

QUESTE MACCHINE SONO SEMPRE A ROTORE LISCIO/POLISALIENTI E A STATORE LISCIO

STATORE - ROTORE

↓
LISCIO

→ POLISALIENTI → M_e a forma rettangolare
→ ROTORE LISCIO → M_e a gradini

Avvolgimenti di eccitazione nel rotore il quale è alimentato in D.C. quindi alimentando il rotore con una corrente I_{ec} continua e considerandoci una macchina a poli salienti (anisotropa) produce una forza magnetomotrice di valore $M_e = n I_{ecc}$. Tale forza magnetomotrice esce da un polo di rotore, attraversa il traferro, si concatena con gli avvolgimenti di statore e rientra nel polo di segno opposto. Sagomando opportunamente le espansioni polari si ha nel traferro una forza magnetomotrice circa sinusoidale anche se inizialmente è rettangolare.

Se invece consideriamo invece una macchina sincrona trifase a rotore liscio (isotropa) formata da N_e conduttori siti nel rotore e percorsi da I_e dove il rotore è formato da Q (numero di core per polo e per fase).

La forza magnetomotrice prodotta dalla corrente I_{ecc} vale:

$$M_e = \frac{n_e q_e I_{ec}}{2}$$

Essa esce da un polo del rotore attraverso il traferro e si concatena con gli avvolgimenti dello statore, se noi consideriamo la componente radiale dell'induzione individuata dalle linee di flusso ϕ si trova nel traferro un valore di forza magnetomotrice a gradini formato da una fondamentale e da una serie di armoniche.

Quindi se noi la scomponiamo in serie di Fourier si trova che la

fondamentale vale $M_1 = \frac{2}{\pi} n_e q_e I_e K_1$

K_1 = coefficiente di avvolgimento,

Si nota che il rotore è ancora fermo infatti non compare né f né Ω né n come numero di giri

Mentre per la terza armonica si ha $M_3 = \frac{2}{3} \pi n_e q_e I_e K_3$

La quinta armonica sarà $\frac{2}{5} \pi n_e q_e I_e K_5$

considerando la fondamentale dell'induzione $b = B_m \sin \omega t$ nel momento in cui il rotore ^①

Ora consideriamo un conduttore posto nell'avvolgimento di statore e poniamo il rotore in rotazione alla velocità angolare $\Omega = \frac{2\pi n}{60}$ consideriamo la fondamentale della forza magnetomotrice prodotta dall'avvolgimento di eccitazione, tale forza magnetomotrice concatenandosi con gli avvolgimenti di rotore induce in uno di essi una forza elettromotrice di valore $\bar{e} = (\bar{v} \times \bar{b}) \cdot L$ dove $\bar{b} = B_{MAX} \sin(\omega t)$ $\bar{v}$ è una velocità con cui la forza magnetomotrice taglia il conduttore.

$$\bar{v} = 2 \cdot \tau \cdot f \quad \bar{v} = 2 \cdot \tau \cdot \frac{p \cdot n}{60}$$

Quindi, considerando le direzioni di $\bar{v}$ e di $\bar{b}$ si ha che:

$$f.e.m. \quad e = 2 \cdot \tau \cdot p \cdot B_{MAX} \sin(\omega t) \cdot L$$

$$e_m = \frac{2}{\pi} e_{MAX} \quad \text{se consideriamo il flusso } \phi = 2\pi \cdot \tau \cdot L \cdot B_{MAX}$$

medio

quindi sostituendo si ha che $e = 2\phi f$ se consideriamo il valore efficace si ha: $e_{eff} = 2 \cdot \phi \cdot f \cdot K_e$ coefficiente di avvolgimento

Se consideriamo una fase, la forza elettromotrice in essa indotta è:

$$E = 2 \cdot \phi \cdot f \cdot K_f \cdot N$$

valore efficace (RMS valore) $\rightarrow$ ↑ numero di conduttori
↑ ↑
fattore di forma

Se si considera un pacco raccorciato si deve aggiungere un K_z

$$E = 2 \cdot \phi \cdot f \cdot K_f \cdot K_z \cdot N \cdot (K)$$

↑ ↑
coefficiente di avvolgimento
NUMERO DI AVVOLGIMENTI TOTALI PER FASE

ORA APPLICHIAMO 3 CARICHI ALL'INDOTTO (DELLA MACCHINA TRIFASE)

$$\dot{Z}_1 = \dot{Z}_2 = \dot{Z}_3 = \dot{Z}$$

$$I = \frac{V}{\sqrt{3} |\dot{Z}|}$$

$$\dot{Z} = Z \angle \varphi$$

↑ ↑
modulo fase

con φ che dipende dalla natura del carico

SI POSSO VERIFICARE 3 CASI DI SFASAMENTO DIPENDENTI DALLA NATURA DEL CARICO.

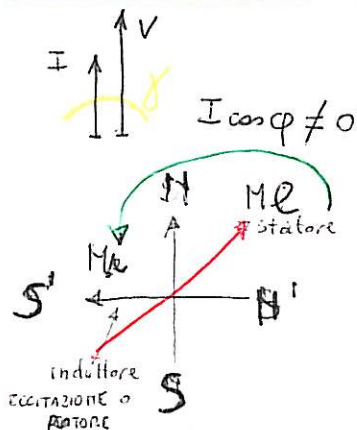
$$\alpha = 0$$

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

$$\alpha = -\frac{\pi}{2}$$

vedi pag 86

Prendiamo in esame $\gamma = 0$, il vettore V è parallelo al vettore I

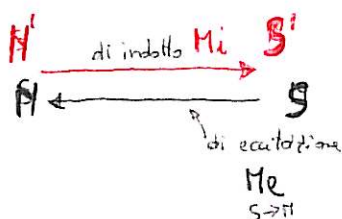


La corrente di indotto concatena con il suo flusso l'induttore e ne genera una corrente.

M_e = f.m.m di eccitazione (sul rotore)

M_i = f.m.m di reazione di indotto (in polarità opposta)

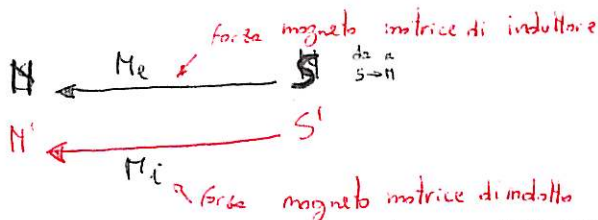
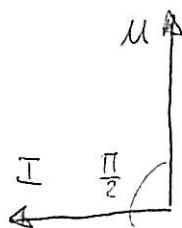
Prendiamo in esame $\gamma = \frac{\pi}{2}$ (vedi pag 86)



Se la natura del carico è tale che sia $\gamma = +\frac{\pi}{2}$ si hanno due coppie poli contrapposte

Prendiamo in esame $\gamma = -\frac{\pi}{2}$

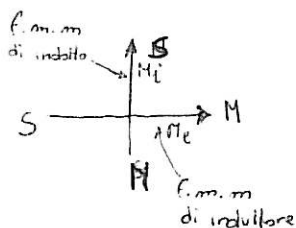
vedi pag 89



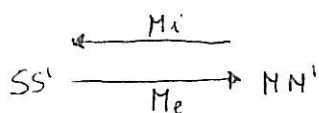
Se la natura del carico è tale che sia $\gamma = -\frac{\pi}{2}$ cioè la corrente è in anticipo sulla tensione.

RIASSUNTO DEGLI EFFETTI IN DIPENDENZA DELLA NATURA DEL CARICO

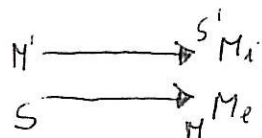
1) $\gamma = 0$



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



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



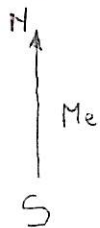
Le due forze magnetomotrici di indotto e di induttore sono uguali e opposte.

RIASSUMENDO OK !!!

La corrente $I = \frac{V}{\sqrt{3} Z}$ e così calcolabile, dove $Z = Z \angle \varphi$

Se la natura del carico dà un sfasamento tra tensione e corrente $\alpha = 0$ si ha:

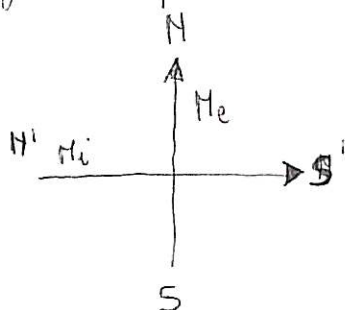
1) Ha una forza magnetomotrice di eccitazione nell'induttore con direzione $S \rightarrow N$



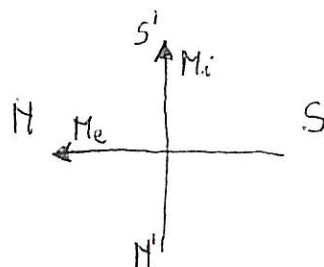
2) da questa, e con $\gamma = 0$, si ha origine e delle polarità che producono M_i (ovvero la forza magnetomotrice di indotto) perpendicolare a M_e e di reazione, ovvero come nella legge di Lenz, si oppone al fenomeno causante avrà quindi direzione $N' \rightarrow S'$ rispetto alle nuove polarità che si è generate.



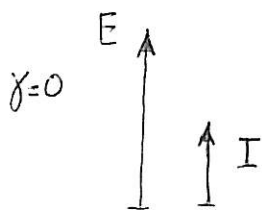
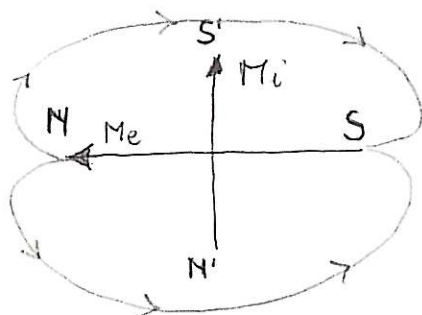
3) Se due forze magnetomotrici di induttore (eccitazione) e di indotto vengono disegnate sovrapposte con la chiara indicazione del valore di γ che esplicita la natura del carico.



Per convenienza posso ruotare tutto di $+\frac{\pi}{2}$ mettendo la forza magnetomotrice di eccitazione sull'asse orizzontale.

