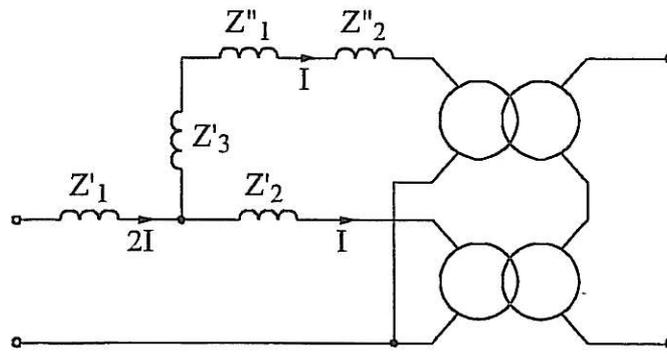


fig. 4.212a

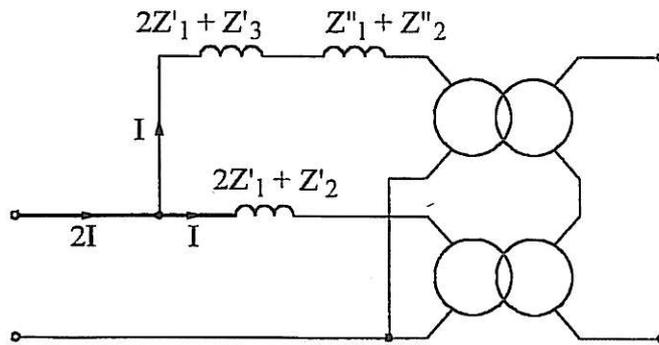
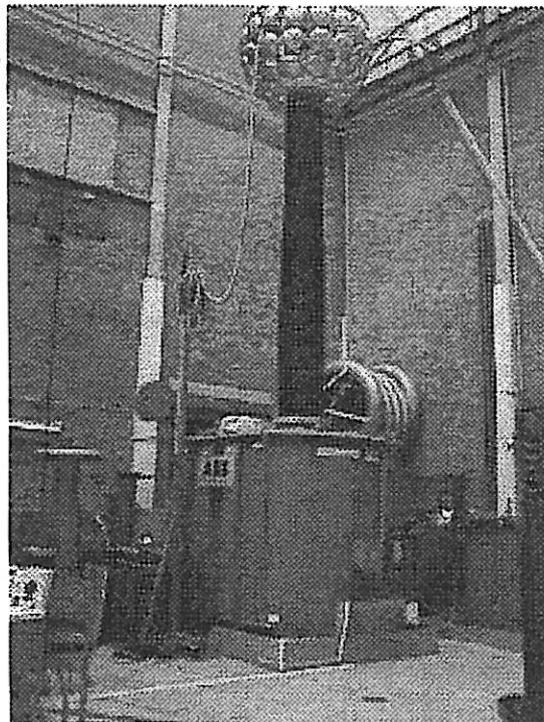


fig. 4.212 b



Trasformatore 700 kV - 2 MVA

In generale, il circuito equivalente, visto dai morsetti di alimentazione, ha lo schema di fig. 4.213 ; in esso però, sia la reattanza  $X_0$  che la  $X_1$  possono non essere lineari e portare a fenomeni di risonanza sulla fondamentale o su sue armoniche.

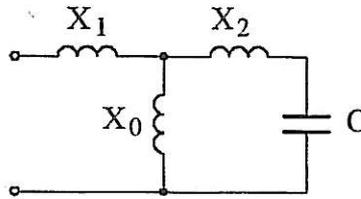


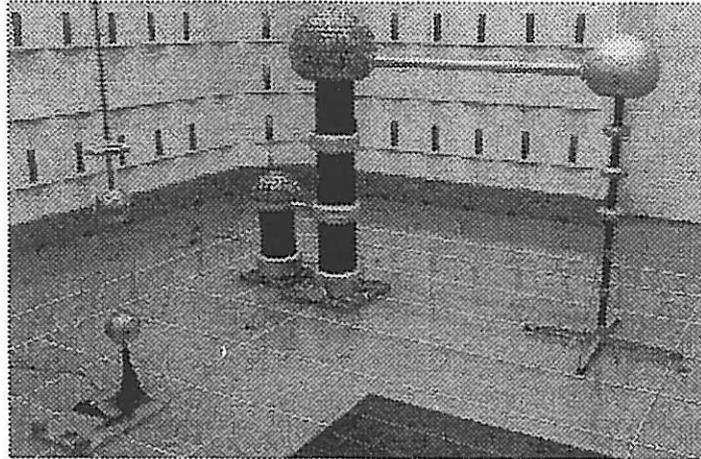
fig. 4.213

Le Norme richiedono che la corrente permanente di cortocircuito, calcolata alla tensione di prova ai morsetti di A.T., non sia inferiore a 1 A. Ciò può limitare l'uso di più trasformatori in cascata (per il crescere della impedenza equivalente) o l'uso di un trasformatore ad una tensione molto inferiore alla sua nominale.

Valori inferiori (0,1 A) sono richiesti nelle prove su provini isolanti di piccole dimensioni, e valori molto maggiori (da 6 a 12 A) per le prove di isolamenti rivestiti di strati superficiali conduttori, atti a simulare i depositi contaminanti che si riscontrano in servizio.

### *Esempi costruttivi*

Trasformatori in cascata – Esecuzione per interno con cassa isolante e senza passante



$V_n = 1650$  kV – due unità in parallelo sul primo stadio per aumentare la potenza in uscita.

Si notano gli elettrodi di schermo per limitare il valore del campo massimo (elettrodi il cui diametro cresce con la tensione), il partitore collegato alla testa della cascata e lo spinterometro a sfere, posizionato peraltro con una distanza tra le sfere tale da non poter scaricare.

Nella figura successiva la soluzione costruttiva per i trasformatori è più convenzionale, con cassa metallica e passante in porcellana. Si notano le strutture isolanti che sorreggono il secondo e terzo trasformatore, le schermature delle stesse casse per evitare gli spigoli e nuovamente gli elettrodi di testa con diametri via via crescenti. Anche in questo caso l'uscita è connessa ad un divisore di tensione. La torre sullo sfondo è un generatore di impulsi (vedi capitolo seguente), in esecuzione per esterno.

## PROVE DIELETTICHE

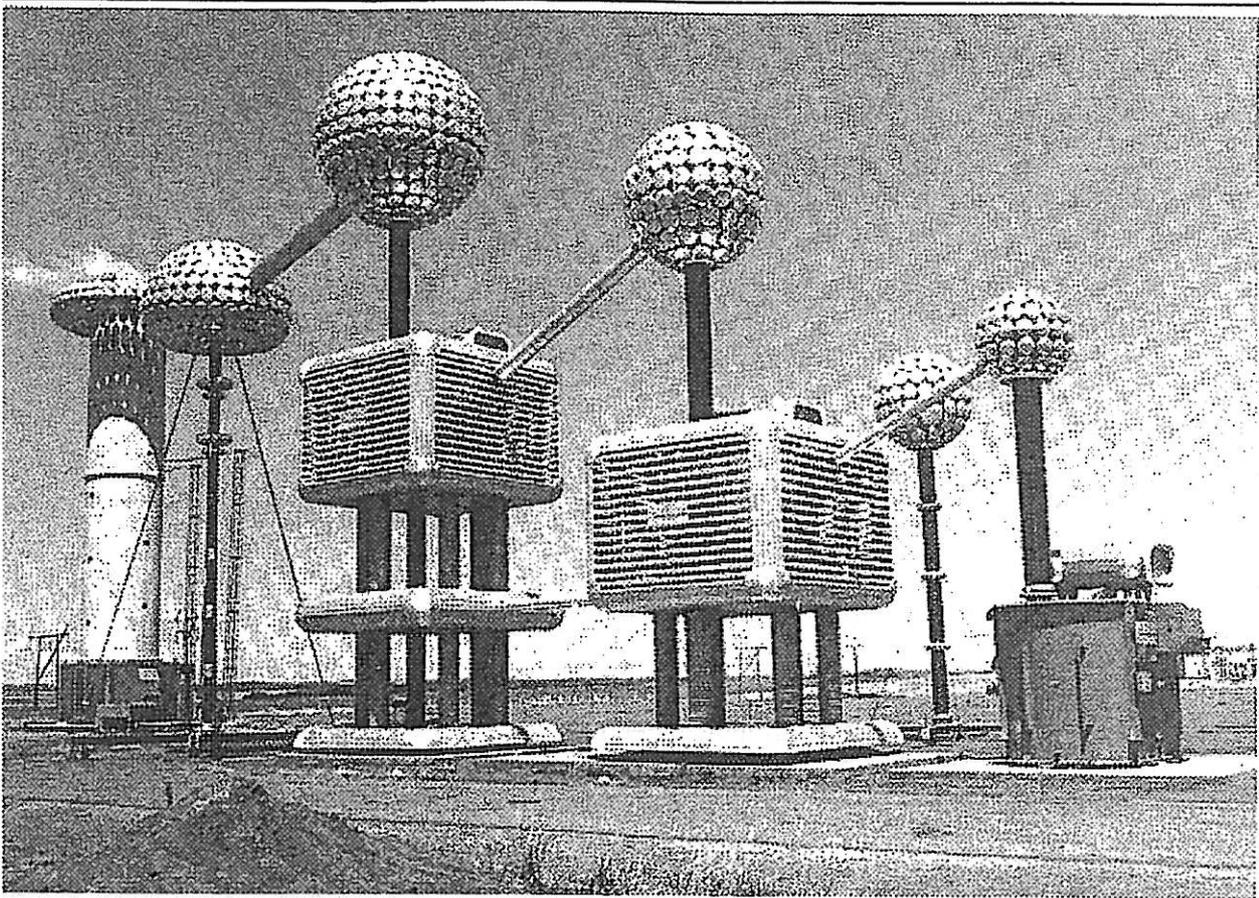


Fig. 4.124

Impianto di prova per 1800 kV AC costituito da tre unità in cascata – Esecuzione per esterno con cassa metallica e passanti in porcellana

#### 4.22 Prove di tenuta a f. i.

Le prove di tenuta a f.i. sono prove di tenuta che si eseguono sulle macchine e sugli apparecchi destinati a funzionare con tensioni alternate.

Si possono distinguere :

- a) prove con "tensione applicata", in cui la tensione di prova è applicata, generalmente per 60", fra parti metalliche destinate a funzionare a tensioni diverse (p. es. fra avvolgimenti di alta e bassa tensione, o fra avvolgimenti e massa); l'isolamento deve essere tutto dimensionato per lo stesso livello di tensione;
- b) prove con "tensione indotta", possibili solo per gli avvolgimenti, e previste per sollecitare sia l'isolamento fra spire, sia quello esterno - anche se graduato - con una tensione proporzionalmente maggiore (tipicamente doppia) di quella d'esercizio; allo scopo di non saturare il nucleo, la frequenza della sorgente di alimentazione deve essere convenientemente aumentata: per gli avvolgimenti trifasi la prova può essere eseguita con più prove monofasi, anche se questo comporta che non venga riprodotta correttamente la sollecitazione tra fasi diverse.

- c) prove di lunga durata, con valori generalmente di poco superiori alle tensioni di esercizio, mantenute per un tempo sufficientemente lungo per poter mettere in risalto i fenomeni termici.

### *Esempio*

Si debba effettuare la prova di tensione indotta su un trasformatore trifase con tensioni nominali 20000/400 V. E' previsto che la tensione di prova sia doppia rispetto alla nominale.

Si tratterebbe pertanto di applicare al lato b.t. una tensione trifase di 800 V ottenendo quindi, per il rapporto spire, una tensione in uscita di 40 kV. E' ovvio che, lavorando il nucleo magnetico in corrispondenza del ginocchio della curva di magnetizzazione (circa 1,7 T), non è possibile arrivare ad una induzione doppia senza entrare completamente in saturazione.

Ricordando che la f.e.m. è pari a:

$$E = 4,44 f N \Phi_M$$

è sufficiente utilizzare una frequenza almeno doppia di quella di esercizio per poter applicare una tensione doppia, con lo stesso flusso. Se la frequenza è più elevata, il flusso massimo e quindi l'induzione, risulteranno proporzionalmente ridotti. Tipicamente si utilizzano frequenze nel campo 150÷300 Hz; non si va oltre per motivi connessi anche alla sollecitazione dielettrica (aumentando la frequenza aumenta il numero di cicli e quindi anche i massimi di sollecitazione nel tempo fissato per la prova). Nell'ambito del prove a f.i. questo tipo di prova è l'unico possibile per macchine con isolamento graduato (trasformatori collegati a stella con centro stella destinato ad essere collegato a terra).

Per queste prove sono utilizzati convertitori di frequenza ottenuti combinando sistemi motore-generatore con adeguato numero di poli; alle frequenze indicate il trasformatore può già avere un comportamento di natura capacitiva (prevalenza della reattiva, soprattutto dei passanti rispetto alla magnetizzante). Se il generatore è di potenza modesta e si deve pensare ad un rifasamento, è possibile che siano necessari reattori piuttosto che condensatori.

Nei trasformatori il possibile guasto si evidenzia con un assorbimento anomalo di corrente su una o più fasi, assorbimento che spesso impedisce al regolatore di sostenere o di raggiungere la tensione di prova.

Per tutte le prove con tensione applicata, specie su isolamenti in aria, il valore molto alto della tensione rispetto a quella di esercizio (si veda la Tabella 4.11) fa sì che durante la prova si verifichino fenomeni, anche molto appariscenti di ionizzazione che però sono "normali" e certamente non compromettono le capacità dell'oggetto di funzionare correttamente in esercizio.

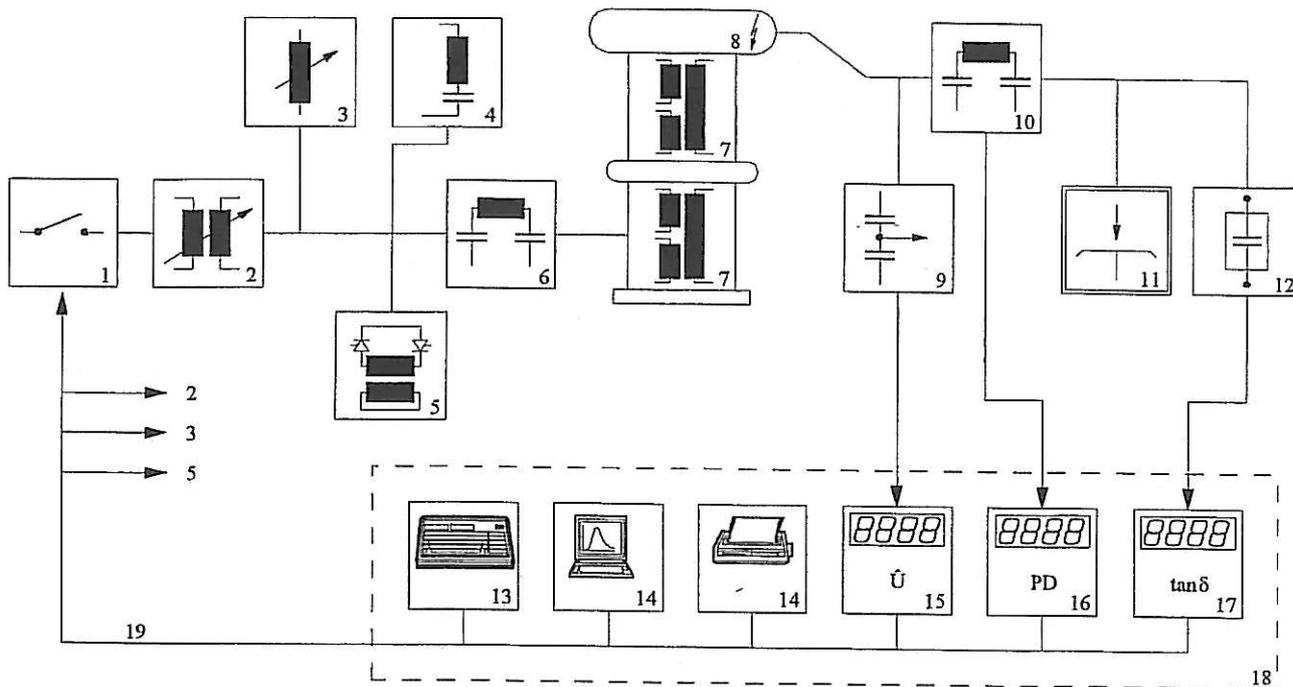
Nell'applicare una tensione specificata, occorre evitare i transitori dovuti all'inserzione del circuito o alla regolazione della tensione; anche la velocità di salita della tensione può avere la sua importanza, se eccessiva perché non permette una misura accurata, se troppo bassa perché prolunga la sollecitazione sul pezzo in prova.

Raggiunto il valore prescritto per la prova, questa viene mantenuta per il tempo prescritto. Il controllo del buon esito della prova è affidato alla constatazione di assenza di scariche, interne od esterne; su alcune apparecchiature in aria possono essere ammesse delle scariche su parte dell'isolamento.

Ovviamente la prova in sé è per certi aspetti grossolana e non mette in evidenza eventuali danneggiamenti minuti ma progressivi (ad esempio, in un sistema isolante costituito da carta-olio vi potrebbero essere scariche parziali con conseguenti modificazioni della caratteristiche). Per taluni sistemi può essere allora necessario ricorrere a sistemi in grado di consentire anche una diagnostica

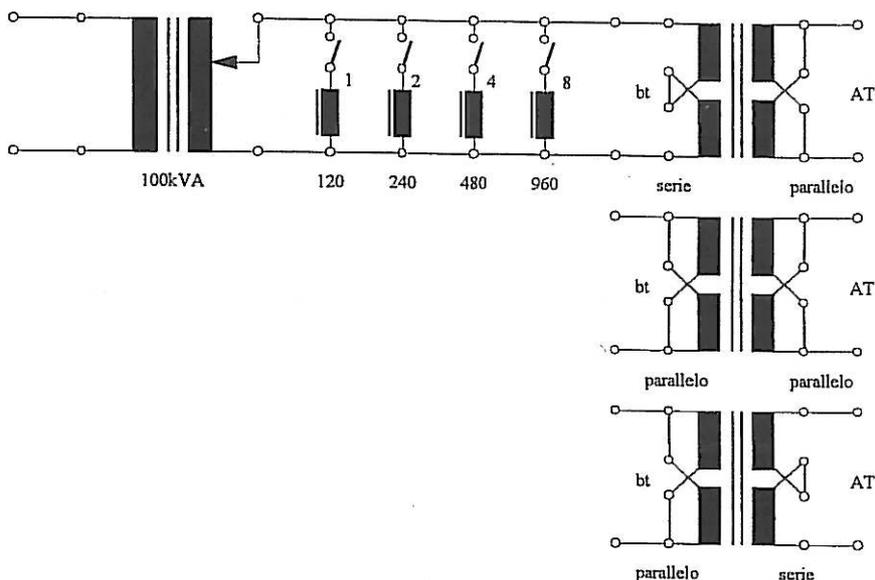
PROVE DIELETTRICHE

basata sul rilievo di parametri del sistema isolante (capacità e angolo di perdita ottenute con adeguato ponte di Schering) prima e dopo la prova e/o misura delle scariche parziali.



Un impianto completo, più complesso di quelli illustrati in precedenza, è indicato nella figura. Il trasformatore elevatore è costituito da due unità in cassa isolante che quindi si possono semplicemente impilare, di un partitore capacitivo (9) con annesso voltmetro (15), filtro di alta tensione per la misura delle scariche parziali (10, 16), condensatore di accoppiamento in gas compresso per misura di  $\text{tg}\delta$  (12 e 17).

Sul primario si nota il regolatore (2), un eventuale filtro tarato su una specifica armonica per ridurre l'eventualità di una risonanza (4), un ulteriore filtro per attenuare i disturbi provenienti dalla rete (6) ed un dispositivo a tiristori per affrettare l'intervento dell'interruttore di protezione in caso di scarica con basso valore di corrente (5).



## PROVE DIELETTICHE

L'accensione dei due tiristori provoca un cortocircuito sul primario e quindi un intervento più rapido delle protezioni. C'è ovviamente la possibilità di rifasamento che per il tipo di prova richiede di solito degli induttori (3).

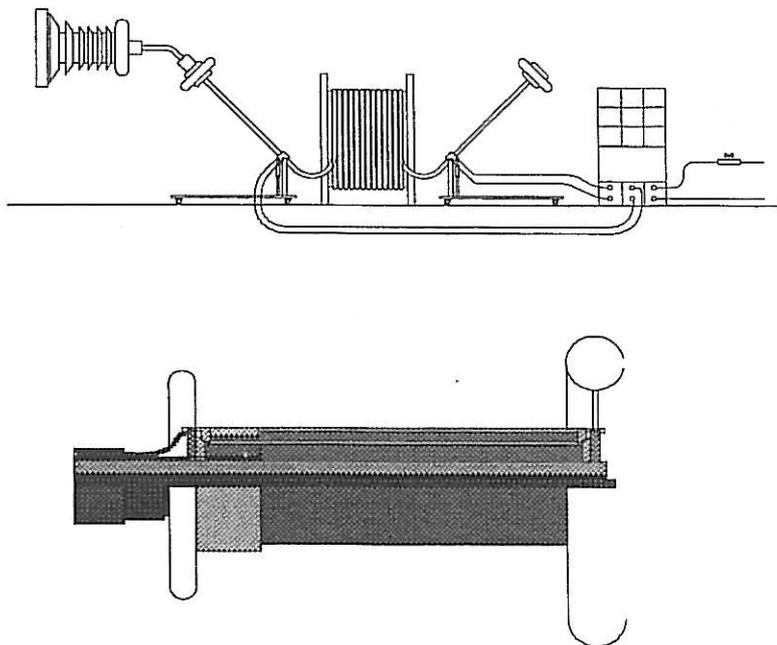
Per rendere più flessibile il sistema, lo stesso primario può essere strutturato con diverse parti collegabili in serie/parallelo per ottenere una maggiore possibilità di regolazione della tensione secondaria.

Impianti di concezione recente possono essere completamente automatizzati ed in particolare si possono gestire le eventuali sequenze che fossero necessarie (salita della tensione con una determinata derivata, permanenza per un tempo prefissato, discesa, etc.) ed effettuare le registrazioni delle grandezze di interesse.

Quando sia importante il fattore peso e quindi per prove "sul posto" si usano anche circuiti risonanti, nel caso in cui l'oggetto in prova presenti una capacità ben definita con basse perdite (caso di cavi o di stazioni blindate in SF<sub>6</sub>). L'unità che viene trasportata è in questo caso un induttore (di dimensioni notevoli comunque, perché deve essere previsto per l'intera tensione) che dovrebbe entrare in risonanza con la capacità dell'oggetto in prova; l'alimentatore può avere una potenza modesta corrispondente alle sole perdite del sistema.

Se la frequenza deve essere fissa, l'induttore deve essere ovviamente variabile mentre se è consentito che questa possa variare in un certo campo l'induttore può essere fisso ed in questo caso la condizione di risonanza viene cercata aggiustando la frequenza a mezzo di un inverter.

Problemi particolari si possono porre durante queste prove quando si tratti di alimentare oggetti in cui il campo è confinato (ad esempio cavi) e che per il collegamento richiederebbero l'esecuzione di passanti con tensioni di tenuta estremamente elevate. Esiste la possibilità di fare un controllo del campo usando passanti ad acqua che con la sua elevata costante dielettrica è in grado di dare il necessario controllo lungo la superficie esterna. Quest'acqua deve peraltro avere delle ottime caratteristiche isolanti, dal momento che viene interessata dalla totale tensione applicata e va quindi accuratamente deionizzata con impianti adatti utilizzando resine particolari (zeoliti). Si deve anche provvedere ad un adeguato raffreddamento dato che, comunque, la potenza dissipata è di qualche kW.



Esempio di passante ad acqua per il controllo del campo all'uscita di un cavo

## PROVE DIELETTRICHE

## 4.23 Misura della tensione di prova

La tensione di prova è generalmente misurata con un divisore capacitivo (più raramente fino a 200 kV con un trasformatore di tensione) associato ad un voltmetro.

Le norme prescrivono che il valore della tensione di prova sia pari al suo valore di cresta diviso per  $\sqrt{2}$  ossia uguale al valore efficace della sinusoide che ha lo stesso valore di cresta. Di conseguenza il voltmetro dovrà portare sul valore di cresta e la scala dello strumento essere opportunamente tarata, tenendo conto del fattore  $\sqrt{2}$ .

Questa misura può essere effettuata ricorrendo a schemi con raddrizzatori, i più comuni dei quali sono indicati nelle figure da 4.231 a 4.233; il loro comportamento è tuttavia diverso quando essi siano collegati alla b.t. di un divisore capacitivo rappresentabile, ai morsetti AB, con la sua capacità equivalente  $C_e$ : lo schema di fig. 4.231 assorbe infatti una corrente unidirezionale che non può circolare nella capacità  $C_e$ ; negli altri due schemi, la capacità  $C_e$  si combina con la capacità  $C_0$  la costituisce.

Gli strumenti indicatori (microamperometri) negli schemi di figura 4.231 e 4.232 possono essere oggi sostituiti con voltmetri numerici; non si deve però eccedere nel valore della costante di tempo RC, per consentire allo strumento di seguire le variazioni della tensione di cresta, sia in salita

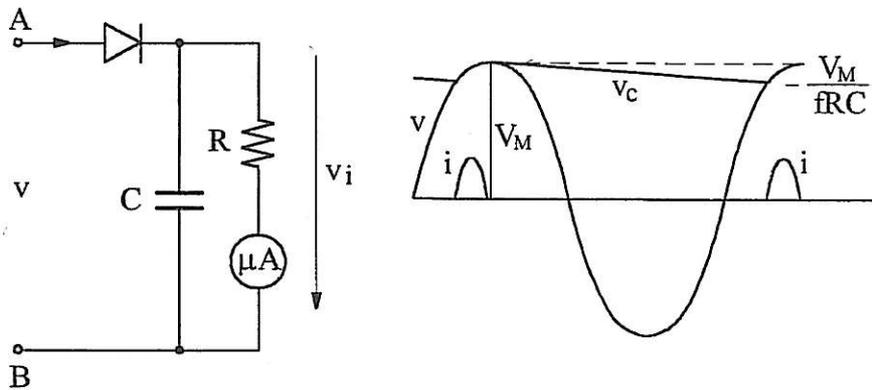


fig. 4.231

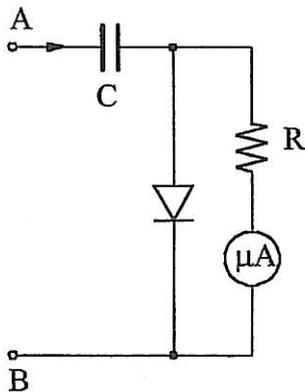


fig. 4.232

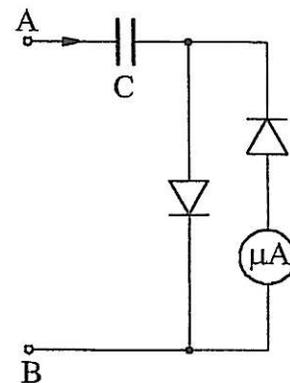


fig. 4.233

che in discesa. Analogamente si può pensare di inserire, fra i morsetti del divisore ed il circuito di misura un opportuno amplificatore (fig. 4.234).

