

- Composizione della macchina sincrona.
- Distinzione a rotore liscio e a poli sporgenti
- Studio della macchina come generatore sincrono trifase
- funzionamento a vuoto del generatore asincrono trifase (per poli sporgenti e per rotore liscio)
- forza elettromotrice indotta in un conduttore di statora
- forze in più conduttori in serie
- Avvolgimento trifase (p.e.m. risultante nelle tre fasi)
- Caratteristica di magnetizzazione a vuoto.
- Generatore A.T. funzionamento a vuoto / funzionamento a carico
- Coppia frenante.
- Rappresentazione vettoriale di p.m. e di grandezze elettriche di indotto al variare dell'angolo.
- Diagrammi vettoriali della macchina sincrona:

Rotore liscio $\left\{ \begin{array}{l} \text{• Per rotore liscio diagramma di Potier (circuito magnetico saturo)} \\ \text{• Diagramma di Behn - Enshemburg (circuito magnetico non saturo)} \end{array} \right.$

Rotore a poli sporgenti $\left\{ \begin{array}{l} \text{• Diagramma di Blondel (circuito magnetico saturo)} \\ \text{• Diagramma delle due realtà (circuito magnetico non saturo)} \end{array} \right.$

- Curve caratteristico del generatore asincrono trifase
 - caratteristica di corto circuito c.c.
 - caratteristica di carico
 - caratteristica esterna
 - caratteristica di regolazione.
- Funzionamento in parallelo delle macchine sincrone.
 - operazione di inserzione.
- macchina sincrona funzionamento da motore/generatore per entrambi i rotori.
- variazione della coppia esterna al variare della corrente di eccitazione sia per il generatore che per il motore.
- Diagramma polare della macchina sincrona.
- Oscillazioni pendolari.

STUDIO DELLA MACCHINA SINCRONA MONOFASE

- Avviamento dei motori sincroni
- Regolazione della velocità dei motori sincroni.
- Rendimento dei motori sincroni e dei generatori.

DEFINIZIONE

Si definisce macchina **SINCRONA** quella macchina che al variare del carico mantiene la velocità costante.

Carico = rete elettrica se è un generatore, coppia meccanica se è un motore.

La forza elettromotrice nasce nei conduttori di statora ed è generata dalla legge di Lenz, infatti il circuito di eccitazione è percorso da una corrente continua.

L'avvolgimento induttore o di eccitazione è formato da N_e spire per polo ed è percorso dalla corrente continua I_e e si trova nel rotore.

Nelle macchine a rotore liscio si trova nelle carene, in quelle a poli sporgenti (salienti è un sinonimo) si trova avvolto in essi.

Essa mette in gioco al traferro una forza magnetomotrice di tipo rettangolare diretta dal rotore allo statora e viceversa, e di valore massimo $M_e = N_e I_e$ costante nel tempo.

FORZA ELETTROMOTRICE INDOTTA A VUOTO IN UN CONDUTTORE DI STATORA

modelliamo la macchina come se avesse un singolo conduttore.

Si pari l'induttore (quindi il rotore) a velocità di rotazione ω , si consideri la fondamentale $B_{M\sin\omega t}$ della distribuzione spaziale dell'induttore prodotta dalla forza magnetomotrice di eccitazione lungo il traferro.

Ogni conduttore di statora è sottoposto all'induzione variabile nel tempo con legge sinusoidale $b = B_{M\sin\omega t}$ con $\omega = \frac{2\pi n_p}{60}$ [rad]

B_M = valore massimo dell'induzione, mentre B_m è il valore medio

$$B_m = \frac{2B_M}{\pi}$$

valore medio dell'induzione

Se valore istantaneo della forza elettromotrice indotta a vuoto in un generico conduttore di statora vale:

$$e = (\vec{v} \times \vec{b}) q$$

tenendo conto che \bar{v}, \bar{b}, l hanno una direzione che li caratterizza,

e $l =$ lunghezza della parte attiva dei conduttori dell'avvolgimento di indotto.

$$e = b l v = B_M \sin \omega t l \frac{2 \pi n}{60}$$

posto $C_M = \frac{B_M L 2 \pi n}{60}$ $f = \text{frequenza}$ si ha (notizietto) che: $e = C_M \sin \omega t$ con $\omega = 2 \pi f$

$$\text{con } T = \text{semplice polare} = \frac{\pi \cdot \left(\frac{\text{diametro interno}}{\text{statora}} \right)}{2p} = \frac{\pi \cdot D}{2p}$$

$$\omega = 2 \pi f = \frac{P \cdot n}{60}$$

Il valore medio C_M è uguale $= 2 \phi f$ con $\phi = \frac{2}{\pi} B_M T L$ e $f = \frac{P \cdot n}{60}$

valore medio: $C_m = \frac{2}{\pi} C_M$

Il valore efficace $e = 2 K_f f \phi$ \downarrow frequenza \downarrow flusso
 \downarrow fattore di forma

Il fattore di forma è il rapporto fra il valore efficace e il valore medio.

C_m, C_M, e , sono i parametri della forza elettromotrice

indotta in un conduttore di una macchina sincrona.

INDICHIANO IN GENERALE CON:

q_i = numero di corde per polo e per fase.

n_i = numero di conduttori per corde.

$N_i = 2p n_i$ è numero totale di conduttori per fase

K_{iC} = coefficiente di avvolgimento indotto riferito alla fondamentale.

E_0 = valore efficace della fem indotta a moto in una fase di indotto.

FORZE ELETTROMOTRICI INDOTTSE IN PIÙ CONDUTTORI IN SERIE

Le forze elettromotrici indotte in più conduttori distribuiti uniformemente in zone distanti x , hanno la medesima ampiezza ma sono spaziate nel tempo una rispetto all'altra di un angolo elettrico $\alpha = \frac{2\pi i}{Q_i}$

con Q_i = numero di zone totali di statorre.

La forza elettromotrice indotta a ruota ai capi di una pila di indotto di un avvolgimento a passo intero vale:

$$E_o = K_{11} N_{ie} = 2K_f K_{11} \phi f N_i$$

Tenuto conto che il coefficiente K_{11} è il rapporto

$$\frac{\left(\sum \text{vettore geometrica delle forze elettromotrici indotte} \right)}{\left(\sum \text{ammettita delle forze elettromotrici} \right)}$$

Quando K tiene conto del fatto che la sinusoida non è perfettamente sinusoidale perché gli avvolgimenti (i conduttori) sono distanti di un certo angolo nello statorre.

Queste dissomogeneità introducono oscillazioni armoniche oltre alla fondamentale.

$$K_{11} = \frac{\sin \frac{q\alpha}{2}}{q \sin \frac{\alpha}{2}}$$

ESERCIZIO Si consideri un alternatore trifase con le seguenti caratteristiche:

$$m^o \text{ poli} \quad 2p = 4$$

$$m^o \text{ cav} \quad q_i = 48$$

$$m^o \text{ conduttori per cava} \quad m_i = 4$$

$$\text{velocità} \quad n = 1500 \frac{\text{giri}}{\text{minuto}}$$

$$\text{flusso totale uscente da 1 polo} \quad \phi = 0,0338 \text{ Weber}$$

Determinare: l'angolo esistente tra cava e cava e il corrispondente angolo elettrico, inoltre il valore efficace della forza elettromotrice di una fase.
soluzione: L'angolo elettrico è dato dalla formula

$$\alpha = \frac{2\pi p}{q_i} = \frac{2 \cdot 314^\circ \cdot p}{48} = 0,216 \text{ rad}$$

posto in gradi si ha:

$$\alpha = \frac{360^\circ \cdot p}{q_i} = \frac{360 \cdot 2}{48} = 15^\circ$$

* trovo la forza elettromotrice indotta in N_i conduttori

$$E_o = K_{f1} N_i \phi = 2 K_f K_{i1} \phi f N_i$$

$$\text{se fattore di forma } K_f = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} \quad \omega = 2\pi f = \frac{p \cdot n}{60}$$

$$E_o = \cancel{\frac{2}{\sqrt{2}}} \cdot \frac{\pi}{\sqrt{2}} \cdot K_{i1} \cdot \phi \cdot f \cdot N_i \quad \begin{aligned} \omega &= \frac{2\pi n p}{60} \\ &= \frac{2 \cdot 314 \cdot 1500 \cdot 2}{60} \\ &= 314,159 \end{aligned}$$

$$N_i = 2p m_i q_i = 4 \cdot 4 \cdot 4 = 64$$

$$\text{trovo il valore di } K_{i1} = \frac{\sin \frac{\alpha}{2}}{q \sin \frac{\alpha}{2}} = \frac{\sin \left(\frac{15^\circ}{2} \right)}{4 \sin \left(\frac{15^\circ}{2} \right)} = \frac{\sin 30^\circ}{4 \sin 7,5^\circ} = 0,995$$

$$q_i = \frac{Q}{3 \cdot 2p} = \frac{48}{3 \cdot 4} = 4$$

* Ora trovo il numero di conduttori per fase:

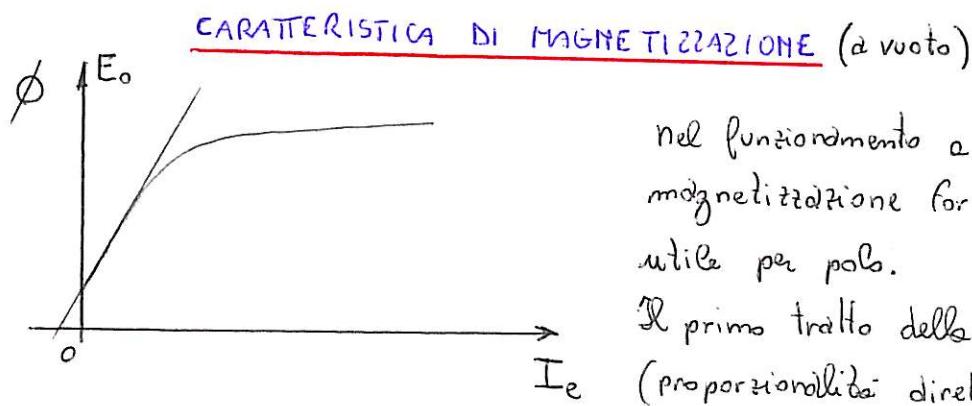
$$N_i = 2p \cdot n_i \cdot q_i = 4 \cdot 4 \cdot 4 = 64 \text{ conduttori per fase.}$$

* Trovo la forza elettromotrice in una fase

$$\boxed{E_o = \frac{\pi}{\sqrt{2}} \cdot 0,958 \cdot 0,0338 \cdot 50 \cdot 64 \\ = 230 \text{ volt}}$$

Se ci saranno più avvolgimenti si dovranno calcolare E_1, E_2, E_3

Se la macchina è costituita da una terna simmetrica allora basta calcolare una e gli altri sono uguali (sfasamento di 120°)



Nel funzionamento a vuoto la caratteristica di magnetizzazione fornisce il valore del flusso utile per polo.

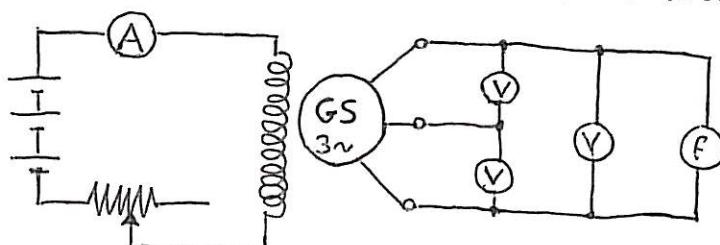
Il primo tratto della curva è rettilineo
 I_e (proporzionalità diretta)

Se aumenta la forza elettromotrice aumenta anche il flusso

Al crescere del valore del flusso interviene la saturazione (del ferro).

Nella zona di saturazione per incrementare il valore della forza magnetomotrice è necessario un grandissimo aumento della corrente di eccitazione I_e (che si ricorda che è costante)

Schema di principio della misura della caratteristica a vuoto di un generatore sincrono trifase



GENERATORE SINCRONO TRIFASE (FUNZIONAMENTO A CARICO)

Nell'ipotesi di terne di forze elettromotorie simmetriche sia a vuoto che a carico costituito da 3 impedenze uguali di modulo $|Z|$ nell'indotto circola una corrente di valore eff. $I = \frac{V}{\sqrt{3} \cdot Z}$

La macchina fornisce al carico una potenza apparente di $P_a = \sqrt{3} VI$

mentre la potenza attiva $P_e = \sqrt{3} VI \cos \varphi$

mentre la potenza reattiva $Q = \sqrt{3} VI \sin \varphi$

Se la potenza attiva è diversa da 0 il generatore sviluppa una coppia premotrice che tenderebbe a fare diminuire la velocità $\vec{v} = \frac{2\pi m}{60}$

* Nel funzionamento a vuoto la potenza meccanica in ingresso deve compensare le perdite meccaniche e le perdite nel ferro.

* Nel funzionamento a carico per mantenere inalterata la velocità la coppia esterna deve aumentare dal volto a vuoto al volto a carico.

vol. pag 84

$$C_m = C + C_{m_0}$$

$$C = \frac{P_e + P_{ep}}{\Omega} \quad C_{m_0} = \frac{P_{mp} + P_{pfo}}{\Omega}$$

VARIAZIONE DI TENSIONE IN UN GENERATORE SINCRONO DA VUOTO A CARICO

Se variazione di tensione in uscita dal generatore è dovuta:

1 ÷ 5 % alla caduta fittizia $R \cdot I$ (spesso trascurabile).

Dipende dai flussi dispersi che ad essi si associa per ogni fase di indotto una reattività di dispersione X_o e una conseguente caduta induttiva.

DIAGRAMMA VUOTO/CARICO

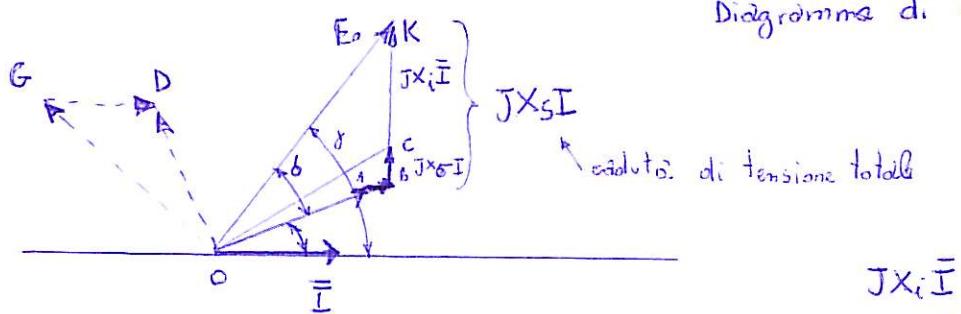


Diagramma di Behn-Eshenborg

Diagramma di Behn-Eshenborg, reattività sincrona e circuito equivalente di una fase.

Per una macchina NON SATURATA, caratteristica a vuoto equivalente esiste proporzionalità tra le f.m.m. e le f.e.m. prodotti dai flussi ad essi dovuti.

Il triangolo delle f.m.m. ODG si può sostituire per le suddette proporzionalità con il triangolo OCK ruotato rispetto al primo di $\frac{\pi}{2}$. L'effetto delle ampe're spire di reazione \overline{GD} può essere quindi valutato attraverso la considerazione di una corrispondente caduta induttiva $\overline{CK} = JX_i I$.

Ne consegue che per uno studio della macchina si può ricavare allo semplice considerazione di un'unica reattività.

$$X_s = X_i + X_o$$

REATTANZA SINCRONA

La reittanza sincrona $X_s = X_t + X_o$ tiene conto sia della dispersione X_o che della reazione di indotto X_t .