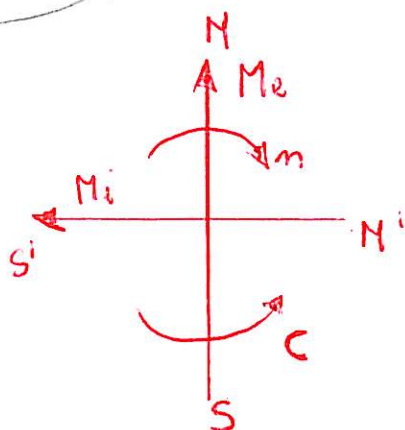


4) a pag 89 del libro si spiega la situazione con $\gamma = 0$ e viene dato il disegno



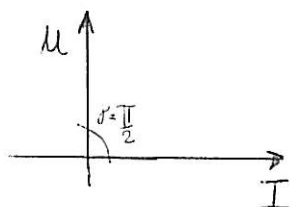
Per $\gamma = 0$ abbiamo E e I in fase questo implica che la M_e (forza magnetomotrice di eccitazione) è diretta da SUD a NORD, quindi è come se fosse comparso un bipolo.

Prima si disegna M_e o verticale o orizzontale e poi mette M_i



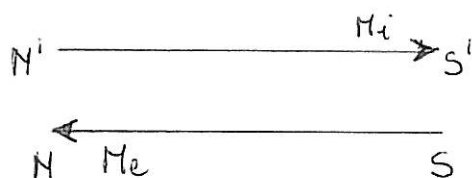
Dato che due polarità del medesimo segno si respingono nasce una coppia frenante $C \neq 0$

Analisi del caso in cui la natura del carico dà origine a uno sfasamento tra tensione e corrente $\varphi = \frac{\pi}{2}$ vedi pag 86



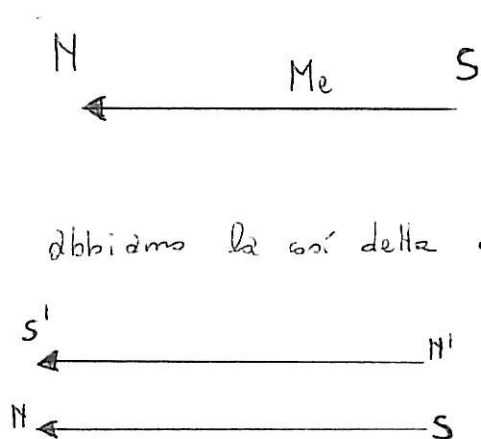
compare per prima M_e che disegna orizzontale da S a Nord del bipolo magnetico.

si sviluppa una M_i parallela ma discorde, quindi c'è un effetto smagnetizzante, ovvero per definizione una azione diretta.



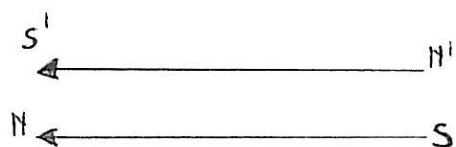
M_e va dal Sud al Nord, al contrario la M_i

Analisi del caso in cui la natura del carico dà uno sfasamento tra Tensione e corrente pari a $\varphi = -\frac{\pi}{2}$, quindi si ha lo sviluppo di due polarità uguali ed opposte.



dopo che ha avuto origine M_e si sviluppa la forza magnetomotrice di indotto M_i (come reazione a M_e) di segno concorde a M_e

abbiamo la così detta azione diretta o azione magnetizzante.

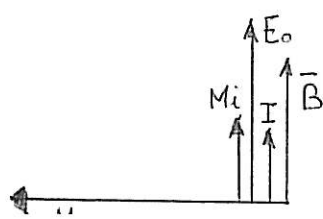


ORA RAPPRESENTIAMO TUTTE ASSIEME LE AZIONI SMAGNETIZZANTI, MAGNETIZZANTI E TUTTE LE F. m. m.

* Supponiamo siano tutte sinusoidali e le f.m.m di VALORE MASSIMO

* Analogamente siano sinusoidali le tensioni e le correnti ma pari al valore efficace.

Sovrapponiamo i grafici di f.m.m e di I, V partendo con M_e orizzontale.

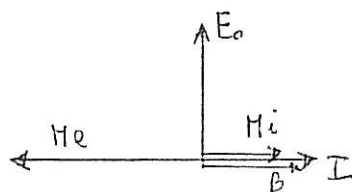


Per $\varphi = 0$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad \text{con} \quad \vec{H} = \frac{m_i}{l}$$

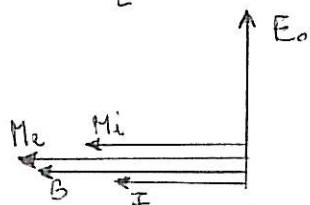
lunghezza del

2) Sovrapposizione dei grafici per $\gamma = \frac{\pi}{2}$



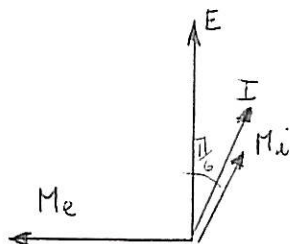
Si traccia per prima sempre la forza magnetomotrice di eccitazione.

3) Per $\gamma = -\frac{\pi}{2}$



Vediamo un caso particolare in cui γ non coincide con uno degli angoli classici

$$\gamma = +\frac{\pi}{6}$$



NOTA BENE:

M_e è sempre sfasata di $\frac{\pi}{2}$ rispetto E_0
vedi pag 91

M_i è sempre parallela a I

CONSIDERIAMO ORA UN GENERATORE SINCRONO CON LA SUA REATANZA SINCRONA

X_s ha due componenti

$$X_s = X_d + X_i$$

$\uparrow$ Reattanza di dispersione
 $\uparrow$ Reattanza proporzionale alla f.m.m. di indotto.
(Proporzionale ai flussi dispersi)

$$X_i = 2\pi f \cdot L_d$$

$\uparrow$ induttanza del circuito

si ricorde dal corso di elettrotecnica che l'induttanza $L = \frac{\Phi}{I}$

$$X_i = 2\pi f \frac{\Phi}{I} \leftarrow \text{flusso concatenato dalla forza magnetomotrice nell'indotto.}$$

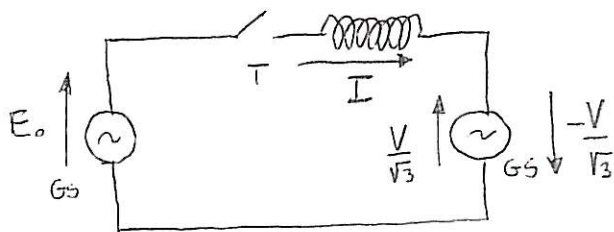
$\leftarrow$ corrente nell'indotto.

$$\text{dove } \frac{\Phi}{I} = \frac{Bs}{I} = \frac{\mu H s}{I}$$

Passiamo allo studio di due generatori in parallelo.
si devono verificare:

- 1) Uguaglianza di fase
- 2) identità di valore efficace
- 3) identità della frequenza

GENERATORI IN PARALLELO



Posso chiudere T quando le due macchine sono in fase, ovviamente il più isofrequenziale possibile come viene evidenziato dalla bassa frequenza di battimento delle lampade di sincronismo e quando le tensioni hanno lo stesso modulo per ogni fase.

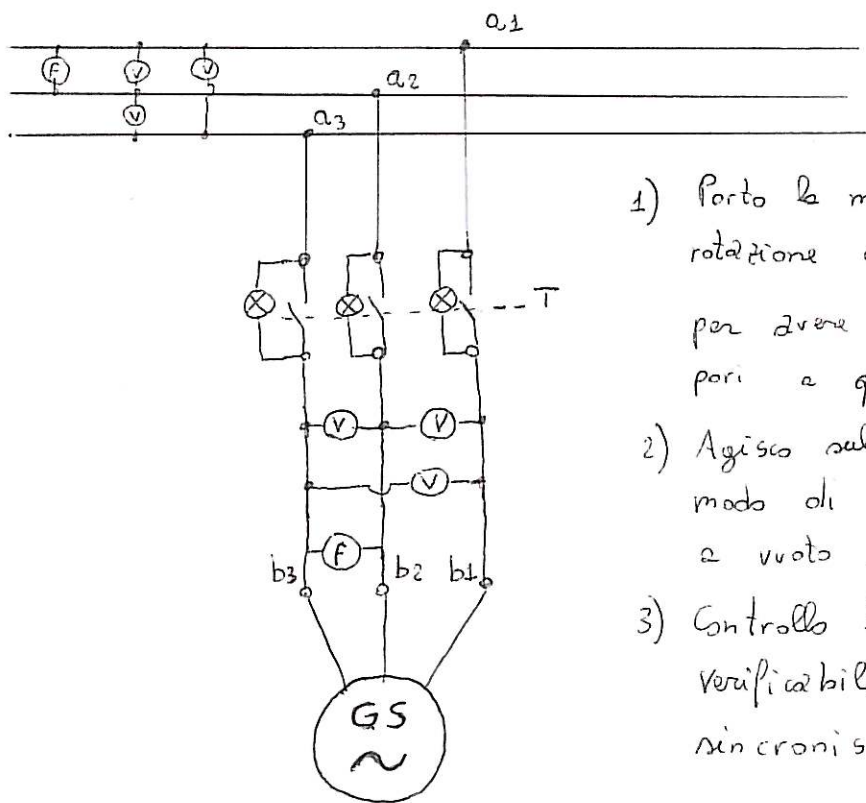
circuito monofase equivalente al parallelismo di due generatori

ipotesi: siano verificate le seguenti condizioni:

- 1) identità di frequenza
- 2) identità di valori efficaci
- 3) concordanza di fase.

quando quando i due generatori sono in fase, ovvero $E_0 - \frac{V}{\sqrt{3}} = 0$ ovvero quando la tensione è uguale questo significa che la corrente è nulla.

collegare lampade di sincronismo e voltmetri come da schema



- 1) Porto la macchina (sganciata) in rotazione alla velocità $n = \frac{60f}{P}$ per avere una frequenza f pari a quella della rete.
- 2) Agisco sul circuito di eccitazione in modo di avere in uscita una fem a vuoto uguale a quella di rete
- 3) Controllo la concordanza della fase verificabile con le lampade di sincronismo.

LAMPADE DI SINCRONISMO

Quando rimangono permanentemente spente la macchina è in sincronismo e l'interruttore T può essere chiuso.

Finché T è aperto non esiste la perfetta uguaglianza di fase ma solo la possibilità di minimizzare la differenza. I battimenti sono dei lampeggi delle lampade di sincronismo. Possiamo pensare di chiudere l'interruttore T quando i battimenti hanno un periodo massimizzato e in un momento in cui le lampade sono spente. Una eventuale disomogeneità viene compensata dall'iterazione del campo di induttore con quello di indotto.

