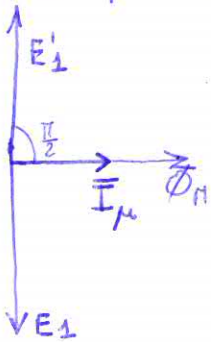


- 1 ✓ 01-feb-10 Trasformatore monofase: corrente magnetizzante e armoniche componenti, calcolo della reattanza a vuoto.
- 2 ✓ 10-gen-07 Diagramma polare di una macchina sincrona a rotore liscio in parallelo sulla rete.
- 3 ✓ 10-gen-07 Determinazione della caratteristica meccanica di una macchina asincrona nel funzionamento come motore, generatore e freno.
- 4 ✓ 18-lug-07 Funzionamento di una macchina asincrona trifase con circuiti rotorici in corto circuito e rotore in movimento. (Pag. 185)
- 5 ✓ 03-set-07 Motore asincrono a doppia gabbia: principio di funzionamento, circuito equivalente e diagramma di funzionamento. (da pag. 213 al pag. 217) (5a serie 3 ind. di c.c. in m.m.)
- 6 ✓ 03-set-07 Determinazione dei circuiti equivalenti di un trasformatore monofase e considerazioni relative ai vari parametri. (Pag. 140 - 141)
- 7 ✓ 20-set-07 Motore asincrono: regolazione della velocità con variazione della frequenza. (da pag. 226 a pag. 235) Convenzioni, equazioni elettriche e meccaniche, bilanci energetici e coppia elettromagnetica in una macchina elettrica rotante a regime permanente nel funzionamento come motore e come una macchina elettrica rotante a regime permanente nel funzionamento come motore e come generatore.
- 8 ✓ 12-dic-07 generatore.
- 9 ✓ 09-gen-08 Sollecitazioni elettrodinamiche in un trasformatore a bobine concentriche.
- 10 ✓ 09-gen-08 Diagramma di Blondel e delle due reattanze. (Pag. 98 - 100)
- 11 ✓ 18-giu-08 Diagramma polare della macchina sincrona a poli sporgenti e calcolo della potenza attiva e della coppia elettromagnetica. (Pag. 126 - 127)
- 12 ✓ 18-giu-08 Analisi di motori e generatori elettrici funzionanti a regime permanente: equazioni elettriche e meccaniche, bilanci energetici e coppia elettromagnetica.
- 13 ✓ 18-lug-08 Macchina a corrente continua: commutazione.
- 14 ✓ 16-lug-08 Determinazione in sede di progetto e sperimentale dei parametri del circuito equivalente di un trasformatore monofase nel funzionamento in corto circuito. (Pag. 18 - 21)
- 15 ✓ 16-lug-08 Determinazione della f.m.m. di eccitazione e del flusso nel funzionamento a vuoto di una macchina sincrona isotropa e anisotropa. (Pag. 75 - 82) (1a serie 1 ind. di c.c. in m.m.)
- 16 ✓ 03-set-08 Motore asincrono trifase: regolazione della velocità.
- 17 ✓ 03-set-08 Fenomeni legati al funzionamento a carico di un generatore sincrono trifase e reazione di indotto. (83 - 88)
- 18 ✓ 18-set-08 Diagramma polare della macchina sincrona a rotore liscio in parallelo sulla rete. (122 - 124)
- 19 ✓ 18-set-08 Autotrasformatore. (Pag. 90 - 93)
- 20 ✓ 02-feb-09 Poli ausiliari ed avvolgimenti compensatori in una macchina a corrente continua: loro funzione e diagrammi di f.m.m. e di induzione. (Pag. 296 - 298)
- 21 ✓ 02-feb-09 Materiali ferromagnetici, isolanti e conduttori usati nelle macchine elettriche: caratteristiche e perdite. Rendimento delle macchine elettriche. (144 - 17)
- 22 ✓ 02-feb-09 Diagrammi di Potier e di Behn-Eshenbourg. Influenza del fattore di potenza del carico sull'eccitazione e sulla variazione di tensione. (Pag. 92 - 94)
- 23 ✓ 18-feb-09 Forza magnetomotrice prodotta da un avvolgimento distribuito trifase percorso da una terza equilibrata di correnti: valori, andamenti ed eventuali armoniche componenti. (Pag. 22 - 23) (1a serie 1 ind. di c.c. in m.m.)
- 24 ✓ 24-giu-09 Macchina asincrona: bilancio delle potenze in gioco in due punti di funzionamento stabile del diagramma circolare (uno come motore e uno come generatore). (196 - 195)
- 25 ✓ 24-giu-09 F.e.m. indotta in un conduttore di rotore e f.e.m. indotta alle spazzole nel funzionamento a vuoto di una macchina a corrente continua. (283 - 289)
- 26 ✓ 24-giu-09 F.e.m. indotta a vuoto in una fase di statore una macchina sincrona e coefficienti di avvolgimento e di raccorciamento. (146 - 147) (1a serie 1 ind. di c.c. in m.m.)
- 27 ✓ 22-lug-09 Regolazione della velocità di un motore asincrono con variazione della frequenza.
- 28 ✓ 22-lug-09 Motore a corrente continua con eccitazione serie: schema, equazioni, e caratteristiche elettromeccaniche e meccaniche.
- 29 ✓ 03-set-09 Macchina in corrente continua: fenomeni legati al funzionamento a carico e reazione di indotto. (289 - 293)
- 30 ✓ 03-set-09 Funzionamento di una macchina asincrona trifase a rotore avvolto con circuiti rotorici in corto circuito e rotore in movimento: tracciamento del circuito equivalente. (188 - 189) (1a serie 1 ind. di c.c. in m.m.)
- 31 ✓ 03-set-09 Analisi di motori e generatori elettrici funzionanti a regime permanente: significato di regime permanente, convenzioni, equazioni elettriche e meccaniche, bilanci energetici e coppia elettromagnetica.
- 32 ✓ 23-set-09 Tracciamento del diagramma circolare di un motore asincrono in sede di progetto e di collaudo. (Pag. 100)
- 33 ✓ 23-set-09 Ripartizione della potenza attiva e reattiva nel funzionamento come generatore e come motore di una macchina sincrona collegata in parallelo alla rete. (Pag. 100)
- 34 ✓ 23-set-09 Motore a corrente continua con eccitazione indipendente: caratteristiche elettromeccaniche e meccanica e regolazione della velocità. (Pag. 307 - 311)

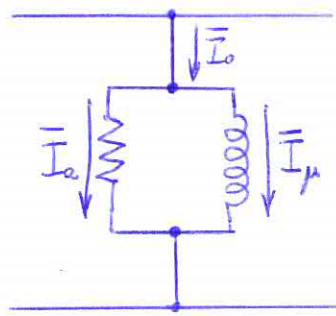
3.	01-feb-10	Motori asincroni trifase con rotore a gabbia speciale.	(212 - 213)
Pagina 27	01-feb-10	Generatore sincro trifase: diagrammi di Potier e di Behn-Eshenbarg. Reattanza sincro.	
Pagina 30	17-feb-10	Motore asincro trifase: tracciamento del diagramma circolare in sede di progetto e di collaudo.	
Pagina 39	17-feb-10	Generatore a corrente continua: f.e.m. indotta in un conduttore di rotore nel funzionamento a vuoto.	
Pagina 40	17-feb-10	Autotrasformatore monofase. Potenza di dimensionamento.	

1) Trasformatore monofase: corrente magnetizzante e armoniche componenti, calcolo della reattanza a vuoto:

- La corrente magnetizzante $\bar{I}_\mu$ è la componente di $\bar{I}_0$ in fase con il flusso $\bar{\Phi}_M$ che origina la magnetizzazione del nucleo. Sarà la potenza reattiva $E_1 \bar{I}_\mu$ che magnetizza il nucleo e produce il flusso.



La corrente magnetizzante risulta in quadratura in anticipo con $\bar{E}_1$ e quindi in quadratura in ritardo con $\bar{E}_1$ comunque in fase con $\bar{\Phi}_M$.



nel circuito equivalente semplificato del trasformatore si tiene conto della corrente magnetizzante introducendo un ramo in derivazione costituito da una resistenza in cui fluisce $\bar{I}_a$, componente attiva della corrente a vuoto e $\bar{I}_\mu$ componente appunto magnetizzante.

La corrente magnetizzante risulta anche uguale, in valore

efficace, al rapporto $\frac{V_{an}}{X_0} = I_\mu$ e si deve tenere conto

che a causa della saturazione del nucleo non è sinusoidale una volta tracciata la curva caratteristica della magnetizzazione avere l'andamento dell'induzione B nel nucleo in funzione del campo H . E tracciato l'andamento "sinusoidale" di $B = B_M \sin \omega t$ nel nucleo in funzione di ωt si può tracciare per punti la curva i_μ data dalla relazione

$$i_\mu = \frac{H \cdot l}{N_1}$$

L'andamento si distacca dal sinusoidale a causa della presenza della terza armonica.

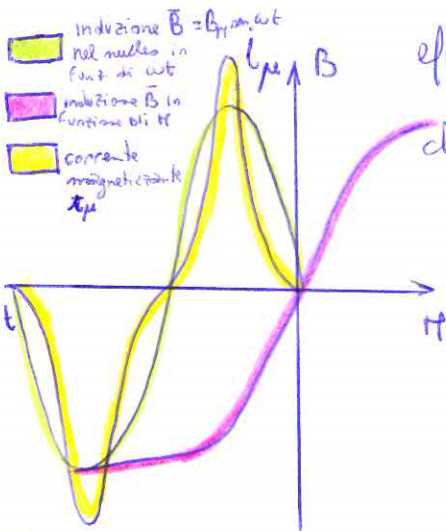
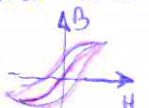
La curva i_μ magnetizzante può essere scomposta in serie di

Fourier dando per simmetria origine a: $i_\mu(t) = i_\mu^I(t) + i_\mu^{III}(t) + i_\mu^V(t) + i_\mu^{VII}(t) + \dots$
 $= \sqrt{2} I_\mu^I \sin \omega t + \sqrt{2} I_\mu^{III} \sin 3\omega t + \sqrt{2} I_\mu^V \sin 5\omega t + \sqrt{2} I_\mu^{VII} \sin 7\omega t + \dots$

Dato che la reattanza a vuoto è data da $X_0 = \frac{V_{an}}{I_\mu}$ il valore di I_μ è

ricavabile da $I_\mu = \sqrt{I_\mu^{I^2} + I_\mu^{III^2} + I_\mu^{V^2} + I_\mu^{VII^2} + \dots}$ Le armoniche sono solo

di ordine dispari anche nel caso che non si trascurino le perdite per isteresi.

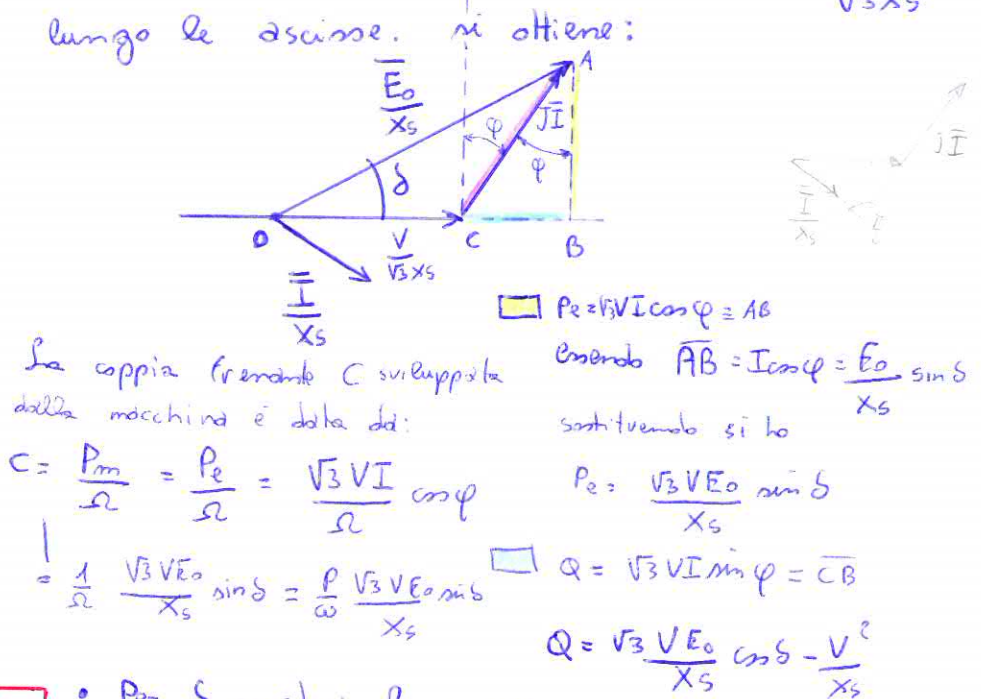
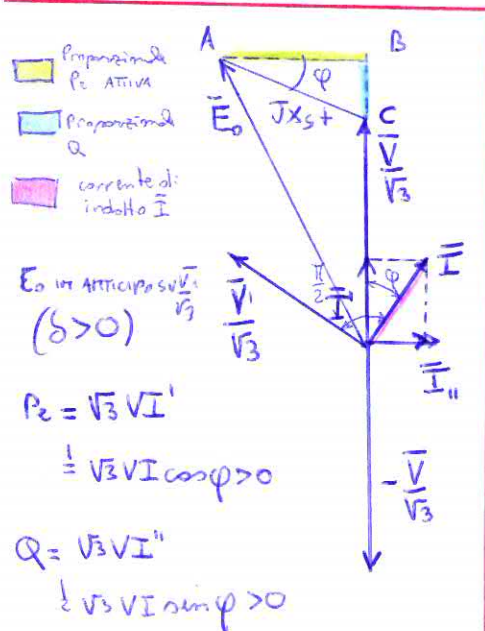


La curva rossa è anche detta caratteristica di magnetizzazione.

2) DIAGRAMMA POLARE DELLA MACCHINA SINCRONA A ROTORE LISCIO IN PARALLELO ALLA RETE.

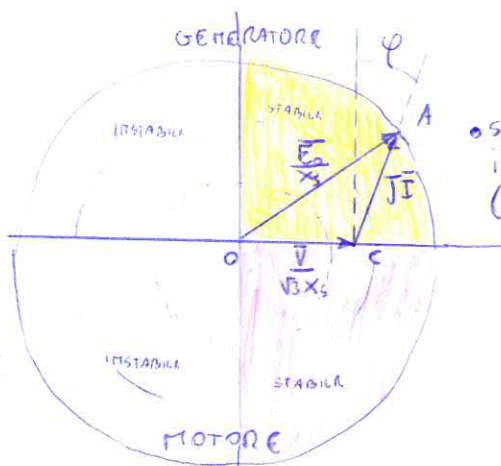
consente lo studio in tutte le condizioni di funzionamento di una macchina NON SATURA in parallelo della rete sia come generatore che come motore.

consideriamo il diagramma fasoriale della macchina non saturata nel funzionamento da generatore sovraeccitato. Dividiamo ogni vettore per la reattanza sincrona $X_s = X_i + X_\sigma$ e disponiamo il vettore $\frac{\bar{V}}{\sqrt{3}X_s}$ lungo le ascisse. si ottiene:

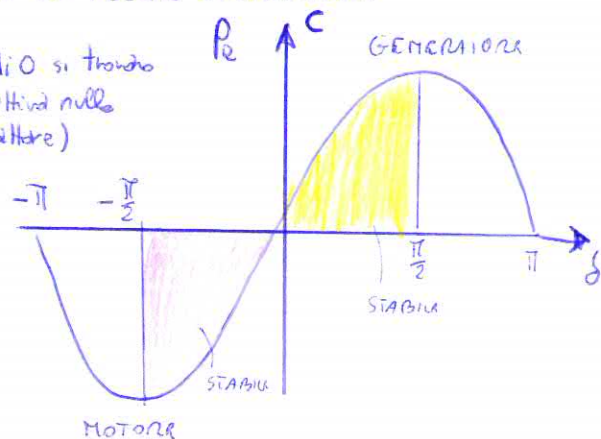


STA EROGANDO POTENZA ELETTRICA ALLA RETE PARI ALLA POTENZA MECCANICA ASSORBITA ALL'ALBERO (GENERATORE) E SVILUPPA UNA COPPIA FREMENTE C CHE CONTROBILANCIA LA COPPIA MOTTRICE APPLICATA. LA MACCHINA METTE IN GIOCO UNA POT. REATTIVA. EROGA INDUTTIVA, ASSORBE CAPACITIVA.