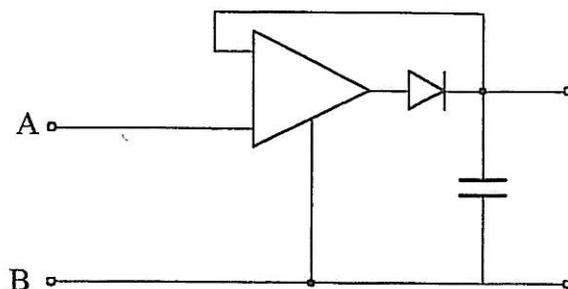


fig. 4. 234

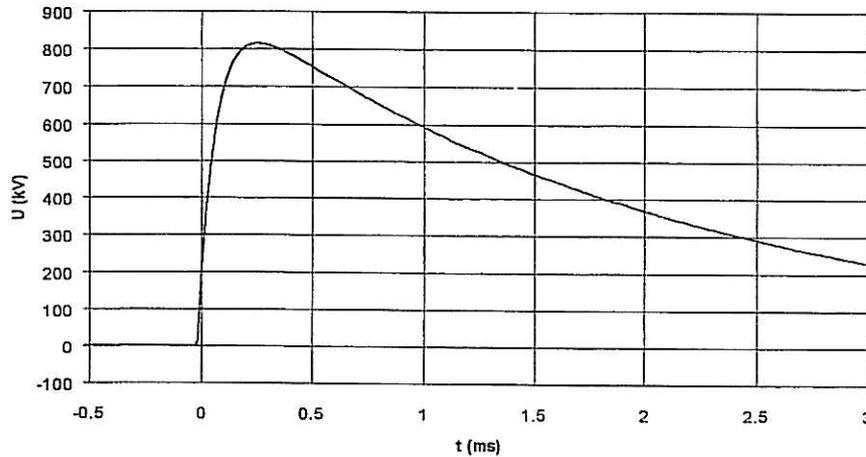
#### 4. 24 Determinazione della forza d'onda

Perché la prova sia riproducibile, la forma d'onda della tensione applicata deve essere il più possibile prossima alla sinusoidale, con i semiperiodi simmetrici; un controllo della forma d'onda può esser fatto, in prima approssimazione, con un oscillografo, con miglior cura attraverso l'analisi armonica.

Un metodo rapido e pratico è il confronto del rapporto fra valore di cresta e valore efficace; si ammette che questo rapporto possa deviare del  $\pm 5\%$  dal valore di  $\sqrt{2}$ .

## Prove dielettriche

La durata della coda è espressa dalla "durata all'emivalore" e cioè dal tempo fra l'origine dell'onda e il punto della coda dove si raggiunge la metà del valore di cresta. Gli impulsi di fulminazione hanno durata del fronte dell'ordine del  $\mu\text{s}$  ( $1 \mu\text{s} = 10^{-6} \text{s}$ ) e coda di alcune decine o centinaia di  $\mu\text{s}$  e l'onda normalizzata ha fronte di 1,2  $\mu\text{s}$  e durata all'emivalore di 50  $\mu\text{s}$ .

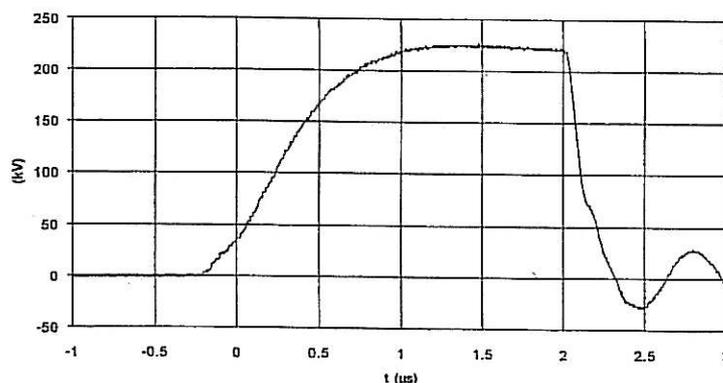


Per gli impulsi di manovra il tempo alla cresta è fra 100 e 500  $\mu\text{s}$  (250  $\mu\text{s}$  è il valore normalizzato) e la durata all'emivalore dell'ordine di 2500  $\mu\text{s}$  o maggiore. In questo caso la durata del fronte viene definita come il tempo compreso tra lo zero e l'istante a cui viene raggiunto il massimo, il che pone qualche problema di determinazione perché la zona intorno ad esso è molto piatta. L'andamento della tensione è comunque descritto da espressioni del tipo

$$v(t) = K V_m (e^{-at} - e^{-bt})$$

con  $a$ ,  $b$  reciproci delle costanti di tempo della coda e del fronte rispettivamente. Andamenti più realistici che tengono conto del fatto che, di norma, la partenza dell'impulso presenta sempre una derivata di valore molto basso (vedi Fig. 4.311) richiederebbero la considerazione di un terzo esponenziale per una rappresentazione più corretta.

L'andamento della tensione può essere bruscamente portato a zero (fig. 4.312) intenzionalmente con adeguato dispositivo o a seguito di una scarica sull'oggetto in prova; ciò può avvenire sia durante la coda che sul fronte (più raramente) ed in questo caso, l'impulso si dice troncato (sulla coda o sul fronte). I parametri dell'onda che si sarebbe prodotta in assenza di troncatura (durata del fronte, della coda, valore di cresta) sono detti valori presunti e caratterizzano l'onda, assieme al tempo  $T_c$  alla troncatura: le Norme generali e le prescrizioni associate si applicano per impulsi aventi  $T_c \geq 0,5 \mu\text{s}$ .



Impulso troncato sulla coda -  $T_c = 2,2 \mu\text{s}$

## Prove dielettriche

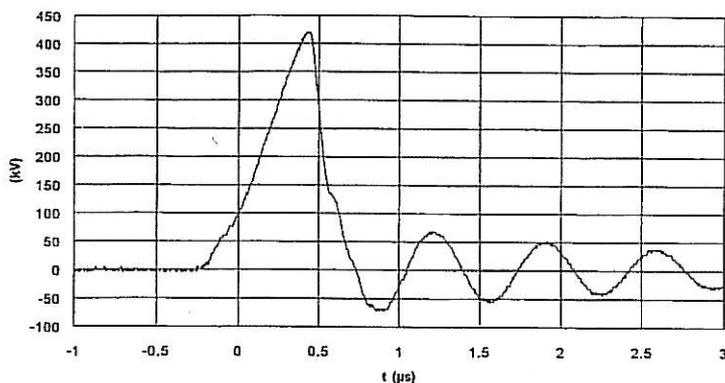
Impulso troncato sul fronte -  $T_c = 0,7 \mu s$ 

fig. 4.312

I casi più frequenti di impiego di onde tronche si hanno per la verifica del comportamento di avvolgimenti di macchine (in particolare di trasformatori) nei quali, per la presenza di oscillazioni interne, si viene a creare una distribuzione molto disuniforme e critica quando la prima, associata al transitorio del fronte, non si è ancora esaurita. Se l'onda tronca si verifica invece a seguito di una scarica non prevista all'interno del sistema isolante, il tempo a cui si verifica è un indicatore dello scarto esistente tra la tensione di tenuta presunta e quella effettiva. Una scarica sulla coda indica che la tensione è poco al di sotto del valore desiderato mentre una scarica sul fronte può avvenire solo con valori di tensione applicata molto al di sopra delle possibilità di tenuta.

## 4.32 Generatori di tensione ad impulso

Per produrre un'onda ad andamento doppio esponenziale, del tipo illustrato in fig. 4.311, si usa lo schema di principio di figura 4.321, o altri che da esso si possono derivare. Gli interruttori impiegati devono poter operare non basse dispersioni ed in tempi molto brevi (dell'ordine del  $\mu s$ ): si usano pertanto dispositivi a scarica (spinterometri) al posto degli interruttori elettromeccanici.

Quando si innesca lo spinterometro S, il condensatore  $C_1$ , caricato alla tensione E, si scarica su  $C_2$  con una costante di tempo che è, in prima approssimazione:

$$T_1 = R_1 \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2};$$

i due condensatori si scaricano poi, in parallelo, con costante di tempo:

$$T_2 = R_2 (C_1 + C_2)$$

Le due costanti di tempo determinano, rispettivamente, la durata del fronte e quella all'emivalore. Il calcolo completo della forma d'onda è tuttavia in genere reso più complesso dalla presenza di elementi parassiti, in particolare, per le onde a fronte breve, da induttanze e capacità distribuite lungo tutto il circuito.

## Prove dielettriche

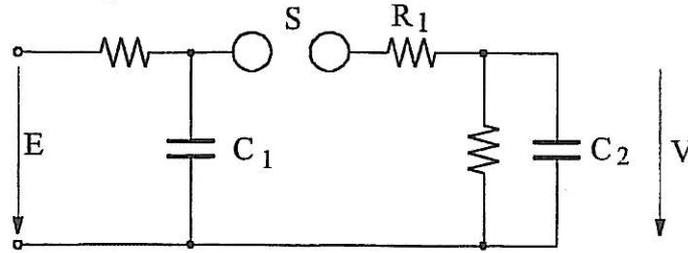


fig. 4.321

Per avere tensioni più elevate (fino a parecchi MV) si usa lo schema di Marx (fig. 4.322) con un conveniente numero  $N$  di stadi. I vari condensatori  $C$  vengono caricati in parallelo dalla sorgente di tensione continua  $E$ , tramite le resistenze  $R_C$ ; quando innescano gli spinterometri  $S$ , i condensatori vengono disposti in serie, formando un condensatore di capacità  $C_1 = C/N$  caricato alla tensione  $NE$ . Le resistenze  $R_C$  sono abbastanza grandi da non influire sul fenomeno o fanno parte delle resistenze destinate a determinare la forma d'onda.

L'innescò del primo spinterometro può essere comandato, in sincronismo con altri dispositivi compreso l'oscilloscopio. Lo schema è tale da facilitare naturalmente l'innescò degli spinterometri successivi, in base alla sovratensione provocata su di ognuno di essi dalla scarica di quello che lo precede.

Un generatore viene definito dalla sua tensione di carica ( $NE$ ) e dall'energia immagazzinata

$$W = \frac{1}{2}NCE^2 = \frac{1}{2} \frac{C}{N} (NE)^2$$

che può andare da qualche kJ a qualche centinaio di kJ. Le capacità per stadio vanno da frazioni di  $\mu F$  a qualche  $\mu F$ ; spesso, per questioni tecniche ma anche economiche, ogni stadio è costituito da due condensatori in serie, previsti per metà tensione.

In generale la tensione disponibile in uscita è più bassa di quella di carica e si definisce un rendimento in tensione che in prima approssimazione è dato da

$$\eta = \frac{C_1}{C_1 + C_2}$$

In realtà la presenza delle resistenze di coda fa sì che sia ancora più basso.

Tipicamente, per impulsi di fulminazione è intorno all'85÷90 % ed è ancora più basso per onde di manovra dato che, per allungare il fronte, spesso si aumentano sia il valore della resistenza di fronte che la capacità di carico. E' più facile avere rendimenti alti con impianti a pochi stadi perché, a parità di altre condizioni, la capacità equivalente è più alta.

Sulla base delle espressioni viste prima, il tempo all'emivalore è dettato sostanzialmente da caratteristiche del circuito del generatore (capacità totale  $C_1$  e resistenze di coda) mentre per la formazione del fronte interviene in modo pesante l'oggetto in prova.

Considerazioni particolari sono necessarie quando l'oggetto si comporta come una induttanza (caso dei trasformatori); se la prova viene effettuata con onde lunghe si arriva facilmente alla saturazione del nucleo e quindi alla sua drastica riduzione.

Per collaudi industriali è comunque vincolante procedere ad una verifica diretta del valore della tensione e della sua forma, collegando un adeguato sistema di misura direttamente ai capi dell'oggetto in prova.

## Prove dielettriche

La forma d'onda, per quanto prevedibile entro certi limiti sulla base dei parametri del circuito e dell'oggetto, deve essere verificata e deve rientrare nelle tolleranze previste.

In realtà, date anche le notevoli dimensioni dell'impianto e delle spira ad esso collegata, non sono affatto trascurabili le induttanze associate ai vari componenti i cui valori sono, come minimo, quelli associati ad un conduttore di pari lunghezza ( $\approx 1 \mu\text{H/m}$ ) ma in realtà spesso maggiori. Si verificano pertanto situazioni contrastanti tra la necessità di limitare, per un certo carico, il valore della resistenza di fronte per stare nei limiti di tolleranza del fronte e la condizione minima di smorzamento

per evitare la comparsa di oscillazioni. In un circuito L,R,C dovrebbe essere  $R > 2\sqrt{\frac{L}{C}}$  ( $R > \sqrt{\frac{L}{C}}$ ,

se ci si accontenta di una sovraelongazione al limite del 5%).

Le prove vengono di solito effettuate con impulsi di entrambe le polarità per gli isolamenti in aria o in gas compresso e con la sola polarità negativa nel caso di trasformatori in olio. Si deve lasciare un certo tempo tra un impulso ed il successivo (da 30 secondi ad 1 minuto) perché è abbastanza normale che, durante la prova, si abbiano fenomeni abbastanza intensi di ionizzazione e quindi si dovrebbe dare modo al dielettrico di ripristinare le sue caratteristiche originali con la diffusione e/o ricombinazione dei prodotti che si sono formati.

La durata della prova può essere pertanto abbastanza lunga, se si devono provare diverse disposizioni (verso terra, tra fasi, aperto e chiuso). Situazioni particolari si possono avere anche con isolamenti compositi (aria e resina, ad esempio, come nel caso di trasformatori a secco). La forte ionizzazione che si viene a determinare in sede di prova nel mezzo con rigidità più bassa determina un flusso di cariche che vengono intrappolate dalla resina che le rilascia con costanti di tempo che possono essere anche molto lunghe. Il segno di queste cariche è contrario a quello della polarità degli elettrodi verso cui migrano e pertanto il loro effetto è quello di ridurre il campo elettrico nella zona in cui si era prodotta la ionizzazione. Quando però la polarità venga invertita, il loro effetto si somma a quello del campo esterno e si può avere una scarica. In questi casi è consentito applicare impulsi a tensione via via crescente per arrivare ad annullare gradualmente le cariche residue prima di applicare la piena tensione.

Le varie parti dell'impianto, oltre alle diverse sollecitazioni elettriche, sono soggette a correnti elevate, rapidamente variabili ( $10^{10} \div 10^{13} \text{ A/s}$ ). Vi sono notevoli problemi di compatibilità elettromagnetica e disturbi che possono rendere molto difficile la registrazione delle prime fasi delle grandezze.

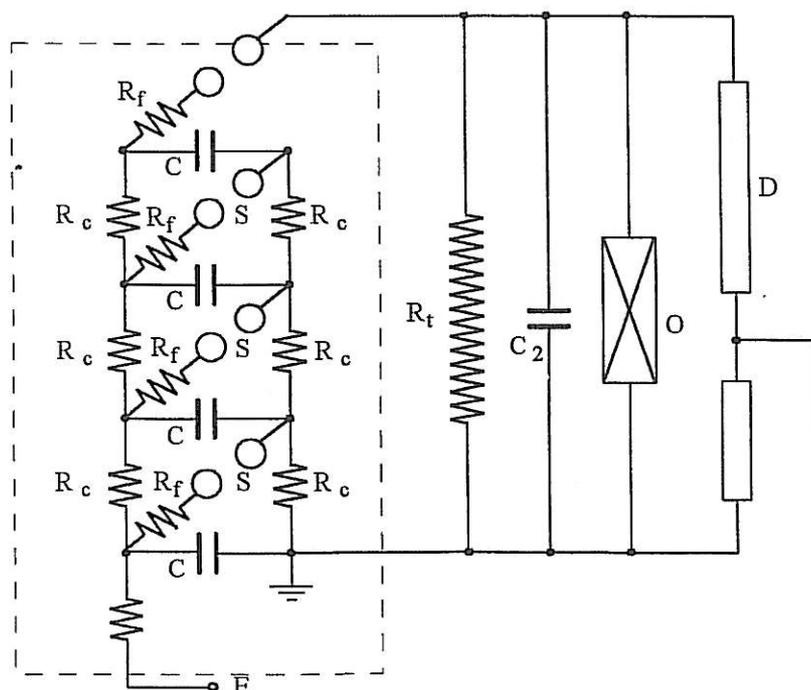


fig. 4.322

Schema di impianto completo di divisore

## Prove dielettriche

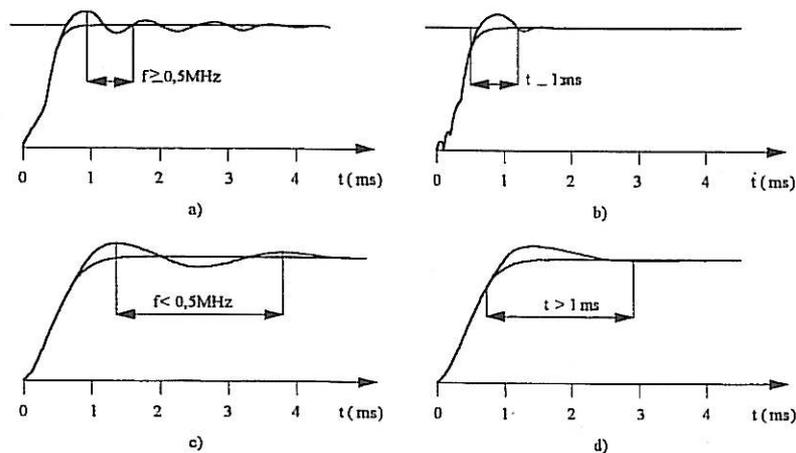
I parametri della forma d'onda si possono modificare agendo su  $R_f$ ,  $R_t$  e  $C_2$ . Quest'ultima va considerata come la capacità di un componente che si solito si include nel circuito e la capacità dell'oggetto in prova O. Il divisore D serve a rilevare la tensione direttamente ai capi dell'oggetto in prova e va posto a valle di esso, almeno per gli impulsi di fulminazione, per rendere minimi gli effetti dovuti alla circolazione di corrente sui collegamenti.

Vi sono diverse varianti a partire dallo schema generale di Fig. 4.322. In particolare si può utilizzare lo schema di fig. 4.322 1 per ridurre il numero delle resistenze complessive; negli impianti di piccole dimensioni è anche in uso uno schema di Fig. 4.322 2 che ha il vantaggio di avere un punto a terra per il primo spinterometro e quindi di consentire sistemi di innesco che non necessitano di disaccoppiamento. Si noti che in questo caso la tensione di uscita ha segno opposto rispetto a quella di carica (schema di Goodlet).

Gli schemi sono comunque semplificati per la presenza di induttanze non trascurabili nel circuito, associate alla dimensioni fisiche dei collegamenti e delle spire che essi formano oltre che a quelle propri dei componenti ( condensatori e resistenze).

Spesso capita che la forma d'onda presenti oscillazioni che, di norma, dovrebbero essere contenute entro il 5% del valore di cresta. La loro influenza a livello di sollecitazione dell'oggetto in prova dipende dal tipo di isolamento e la valutazione della loro influenza dovrebbe essere associata all'aspetto fisico dei fenomeni che possono intervenire, in particolare al tempo che una eventuale scarica impiega a formarsi. E' infatti evidente che nel caso di isolamenti in aria su lunghe distanze, dove sono necessarie alcune decine di  $\mu s$  perché la scarica si propaghi, aumenti di qualche percento della tensione, seguiti peraltro da abbassamenti successivi della stessa entità rispetto al valore medio, non hanno praticamente influenza. Nel caso di per isolamenti in  $SF_6$  ad alta pressione possono bastare invece decine di ns e quindi il picco di un singola oscillazione può essere sufficiente a produrre la scarica.

Le Norme, tuttavia, almeno in questa fase, prevedono di considerare una curva media e di considerare il massimo di questa curva o quello effettivo dell'oscillazione a seconda della frequenza o della durata, nel caso di sovraelongazione subito smorzata. I limiti sotto cui si prende il picco effettivo sono 500 kHz per la frequenza e  $1 \mu s$  per la durata della eventuale sovraelongazione.



Sono possibili, a spese di complicazioni circuitali di un certo impegno, anche soluzioni per attenuare o eliminare il fenomeno delle oscillazioni mediante reti RC, che vengono inserite al posto della resistenza di fronte sui vari stadi.

Prove dielettriche

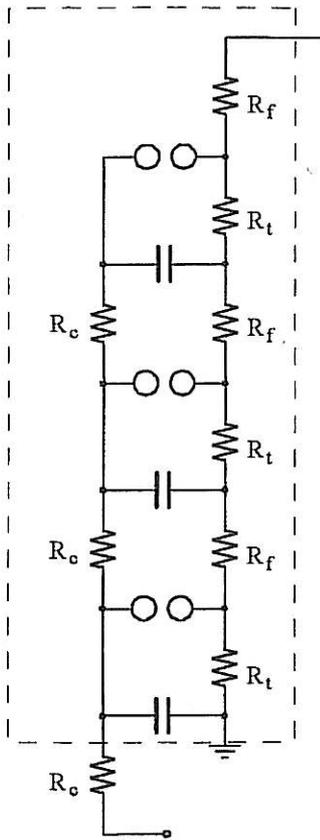


Fig. 4.322 1

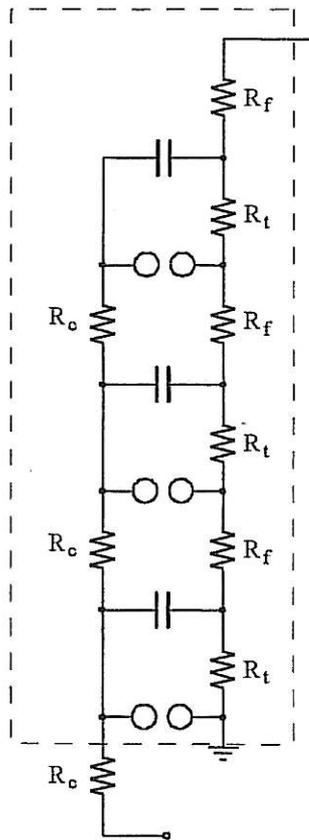
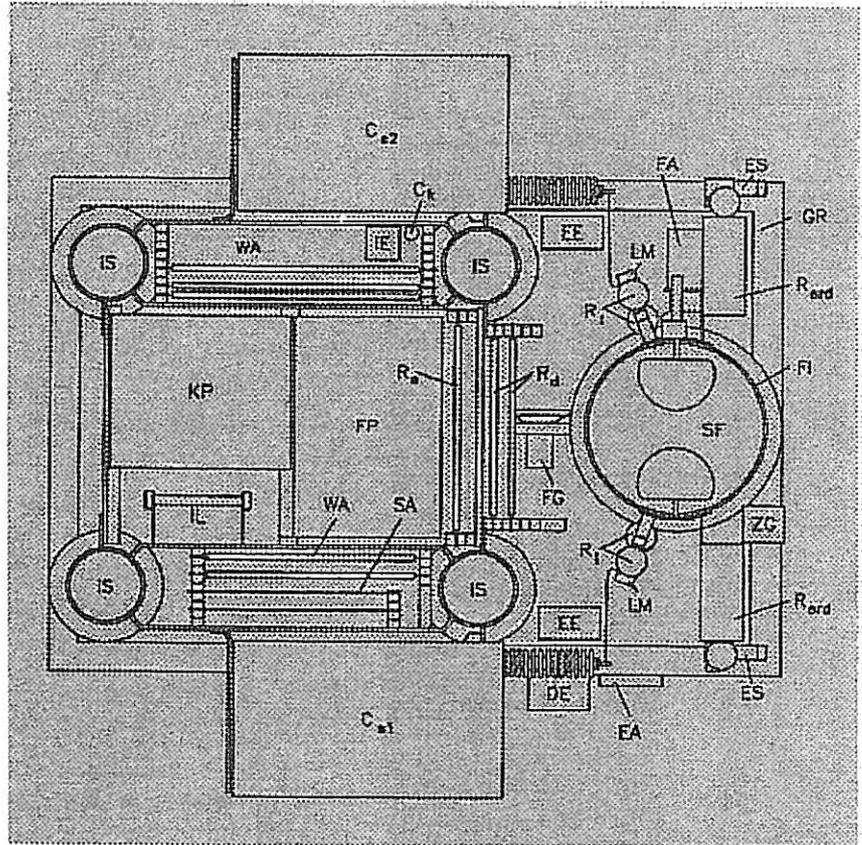
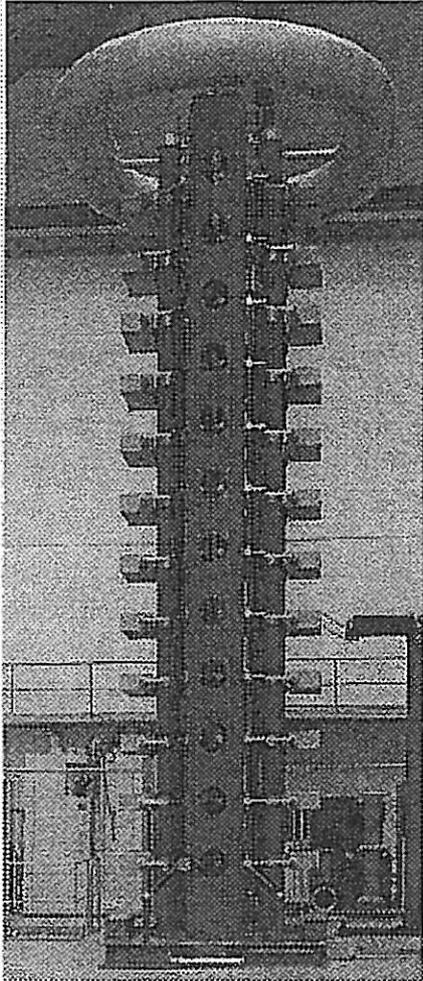


Fig. 4.322 2

## Prove dielettriche

## 4.33 Considerazioni tecnologiche

Le dimensioni di questi impianti sono commisurate alla tensione massima di carica e devono tener conto della necessità di isolare gli stadi uno rispetto all'altro per permetterne il corretto funzionamento durante il passaggio dal parallelo alla serie. I gradienti tollerabili lungo le colonne isolanti di sostegno, sono, come ordine di grandezza, non molto diversi da  $2,5 \pm 3$  kV/cm per cui le dimensioni tipiche, in funzione della tensione, sono dell'ordine di 4 m per MV di tensione nominale. Nella foto è riportato un generatore (12 stadi - 2400 kV - 120 kJ) con la disposizione dei componenti sul piano costituente lo stadio.



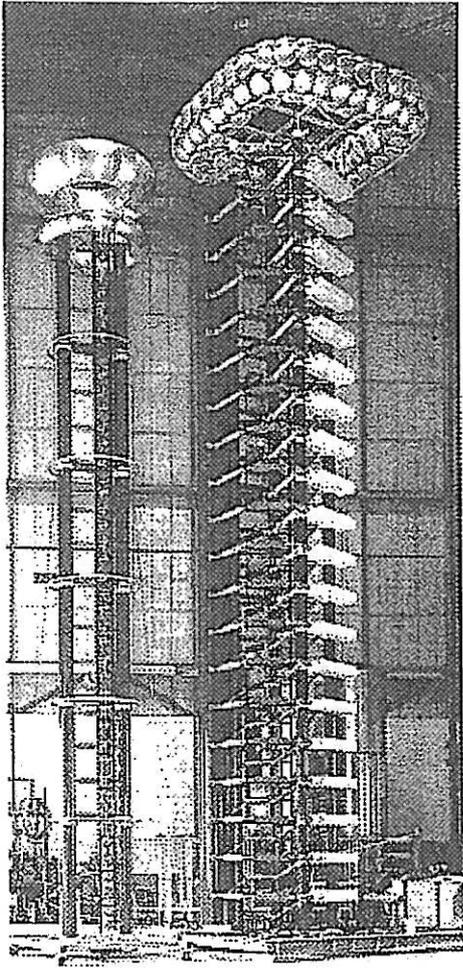
## LEGENDA

- Cs1, Cs2: Condensatori di stadio  
 Ck : Condensatore di accoppiamento  
 R1 : Resistenza di carica      Rd : Resistenza di fronte  
 R2 : Resistenza di coda      Rerd: Resistenza di messa a terra  
 IS: Colonne portanti  
 IL: Scala di accesso  
 SF: Spinterometro  
 FI: Cilindro isolante di contenimento degli spinterometri  
 LM: Divisore di misura per la tensione continua di carica  
 FA: Motore di azionamento degli spinterometri  
 FG: Filtro e ventilatore  
 ZG: Generatore di innesco  
 IE: rivelatore di innesco      DE: Rivelatore di scarica  
 EA: Terminale di terra      ES, EE: Dispositivo di messa a terra  
 KP : Piattaforma pieghevole      FP : Piattaforma fissa      WA: Supporto per resistori  
 SA: Supporto per barrette di collegamento

## Prove dielettriche

Per le tensioni più elevate è necessario un elettrodo di testa per controllare i campi elettrici nella posizione in cui la sollecitazione è massima: in caso contrario sarebbe praticamente impossibile realizzare le tensioni volute dal momento che si potrebbe avere una scarica dal generatore verso le pareti o il soffitto o lo stesso piano di terra. In base alle considerazioni già esposte relative ai meccanismi di scarica ed alle conseguenti implicazioni, il caso più critico è quello in cui si vogliono generare impulsi di manovra con polarità positiva.