RIPARTIZIONE DELLA POTENZA ATTIVA E REATTIVA

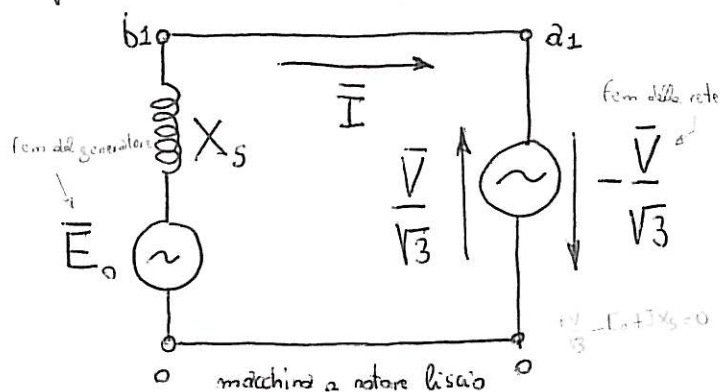
FUNZIONAMENTO DA MOTORE E DA GENERATORE DELLE MACCHINE SINCRONE.

Dopo che la macchina è stata inserita in parallelo alla rete valgono le ipotesi di:

- Rete di potenza infinita e quindi con tensione di ampiezza e frequenza costanti.
- Macchina non saturata.
- macchina di resistenza di indotto nulla.

MACCHINA A ROTORE LISCIO

Allo schema usato per inserire le macchine in parallelo corrisponde per una fase il circuito equivalente sottostante.



Il generatore $-\frac{\bar{V}}{\sqrt{3}}$ rappresenta

la rete di impedenza nulla.

Con il verso fissato $\vec{I}$ la potenza attiva è positiva se erogata dalla macchina e quella reattiva è positiva se erogata con in più il vincolo di essere induttiva.

Alla chiusura dell'interruttore il vettore che rappresenta la macchina $\bar{E}_0$ e il vettore $-\frac{\bar{V}}{\sqrt{3}}$ che rappresenta la rete sono uguali ed opposti facendo il bilancio $\frac{\bar{V}}{\sqrt{3}}$

$$\bar{E}_0 - \frac{\bar{V}}{\sqrt{3}} = jX_s I = 0$$

La corrente di indotto I in questo caso è nulla e la macchina non scambia con la rete né potenza attiva che potenza reattiva.

CASO BASE

rete vista come un utilizzatore

La rete vede la macchina come un carico resistivo la rete non scambia né potenza attiva né potenza reattiva.

$$\bar{E}_0 - \frac{\bar{V}}{\sqrt{3}} = 0$$

$$\text{da cui } \bar{E}_0 = \frac{\bar{V}}{\sqrt{3}}$$

NB. QUESTO TIPO DI ECCITAZIONE VIENE PRESO COME RIFERIMENTO PER I CASI SUCCESSIVI.

Nell'ipotesi che tutte le perdite siano nulle ($C = \frac{P_e}{\Omega} = \frac{P_m}{\Omega}$) si considerano

i seguenti casi

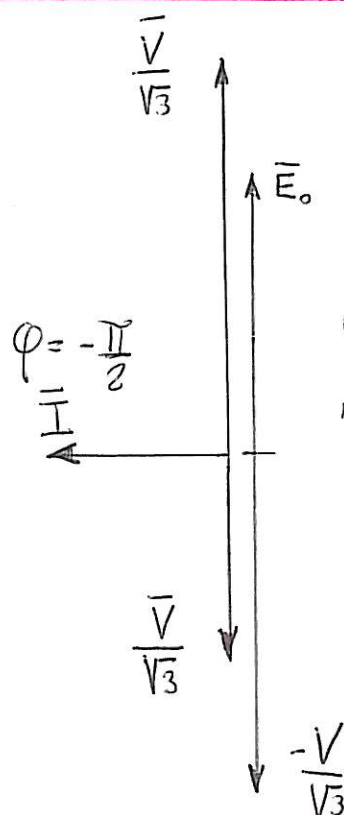
1° caso) con eccitazione ridotta rispetto al caso del diagramma precedente (macchina sottoeccitata) e senza variere le altre condizioni, diminuisce l'ampiezza della f.e.m. $\bar{E}_0$ rispetto a quella di $\frac{\bar{V}}{\sqrt{3}}$ mentre rimane inalterato lo spostamento tra i due vettori.

Il circuito di indotto è sottoposto alla tensione $\frac{\bar{V}'}{\sqrt{3}} = \bar{E}_0 - \frac{\bar{V}}{\sqrt{3}}$ questa tensione dà luogo alla corrente $\bar{I}$ tale che:

$$\frac{\bar{V}'}{\sqrt{3}} = jX_s \bar{I}$$

Questa corrente è in quadratura in anticipo rispetto a $\frac{\bar{V}}{\sqrt{3}}$ ($\varphi = -\frac{\pi}{2}$) di fatti questo si indica l'angolo φ si prende sempre come riferimento la tensione.

La macchina mette in gioco potenza reattiva $Q < 0$ e quindi eroga potenza capacitiva. La macchina è vista dalla rete come un carico induttivo



MACH. SOTTOECCITATA

MACH. Viene vista dalla rete come una induttanza

MACH. ERoga Potenza capacitiva

Potenza erogata reattiva $Q < 0$

2° caso) con eccitazione aumentata rispetto al caso base.

MACCHINA SOPRAECCITATA senza cambiare le altre condizioni, cresce l'ampiezza di $\bar{E}_0$ mentre rimane inalterato lo sfasamento tra $\bar{E}_0$ e $\frac{\bar{V}}{\sqrt{3}}$.

Il circuito di indotto della macchina è sottoposto alla tensione.

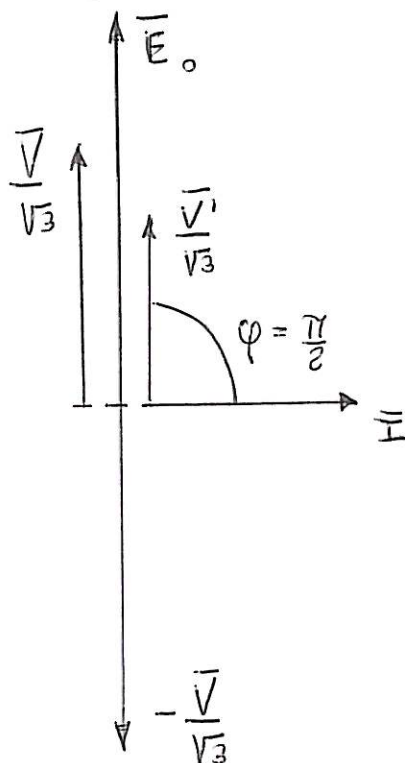
$$\frac{\bar{V}'}{\sqrt{3}} = \bar{E}_0 - \frac{\bar{V}}{\sqrt{3}} \quad \text{che dà luogo a una corrente } \bar{I}$$

$$\frac{\bar{V}'}{\sqrt{3}} = j X_s \bar{I}$$

La corrente $\bar{I}$ è in quadratura in ritardo rispetto a $\frac{\bar{V}}{\sqrt{3}}$ e a $\frac{\bar{V}'}{\sqrt{3}}$ $\varphi = \frac{\pi}{2}$ la macchina mette in gioco una potenza reattiva $Q > 0$

e quindi eroga alla rete potenza induttiva. e in anticipo di $\frac{\pi}{2}$ rispetto a $-\frac{\bar{V}}{\sqrt{3}}$ (la macchina è vista dalla rete come un carico capacitivo). Nessuna potenza attiva P_e è scambiata con la rete.

In tal caso la macchina può essere impiegata come se fosse un CONDENSATORE ROTANTE al fine di rifasare gli impianti a basso fattore di potenza o di regolare la tensione delle grandi reti.



MACCH. SOPRAECCITATA

La macchina viene vista dalla rete come un carico capacitivo

La macchina fornisce alla rete un carico induttivo.

DIAGRAMMA VETTORIALE RELATIVO AL FUNZIONAM.
IN PARALLELO PER MACCHINA
SOPRAECCITATA.

con macchina sopraeccitata e aggiunta di coppia motrice C_m applicata all'albero.

3° caso) Lo sfasamento in queste condizioni tra $\bar{E}_0$ e $\frac{\bar{V}}{\sqrt{3}}$ cambia rispetto ai casi precedenti, con $\bar{E}_0$ in anticipo di un angolo δ .

Assumendo per convenzione che con $\bar{E}_0$ in anticipo rispetto a $\frac{\bar{V}}{\sqrt{3}}$ l'angolo di coppia sia positivo risulta $\delta > 0$

La tensione $\frac{\bar{V}'}{\sqrt{3}}$ è quella a cui è soggetto l'indotto e la corrente $\bar{I}$ è quella che lo percorre.

Nel caso in cui $E_0 \cos \delta > \frac{V}{\sqrt{3}}$ ($OB > OC$) la corrente $\bar{I}$ è in ritardo rispetto a $\frac{\bar{V}}{\sqrt{3}}$ ($\varphi > 0$) ed ha una componente $\bar{I}'$ in fase con la componente $\bar{I}''$ in quadratura in ritardo rispetto a $\frac{\bar{V}}{\sqrt{3}}$. La macchina mette in gioco una potenza attiva diversa

da zero di valore $P_e = \sqrt{3} V I' = \sqrt{3} V I \cos \varphi > 0$

Quindi eroga una potenza elettrica alla rete pari alla potenza meccanica assorbita all'albero e funziona pertanto come generatore sviluppando una coppia frenante C che controbilancia la coppia motrice applicata.