IMPEDIMENTA SINCRONA

$$Z_s = R + jX_s$$

Il modulo di Z_s è poco diverso da X_s essendo R sempre molto minore di X_s .

Il diagramma vettoriale di funzionamento della macchina nelle ipotesi assunte si riduce ad un diagramma di sole tensioni.

COPPIA FREANTE

Nell'ipotesi di potenza attiva P_e diversa da zero e facendo riferimento ad una macchina sincrona isotropa (rotore estetorico entrambi lisci) a due poli e con due corde per polo e per fase.

Supponiamo la macchina eccitata in rotazione con velocità n (R.P.M.) al ruotare del rotore la distribuzione delle forze elettromagnetiche segue la posizione dell'induttore si ha così una distribuzione di forza elettromotrice indotta rigidamente legata alla posizione dell'induttore.

Se la natura del carico è tale che la corrente di indotto I e la forza elettromotrice a vuoto è zero, nona in fase ($\gamma = 0$) rel. pag 86 la forza elettromotrice ha lo stesso andamento delle correnti.

A tali correnti sono associate i flussi utili (le linee tralteggiate in fig. 2-10 b). Se forza magnetomotrice che da lusso ai flussi utili viene denominata forza magnetomotrice di reazione di indotto e presenta le seguenti caratteristiche: 1) ha andamento a gradini con valore massimo $M_{i1} \approx 1,31 n_i q_i I$

SI CONSIDERA SOLO L'ARMONICA FONDAMENTALE

$$M_{i1} = 1,35 n_i q_i K_{i1}$$

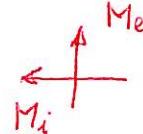
con asse magnetico disposto sull'asse interpolare.

2) È scomponibile in serie di Fourier.

3) L'armonica fondamentale ha valore massimo $M_{11} = 1,35 \text{ niqiIK}_{11}$

4) Ruota nel traferro nel verso corrispondente all'ordine clico delle 3 fasi con velocità angolare $\frac{2\pi m}{60} = \Omega$

I° caso se la natura del carico è tale che $\gamma = 0$

Nelle condizioni di carico ipotizzate (angolo di sfasamento nullo) 

Le forze magneto motrice di reazione ora indotto e quindi in quadratura rispetto a quella della forza magneto motrice di eccitazione quindi REAZIONE IN QUADRATURA tutto si comporta come se fossero sorte sulla superficie interna dell'inolto due polarità magnetiche N' e S' disposte in corrispondenza dell'asse interpolare.

IMPORTANTE poiché polarità di uguale segno si respingono nascono delle forze elettromotorie tali da dare luogo a una coppia frenante C che tende a rallentare la rotazione della macchina.

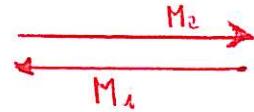
II° caso $\gamma = \frac{\pi}{2}$ La corrente è in ritardo di $\frac{\pi}{2}$. (Se la natura del carico è tale che:)

$$\bar{E}_0 = \text{Fem a vuoto}$$

$$\gamma = \frac{\pi}{2}$$

I corrente
in ritardo

L'asse magnetico delle forze magneto motrice di reazione ha ora la stessa direzione e verso opposto rispetto a quello delle forze magneto motrice di eccitazione avendo cioè reazione diretta



Tutto si comporta come se sulla superficie dell'inolto (stator) fossero sorte due polarità magnetiche N' e S' disposte in corrispondenza dell'asse polare e con azione smagnetizzante.

III° caso corrente di indotto I e ferm. a vuoto sfasato di $\frac{\pi}{2}$.

se la natura del carico è tale che $\gamma = -\frac{\pi}{2}$



la corrente di indotto è in anticipo sulla tensione a vuoto.

L'asse magnetico di reazione ha la stessa direzione e stesso verso di quelle delle forze magneto motrice di reazione, reazione diretta.

Tutto si comporta come se fossero sorte sulla superficie interna dell'indotto due polarità magnetiche N e S disposte in corrispondenza dell'asse polare e con azione MAGNETIZANTE.

Le azioni tra polarità magnetiche di induttore e di indotto sono ancora solamente radiali senza alcuna produzione di coppia frenante e quindi di potenza attiva.

tra macchine è rette si ha ancora solo scambio di potenza reattiva.

RAPPRESENTAZIONE VETTORIALE DI FORZE MAGNETO MOTRICI E DI GRANDEZZE ELETTRICHE

Le condizioni di carico dell'avvolgimento di indotto (stator) di una macchina SINCRONA IDENTIFICATA DALLE GRANDEZZE SINUSOIDALI corrispondenti a tensione di fase, corrente e dal relativo angolo di sfasamento non sono rappresentabili in un diagramma vettoriale del piano complesso.

È possibile inoltre mettere in evidenza i mutui rapporti tra forze magnetomotorie e grandezze elettriche di indotto rappresentando tutte le grandezze in un unico diagramma vettoriale.

Per far ciò è necessario:

- Fissare un riferimento solido con lo stator ed esprimere l'avvolgimento temporale della forza magneto motrice rispetto ad esso.

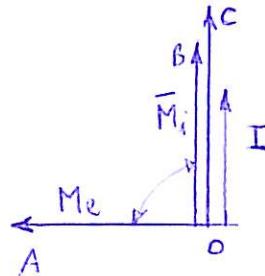
Data una fase di alternatore si procede nel seguente modo:

PER LA RAPPRESENTAZIONE VETTORIALE

- 1) Si prende come riferimento l'asse magnetico
- 2) Si considerano gli andamenti temporali delle f.m.m. sinusoidali rispetto a tale riferimento, e si rappresentano mediante vettori di ampiezza pari al valore massimo.
- 3) Contemporaneamente si considerano gli andamenti temporali di tensione e correnti sinusoidali relative alla fase e si rappresentano mediante vettori di ampiezza pari al valore efficace.

- 1) Sulla base di quanto sopra si possono tracciare per le tre condizioni di carico ipotizzate i diagrammi vettoriali.

1° caso $\gamma = 0$



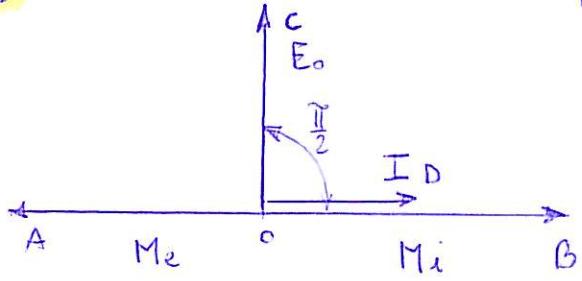
\bar{M}_e = f.m.m. di induttore

\bar{M}_i = f.m.m. di indotto

$A = \bar{M}_e$ f.m.m. di induttore

E_o è in ritardo di $\frac{\pi}{2}$ rispetto al flusso (\bar{M}_e) che lo genera. mentre si vede che la corrente I è in fase con E_o mentre la \bar{M}_i si vede che è in ritardo di $\frac{\pi}{2}$ rispetto a \bar{M}_e

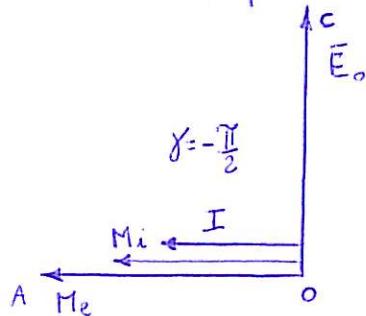
- 2) Rappresentazione vettoriale per $\gamma = +\frac{\pi}{2}$ (carico induttivo)