- Per δ positivi la macchina si comporta da generatore mentre per δ negativi da motore.
- con corrente di eccitazione costante al variare della coppia esterna applicata all'albero varia l'angolo δ ma rimane costante il vettore $\frac{E_0}{X_s}$. il punto A si sposta lungo una circonferenza di raggio $\frac{E_0}{X_s}$.
- Variando la corrente di eccitazione cambia $\frac{E_0}{X_s}$, quindi si cambia circonferenza.
- Il funzionamento è stabile nei soli due quadranti di destra perché a una variazione di δ corrisponde una variazione di C e P_e che mantiene la relazione di sincronismo.



- sulle ascisse dx e sx di O si trovano i punti a potenza attiva nulla (funzionamento da reattore)

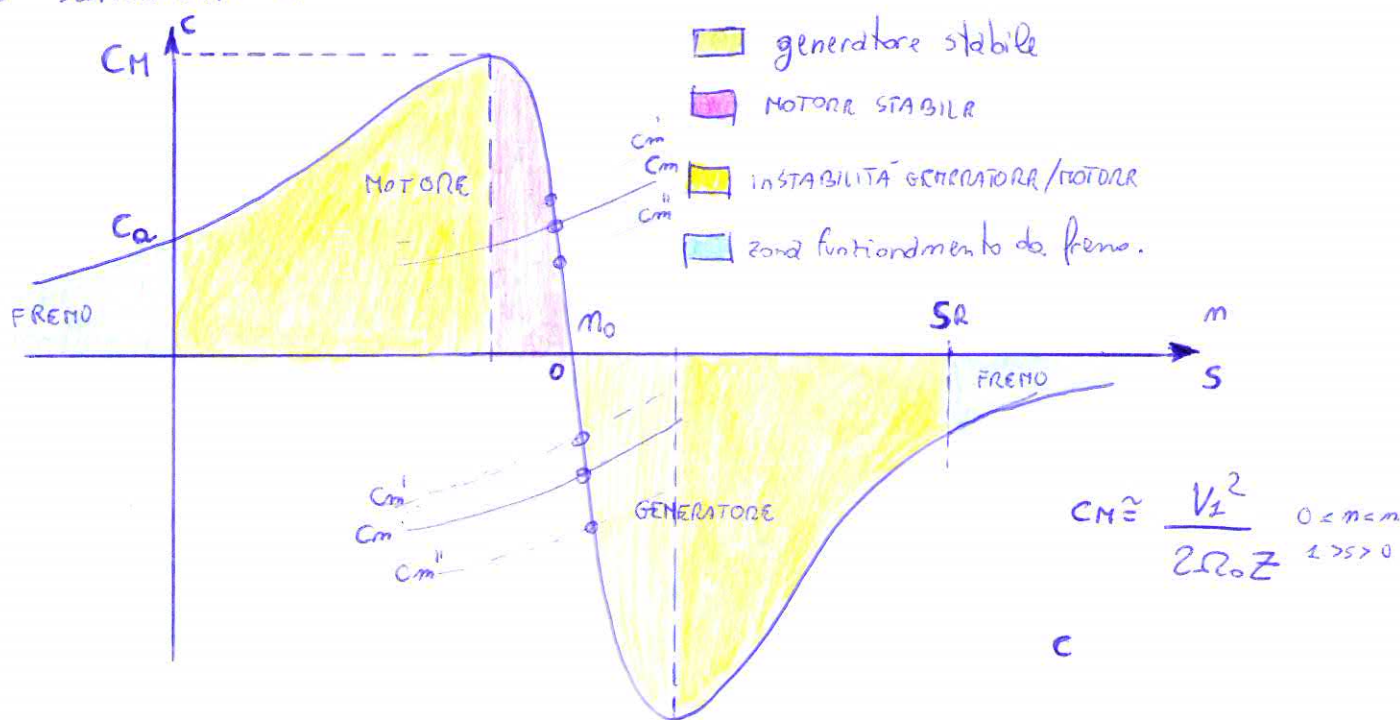


3) Determinazione della caratteristica meccanica di una macchina asincrona nel funzionamento da motore, generatore, freno.

In generale, la caratteristica meccanica di una macchina mette in relazione il numero di giri "n" con la coppia "C" elettromagnetica.

La caratteristica meccanica di una macchina asincrona mette in evidenza, oltre alle zone di stabilità di funzionamento come generatore e come motore, le zone in cui si comporta da freno, il valore della coppia massima C_M e della coppia di avviamento C_a .

Il grafico ha il medesimo significato se tracciato in funzione dello scorrimento s .



nelle zone di funzionamento stabile un aumento/decremento della coppia esterna C_m applicata all'albero corrisponde un aumento/decremento della coppia fornita dalla macchina.

Come già messo in evidenza C_M e C_M' si hanno rispettivamente per $s_{II} = \frac{R_{12}}{Z}$ e $s_{IM} = -\frac{R_{12}}{Z}$ dato che $R_{12} \ll Z$, sono valori molto piccoli.

NE CONSEGUO CHE IL FUNZIONAMENTO STABILE DELLA MACCHINA ASINCRONA SI HA PER BASSI VALORI DELLO SCORRIMENTO, QUINDI PER $n \text{ circa} = n_0$ UNO SCORRIMENTO TIPICO E COMPRESO TRA 0,01 E 0,06 PER FUNZIONAMENTI STABILI (maggiore in piccoli motori).

4) FUNZIONAMENTO DI UNA MACCHINA ASINCRONA TRIFASE CON CIRCUITI ROTORICI IN CORTO CIRCUITO E ROTORE IN MOVIMENTO

SI HA L'OBIETTIVO DI DEFINIRE LO SCORRIMENTO.

Alla macchina asincrona, in attesa di essere alimentata, non si applichi alcuna coppia esterna né motrice né resistente. L'albero sia inizialmente fermo e i circuiti rotorici siano chiusi in corto circuito.

Quando i conduttori di rotore sono percorsi da corrente ed immersi in un campo magnetico perpendicolare si originano delle forze tangenziali che danno luogo a una forza risultante che origina una coppia.

La coppia, originata da correnti indotte, risponde alla legge di Lenz, si oppone alla causa che la ha creata, cioè al campo di statore e rotante alla velocità di sincronismo n_0 . Il fenomeno tende a diminuire la velocità relativa tra campo e rotore, ossia a trascinare il rotore nello stesso verso del campo di statore. La velocità che si raggiunge "m" sarà minore di n_0 a causa di fenomeni dissipativi anche in assenza di coppia resistente esterna applicata all'albero.

Applicando una coppia resistente esterna all'albero si stabilisce una nuova situazione di equilibrio che ha come effetto la riduzione della velocità m e l'aumento delle correnti indotte al rotore. Si instaura un nuovo valore di coppia. Se invece si applica all'albero una coppia motrice esterna è possibile fare raggiungere e superare al rotore la velocità di sincronismo n_0 oppure fare ruotare il rotore in senso opposto a quello del campo magnetico rotante.

Se il verso positivo ^{quello} del campo rotante di statore, in corrispondenza a una certa velocità m del rotore la velocità relativa tra i due è $(n_0 - m)$ e la ^{frequenza} ~~fem~~ f_s indotta nei conduttori di statore vale

$$f_s = p \frac{n_0 - m}{60}$$

posto

$$s = \frac{n_0 - m}{n_0}$$

si ottiene

$$f_s = \frac{p n_0 s}{60} = f \cdot s$$

$$f_s = f \cdot s$$

La fem e la ^{resistenza} ~~resistenza~~ di dispersione all'indotto vale

$$E_{gs} = 2k_f k_e \phi f_s N = E_g s$$

$$X_{es} = 2\pi f_s L_2 = X_e s$$

La f.m.m. ruota rispetto al rotore con $n_s = \frac{60 f_s}{p} = n_0 \cdot s = n_{sm}$

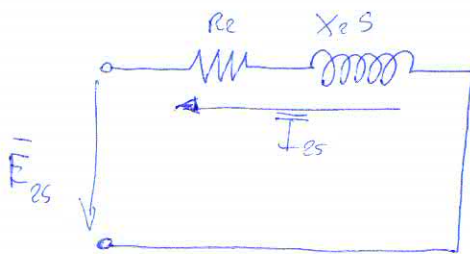
e rispetto allo statore con $N = n_0 - m + m = n_0$.

LA FORZA MAGNETO MOTRICE DI ROTORE, INDIPENDENTEMENTE DAL SENSO DI ROTAZIONE DEL ROTORE E DELLA SUA VELOCITA' n, RUOTA SEMPRE A VELOCITA' n_0 E CON LO STESSO VERSO DI QUELLO DI STATORE

⇒ CONTINUA

4) → CONTINUA

L'equazione di maglia del circuito equivalente semplificato vale:



$$\bar{E}_{2s} = (R_2 + jX_2 \cdot s) \bar{I}_{2s}$$

si ricava $\bar{I}_{2s} = \frac{\bar{E}_{2s}}{R_2 + jX_2 \cdot s}$

dividendo numeratore e denominatore per s risulta: $\bar{I}_{2s} = \frac{\frac{\bar{E}_{2s}}{s}}{\frac{R_2}{s} + jX_2}$

si ricorda che $E_{2s} = E_2 \cdot s$ e $X_{2s} = X_2 \cdot s$

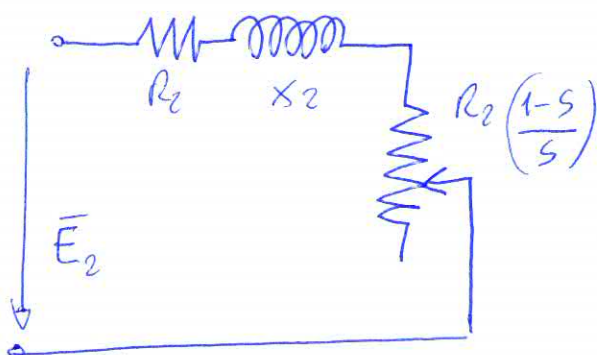
si riporta poi la relazione di $\bar{I}_{2s}$ dalla frequenza f_s alla f moltiplicando ambo i membri per $\frac{e^{j2\pi f t}}{e^{j2\pi f_s t}}$

si ottiene $\bar{I}_2 = \frac{E_2}{\frac{R_2}{s} + jX_2}$ con $\bar{I}_2$ corrente di Val. eff. $I_2 = I_{2s}$ e

$\bar{E}_2$ fem di valore efficace $E_2 = \frac{E_{2s}}{s}$ si riscrive l'equazione di maglia:

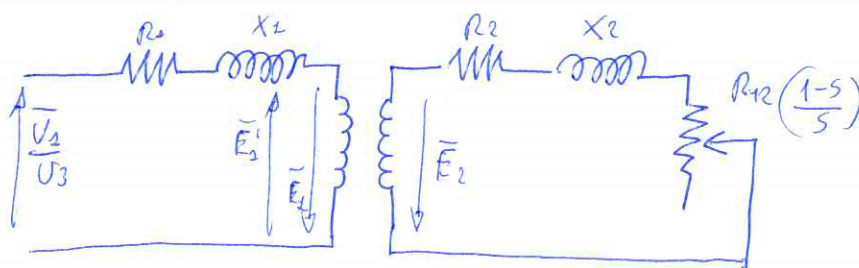
$$\bar{E}_2 = \left(\frac{R_2}{s} \bar{I}_2 + jX_2 \bar{I}_2 \right) = R_2 \bar{I}_2 + jX_2 \bar{I}_2 + R_2 \frac{1-s}{s} \bar{I}_2$$

CHE RENDE USABILE IL CIRCUITO EQUIVALENTE:



che permette lo studio della macchina e motore in movimento come se questo fosse fermo perché l'effetto è compensato e rappresentato dal carico variabile con lo scorrimento $R_2 \left(\frac{1-s}{s} \right)$.

NOTA FINALE IMPORTANTE: DATO CHE IL CIRCUITO SECONDARIO È STATO PORTATO ALLA FREQUENZA DI ROTORE A QUELLA DI STATORE È ANCORA POSSIBILE RAPPRESENTARE ASSIEME I DUE CIRCUITI ISO FREQUENZIALI CON IL FOTO CIRCUITO EQUIVALENTE:



5)

MOTORE ASINCRONO A DOPPIA GABBIA, PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO, CIRCUITO EQUIVALENTE E DIAGRAMMA DI FUNZIONAMENTO

In questo caso il rotore è provvisto di due gabbie coassiali con caratteristiche elettriche molto diverse. Diverso sarà il momento di "AZIONE" di esse.

La gabbia esterna ha una elevata resistenza ohmica R_{ee} (sborre ed anelli di piccola sezione). Dato che i flussi ^{dispersi} si concatenano ^{solo} con questa gabbia sono piccoli, dato che siano vicini al traferro rotore/statore e che vi è un altro traferro tra le due gabbie. La sborra presenta di conseguenza una bassa induttanza di dispersione L_{2e} e la sua impedenza quindi vale: $\tilde{Z}_{2e} = R_{2e} + j2\pi f_s L_{2e} = R_{2e} + jX_{2e}$



La gabbia interna ha una bassa R_{2i} , (grandi sezioni). Poiché i flussi ^{dispersi} si concatenano solo con questa gabbia e sono elevati e giustificano la forma a sborra profonda. La gabbia ha una elevata induttanza di dispersione L_{2i}

$$L_{2i} = R_{2i} + j2\pi f_s L_{2i} = R_{2i} + jX_{2i}$$

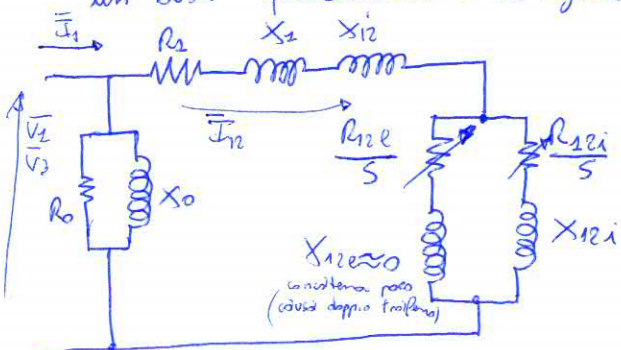
si distinguono due casi di funzionamento, 1) ALL'AVVIO con $X_{2e} \gg R_{2e}$ $X_{2i} \gg R_{2i}$ ^{causa dell'alta frequenza rotorica.}

e si può scrivere $\tilde{Z}_{2e} \approx jX_{2e}$ $\tilde{Z}_{2i} \approx jX_{2i}$ essendo $X_{2e} \ll X_{2i}$ e quindi $\tilde{Z}_{2e} \ll \tilde{Z}_{2i}$ CONDIZIONE DI SPUNTO ($s=1$) e corrente superficiale che si distribuisce nella gabbia esterna la quale garantisce una elevata coppia di avviamento

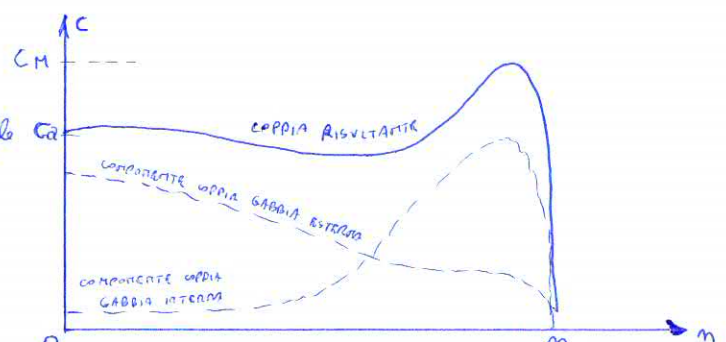
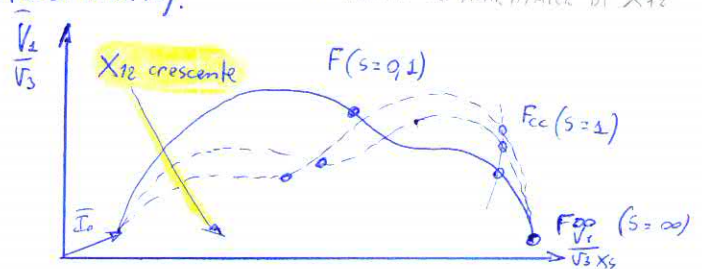
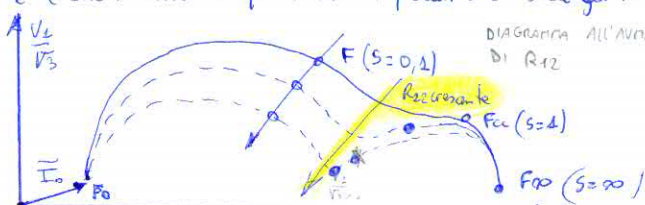
2) delle condizioni di regime con $s < 0,1$ e le reattanze X_{2e} e X_{2i} molto basse ^{causa bassa frequenza rotorica}. Le resistenze sono quindi maggiori delle reattanze $X_{2e} \ll R_{2e}$ e $X_{2i} \ll R_{2i}$ possiamo scrivere $\tilde{Z}_{2e} \approx R_{2e}$ e $\tilde{Z}_{2i} \approx R_{2i}$ REGIME ($s < 0,1$) → CORRENTE PROFONDA

La corrente in condizione di regime si distribuisce nella gabbia più interna, e la resistenza equivalente delle due gabbie corrisponde al parallelo delle resistenze delle due gabbie e risulta inferiore a R_{2i} e quindi molto bassa, è assicurato quindi un buon funzionamento a regime (elevato rendimento).