L'elettrodo deve essere dimensionato in modo che il massimo gradiente superficiale sia inferiore ai limiti di innesco del corona, con un margine che tiene conto di fenomeni anomali, sempre possibili con elettrodi di grosse dimensioni, e con fenomeni perturbatori, quali potrebbero nascere quando il collegamento verso il carico viene collegato all'elettrodo originariamente simmetrico.



Le soluzioni sono via via più impegnative all'aumentare della tensione e possono passare da un singolo conduttore tubolare di diametro modesto, opportunamente sagomato, ad un toroide o ad un elettrodo completo, realizzato di solito con una combinazione di piccoli elettrodi fissati su una gabbia metallica (elettrodi tipo "POLYCON"). Questi ultimi hanno il vantaggio di essere relativamente economici, di permettere collegamenti in punti diversi semplicemente rimuovendo gli elettrodi elementari e di consentire anche facili riparazioni in caso di ammaccature con la sostituzione dell'elemento danneggiato. Tutti i componenti devono essere previsti per la tensione di stadio, se all'interno, e per la totale tensione se all'esterno; le lunghezze sono comunque notevoli per assicurare la tenuta superficiale, anche se quella interna potrebbe essere molto migliore. Le resistenze vanno dimensionate tenendo conto che il processo di riscaldamento subito durante la fase di scarica è sostanzialmente adiabatico per cui il materiale attivo deve aver massa sufficiente da poter assorbire la quantità di energia dissipata con un aumento di temperatura accettabile.

Ciò richiede normalmente esecuzioni a filo (con avvolgimento antiinduttivo) o comunque realizzate con resistenze ad impasto; sono normalmente da escludere resistenze a strato che tipicamente utilizzano quantità di materiale molto modeste. Resistenze ad impasto di carbone tuttavia non hanno elevata stabilità e presentano la tendenza ad una riduzione del valore, dovuta la progressivo incollamento dei granuli tra loro: devono

essere pertanto impiegate con cautela.

Resistenze a liquido, che risultano molto economiche, sono state parimenti usate in talune applicazioni: non sono molto stabili con la temperatura e pertanto vengono usate nel ramo di carica e non nella parte formatrice dell'impulso. In passato sono state utilizzate soluzioni con resistenze immerse in olio, con l'indubbio vantaggio di garantire una elevata capacità termica e quindi la possibilità di operare il generatore, anche a tensioni alte, con cadenza elevata. Le complicazioni costruttive e la meccanica richiesta per assicurare le tenute con i costi conseguenti, ne hanno tuttavia decretato l'abbandono per le nuove costruzioni, nella quali le resistenze sono del tipo a secco, con avvolgimento di filo isolato con smalti con classe di temperatura elevata, formati da leghe ad alta stabilità, avvolti su due strati in senso opposto o con avvolgimento Ayrton-Perry. L'avvolgimento è poi protetto con guaina termorestringente che ne permette una manipolazione agevole o inglobato in resina. Rispetto al caso in olio l'esecuzione risulta anche molto più leggera.

## Prove dielettriche

Esecuzioni molto curate consentono il raggiungimento di costanti di tempo intorno ai 10 ns, il che tuttavia implica che il contributo di induttanza può essere ancora sensibile: una resistenza da 100  $\Omega$  si trova associata ad almeno 1  $\mu\text{H}$ .

I condensatori sono normalmente del tipo a cassa metallica: gli isolamenti interni, prima realizzati con carta e olio, si sono gradualmente evoluti verso soluzioni che impiegano film di materiali plastici (polipropilene).

Per gli impianti di grosse dimensioni non va assolutamente trascurato l'aspetto logistico e le problematiche connesse ai cambiamenti della struttura interna (scelta della resistenze di fronte e di coda adeguate alla forma d'onda che si vuol produrre) o addirittura alle connessioni esterne che si possono trovare ad altezze comprese tra 10 e 20 m.

Oltre ad un adeguato sistema di elevatori e/o di sospensioni a soffitto, possibilmente con carro ponte mobile, la stessa struttura dell'impianto è di solito dotata di scala interna di servizio, realizzata ovviamente in materiale isolante, di piattaforma agibili ai diversi stadi e di vassoi, messi in zone equipotenziali per il contenimento dei vari resistori a disposizione; sono stati messi in servizio impianti per i quali il cambio, almeno per la due forme d'onda normalizzate, può essere effettuato automaticamente, per mezzo di pistoni comandati pneumaticamente.

Fondamentale è l'aspetto di sicurezza elettrica che deve prevedere la messa a terra delle uscite di tutti i condensatori e delle loro casse, soprattutto quando queste vengano utilizzate per realizzare il collegamento serie. La trasmissione del comando viene effettuata tipicamente con un sistema pneumatico per cui il trasporto di aria compressa avviene con tubi di materiale isolante o con un nastro, avvolto su un tamburo e rinviata sulla testa dell'impianto, passando su tutti gli stadi. Il nastro è costituito per metà da una fettuccia isolante e per l'altra metà da un nastro metallico; a seconda della parte in contatto con gli stadi si ha la messa a terra o l'isolamento relativo.

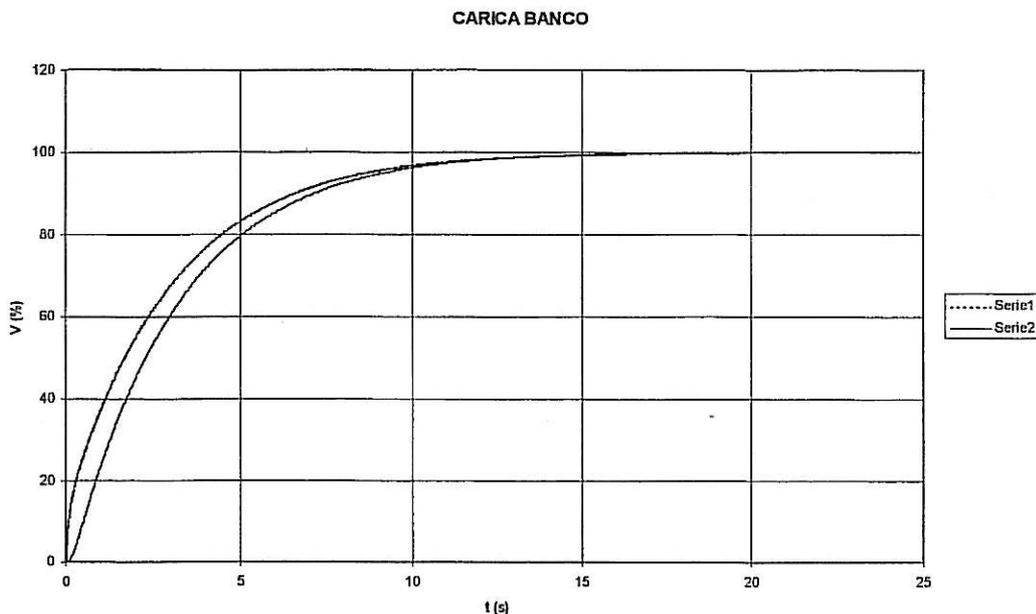
Le soluzioni più comuni per gli spinterometri prevedono esecuzioni aperte per i piccoli impianti; per quelli più grossi, vi sono versioni in cui gli spinterometri sono incapsulati in un cilindro isolante in cui si può immettere gas a pressione elevata. La regolazione avviene variando la distanza su un numero finito di valori possibili e adeguando poi la pressione; come isolate si usa aria convenientemente essiccata.

Il sistema è oggettivamente complicato e costoso. L'altra soluzione consiste nel lasciare gli spinterometri in aria libera all'interno di una colonna isolante nella quale viene immessa aria filtrata in leggera sovrappressione rispetto all'ambiente. Vengono così ad essere drasticamente ridotti tutti gli inneschi spuri determinati dalla presenza nell'aria di contaminanti di varia natura. Viene comunque ad essere ridotto il rumore anche se, per gli impianti industriali, si cerca di non eliminare completamente l'emissione di luce perché può facilitare il corretto funzionamento di un eventuale spinterometro di misura.

Progressi notevoli sono stati fatti nei sistemi di controllo del generatore e si può arrivare ad avere impianti che funzionano in modo automatico e che possono anche arrivare a gestire sequenze di prova in cui la tensione da applicare può essere determinata dal risultato della prova precedente. In questi casi si richiede ovviamente una elevata immunità ai disturbi dell'elettronica di controllo ed un funzionamento molto affidabile del generatore con un dispositivo che consenta di rilevare anche gli inneschi spuri (ossia quelli avvenuti spontaneamente, prima del comando di innesco).

Il controllore può impiegare un PLC o far capo a calcolatori dedicati. Molto importante in questo caso è la gestione dei consensi e dei controlli (interblocchi sulle porte e su eventuali barriere) e la gestione di eventi spuri (ad esempio un innesco intempestivo); la determinazione dell'esito della prova può essere ottenuta dall'analisi automatica dell'oscillogramma della tensione o da dispositivi analogici in grado di determinare l'eventuale tempo alla scarica. L'utilità di questi dispositivi, che comportano complicazioni e costi notevoli, spesso si giustifica solo per grossi impianti destinati ad impieghi molto differenziati.

## Prove dielettriche



Andamento della tensione sul primo condensatore (linea tratteggiata) e sull'ultimo (linea intera).

La disposizione della sala, la posizione dei vari componenti e dell'oggetto in prova sono critiche per una corretta gestione; per una migliore utilizzazione gli impianti sono spesso mobili, anche se la cosa non è agevole. Vi sono soluzioni che utilizzano vie di corsa preferenziali realizzate con rotaie o ruote o, più liberamente, con cuscini d'aria.

E' da notare che spesso la zona sopra il generatore, per quanto necessaria per l'isolamento, è poco utilizzata, a scapito del pavimento. Alcuni impianti adottano per i partitori di tensione la sospensione a soffitto, andando con ciò a porli in una zona libera da interferenze con altri oggetti ed al tempo stesso liberando spazio a livello del suolo. All'aumentare della tensione aumentano tutte le dimensioni della sala perché si tratta di assicurare un sufficiente isolamento anche verso le pareti e di poter poi gestire l'oggetto in prova. I circuiti si sviluppano in genere lungo la diagonale.

In taluni casi la stessa cosa è stata fatta per lo stesso generatore, in zone fortemente sismiche: un generatore sospeso da un traliccio metallico resiste meglio di una torre con struttura isolante.

Sono in servizio anche impianti concepiti per poter funzionare all'esterno; in questo caso la struttura descritta viene racchiusa in una torre cilindrica di materiale isolante, normalmente provvista di un sistema di condizionamento dell'aria all'interno, per evitare fenomeni di condensa. Oltre ad un elettrodo sulla sommità, strutture di questo tipo prevedono spesso elettrodi intermedi collegati al potenziale della struttura all'interno per arrivare ad una graduazione controllata del campo lungo la superficie esterna: naturalmente le prestazioni massime si possono ottenere solo con condizioni di tempo bello.

Il sistema di carica è normalmente concepito per funzionare a corrente costante, agendo sull'angolo di accensione di due tiristori collegati in antiparallelo: spesso la pendenza viene cambiata nell'ultimo tratto (sopra il 90% del valore impostato) per permettere una migliore equalizzazione delle tensioni sui diversi stadi. E' possibile regolare in modo automatico anche la distanza degli spinterometri sulla base di una curva preprogrammata, basata sui valori della tensione di scarica per spinterometri del diametro utilizzato.

#### 4.341 Generatori di impulsi oscillanti

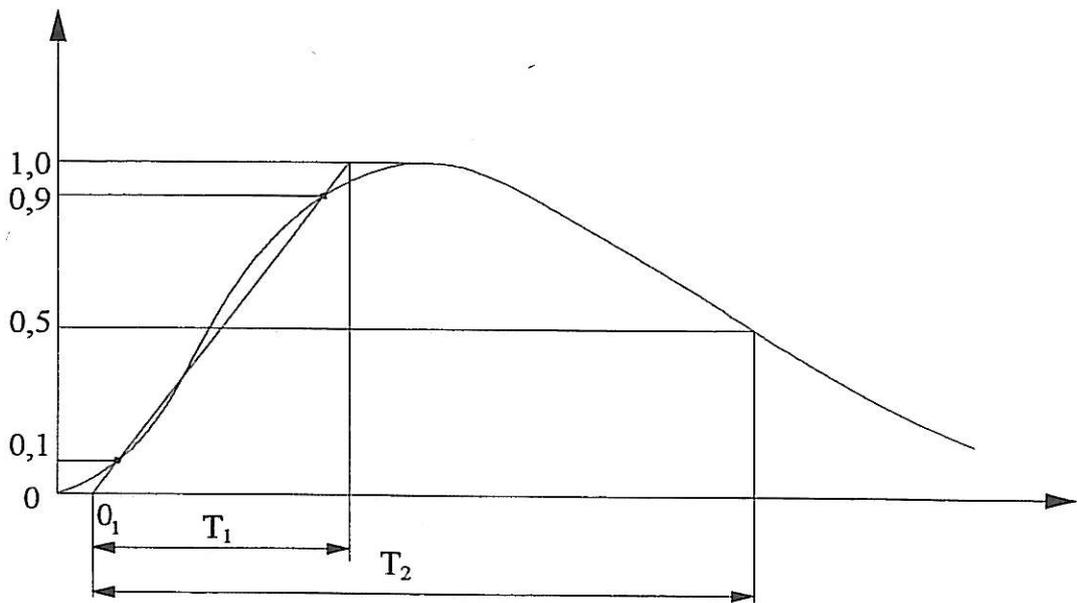
Vi sono situazioni che possono richiedere l'impiego di generatori trasportabili, in particolare per prove sul campo, una volta effettuata l'installazione: è questo il caso delle stazioni blindate, per le

## Prove dielettriche

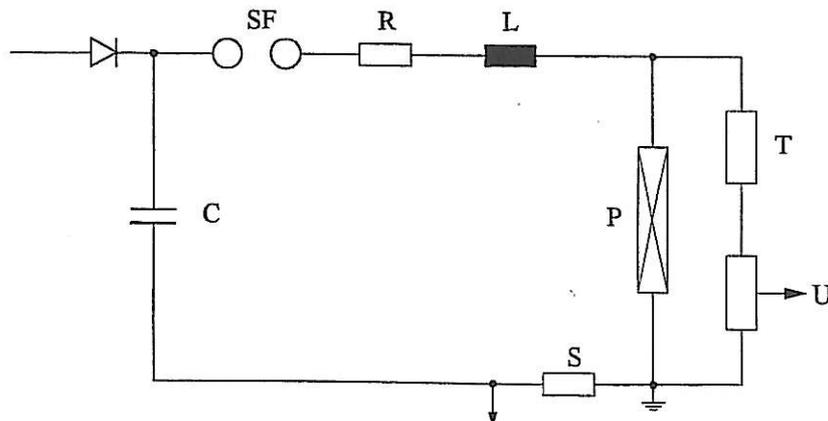
quali, data la rilevanza che possono avere, è fondamentale assicurarsi che nella fase di smontaggio e successivo ripristino "in situ" non siano intervenuti elementi tali da ridurre le caratteristiche di isolamento. Per quanto non ancora pienamente caratterizzati a livello normativo, vengono per questo utilizzati spesso generatori di forme d'onda oscillanti. Il principio di funzionamento è quello del circuito di Marx, con la variante di un induttore collegato in serie, che risona con la capacità della stessa stazione. Il vantaggio notevole è che questi sistemi hanno un rendimento in tensione decisamente superiore all'unità, per cui a parità di tensione sull'oggetto in prova, le loro dimensioni possono essere decisamente ridotte rispetto ad un generatore tradizionale. Le tensioni che si possono ottenere agevolmente rientrano, come tempi, tra quelle delle sovratensioni di manovra.

## 4.343 Generatori di correnti impulsive

La forma tipica degli impulsi di corrente è 8/20  $\mu$ s. Esistono tuttavia varianti a seconda del fenomeno che si vuole simulare (onda 4/10, a fronte ripido, di lunga durata). Il campo di prova è spesso relativo agli scaricatori; esistono tuttavia impianti per la valutazione della compatibilità elettromagnetica in presenza di fulmini ma anche applicazioni particolari come la formatura elettromagnetica o la produzione di onda d'urto.



Impulso normalizzato di corrente



Schema di impianto per la produzione di impulsi di corrente

## Prove dielettriche

Il valore di cresta della corrente può essere molto elevato (centinaia di kA); nel caso di scaricatori il carico può essere fortemente non-lineare. Il circuito è sostanzialmente duale: vengono caricati diversi condensatori in parallelo e poi vengono connessi all'oggetto in prova. E' determinante l'induttanza globale, specie nel caso di correnti a fronte ripido ( $1\mu\text{s}$ ) per cui spesso la disposizione del banco di condensatori è concentrica, come nella figura seguente. Sono previste le misure di corrente (shunt S) e la misura della tensione residua ai capi dello scaricatore (divisore T)

Nel caso di prove su scaricatori, in particolare ad ossido di zinco con comportamento fortemente non-lineare, spesso i parametri devono essere ricavati con simulazioni.

## Prove dielettriche

## 4.35 Probabilità di tenuta e di scarica

Vi sono degli isolamenti (in particolare quelli in aria) che, dopo una scarica, recuperano in pieno la loro qualità dielettriche mentre altri (ad esempio gli isolamenti solidi) ne vengono permanentemente danneggiati. Nei primi è quindi possibile l'applicazione, ripetuta  $N$  volte, di una tensione di data forma e ampiezza, anche se durante queste applicazioni si verificano delle scariche. D'altra parte, la sequenza degli eventi che portano alla scarica prevede che si verifichi tutta una serie di eventi che vanno dalla disponibilità di cariche libere nella zona a campo elevato, alla formazione di filamenti che si susseguono con dimensioni crescenti fino al raggiungimento dell'elettrodo opposto: il risultato ha pertanto un andamento casuale. Se la tensione applicata è alternata o continua, si tratta di aumentarne gradualmente il valore fino a provocare la scarica, annotando il valore di tensione per cui questa si è verificata. La procedura viene ripetuta un numero consistente di volte, arrivando ad ottenere valori diversi. La media della distribuzione viene assunta come  $U_{50}$  mentre la  $\sigma$  indica la dispersione dei valori intorno alla media.

Nel caso di tensioni impulsive si applicano sequenze di  $N$  impulsi di pari valore e forma e si conta il numero delle scariche che si verificano. Si definisce pertanto, per ogni valore di tensione, una probabilità di scarica  $p$  (o di tenuta:  $1-p$ ), compresa fra 0 e 1; una stima di tali probabilità è la frequenza:

$$r = \frac{n}{N}$$

che è il rapporto fra il numero  $n$  delle applicazioni in cui si ha la scarica, e il numero totale  $N$  delle applicazioni di tensione, nelle stesse condizioni. La frequenza  $r$  si avvicina alla probabilità  $p$  solo per  $N$  molto grande, ma si possono tracciare, con sufficiente precisione, delle curve di probabilità cumulate di scarica, del tipo di fig. 4.331, con più serie di dieci-venti applicazioni di tensione per ciascun livello.

I parametri principali che definiscono il comportamento di un isolamento sono:

- la tensione di scarica 50%, punto centrale della distribuzione: esistono opportuni metodi basati su considerazioni statistiche, per la sua determinazione abbastanza accurata (metodo up and down o metodo a livelli multipli) con alcune decine di applicazioni di tensione;
- la dispersione, valutata approssimativamente come lo scarto di tensione fra i punti a probabilità di tensione 0,5 e 0,16; spesso si assume una dispersione del 3% per impulsi di fulminazione e del 6% per impulsi di manovra.

Tutte le caratteristiche dipendono dalla polarità dell'onda impiegata e della sua forma. Nel caso di isolamenti in aria, esse dipendono anche dalla sua temperatura, pressione e umidità; le Norme indicano dei coefficienti di correzione, non sempre correttamente applicabili. I valori forniti nelle Tabelle fanno sempre riferimento alle condizioni standard di 760 mmHg, 20 °C e 11 g/m<sup>3</sup> di umidità. Se la prova viene effettuata in condizioni diverse, come succede normalmente, il valore di prova va corretto come già illustrato.

La distribuzione di probabilità cumulata segue spesso una legge di tipo gaussiano, anche se non vi sono motivi sostanziali perché questo debba avvenire: nei fatti però i dati sperimentali spesso possono essere interpolati con una curva di questo tipo.

La formula della distribuzione è :

## Prove dielettriche

$$P(U) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{y^2}{2}} dy$$

con  $x = (U - U_{50})/\sigma$ .

In pratica la funzione deve essere considerata troncata verso il basso ( di solito a  $U_{50} - 3\sigma$ ) perché, in caso contrario, si arriverebbe ad avere probabilità di scarica finita anche con tensione applicata nulla.

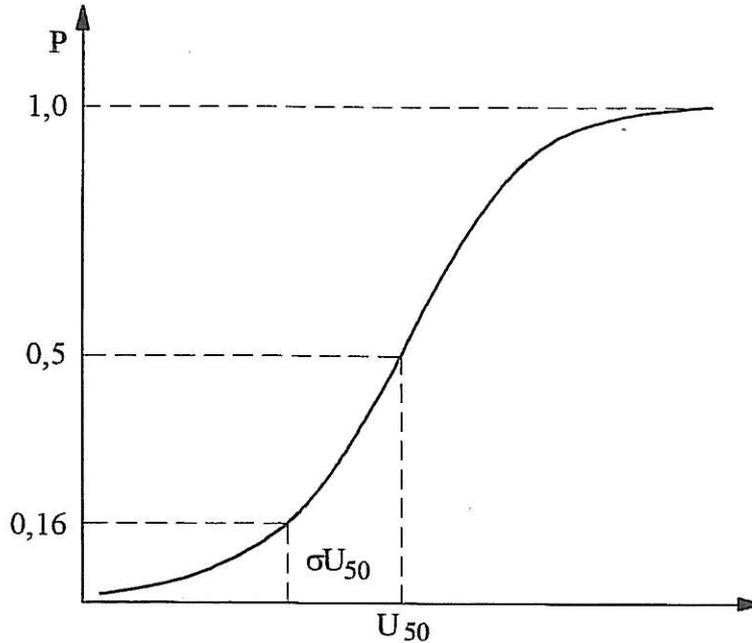


fig. 4.331

## 4.34 Prove di tenuta

Dato il carattere statistico della scarica in aria (o in generale negli isolamenti che si autoripristinano), la tensione di tenuta di un tale isolamento viene convenzionalmente fissata nella tensione che abbia una probabilità molto bassa (ma necessariamente non nulla) di scarica. Le Norme prescrivono attualmente l'applicazione di quindici impulsi al valore prescritto, considerando la prova soddisfacente se nel corso di queste applicazioni non si sono prodotte più di due scariche e se queste avvengono in modo tale da non dare origine a perforazioni di isolamenti solidi.

In taluni casi la procedura può essere notevolmente laboriosa, se le configurazioni da provare sono numerose; esistono in alcuni casi varianti sul tema che tendono a ridurre il numero di impulsi applicati. Si può pensare, ad esempio, di applicare solo 5 impulsi: la prova si considera passata se non ci sono scariche mentre l'oggetto viene respinto se ci sono due scariche. Se ce n'è una sola, si devono applicare dieci impulsi senza che si possa verificare alcuna scarica.

Secondo questo tipo di impostazione è chiara che la cosiddetta tensione di tenuta è tale solo da un punto di vista convenzionale: in effetti si conviene che a quel livelli la probabilità di tenuta sia superiore al 90%.

In altri casi, si assume come tensione di tenuta il valore

$$U = \frac{U_{50}}{1 - 3\sigma}$$

## Prove dielettriche

ottenuto dalla tensione di scarica 50%  $U_{50}$  e da un margine di sicurezza pari a 3 volte la dispersione; in queste condizioni la probabilità di scarica sarebbe decisamente bassa.

Se invece si tratta di isolamenti non autoripristinabili, le Norme prevedono tre applicazioni di tensione; le modalità per controllare che esse non diano luogo a scariche possono essere più complesse che non durante una prova in aria, dove gli effetti luminosi e acustici della scarica sono evidenti. In ogni caso una scarica che sia completa - cioè che cortocircuiti i terminali dell'oggetto in prova - produce il troncamento dell'onda di tensione applicata.

## 4.35 Errori nelle misure di impulsi

Tolleranze ed incertezze per le diverse forme d'onda sono riportate nelle Tabelle seguenti.

**IMPULSI DI FULMINAZIONE**

	TOLLERANZA	INCERTEZZA
Valore di cresta	3 % ( 5 % CI)	3 %
Durata del fronte	30 %	10 %
Tempo all'emivalore	20 %	10 %

**IMPULSI DI MANOVRA**

	TOLLERANZA	INCERTEZZA
Valore di cresta	3 %	3 %
Tempo alla cresta	20 %	10 %
Tempo all'emivalore	60 %	10 %

Gli impulsi di manovra sono i meno problematici dal punto di vista della misura; per contro il caso più delicato, nelle misure di tensioni impulsive, è quello delle onde tronche sul fronte, che vengono schematizzate con una tensione a rampa (fig. 4.351):

$$v = at \quad \text{per} \quad 0 < t < T_c.$$

Come è noto, se applichiamo una simile tensione a rampa ad un sistema di misura la cui risposta ridotta, allo scalino unitario, sia  $g(t)$ , otteniamo, utilizzando l'integrale di convoluzione, in uscita la tensione:

$$u(t) = \int_0^t a \cdot g(t - \tau) d\tau = \int_0^t [a - a + a \cdot g(t - \tau)] \cdot d\tau = at - a \int_0^t (1 - g(t - \tau)) d\tau = at - aT$$

A condizione che il transitorio si sia esaurito vale

$$\int_0^t (1 - g(t - \tau)) d\tau = \int_0^{\infty} (1 - g(t - \tau)) d\tau = T$$

$$u(T_c) = a T_c - aT \Rightarrow \frac{u(T_c) - a T_c}{a T_c} = -\frac{T}{T_c}$$

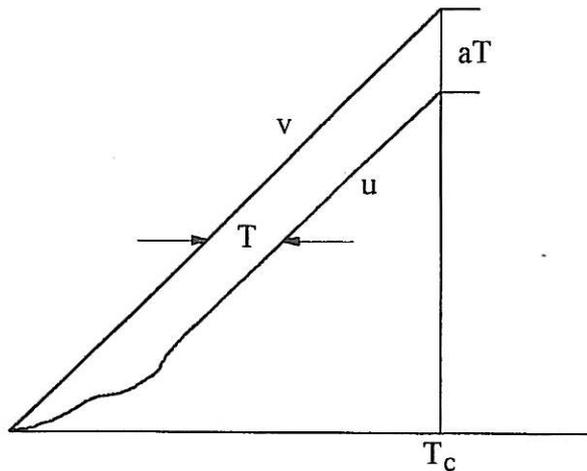
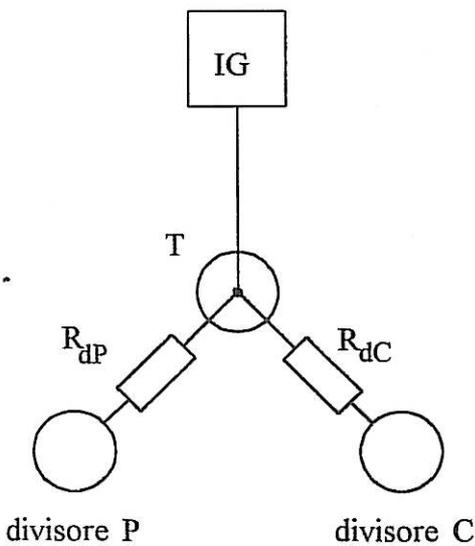


fig. 4.351

Se il tempo  $T_c$  è abbastanza grande, il secondo termine raggiunge il valore della costante di tempo (generalizzata)  $T$  del sistema di misura (detta, in questo caso, dalle Norme, tempo di risposta). Gli errori di ampiezza e durata del fronte sono allora funzioni del rapporto  $T/T_c$ ; le Norme fissano il limite  $T = 0,05 T_c$ , per onde troncate sul fronte al tempo  $T_c$ ; è abbastanza difficile restare entro questi limiti perché per  $T_c = 500$  ns basta un tempo di risposta di 25 ns.