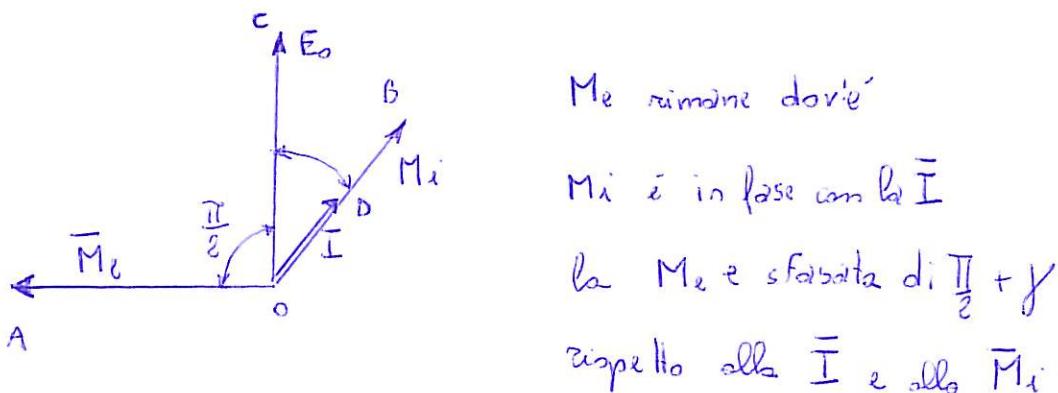
Il vettore OD che rappresenta I_D è in ritardo di $\frac{\pi}{2}$ come anche M_i rispetto a OC (che è la tensione a vuoto E_o) e sono rispettivamente in opposizione con OA (M_e)

3) GRANDEZZE ELETTRICHE PER $\gamma = -\frac{\pi}{2}$

In questo caso abbiamo che i è in anticipo di $\frac{\pi}{2}$ su E_o , così anche M_i è sono in fase con M_e .



4) caso ANGOLO DI SFASAMENTO GENERICO



INTRODUZIONE A DIAGRAMMA DI POTIER (ROTORE LISCIO)

Indicati con \bar{M}_2 ed \bar{E} i vettori rappresentativi della forza magnetomotrice risultante e della forza elettromotrice indotta a carico.

\bar{M}_2 = vettore della forza magnetomotrice risultante.

\bar{E} = forza elettromotrice risultante.

È ipotizzato che le caratteristiche che ne lega le ampiezze coincida con quelle a vuoto.

La rappresentazione vettoriale rende possibili le seguenti operazioni:

- 1) Combinare vettorialmente M_e e M_i al fine di determinare M_2
- 2) Evidenziare le relazioni di fase tra tensione a carico $\frac{V}{\sqrt{3}}$, corrente I , E_o , E , M_e , M_i , M_2
- 3) Combinare vettorialmente, se si trascura la saturazione le forze elettromotrici generali delle forze magnetomotrici.

Diagramma di Potier e di Blondel sono usati per la progettazione delle macchine ma tenendo conto della non linearità e delle caratteristiche di magnetizzazione, non permettono di determinare agevolmente le caratteristiche di funzionamento.

A questo scopo si presentano meglio i diagrammi di Bessemburg e delle due realtà (pag 92)

GENERATORE SINCRONO A ROTORE LISCIO

La macchina a rotore liscio è caratterizzata da un trafilero di ampiezza costante, ma segue che la forza magnetomotrice di indotto agisce sui percorsi che presentano la stessa resistenza qualunque sia il valore dell'angolo γ .

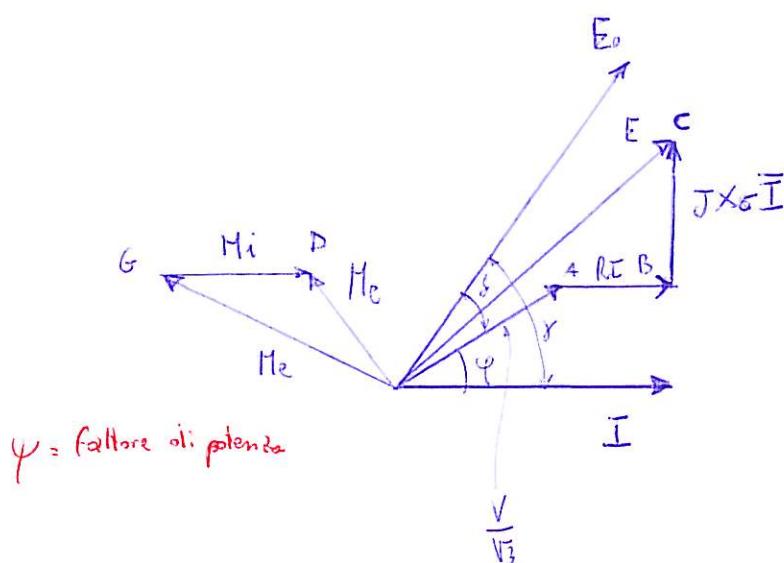
La forza magnetomotrice di reazione invece ha lo stesso effetto al variare della natura del carico. Ed è pertanto possibile sommare per ogni condizione di carico M_e e M_i

DIAGRAMMA DI POTIER Note R e la realtà di dispersione X_o e fissate la tensione di fase $\frac{V}{\sqrt{3}}$ e la corrente erogata \bar{I} il diagramma di Potier consente indipendentemente dalla condizione di saturazione della macchina di calcolare:

- 1) La forza magnetomotrice di eccitazione
- 2) La variazione di tensione da carico a vuoto con forza magnetomotrice di eccitazione costante

M_e è sfasata sempre di $\frac{\pi}{2}$ rispetto ad E

La differenza aritmetica tra E_o e $\frac{V}{\sqrt{3}}$ fornisce la variazione di tensione da carico a vuoto ad eccitazione costante



l'angolo di sfasamento tra E_o e $\frac{V}{\sqrt{3}}$ è definito angolo di coppia o di carico

Dal diagramma di Potier si rileva in quale modo influenza il fattore di potenza del carico sull'eccitazione.

VALE SEMPRE: Se la corrente è in ritardo rispetto alla tensione si ha sempre una caduta di tensione per cui la tensione a carico è minore di quella a vuoto

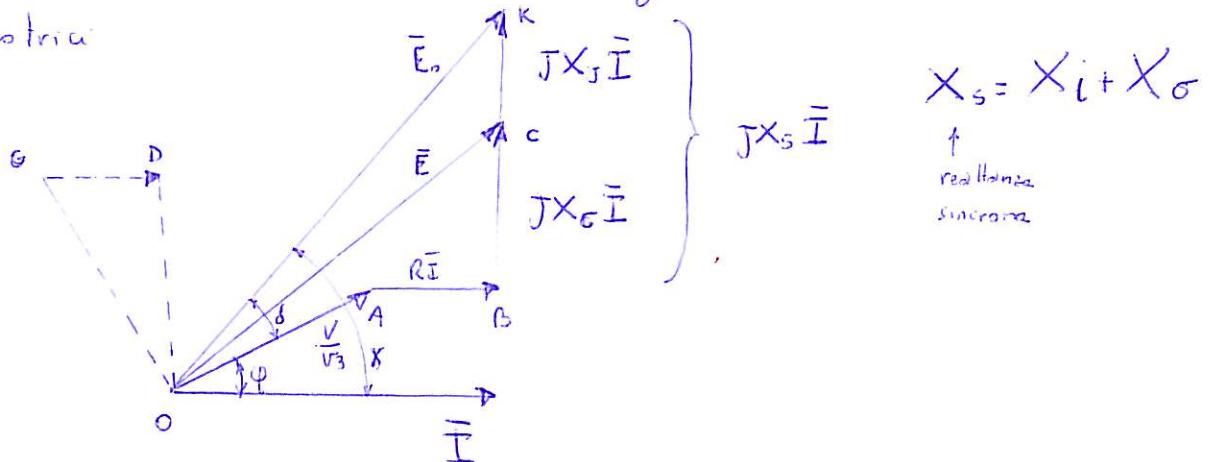
Se invece la corrente è in anticipo rispetto alla tensione, la tensione a carico è maggiore di quella a vuoto.