La macchina mette in gioco pure la potenza reattiva

$$Q = \sqrt{3} V I'' = \sqrt{3} V I \sin \varphi > 0$$

e quindi eroga potenza induttiva ovvero vista dalla rete la macchina assorbe potenza capacitiva. ($\bar{I}''$ in quadratura in anticipo rispetto a $-\frac{V}{\sqrt{3}}$)

Triangoli simili

- Proporzionale a P_e
proporzionale a $(I \cos \varphi)$
- Proporzionale a Q
proporzionale a $(I \sin \varphi)$
- Corrente di indotto $\bar{I}$
(statorica)

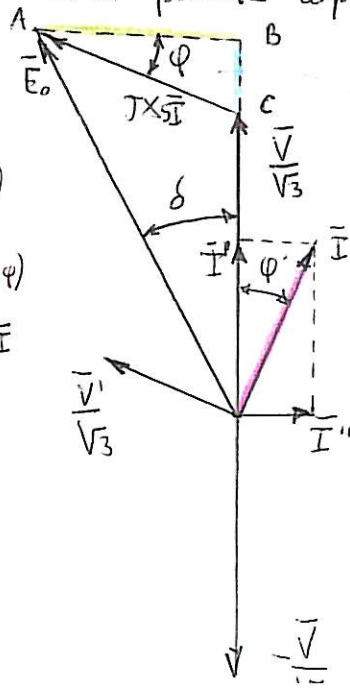
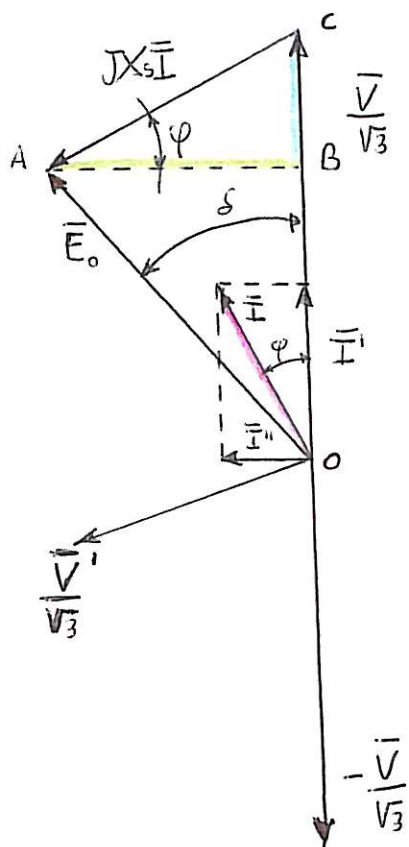


Diagramma vettoriale relativo al funzionamento in parallelo per macchina sopraeccitata ovvero $\bar{E}_0 > \frac{V}{\sqrt{3}}$ e con $\bar{E}_0$ in anticipo rispetto a $\frac{\bar{V}}{\sqrt{3}}$ ($\delta > 0$)

nel caso in cui $E_0 \cos \delta < \frac{V}{\sqrt{3}}$ ($OB < OC$) la corrente I risulta in anticipo rispetto a $\frac{V}{\sqrt{3}}$ ($\varphi < 0$) la macchina funziona ancora da generatore ma mette in gioco una potenza reattiva $Q < 0$ ossia eroga potenza capacitiva. Le proiezioni di I , $I \cos \varphi$ e $I \sin \varphi$ sono proporzionali alle potenze attiva P_e e reattiva Q messa in gioco dalla macchina.

4° caso) con macchina sottoeccitata $E_0 < \frac{V}{\sqrt{3}}$ e con coppia motrice C_m applicata all'albero la f.e.m. E_0 è ancora in anticipo rispetto a $\frac{V}{\sqrt{3}}$ ($\delta > 0$)



corrente di indotto (statorio)
 $\vec{I}$

E_0 è in anticipo rispetto a $\frac{V}{\sqrt{3}}$ ($\delta > 0$)

Proporzionale a P_e

Proporzionale a Q

La corrente di indotto $\vec{I}$ è in anticipo rispetto a $\frac{V}{\sqrt{3}}$ ($\varphi < 0$)

La macchina mette in gioco una potenza attiva diversa da zero di valore.

$$P_e = \sqrt{3} V I' = \sqrt{3} V I \cos \varphi > 0$$

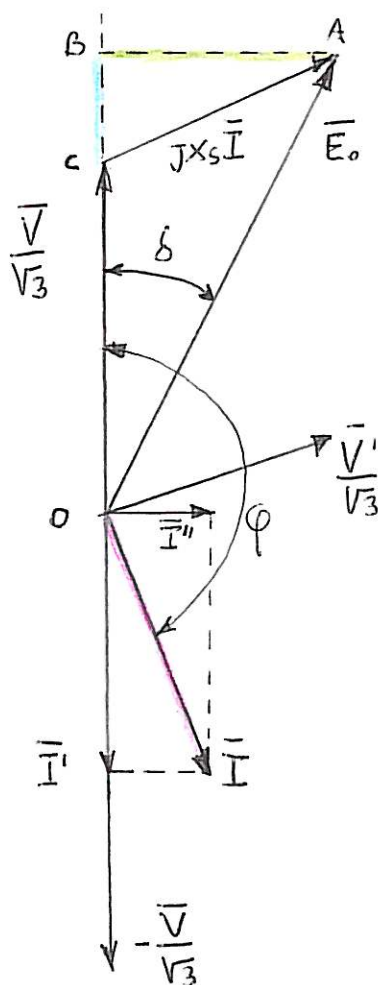
quindi eroga una potenza elettrica alla rete e funziona ancora come generatore.

Diagramma vettoriale relativo al funzionamento in parallelo per macchina sottoeccitata e con $\vec{E}_0$ in anticipo rispetto a $\frac{V}{\sqrt{3}}$ ($\delta > 0$)
La macchina mette in gioco pure una potenza reattiva

$$Q = -\sqrt{3} V I'' = \sqrt{3} V I \sin \varphi < 0$$

LA POTENZA EROGATA È DI TIPO CAPACITIVO. OVVERO VISTA DALLA RETE LA MACCHINA ASSORBE POTENZA INDUTTIVA

5° caso) Con macchina sopereccitata $E_0 > \frac{V}{\sqrt{3}}$ e con coppia frenante C_m applicata all'albero. la fem E_0 è in ritardo di δ rispetto rispetto a $\frac{\bar{V}}{\sqrt{3}}$ ($\delta < 0$)



 Potenza attiva P_e (segmento AB proporzionale)

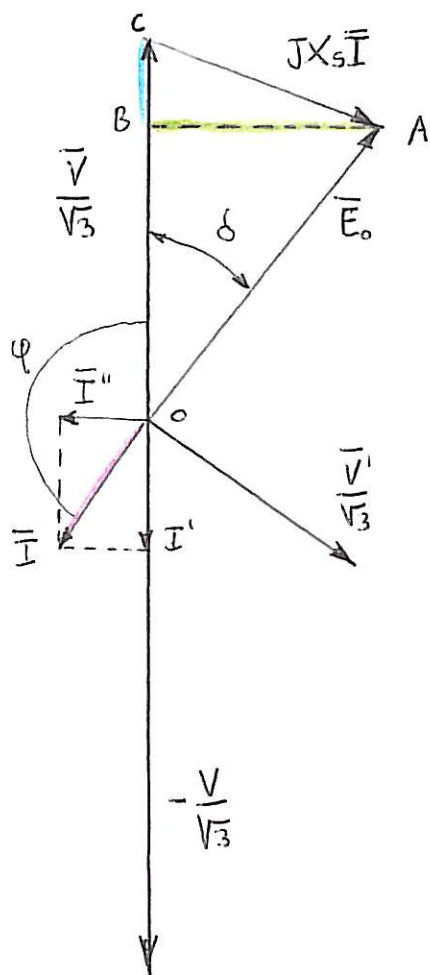
 Potenza reattiva Q (segmento BC proporzionale)

 Corrente storica di indotto I

La macchina in questo caso eroga la potenza attiva $P_e = -\sqrt{3} VI = \sqrt{3} VI \cos \varphi < 0$ e quindi assorbe dalla rete potenza elettrica pari alla potenza meccanica erogata all'albero e funziona pertanto da motore, sviluppando una coppia motrice C che controbilancia la coppia frenante applicata.

La macchina mette in gioco anche la potenza reattiva $Q = \sqrt{3} VI'' = \sqrt{3} VI \sin \varphi > 0$ e quindi eroga una potenza induttiva ovvero vista dalla rete assorbe potenza capacitiva (I'' in quadratura in anticipo rispetto a $-\frac{V}{\sqrt{3}}$)

6° caso) con macchina sotto eccitata $E_0 < \frac{V}{\sqrt{3}}$ e con coppia frenante C_m applicata all'albero la f.e.m. E_0 è ancora in ritardo rispetto a $\frac{\bar{V}}{\sqrt{3}}$ $\delta < 0$ e il diagramma vettoriale diventa quello sottostante



 Potenza attiva P_e (proporzionale a AB)

 Potenza reattiva Q (proporzionale BC)

 corrente statica di indotto

LA MACCHINA IN QUESTE CONDIZIONI FUNZIONA
DA MOTORE.

Ergo potenza capacitiva, ossia vista dalla rete la macchina assorbe potenza induttiva $\bar{I}''$ in quadratura in ritardo rispetto a $-\frac{\bar{V}}{\sqrt{3}}$

Questo diagramma è relativo al funzionamento in parallelo per macchina sottoeccitata e con $\bar{E}_0$ in ritardo rispetto a $\frac{\bar{V}}{\sqrt{3}}$ ($\delta < 0$)

$$P_e = -\sqrt{3} V I' = \sqrt{3} V I \cos \varphi < 0$$

$$Q = -\sqrt{3} V I'' = \sqrt{3} V I \sin \varphi < 0$$

MACCHINA A POLI SPORGENTI

Si consideri una macchina sincrona non saturata con rotore a poli sporgenti con riferimento a una macchina sovraccaricata funzionante da generatore con resistenza di indotto e perdite supposte nulle

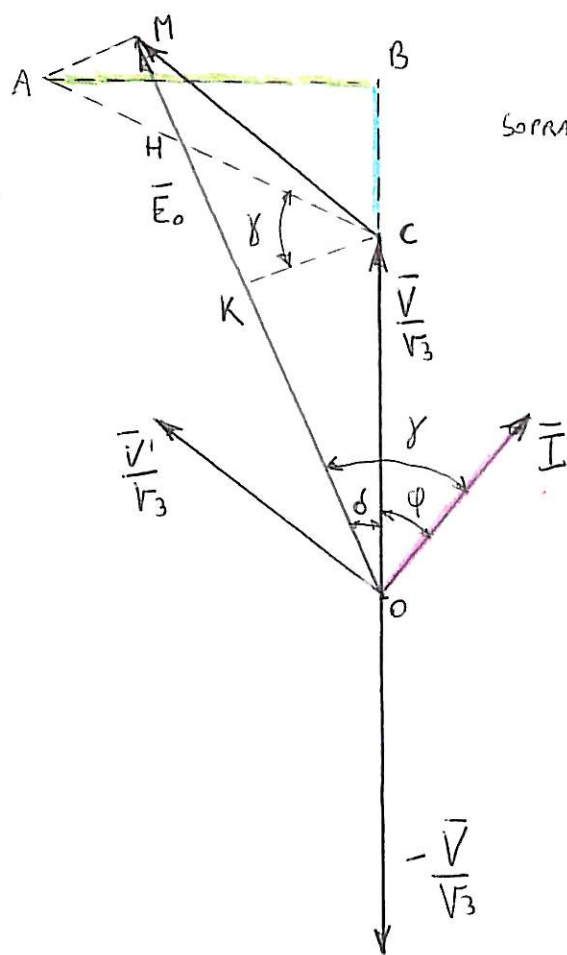
Si traccia prima $OC = \frac{\bar{V}}{\sqrt{3}}$ poi $\overline{OM} = E_0$ e $\overline{CM} = \frac{V'}{\sqrt{3}} = E_0 - \frac{\bar{V}}{\sqrt{3}}$

si conduce poi la normale CK a $\overline{OM}$ e si individua su $\overline{OM}$ il