DIAGRAMMA ALL'AUMENTARE DI X_{12}



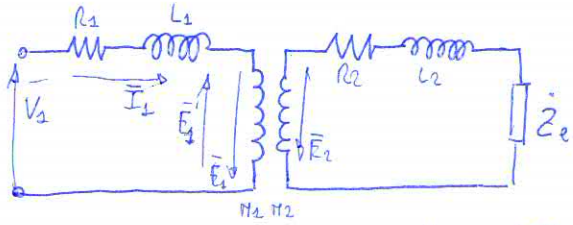
il diagramma di funzionamento non risulta circolare e l'andamento è fortemente influenzato dalle caratteristiche delle gabbie.



6)

DETERMINAZIONE DEI CIRCUITI EQUIVALENTI DI UN TRASFORMATORE MONOFASE E CONSIDERAZIONI RELATIVE AI VARI PARAMETRI.

si consideri inizialmente lo schema circuitale del trasformatore a cui è connesso il carico $\dot{Z}_e$



scriviamo le equazioni delle due maglie del circuito primario e secondario

$$\begin{cases} \bar{V}_1 = R_1 \bar{I}_1 + jX_1 \bar{I}_1 - \bar{E}_1 \\ \bar{E}_2 = R_2 \bar{I}_2 + jX_2 \bar{I}_2 + \dot{Z}_e \bar{I}_2 \end{cases}$$

$$\frac{N_1}{N_2} = m \quad \text{RAPPORTO SPIRE}$$

moltiplichiamo ambo i membri della seconda per $-\frac{N_1}{N_2}$ e poi ricordiamo che $\bar{E}_1 = m \bar{E}_2$ e anche $\bar{I}_2 = -m \bar{I}_{12}$ (da sostituire brevemente nelle equazioni)

$$-\bar{E}_2 \left(\frac{N_1}{N_2} \right) = R_2 \bar{I}_2 \left(-\frac{N_1}{N_2} \right) + jX_2 \bar{I}_2 \left(-\frac{N_1}{N_2} \right) + \dot{Z}_e \bar{I}_2 \left(-\frac{N_1}{N_2} \right) \quad \text{posso già sostituire il primo membro.}$$

$$-\bar{E}_1 = -R_2 \left(\bar{I}_2 \right) \frac{N_1}{N_2} - jX_2 \left(\bar{I}_2 \right) \frac{N_1}{N_2} - \dot{Z}_e \left(\bar{I}_2 \right) \frac{N_1}{N_2} \quad \text{ora sostituisco } \bar{I}_2 = -\frac{N_1}{N_2} \bar{I}_{12}$$

$$-\bar{E}_1 = -R_2 \left(-\frac{N_1}{N_2} \bar{I}_{12} \right) \frac{N_1}{N_2} - jX_2 \left(-\frac{N_1}{N_2} \bar{I}_{12} \right) \frac{N_1}{N_2} - \dot{Z}_e \left(-\frac{N_1}{N_2} \bar{I}_{12} \right) \frac{N_1}{N_2} \quad \text{AGGIUSTO I SEGNI E INDICO I QUADRI}$$

$$-\bar{E}_1 = R_2 \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 \bar{I}_{12} + jX_2 \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 \bar{I}_{12} + \dot{Z}_e \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 \bar{I}_{12}$$

ora trasmetto le resistenze, reattanze, impedenze al primario $R_{12} = \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 R_2$ $X_{12} = \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 X_2$ $\dot{Z}_{1e} = \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 \dot{Z}_e$

$$-\bar{E}_1 = R_{12} \bar{I}_{12} + jX_{12} \bar{I}_{12} + \dot{Z}_{1e} \bar{I}_{12}$$

posso sostituire tutta l'espressione trovata nell'ultimo termine del secondo membro della prima,

$$\bar{V}_1 = R_1 \bar{I}_1 + jX_1 \bar{I}_1 + R_{12} \bar{I}_{12} + jX_{12} \bar{I}_{12} + \dot{Z}_{1e} \bar{I}_{12}$$

RACCOLGENDO I TERMINI OMOLOGHI SI HA:

$$\bar{V}_1 = \bar{I}_1 (R_1 + jX_1) + \bar{I}_{12} (R_{12} + jX_{12}) + \dot{Z}_{1e} \bar{I}_{12}$$

dato che $\dot{Z}_{1e} \bar{I}_{12} = \bar{V}_{1e}$
tensione sul carico riferita al primario, sostituisco

$$\bar{V}_1 = \bar{I}_1 (R_1 + jX_1) + \bar{I}_{12} (R_{12} + jX_{12}) + \bar{V}_{1e}$$

dalle definizioni $\phi_M = \frac{V_2 \bar{E}_1'}{j\omega N_1}$ e $\bar{I}_0 = \frac{B_0 \phi_M}{N_1 V_2}$ sostituisco il ϕ_M nella seconda

$$\text{ottengo } \bar{I}_0 = B_0 \frac{V_2 \bar{E}_1'}{j\omega N_1} = \frac{B_0 V_2 \bar{E}_1'}{j\omega N_1} \cdot \frac{1}{N_1 V_2} = \frac{B_0 \bar{E}_1'}{j\omega N_1^2} \Rightarrow \bar{I}_0 = \frac{B_0 \bar{E}_1'}{j\omega N_1^2}$$

Per tenere conto di questa corrente $\bar{I}_0$ secondo le sue componenti $\bar{I}_a$ e $\bar{I}_\mu$ per

$$a \quad \bar{I}_a = \frac{\bar{E}_1'}{R_0} \quad e \quad \bar{I}_\mu = \frac{\bar{E}_1'}{X_0} \quad \text{si introduce il parallelo di una resistenza}$$

R_0 e di una reattanza X_0 che sono la resistenza a vuoto e la reattanza a vuoto riferite al primario.

Il loro parallelo, dato dalla nota formula di sintesi $\bar{Z}_0 = \frac{R_0 \cdot jX_0}{R_0 + jX_0}$ restituisce l'impedenza a vuoto da derivare nel circuito equivalente all'altreza della presenza di $\bar{E}_1'$.

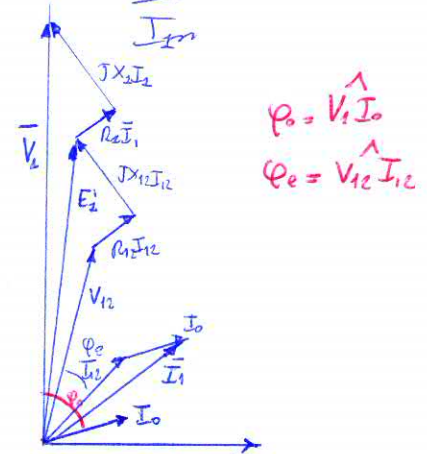
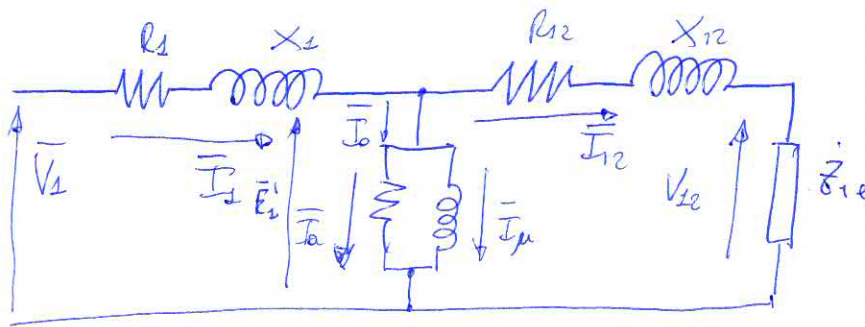
Dato che R_0 è la componente attiva di questa impedenza se ne ricava

$$\bar{R}_0 = \frac{\bar{Z}_0}{\cos \varphi_0} \quad \text{e} \quad \cos \varphi_0 = \frac{Z_0}{R_0} \quad \text{è il fattore di potenza a vuoto.}$$

alle correnti abbiamo trovato le seguenti equazioni secondo Kirchhoff.

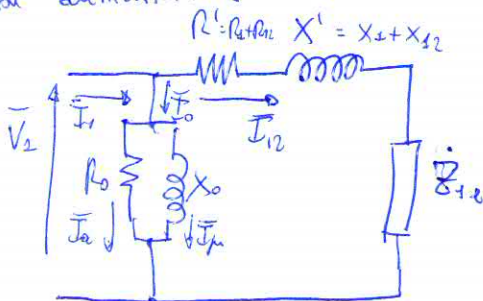
$$\begin{cases} \bar{I}_0 = \bar{I}_\mu + \bar{I}_a \\ \bar{I}_1 = \bar{I}_0 + \bar{I}_{12} \end{cases} \quad \begin{array}{l} \text{in valore relativo si ha } i_a = \frac{I_0}{I_m} \\ \text{in valore percentuale si ha } i_0\% = \frac{I_0}{I_m} \cdot 100 \end{array}$$

Il circuito risultante è:



- I_0 non è sinusoidale a causa della saturazione del nucleo, lo si suppone tale per piccoli valori dato che $i_0\%$ è compreso tra il 2% e il 15%.
- Le cadute $R_1 I_1$ e $X_1 I_1$ (valori eff.) sono piccole rispetto a V_1 .
- Le cadute $R_2 I_2$ e $X_2 I_2$ (val. eff.) sono piccole rispetto a V_{12} (stessa ordine percentuale delle precedenti).
- Benché ϕ_m dipenda dal carico e dalla tensione V_1 (imposta) essendo le cadute al primario piccole anche la variazione di ϕ_m è piccola, quindi si suppone costante, come si considera costante anche I_0 .

con queste supposizioni si può considerare la derivazione direttamente collegata di morsetti di alimentazione e il circuito si semplifica ulteriormente.



R' somma delle R primaria e secondaria riferito al primario

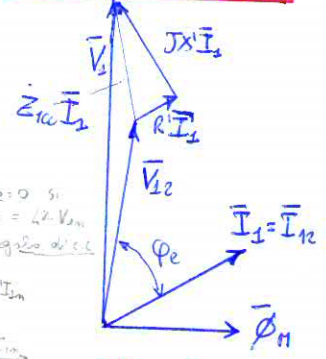
X' = somma delle reattanze di dispersione al primario con quella al secondario

X_0 = φ_m riferita allo V_m , varia con la saturazione e non solo con I_μ

R_0 = costante accettabilmente anche al variare di V_1

$$Z_{12} = \frac{R_1^2 + R_2^2}{2(R_1 + R_2)} \quad \cos \varphi_{ec} = \frac{R_1}{Z_{12}} \quad \text{fattore di p.d. in c.c.}$$

TRASCURATO $\bar{I}_0$ DIVENTA



→ continua

7)

MOTORE ASINCRONO: REGOLAZIONE DELLA VELOCITÀ CON VARIAZIONE DELLA FREQUENZA.

Dalla relazione fondamentale $n = n_0(1-s) = \frac{60f}{p}(1-s)$ si vede che la velocità n del motore asincrono può essere variata non solo con l'inverso del numero dei poli ma ^{anche} direttamente con una variazione della frequenza. La frequenza di linea viene variata tramite convertitori statici (inverter). Si raccomandano alcune condizioni:

- 1) I_0 , proporzionale al flusso di trasferimento, non deve superare il valore nominale per non saturare il nucleo e aumentare notevolmente le perdite nel ferro
- 2) I_1 e I_2 rotorica non devono superare i valori nominali per evitare sovriscaldamenti e sovradiimensionamenti del convertitore statico.
- 3) La tensione di alimentazione non deve superare il valore nominale per il quale sono dimensionati l'isolamento della macchina e il convertitore.

La corrente rotorica, riferita allo statore è data da: $I_{12} = \frac{\frac{V_1}{\sqrt{3}}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2}{s}\right)^2 + X^2}} = \frac{s V_1}{\sqrt{3} R_{12}}$ e quindi proporzionale allo scorrimento.

Poniamo

$$\alpha = \frac{f_2}{f}$$

con f = Frequenza nominale

f_2 = generica frequenza di funzionamento (alimentazione)

Si supponga, in tutte le considerazioni seguenti che nel limite del possibile si mantenga costante la corrente rotorica a cui sono legate potenza e coppia.

Si impone quindi $I_{12\alpha} = I_{12n}$ quindi deve essere $V_{1\alpha} \cdot S_{\alpha} = V_{1n} \cdot S_n = \text{cost.}$

LA VARIAZIONE DI VELOCITÀ DI UN MOTORE ASINCRONO CON VARIAZIONE DELLA FREQUENZA PUÒ AVVENIRE IN DUE PRINCIPALI MODI PIÙ UNO

- 1) REGOLAZIONE CON VARIAZIONE DI AMPIEZZA E FREQUENZA DELLA TENSIONE DI ALIMENTAZIONE
- 2) REGOLAZIONE CON ALIMENTAZIONE A CORRENTE IMPRESSA DI AMPIEZZA E FREQUENZA VARIABILI
- 3) REGOLAZIONE A RAPPORTO tensione/frequenza costante

RIDUZIONE DELLA VELOCITÀ ($\alpha < 1$) La riduzione della velocità si ottiene riducendo la frequenza ($f_2 = \alpha f < f$). Se contestualmente alla riduzione della frequenza, si riduce anche la tensione di alimentazione del medesimo rapporto $V_{1\alpha} = \alpha V_{1n}$. Si realizza così una regolazione a rapporto $\frac{V_{1\alpha}}{f_2} = \frac{V_{1n}}{f} = \text{cost}$ si verifica che il flusso di trasferimento rimane costante e pari al valore nominale, quindi è soddisfatta la condizione 1) La corrente a vuoto rimane invariata.

GRAFICO DELLA REGOLAZIONE A RAPPORTO TENSIONE/FREQUENZA costante ($\alpha < 1$) diminuzione velocità

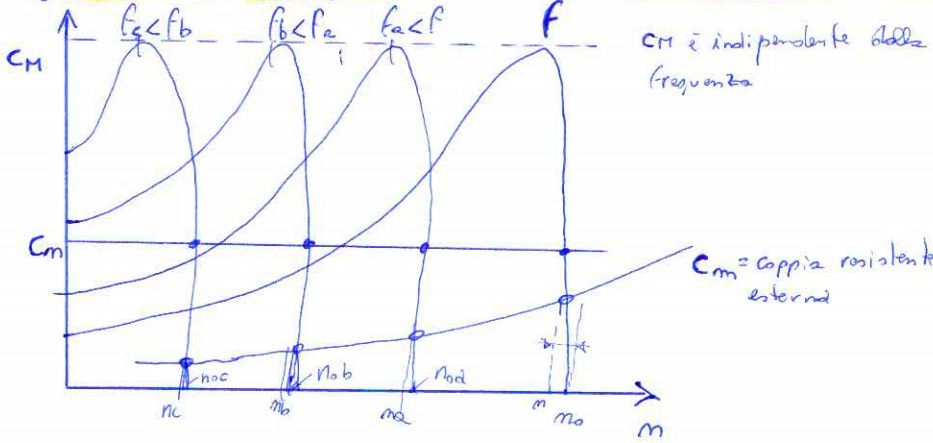
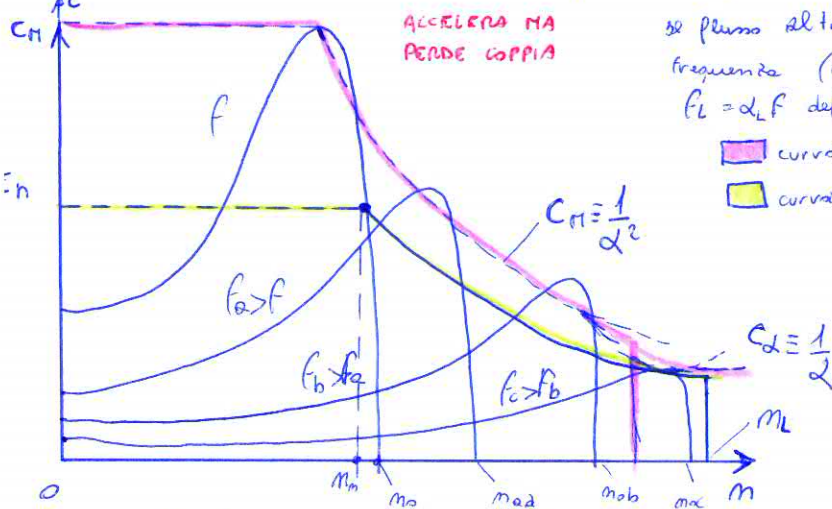


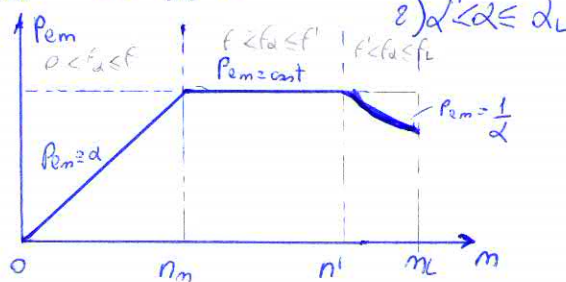
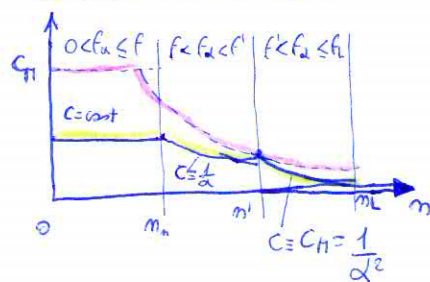
GRAFICO DELLA REGOLAZIONE IN INCREMENTO DELLA VELOCITA' AUMENTANDO LA FREQUENZA MA SENZA AUMENTARE V_1 (non si aumenta la tensione aumentando f per soddisfare la terza condizione) ($\alpha > 1$)



ci sono due zone di funzionamento

- 1) $1 < \alpha \leq \alpha'$: funzionamento a potenza costante
la coppia ^{inversa} cresce secondo $\frac{1}{\alpha}$
la coppia C_d decresce secondo $\frac{1}{\alpha^2}$

Le curve limite sono:



$$C_M < C_d$$

la potenza convertita è inversamente proporzionale alla frequenza.