Diagramma di Bhen Esenbury

Realtà sincrona e circuito equivalente di una fase.

Per la macchina non saturo. (nella parte rettilinea della curva)

vinete proporzionalità fra le forze magnetomotorie e le forze elettromotorie



Il triangolo della forza magnetomotrice ODG si può sostituire il triangolo OCK della forza elettromotrice ruotato rispetto al primo di $\frac{\pi}{2}$. L'effetto delle ampie spine di reazione GD può essere dunque tenuto d'incarico la considerazione di una corrispondente colonna di tensione induttiva CK.

$$C_K = JX_d I$$

ne consegue un'unica resistenza $X_s = X_i + X_o$ (resistenza sincrona) che tiene conto sia della dispersione sia della reazione di indotto.

GENERATORE SINCRONO A POLI SPORGENTI

La macchina a poli sporgenti è caratterizzata da un trapezio di ampiezza $N_{\text{f}} \text{ COSTANTE}$ e quindi le forze magneto motrice di indotto agiscono su percorsi di rincorrimento diversi a seconda del valore dell'angolo γ .

Per $\gamma = \pm \frac{\pi}{2}$ l'asse magnetico e la forza magneto motrice di reazione si trova ad esempio sull'asse polare e viene così ad avere un circuito magnetico di minima rincorrimento, e quindi massima permeabilità.

Per $\gamma = 0$ l'asse magnetico della forza magneto motrice di reazione si trova invece sull'asse interpolare al quale corrisponde un circuito di massima rincorrimento e quindi di minima permeabilità.

Le forze magneto motrice di reazione e di molta e�icità di correnti che la producono ha perimetro effetti diversi al variare della natura del vinco.

Teoria delle doppie reazioni, fissata una coordinate di rotolabile con il rotore e per una generica condizione di carica caratterizzata da un angolo α di ritardo di \bar{I} rispetto E si può esprimere le due forze magneto motrici M_e prodotta dall'induttore e la fondamentale M_i di reazione di indotto nel seguente modo.

$$m_e(\alpha) = \begin{cases} +M_e & \text{per } 0 < \alpha < \pi \\ -M_e & \text{per } \pi < \alpha < 2\pi \end{cases}$$

$$m_i = -M_d \sin \alpha + M_q \cos \alpha \quad \text{con} \quad \left\{ \begin{array}{l} M_d = M_{\text{f}} \sin \gamma \approx 1,35 \text{ nigi} K_{11} I_{\text{m}} \sin \gamma \\ M_q = M_{\text{f}} \cos \gamma \approx 1,35 \text{ nigi} K_{11} I_{\text{m}} \cos \gamma \end{array} \right.$$

La \bar{m}_i (d) mostra che la forza magnetomotrice di indotto m_i puo' considerarsi costituita da due componenti:

- Una sinusoidale m_d con max M_d corrispondente alla forza magnetomotrice di reazione che si avrebbe se esistesse la sola componente $I_{sen \gamma}$ in quadratura con E_0
- Una sinusoidale m_q con max M_q corrispondente alla f.m.m. di reazione che si avrebbe se esistesse la sola componente I_e .

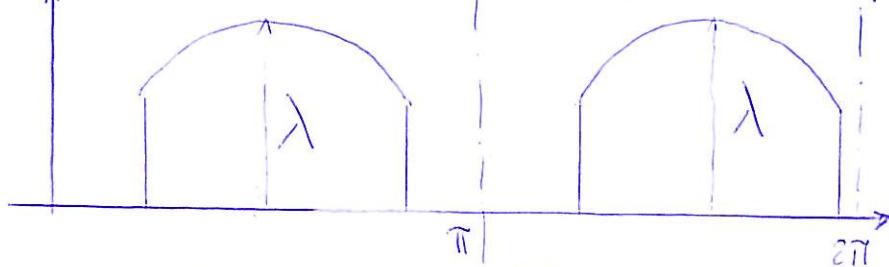
$$I_q = i \cos \gamma \quad \text{in fase con } E_0$$

$$(M_2 = M_e + K_M M_d + K_q M_q)$$

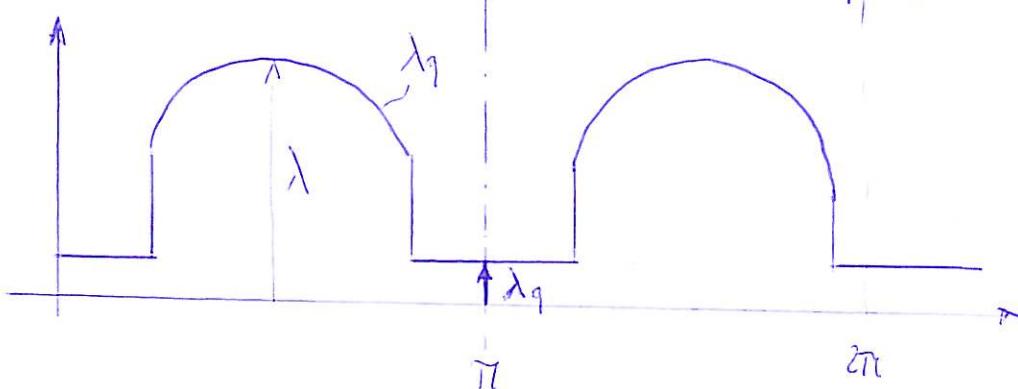
La sinusoidale m_i , puo' essere sostituita con le due sinusoidi m_d e m_q che indipendentemente dalla natura del circo presentano sempre assi magnetici coincidenti rispettivamente con l'asse polare e quello interpolare. Conseguentemente e possibile definire due punzoni di α :

la prima

c) Andamento qualitativo delle permeanze specifiche $\lambda_d(\alpha)$ al traferro



d) andamento qualitativo delle permeanze specifiche λ_q al traferro.



$$\lambda_d(\alpha) = \lambda G_d(\alpha) \quad \lambda_q(\alpha) = \lambda G_d(\alpha)$$

$$\lambda_p = \frac{4}{\pi^2} T \lambda_L \int_0^{\pi} G_d(\alpha) \sin(\alpha) d\alpha \quad \text{permesso media per polo}$$

da cui si ricava K_d e K_q vedi pag 97

$$\text{Essendo il flusso } \bar{\phi} = \frac{2}{\pi} B_H T L \text{ si ha che diventa } \bar{\phi} = \lambda_p \bar{M}_r$$

con M_r = forza magnetica matrice risultante.

$$M_r = M_e + K_d M_d + K_q M_q$$

È la relazione base della teoria delle doppie reazioni applicata alle macchine a poli sporgenti

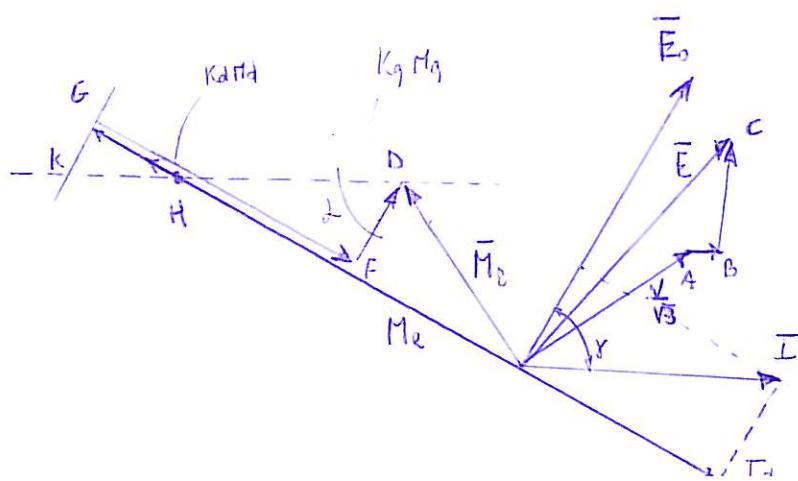
Se flusso a carico $\bar{\phi}$ può essere considerato come quello prodotto da 3 forze magnetica matrice minime.