punto H tale che $\frac{HK}{KM} = \frac{X_q}{X_d}$. tracciata la semiretta da C

passante per H ed essendo $CH = X_q I$ si ricadrà $I = \frac{CH}{X_q}$ e $\gamma = \widehat{HCK}$

sulla semiretta CH resta inoltre individuato il segmento $CA = X_d I$



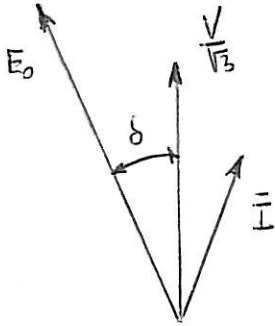
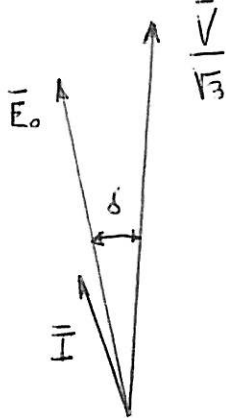
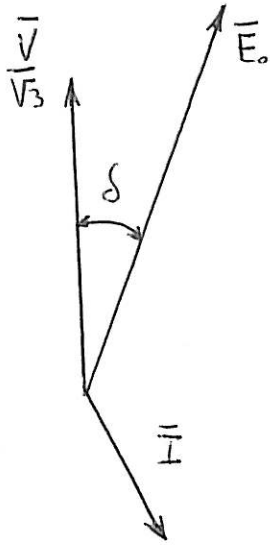
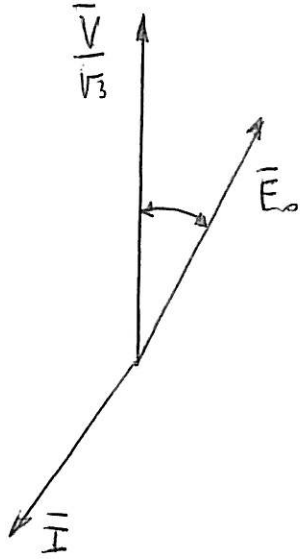
SOVRACCITATA $E_0 > \frac{V}{\sqrt{3}}$

P_e potenza attiva

Q potenza reattiva

I corrente di indotto

Diagramma vettoriale relativo al funzionamento in parallelo di un generatore a poli sporgenti sovraccaricato.

	macchina sovraccaricata Erogazione potenza induttiva Assorbimento potenza capacitiva $Q > 0$	macchina sottocaricata Erogazione potenza capacitiva Assorbimento potenza induttiva $Q < 0$
<u>GENERATORE</u> $\vec{E}_0$ in anticipo su $\frac{\vec{V}}{\sqrt{3}}$ Erogazione potenza attiva Assorbimento potenza meccanica $P_e > 0$		
<u>MOTORE</u> $\vec{E}_0$ in ritardo su $\frac{\vec{V}}{\sqrt{3}}$ Erogazione potenza meccanica Assorbimento potenza Attiva $P_e < 0$		

Schema riassuntivo dei diagrammi vettoriali relativi al funzionamento in parallelo di una macchina sincrona.

VARIAZIONE DELLA COPPIA ESTERNA E DELLA CORRENTE DI ECCITAZIONE

Le condizioni di funzionamento a regime di una macchina sincrona in parallelo sono funzione della coppia esterna C_m applicata all'albero e della corrente di eccitazione (e quindi della fem a vuoto) E_0 .

FACCIAMO L'IPOTESI DI PERDITE NULLE

EFFETTO DELLA VARIAZIONE DELLA COPPIA ESTERNA.

GENERATORE

Consideriamo una condizione di funzionamento a regime con perdite nulle. In corrispondenza alla coppia motrice applicata all'albero il generatore eroga alla rete potenza attiva e sviluppa una coppia frenante C che controbilancia la coppia motrice C_m mantenendo la macchina in rotazione a velocità di sincronismo.

Se a partire da tale condizione di funzionamento si aumenta o si riduce di altre condizioni la coppia motrice applicata all'albero, il generatore tende ad accelerare: l'angolo di coppia δ diventa più grande e la potenza elettrica erogata e quindi la coppia frenante prodotta aumentano. Se viene così a determinare una nuova condizione di regime nella quale le coppie motrice e frenante si fanno equilibrio e il generatore ruota alla velocità di sincronismo con un angolo di coppia maggiore.

Con riferimento a una macchina a rotore liscio non saturata si può scrivere
($E_0 \cos \delta > \frac{V}{\sqrt{3}}$)

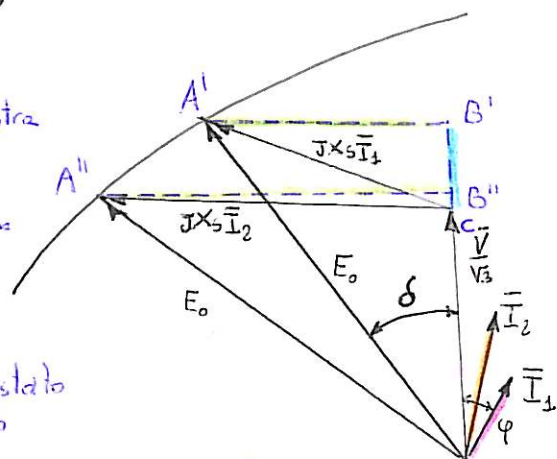
La fem E_0 è indipendente dalla coppia esterna, quindi rimane costante e viene iscritta in una circonferenza. Se cresce la coppia esterna la fem E_0 si sposta verso sinistra. $\frac{V}{\sqrt{3}}$ rimane costante e fermo nella posizione iniziale.

Aumenta $X_s I$ e conseguentemente aumenta I .

δ è detto ANGOLO DI CARICO

Aumentando il carico meccanico il numero di giri rimane costante però aumentano le perdite e diminuisce la potenza reattiva erogata.

SE AUMENTA IL CARICO: Aumenta l'attiva e diminuisce la reattiva. La potenza APPARENTE rimane costante.



■ Potenza attiva P_e
Aumenta verso sinistra

■ Potenza reattiva Q
diminuisce verso sinistra

■ corrente I_1
iniziale di indotto

■ corrente I_2 nello stato
finale di indotto

VARIAZIONE DELLA COPPIA E DELLA CORRENTE DI ECCITAZIONE

MOTORE

Si consideri una condizione di regime del motore con una coppia frenante C_m applicata all'albero. Il motore assorbe una potenza elettrica P_e e sviluppa una coppia motrice C_m controbilanciando la coppia frenante C_m mantenendo la macchina e il carico a velocità di sincronismo.

Se aumentiamo una coppia frenante C_m il motore tende a decelerare: l'angolo di coppia δ diventa più grande in valore assoluto e la potenza assorbita e quindi la coppia motrice prodotta aumentano.

Aumenta l'angolo di coppia δ e si riporta l'equilibrio alla velocità di sincronia. Con riferimento a una macchina a polo liscio (quindi isotropa)

$E_0 \cos \delta > \frac{\bar{V}}{\sqrt{3}}$. Poiché la fem E_0 dipende solo dalla corrente di eccitazione e dalla velocità essa rimane costante e si mantiene all'interno di una circonferenza.

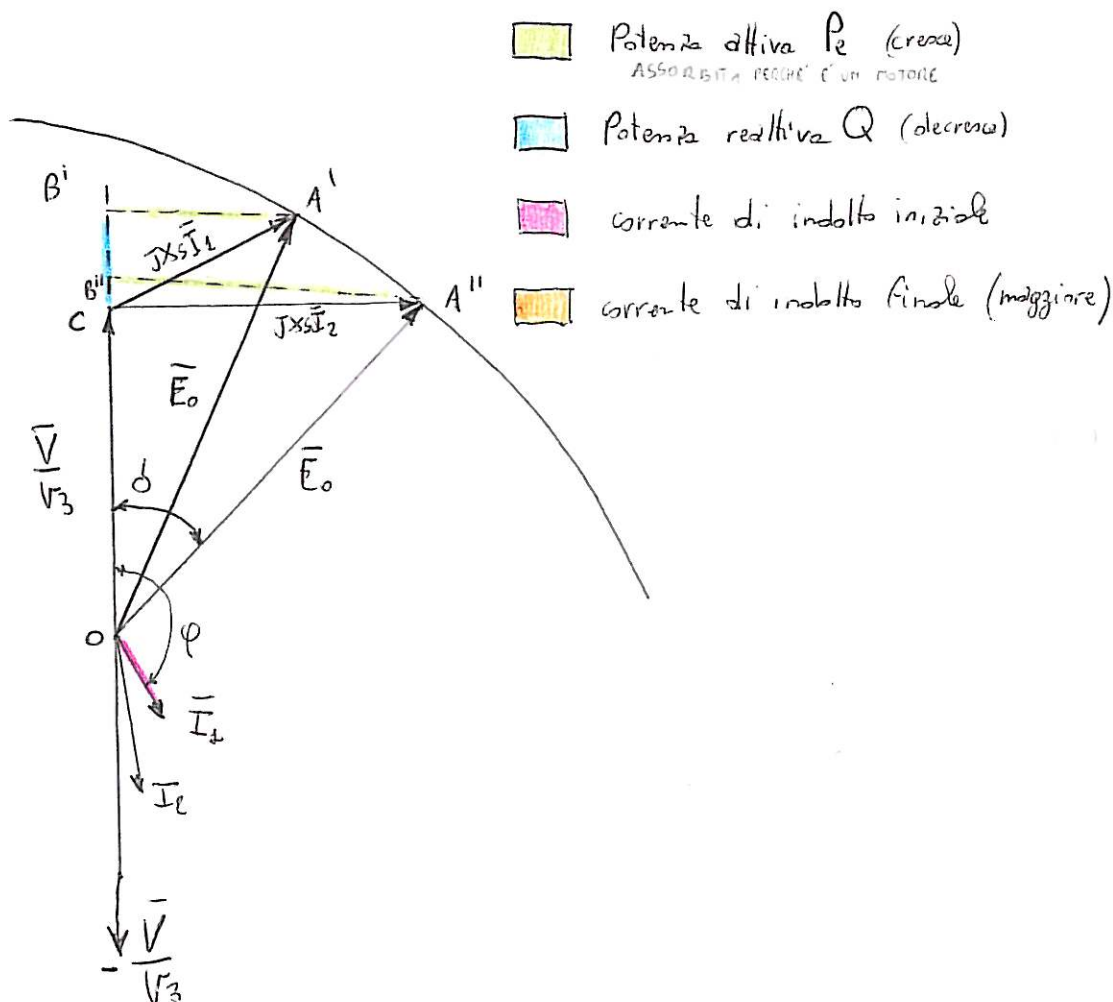


Diagramma vettoriale relativo a un motore sincrono sovraccaricato al variare del carico meccanico.