Le prescrizioni attuali, tuttavia, per quanto riguarda le misure in ambito industriale, tendono a riportare le tarature in un ambito più facilmente controllabile di quello ottenibile dalle garanzie dei parametri della risposta. Si cerca pertanto di stabilire la riferibilità effettuando tarature per confronto con un sistema campione, in grado di offrire incertezze al livello dell'1% (5 % per i parametri temporali). In questo caso si tratta semplicemente di mettere i due sistemi in parallelo e di prendere misure simultanee, trasferendo poi il Fattore di scala del sistema campione a quello in prova. E' indubbio che vi sono maggiori problemi legati alla varietà delle forme d'onda che possono intervenire per cui si conviene di provare ai due estremi del campo di tolleranza relativa alla durata del fronte.



Nel complesso i requisiti più critici sono quelli relativi ai parametri temporali; un sistema di misura rileva meglio il valore di cresta perché, sulla base di quanto esposto precedentemente, l'errore verrebbe ad essere influenzato dalla durata della coda e dal tempo a disposizione per raggiungere, anche con ritardo il valore massimo.

Le caratteristiche indicative di un partitore adatto sono elencate di seguito per i diversi tipi di tensione da misurare.

## PARTITORE CAMPIONE PER IMPULSI

Parametri	Specifiche relative a			
	Impulsi di fulminazione pieni e troncati sulla coda	Impulsi di fulminazione troncati sul fronte	Impulsi di manovra	Impulsi di corrente
Tempo di risposta sperimentale $T_N$	15 ns	10 ns	-	-
Tempo di assestamento $t_s$	200 ns	150 ns	10 $\mu$ s	-
Tempo di risposta parziale T	30 ns	20 ns	-	0,1 $T_1$
Tempo di distorsione iniziale $T_0$	10 ns	2,5 ns	-	-

Il confronto dovrebbe essere effettuato almeno al 20% della tensione nominale mettendo i due sistemi di misura in parallelo sullo stesso oggetto in prova.

L'incertezza complessiva si valuta con la combinazione quadratica di tutti i singoli termini che intervengono con una relazione del tipo

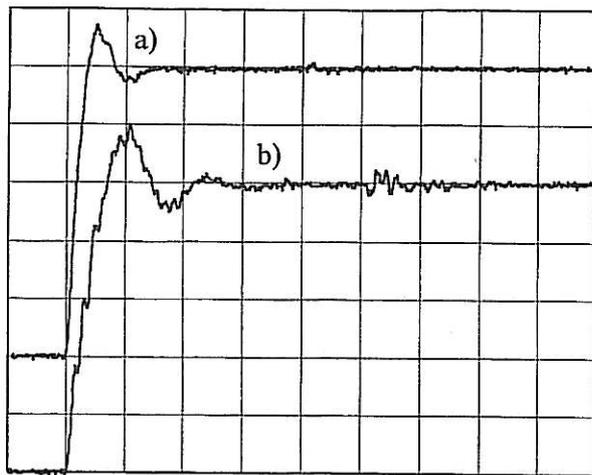
$$e = \sqrt{\sum_{i=1}^n e_i^2}$$

Di particolare rilievo può essere il contributo legato ad eventuali non-linearità che possono intervenire tra il livello di tensione a cui si effettua la taratura e quello di misura, l'influenza della temperatura sui valori dei componenti, gli stessi effetti di prossimità legati alle capacità parassite che possono modificare il valore del fattore di scala in funzione della distanza da pareti o altri oggetti a potenziale di terra.

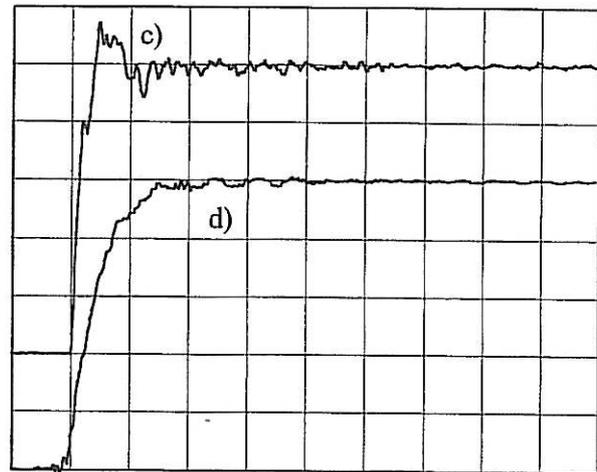
Si possono ancora utilizzare i parametri della risposta, anche se la procedura non è tra quelle raccomandate, dal momento che non è stata individuata una relazione univoca tra parametri ed errori, con il risultato che, in taluni casi, partitori buoni hanno parametri non soddisfacenti e viceversa: in ogni caso si deve tenere presente che il rilievo delle risposte e le valutazioni conseguenti sono abbastanza delicate, anche per i tempi che intervengono (decine di ns).

Nelle figure che seguono sono riportate la risposte di un certo numero di partitori previsti per tensioni via via crescenti e quindi con caratteristiche dinamiche sempre peggiori.

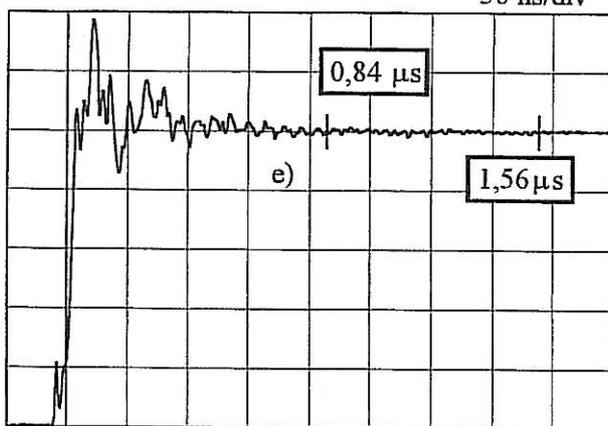
## Prove dielettriche



50 ns/div



100 ns/div



200 ns/div

Esempi di risposta al gradino per partitori con diverse tensioni nominali

- a) Divisore campione 100 kV    b) Divisore campione 200 kV  
 c) Divisore campione 700 kV    d) Divisore industriale 800 kV  
 e) Divisore industriale di tipo capacitivo smorzato - 2400 kV

## 4.36 Divisori per impulsi

Per la misura di alte tensioni impulsive sono usati divisori ohmici, capacitivi o misti; i primi sono generalmente limitati al caso di impulsi di fulminazione, dato che la loro resistenza viene a far parte delle resistenze  $R_2$  dello schema di figura 4.321 e non può avere valori troppo elevati, per non introdurre eccessive costanti di tempo; hanno spesso dispositivi di compensazione o di schermo (fig. 4.361).

I divisori capacitivi o misti (RC serie) sono usati sia per gli impulsi di manovra che per quelli di fulminazione; spesso essi hanno una resistenza di smorzamento a monte (fig. 4.362). Più rari sono i partitori cosiddetti universali, costituiti da un ramo RC serie con in parallelo un partitore ohmico di elevata resistenza per la misura della continua.

In ogni caso, il comportamento del divisore comprende anche quello delle sue connessioni fino all'oggetto in prova, che in prima approssimazione possono considerarsi un'induttanza in serie, ovvero una linea a parametri distribuiti in opportuna impedenza. Queste connessioni non devono in ogni caso essere percorse dalla corrente dell'oggetto in prova (lo schema corretto è quello di fig. 4.63a e non quello di fig. 4.363b)

## Prove dielettriche

La taratura di un divisore comprende diversi passaggi: in primo luogo si determina il fattore di scala determinando il rapporto tra una tensione di ingresso e la corrispondente in uscita. Si possono ottenere precisioni molto spinte usando tensioni continue o alternate. Si tratta poi di trasferire il fattore di scala così determinato ai tempi di interesse (normalmente  $\mu\text{s}$ ); per questo si deve valutare il comportamento dinamico del sistema. Questo tipo di analisi si può effettuare nel dominio della frequenza (risposta in frequenza) o più comunemente del tempo (risposta al gradino). Tipicamente si effettua applicando, in bassa tensione, uno scalino di tensione (fig. 4.364) e deducendo il tempo di risposta dall'oscillogramma rilevato in bassa tensione. Se questo tempo è piccolo (dell'ordine di qualche decina di ns) si deve tenere conto dei tempi di propagazione lungo le connessioni e lungo il divisore stesso, che possono essere di valore confrontabile.

L'interruttore impiegato è di solito un relè a mercurio: il vantaggio dei suoi contatti è esclusivamente legato al fatto che, quando si toccano, non effettuano rimbalzi come invece capita nei comuni sistemi elettromeccanici.

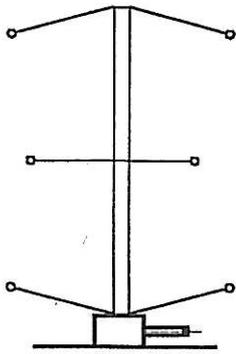


fig. 4.361

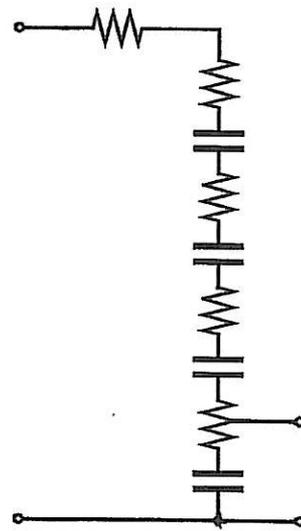


fig. 4.362

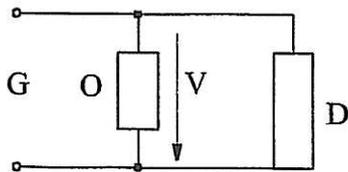


fig. 4.363a

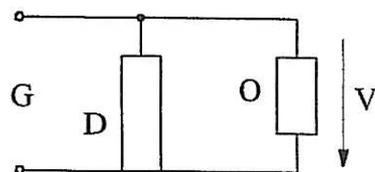


fig. 4.363b

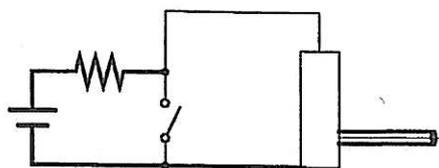
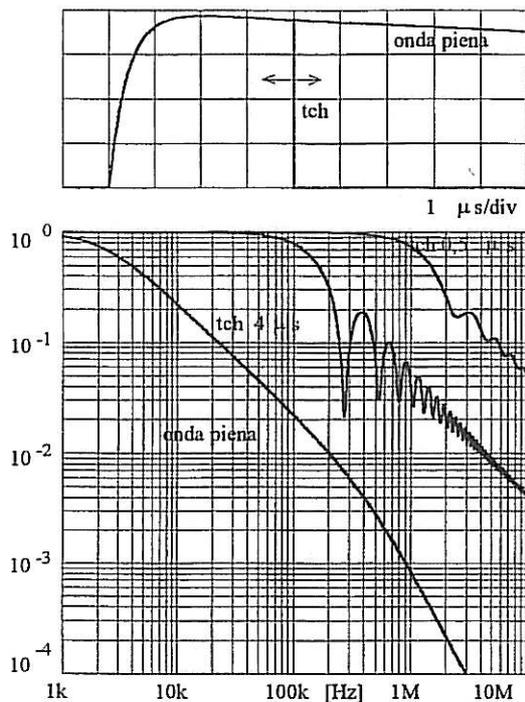


fig. 4.364

## Prove dielettriche



Gli errori che il partitore commette possono essere derivati con un approccio basato su parametri della risposta o con l'integrale di convoluzione. Questo secondo modo di procedere, ancora poco comune, presuppone la disponibilità dei segnali in forma campionata per risultare fattibile praticamente. In linea di principio sarebbe anche possibile, noto il comportamento dinamico nel tempo, arrivare a correggere il segnale di ingresso con una procedura inversa rispetto alla convoluzione e denominata appunto deconvoluzione: in realtà questo procedimento, pur fattibile, spesso si traduce in un problema mal posto dal punto di vista matematico. Pesante può essere anche il contributo del rumore, soprattutto per la risposta al gradino, di norma ottenuta applicando tensioni molto basse. In pratica pertanto, si applica molto raramente e solo nei casi estremi in cui gli impulsi abbiano caratteristiche al limite delle capacità di misura dei sistemi.

Nella figura viene riportata la trasformata di Fourier

di un impulso di tensione di forma normalizzata e la variazione del contenuto armonico in funzione del tempo a cui la tensione viene troncata.

## 4.37 Oscilloscopi e voltmetri di cresta

Lo strumento che più comunemente è collegato alla bassa tensione di un divisore è un oscilloscopio a raggi catodici, il cui pennello impressiona una pellicola fotografica.

Dall'oscillogramma sono quindi deducibili, previa taratura degli assi, il valore di cresta, la durata del fronte e della coda ecc.; inoltre possono essere testimoniate eventuali irregolarità nel fenomeno come scariche parziali o totali che alterano il regolare andamento della forma d'onda.

Per avere l'immagine completa del transitorio, l'asse dei tempi dell'oscilloscopio deve essere fatto partire una frazione di  $\mu\text{s}$  prima dell'arrivo del segnale sulle sue placche, mediante opportuni dispositivi di sincronizzazione o linee di ritardo. La tensione di alimentazione, di accelerazione ecc., devono essere ben stabilizzate per poter contenere l'errore di taratura e di lettura entro il percento. In genere, non si usano amplificatori, potendosi già disporre di un segnale di ampiezza elevata. La scala dei tempi può essere sia lineare che logaritmica; nella prima sono più facili le misure degli intervalli di tempo, con la seconda si possono avere, sullo stesso oscillogramma e con pari risoluzione, sia il fronte che la coda di un'onda.

Oscilloscopi per questi scopi avevano requisiti diversi rispetto a quelli per impieghi correnti: in generale la banda passante non è molto alta (sotto 30 MHz) per contrastare l'effetto del rumore, la tensione di accelerazione del tubo elevata per avere un fascio di elettroni energetico ed avere, di conseguenza, una emissione dal fosforo di intensità tale da poter impressionare la pellicola con una singola spazzolata. A questo fine la stessa scelta del fosforo era spesso orientata verso l'emissione di luce nella zona del blu, piuttosto che in quella del verde. A questo si aggiungeva un alimentatore con notevole grado di isolamento contro eventuali tensioni trasferite dalla rete di alimentazione e degli attenuatori normalmente scelti con gradini ottenuti secondo la radice cubica di due (1- 1.25 - 1.6 - 2 etc.). In questo modo si riesce ad avere una scelta conveniente per quanto riguarda le portate da utilizzare in relazione ad una particolare tensione in ingresso e ad avere, in ogni caso, una portata con sensibilità pari alla metà, soluzione questa utile soprattutto per le prove sui trasformatori. Questi

## Prove dielettriche

ultimi richiedano poi tubi con doppio cannone, in grado cioè di consentire la registrazione simultanea di due grandezze separate (ad esempio tensione e corrente).

Quando interessi solo il valore di cresta della tensione, l'oscilloscopio può essere sostituito da un voltmetro di cresta, in cui con appositi circuiti elettronici si immagazzina il valore di cresta della tensione, permettendone la successiva misura; la precisione ottenibile è maggiore rispetto all'oscilloscopio anche se spesso non è ben definito come il voltmetro risponda ad eventuali oscillazioni o irregolarità della tensione nella zona intorno alla cresta.

Stanno entrando in uso sempre più frequentemente registratori di transistori numerici, che campionando la tensione ad intervalli di tempo molto piccoli (la Norma IEC 1083 specifica una frequenza minima di campionamento pari a  $30/T_x$ , dove  $T_x$  rappresenta il minimo intervallo di tempo da misurare) ne consentono la successiva ricostruzione in forma analogica o numerica.

La risoluzione consigliata per applicazioni generali è di 8 bit (1/256) e la frequenza di campionamento valutata secondo la relazione data precedentemente non dovrebbe risultare inferiore a 60 MS/s.

I vantaggi più sensibili di apparecchi di questo tipo sono la memoria e quindi la possibilità di acquisire e visualizzare poi permanentemente un evento transitorio, cosa ottenibile con grosse difficoltà e con risultati spesso non soddisfacenti con gli oscilloscopi analogici per i quali era necessario fotografare le tracce dei segnali.

Molto vantaggioso risulta anche il cosiddetto pretrigger, ossia la possibilità di sincronizzarsi su eventi casuali senza poter disporre di un segnale che anticipi l'evento stesso: operando un campionamento continuo e riscrivendo la memoria digitale, si può infatti usare un segnale ottenuto anche in un periodo successivo all'evento che interessa per arrestare la cancellazione di quanto registrato a partire da un tempo prefissato a partire dal trigger stesso.

Sistemi di questo tipo si prestano ad una gestione automatizzata ed a una valutazione diretta dei risultati: non è necessario che questi vengano passati in forma di grafico ma le operazioni si possono fare direttamente per via numerica sui contenuti delle memorie. Di particolare importanza sono però le caratteristiche metrologiche della macchine che dovrebbero fornire garanzie sull'accuratezza. La risoluzione è solo il limite a cui questa può arrivare: in realtà occorre considerare tutti i problemi della parte analogica che precede il convertitore A/D e gli errori che questo può introdurre.

Qualunque sia il tipo di dispositivo impiegato deve essere collegato alla bassa tensione del divisore tramite un cavo, in genere del tipo coassiale; esso trasmette fedelmente le tensioni dall'ingresso all'uscita, senza deformazioni quando è chiuso sulla sua impedenza caratteristica, che è in prima approssimazione una resistenza. Con i cavi reali, oltre ad una deformazione dovuta alle riflessioni, si ha anche un'attenuazione del segnale, crescente con la frequenza. Poiché questi fenomeni sono tanto più marcati quanto maggiore è la lunghezza del cavo, di regola si tende a ridurla al minimo possibile. Il cavo presenta un'impedenza caratteristica (o impedenza d'onda) molto bassa che vale normalmente 50 o 75  $\Omega$ . Quando viene chiuso sull'impedenza di un oscilloscopio dà luogo a riflessioni che influenzano la forma del segnale per tempi che sono un multiplo di quello di propagazione nel cavo stesso; per ovviare a questi effetti distorcimenti il cavo va chiuso su una resistenza pari a questa stessa impedenza caratteristica (partitori ohmici). Questa resistenza entra a pieno titolo nella determinazione del rapporto; la chiusura sull'impedenza caratteristica di norma non è possibile per partitori capacitivi per i quali si adotta allora un semi-adattamento, andando a collocare la resistenza in serie all'uscita dal ramo di bassa tensione.

Un cavo reale è anche sede di disturbi prodotti dai campi elettrici e magnetici rapidamente variabili che esistono durante l'impulso e, in misura ancora maggiore, durante la scarica di un oggetto. Un controllo di routine consiste nel registrare il segnale parassita che si ha con il cavo cortocircuitato al suo ingresso. Esso non deve superare qualche per cento del segnale utile: in caso contrario occorre ridurre le dimensioni delle spire formate dai circuiti di bassa o provvedere a schermi multipli.

## Prove dielettriche

Sono disponibili, anche se meno usati, sistemi di trasmissione in fibra ottica che sono in grado di assicurare un isolamento tra sistemi sino alle massime tensioni utilizzate (si tratta solo di avere sufficiente lunghezza della fibra stessa). Sono più costosi di un cavo e comprendono un elemento attivo (trasmettitore) alimentato di solito a batterie, la fibra ed un ricevitore che converte il segnale ottico in segnale elettrico. Esiste un certo decadimento della qualità del segnale legato alla presenza di rumore, alla stabilità e precisione del guadagno. Le bande passanti possono essere di diverse decine di MHz anche se, per molte applicazioni, bastano 100 kHz (prove in sistemi di grossa potenza, prove su interruttori etc.). Sistemi di questo tipo possono essere utilizzati per misure in tensione, adottando lunghezze di fibra commisurate al potenziale a cui viene portato il trasmettitore.

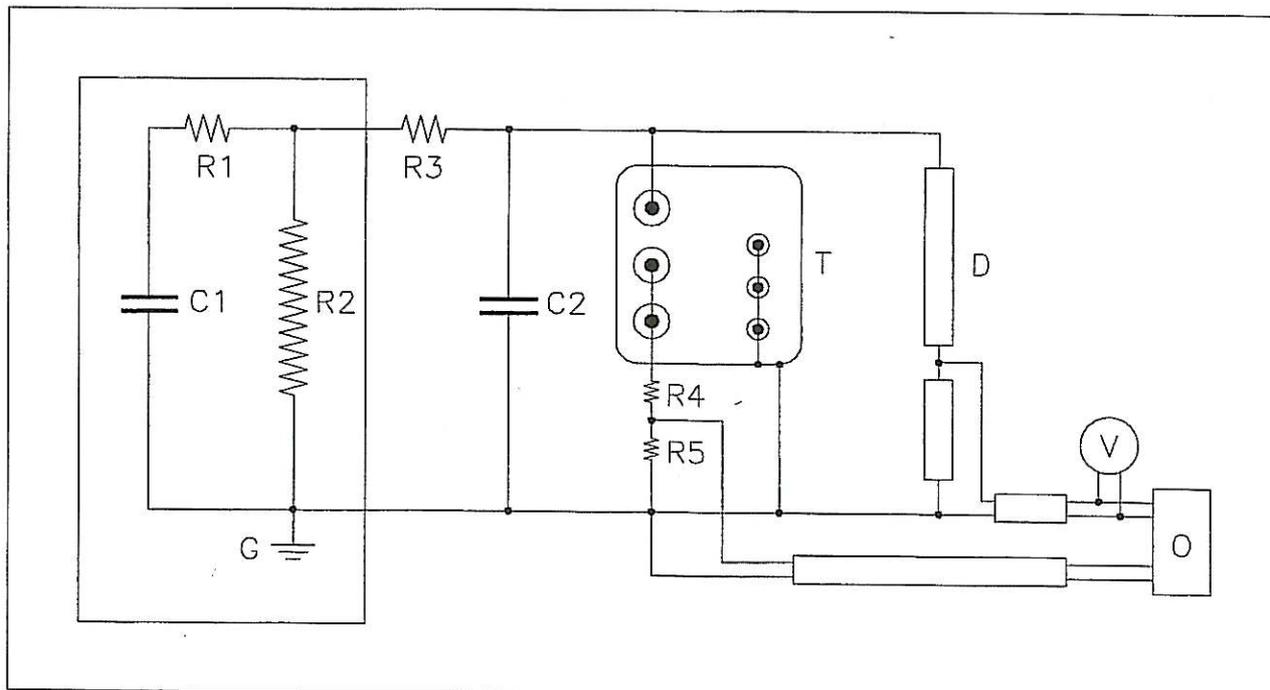
## Prove dielettriche

## 4.38 Prove su trasformatori

11-05-2007

(IMPORTANTE)

L'isolamento dei trasformatori è tipicamente non-autoripristinante e pertanto non possono essere adottate procedure statistiche per le prove. Si applicano in sequenza cinque impulsi di cui il primo ad una tensione prossima al 50% del valore di prova, i successivi tre al valore di tensione specificato e l'ultimo ancora al livello del primo. La prova viene considerata superata se non si verificano scariche tra spire o verso terra. Viene impulsato a turno ciascun terminale con tutti gli altri connessi a terra secondo lo schema indicato nella Figura seguente



- G : Generatore di Marx  
 T : Trasformatore in prova  
 D : Partitore di tensione

In generale non è sufficiente valutare l'andamento della tensione per decidere se la macchina abbia passato la prova; vi potrebbero essere infatti guasti molto minuti (corti che interessano poche spire) che quindi non determinano grosse variazioni nell'induttanza dell'avvolgimento e che pertanto non costituiscono un corto circuito effettivo. Si tratta di registrare pertanto, oltre alla tensione, anche una grandezza maggiormente sensibile ai guasti (tipicamente la corrente verso terra dai terminali non impulsati dell'avvolgimento in prova)

Durante il fronte i parametri significativi che intervengono sono quelli associati alle capacità tra spire e tra strati mentre sui tempi più lunghi interviene l'induttanza che, per il tipo di collegamento, è quella associata al flusso disperso.

In prima approssimazione il valore di induttanza può essere stimato come

$$L_2 = 30 \frac{V_{cc} V^2}{P} [\text{mH}]$$

## Prove dielettriche

con i significati usuali per i vari termini (P in kVA, tensione V in kV e  $V_{cc}$  in valore percentuale).

La corrente presenta una prima fase in cui è predominata la componente capacitiva seguita da quella induttiva che raggiunge il massimo quando la tensione si annulla. Nei casi reali la tensione è tendenzialmente oscillante anche se l'inversione di polarità dovrebbe essere contenuta.

Nel caso di avvolgimenti a bassa impedenza, la forma d'onda della tensione ai capi del carico è data dalla formula seguente:

$$U_t = U e^{-\alpha t} \left( \cos \omega t - \frac{\alpha}{\omega} \sin \omega t \right)$$

con

$$\omega^2 = \omega_0^2 - \alpha^2$$

$$\omega_0^2 = 1/L_t C_g$$

$$\alpha = R_s/2L_t$$

$$k = \frac{\alpha}{\omega_0} = \frac{R_s}{2 \sqrt{L_t C_g}}$$

Supponendo in prima approssimazione nullo lo smorzamento ( $\alpha=0$ ) l'espressione della tensione diventa:

$$U_t = U \cos \omega_0 t$$

da cui si può stimare il tempo all'emivalore

$$T_2 = \frac{1}{6} \cdot \frac{2\pi}{\omega_0} = \frac{\pi}{3} \sqrt{L_t C_g}$$

Esiste pertanto un limite ai valori di  $L_t$ , oltre il quale, per una data capacità del generatore non è più possibile sostenere la durata della coda dell'impulso.

$$C_g \approx 2 \cdot \frac{T_2^2}{L_t}$$

Si può allora collegare a terra i terminali dell'avvolgimento non in prova con delle resistenze che vengono scelte nei limiti corrispondenti a quelli delle impedenze caratteristiche delle linee (meno di  $500 \Omega$ ).

Per mettere in evidenza eventuali guasti che potrebbero interessare anche parti molto modeste dell'avvolgimento, si registra, insieme con la tensione, anche la corrente che fluisce dai terminali non impulsati dell'avvolgimento in prova. L'analisi viene fatta confrontando gli andamenti della corrente in un caso in cui non vi dovrebbero essere scariche (tipicamente ad un valore di tensione applicata pari alla metà della tensione di prova) e successivamente alla tensione piena. L'ipotesi di base è che il trasformatore si comporti in modo lineare con la tensione: pertanto tra le registrazioni non vi devono essere differenze neanche minute per lo meno nei casi in cui il mezzo isolante sia costituito da olio. La corrente presenta in genera tre fasi distinte:

## Prove dielettriche

FASI DELLA CORRENTE DURANTE GLI IMPULSI

- la prima è associata al trasferimento capacitivo, dipende pertanto dal valore delle capacità serie dell'avvolgimento ed è collegata direttamente alla derivata della tensione che è ovviamente massima sul fronte;
- a partire dal massimo questa corrente diventa trascurabile mentre <sup>poi</sup> aumenta quella di tipo induttivo dipendente dal fatto che, essendo la tensione lentamente variabile, si può avere la formazione di un flusso; questa corrente è in prima approssimazione legata all'integrale della tensione e raggiunge pertanto il suo massimo quando la tensione scende a zero
- nel passaggio tra la situazione iniziale di distribuzione capacitiva a quella induttiva si verificano all'interno dell'avvolgimento oscillazioni con frequenza propria pari a quella delle celle LC della linea costituente l'avvolgimento.