Praticamente l'ampiezza della forza magnetomotrice è dovuta al flusso $\bar{\phi}$ prodotto da M_r .

La forza magnetomotrice $K_d M_d$ rispettivamente f.m.m. di reazione diretta con K_d uguale a 0,85 mentre $K_d M_q$ forza magnetica matrice di reazione in quadratura con $K_q = 0,43$

DIAGRAMMA DI BLONDEL

Nell'ipotesi di conoscere inizialmente i vettori E_0 , I e l'angolo γ si tracciano le componenti I_d e I_q vettori di ampiezza rispettivamente $I_{d\sin\gamma}$ e $I_{q\cos\gamma}$



Me risulta fatta in anticipo di $\frac{\pi}{2}$ nel E_o

Si compone il vettore OG con GF, poi con FD, la loro somma è il vettore OD che è la forza magneto motrice risultante \bar{M}_e che fornisce E si carichi in ritardo di $\frac{\pi}{2}$ su OD

Poiché le grandezze note inizialmente sono in realtà $\frac{V}{R_3}$, la corrente I è l'angolo di sfasamento qf tra tensione a catena e corrente I, il diagramma di Blondel si può tracciare osservando che partendo dal punto G la normale finisce a K.

talché l'angolo $\hat{HDF} = \gamma$

quindi si può trovare la relazione

$$DK = \frac{FG}{\sin \gamma} = \frac{Kd M_d}{\sin \gamma} = Kd M_i$$

e $DH = \frac{DF}{\cos \gamma} = \frac{Kg M_g}{\cos \gamma} = Kg M_i$

A questo punto condotta la semiretta OH ed abbassata la

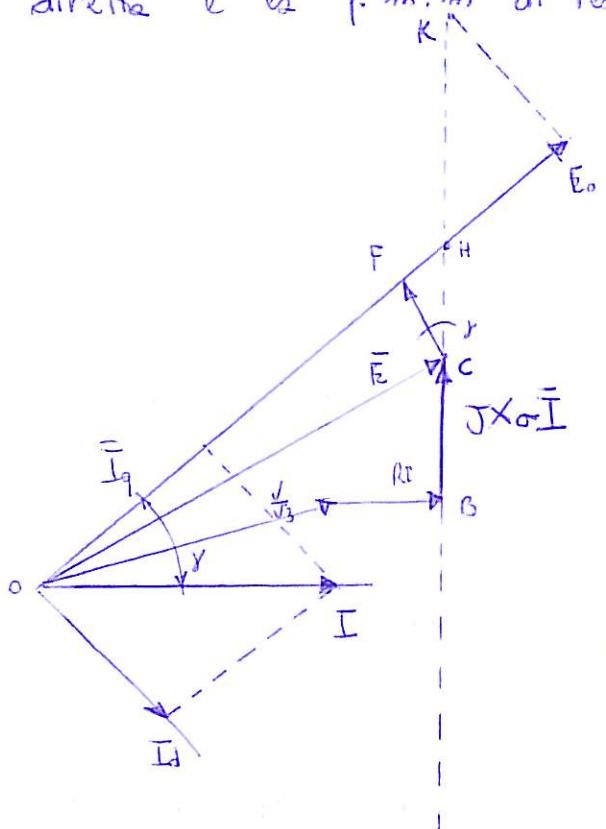
normale ad essa da K resta definito il punto G

e qui sotto il vettore OG che da la forza magneto motrice \bar{M}_e

DIAGRAMMA DELLE DUE REATTANZE

Nell'ipotesi di macchina anisotropa, non saturo, si puo' fare un diagramma di sole tensioni.

In questo caso le forze magnetomotorie che agiscono sul circuito magnetico sono la forza magnetomotrice di eccitazione, la forza magnetomotrice di reazione di indotto diretta e la f.m.m. di reazione di indotto in quadratura.



Indicando con

$$\begin{cases} X_{id} = K_d X_i \\ X_{iq} = K_q X_i \end{cases}$$

chiamate rispettivamente

reattanza di reazione diretta e

reattanza di reazione in quadratura

Se diagramma delle due reattanze si realizza secondo le seguenti
di operazione di 6 punti

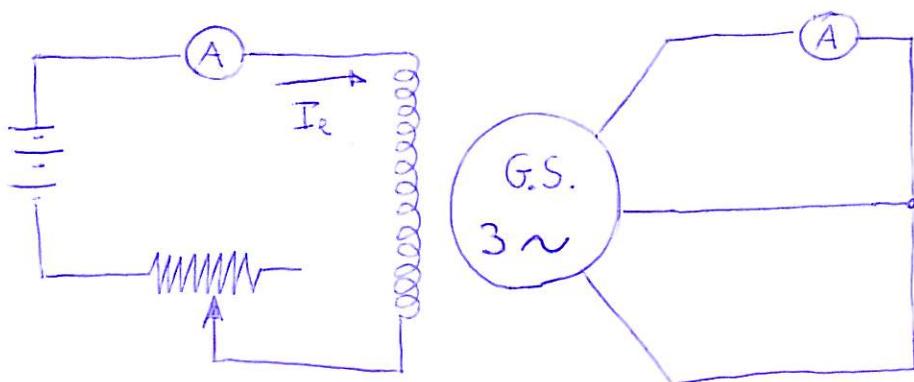
- Si trovano i vettori \bar{I} , $\frac{\bar{V}}{\sqrt{3}}$, $\bar{R}\bar{I}$, $\bar{J}X\sigma\bar{I}$
- Indichiamo con \bar{OA} il vettore $\frac{\bar{V}}{\sqrt{3}}$, cm $AB = \bar{R}\bar{I}$, $BC = \bar{J}X\sigma\bar{I}$
si prolunga il vettore BC e si individua il punto H
tale che $CK = X_{id}\bar{I}$ e $CH = X_{iq}\bar{I}$
- Si conduce la retta OH e si tracciano dei punti C e K
le normali ad esse CF e KD restano individuato il vettore
 $OD = EO$

GENERATORE SINCRONO TRIFASE (curve caratteristiche)

Caratteristica di corto circuito C.C. e di carico, caratteristica esterna e caratteristica di regolazione.

La caratteristica di corto circuito fornisce la corrente di inoltro I_{sc} in funzione della corrente di eccitazione.

per $V=0$



In sede di calcolo può essere ricavata direttamente dai diagrammi rettangolari una volta posto $\frac{V}{V_3} = 0$