VARIAZIONE DELLA CORRENTE DI ECCITAZIONE (EFFETTI)

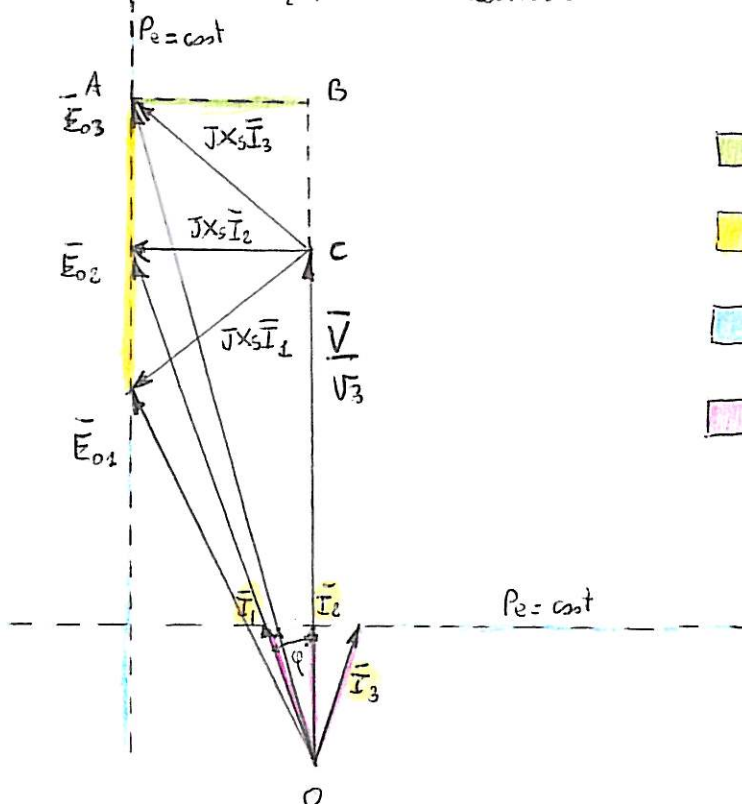
GENERATORE

Generatore: Partendo dalla condizione di funzionamento a regime di un generatore sincrono si supponga di aumentare, a parità di altre condizioni, la corrente di eccitazione. Aumenta E_0 ma non varia la potenza attiva P_e erogata dal generatore, poiché la coppia motrice applicata all'albero non ha subito variazioni. Pertanto, all'aumentare della corrente di eccitazione, E_0 può variare solo in modo che l'estremità di $\vec{E}_0$ resti su una linea retta di Potenza attiva costante. Segmento AB costante

MACCHINA NON SATURA A ROTORE LISCIO inizialmente sottocaricata $E_0 = E_{01} < \frac{V}{\sqrt{3}}$

All'aumentare di $\vec{E}_0$ la corrente di statore $\vec{I}$ varia e la sua ampiezza diminuisce per poi aumentare. Per bassi valori di $\vec{E}_0$ la corrente $\vec{I}$ è in anticipo rispetto a $\frac{V}{\sqrt{3}}$ ($\vec{I} = \vec{I}_1$) ed il generatore eroga, oltre alla potenza attiva, potenza reattiva capacitiva. Man mano che E_0 aumenta, la corrente $\vec{I}$ varia fino ad allinearsi a $\frac{V}{\sqrt{3}}$ ($\vec{I} = \vec{I}_2$), condizione in cui il generatore eroga solo potenza attiva.

Se la corrente di eccitazione continua ad aumentare la corrente di statore va in ritardo su $\frac{V}{\sqrt{3}}$ ($\vec{I} = \vec{I}_3$) ed il generatore eroga, oltre alla potenza attiva, potenza reattiva induttiva.



■ Potenza attiva P_e (è costante)

■ Potenza reattiva Q (Varia)

■ Linee della costante della potenza attiva P_e

■ Correnti di indotto $\vec{I}_m$

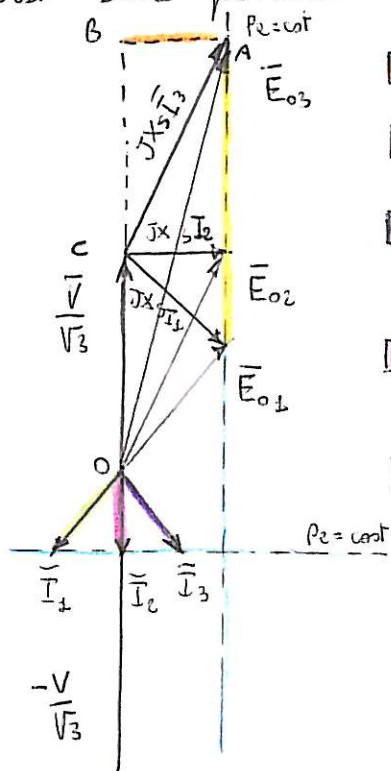
EFFETTO DELLA VARIAZIONE DELLA CORRENTE DI ECCITAZIONE

MOTORE

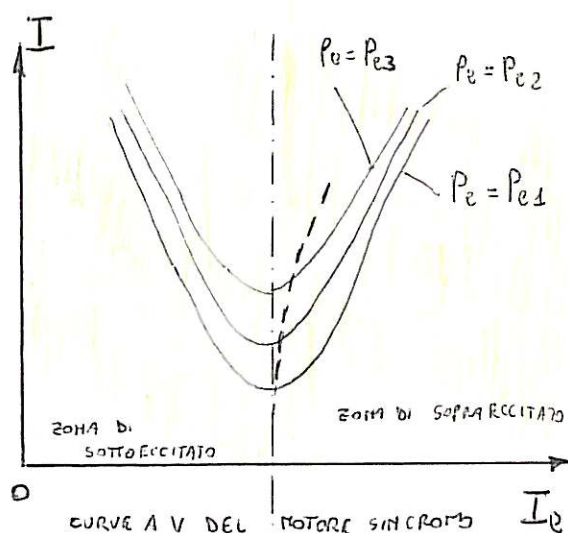
Partendo dalla condizione di funzionamento a regime di un motore sincro, si supponga di aumentare, e per altre condizioni, la corrente di eccitazione: aumenta E_o ma non varia la potenza attiva assorbita dal motore, poiché la coppia frenante applicata all'albero non ha subito variazioni. Pertanto all'aumentare della corrente di eccitazione, E_o può variare solo in modo che l'estremità del vettore E_o resti lungo una retta a potenza costante come indicato in figura (segmento AB costante) che fa riferimento ad una macchina non saturata a motore liscio inizialmente sottoeccitato.

$E_o = E_{o1} < \frac{V}{\sqrt{3}}$ Si noti che all'aumentare di E_o la corrente $\bar{I}$ è in ritardo rispetto alla tensione di rete $-\frac{V}{\sqrt{3}}$ ($\bar{I} = \bar{I}_1$) e il motore si comporta come un carico di tipo **ohmico-induttivo** assorbendo potenza induttiva man mano che E_o aumenta la corrente di indotto $\bar{I}$ varia fino ad allinearsi a $-\frac{V}{\sqrt{3}}$ ($\bar{I} = \bar{I}_2$) condizione in cui il motore si comporta come un carico resistivo. Se la corrente di eccitazione continua ad aumentare la corrente di statore va in anticipo su $-\frac{V}{\sqrt{3}}$ ($\bar{I} = \bar{I}_3$) il motore diventa un carico **ohmico-capacitivo** assorbendo potenza capacitiva dalla rete.

L'andamento della corrente di indotto $\bar{I}$ in funzione della corrente di eccitazione I_e è nella figura delle curve a V del motore sincro (con riferimento di valori diversi della potenza attiva).



- Potenza Attiva costante
- Potenza Reattiva
- corrente di indotto $\bar{I}$ che fa vedere il motore come un carico OHMICO-INDUTTIVO
- corrente di indotto che fa vedere il motore come un carico puramente resistivo
- corrente di indotto che fa vedere il motore come un carico OHMICO-CAPACITIVO



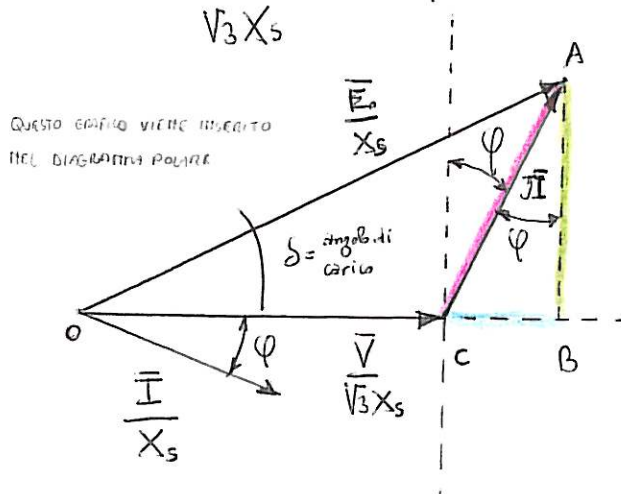
Per ciascuna curva la corrente minima di statore si ha per il fattore di potenza unitario quando viene fornita al motore solo potenza attiva. Per qualsiasi altro punto la potenza è reattiva.

DIAGRAMMA POLARE DELLA MACCHINA SINCRONA

Il diagramma polare della macchina sincrona consente lo studio di tutte le condizioni della macchina in parallelo sia come generatore sia come motore e compendia i diagrammi visti con precedenza.