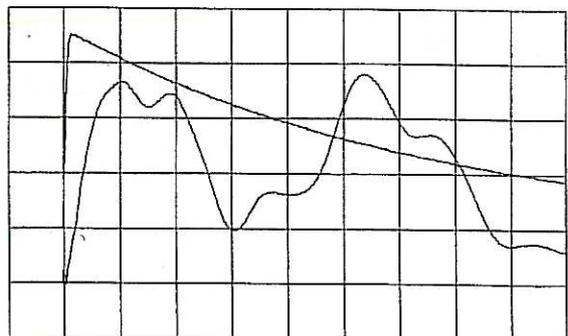
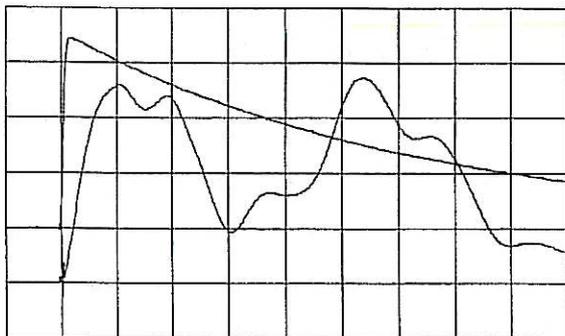
Se vi fosse poi sufficiente tempo, ma normalmente non succede, si arriverebbe ad una situazione finale dettata dalle resistenze.

Nel caso di trasformatori a secco la situazione è più complessa perché l'isolamento principale è in ogni caso costituito da aria, che per le caratteristiche dielettriche (costante dielettrica e rigidità) si trova ad essere sollecitata ancora di più di quanto non avvenga per la resina. Si possono avere allora dei fenomeni di ionizzazione anche molto intensi che interessano il canale tra gli avvolgimenti e che non danno luogo a scariche complete perché il percorso di scarica viene interrotto dal mezzo isolante in contatto con gli avvolgimenti. Certamente vi possono essere allora differenze notevoli tra le registrazioni delle correnti a metà ed a piena tensione e molto spesso differenze significative tra il primo impulso a piena tensione e quelli successivi per la presenza di fenomeni di accumulo di carica sugli isolanti che modificano in modo sensibile la distribuzione del campo elettrico.

L'interpretazione dei risultati è indubbiamente più incerta: un criterio potrebbe essere quello di confrontare tra loro gli impulsi a piena tensione (o almeno gli ultimi due) ed in ogni caso di osservare con cura fenomeni che appaiono di tipo degenerativo

Con i sistemi analogici i migliori risultati del confronto si ottengono con registrazioni uguali: pertanto nel passare dalla prova a metà tensione a quella a piena tensione tipicamente si dimezza la sensibilità della registrazione per avere deliberatamente tracciati che dovrebbero risultare perfettamente sovrapponibili in ogni dettaglio.

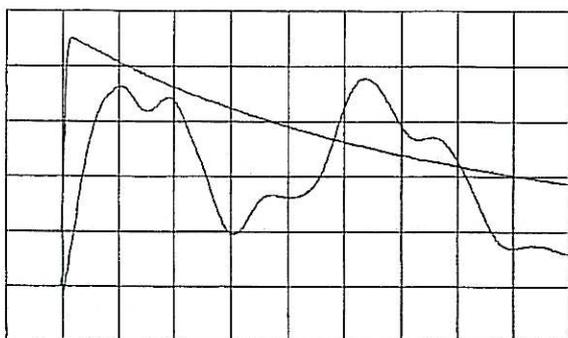
Un caso ancor più particolare è la prova con onda tronca in cui, ad opera di un dispositivo esterno, si tronca ad un tempo prefissato la tensione applicata. Il principio è quello di simulare il tipo di sollecitazione che interessa la macchina nel momento in cui interviene un dispositivo di protezione (ad esempio uno scaricatore o uno spinterometro a corno). E' molto difficile in questo caso ottenere delle registrazioni simili anche per impulsi nominalmente uguali perché bastano differenze nei tempi di troncamento anche molto modeste (100 ns) per dare origine a transitori completamente diversi. L'effetto della prova si valuta pertanto confrontando due impulsi con onda piena applicati prima e dopo la serie di onde tronche.



## Prove dielettriche



Prova ad impulso con onda tronca su un trasformatore di tensione.



I sistemi digitali possono essere ancora più efficaci dal momento che l'operazione di normalizzazione può essere effettuata in modo automatico, a partire dai contenuti delle memorie. Si può pensare di normalizzare le registrazioni tenendo conto dell'effettivo rapporto tra le tensioni impiegate e di fare poi la differenza tra le registrazioni delle correnti così normalizzate. Le maggiori difficoltà sono legate alla natura discreta dei valori disponibili; per questo si richiede di solito un registratore con risoluzione più spinta (almeno 9 bit o, praticamente 10) di quanto indicato precedentemente e con un livello di rumore più basso di quelli consentiti per le misure di tensione impulsive.

Con questa tecnica sono fattibili anche operazioni che altrimenti sarebbero solo teoriche, ossia l'analisi nel dominio della frequenza.

$$Z(\omega) = \frac{V(\omega)}{I(\omega)}$$

Se infatti si calcola la trasformata di Fourier della tensione e la si divide per la trasformata di Fourier della corrente, si ottiene l'andamento della cosiddetta transimpedenza dell'avvolgimento in funzione della frequenza (spesso si fa il contrario per questioni legate al contenuto armonico dei segnali in esame, per cui si ottiene la transammettenza). Detto andamento dovrebbe risultare invariante sia con il livello della tensione che con la forma d'onda. Pertanto i due tracciati relativi ai due livelli di tensione o lo stesso andamento ottenuto con forme d'onda leggermente diverse come nel caso di mal funzionamento del generatore dovrebbero essere perfettamente sovrapponibili.

I guasti nell'avvolgimento, modificando la rete equivalente, in genere modificano le frequenze di risonanza propria i cui picchi allora si spostano. Nel caso di scariche parziali che non cortocircuitino spire si introducono invece, nello schema originario, elementi dissipativi che abbassano il fattore di merito del circuito e quindi le ampiezze di picchi senza che la frequenza cambi in modo apprezzabile.

## Prove dielettriche

Il calcolo delle due trasformate deve tener conto del fatto che le registrazioni sono comunque di lunghezza finita per cui, per evitare di introdurre componenti estranee, è necessario usare delle finestre o manovre a zero in modo regolare la registrazione. Con registratori di buone caratteristiche si riesce mediamente ad ottenere un andamento regolare fino a circa 1 MHz.

Questo procedimento non è ancora previsto nella Normativa anche se spesso viene utilizzato come strumento aggiuntivo, utile soprattutto per dirimere casi dubbi.

## Prove di corrente

4.4 Prove di corrente 11-05-2007 20:30 JAFELU

Le macchine e gli stessi sistemi di alimentazione possono essere soggetti a condizioni di cortocircuito. In questi casi la corrente che passa è un multiplo consistente della corrente nominale con notevoli effetti di natura termica e dinamica.

Gli effetti termici possono essere molto pericolosi nel caso di isolamenti a base organica, in condizioni spinte possono portare a surriscaldamenti se non a fusione delle parti interessate; gli effetti dinamici si possono tradurre in deformazioni permanenti dei sistemi di sbarra con riduzione delle stesse capacità di tenuta per via della riduzione delle distanze. La sollecitazione dipende dal quadrato della corrente e pertanto, in presenza di componenti unidirezionali, raggiunge il massimo in corrispondenza del primo picco; in taluni casi la sollecitazione può essere amplificata da fenomeni di risonanza, dato che si tratta di una forza di natura pulsante.

I due effetti si possono combinare nel caso di contatti mobili per i quali le sollecitazioni elettrodinamiche possono indurre separazioni o cattivi contatti seguenti da scintillamenti localizzati con possibilità di notevoli dissipazioni di potenza ad opera dell'arco che si forma. Il problema, a differenza di quanto può valere per le prove dielettriche, è sensibile per tutti i livelli di tensione ed anzi, in molti casi, più critico per i sistemi a tensione basse, con potenze elevate e quindi con correnti alte, in cui la distanza ridotta tra fasi amplifica gli effetti degli sforzi.

La sostanza della prova tende pertanto ad accertare la possibilità dell'apparecchio di resistere alla sollecitazione fino all'intervento della protezione. In taluni casi si può richiedere che l'apparecchiatura continui a funzionare correttamente (ad esempio TA di protezione) o, ancor peggio, che si determinino azioni atte ad eliminare il guasto come nel caso degli interruttori per i quali però le specifiche diventano più complicate.

Le prove vanno fatte per verificare entrambi gli effetti. Per un determinato valore di corrente di cortocircuito, l'elemento discriminante è la durata che, a seconda dei casi, va da 1 a 3 secondi, in relazione del tipo di intervento della protezione del sistema. La valutazione degli effetti dinamici considera il fatto associato alla evoluzione transitoria della corrente in un sistema con parametri L,R con il primo elemento prevalente sul secondo.

Il raggiungimento della doppia condizione di avere un determinato valore di picco associato poi ad uno specifico valore efficace viene ottenuto chiudendo il circuito ad un istante opportuno nell'intorno dello zero della tensione. Nel caso la costante di tempo non consentisse di soddisfare alle due condizioni contemporaneamente, si possono fare due prove: la prima, per i soli effetti dinamici, non deve durare meno di 5 cicli mentre, per la seconda, si può chiudere vicino al massimo ottenendo un andamento senza transitorio iniziale per il tempo necessario per la fase termica.

4.41 Prova di cortocircuito su trasformatori **IMPORTANTE**

Gli sforzi sono ovviamente un problema notevole anche per i trasformatori dato che il tipo di struttura è spesso abbastanza critica per il tipo di sollecitazione. La prova viene effettuata con due possibilità:

- alimentazione a piena tensione di una macchina preventivamente messa in corto circuito sul lato secondario; (prima corto poi tensione)
- corto circuito sul lato secondario di una macchina preventivamente alimentata alla tensione nominale sul primario. (prima tensione e poi corto)

La prova viene ripetuta per 9 volte, variando l'istante di chiusura in modo tale che il massimo della corrente si presenti ciclicamente sulle diverse fasi.

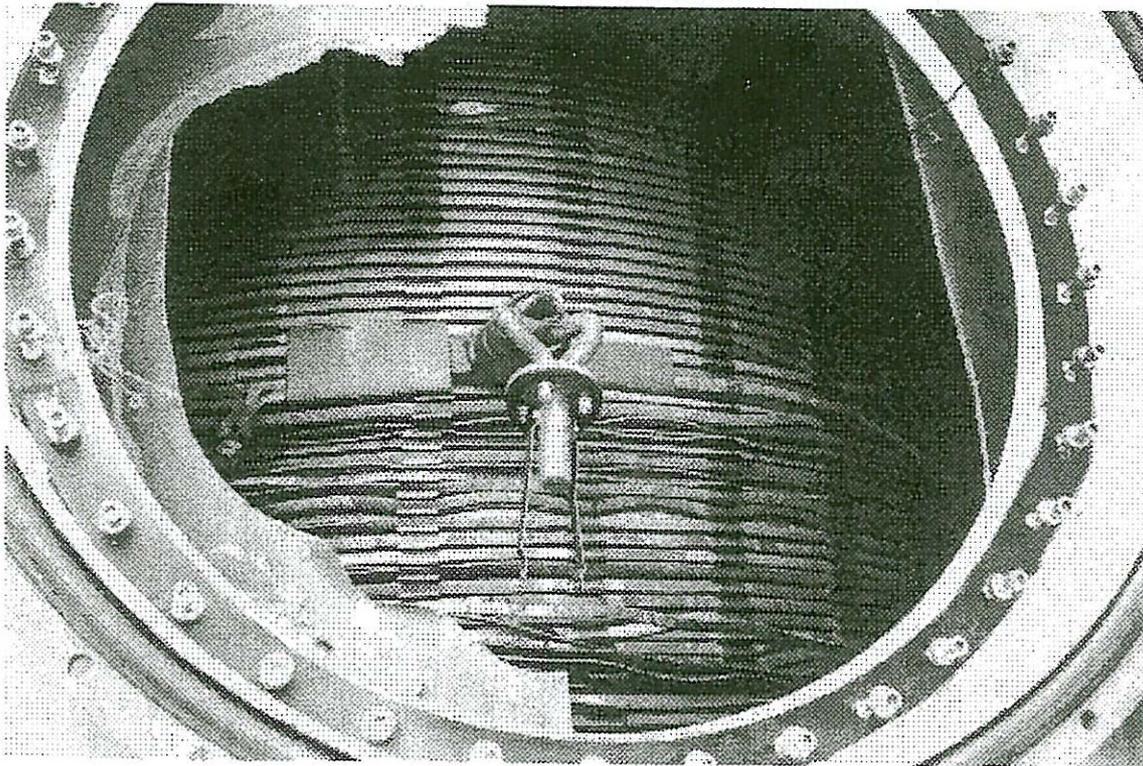
## Prove di corrente

La potenza della rete deve essere ovviamente prevalente rispetto a quella della macchina (ad esempio, una macchina da 100 MVA nominali con  $v_{cc}$  del 10%, assorbe in cortocircuito all tensione nominale 1000 MVA (10 volte la corrente nominale); la rete dovrebbe avere una potenza di corto circuito almeno pari a 10 GVA).

Il criterio per stabilire se la prova è passata consiste nel misurare la impedenza di corto circuito prima e dopo la prova stessa: si considera la prova superata quando la reattanza alla fine non differisce da quella iniziale per più dello 0,2%; limiti maggiori sono attualmente all'esame per trasformatori con avvolgimento ovali, per i quali la prova riveste carattere di particolare criticità.

La prova si effettua normalmente con metodi di ponte per avere la ripetibilità necessaria. Spesso si effettua anche una ricognizione sulle parti attive estraendo nucleo ed avvolgimenti dal cassone per verificare eventuali deformazioni degli avvolgimenti, frequenti soprattutto in corrispondenza delle testate.

Di seguito vengono riportati gli effetti di un cortocircuito avvenuto in servizio su un autotrasformatore trifase da interconnessione: si vede il dislocamento di tutto l'avvolgimento nella parte inferiore. In altri casi gli effetti possono essere ancora più disastrosi, soprattutto se l'onda d'urto riesce a squarciare la cassa, per cui tipicamente si può sviluppare un incendio dell'olio.



Autotrasformatore 250 MVA – 400/135 ± 15%/6,3 kV danneggiato da un cortocircuito ai morsetti lato 135 kV.

L'avvolgimento di alta tensione è realizzato con due vie in parallelo con ingresso dell'alta tensione in posizione centrale. Il passante è montato lateralmente sulla cassa.

#### 4.42 Prova di cortocircuito su sezionatori, quadri elettrici etc.

Nel caso di sezionatori di linea o di terra il maggior problema è associato alla presenza di contatti mobili. La costruzione meccanica deve essere tale che essi non aprano durante la fase dinamica; spesso si sfrutta un opportuno andamento della corrente nei contatti per ottenere delle forze che tendano a serrare il contatto. La stessa struttura dei contatti a tulipano, quando presente, contribuisce a questo scopo. Il sezionatore deve essere montato nelle condizione di funzionamento e,

## Prove di corrente

dopo la taratura del circuito effettuata facendo un corto circuito all'ingresso della spira, si passa alla prova con i valori di corrente e per il tempo specificati.

La prova si considera passata se il sezionatore è ancora integro : nel caso in cui si verificano piccoli danneggiamenti ai contatti (perlinature) il criterio per arrivare al giudizio finale è la ripetizione della prova termica per arrivare a stabilire se, in quelle condizioni, il sezionatore può ancora portare le correnti nominali con salti termici dei contatti nei limiti consentiti.

Nel caso dei quadri elettrici le possibilità e le conseguenti localizzazioni di un cortocircuito sono molteplici. Per i quadri di bassa tensione, con molteplici diramazioni, la corrente di cortocircuito a valle degli interruttori potrebbe essere limitata anche dall'intervento di questi, se hanno la funzione di limitatori: in questo caso si possono fare prove con diverso valore per parti diverse del quadro.

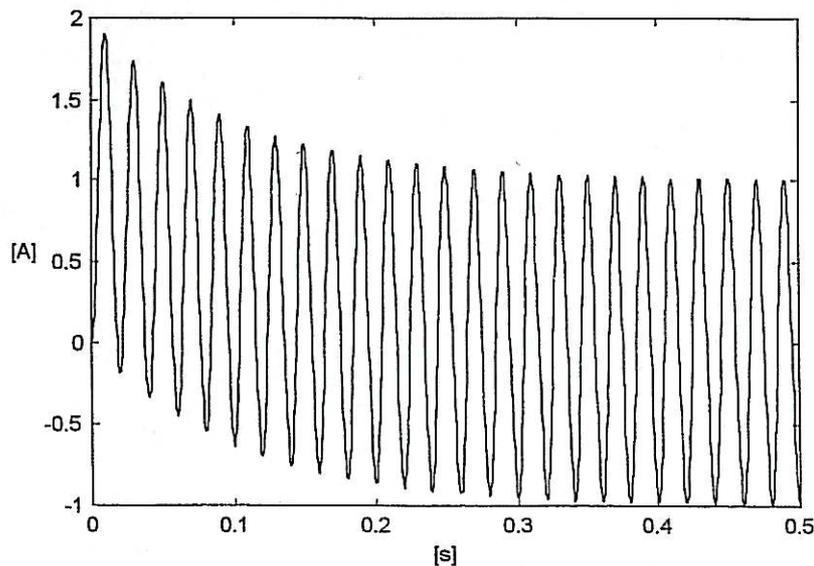
La corrente che si viene a stabilire all'inserzione di una f.e.m. alternata è del tipo:

$$i = \frac{E_M}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}} \left( \sin(\omega t + \alpha - \varphi) - e^{-\frac{t}{T}} \sin(\varphi - \alpha) \right) \quad \text{con} \quad \text{tg} \varphi = \frac{\omega L}{R} \quad \text{e} \quad T = \frac{L}{R}$$

costante di tempo

Se  $\varphi$  ed  $\alpha$  sono uguali, il termine transitorio scompare e la corrente si stabilisce da subito al valore di regime; in caso contrario, se  $\varphi$  è prossimo a  $\pi/2$  ed  $\alpha$  a zero

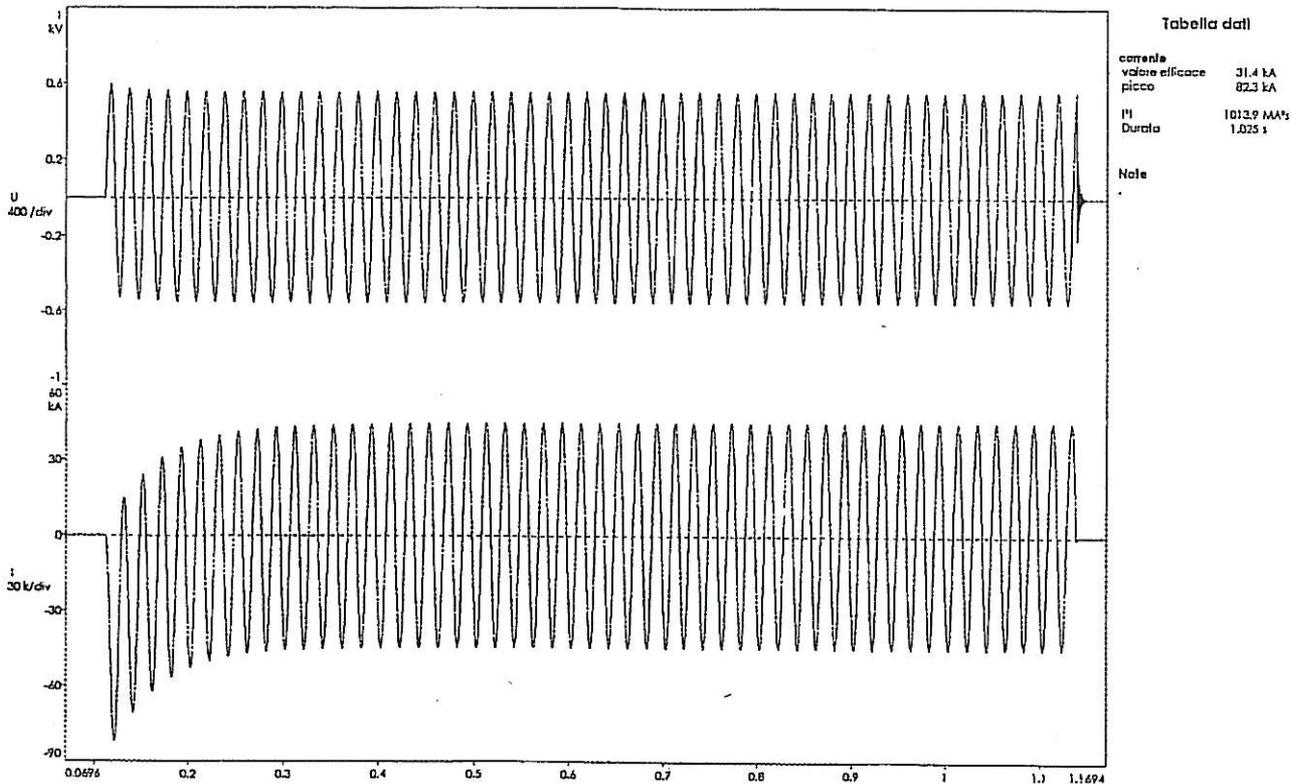
$$i = \frac{E_M}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}} \left( \cos(\omega t) - e^{-\frac{t}{T}} \right)$$



Andamento della corrente in un circuito R-L con chiusura sullo zero della tensione

Dopo un semiperiodo il valore approssima il doppio del massimo della sinusoide tanto più quanto più è elevata la costante di tempo rispetto al periodo. Si possono pertanto avere le situazioni illustrate nella figura seguente, per due diversi istanti di chiusura; per un sistema trifase in cui la chiusura dei contatti dei vari poli avvenga simultaneamente si può controllare l'andamento della corrente in una fase mentre quelle delle altre due derivano automaticamente dalle relazioni di fase del sistema. Per molte prove su sistemi trifase è previsto che l'istante di chiusura venga variato in modo che il massimo della corrente si verifichi ciclicamente sulle tre fasi.

## Prove di corrente

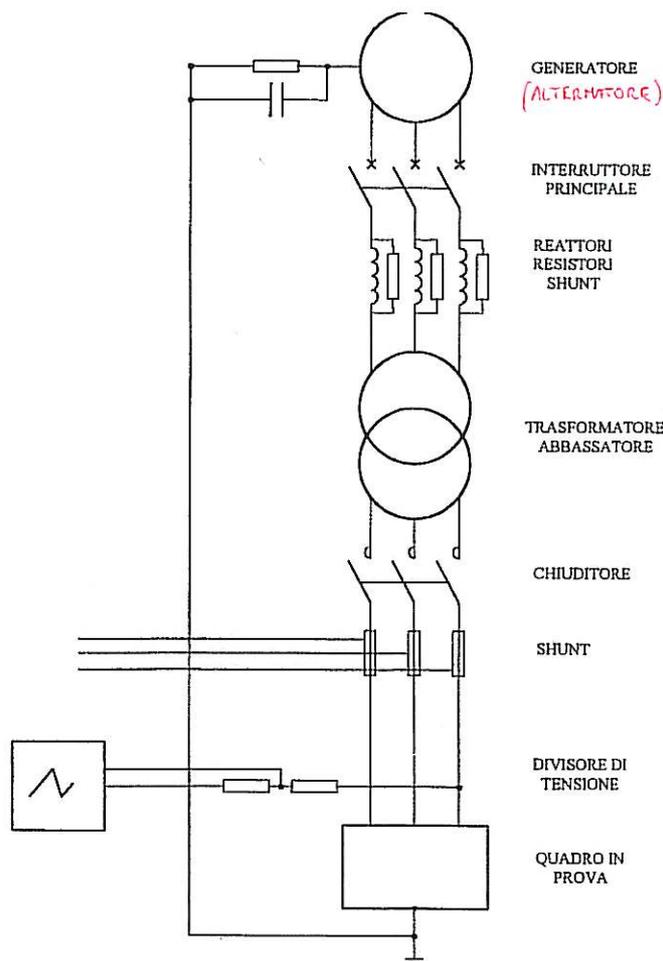


Andamento della corrente e della tensione ai capi dell'oggetto in prova

La pratica applicazione prevede due possibili tipi di impianto di prova:

- connessione ad un nodo di rete di potenza sufficientemente alta a mezzo di trasformatori collegati direttamente alle sbarre di una sottostazione di notevole potenza; a seconda della corrente che si vuole ottenere andranno previste adeguate reattanze di limitazione ed interruttori di protezione (normalmente duplicati con soglie di intervento diverse) per evitare che un guasto nell'impianto di prova possa mettere fuori uso la stessa sottostazione.
- utilizzo di un alternatore. In questo caso la macchina prevista per un servizio con grado di intermittenza bassa può essere sfruttato molto al di sopra dei limiti convenzionali arrivando ad avere potenze di migliaia di MVA con macchine con dimensioni relativamente piccole.

## Prove di corrente



Schema di impianto di prova con alternatore

La sollecitazione termica che, oltre all'oggetto in prova interessa lo stesso impianto di alimentazione, porta ad un riscaldamento che determinando un aumento della resistenza tende a creare delle situazioni di instabilità che possono portare alla fusione del circuito.

Particolarmente pericolosa è la condizione in cui si venga a creare un contatto incerto che porterebbe alla formazione di un arco con conseguenze devastanti per l'elevata energia che si sviluppa in queste condizioni. Il riscaldamento di diversi tipi di conduttori può essere valutato con abachi del tipo riportato di seguito, che tiene conto delle variazioni della resistività con la temperatura.