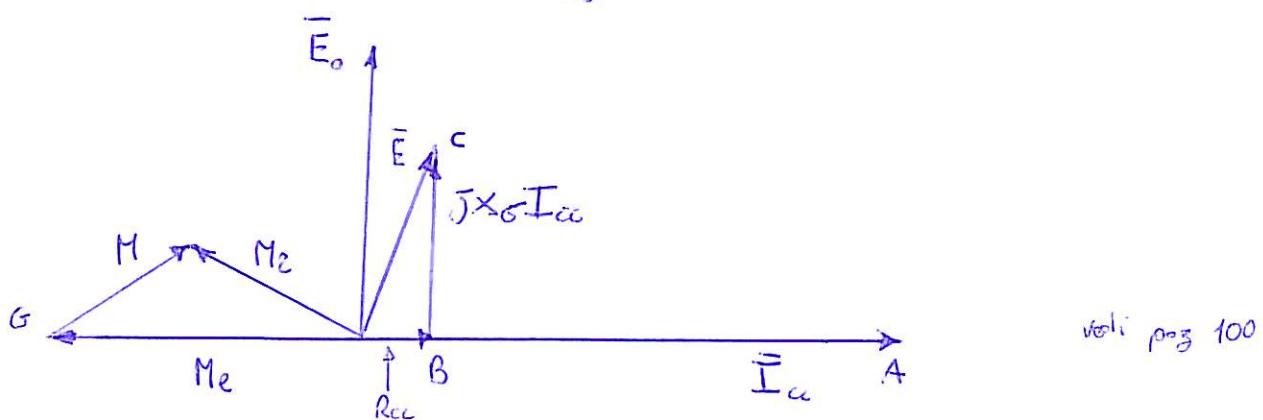
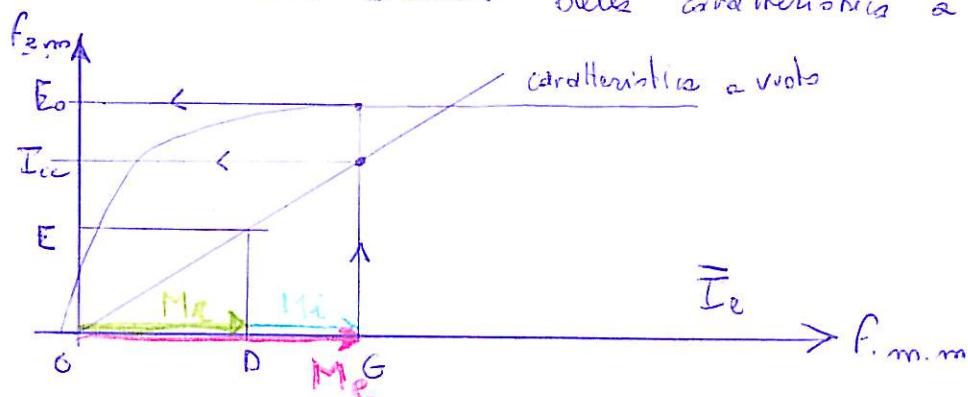


Diagramma di Potier per $\frac{V}{V_3} = 0$

Il diagramma di Potier mostra che il vettore E risulta in quadratura rispetto a I_{sc} essendo R_{sc} molto, molto più piccolo di $jX_o I_{sc}$.

Ripartiamo E sulle ordinate delle caratteristiche a vuoto in riferimento



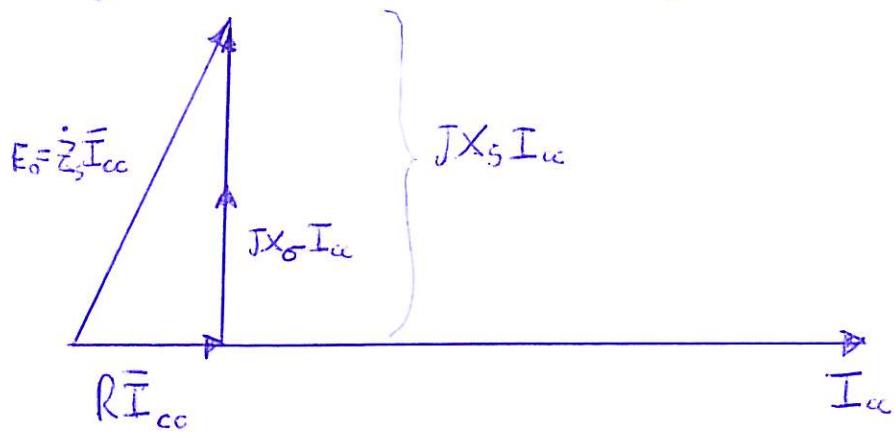
Riportando E sulle ordinate delle caratteristiche a vuoto si ricava sulla fascia il valore $\bar{M}_e = \bar{M}_2$

Mentre GD è uguale a \bar{M}_1 , il vettore OG è \bar{M}_e necessaria per fare circolare la corrente I_{ac} . Resta così definito oltre il valore di E_0 in un punto della caratteristica di corto circuito, che può essere riportato accanto alla caratteristica a vuoto, combinando unicamente le scali delle ordinate Punto P.

Vista l'effetto smagnetizzante della reazione di indotto la caratteristica di corto circuito è lineare al valore di f.m.m.

E SUFFICIENTE QUINDI UN SOLO PUNTO PER LA SUA INDIVIDUAZIONE

Diagramma di Behn Eshen burg



il diagramma di B.E.
assume per $\frac{V}{\sqrt{3}} = 0$ e $O\bar{A} = I_{ac}$
la forma indicata affatto.

Determinato il valore del vettore E_0 lo si riporta sulle ordinate delle caratteristiche a vuoto (grafico della pag precedente) rettilinea e si individua sulla fascia il valore della f.m.m. di eccitazione \bar{M}_e necessaria per avere la corrente I_{ac} .

Dalle caratteristiche a vuoto e di corto circuito delle entrambi rettilinee è possibile ricavare per ogni valore della corrente di eccitazione il valore dell'impedenza minima Z_s come rapporto dei corrispondenti valori di E_0 e I_{ac} .

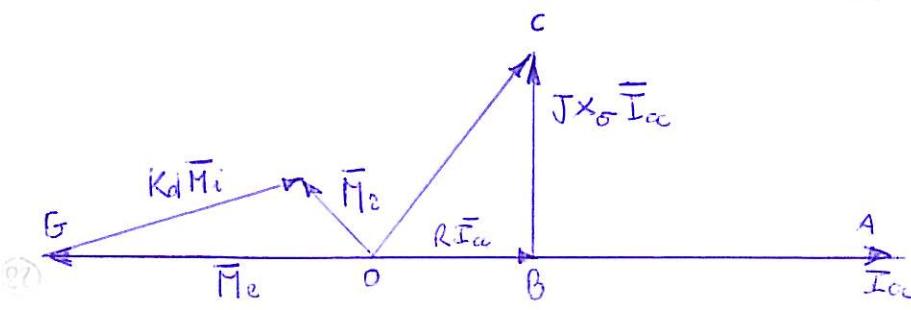
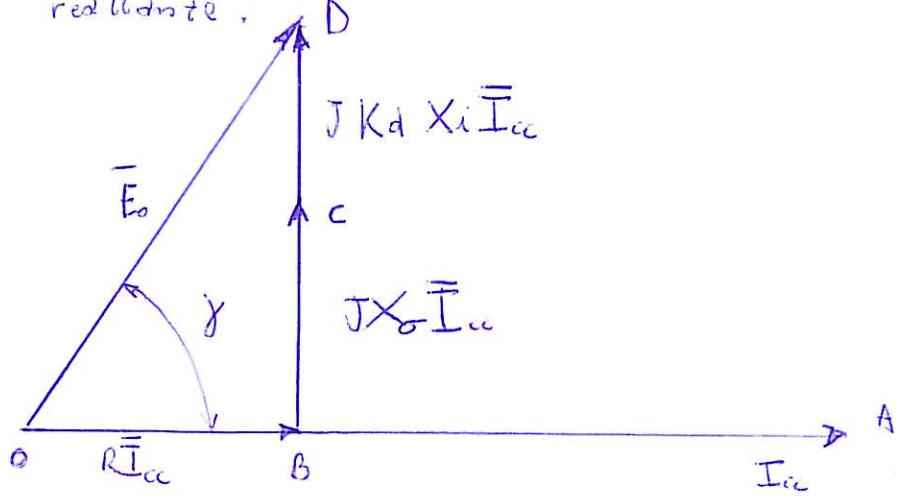


Diagramma di Blondel
per $\frac{V}{\sqrt{3}} = 0$

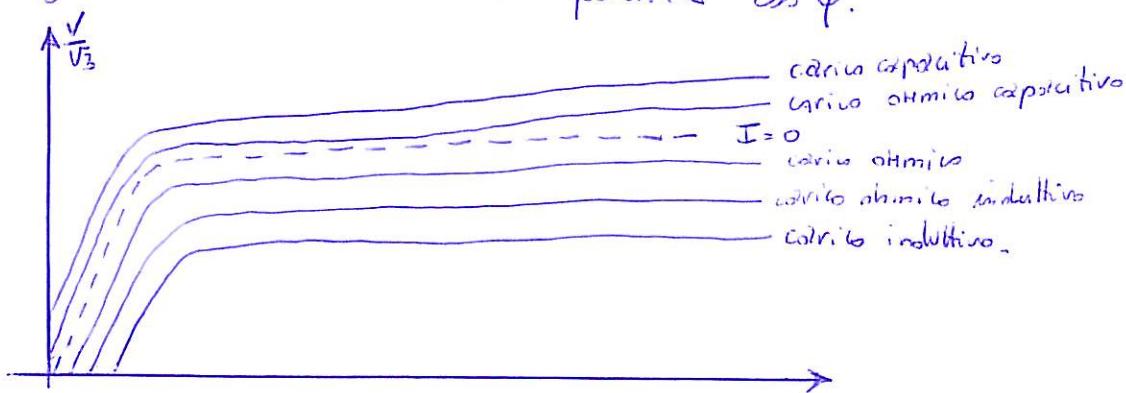
Nel caso di macchina anisotropa la caratteristica di corto circuito viene tracciata in maniera del tutto analoga solo che si considerano solo i diagrammi di Blondel o quelli delle due realtanze.