DIAGRAMMA POLARE DELLA MACCHINA SINCRONA A ROTORE LISCIO

Con riferimento ad una macchina non satura, dividendo per X_s i vettori del diagramma del generatore sprotecitato (pg. 111) si ottiene il seguente diagramma, dove il vettore $\frac{\bar{V}}{\sqrt{3}X_s}$ è disposto sull'asse delle ascisse.



 corrente di indotto

 $P_e \equiv \sqrt{3}VI \cos \varphi$ Potenza attiva
 Proportionale non uguale
 in fatti il segmento AB non è una
 potenza ma solo $I \cos \varphi$

$$AB = I \cos \varphi$$

$$AB = \frac{E_0}{X_s} \sin \delta$$

Quindi possiamo anche scrivere

$$P_e = \frac{\sqrt{3}VE_0}{X_s} \sin \delta$$

Per quanto concerne la potenza reattiva Q rappresentata dal segmento BC si può calcolare con la trigonometria

 $Q = \sqrt{3}VI \sin \varphi$ Potenza reattiva

$$CB = OB - OC$$

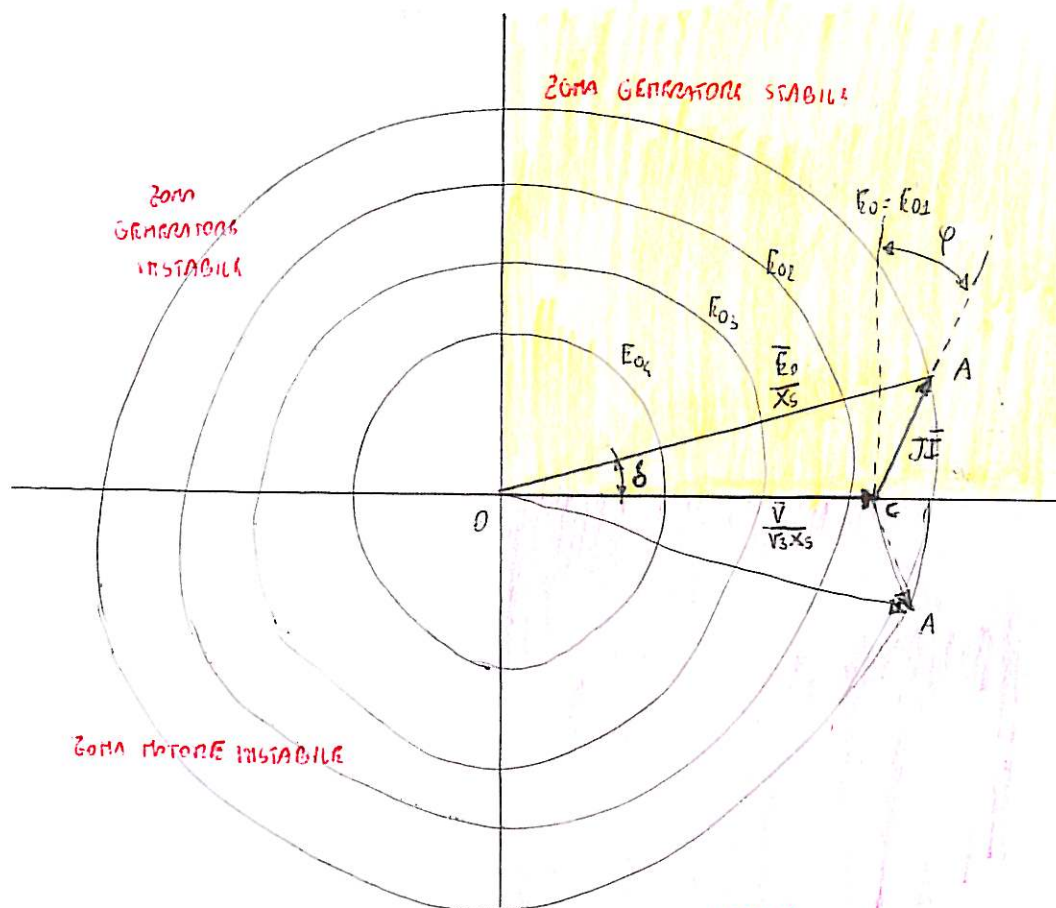
dove $OB = \frac{E_0}{X_s} \cos \delta$

quindi $Q = \frac{E_0}{X_s} \cos \delta - \frac{\bar{V}}{\sqrt{3}X_s}$

si può anche scrivere $Q = \frac{\sqrt{3}VE_0}{X_s} \cos \delta - \frac{V^2}{X_s}$

La coppia frenante C sviluppata dalla macchina è data da:

$$C = \frac{P_m}{\Omega} = \frac{P_e}{\Omega} = \frac{\sqrt{3}VI}{\Omega} \cos \varphi = \frac{1}{\Omega} \frac{\sqrt{3}VE_0}{X_s} \sin \delta = \frac{P}{\omega} \frac{\sqrt{3}VE_0}{X_s} \sin \delta$$



Potenza attiva erogata
 $\delta > 0$
 $P_e > 0$
 $C > 0$
 $\uparrow$ GENERATORE
 Semipiano SUPERIORE
 $\downarrow$ Semipiano inferiore
 MOTORE.
 $\delta < 0$
 $P_e < 0$
 Potenza attiva assorbita
 $C < 0$ coppia motrice

- 1) Con corrente di eccitazione costante al variare della coppia esterna applicata varia l'angolo δ ma rimane costante il valore di $\frac{E_0}{X_s}$ - ne viene che in queste condizioni si sposta il punto

A lungo una circonferenza di centro O e raggio $\frac{E_0}{X_s}$. Il semipiano superiore è erogatore una potenza

SEMIPIANO SUPERIORE = FUNZIONAMENTO DA GENERATORE

SEMIPIANO INFERIORE FUNZIONAMENTO DA MOTORE.

- 2) Al variare della corrente di eccitazione cambia il valore di $\frac{E_0}{X_s}$ si vengono ad avere circonferenze con un raggio minore. ciascuna in corrispondenza di un E_0 diverso dipendente da I_e

- 3) Il funzionamento della macchina è stabile solo nei quadranti di destra. infatti solo in essi una variazione dell'angolo di carico δ provoca una variazione di coppia prodotta dalla macchina che mantiene il motore alla velocità.

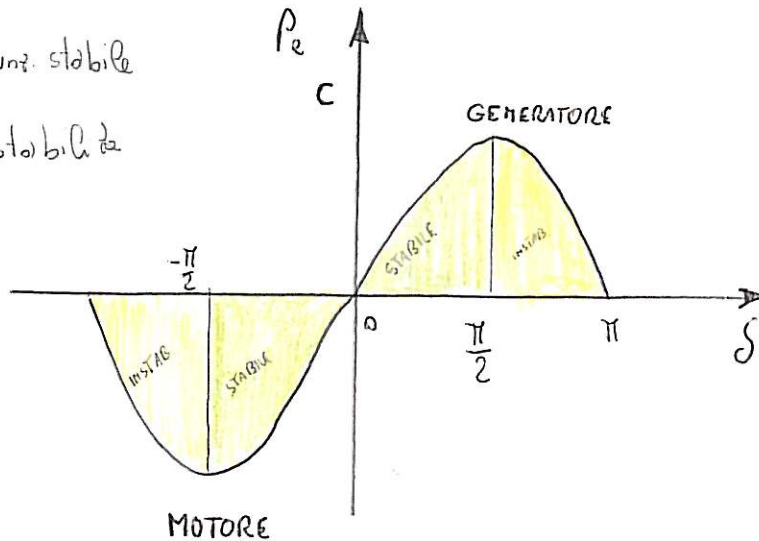
- 4) L'andamento in funzione dell'angolo δ e della potenza attiva P_e e della coppia messe in gioco dalla macchina e nel grafico successivo dove sono messe in evidenza un tralleggio anche le rispettive zone di stabilità nel funzionamento come motore.

- 5) Con riferimento al diagramma precedente i punti di funzionamento a potenza attiva nulla si trovano sulle ascisse a destra $E_0 > \frac{V}{\sqrt{3}}$ e a sinistra $E_0 < \frac{V}{\sqrt{3}}$ nel punto C essi individuano i punti in cui la macchina funziona come reattore capacitivo o induttivo

Andamento in funzione dell'angolo δ della potenza attiva e della coppia messa in gioco da una macchina sincrona non saturata a rotore liscio ($R=0$) per un dato valore della corrente di eccitazione.

 Zona di funz. stabile

 Zona di instabilità

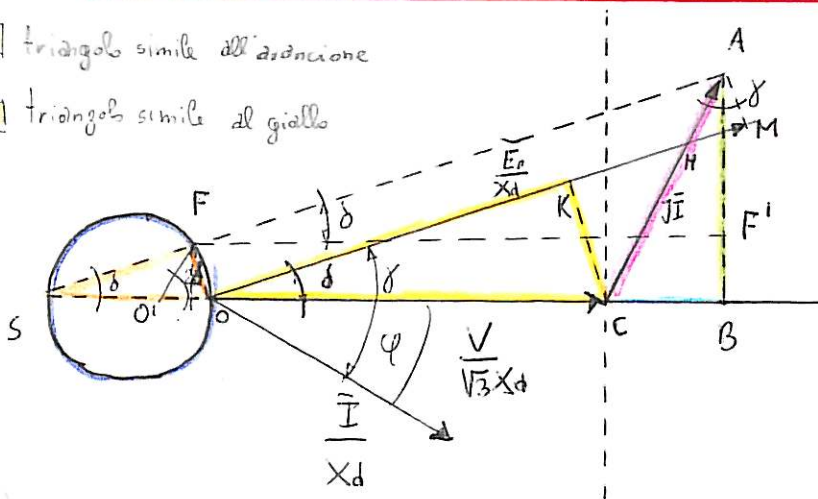


δ = angolo di carico ovvero angolo tra la tensione a vuoto E_0 e la tensione a carico $\frac{V}{\sqrt{3}}$

DIAGRAMMA POLARE DELLA MACCHINA SINCRONA A POLI SPORGENTI

 triangolo simile all'azionazione

 triangolo simile al giallo



con riferimento alla macchina non saturata dividendo tutto per X_d i vettori del diagramma relativi a macchina in parallelo di un generatore a poli sporgenti sovraccaricato si ottiene questo diagramma dove il vettore $\frac{V}{\sqrt{3}X_d}$ è posto sulle asse.

 Potenza attiva P_e

 Potenza reattiva

 Corrente di indotto

Costruzione geometrica per la determinazione delle potenze messe in gioco da una macchina sincrona a poli sporgenti non saturata ($R=0$)

La potenza attiva è pari a $\overline{SA} \sin \delta = \overline{AB} = \frac{E_0}{X_d} \sin \delta + AM$

con $AM = \frac{V}{\sqrt{3}} \frac{X_d - X_q}{2X_d X_q} \sin 2\delta$

$Q = \sqrt{3} V I \sin \varphi \propto CB$ Proportional

$$sc = OC + OS = \frac{V}{\sqrt{3}X_d} + \frac{X_d - X_q}{X_d X_q} \frac{V}{\sqrt{3}} = \frac{V}{\sqrt{3}X_q}$$