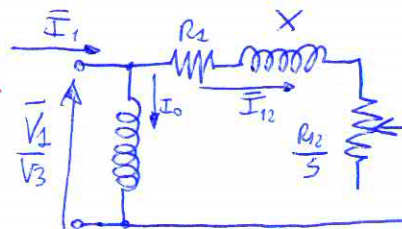
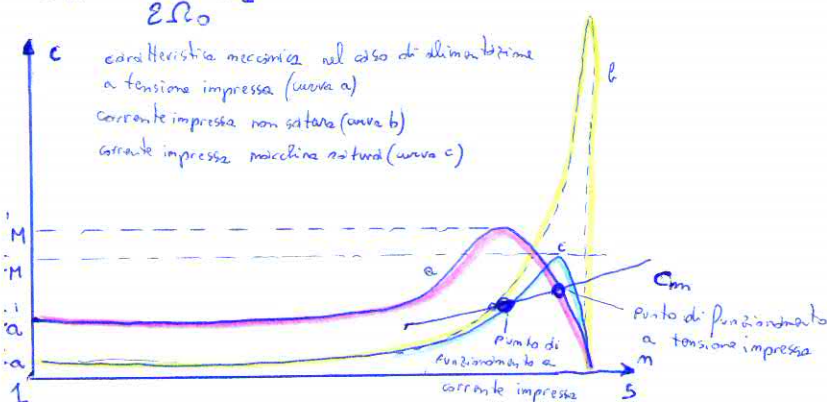
REGOLAZIONE A CORRENTE IMPRESA E FREQUENZA VARIABILE

il rotore assorbe I_2 qualunque sia lo scorrimento

$C_a \approx \frac{3 R_2 I_1^2}{2 \Omega_0}$ assorbe I_2 anche all'avviamento, quindi in questo tipo di controllo la coppia di avviamento è limitata (bassa)

$$S_H = \frac{R_2}{X_0} \quad I_{12H} \approx I_1 \frac{X_0}{\sqrt{R_2^2 + X_0^2}} = \frac{I_1}{\sqrt{2}}$$

$$C_M = 3 \frac{X_0}{2 \Omega_0} I_1^2$$



CIRCUITO EQUIVALENTE

SEMPRE CON $R_0 =$

si trascura I_2 su R_0

si eseguono i partiti di corrente

per valori di scorrimento piccoli: $I_{12} = I_1 \frac{X_0}{\sqrt{R_2^2 + X_0^2} + (X_0 + X)}$

si ha da: $I_{12} \approx I_1 \frac{X_0}{\sqrt{R_2^2 + X_0^2}}$

$I_0 \approx I_1 \frac{R_2}{S X_0}$

$I_0 = I_1 \frac{\sqrt{R_2^2 + X_0^2}}{S X_0}$

continua domanda 7) Riduzione della velocità ($\alpha < 1$) riducendo f della I_1 impresso.

La riduzione della velocità si ottiene riducendo la frequenza della "corrente" di alimentazione. $f_\alpha = \alpha f < f$ scorrimento relativo alla corrente I_{2m}

$$s_m = \frac{R_{12}}{I_{2m} X_0} \rightarrow s_\alpha = \frac{I_{2m} s_m}{I_{2m} \alpha} = \frac{s_m}{\alpha}$$

$$C_m = \frac{3 R_{12}}{s_m \Omega_0} I_{2m}^2 \rightarrow C_\alpha = \frac{3 R_{12}}{s_\alpha \alpha \Omega_0} I_{2m}^2 = C_m$$

$$P_{emm} = C_m \Omega_0 (1 - s_m) \approx C_m \Omega_0 \quad P_{em} = C_\alpha \alpha \Omega_0 (1 - s_\alpha) \approx P_{emm}$$

Coppia max

$$C_{M\alpha} \approx \frac{3 X_0}{\Omega_0} I_{2m}^2 = \frac{3 X_0}{2 \Omega_0} I_{1m}^2$$

$$C_{M\alpha} \approx \frac{3 \alpha X_0}{\alpha \Omega_0} I_{2m\alpha}^2 = \frac{3 \alpha X_0}{2 \alpha \Omega_0} I_{1m}^2 = C_M$$

scorrimento relativo alla coppia massima

$$\Delta m = m_0 - (1 - s_m) m_0 = m_0 s_m$$

$$\Delta m_\alpha = \alpha m_0 s_{M\alpha} = \Delta m$$

$$C_\alpha \approx \frac{3 R_{12} I_{1m}^2}{\Omega_0}$$

$$C_{\alpha\alpha} \approx \frac{3 R_{12} I_{1m}^2}{\alpha \Omega_0} = \frac{C_\alpha}{\alpha}$$

queste relazioni sono valide finché la frequenza è tale che $R_1 \ll X$ l'ultima in particolare fino a che $R_{12} \ll X_0$.

- 1) La coppia C_α è indipendente dalla frequenza (funzionamento a coppia costante)
- 2) Scorrimento relativo alla coppia C_α è inversamente proporzionale alla frequenza
- 3) La potenza corrispondente alla coppia C_α è direttamente proporzionale alla frequenza
- 4) La coppia massima è indipendente dalla frequenza.
- 5) Lo scorrimento relativo alla coppia massima è inversamente proporzionale alla frequenza.
- 6) L'intervallo di velocità Δm in cui si ha funzionamento stabile è indipendente dalla frequenza.
- 7) La coppia di avviamento è inversamente proporzionale alla frequenza.

$$\frac{V_{s\alpha}}{\sqrt{3}} = \alpha X_0 I_{0\alpha} = \alpha X_0 I_{0m} = \alpha \frac{V_{1m}}{\sqrt{3}}$$

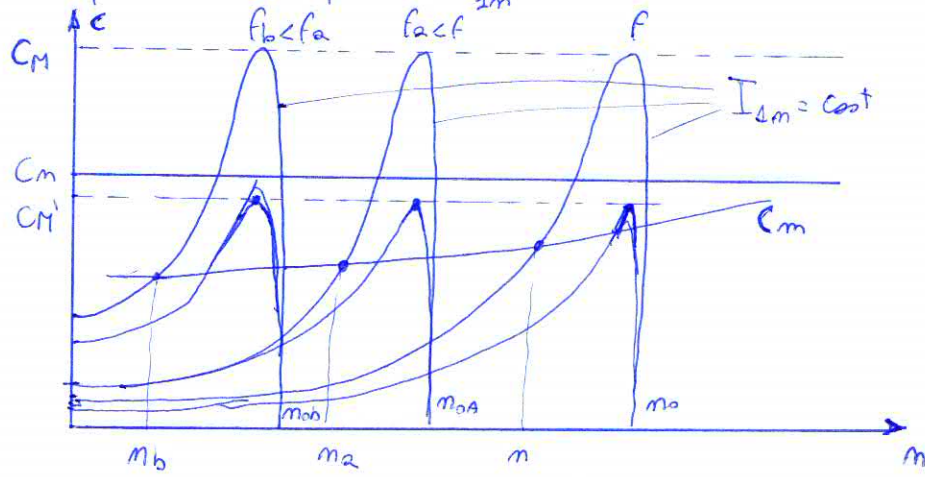
La tensione ai morsetti del circuito equivalente diminuisce con la frequenza

$$\frac{V_{s\alpha}}{\sqrt{3}} = \alpha \frac{V_{1m}}{\sqrt{3}}$$

$$\frac{V_{s\alpha}}{\alpha} = V_{1m}$$

infatti

caratteristica meccanica $m-c$ al diminuire della frequenza delle corrente di alimentazione
nell'ipotesi di ampiezza $I_{1m} = \text{cost.}$



CONVENZIONI, EQUAZIONI ELETTRICHE, MECCANICHE, BALANCI ENERGETICI E COPPIA ELETTROMAGNETICA
IN UNA MACCHINA ELETTRICA ROTANTE A REGIME PERMANENTE NEL FUNZIONAMENTO COME
MOTORE E COME GENERATORE.

Nei sistemi reali non è possibile trasformare tutta l'energia entrante nella forma di energia uscente dato che durante il percorso interno esistono numerosi punti sede di perdite di varie natura.

Diagram illustrating the energy flow in a regenerative braking system:

- SISTEMI ELETTRICI ESTERNO** (External Electrical Systems) provides power to the **morsetti elettrici** (electrical bus).
- The **morsetti elettrici** supply power to the **conv. da elettrica a meccanica** (electrical to mechanical converter).
- The converter outputs power to the **motore** (motor), which is connected to the **albero** (shaft).
- The **albero** is connected to the **SISTEMI MECCANICI ESTERNO** (External Mechanical Systems).
- The **motore** also receives feedback from the **conv. da meccanica a elettrica** (mechanical to electrical converter).
- The **conv. da meccanica a elettrica** is connected to the **conv. da elettrica a meccanica** via a **campo magnetico di decoppiamento** (decoupling magnetic field).
- The **conv. da meccanica a elettrica** outputs power to the **SISTEMI ELETTRICI ESTERNO**.

ΔW_{ms} = Variazione dell'energia W_m immagazzinata sotto forma di energia cinetica.

$$dW_e = dW_{ep} + dW_{em} + dW_{ec}$$

Voltaggio di
Energia nei campi
magnetici

moltiplichiamo ambo i membri per $\bar{a}dt$ e si ottiene il bilancio energetico.

$$v_i dt = R i^2 dt + e_i dt$$

$$e i dt = dW_{em} + dW_{ec}$$

La forza elettromotrice, legata all'energia elettrica convertita in meccanica, rappresenta la radiazione del campo di decoppiamento ai morsetti elettrici.

V = tensione di
morselli
 i = corrente di
morselli

Re calculo química

c: fono inibitoria
della variabilità
di campo magnetico

conversione infinitesima da meccanica ad elettrica in una macchina funzionante da generatore.

$$dW_m = dW_{mp} + dW_{ms} + dW_{me}$$

dalla parte dell'albero, supponendo ci siano solo le perdite per attrito, si ha l'equazione della coppia:

$$C_m = b\Omega + J \frac{d\Omega}{dt} + C$$

C_m = coppia esterna applicata all'albero

Ω = velocità angolare dell'albero

$b\Omega$ = coppia d'attrito

$J \frac{d\Omega}{dt}$ = C_{ms} coppia d'inerzia

C = coppia elettromagnetica prodotta dalla variazione di campo magnetico.

moltiplicando ambo i membri per Ωdt si ottiene un'altra forma del bilancio energetico

$$C_m \Omega dt = b\Omega^2 dt + J \Omega d\Omega + C \Omega dt$$

dalle ultime due equazioni deriva che

$$C \Omega dt = dW_{me}$$

Se invece consideriamo la conversione da elettrica a meccanica si ha:

$$C = b\Omega + J \frac{d\Omega}{dt} + C_m$$

che moltiplicando ancora per Ωdt dà $C \Omega dt = dW_{em}$

Se si converte l'energia da meccanica ad elettrica si ha $e = Ri + v$ che moltiplicata ambo i membri per $i dt$ dà ancora un'equazione di bilancio energetico, che trascurando le perdite R_{fp} è: $e i dt + R i^2 dt + v i dt$

Riassumendo:

$$\left\{ \begin{array}{l} v = Ri + e \\ e = Ri + v \end{array} \right\} \text{ equazioni elettriche generatore/motore (bilancio delle tensioni)}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} C_m = b\Omega + J \frac{d\Omega}{dt} + C \\ C = b\Omega + J \frac{d\Omega}{dt} + C_m \end{array} \right\} \text{ equazioni meccaniche generatore/motore (bilancio delle coppie)}$$

La coppia elettromeccanica convertita in elettrica, rappresenta la reazione del campo al decoppiamento all'albero del convertitore.

riduzione di corrente e assorbimento di energia meccanica dal sistema esterno con la conseguente conversione.

inverte

continua domanda 8

Per convenzione la macchina può essere rappresentata come due bipoli decouplati, uno elettrico e uno meccanico, in cui la potenza convertita rappresenta l'elemento di connessione.

Considerando solo le perdite P_{ep} (potenza elettrica persa) e P_{mp} (potenza meccanica persa).

APPLICHIAMO:

CONVENZIONE UTILIZZATORI $\rightarrow$ lato elettrico (potenza positiva entrante)

CONVENZIONE GENERATORI $\rightarrow$ lato meccanico (potenza meccanica positiva se erogata)

MOTORE convenzione utilizzatori lato elettrico

$$V = Ri + e$$

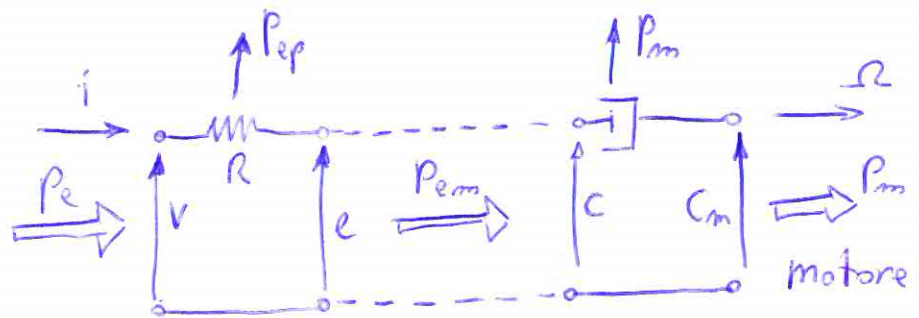
$$P_e = +P_{ep} + P_{em}$$

$$C = b\Omega + C_m$$

$$P_{em} = P_{mp} + P_m$$

$$P_e = P_{ep} + P_{mp} + P_m$$

$$C = \frac{P_{em}}{\Omega} = \frac{P_e - P_{ep}}{\Omega} = \frac{P_m + P_{mp}}{\Omega}$$



GENERATORE convenzione utilizzatori dal lato meccanico (potenza meccanica positiva se erogata)
(potenza elettrica positiva se erogata)

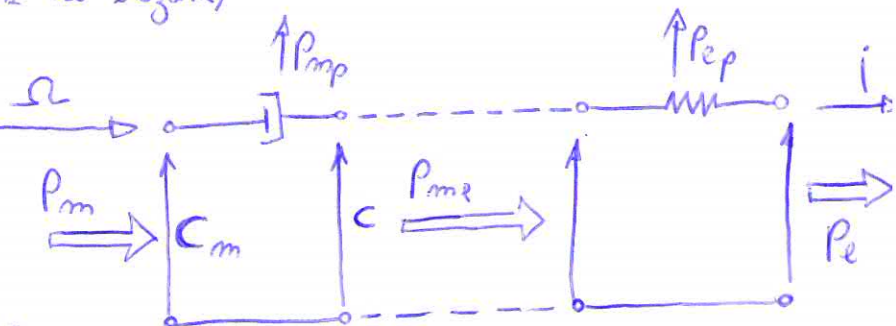
$$C_m = b\Omega + C \quad \text{equazione meccanica}$$

$$P_m = P_{mp} + P_{me} \quad \text{bilancio meccanico}$$

$$e = Ri + v \quad \text{equazione elettrica}$$

$$P_{me} = P_{ep} + P_e \quad \text{bilancio complessivo}$$

$$C = \frac{P_{me}}{\Omega} = \frac{P_m - P_{mp}}{\Omega} = \frac{P_e + P_{ep}}{\Omega} \quad \text{oppo elettromagnetica}$$



NOTA: se fissata una convenzione la potenza risulta positiva allora la macchina funziona secondo quella convenzione altrimenti in quella opposta.