Si nota che nel diagramma di Blondel si ha che $\gamma \approx \frac{\pi}{2}$ e quindi $Kg Mg \approx 0$ e $Kd Md \approx Kd Mi$

CARATTERISTICA DI CARICO

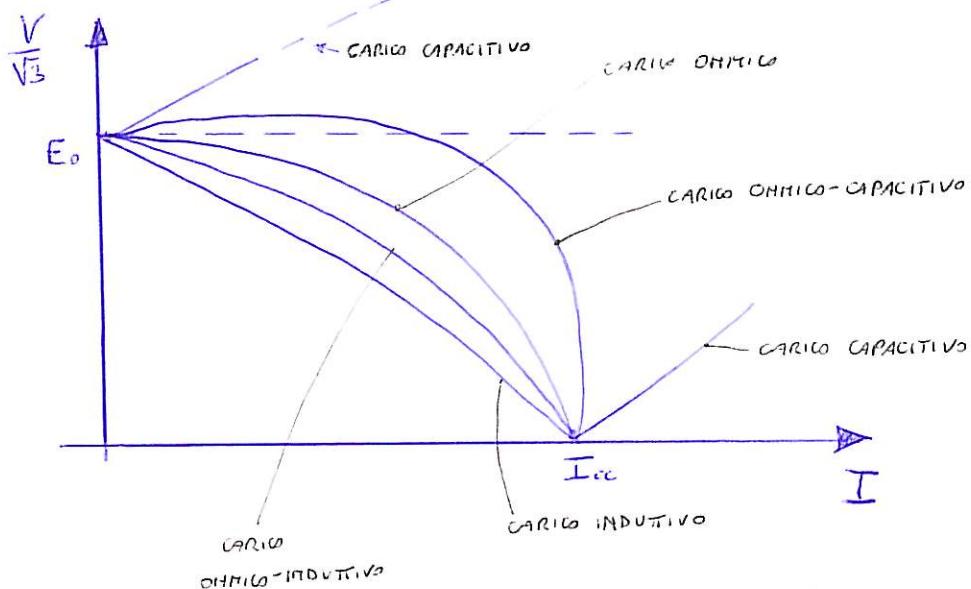
La caratteristica di carico fornisce la tensione $\frac{V}{\sqrt{3}}$ in funzione della corrente di eccitazione I_e per un dato valore della corrente erogata e del fattore di potenza $\cos \varphi$.



La curva tratteggiata corrisponde alla caratteristica a vuoto $I=0$ nel caso di carico OHMICO-INDUTTIVO o induttivo, si ha una riduzione di tensione ai massimi rispetto al valore a vuoto E_o .

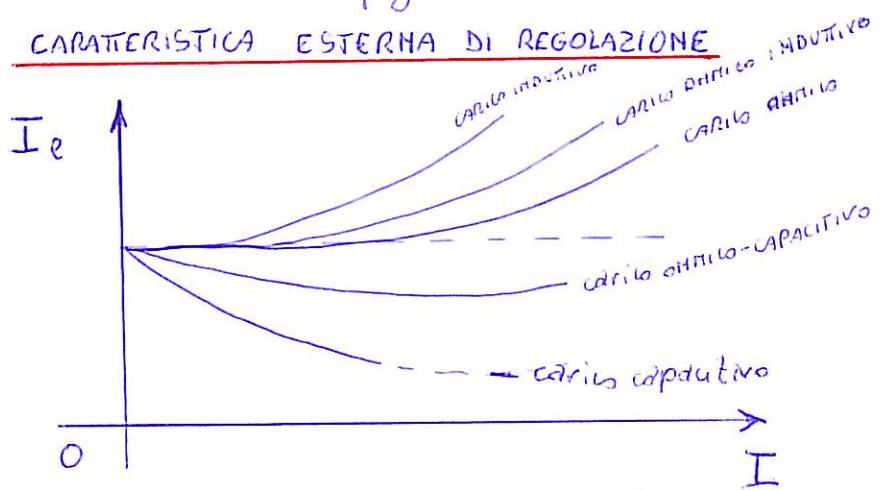
Nel caso di carico OHMICO-CAPACITIVO o capacitivo può also luogo ad un aumento della tensione ai massimi.

CARATTERISTICA ESTERNA



La caratteristica esterna fornisce la tensione a carico in funzione della corrente erogata I_e per un dato valore della corrente I e di un dato valore del fattore di potenza $\cos \varphi$.
Fissato un valore della corrente di eccitazione ed un valore del fattore di potenza si ha una famiglia di curve che rappresentano gli andamenti nella figura.

CARATTERISTICA ESTERNA DI REGOLAZIONE



La caratteristica di eccitazione fornisce la corrente di eccitazione I_e in funzione della corrente erogata I per un dato valore della tensione V/V_3 e del fattore di potenza $\cos \varphi$.

Al variare di quest'ultima si ha per ogni valore di tensione una famiglia di curve che presentano gli andamenti in figura.

FUNZIONAMENTO IN PARALLELO DELLE MACCHINE SINCRONE

L'operazione di inserzione di una macchina in parallelo a una rete deve essere eseguita in modo che non si manifesti nessuna perturbazione dello stato di regime della rete, ossia non si determini nessuna circolazione di corrente attraverso l'avvolgimento di statore delle macchine. Affinché ciò avvenga è necessario prima di chiudere l'interruttore che la forza elettromotrice a vuoto della macchina sia in ogni istante uguale alla tensione presente ai margini della rete a cui è abbucata.

Ciò si verifica se sono soddisfatte le seguenti condizioni:

- Identità di frequenza
- Identità di valori efficaci
- Concordanza di fase.

Soddisfatte le tre condizioni si chiude l'interruttore.

Dal punto di vista pratico:

- 1) Si porta la macchina in rotazione alla velocità $n = \frac{60f}{P}$ controllabile con due frequenzimetri.
- 2) Si agisce sul circuito di eccitazione in modo da avere in uscita una tensione uguale alla tensione di rete controllabile con i due voltmetri.
- 3) Si controlla la concordanza di fase verificabile con le lampadine di sincronismo.

Quando le lampadine rimangono permanentemente accese la macchina è in sincronismo e l'interruttore può essere chiuso.

Portata la frequenza di battimento a un valore molto basso mediante una regolazione fine della velocità si chiude comunque l'interruttore (in un momento in cui le lampade sono sparse).

La macchina mantiene il sincronismo dato da ogni variazione di velocità rispetto al sincronismo è controllata dall'interazione che verrebbe a determinarsi tra il campo induttore e quello di indotto.

Esplicate le operazioni di inserzione e chiuso l'interruttore T la macchina è inserita nella rete.

Valgono le ipotesi di:

- 1) Rete di potenza infinita e quindi tensione e frequenza costante.
- 2) Macchina non satura.
- 3) Macchina con resistenza di indotto nulla.