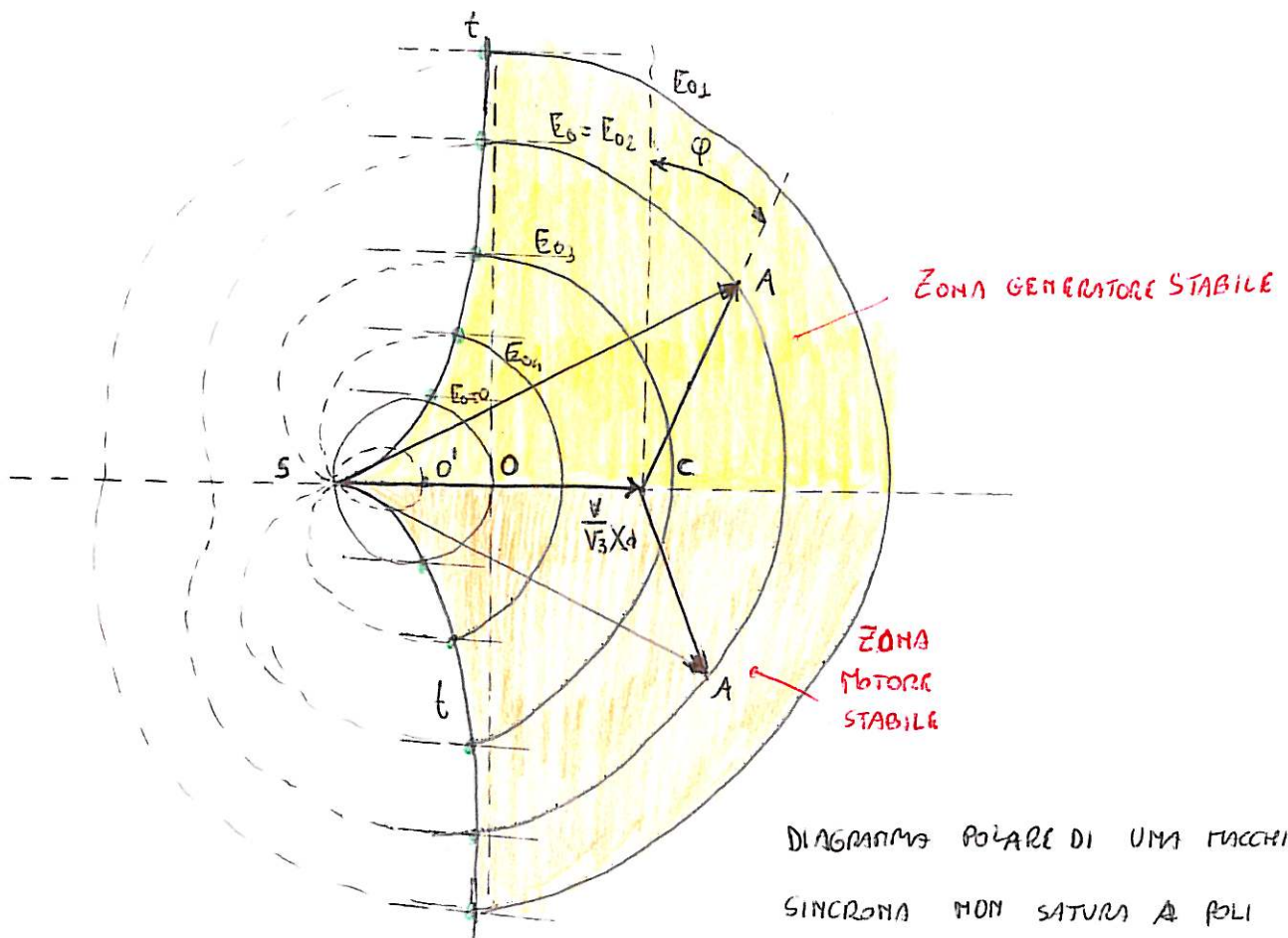


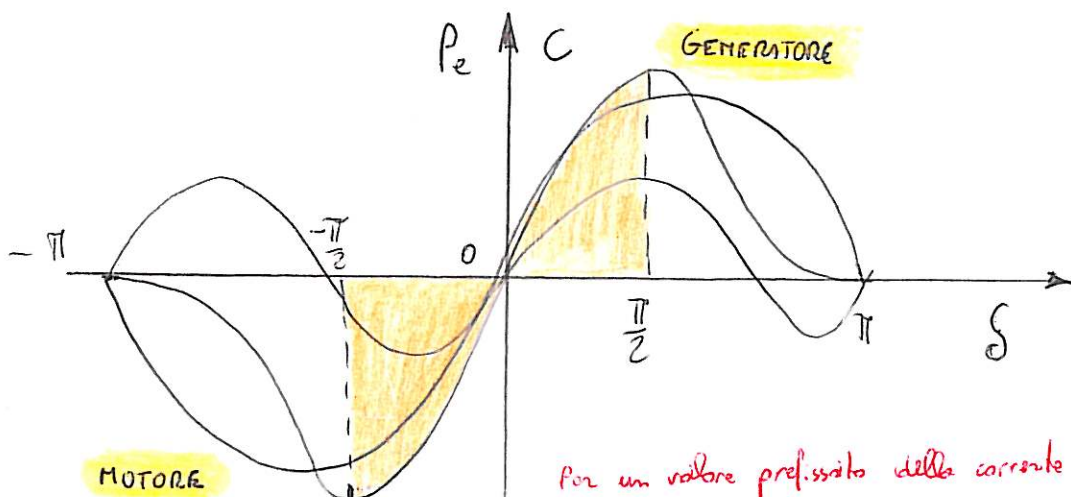
DIAGRAMMA POLARE DI UNA MACCHINA
SINCRONA NON SATURA A POLI
SPORGENTI ($R=0$) RELATIVO A
DIVERSI VALORI DELLA CORRENTE
DI ECCITAZIONE
(chiocciola di Pascal)

■ Punti di massima potenza P_e
si ottengono intersecando le curve
con le parallele alle asse

■ È lo stesso cerchio del grafico precedente
che corrisponde alla condizione $I_e = 0$
cioè corrente di eccitazione nulla

■ Zona STABILE funzionamento da generatore

■ Zona STABILE funzionamento da motore



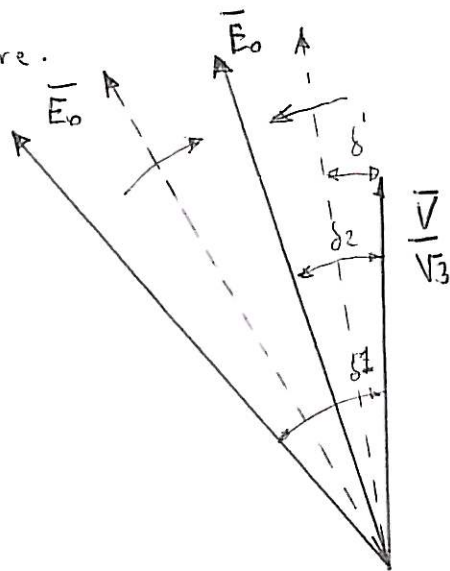
Per un valore prefissato della corrente di eccitazione

OSCILLAZIONI PENDOLARI

- * OSCILLAZIONI PROPRIE (LIBERE) QUANDO SI HA UNA BRUSCA VARIAZIONE DELLA COPPIA ESTERNA
- * OSCILLAZIONI FORZATE (QUANDO LA COPPIA ESTERNA ALL'ALBERO E' VARIABILE PERIODICAMENTE).

Importantissima è l'analisi del comportamento della macchina sincrona in presenza di una brusca variazione della coppia esterna motrice (se generatore) o frenante (se motore) applicata all'asse.

Se coppia applicata agisce direttamente sull'angolo di carico δ tra E_0 e $\frac{\bar{V}}{\sqrt{3}}$ a causa dell'inerzia delle masse rotanti la variazione dell'angolo di carico non è istantanea ma si assiste con una sequenza di oscillazioni di tipo pendolare.



Se E_0 è in anticipo rispetto a $\frac{V}{\sqrt{3}}$ la macchina sta funzionando da generatore

Condizione di regime iniziale $\delta = \delta_1$ e finale $\delta = \delta_2$ di un generatore sincrono in parallelo soggetto a una brusca diminuzione della coppia motrice applicata (in transito posizioni transitorie intermedie della fem E_0).

Le oscillazioni dovute alla brusca variazione della coppia esterna sono dette oscillazioni proprie o "libere".

Le oscillazioni "forzate" si verificano quando la coppia esterna è variabile periodicamente, come quando il generatore sincrono è mosso da un motore alternativo quale ad esempio un diesel.

Per attenuare le oscillazioni pendolari e provocarne il rapido smorzamento è conveniente aumentare i fenomeni dissipativi, si usano quindi i circuiti smorzatori costituiti dagli avvolgimenti a gabbia infilati nelle espansioni polari. Le correnti indotte nell'avvolgimento a gabbia nell'istante

REGOLAZIONE DELLA VELOCITÀ DEI MOTORI SINCRONI

La velocità di un motore sincrono è rigidamente collegata alla frequenza di rete a cui la macchina è collegata tramite la formula

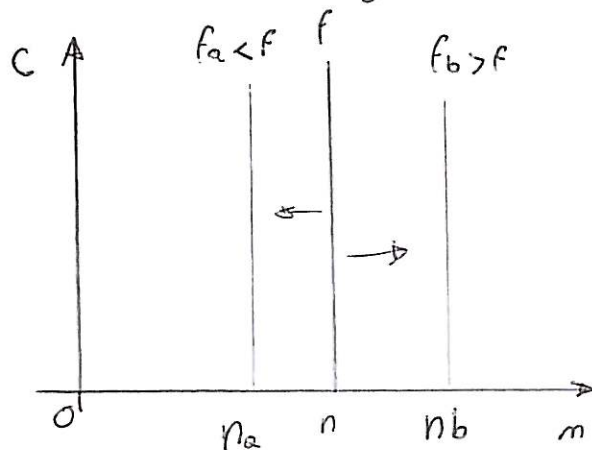
$$n = \frac{60f}{p}$$

velocità di rotazione del
motore sincrono

non si può agire su p (numero di poli) perché questi sono l'hardware della macchina, ovvero un parametro costruttivo.

Non si può ovviamente agire sul numero 60 perché è ovviamente una costante.

Quindi per regolare la velocità di un motore sincrono bisogna avere un convertitore statico che agisce sulla frequenza.



RENDIMENTO E SPECIFICAZIONE DELLA MACCHINA SINCRONA

RENDIMENTO

Le norme CEI identificano le seguenti perdite: (pag. 137)

- Perdite costanti P_0
- perdite di eccitazione P_{ecc}
- perdite sottocirco $P_{ep} = 3RI^2$ (nella trifase)
- perdite addizionali sottocirco P_{adc}

Le perdite addizionali sottocirco sono date da:

- 1) Perdite nel ferro investito dai flussi (esclusi i conduttori)
- 2) Perdite per correnti parassite nei conduttori e negli avvolgimenti di indotto.

$$P_{fp} - P_{fpo} \text{ e } P_{cp}$$

ne consegue che nel funzionamento da generatore vale:

$$\eta = \frac{P_{ergata}}{P_{assorbita}} = \frac{P_e}{P_m} = \frac{P_e}{P_e + P_p} = \frac{P_e}{P_e + P_0 + P_{ecc} + P_{ep} + P_{adc}}$$

con $P_e = VI \cos \varphi$ per le macchine monofase

e $P_e = \sqrt{3} VI \cos \varphi$ per le macchine trifase