• V e e e C_m e C sono grandezze che hanno lo stesso segno.

conv. motore	conv. generatore	
$C = \frac{P_e}{\Omega} = \frac{P_m + P_{mp}}{\Omega}$	$C = \frac{P_m - P_{mp}}{\Omega} = \frac{P_e}{\Omega}$	potenze elettriche trascurate
$C = \frac{P_e - P_{ep}}{\Omega} = \frac{P_m}{\Omega}$	$C = \frac{P_m}{\Omega} = \frac{P_e + P_{ep}}{\Omega}$	potenze meccaniche trascurate

Domanda 9)

sollecitazioni elettrodinamiche in un trasf. a bobine concentriche

Domanda 10) Diagrammi di Blondel e delle due reattanze

I diagrammi di Blondel e delle due reattanze si applicano alle macchine sincrone a poli sporgenti con la diversificazione:

Blondel $\rightarrow$ circuito magnetico saturo

due reattanze $\rightarrow$ circuito magnetico non saturo

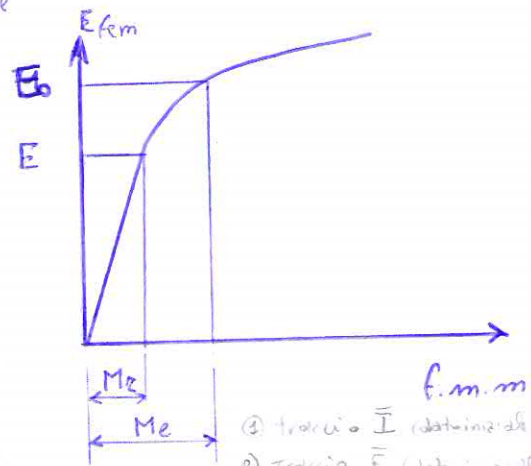
Per tracciare entrambi è necessario conoscere la caratteristica di magnetizzazione che restituisce il modulo del vettore M_e della f.m.m di reazione, e M_e della forza magnetica di eccitazione, questo alla f.e.m a vuoto E_0 , mentre la prima alla f.e.m a carico E .

Blondel Sono note $\bar{E}_0, \bar{I}, \gamma$ quindi possiamo tracciare

le componenti diretta e in quadratura della corrente, I_d e I_q di ampiezza $I \sin \gamma$ e $I \cos \gamma$. Dalle unit. a vuoto si ricava l'ampiezza della f.m.m. $M_e = M_e I_e$ corrispondente a E_0 e si porta in anticipo di $\frac{\pi}{2}$ la f.m.m. M_e le costanti K_d e K_q valgono:

$$K_d = 0,85 \quad K_q = 0,43$$

si ha che $\bar{M}_e = \bar{M}_e + K_d \bar{M}_d + K_q \bar{M}_q$ (al punto 6) costruisce questa somma vettoriale



- 1) traccio $\bar{I}$ (dato iniziale)
- 2) traccio $\bar{E}_0$ (dato iniziale)
- 3) traccio I_q componente in quadratura
- 4) traccio I_d componente diretta di I

- 5) $\bar{E}_0$ è in ritardo di $\frac{\pi}{2}$ su $\bar{M}_e$ (la cui ampiezza si ricava dal diagramma della caratteristica a vuoto)

- 6) si scende in fase con $\bar{M}_e$ di $K_d \bar{M}_d$

- 7) si sale di $K_q \bar{M}_q$

- 8) si traccia la parallela a $\bar{I}$ sulla punta di $K_q \bar{M}_q$

- 9) traccio la parallela a $\bar{E}_0$ sulla punta di $\bar{M}_e$

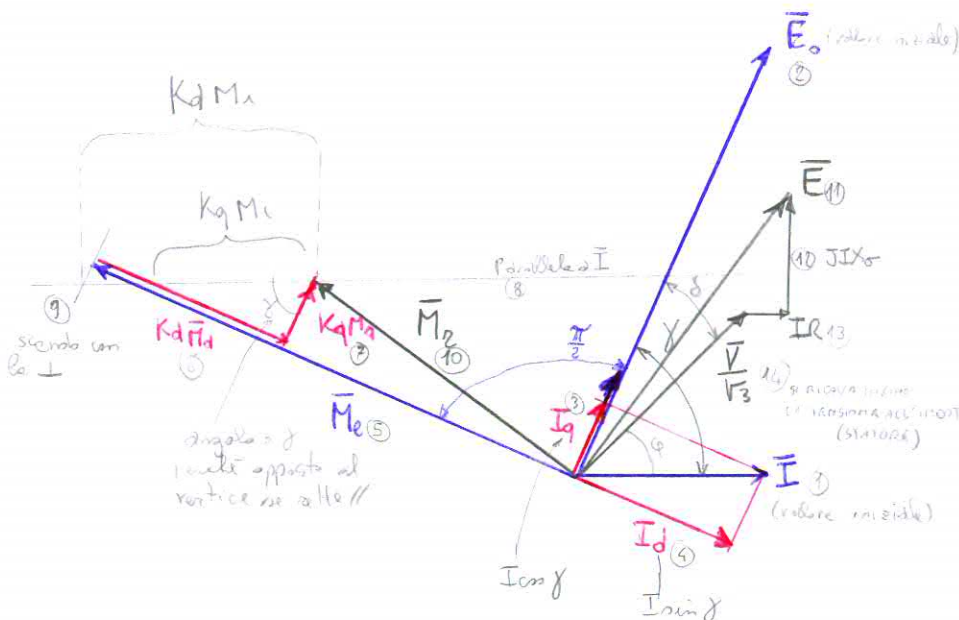
- 10) traccio $\bar{M}_e$ dall'origine

- 11) in ritardo di $\frac{\pi}{2}$ traccio $\bar{E}$ la cui ampiezza viene dalla caratteristica a vuoto

- 12) scalo della costante induttiva X_d

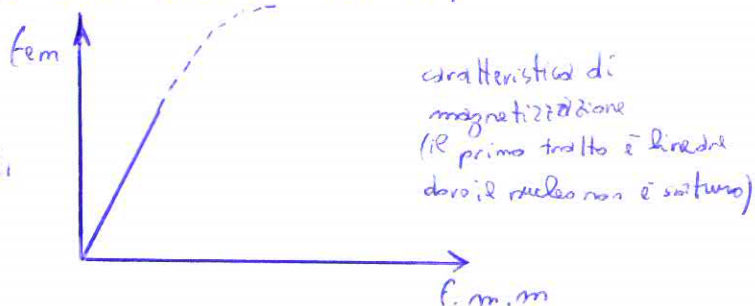
- 13) scalo della costante omica R

- 14) trova la tensione di morsetti $\bar{V}$ alle condizioni di carico scelte



Due reattanze si premette che essendo valido per circuiti magnetici non salaturi, questo diagramma è collegato al tratto lineare della caratteristica di magnetizzazione. Il diagramma delle due reattanze è anche detto "di sole tensioni".

ci sono in gioco 3 f.m.m., la M_e , M_d e M_q . La X_i è la reattanza di reazione in quadratura.



Indicata con X_i la reattanza di reazione corrispondente alla f.m.m. $M_i = mI$, alle f.m.m. $K_d M_d$ e $K_q M_q$ corrispondono le reattanze di reazione diretta e in quadratura

$$X_{id} = K_d X_i$$

985

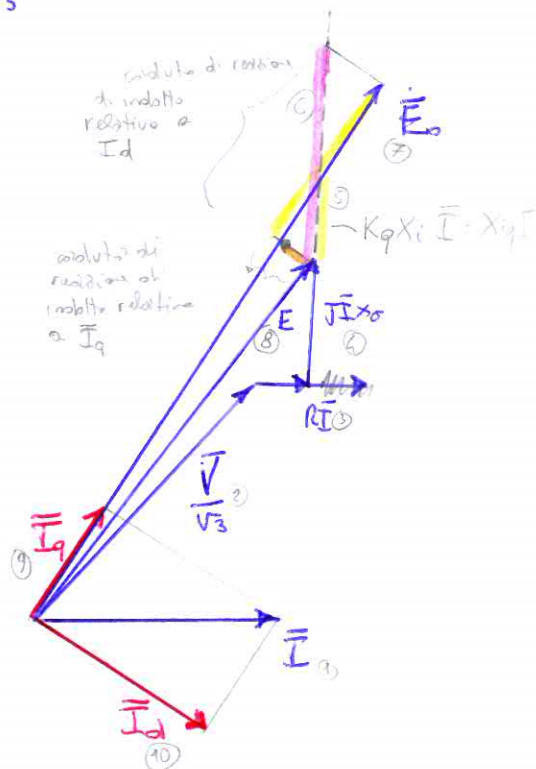
$$X_{iq} = K_q X_i$$

943

dalle quali, sommando la reattanza di dispersione X_σ si ottiene la REATTANZA SINCRONA DIRETTA e la REATTANZA SINCRONA IN QUADRATURA

Il diagramma delle due reattanze si traccia usando la sequenza:

$$\vec{I}, \vec{E}_0, \frac{V}{\sqrt{3}}, R\vec{I}, jX_\sigma \vec{I}, X_{iq} \vec{I}$$



dopo aver tracciato fino al punto $jX_\sigma \vec{I}$ si prolunga verso l'alto questo vettore

- il primo tratto $X_{iq} \vec{I} = K_q X_i \vec{I}$ identifica il punto attraverso cui passerà $\vec{E}_0$

- il secondo tratto che ha origine sempre dalla punta di $jX_\sigma \vec{I}$ e di valore pari a $X_{id} \vec{I} = K_d X_i \vec{I}$ identifica, scendendo dalla sua punta con una perpendicolare su $\vec{E}_0$, il modulo di $\vec{E}_0$

- $K_q X_i \vec{I} = X_{iq} \vec{I}$ (ora tracciamo le componenti dirette e in quadratura di $\vec{I}$ su $\vec{E}_0$)
- $K_d X_i \vec{I} = X_{id} \vec{I}$

- unendo le punte di $jX_\sigma \vec{I}$ con l'origine si trova la fem e carico $\vec{E}$

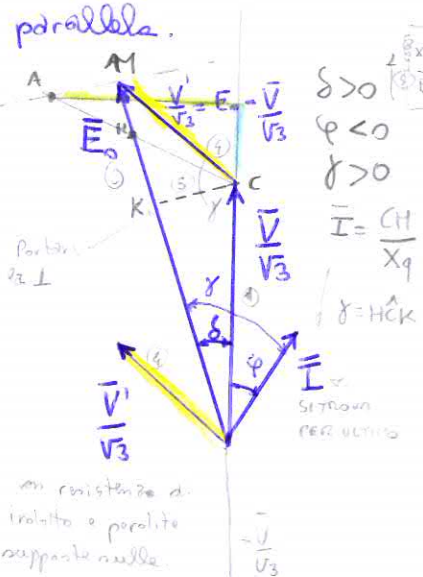
- Resta definita anche la caduta di indotto, relativa a I_q (quindi parallela a I_q) con origine sulla punta di $jX_\sigma \vec{I}$

- Resta definita la caduta di reazione di indotto relativa a $\vec{I}_d$

11) Diagramma polare della macchina sincrona a poli sporgenti e calcolo della potenza attiva e della coppia elettromagnetica.

consideriamo inizialmente il diagramma del generatore sovraccaricato a poli sporgenti, e dividiamo ogni vettore per X_d . Cambiando le coordinate, riferendo cioè il vettore della tensione all'indotto sulle ascisse si ottiene il diagramma polare per la macchina sincrona a poli sporgenti.

Si tracciano i vettori $\frac{\bar{V}}{\sqrt{3}}$ e $\bar{E}_0$ oltre a $\frac{\bar{V}'}{\sqrt{3}} = \left(\bar{E}_0 - \frac{\bar{V}}{\sqrt{3}} \right)$ che chiude la somma vettoriale, ma che viene anche spostato sull'origine con una traslazione parallela.



calcolo potenza attiva: si conduce da A la parallela a $\frac{\bar{E}_0}{X_d}$, trovando il diametro della circonferenza OS e centro O'. F è l'intersezione con la circonferenza. $AF = \frac{E_0}{X_d}$
 $OF = MA$ (c'è un rettangolo). $SFO = \gamma$ $FSO = \delta$

essendo $\bar{CK} = \frac{X_q}{X_d} I \cos \gamma$ $\bar{MA} = \bar{CA} \cos \gamma = \bar{CK} \cos \gamma = \frac{X_d - X_q}{X_d} I \cos \gamma$

dalla similitudine dei triangoli SFO e OKC si ricava:

$$\frac{OS}{OF} = \frac{OC}{CK} = \frac{OC}{MA} = \frac{X_d - X_q}{X_d} \cdot \frac{V}{V_3}$$

Risultando

$$SA = FA + SF = OF + OS \cos \delta = \frac{E_0}{X_d} + \frac{X_d - X_q}{X_d} \frac{V}{V_3} \cos \delta$$

$$\text{si ha } \bar{AB} = SA \sin \delta = \frac{E_0}{X_d} \sin \delta + \frac{X_d - X_q}{X_d} \frac{V}{V_3} \sin \delta \cos \gamma$$

quindi

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

$$= \frac{\sqrt{3} V E_0}{X_d} \sin \delta + \frac{\sqrt{3} V (X_d - X_q)}{2 X_d X_q} \sin 2\delta$$

La coppia frenante c sviluppata vale

$$c = \frac{P_m}{\Omega} = \frac{P_e}{\Omega}$$

quindi si sostituisce e si divide per Ω

$$c = \left(\frac{\sqrt{3} V E_0}{X_d} \sin \delta + \frac{\sqrt{3} V (X_d - X_q)}{2 X_d X_q} \sin 2\delta \right) \frac{1}{\Omega}$$

(8)

Al punto Z si traccia la parallela al vettore $\frac{\bar{E}_0}{X_d}$ che identifica su la disuso il diametro del cerchio SO

(8) si traccia la circonferenza

si individua un triangolo dentro alla circonferenza e quindi il punto F - $\bar{FA} = \frac{\bar{E}_0}{X_d}$

tracciando la parallela a $\frac{\bar{E}_0}{X_d}$ trovo il diametro del cerchio e posso tracciare il triangolo simile (dunque, a quello giallo). La coppia frenante è data da

$$c = \frac{P_m}{\Omega} = \frac{P_e}{\Omega} = \frac{\sqrt{3} V I \cos \varphi}{\Omega}$$

la potenza P_e e la coppia presentano due componenti

⑥ è il passaggio più complesso, si deve fare il rapporto $\frac{X_q}{X_d}$

$X_q = X_\sigma + X_{iq}$ reattanza sincrona in quadratura

$X_d = X_\sigma + X_{id}$ reattanza sincrona diretta.

e chiamato K il punto del piede della perpendicolare allora si mantenga lo stesso rapporto con un punto H che si trova tra K e M.

si traccia la semiretta dallo punto di $\frac{\bar{V}}{\sqrt{3}}$ al passante per H, si trova il punto A.