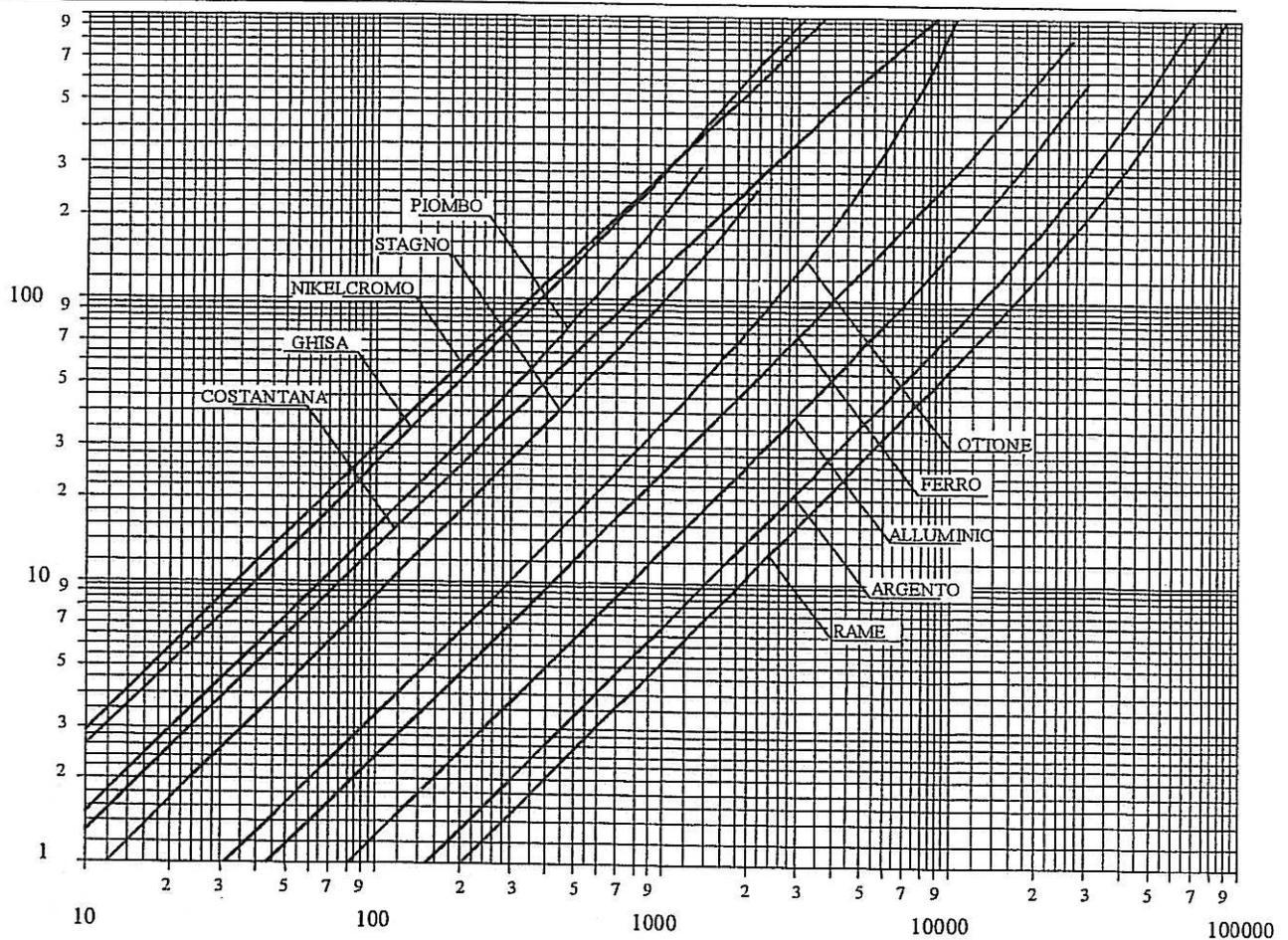
Se si verificano guasti durante la prova è normalmente impossibile intervenire perché le condizioni del circuito non cambiano in modo significativo da fornire informazioni al relè di massima corrente: si ha pertanto la distruzione, più o meno completa dell'oggetto in prova o almeno dei contatti.

Nella valutazione della sollecitazione termica, potendosi verificare differenze tra il valore di corrente specificato e quello ottenuto, si considera il cosiddetto integrale di Joule

$$\int I^2 dt$$

calcolato sui valori effettivi della corrente: la prova si considera superata se il valore di detto integrale corrisponde a quello che si otterrebbe sulla base del calcolo effettuato con i valori di corrente e di tempo specificati. In pratica pertanto potrebbe essere possibile allungare il tempo se il valore di corrente è più piccolo di quello richiesto.

Prove di corrente

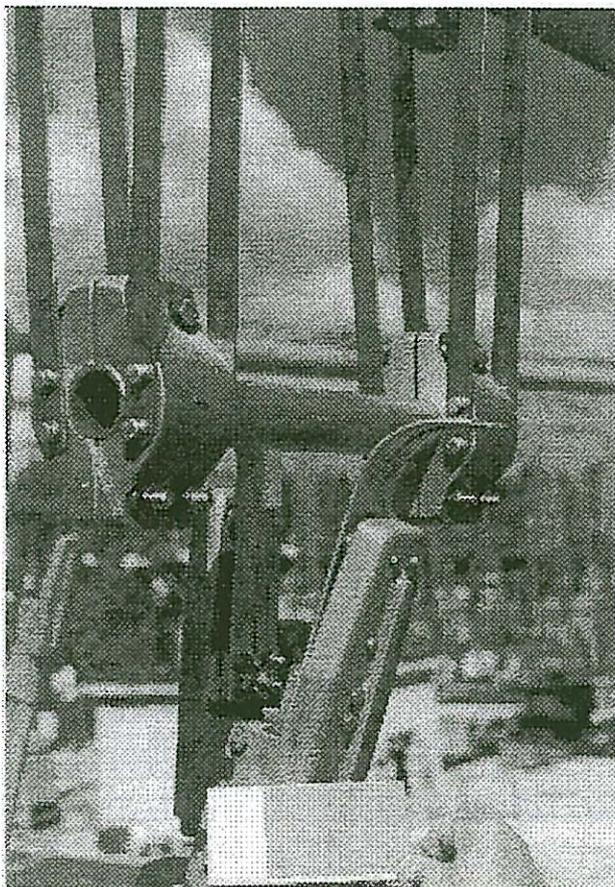


$$G^2t \left[ \frac{A}{mm^2} \right]^2 s$$

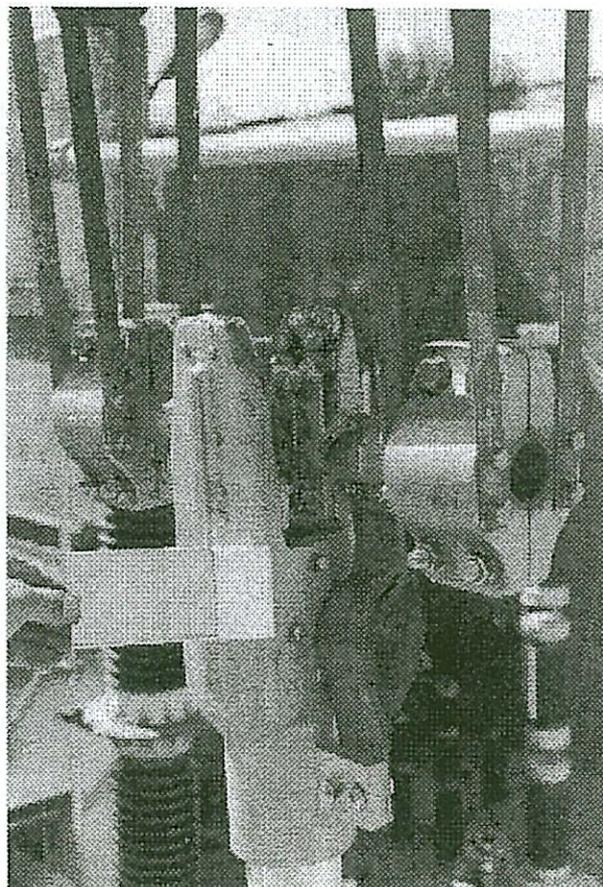
**Esempio**

Si supponga di avere una corrente di 25 kA per 1 secondo su un conduttore di terra con sezione 100 mm<sup>2</sup>.  
 Si ottiene allora  $G^2t = 62500 [A/mm^2]^2 s$  e dall'abaco si vede che l'incremento di temperatura per il conduttore di rame sarà di circa 700 K.  
 Nel caso di un cavo con rivestimento plastico questo porterebbe alla distruzione certa dell'isolamento.

## Prove di corrente



(a)



(b)

Sezionatore a pantografo prima e dopo la prova.

Stato dei contatti di un sezionatore prima (a) e dopo la prova di corrente (b): l'arco di potenza ha fuso completamente le lame dei contatti ed il tubo del pendino verticale per il quale, in fase di cortocircuito, si è allentata la presa tra contatto fisso e mobile.

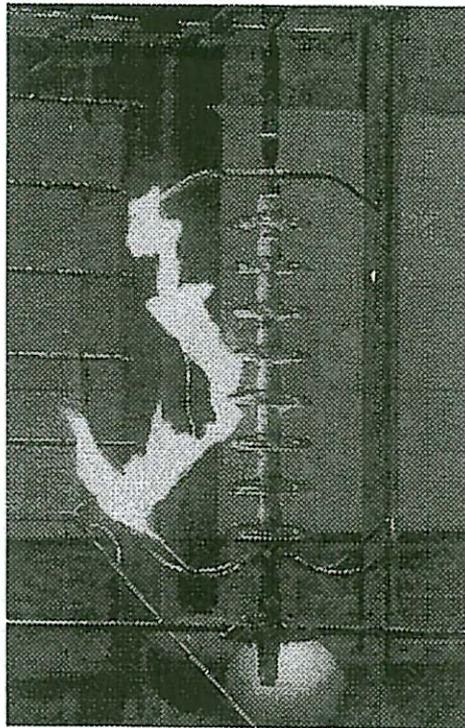
La corrente viene regolata con una serie di reattanze il cui valore viene scelto in modo che costituisca un'impedenza maggiore di quella del carico e far sì che la tensione a vuoto sia sufficientemente elevata per poter mantenere un arco nel caso in cui si verifichi un guasto nell'oggetto in prova.

Questo particolare aspetto è molto importante quando ad esempio si debbano valutare gli effetti di un arco di potenza su una catena di isolatori o all'interno di un quadro elettrico: in questo caso, date le notevoli lunghezze, possono essere necessarie tensioni di qualche decina di kV per assicurarsi che l'arco non si spenga al passaggio della corrente per lo zero.

L'innesco dell'arco in questo caso avviene con un filo di materiale conduttore collegato tra gli elettrodi terminali, filo che viene vaporizzato nei primi istanti del passaggio di corrente. Il percorso

## Prove di corrente

è normalmente fissato dalla normativa che prevede che venga fatto passare anche sulle cappe degli isolatori per simulare l'effetto di un arco che si sviluppa a contatto delle alette isolanti. Normalmente la prova si considera superata quando la catena non viene tranciata provocando la caduta della linea. Non è detto ovviamente che la catena possa ancora tenere la tensione nominale per la presenza di depositi metallici sulla superficie, legati alla sublimazione delle parti metalliche con cui l'arco sia venuto in contatto. La tensione può essere invece ulteriormente adattata facendo ricorso ad un trasformatore abbassatore nel caso di prove su oggetti per bassa tensione.



## Prova di tenuta all'arco di potenza su una catena equipaggiata con racchetta

La misura della corrente vien fatta con uno shunt che deve avere adeguata capacità termica per immagazzinare l'energia che viene dissipata senza che il riscaldamento pregiudichi le sue caratteristiche di funzionamento e metrologiche. Lo shunt ovviamente riproduce correttamente anche le componenti unidirezionali; il problema del collegamento galvanico viene attualmente risolto facendo ricorso a sistemi di trasmissioni in fibra ottica, anche se questo complica ed allunga la catena di misura, introducendo potenziali sorgenti di errore.

Vengono anche utilizzati TA in esecuzione particolare (nucleo con traferro) per contrastare gli effetti dello spostamento del punto di lavoro o sonde di Rogowsky, senza nucleo magnetico, per le quali i problemi possono venire dall'integratore collegato in uscita che potrebbe saturare sempre in relazione alla presenza di componenti unidirezionali.

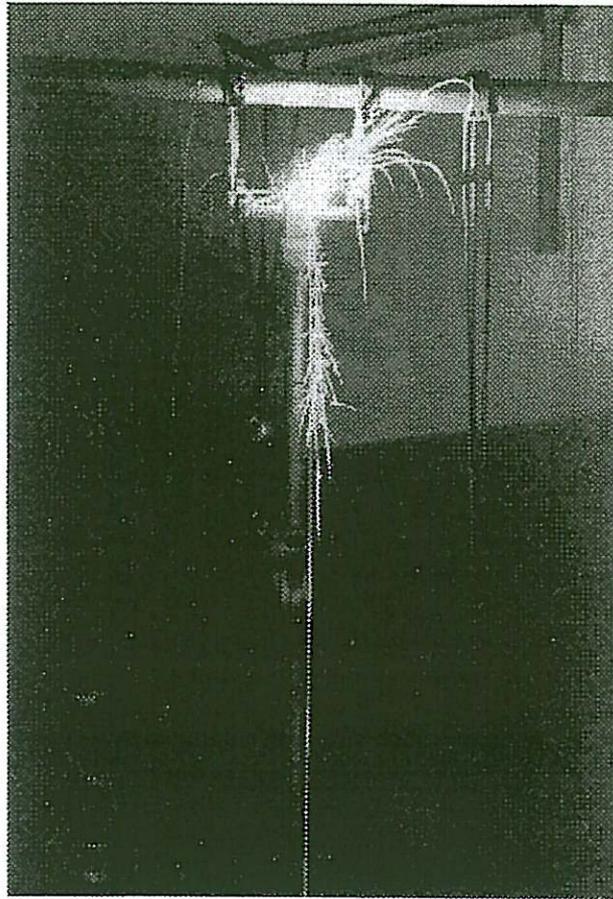
Se la prova è intesa a verificare le possibilità di tenuta di un oggetto e questo invece cede, normalmente gli effetti sono molto drastici (praticamente l'oggetto viene distrutto) perché non è possibile intervenire a livello di relè di protezione per la mancanza di variazioni significative nella corrente.

Vi sono anche situazioni in cui viene innescato intenzionalmente un arco per verificarne gli effetti (caso di quadri protetti); la prova si considera superata quando l'involucro metallico è in grado di contenere all'interno i prodotti della combustione e non esplosione per effetto della pressione elevata

DISTRUZIONE  
FORNITA

## Prove di corrente

che l'energia dell'arco genera (prova di tenuta all'arco interno). In questi casi è ovvio che l'oggetto viene sicuramente distrutto.



Vi sono altre situazioni particolari per apparecchiature di stazione quali la prova di apertura e chiusura di correnti di sbarra: la prova tende a simulare le situazione di un sezionatore che deve effettuare il parallelo tra due sistemi di sbarre della stessa stazione. La differenza di potenziale è ovviamente molto modesta (qualche centinaio di volt) ma le correnti in giuoco molto alte. La struttura del sezionatore deve essere tale da consentire l'operazione senza danneggiare i contatti principali; di solito il sezionatore viene dotato di contatti d'arco che peraltro devono riuscire ad operare senza incollarsi o, peggio, saldarsi.

## APPENDICE

## CEI - Suddivisione Norme per Comitati Tecnici

- 0 Applicazione delle Norme e testi di carattere generale
- 1/25 Terminologia, grandezze e unità (ex CT 1/24/25)
- 2 Macchine rotanti**
- 3 Documentazione e segni grafici
- 4 Motori primi idraulici
- 5 Turbine a vapore
- 7 Materiali conduttori
- 8/28 Tensioni, correnti e frequenze normali / Coordinamento degli isolamenti
- 9 Trazione
- 10 Fluidi isolanti
- 11 Impianti elettrici ad alta tensione e di distribuzione pubblica di bassa tensione
- 12 vedi 92, 100 e 102/103
- 13 Apparecchi per la misura dell'energia elettrica e per il controllo dei carichi
- 14 Trasformatori**
- 15/98 Materiali isolanti - Sistemi di isolamento (ex CT 15/63)
- 16 Contrassegni dei terminali e altre identificazioni
- 17 Grossa apparecchiatura**
- 18 Impianti elettrici di navi ed unità fisse/mobili fuori costa (off-shore)
- 20 Cavi per energia**
- 21/35 Accumulatori e pile
- 22 Elettronica di potenza
- 23 Apparecchiatura a bassa tensione
- 24 Vedi 1/25
- 26 Macchine ed apparecchiature per saldatura elettrica
- 27 Elettrotermia
- 28 Vedi 8/28
- 29/87 Elettroacustica/Ultrasuoni (ex CT 29)
- 31 Materiali antideflagranti
- 32 Fusibili
- 33 Condensatori**
- 34 Lampade e relative apparecchiature
- 35 Vedi 21/35
- 36 Isolatori
- 37 Scaricatori
- 38 Trasformatori di misura**
- 40 Condensatori e resistori per apparecchiature elettroniche
- 41 Vedi 94
- 42 Tecnica delle prove ad alta tensione**
- 44 Equipaggiamento elettrico delle macchine industriali
- 45 Strumentazione nucleare del reattore e suo ambito
- 46 Cavi simmetrici e coassiali, cordoni, fili, guide d'onda, connettori per radiofrequenza
- 47 Dispositivi a semiconduttore e microcircuiti integrati
- 48 Componenti elettromeccanici per apparecchiature elettroniche
- 50 vedi CT 104
- 52/91 Circuiti stampati/Tecniche di montaggio superficiale
- 55 Conduttori per avvolgimenti
- 56 Fidatezza
- 57 Telecomunicazioni associate ai sistemi elettrici di potenza
- 59/61 Apparecchi utilizzatori elettrici per uso domestico e similare (ex CT 107)
- 60 Vedi 100
- 61 Vedi 59/61

- 62 Apparecchiature elettriche per uso medico
- 64 Impianti elettrici utilizzatori di bassa tensione (fino a 1000 V in c.a. e a 1500 V in c.c.)
- 65 Controllo e misura nei processi industriali
- 66 Sicurezza degli strumenti di misura, controllo e da laboratorio
- 69 Macchine elettriche dei veicoli stradali elettrici
- 70 **Involucri di protezione**
- 72 Vedi 59/6 1
- 74 Macchine d'ufficio e per l'elaborazione dei dati
- 75 vedi CT 104
- 76 Apparecchiature laser
- 77 Vedi CT 210
- 79 Sistemi di rilevamento e segnalazione per incendio, intrusione, furto, sabotaggio e aggressione
- 80 Apparatı e sistemi per la navigazione e le radiocomunicazioni marittime
- 81 Protezione contro i fulmini
- 82 Sistemi di conversione fotovoltaica dell'energia solare
- 83 Interconnessione degli apparati per le tecniche informatiche
- 84 Vedi 100
- 85 Strumenti di misura delle grandezze elettromagnetiche
- 86 Fibre ottiche
- 87 Vedi 29/87
- 88 Sistemi di generazione a turbina eolica
- 89 Prove relative ai rischi da fuoco
- 90 Superconduttività
- 92 Sicurezza di apparecchi elettronici audio, video e similari
- 94 Relè elettrici a tutto o niente (ex CT 94/95, ex CT 41 )
- 95 Relè di misura e dispositivi di protezione
- 96 Trasformatori di sicurezza ed isolamento
- 100 Sistemi e apparecchiature audio, video e multimediali (ex CT 84/60, SC 12A, SC 12G)
- 101 Elettrostatica
- 102/103 Radiocomunicazioni (ex SC 12C, 12E, 12F)
- 103 Vedi 303
- 104 Condizioni ambientali. Classificazioni e metodi di prova (ex CT 50, CT 75)
- 107 Vedi 59/61
- 110 Vedi 2 10
- 111 Vedi 211
- 114 Vedi 2 14
- 116 Vedi 2 16
- 210 Compatibilità elettromagnetica (ex CT 110)
- 211 Esposizione umana ai campi elettromagnetici (ex CT 111 )
- 214 Sistemi e tecnologie elettrotecniche, elettroniche e telematiche per la gestione ed il controllo del traffico e dei trasporti stradali (ex CT 114)
- 216 Rivelatori di gas (ex CT 116)
- 301 Azionamenti elettrici (ex Comm. Azionamenti Elettrici)
- 303 Reti e apparati per servizi di telecomunicazioni (ex CT 103)
- 304 Interferenze elettriche (ex SC 303A)
- 305 Apparatı e sistemi terminali di telecomunicazioni (ex SC 3038, 303E/F)
- 306 Interconnessione di apparecchiature di telecomunicazione (ex SC 303L)
- 345 Strumentazione di radioprotezione (ex CT 145)

### A.1 - METODO IN P.U.

Il procedimento in per unità, raccomandato dalle stesse Norme per la presentazione dei risultati, trova ampio impiego anche nelle valutazioni ed analisi di rete di tipo impiantistico.

I vantaggi principali nell'ambito delle misure sono :

- una facilità di presentazione e controllo dei dati, dal momento che le macchine hanno parametri che, dopo la normalizzazione, si collocano entro limiti molto stretti;
- nel caso di trasformatori i valori non dipendono dal lato considerato (primario o secondario);
- non interessa il tipo di collegamento.

I parametri normalmente coinvolti sono quattro: P, V, I, Z.

Ovviamente non sono tutti indipendenti: di solito si danno P e V e si derivano gli altri.

$$I_B = \frac{P_B}{\sqrt{3}V_B}$$

Per sistemi trifasi:

$$Z_B = \frac{V_B}{\sqrt{3}I_B} = \frac{V_B^2}{P_B};$$

Perché le considerazioni fatte prima abbiano valore, la base scelta per il calcolo deve essere pari alla potenza nominale; nel caso in cui questo non sia possibile, i valori possono risultare non più in linea con le grandezze fisiche, anche se ovviamente sono ancora pienamente utilizzabili per i calcoli.

Le grandezze relative si esprimono come:

$$v = \frac{V}{V_n}; \quad i = \frac{I}{I_n} \quad \text{dove lo stesso numero si applica sia alle grandezze stellate che}$$

concatenate, primarie o secondarie, a seconda del riferimento usato per la normalizzazione.

Analogamente si possono esprimere in termini relativi le perdite, le impedenze, le resistenze e le reattanze.

$$p = \frac{P}{P_n}; \quad z = \frac{Z}{Z_n}; \quad r = \frac{R}{Z_n}; \quad x = \frac{X}{Z_n}$$

Si noti che, essendo

$$r = \frac{R}{Z_n} = \frac{R I_n^2}{Z_n I_n^2} = \frac{P}{P_n}$$

discende

$r = p$  e analogamente

$$v_c = z_c$$

$$v' = \frac{V}{i} = z_c \quad v'_r = p = v' \cos \varphi_c = r; \quad v'_x = v' \sin \varphi_c = x$$

Può capitare di dover effettuare un cambiamento di base per cui essendo  $Z$  l'impedenza nella base di partenza si ottiene:

$$z_o = Z \frac{P_o}{V_o^2}; \quad z_n = Z \frac{P_n}{V_n^2} \Rightarrow z_n = z_o \frac{P_n V_o^2}{P_o V_n^2}$$

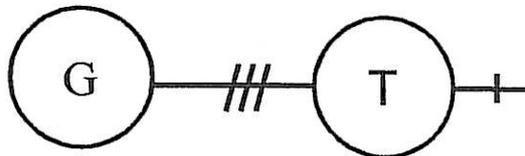
Se non vengono cambiati i riferimenti per le tensioni si ottiene

$$z_n = z_o \frac{P_n}{P_o}$$

ossia l'impedenza, in valore relativo, risulta proporzionale alla potenza base considerata. Il cambiamento di base è normalmente irrilevante nel caso il metodo si applichi alla presentazione dei risultati di misure: più importante è l'applicazione ai calcoli negli impianti elettrici, nei quali sono normalmente presenti componenti con potenze diverse. Il metodo prevede allora che tutti i componenti siano riferiti alla stessa base, che in linea di principio può essere qualsiasi. In questo caso il valore delle grandezze, espresse in valore relativo, può non avere alcun senso fisico anche se conserva validità al fine dei calcoli.

### Esempio (IMPORTANTE)

Si consideri lo schema indicato con un generatore sincrono collegato al trasformatore si valuti la corrente di corto circuito a valle del trasformatore con il sincrono funzionante alla tensione nominale.



G: Generatore sincrono trifase -  $P_n = 25 \text{ MVA}$  -  $V_n = 13,8 \text{ kV}$  -  $x_s = 100\%$

T: Trasformatore trifase -  $P_n = 10 \text{ MVA}$  -  $13,8 / 130 \text{ kV}$  -  $x_c = 10\%$

Si scelga come base per i calcoli quella del generatore. L'impedenza del trasformatore, nel passaggio dalla base  $10 \text{ MVA}$  a  $25 \text{ MVA}$ , diventa pertanto

$$x_{cn} = 10 \cdot 25 / 10 = 25\%$$

La reattanza totale diventa:

$$x_t = 125\% = 1,25$$

Se viene fatto il cortocircuito a piena tensione si ottiene a regime

$$i = 1/1,25 = 0,8$$

ossia la corrente è pari all'80% della corrente nominale riferita a 25 MVA.

$$I_n = \frac{25 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 130 \cdot 10^3} = 111 \text{ A}$$

$$I_n = \frac{P_n}{\sqrt{3} \cdot 130 \cdot 10^3}$$

Scegliendo invece come base 10 MVA l'impedenza del trasformatore rimane inalterata e quella del generatore diventa

$$x_{sn} = 100 \cdot 10/25 = 40\%$$

La reattanza totale diventa:

$$x_t = 50\% = 0,5$$

Se viene fatto il cortocircuito a piena tensione si ottiene

$$i = 1/0,5 = 2 = 200\%$$

ossia la corrente è pari al doppio della corrente nominale riferita a 10 MVA.

$$I_n = \frac{10 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 130 \cdot 10^3} = 44,4 \text{ A}$$

In termini assoluti la corrente è ovviamente la stessa. Infatti, nel primo caso

$$I_c = 0,8 \cdot 111 = 88,8 \text{ A}$$

$$I_c = 2 \cdot 44,4 = 88,8 \text{ A.}$$

Un risultato perfettamente equivalente potrebbe essere ottenuto facendo riferimento anche ad una base qualsiasi, completamente svincolata dalle potenze nominali delle due macchine. Naturalmente l'utilizzo di una base non corrispondente alla taglia della macchina non consente la valutazione della correttezza delle grandezze utilizzate ed in sostanza si perde il riscontro fisico.

Si noti che le grandezze relative possono appunto essere usate come tali o in percentuale (valore relativo  $\cdot 100$ ). Quando nelle operazioni si usano valori relativi non nascono mai problemi mentre con le grandezze percentuali, quando si debbano fare prodotti o divisioni bisogna rispettivamente dividere o moltiplicare per 100 il risultato.

Esempio

Si calcoli la tensione necessaria per far circolare in un trasformatore in c.c. con impedenza del 13 % la metà della corrente nominale

In termini relativi

$$v = 0,13 \cdot 0,5 = 0,065 = 6,5\%$$

In termini percentuali

$$v = 13 \cdot 50 / 100 = 6,5\%$$

**A.2 TRASFORMATORI - Tolleranze**

<b>GRANDEZZA GARANTITA</b>	Tolleranza ammessa
<b>RAPPORTI DI TRASFORMAZIONE</b>	Il più piccolo tra i valori seguenti: a) $\pm 0,5$ % del valore nominale b) $\pm 1/10$ della tensione di corto circuito percentuale garantita.
<b>PERDITE</b>	1/10 del valore garantito sulle perdite totali. E' ammessa una compensazione tra perdite a vuoto e perdite dovute al carico a condizione che nessuna di esse superi di oltre 1/7 il valore garantito. Negli stessi limiti è ammessa la compensazione tra perdite a carico tra coppie diverse avvolgimenti.
<b>TENSIONE DI CORTO CIRCUITO</b>	1/10 della tensione di corto circuito (presa principale) specificata per quella presa
<b>CORRENTE A VUOTO</b>	+30 % del valore garantito
<b>SOVRATEMPERATURE</b>	Nessuna tolleranza in più, alla potenza nominale e sulla presa principale, salvo accordi contrari.

### A.3 MISURA DELLE CAPACITÀ TRA AVVOLGIMENTI

Esistono alcune situazioni, in particolare quelle connesse al trasferimento di impulsi di tensione, per le quali interessa conoscere le capacità tra avvolgimenti. Lo schema equivalente è quello indicato in figura A.1.1; si vede come le varie capacità non possano essere misurate separatamente. Si tratta pertanto di effettuare tre misure tra un terminale e gli altri due connessi tra loro e di risolvere poi il sistema ottenuto. La misura può essere effettuata anche in bassa tensione; ovviamente la cassa deve essere mantenuta isolata.