tracciando la perpendicolare al prolungamento di

$\frac{\bar{V}}{\sqrt{3}}$ restano definite P_e e Q

Proporzionale alla potenza attiva P_e
 Proporzionale alla pot. reattiva Q

continua →

La potenza P_e e la coppia presentano due componenti

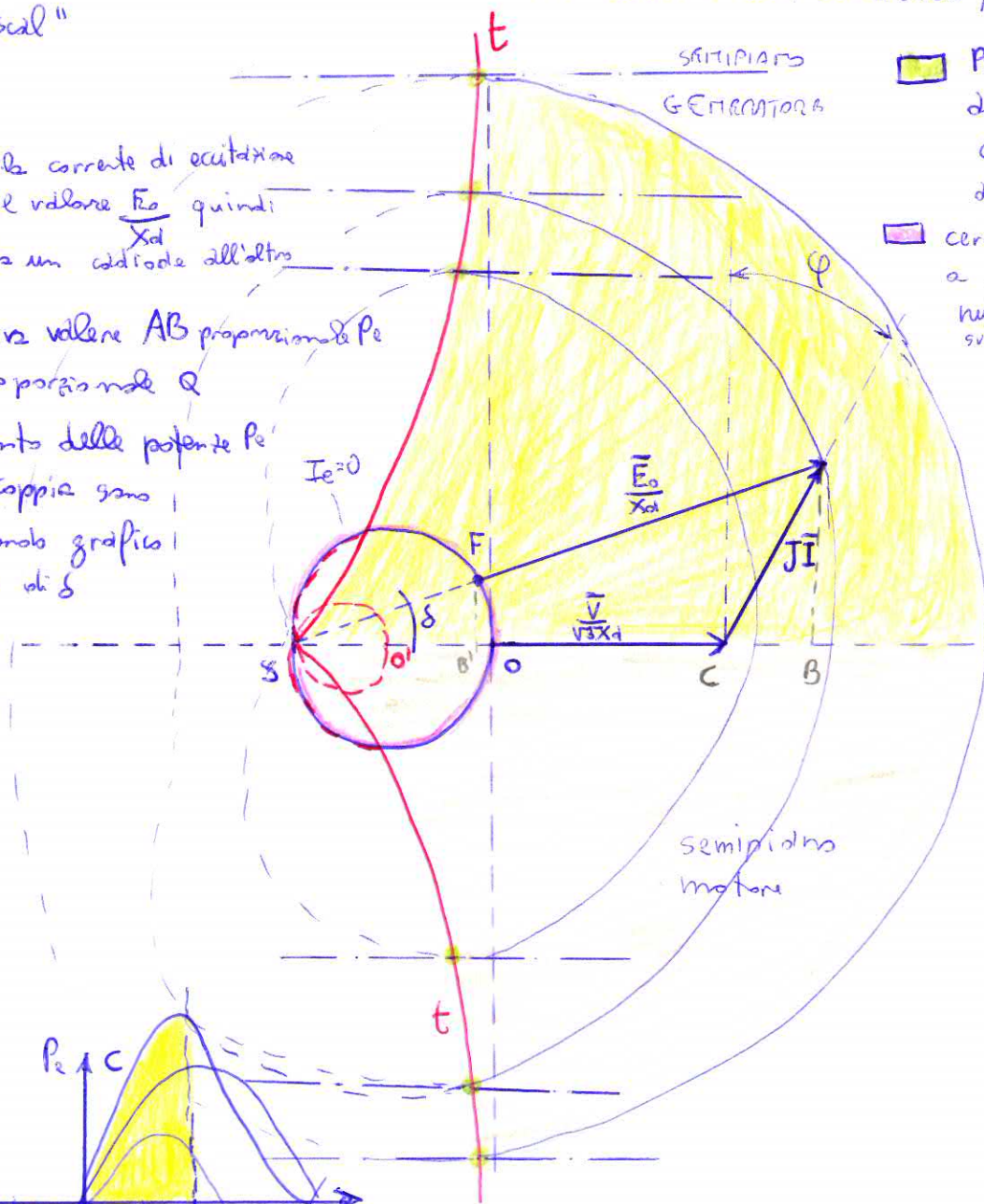
- componente cilindrica (come nella macchina a rotore liscio) è funzione di E_o e quindi della corrente di eccitazione
- componente dovuta all'anisotropia della macchina, indipendente dall'eccitazione e funzione della differenza $(X_d - X_q)$, componente di riluttanza.

costante: con corrente di eccitazione costante, al variare della coppia esterna applicata varia l'angolo δ ma rimane costante $\frac{E_0}{X_d}$ perciò i punti di funzionamento A ad eccitazione costante corrispondono ai punti $\overline{FA}$ di ampiezza costante, dato che $\overline{OS}$ è costante, al variare di δ il punto F sta sempre sulla circonferenza di diametro $\overline{OS}$ mentre A descrive una cardioidi, detta "chiocciola di Pascal".

cambiando la corrente di eccitazione
cambia il valore $\frac{E_o}{X_d}$ quindi
si passa da un valore all'altro

continua in valore AB proporzionale P
e CB proporzionale Q

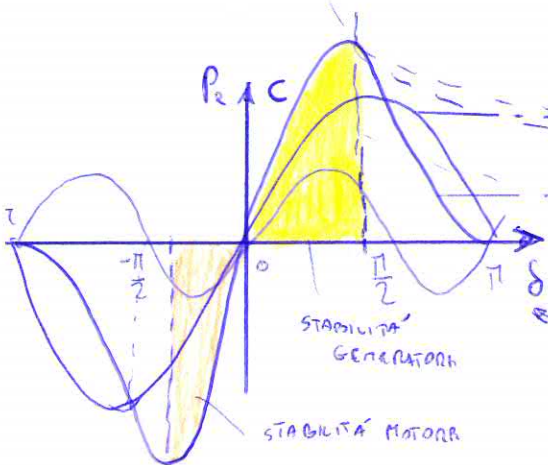
d'innalzamento delle potenze P_e
e della coppia sono
in un secondo grafico
in funzione di δ



 Punti di massima potenza
altina e massima
coppia (per costruzione
altre massime)

cerchio che corrisponde
a corrente di eccitazione
nulla $I_e = 0$ ci sono potenze
sviluppatate per anisotropia della matrice
 P_{ee} e C sono in
funzione della
realizzazione diretta e
in quadratura

curve t del
limite di stabilità
sia come generatore
che come motore.



La stabilità statica ha un angolo inferiore a $\frac{\pi}{2}$.

La coppia ha un valore massimo che dipende dalle condizioni di eccitazione sia dal rapporto $\frac{X_d}{X_d}$ che influenza sulla seconda armonica.

DETERMINAZIONE IN SEDE DI PROGETTO E SPERIMENTALE DEI PARAMETRI DEL CIRCUITO EQUIVALENTE DI UN TRASFORMATORE ^{monofase} NEL FUNZIONAMENTO IN CIRCUITO

I parametri del circuito equivalente del trasf. monofase sono:

P_0 = potenza attiva assorbita a vuoto.

R_0 = resistenza a vuoto X_0 = reattanza a vuoto.

I_a = componente attiva della corrente a vuoto

I_p = componente reattiva della corrente a vuoto

R' = resistenza di c.c.

P_{cc} = potenza attiva assorbita in c.c.

Z_{cc} = impedenza di corto circuito

X' = componente reattiva delle Z_{cc} .

QUESTI PARAMETRI POSSO ESSERE RICAVATI PER VIA SPERIMENTALE O IN SEDE DI PROGETTO.

SEDE SPERIMENTALE: SI ESEGUONO DUE PROVE:

1) Prova a vuoto (PER TROVARE R_0 e X_0)

2) Prova in c.c. (PER TROVARE R' e X')

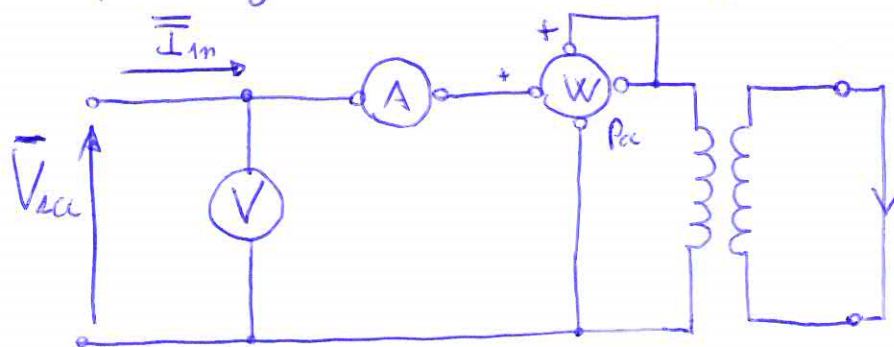
La domanda è specifica per il funz. in corto circuito. Si devono quindi

IN SEDE SPERIMENTALE

cortocircuitare i terminali del secondario, mentre quelli del primario vengono alimentati a quella particolare V_1 ridotta, chiamata V_{cc} che farà scorrere nei circuiti primario e secondario la I_m .

Essendo R_{12} e X_{12} molto piccole rispetto a R_0 e X_0 , la corrente assorbita dal ramo derivato si trascura. La caduta di tensione nel trasformatore è localizzata su $R' = R_1 + R_{12}$ e su $X' = X_1 + X_{12}$

Mettiamo quindi gli strumenti come in figura:



dove si considerano gli strumenti ideali

da $P_{cc} = R' I_m^2$ si ricava

$$R' = \frac{P_{cc}}{I_m^2} \quad \text{dato che } \bar{V}_{cc} = \bar{Z} \cdot \bar{I} \quad \text{si calcola}$$

$$\bar{Z}_{cc} = \frac{V_{cc}}{I_m} \quad X' = \sqrt{Z_{cc}^2 - R'^2}$$

In sede di progetto, ovvero prima di avere la macchina fisica a disposizione, si calcola la resistenza $R' = R_1 + R_2$ e partire dalla potenza di corto circuito:

$$R' = R_1 + R_2 = \frac{P_{cu1}}{I_m^2} + \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 \frac{P_{cu2}}{I_m^2} = \frac{P_{cu}}{I_m^2}$$

La corrente I_m è un dato del problema, il calcolo di R' richiede la valutazione delle potenze P_{cu1} e P_{cu2} messe in gioco per effetto Joule nei rispettivi avvolgimenti.

$$P_{cu1} = K_1 \int \delta_{1m}^2 S_1 l_1 \quad P_{cu2} = K_2 \int \delta_{2m}^2 S_2 l_2$$

δ_{1m} → lunghezza conduttore al primario
 S_1 → sezione conduttori
 δ_{1m}^2 → densità di corrente
 K_1 → resistività dei conduttori

coefficienti che tengono conto delle perdite addizionali a causa delle correnti parassite indotte nei conduttori dai flussi di dispersione e della eventuale disuniformità della distribuzione della corrente all'interno dei conduttori - effetto pelle.

La reattanza di dispersione $X' = X_1 + X_2$ si calcola in base all'energia immagazzinata nel campo magnetico messo in gioco negli avvolgimenti.

$$W = \frac{1}{2} L I^2$$

se valore infinitesimo di energia immagazzinata in un volume dv permeato dal campo $\vec{H}$ e da una induzione B vale

$dw = \frac{1}{2} H \cdot B dv$, se si integra rispetto al volume in cui c'è campo H si ricava W e quindi il valore di L

$$W = \frac{HBV}{2} \Rightarrow \frac{HBV}{2} = \frac{1}{2} L I^2 \Rightarrow L = \frac{HBV}{I^2}$$

ci sono ora tre possibili situazioni (in cui agiscono L)

- AVVOLGIMENTI A BOBINE CONCENTRICHE
- AVVOLGIMENTI A BOBINE DOPPIO CONCENTRICHE
- AVVOLGIMENTI A BOBINE ALTERNATE

continua →

continua domanda 14.

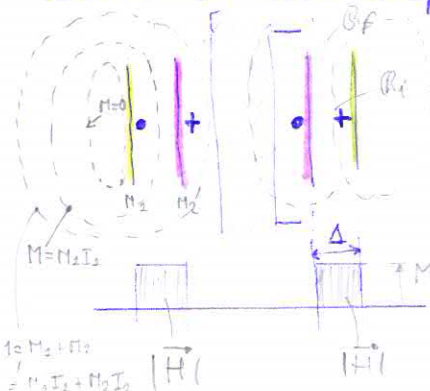
L avvolto a bobine concentriche su nucleo a colonna

• h = altezza uguale per le due bobine di N_1 e N_2 spire, molto maggiore del diametro D

• Δ_1 e Δ_2 sono gli spessori degli avvolgimenti e Δ distanza tra molto minore di h

• la corrente è verso o via trascurabile perciò $\vec{M}_1 + \vec{M}_2 = 0$ ossia $N_1 \vec{I}_1 = -N_2 \vec{I}_2$.

Consideriamo nullo lo spessore delle bobine $\Delta_1 = \Delta_2 = 0$ si ottiene la figura:



Il diagramma delle f.m.m. messe in gioco ha una forma rettangolare.

R_{a1} = riluttanza aria R_{p1} = riluttanza esterna del percorso il ferro.

R_{i1} = riluttanza percorso intermedio tra le bobine.

$$R_{i1} = \frac{h}{\mu_0 S_i} \gg R_{a1}, R_{p1} \quad \text{con } S = \pi D \Delta$$

si trascurano le altre e si considera solo la R_{i1} .

si applica la legge di Ohm per i circuiti magnetici, si ricava quindi il valore del campo H messo in gioco da f.m.m. $M_1 = N_1 I_1 \neq N_2 I_2$

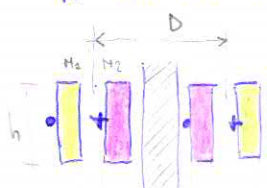
$$N_1 I_1 \approx \oint B_{i1} = \mu_0 H S_i \frac{h}{\mu_0 S_i}$$

RISULTA INFATTI

$$H = \frac{N_1 I_1}{h}$$

dove H è l'altezza delle bobine.

nel caso reale in cui $\Delta_1 = \Delta_2 \neq 0$ il grafico mostra una forma del campo H diversa diversa da rettangolare, ad esempio:



il diagramma si determina in base al principio di sovrapposizione degli effetti: si arriva a un diagramma di f.m.m. e quindi di H , di tipo trapezoidale con valore massimo $|\vec{H}| = \frac{N_1 I_1}{h}$.

l'energia immagazzinata è: $dW = \frac{1}{2} H \cdot B dl$

con $H = \frac{x}{\Delta_2} \frac{N_1 I_1}{h}$ e $dv \approx \pi D dx h$ integrando si trova l'energia totale

$$W_{02} = \int \frac{1}{2} \mu H^2 dv = \int_0^{\Delta_2} \frac{\mu}{2} \left(\frac{x}{\Delta_2} \frac{N_1 I_1}{h} \right)^2 \pi D h dx = \frac{\mu}{2} \frac{N_1^2 I_1^2}{h} \pi D \frac{\Delta_2}{3}$$

μ = permeabilità degli avvolgimenti.

energia accumulata nello spazio tra le bobine $W_1 = \mu_0 \frac{N_2^2 I_2^2}{2h} \pi D \frac{\Delta_1}{3}$

Lo stesso calcolo nell'altra bobina dà un analogo risultato.

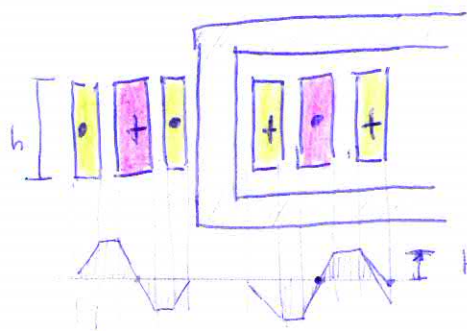
$$W_{01} = \mu \frac{N_2^2 I_2^2}{2h} \pi D \frac{\Delta_1}{3} \quad \text{la totale energia è } W = W_{01} + W_{02}$$

indicata con L l'induttanza di dispersione della coppia di bobine, si ha:

$$W = \frac{1}{2} L I_1^2 = \frac{1}{2} \frac{x}{\omega} I_1^2 = \frac{\mu_0}{2} \frac{N_1^2 I_1^2}{h} \pi D \left(\Delta + \frac{\Delta_1 + \Delta_2}{3} \right)$$

$$L = \mu_0 \frac{N_1^2}{h} \pi D \left(\Delta + \frac{\Delta_1 + \Delta_2}{3} \right)$$

Avvolgimenti a bobine concentriche



si deve supporre che le bobine B.T. (vande) siano composte di due gruppi collegati in serie con un ~~numero~~ numero di spine pari a $\frac{N_1}{2}$ e $\frac{N_2}{2}$ con spessori $\frac{\Delta_1}{2}$ e $\frac{\Delta_2}{2}$

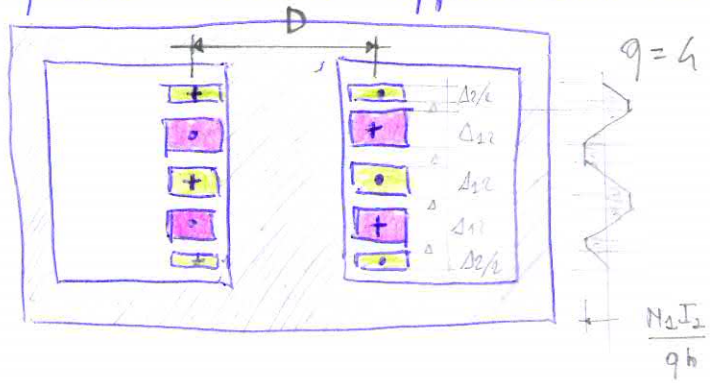
Procedendo in maniera analoga al caso precedente si ricava la reattanza dove si sostituisce N_1^2 al posto di N_2^2 e $\frac{\Delta_1 + \Delta_2}{6}$ al posto di $\frac{\Delta_1 + \Delta_2}{3}$. si moltiplica per 2 per tenere conto dei due gruppi di bobine in serie.

$$X' = \omega \mu_0 \frac{N_1^2}{2h} \pi D \left(\Delta + \frac{\Delta_1 + \Delta_2}{6} \right)$$

Nella configurazione a bobine doppio concentriche la reattanza di dispersione è circa $\frac{1}{4}$ di quella nella configurazione a bobine concentriche.