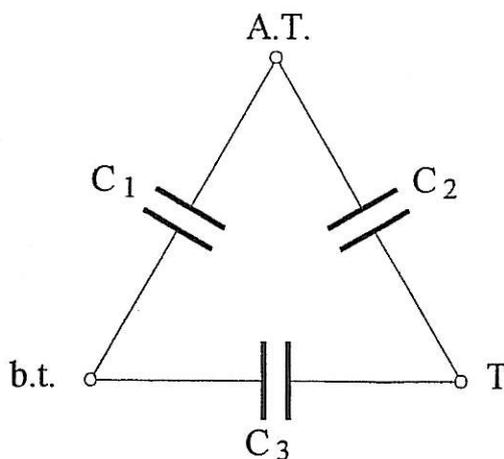


Fig. A.1.1

#### *Esempio di misura delle capacità tra avvolgimenti*

##### 1. Trasformatore in olio – $P_n = 16 \text{ MVA} - 120/20 \text{ kV}$

AT/mt-cassa	$5810 \text{ pF} = C_1 + C_2$
mt/AT-cassa	$10200 \text{ pF} = C_1 + C_3$
Cassa/At-mt	$9190 \text{ pF} = C_2 + C_3$

da cui, risolvendo il sistema, si trova:

AT / mt	$3410 \text{ pF}$
At / cassa -nucleo	$2400 \text{ pF}$
mt / cassa- nucleo	$6790 \text{ pF}$

##### 2. Trasformatore in olio - $P_n = 400 \text{ kVA} - 15/0,4 \text{ kV}$

AT/bt-cassa	$= 2390 \text{ pF} = C_1 + C_2$
bt/AT-cassa	$= 5590 \text{ pF} = C_1 + C_3$
Cassa/At-bt	$= 4550 \text{ pF} = C_2 + C_3$

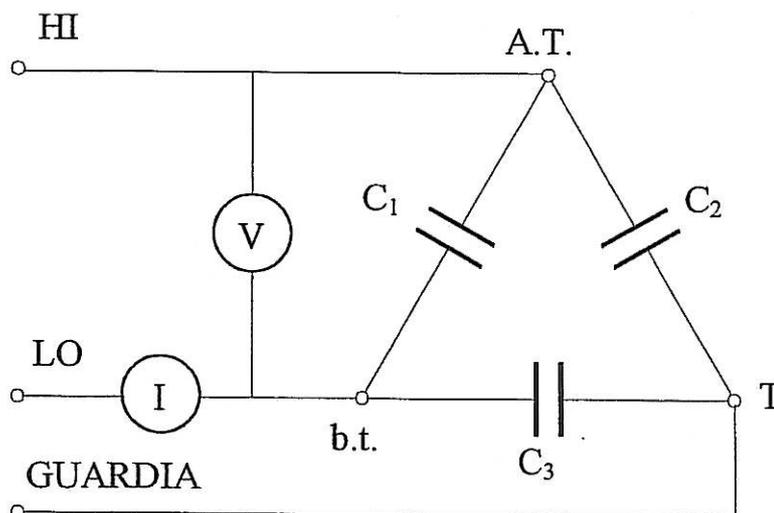
da cui, risolvendo il sistema, si trova:

AT - bt	= 1710 pF
At - cassa	= 670 pF
bt - cassa	= 3870 pF

Circa il senso di questo tipo di misura si vede facilmente come una sovratensione che si presentasse "di modo comune" sull'avvolgimento AT si trasferirebbe attenuata solo di un fattore 3,3 sulla bassa, nel caso in cui questa non sia vincolata a terra. L'attenuazione non avrebbe pertanto nulla in comune con il rapporto spire che regola il trasferimento per via magnetica e che continuerebbe ad applicarsi per sovratensioni di modo differenziale. La capacità tra avvolgimento di A.T. e b.t. può essere ridotta drasticamente facendo ricorso ad uno schermo metallico inserito nel canale tra gli avvolgimenti. In questo caso le linee di campo si chiudono direttamente a terra senza interessare l'avvolgimento b.t.. E' pertanto possibile ottenere una ottima reiezione del disturbo di modo comune (facilmente un rapporto 1000)

Le sovratensioni di modo differenziale invece si trasferisce con il rapporto spire; se si tratta di transistori veloci il flusso magnetico non riesce a penetrare nel nucleo ma comunque l'accoppiamento non si modifica.

Con taluni L-C-R Meters è possibile determinare direttamente ciascuna delle capacità, utilizzando un elettrodo di guardia il cui potenziale viene pilotato automaticamente dal ponte stesso.



Con il collegamento indicato in figura, se il potenziale di T è portato a coincidere con quello dell'elettrodo b.t., la capacità  $C_3$  risulta scarica e il misuratore vede solo la corrente che fluisce in  $C_1$ .

### 3. Trasformatore a secco - $P_n = 630 \text{ kVA} - 8,4/0,4 \text{ kV}$

Misura con L-C-R Meter

AT/bt	= 783 pF
bt/nucleo	= 2460 pF
Nucleo/At	= 88 pF

Nel caso di macchine con 3 avvolgimenti lo schema è più complesso (Fig. A.1.2)

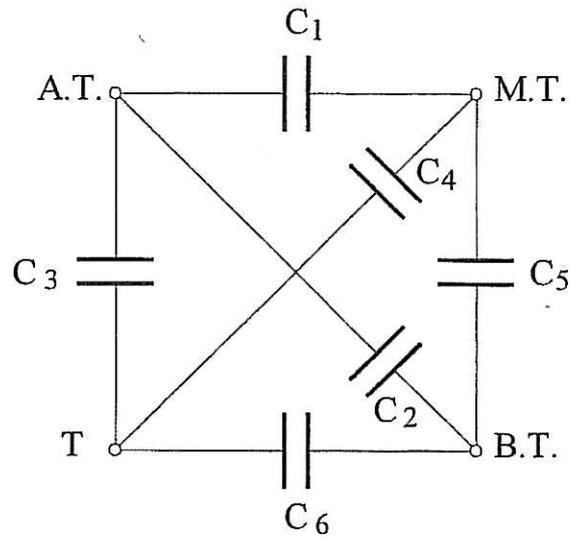


Fig. A.1.2

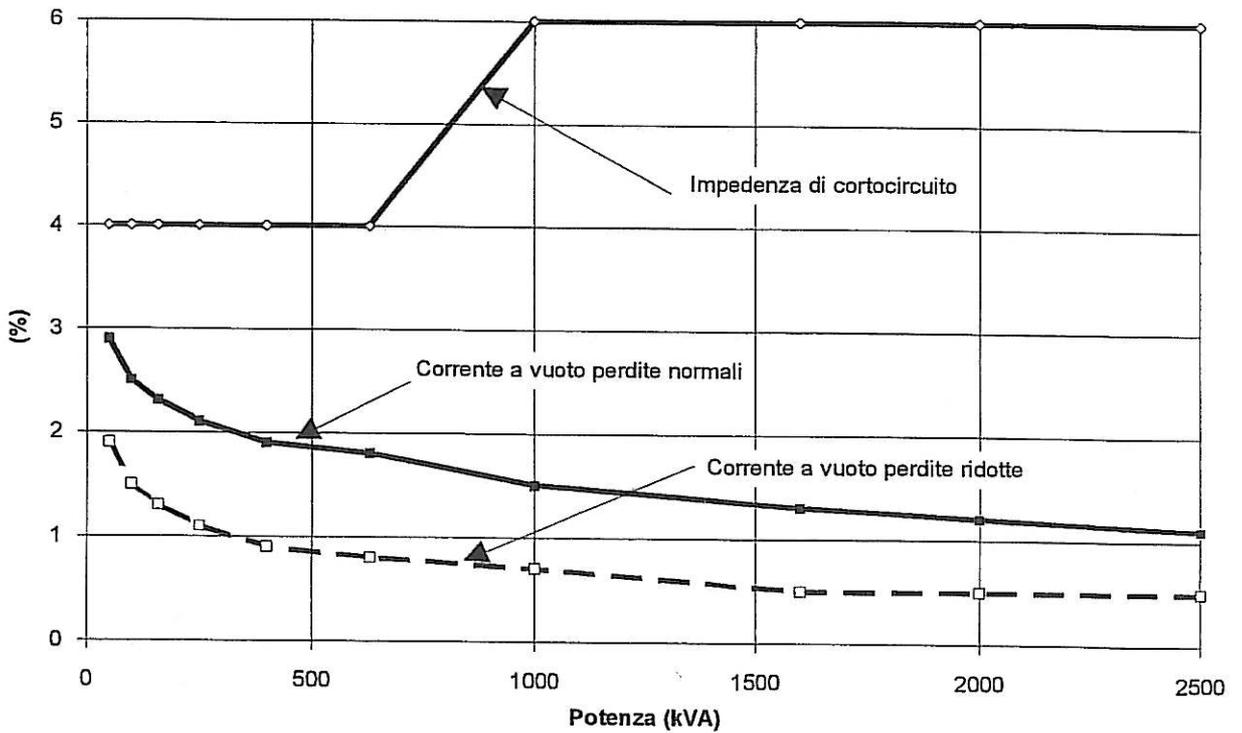
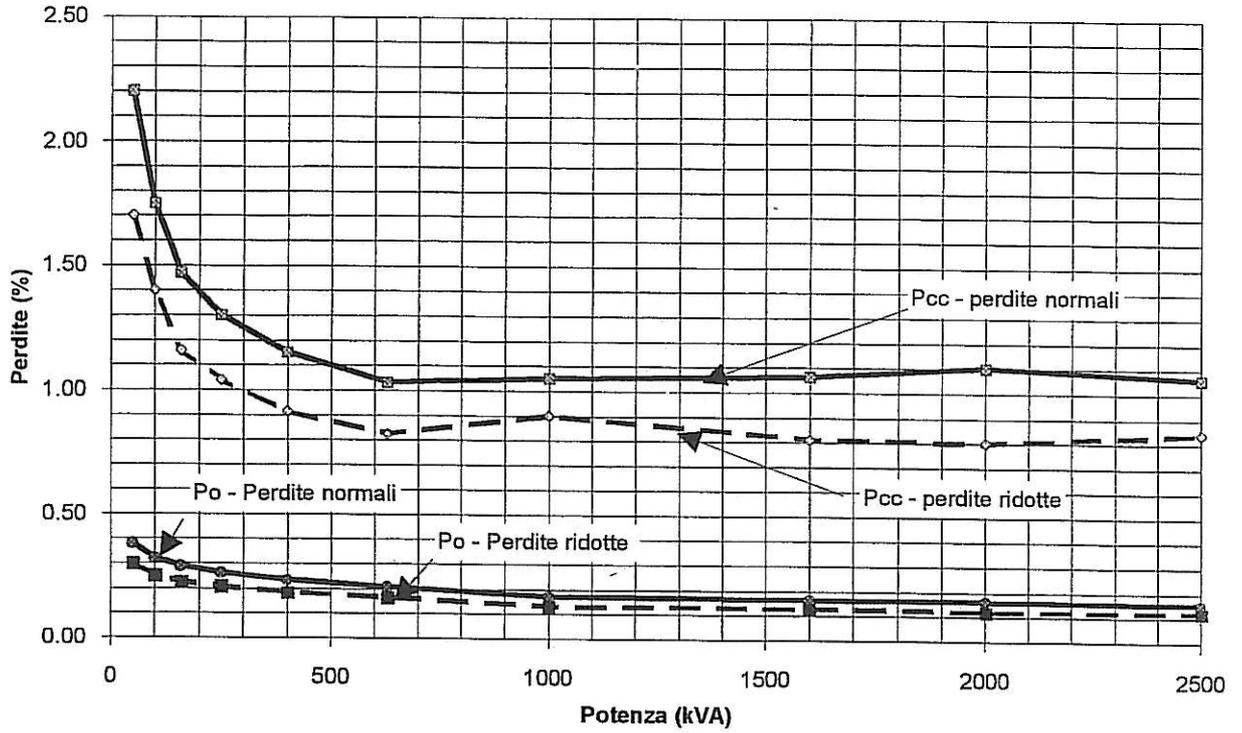
Si tratta in questo caso di effettuare sei misure indipendenti per arrivare a determinare le sei incognite.

$$\begin{aligned}
 AT/MT-BT-T &= C_1 + C_2 + C_3 \\
 MT/AT-BT-T &= C_1 + C_4 + C_5 \\
 BT/AT-MT-T &= C_5 + C_6 + C_2 \\
 T/AT-MT-BT &= C_3 + C_6 + C_4 \\
 AT-MT/BT-T &= C_2 + C_3 + C_4 + C_5 \\
 MT-BT/AT-T &= C_1 + C_6 + C_2 + C_4
 \end{aligned}$$

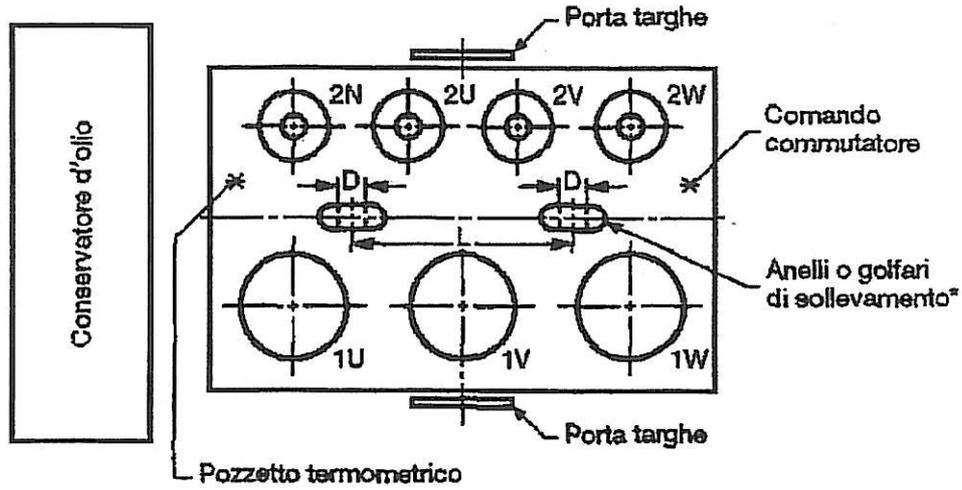
Le capacità tra avvolgimenti si possono anche misurare con un ponte di Schering: in questo caso è anche possibile la determinazione dell'angolo di perdita del sistema isolante. La misura va fatta ad una tensione commisurata a quella di funzionamento della macchina e ciò richiede l'impiego di un condensatore a gas compresso previsto per una tensione adeguata.

**A.4 TRASFORMATORI CON TENSIONE  $U_m \leq 24$  kV - CEI 14-13**

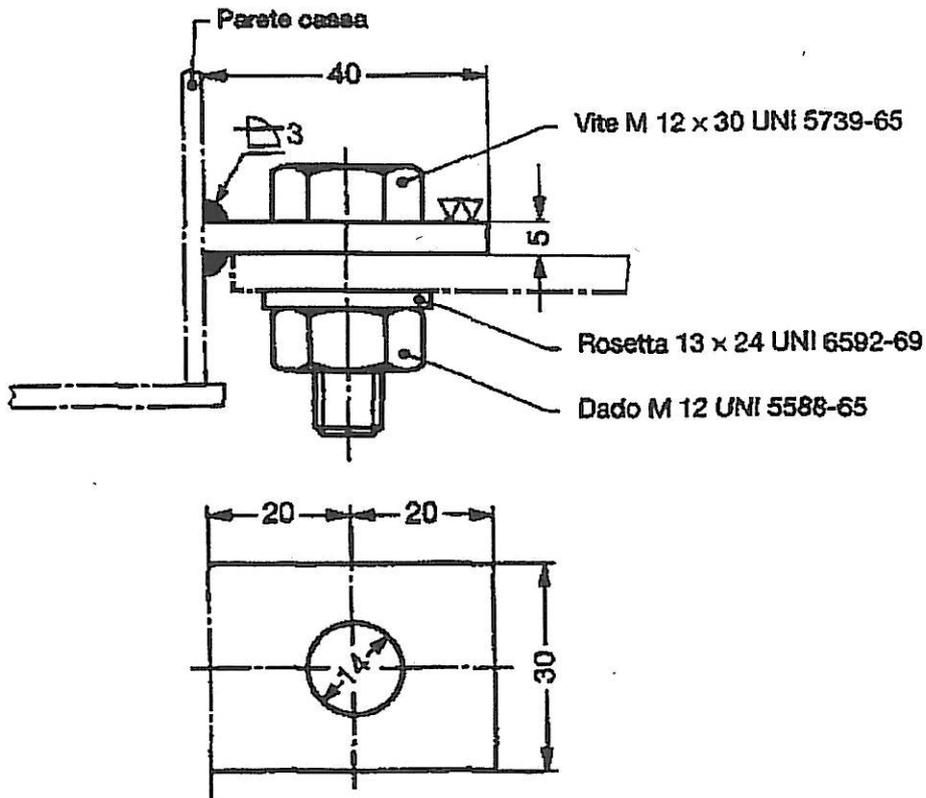
Valori normalizzati delle perdite, della tensione di cortocircuito e della corrente a vuoto



**A.5 SOLUZIONI COSTRUTTIVE NORMALIZZATE  
TRASFORMATORI CON TENSIONE  $U_m \leq 24$  kV - CEI 14-13**

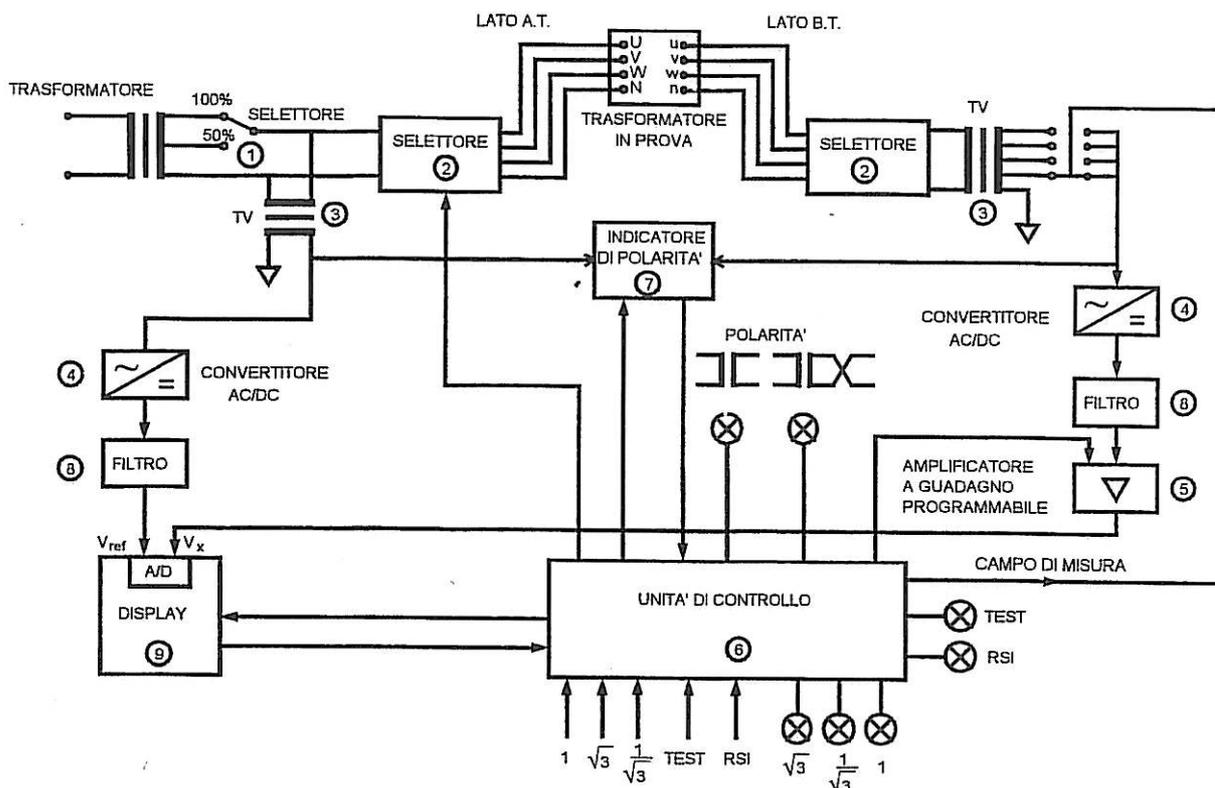


Disposizione degli isolatori sopra coperchio



Realizzazione del collegamento di terra della cassa

## A.6 MISURATORE DI RAPPORTO



Il dispositivo indicato, versione moderna del misuratore di rapporti, fornisce un'indicazione derivando l'informazione della tensione applicata tramite un trasformatore di tensione collegato al primario ed uno analogo al secondario. Le tensioni così ottenute vengono convertite in tensioni continue e inviate ad un misuratore di rapporto in continua. Il valore della seconda tensione è adattata mediante un amplificatore a guadagno regolabile ed i campi di misura sono determinati dalla scelta dei rapporti del trasformatore di tensione inserito sul secondario.

Per restare nei limiti di incertezza indicati (l'incertezza garantita è pari allo 0,1 % della lettura) è ovvio che tutti i componenti indicati ed in particolare i trasformatori di tensione devono avere precisioni molto spinte.

Ovviamente, dato il tipo di conversione che viene effettuata, non esiste un sistema per l'indicazione del gruppo: di fatto vengono confrontati tra loro solo i valori delle tensioni, senza alcun riferimento agli sfasamenti. Si può correggere, ma solo formalmente la questione introducendo un fattore  $\sqrt{3}$  che corrisponde alle situazioni di più comune impiego (gruppo Dyn 5 o Dyn11).

Precisioni molto spinte si possono ottenere anche andando a misurare il rapporto della tensioni su avvolgimenti avvolti sulla stessa colonna (nel caso dei gruppi citati questo equivale a confrontare tra loro una tensione concatenata con una stellata, cosa possibile perché esiste il collegamento del neutro).

### A.7 . CORREZIONI PER LA FORMA D'ONDA

L'esigenza di mantenere la forma d'onda dell'induzione il più possibile prossima alla sinusoidale è dovuta alla necessità di misure nel materiale magnetico in condizioni ben determinate e riproducibili. Per piccoli scostamenti dalla forma sinusoidale è però possibile correggere i risultati di misura e riportarli ai valori che si sarebbero misurati con induzione sinusoidale.

La possibilità di queste correzioni deriva dalle considerazioni seguenti:

a) le perdite  $p_i$  per isteresi sono legate alla frequenza (numero di cicli percorsi al secondo) e al valore massimo dell'induzione; la velocità con cui si percorrono i singoli tratti del ciclo non ha influenza (purché non si formino cicli intermedi); anche il *valore medio*  $E_m$  della f.e.m. indotta è legato agli stessi parametri ; se l'induzione è simmetrica nelle due semionde, è infatti :

$$E_m = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = 4 \frac{\Phi_M}{T} = 4fNS B_M \quad (1)$$

Si può perciò dire che sotto certe condizioni usualmente verificate, è lecito scrivere, indipendentemente dalla forma d'onda :

$$p_i = p_i(E_m)$$

b) Le perdite per correnti parassite, dovute alla componente sinusoidale  $B_n$  dell'induzione di pulsazione  $\omega_n$ , sono del tipo :

$$p_{pn} \equiv \omega_n^2 B_n^2$$

e perciò le perdite totali per correnti parassite risultano

$$p_{pn} \equiv \sum \omega_n^2 B_n^2$$

Anche il valore efficace della f.e.m. indotta è legato agli stessi parametri, essendo per la componente  $\omega_n$  :

$$E_n \equiv \omega_n B_n$$

e quindi:

$$E^2 = \sum E_n^2 \equiv$$

ne deriva che si può porre :

$$p_p \equiv E^2$$

Con flussi sinusoidali, le perdite per isteresi  $p_{is}$  e quelle per correnti parassite  $p_{ps}$ , possono esprimersi in funzione delle perdite totali  $p_{fs}$ , con adeguati coefficienti, in relazioni del tipo :

$$p_{is} = ap_{fs}, \quad p_{ps} = bp_{fs};$$

i valori dei coefficienti  $a$  e  $b$  ( $a + b = 1$ ) possono essere ricavati sperimentalmente o sono fissati empiricamente, in funzione del materiale (per es. nei lamierini per costruzioni elettromeccaniche laminati a caldo  $b \cong 0,2 \div 0,3$ ; in quelli laminati a freddo,  $b \cong 0,5 \div 0,6$ , a 50 Hz e per le normali induzioni d'impiego).

Si supponga ora di avere determinate le perdite  $p_f$ , con flusso non sinusoidale; in corrispondenza, si misuri la tensione applicata sia con un voltmetro a raddrizzatori (o elettronico che normalmente fornisce la stessa indicazione), che indica  $1,11E_m$ , sia con voltmetro a valore efficace (TRUE RMS se elettronico), che indica  $E_2$ ; a parità di tensione media (e cioè di  $B_M$ ) le perdite per isteresi restano costanti ( $p_i = p_{is}$ ) indipendentemente dalla forma d'onda; le perdite per correnti parassite risultano invece riferite alla f.e.m. efficace  $E_2$  anziché al valore efficace che avrebbe la f.e.m.: se il flusso fosse sinusoidale, valore che è uguale a  $1,11 E_m$ .

Risulta perciò :

$$p_f = p_i + p_p = p_{fs} \left[ a + \left( \frac{E}{1,11E_m} \right)^2 b \right]$$

e si ottiene quindi la potenza in condizioni di flusso sinusoidale

$$p_{fs} = \frac{p_f}{a + k^2 b}$$

in funzione del rapporto  $k$  tra le letture dei due voltmetri o della sua differenza  $\Delta k$  rispetto all'unità; questa perdita è riferita al valore di  $B_M$  fornito dalla (1) quando si assuma per la f.e.m. indotta il valore letto sul voltmetro a raddrizzatori. La correzione si esegue quando le indicazioni dei due voltmetri non differiscano per più di qualche per cento: in caso contrario è necessario agire sugli organi di regolazione.

Qualora detta correzione non venga effettuata, porta ad un errore pari alla differenza percentuale tra le letture degli strumenti:

$$\epsilon = \frac{p_f - p_{fs}}{p_{fs}} \cong k - 1$$

## A.8 DETERMINAZIONE DEL CONTENUTO ARMONICO DELLA CORRENTE MAGNETIZZANTE DI UN TRASFORMATORE.

Vengono acquisiti, con un oscilloscopio digitale, i segnali relativi alla tensione concatenata e le tre correnti di linea. In entrambi i casi è necessario provvedere a disaccoppiare lo strumento, dato che l'ingresso dell'oscilloscopio è riferito a massa mentre tutti i segnali sono in tensione. Ciò può farsi con una sonda differenziale per la tensione e con TA per la corrente. Il segnale viene allora prelevato su una resistenza di valore noto collegata al secondario.

La valutazione delle armoniche viene effettuata mediante analisi armonica sul segnale campionato; sono possibili tecniche diverse (DFT, FFT normalmente disponibili nelle varie librerie scientifiche) o addirittura tra le opzioni matematiche di elaborazione dell'oscilloscopio. Si tratta, particolarmente il secondo, di algoritmi progettati per funzionare in tempo reale, operando quindi su registrazioni non particolarmente ottimizzate in relazione alla durata del periodo. Può capitare pertanto che la sequenza numerica non rappresenti correttamente la periodicità che invece si assume alla base delle valutazioni; gli effetti negativi possono essere ridotti adottando una apposita finestra, che va scelta in modo da ottimizzare gli aspetti che si ritengono più rilevanti.

Valutazioni più semplici possono essere condotte fuori linea con considerazioni che passano attraverso la teoria di base che può essere brevemente riassunta come segue.

Una forma d'onda periodica può sempre essere espressa come:

$$f(t) = 1/2 a_0 + a_1 \cos \omega t + a_2 \cos 2\omega t + a_3 \cos 3\omega t + \dots \\ + b_1 \sin \omega t + b_2 \sin 2\omega t + b_3 \sin 3\omega t + \dots$$

Posto  $\omega t = x$  l'espressione si può scrivere più brevemente:

$$f(t) = \frac{1}{2} a_0 + \sum_{m=1}^{\infty} (a_m \cos mx + b_m \sin mx) \quad \text{sviluppo in serie di Fourier}$$

con

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(x) \cos nx dx \quad e$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(x) \sin nx dx$$

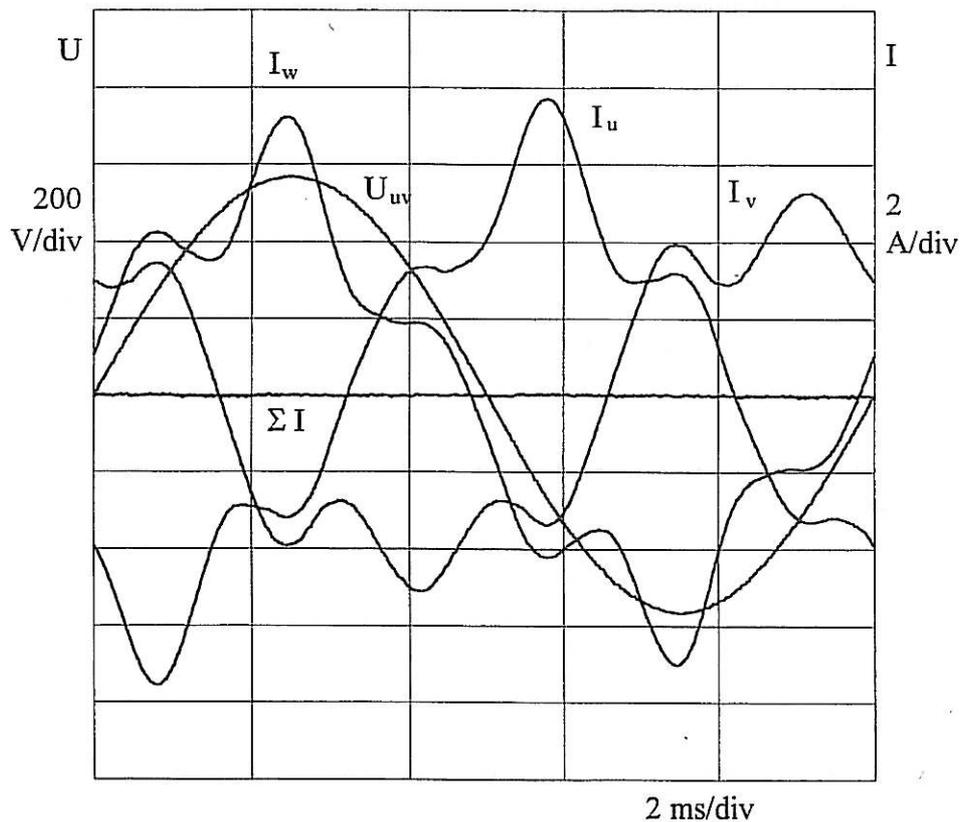
Gli integrali indicati si possono calcolare per via numerica a partire dai dati registrati sino ad un ordine di armonica tale da consentire di ottenere indicazioni significative.

$$a_n = \frac{1}{\pi} \sum (y \cdot \sin \cdot nx) \Delta x = \frac{1}{\pi} \Delta x \cdot \sum (y \cdot \sin \cdot nx)$$

e analogamente per gli altri termini.

Dall'esempio che viene riportato di seguito si può notare come siano praticamente assenti le armoniche di ordine pari e come vi sia una componente significativa di terza armonica nonostante l'alimentazione avvenga a tre fili. Ciò è dovuto alla configurazione normalmente non equilibrata del circuito magnetico che si traduce in una stella di impedenze diverse.

**Trasformatore di potenza 160 kVA - 10500 V / 400 V**  
 Prova a vuoto - andamento delle correnti di linea

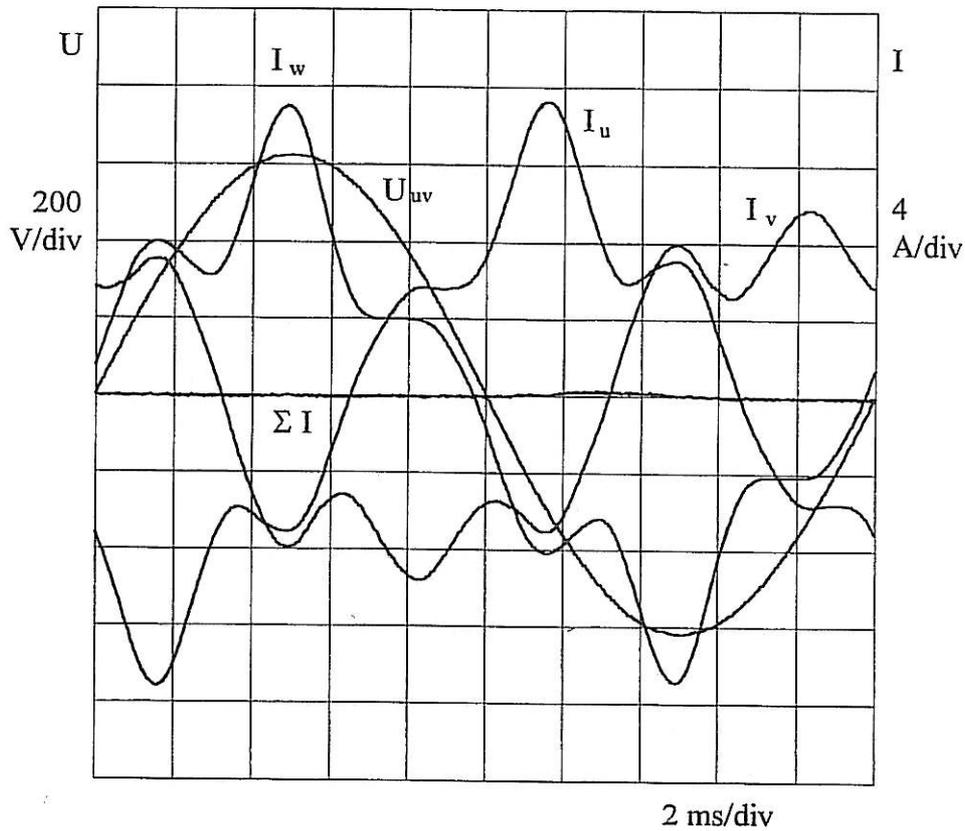


	$U_{uv}$ [V]	$I_u$ [A]	$I_v$ [A]	$I_w$ [A]
Val. medio	359,8	3,683	3,215	3,408
Val. rms	399,5	4,135	3,415	3,871
fat. di forma	1,11	1,12	1,06	1,14

	$U_{uv}$	$I_u$	$I_v$	$I_w$
N. armonica	Mi/M1 [%]	Mi/M1 [%]	Mi/M1 [%]	Mi/M1 [%]
1	100,0	100,0	100,0	100,0
2	0,0	0,7	0,9	0,9
3	0,1	6,3	5,2	5,2
4	0,0	0,2	0,5	0,5
5	0,1	22,1	24,2	24,2
6	0,0	0,2	0,3	0,3
7	0,1	5,1	6,0	6,0
8	0,0	0,0	0,0	0,0
9	0,0	0,4	1,4	1,4
10	0,0	0,0	0,0	0,0
11	0,0	1,0	1,0	1,0

**Trasformatore di potenza 160 kVA - 10500 V / 400 V**

Prova a vuoto - andamento delle correnti di linea



	$U_{uv}$ [V]	$I_u$ [A]	$I_v$ [A]	$I_w$ [A]
Val. medio	395,9	7,127	6,208	6,785
Val. rms	439,3	8,050	6,553	7,792
fat. di forma	1,11	1,13	1,06	1,15

**Tensione  $U_{uv}$** 

N. armonica	$b_{max}$ [V]	$A_{max}$ [V]	$M_{max}$ [V]	$\phi$ [°]	$M_i/M_1$ [%]
1	621,3	-2,4	621,3	-0,22	100,0
2	0,0	0,0	0,0	0,00	0,0
3	0,5	0,9	1,0	60,03	0,2
4	0,0	0,0	0,0	0,00	0,0
5	1,4	-0,1	1,4	-2,54	0,2
6	0,0	0,0	0,0	0,00	0,0
7	1,0	-0,1	1,0	-6,92	0,2
8	0,0	0,0	0,0	0,00	0,0
9	-0,2	-0,1	0,2	-147,02	0,0
10	0,0	0,0	0,0	0,00	0,0
11	0,0	0,1	0,1	98,15	0,0

**Corrente Iu**

N. armonica	bmax [A]	a max [A]	Mmax [A]	$\varphi$ [°]	Mi/M1 [%]
1	-5,539	-9,526	11,019	-120,18	100,0
2	0,048	0,025	0,054	27,91	0,5
3	-0,767	-0,080	0,771	-174,01	7,0
4	0,015	-0,007	0,017	-25,61	0,2
5	-1,909	1,851	2,659	135,88	24,1
6	-0,009	0,005	0,010	148,08	0,1
7	0,416	0,555	0,694	-53,13	6,3
8	-0,001	0,006	0,006	103,27	0,1
9	0,042	0,061	0,074	55,19	0,7
10	-0,001	0,001	0,001	144,02	0,0
11	0,015	-0,064	0,065	-76,88	0,6

**Corrente Iv**

N. armonica	bmax [A]	amax [A]	Mmax [A]	$\varphi$ [°]	Mi/M1 [%]
1	-4,913	7,378	8,864	123,66	100,0
2	0,000	0,000	0,000	0,00	0,0
3	1,553	0,362	1,595	13,11	18,0
4	0,000	0,000	0,000	0,00	0,0
5	-0,896	-1,948	2,144	-114,70	24,2
6	0,000	0,000	0,000	0,00	0,0
7	0,294	-0,207	0,360	-35,23	4,1
8	0,000	0,000	0,000	0,00	0,0
9	-0,172	-0,020	0,173	-173,39	1,9
10	0,000	0,000	0,000	0,00	0,0
11	0,022	0,034	0,040	57,38	0,5

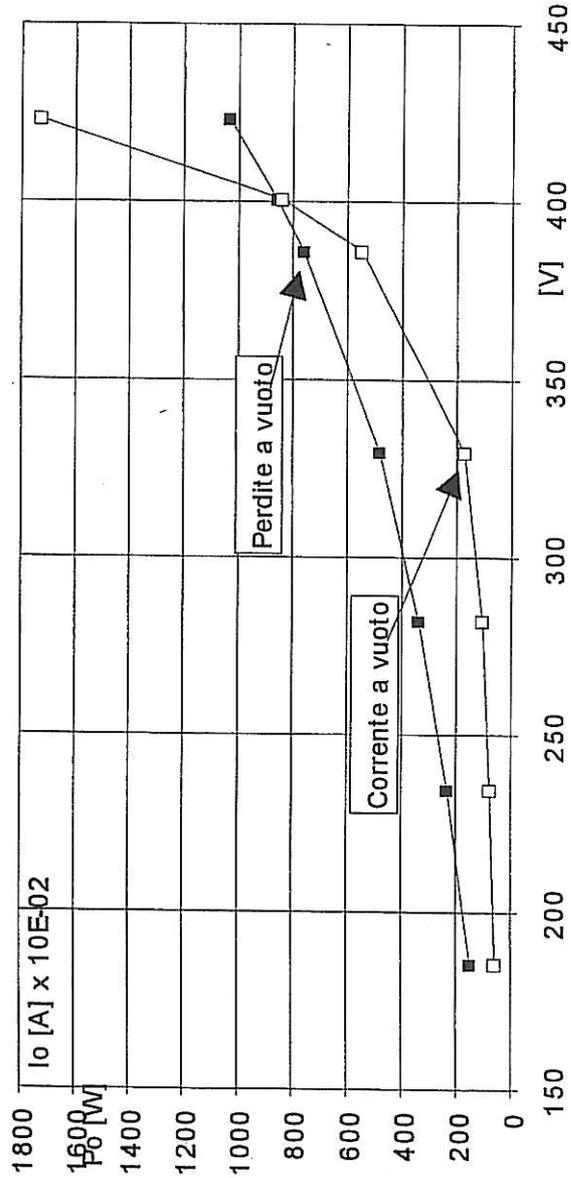
**Corrente Iw**

N. armonica	bmax [A]	amax [A]	Mmax [A]	$\varphi$ [°]	Mi/M1 [%]
1	10,379	2,098	10,588	11,43	100,0
2	0,021	-0,056	0,060	-69,11	0,6
3	-0,794	-0,243	0,830	-163,01	7,8
4	-0,003	0,025	0,025	97,80	0,2
5	2,820	0,096	2,822	1,95	26,6
6	0,016	-0,013	0,021	-37,73	0,2
7	-0,710	-0,352	0,792	-153,63	7,5
8	-0,001	0,002	0,002	122,02	0,0
9	0,134	-0,038	0,140	-15,93	1,3
10	0,001	-0,002	0,003	-60,28	0,0
11	-0,038	0,034	0,050	138,25	0,5

TRASFORMATORE 400 kVA - 15000/400 V

PROVA A VUOTO

lu	lv	lw	lm	Eu	Ev	Ew	Em	Ucm	Pu	Pv	Pw	Pt
0.668	0.436	0.678	0.594	107.43	106.76	106.83	107.01	185.347	46.75	36.59	64.75	148.1
0.884	0.575	0.877	0.778	135.73	135.34	135.1	135.39	234.502	73.84	57.25	103.19	234.28
1.204	0.792	1.176	1.057	162.97	162.9	162.72	162.86	282.082	103.91	82.14	154.68	340.73
1.933	1.316	1.884	1.711	190.29	190.55	190.06	190.3	329.609	129.84	114.83	236.98	481.65
5.928	4.561	5.92	5.47	222.54	223.73	222.1	222.79	385.884	103.59	191.42	463.2	758.2
8.932	7.348	8.935	8.405	230.95	232.45	230.41	231.27	400.571	86.1	225.7	545.4	857.1
17.938	16.036	17.934	17.303	244	245.84	243.33	244.39	423.296	65.5	278.5	691	1035



TRASFORMATORE 400 kVA - 15000/400 V

PROVA DI CORTOCIRCUITO

Pn	V1n	V2n	I1n	I2n
400000	15000	400	15.4	577.35

Iu	Iv	Iw	Im	Eu	Ev	Ew	Em	Ucm	Pu	Pv	Pw	Pt	cosfi
8.798	8.884	8.833	8.838	200.4	201.82	201.75	201.32	348.6965	646	647	647	1940	0.36
9.828	9.927	9.883	9.879	223.97	225.57	225.78	225.11	389.902	808	809	810	2427	0.36
10.376	10.479	10.437	10.431	236.51	238.14	238.41	237.69	411.6912	901	903	905	2709	0.36

T1	R1	R2	k	R1t	R2t
19.2	10.055	0.00416	1.228501	12.35258	0.005111

Z	R	X	P	Pj	Pa	Pt	Rt	Zt	Vcc	Vcc = zcc	r = vr	x = vx
22.77891	8.279	21.22	5890.27	5656.964	233.31	7139.498	10.035	23.474	626.139	4.174	1.785	3.773
22.78672	8.289	21.23	5897.73									
22.78689	8.299	21.22	5904.71									

po	pcc
0.0021	0.01785

RENDIMENTO	cosfi = 1	RENDIMENTO	cosfi = 0.8	CADUTA DI TENSIONE cosfi = 1	CAD. DI TENSIONE cosfi = 0.8
0.25	0.9873	0.25	0.984	0.25	0.25
0.5	0.9870	0.5	0.984	0.5	0.5
0.75	0.9841	0.75	0.980	0.75	0.75
1	0.9804	1	0.976	1	1

## TRASFORMATORI DI TENSIONE E DI CORRENTE

### *Limiti di errore trasformatori di corrente*

Classe di precisione	Errore di rapporto in percento alla percentuale della corrente nominale sottoindicata				Errore d'angolo in centiradiani alla percentuale della corrente nominale sottoindicata			
	5	20	100	120	5	20	100	120
0,1	0,4	0,2	0,1	0,1	0,45	0,24	0,15	0,15
0,2	0,75	0,35	0,2	0,2	0,9	0,45	0,3	0,3
0,5	1,5	0,75	0,5	0,5	2,7	1,35	0,9	0,9
1	3	1,5	1	1	5,4	2,7	1,8	1,8

### *Limiti di errore trasformatori di tensione*

Classe di precisione	Errore di rapporto in percento tra l'80 e il 120 % della tensione nominale	Errore d'angolo in centiradiani alla percentuale della tensione nominale sottoindicata
0,1	0,1	0,15
0,2	0,2	0,3
0,5	0,5	0,6
1	1	1,2

### Definizioni

#### Errore di rapporto (o di tensione - corrente)

$$\eta = \frac{k_n U_s - U_p}{U_p} \cdot 100$$

$$\eta = \frac{k_n I_s - I_p}{I_p} \cdot 100$$

#### Errore d'angolo

E' la differenza di fase tra i vettori delle tensioni (correnti) primaria e secondaria. Viene considerato positivo quando il vettore della tensione (corrente) secondaria è in anticipo sul vettore della tensione primaria.

### Prestazione (TA)

Impedenza del circuito secondario in ohm con indicazione del suo fattore di potenza. La prestazione è generalmente espressa come potenza apparente (in VA) con un fattore di potenza specificato (tipicamente 0,8) e per la corrente nominale. La prestazione nominale è quella su cui si basano le prescrizioni relative alla precisione.

### Prestazione (TV)

Ammettenza del circuito secondario in siemens con indicazione del suo fattore di potenza. La prestazione è generalmente espressa come potenza apparente (in VA) con un fattore di potenza specificato e per la corrente nominale. La prestazione nominale è quella su cui si basano le prescrizioni relative alla precisione.

### Esempio

Gli errori di rapporto possono essere corretti facilmente introducendo, nel calcolo, i valori di rapporto derivati dal Certificato di taratura, in corrispondenza della tensione o corrente cui la misura si riferisce. Per quanto riguarda il contributo degli errori d'angolo, supponendo di disporre degli andamenti riportati, validi per i tre TA e TV utilizzati, si possono fare le considerazioni seguenti.

Il tipo di correzione proposto viene effettuato, in ambito industriale, per valori del  $\cos\varphi < 0,1$ .

Se il valore effettivo della potenza vale

$$P = VI \cos\varphi,$$

un errore di d'angolo porterebbe a misurare

$$P_m = VI \cos(\varphi + \varepsilon) = VI [\cos\varphi \cos\varepsilon - \sin\varphi \sin\varepsilon]$$

Dati i valori di  $\varepsilon$  e di  $\varphi$ , si può ritenere  $\cos\varepsilon \approx 1$ ,  $\sin\varphi \approx 1$  e  $\sin\varepsilon \approx \varepsilon$  e quindi

$$P_m \approx VI \cos\varphi - VI\varepsilon$$

Nel caso di misure di potenza con tre wattmetri si ha

$$P_m = 3E_i I_i \cos\varphi_i - E_i I_i \sum \varepsilon_i$$

ed utilizzando trasformatori di misura sostanzialmente uguali, si ottiene:

$$P_m = 3E_i I_i \cos\varphi_i - 3E_i I_i \varepsilon_i$$

Con gli errori d'angolo sono espressi in radianti.

Per un valutazione corretta è ovviamente necessario determinare i valori delle prestazioni nelle effettive nelle condizioni di impiego misurando quindi la tensione fornita dal TA e la corrente erogata dal TV.

Di seguito vengono riportate le misure effettuate durante una prova in cortocircuito su un trasformatore di potenza e le curve degli errori d'angolo dei trasformatori di misura utilizzati, dedotte dai certificati di taratura. Su questi stessi grafici sono evidenziate le curve di errore corrispondenti alla prestazione effettiva, così come misurata nello specifico circuito: l'errore viene determinato su queste curve al valore di corrente (o tensione) specifico.

La correzione si giustifica per il basso  $\cos\phi$  delle letture.

Ad esempio, per la fase 1 si ha:

$$\begin{aligned} P_a &= 962.3 \text{ kVA} \\ P &= 47.7 \text{ kW} \\ \cos\phi_1 &= 0.0496 \end{aligned}$$

La correzione sulla potenza e dell'ordine dell'1,95% e potrebbe non essere trascurabile, neanche in termini assoluti, se vi sono penali o premi per le perdite.

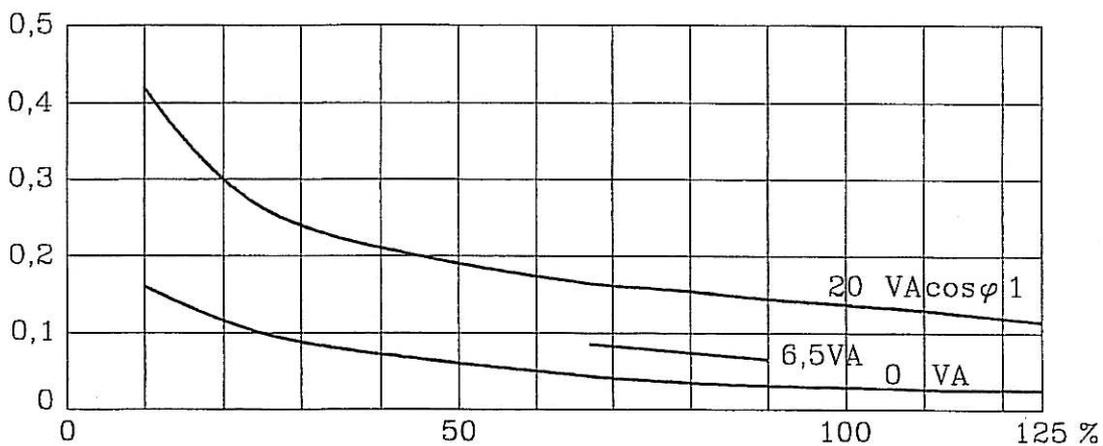
PROVA IN CORTOCIRCUITO						
$I_1$	$I_2$	$I_3$	$K_i$	$I_m$		
80.7	80	81.1	1.5	120.9		
$V_1$	$V_2$	$V_3$	$K_v$	$V_m$		
79.5	79.2	79.3	100	7934		
$W_1$	$W_2$	$W_3$	$K_w$	$\Sigma \sin(\epsilon_a - \epsilon_v)$	$\frac{VI}{\sqrt{3}} \Sigma \sin \epsilon$	$W_c$
106	88	92	450 128700	$0.26 \cdot 10^{-2}$	2493.8	126206

TA 150/5 – Prestazione 6.5 VA  
TV 10000/100 – Prestazione 3.8 VA

$A_1$	$\epsilon_{A1}$	$A_2$	$\epsilon_{A2}$	$A_3$	$\epsilon_{A3}$	$V_1$	$\epsilon_{A1}$	$V_2$	$\epsilon_{A1}$	$V_3$	$\epsilon_{A1}$
80.7	0.07	80	0.08	81.1	0.07	79.5	-0.01	79.2	-0.02	79.3	-0.01

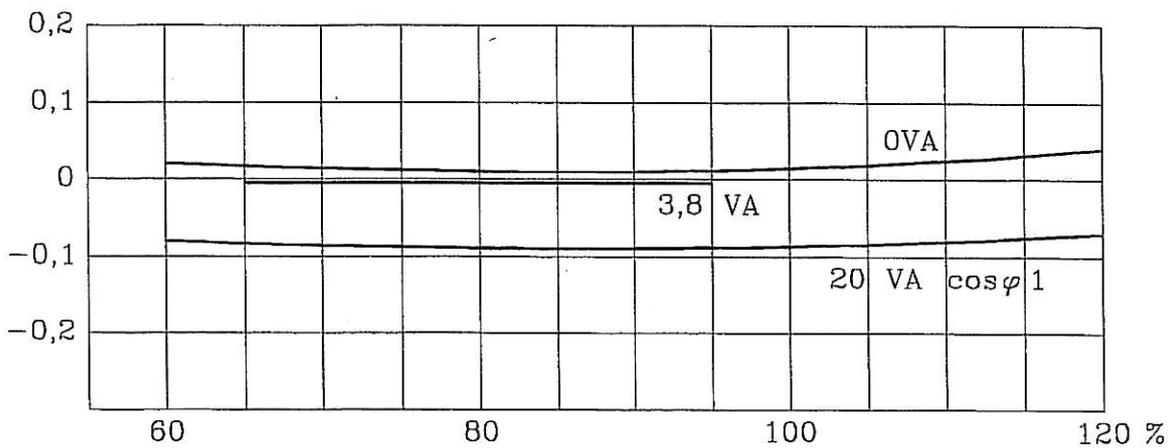
**CURVE DEGLI ERRORI D'ANGOLO DI TRASFORMATORI DI MISURA**

Errori di angolo  $\varepsilon$ (c.rad.)



TRASFORMATORE DI CORRENTE

Errori di angolo  $\varepsilon$ (c.rad.)



TRASFORMATORE DI TENSIONE

**TRASFORMATORE A SECCO 630 kVA - 20000 +/- 2 x 2,5 % /400 V**

Tipo	TEP-C	Matr.	57282
Pn=	630 kVA		
IP 00	Anno	1999	
V1n	20000 "+/-2x2,5%"	I1n	18.19 A
V2n	400 V	I2n	909.3 A
LI 125 AC 50		LI -	AC 3
Dyn11		vcc	4.09%
CLASSE	E1	C1	F1
		Massa	2300 kg

**PROVA A VUOTO**

Eu	Ev	Ew	Ucm	Iu	Iv	Iw	Im	Pu	Pv	Pw	Pt	cosfi
272.2	275	270.6	272.6	2.52	1.8	2.38	2.23333	280	220	330	830	0.78711
321.5	324.8	320.5	322.267	3.03	2.16	2.61	2.6	391	300	457	1148	0.79103
359.2	363.1	358.7	359.2	3.59	2.57	3.28	3.14667	491	369	576	1436	0.73351
401.2	405.1	400.6	402.3	4.79	3.54	4.34	4.22333	612	465	752	1829	0.62151
442.6	446.8	441.2	443.533	8.55	6.83	7.92	7.76667	727	611	1046	2384	0.39956

**PROVA IN CORTOCIRCUITO**

Eu	Ev	Ew	Ucm	Iu	Iv	Iw	Im	Pu	Pv	Pw	Pt	cosfi
148.9	149.9	147.4	257.614	5.77	5.74	5.76	5.75667	185.1	195.8	193	573.9	0.22343
184.4	185.5	182.8	319.101	7.15	7.13	7.12	7.13333	286	297	291	874	0.22168
249.8	250.3	247.6	431.685	9.67	9.64	9.62	9.64333	534	542	531	1607	0.22287

MISURA DI RESISTENZA			t=	20.6 °C			K75=	1.2215	
A.T.	R (OHM)	RmAT	bt	R (OHM)		Rmbt	Rmbt75	RmAT75	
1.005	5.74	5.71144	10.52	0.0148	0.00141				
1.046	5.99	5.72658	10.52	0.0151	0.00144				
1.046	5.99	5.72658	5.72153	10.52	0.0147	0.0014	0.00141	0.00173	6.98884

Z	R	X	P	Pj	Pa	Pt75	Rt75	Zt75	Vcc
25.8367	5.77262	25.1836	5730.06	4592.48	1137.59	6541.01	6.58958	26.0314	820.146
25.8271	5.72539	25.1845	5683.19						
25.8451	5.76024	25.1951	5717.77						

vcc	pcc=r=vr	x=vx	po	io	RENDIMENTO cosfi=1		RENDIMENTO cosfi=0.8	
4.10073	1.03826	3.96641	0.29032	0.46446	0.25	98.5991	0.25	98.255
					0.5	98.9122	0.5	98.6439
					0.75	98.8477	0.75	98.5637
					1	98.6888	1	98.3664

C.T.A. DI TENSIONE cosfi=1		C.T.A. DI TENSIONE cosfi=0.8	
0.25	0.33823	0.25	2.62002
0.5	0.59779	0.5	2.82767
0.75	0.85735	0.75	3.03532
1	1.11692	1	3.24297

**Misura di capacità**

CAT/bt-n	546 pF	CAT/bt=	460 pF
Cbt/AT-n	1690 pF	Cbt/n=	1200 pF
Cn/AT-bt	1310 pF	CAT/n=	86 pF

PROVA A VUOTO