Avvolgimenti a bobine alternate.

si usano in trasformatori con nucleo centrato e presentano bobine esterne formate da metà spine rispetto a quelle interne appartenenti allo stesso avvolgimento.



$$W = q \frac{\mu_0}{2} \left(\frac{N_1}{q} \right)^2 I_1^2 \pi D \left(\Delta + \frac{\Delta_1 + \Delta_2}{6} \right)$$

quindi

$$X' = \omega \mu_0 \frac{N_1^2}{qh} \pi D \left(\Delta + \frac{\Delta_1 + \Delta_2}{6} \right)$$

I TRE RISULTATI OTTENUTI PER I TRE VALORI SONO:

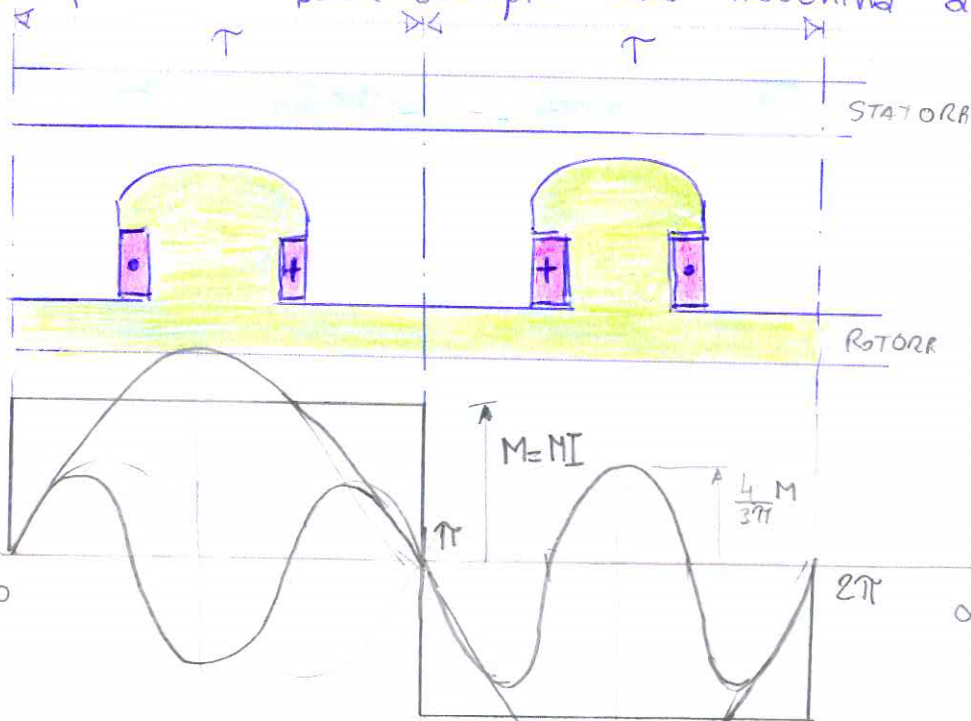
$$X' = \omega \mu_0 \frac{N_1^2}{h} \pi D \left(\Delta + \frac{\Delta_1 + \Delta_2}{3} \right) \quad \text{Bobine concentriche}$$

$$X' = \omega \mu_0 \frac{N_1^2}{2h} \pi D \left(\Delta + \frac{\Delta_1 + \Delta_2}{6} \right) \quad \text{Bobine doppio concentriche}$$

$$X' = \omega \mu_0 \frac{N_1^2}{qh} \pi D \left(\Delta + \frac{\Delta_1 + \Delta_2}{6} \right) \quad \text{Bobine alternate, } q \text{ funge da fattore di miglioramento rispetto alle bobine doppio concentriche.}$$

15) Determinazione della f.m.m. di eccitazione e del flusso nel funzionamento a vuoto di una macchina sincrona isotropa e anisotropa.

Un avvolgimento concentrato di rotore, alimentato in continua come è consuetudine in una macchina sincrona, mette in gioco al traferro una f.m.m. rettangolare di ampiezza $M = NI$ dove N è il numero di spire per polo dell'avvolgimento e i la corrente che lo percorre. Indichiamo con τ il semipasso polare, e rettifichiamo come esempio una macchina a due poli.



coordinate
elettriche

$$\alpha = \frac{x}{\tau} \pi$$

Scomponendo la f.m.m. M in serie di Fourier si ottiene solo componenti di ordine dispari "ovvero in seno"

$$\alpha = \frac{x}{\tau} \pi$$

in un avvolgimento distribuito di tipo aperto, percorso da una corrente continua, come è il nostro caso dato che la macchina è sincrona, si genera una distribuzione spaziale di f.m.m. A GRADINI, FISSA rispetto all'avvolgimento. di ampiezza

$$M_{(q=1)} = \frac{n}{2} i \rightarrow M = \frac{nqi}{2}$$

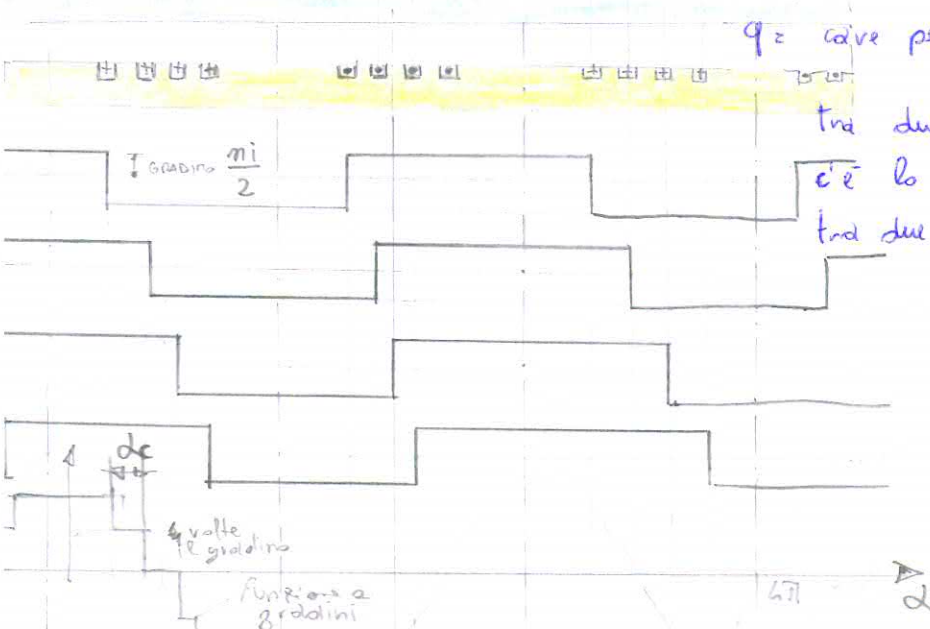
n = numero di conduttori per cave
 i = corrente che lo percorre

q = cave per polo (il diagramma presenta q gradini, sommati tra loro)

tra due dei diagrammi rettangolari da sommare c'è lo spostamento pari alla distanza elettrica tra due cave consecutive

$$\alpha_c = \frac{x_c}{\tau} \pi$$

CONTINUA



~~non sporgenti~~
 nella macchina sincrona a poli sporgenti, è possibile, regolando opportunamente le espansioni, avere ~~una induzione~~ lungo la coordinata angolare α , valori di riluttanza associate alle linee di flusso che generino al trasfero una distribuzione sinusoidale della componente radiale dell'induzione, onde se la f.m.m. è rettangolare. valore massimo $M_e = M_e I_e$

motore liscio

La distribuzione della f.m.m. al trasfero è di tipo a gradini, fissa rispetto all'allungamento con valore massimo $M_e = \frac{m_e q_e I_e}{2}$ della scomposizione in serie di Fourier si ha, lungo α :

- f.m.m. fondamentale e una induzione B fondamentale con numero di semipole pari al numero di gruppi di cave con conduttori percorsi da corrente nello stesso verso.

$$M_{e1} = \frac{4}{\pi} M_e K_{e1} = \frac{2}{\pi} m_e q_e I_e K_{e1}$$

← coefficiente dell'allungamento di eccitazione relativo alla fondamentale

- f.m.m. e induzione di terza armonica, con numero di poli triplo della fondamentale di valore massimo:

$$M_{e3} = \frac{4}{3\pi} M_e K_{e3} = \frac{2}{3\pi} m_e q_e I_e K_{e3}$$

- f.m.m. e induzione di quinta armonica con num. di poli quintuplo rispetto alla fondamentale di val. max:

$$M_{e5} = \frac{4}{5\pi} M_e K_{e5} = \frac{2}{5\pi} m_e q_e I_e K_{e5}$$

e successive armoniche dispari.

Per ridurre il contenuto armonico si deve scegliere un opportuno numero di poli o distribuzione delle cave.

Il valore massimo ^{M_{e1} della fondamentale} alla fine dovrà somigliare al valore massimo M_e della distribuzione a gradini.

15)

Determinazione della f.m.m. di eccitazione e del flusso nel funzionamento a vuoto di una macchina sincrona isotropa e anisotropa

Lungo il traferro l'analisi della f.m.m. di eccitazione si fa lungo la coordinata angolare α , fissa rispetto all'avvolgimento di eccitazione e quindi con il rotore.

POLI SPORANTI, ~~III~~ avvolgimento concentrato di Me spire per polo attraversato da I_e . La f.m.m. M_e è rettangolare, fissa rispetto al rotore, all'angolo rotore-statore e statore-rotore $M_e = M_e I_e$ ^{val. max.}. Seguendo i poli si può ottenere una f.m.m. sinusoidale ~~sinusoidale~~ (la componente radiale) anche in presenza di una f.m.m. rettangolare.

ROTORE LISCIO l'avvolgimento di eccitazione è di tipo distribuito, aperto con n_e conduttori per cave, q_e cave per polo, percorso da corrente continua I_e . Al traferro n è una f.m.m. a gradini alternativamente diretta ROTORE-STATORE e STATORE-ROTORE.

$M_e = \frac{n_e q_e I_e}{2}$. Poiché il traferro ha dimensioni costanti, trascurando le cave, la riluttanza risulta costante lungo α quindi la f.m.m. ha un andamento analogo a quello dell'induzione.

Se si scompone il diagramma a gradini lungo α con Fourier si ricava:

• una f.m.m. e una induzione b fondamentale con numero di semionde uguale a quello dei gruppi di cave con conduttori percorsi ^{da I_e} nello stesso verso

1^a $M_{e1} = \frac{4}{\pi} M_e K_{e1} = \frac{2}{\pi} n_e q_e I_e K_{e1}$ con K_{e1} coeff. di avvolgimento della fondamentale

3^a armonica, con numero di poli triplo rispetto alla fondamentale con valore massimo

$M_{e3} = \frac{4}{3\pi} M_e K_{e3} = \frac{2}{3\pi} n_e q_e I_e K_{e3}$

5^a armonica, con numero di poli quintuplo rispetto alla fondamentale con valore massimo

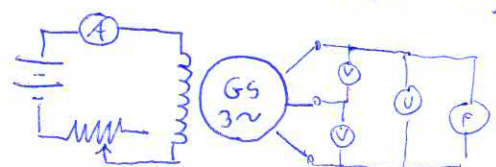
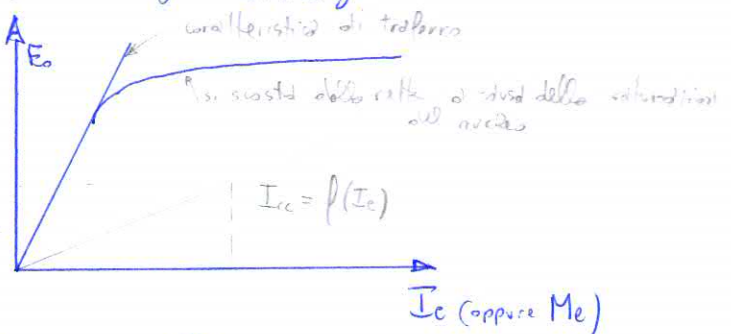
$M_{e5} = \frac{4}{5\pi} M_e K_{e5} = \frac{2}{5\pi} n_e q_e I_e K_{e5}$

Il flusso invece è ricavabile dalla CARATTERISTICA A VUOTO, detta anche

CARATTERISTICA DI MAGNETIZZAZIONE, che fornisce il flusso utile per polo ϕ .

si traccia in funzione di I_e oppure di M_e sia rettangolare che a gradini

Il primo tratto rettilineo, che è proporzionalità ϕ (tra il flusso ϕ e la f.m.m.) a bassi valori di ϕ la permeabilità del ferro è elevata e quindi la riluttanza dei percorsi nel ferro di rotore e statore è trascurabile, ne consegue la f.m.m. viene spesa per vincere la riluttanza al traferro e la semiretta si chiama caratteristica di traferro, poi interviene la saturazione del ferro, la permeabilità diminuisce e la riluttanza aumenta sommandosi a quella del traferro, e la curva piega verso le ascisse.



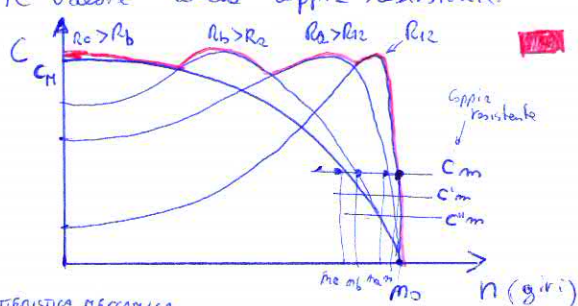
16) MOTORE ASINCRONO TRIFASE: REGOLAZIONE DELLA VELOCITA'

La velocità di un motore asincrono si regola con le seguenti tecniche:

- 1) INSERENDO DELLE RESISTENZE ADDIZIONALI NEI CIRCUITI DI INDOTTO (ROTORE)
- 2) VARIANDO IL NUMERO DI POLI
- 3) VARIANDO L'AMPIEZZA DELLA TENSIONE DI ALIMENTAZIONE
- 4) ALIMENTANDO IL MOTORE CON CORRENTI IMPRESSE DI AMPIEZZA E FREQUENZA VARIABILI

1) con resistenze addizionali (solo per motore di tipo avvolto), ha due inconvenienti, 1) dissipazione di energia più elevata a parità di coppia resistente C_m quanto maggiore è lo scorrimento che viene realizzato.

2) Il campo di regolazione della velocità, legato alla coppia resistente applicata, come risulta dalla stessa figura (vedi sotto). Il campo di regolazione è più stretto più è piccolo il valore della coppia resistente.



andamento complessivo della coppia che si può ottenere con un sistema automatico di commutazione della resistenza rotorica in corrispondenza di precisi valori n della velocità.

CARATTERISTICA MECCANICA

2) con variazione del numero dei poli dalla relazione $n = n_0 (1-s) = \frac{60f}{p} (1-s)$

si vede che si può cambiare la velocità cambiando la n_0 del campo magnetico rotante mediante una modifica del numero dei poli prodotti dagli avvolgimenti di statore e di rotore. PER SEMPLICITA' SI APPLICA A MOTORI CON ROTORE AGABBIATO così è suff. cambiare

il numero di poli del solo avvolgimento di statore.

- commutare le bobine dell'avvolgimento statico.

La variazione di velocità è di tipo 2-1

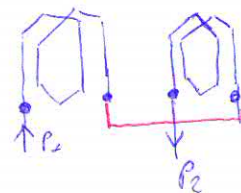
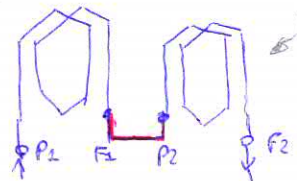
- realizzando più avvolgimenti di statore con numero di poli diverso, ed alimentando quello che interessa per la velocità con la stessa frequenza. Es. 6 poli o 4 poli ovvero velocità 1000 o 1500 giri/minuto.

- combinando le precedenti soluzioni.

si ottiene un asincrono a 4 velocità

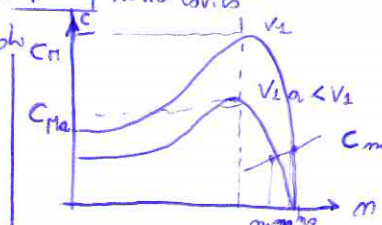
Esempio, due avvolgimenti separati a 12 e 8 poli commutabili a 6 e 4 si ruota al sincronismo di 500, 750, 1000, 1500 giri al minuto.

La regolazione è a gradini



3) Variando l'ampiezza della tensione V_1 di alimentazione del motore, la coppia varia col quadrato V_1 e rimane costante corrispondente alla coppia m_{ax} e la vel. n_0 del campo magnetico rotante. La caratteristica meccanica varia in ampiezza ma non i forma.

Si usa per piccole variazioni continue; molto diffuso



Altri metodi ved. risposta num. 7.

12) Fenomeni legati al funzionamento a carico di un generatore sincrono trifase e reazione di indotto.

γ = ANGOLO TRA $\vec{E}_0$ E $\vec{I}$ sul carico

Se si chiudono i circuiti di indotto su un carico, circola una corrente che ha l'effetto di ~~diminuire~~ ^{cambiare} la tensione di fase, a parità di corrente di eccitazione I_e dal valore E_0 al valore $\frac{V}{\sqrt{3}}$.

$$E_0 = K_{fi} N_{fe} = 2KF K_{is} \phi_f M_i$$

Se si applica una terna simmetrica di fem a vuoto a una terna di impedenze $|Z|$ così nell'indotto circola una terna equilibrata di correnti di frequenza f e di valore eff. $I = \frac{V}{\sqrt{3}Z}$

La macchina fornisce al carico la potenza apparente $P_a = \sqrt{3}VI$ con potenza attiva $P_e = \sqrt{3}VI \cos \varphi$ e potenza reattiva $Q = \sqrt{3}VI \sin \varphi$

L'ANGOLO DI SFASAMENTO φ TRA $\frac{V}{\sqrt{3}}$ e I coincide con l'argomento di Z

Lo sfasamento dipende dal tipo di carico.

Se la potenza attiva è diversa da zero $I \cos \varphi \neq 0$ il generatore sviluppa una coppia freno che fa diminuire la velocità $\Omega = \frac{2\pi n}{60}$

A vuoto la potenza meccanica in ingresso deve compensare le perdite meccaniche P_{mp} (per attrito e ventilazione) e le perdite nel ferro P_{fp} . La coppia esterna applicata all'albero assume il valore $C_{mo} = \frac{P_{mp} + P_{fp}}{\Omega}$

A carico invece per mantenere inalterata la velocità la coppia esterna deve aumentare del valore a vuoto e quello a carico

$$C_m = C + \frac{P_{mp} + P_{fp}}{\Omega}$$

P_{fp} = perdite nel ferro,

La coppia frenante, corrispondente alla potenza convertita da meccanica in elettrica è

$$C = C_m - \frac{P_{mp} + P_{fp}}{\Omega} = \frac{P_e + P_{ep}}{\Omega}$$

$$P_{ep} = 3RI^2$$

continua →

L'ANGOLO γ TRA $\vec{E}_0$ e $\vec{I}$ sul carico dipende dalla natura del carico

continua 17 La tensione d'uscita e la sua variazione da vuoto a carico e dovuta in piccola parte alla caduta ohmica sulla resistenza di una fase dell'avvolgimento di indotto, e della f.m.m. dovuta alla I nell'indotto.

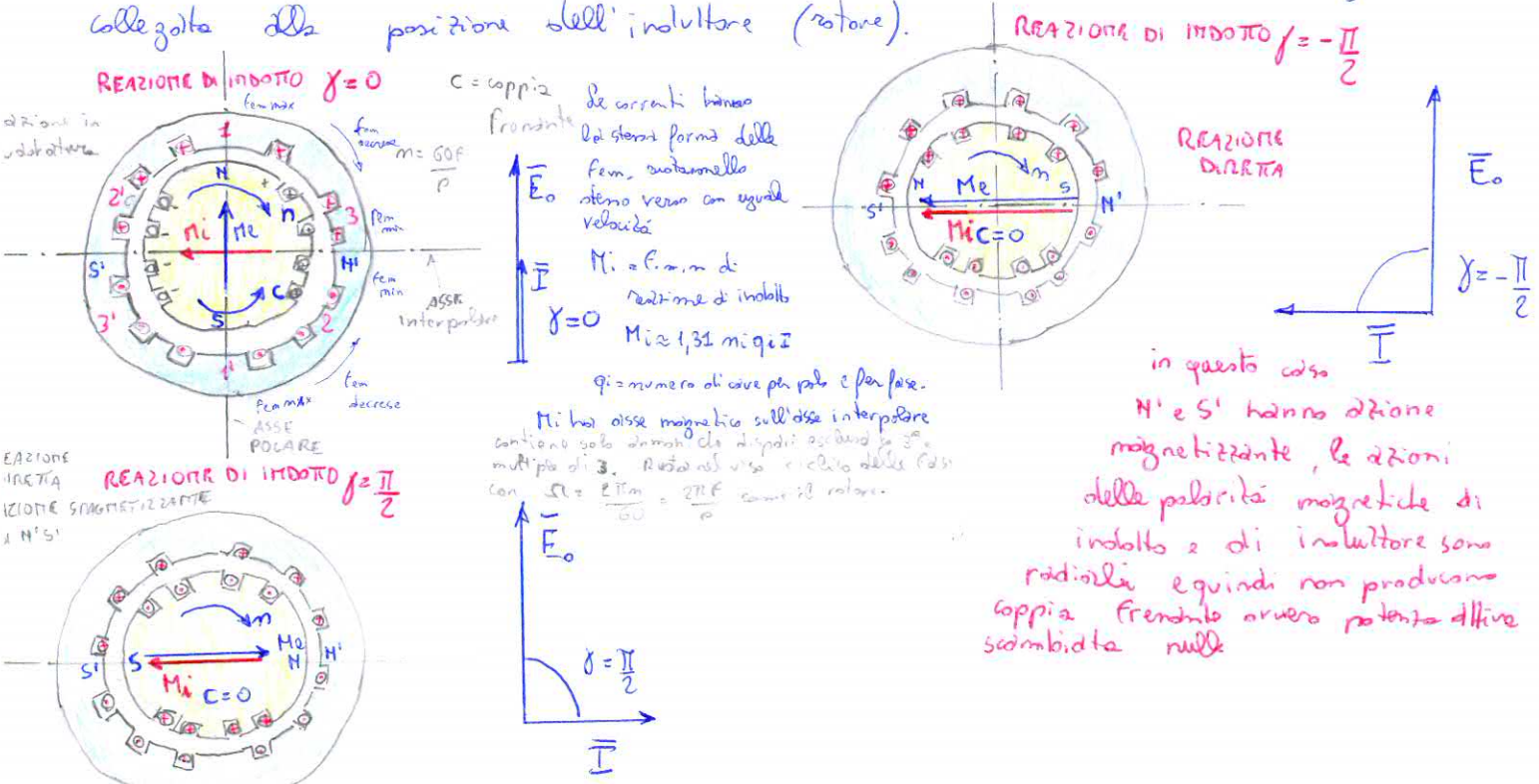
- flussi dispersi che concatenano solo gli avvolgimenti di indotto e che danno luogo, come nei trasformatori alla reazione di dispersione X_σ . questa dà luogo alla caduta induttiva $X_\sigma I$.
- flussi che concatenano anche i conduttori di induttore che di conseguenza alterano il flusso totale prodotto da loro stessi, cioè la f.m.m di eccitazione. con conseguente variazione della f.e.m. indotta su ogni fase distributore, che passa da E_0 a E . si chiamano "flussi di reazione" e il fenomeno è la "reazione di indotto"

NOTA: La coppia C nasce dalla potenza attiva

COPPIA FREMIANTE consideriamo un modello semplificato di macchina

sincrona con rotore liscio, due poli, due cavi per polo e per fase. e sia funzionante con $I \cos \varphi \neq 0$. si verificano i seguenti casi.
Analisi della f.e.m.

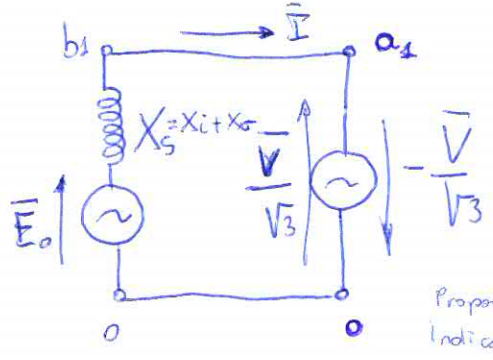
- massima ed entrante nei conduttori posti sotto al polo "N" di eccitazione.
- tra il polo N e ^{interpolare} la f.e.m. ha lo stesso verso e decresce.
- Distribuzione uguale ma versi opposti tra il polo S e l'asse interpolare.
- Quando il rotore ruota la distribuzione delle f.e.m. segue l'induttore spostandosi sì con la stessa velocità. La distribuzione delle f.e.m. è rigidamente collegata alla posizione dell'induttore (rotore).



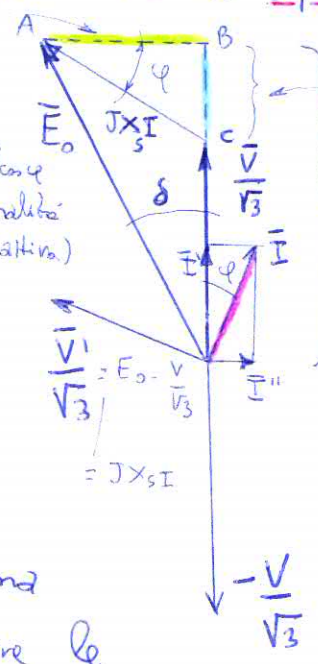
18) DIAGRAMMA POLARE DELLA MACCHINA SINCRONA A ROTORE LISCIO IN PARALLELO ALLA RETE

DOMANDA D'ESAME

Per costruire il diagramma polare:
Consideriamo la macchina inserita in parallelo schematizzata così:



consideriamo il diagramma vettoriale della macchina sopraeccitata $E_0 > \frac{V}{\sqrt{3}}$



Proporzionale a $I \cos \varphi$
Indica proporzionalità con P_e (Potenza attiva)

Proporzionale $I \sin \varphi$ è proporzionale a Q (Pot. reattiva).

$I \perp \frac{V'}{\sqrt{3}}$

$P_e > 0$

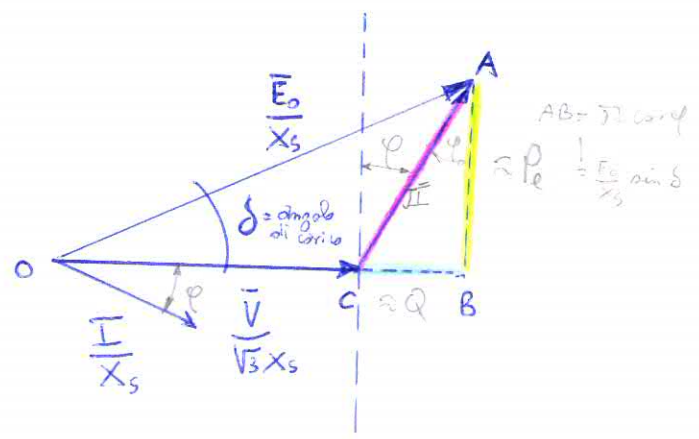
$Q > 0$ eroga potenza induttiva ovvero vista dalla rete assorbe potenza capacitiva.

Proporzionale a P_e ($I \cos \varphi$)

Proporzionale a Q ($I \sin \varphi$)

corrente di indotto $\bar{I}$ statica.

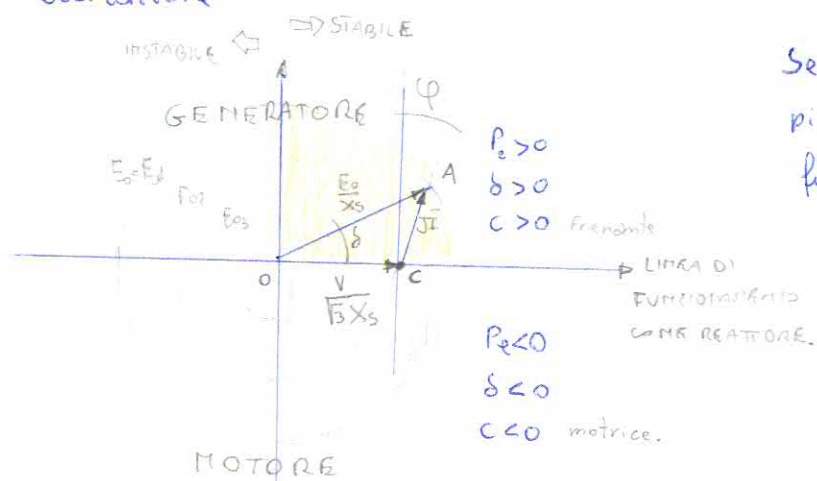
Per la costruzione del diagramma polare continuiamo a trascurare le perdite, usiamo il diagramma vettoriale sovraeccitato, dopo aver diviso ogni vettore per X_s . (consideriamo la macchina non saturata).
dove si dispone il vettore della tensione $\frac{\bar{V}}{\sqrt{3}X_s}$ sulle ascisse.



$P_e = \sqrt{3} V \frac{E_0}{X_s} \sin \delta$

La coppia frenante C sviluppata dalla macchina è: $C = \frac{P_m}{\Omega} = \frac{P_e}{\Omega} = \frac{\sqrt{3} V I \cos \varphi}{\Omega}$
applicando le uguaglianze $I \cos \varphi = \frac{E_0}{X_s} \sin \delta$ si ha $C = \frac{1}{\Omega} \frac{\sqrt{3} V E_0}{X_s} \sin \delta = \frac{P}{\omega} \frac{\sqrt{3} V E_0}{X_s} \sin \delta$

Il diagramma polare in questo caso è tracciato al variare della corrente di eccitazione



Se $S = 0$ ovvero sulle discese, A è più a destra di C , la macchina funziona da reattore capacitivo e X è a sinistra e un reattore induttivo.

$$X_s = X_0 + X_i$$

RedHanz
Sincero na

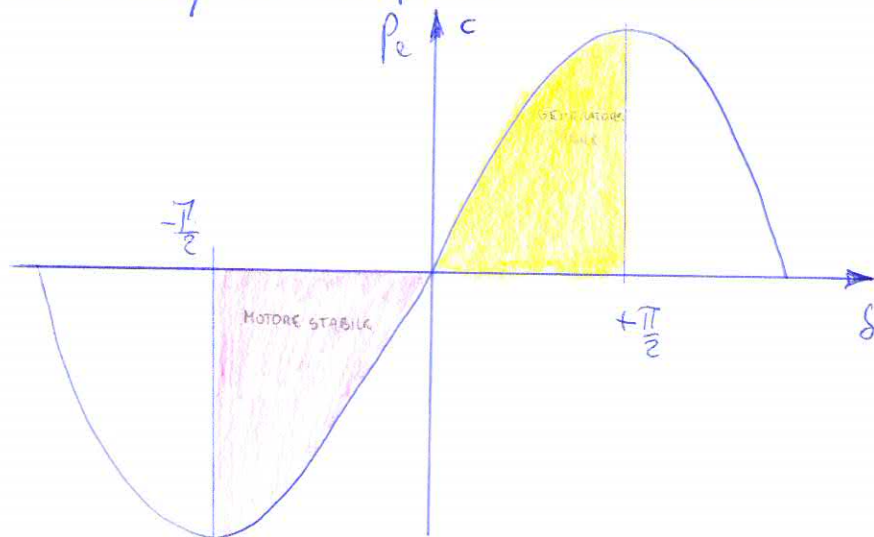
Fluorine
disproportionates

Funktionale Aufgaben

per $\delta > 0$, $P_e > 0$ potenza attiva erogata $C > 0$ coppia frenante

Funzionamento DA Motore

Per $S < 0$, $P_e < 0$ potenza attiva assorbita $C < 0$ coppia motrice

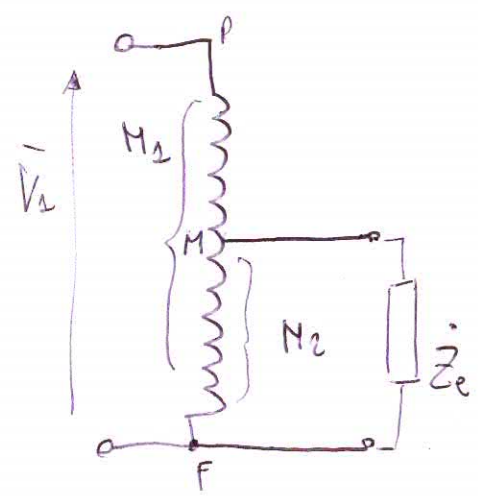


In definitiva il diagramma potere della macchina sincrona a rotore liscio non saturato $R=0$, mette in evidenza oltre al tipo di potenza erogata o assorbita, la funzionalità motore/generatore e funzionalità stabile o instabile.

19) Autotrasformatore

Domanda d'esame

È una macchina elettrica statica avente struttura magnetica identica al trasformatore ma diversificata nel circuito elettrico.
L'unico avvolgimento è parzializzato in una percentuale consona alla trasformazione che si vuole ottenere che può risultare sia di tipo "elevatore" che "riduttore".



- Tutte le spire dell'avvolgimento sono indicate con M_1
- La parte di M_1 riferita al morsetto che rimarrà in comune lo chiameremo M_2 .

$$\frac{V_1}{V_2} = K \quad \text{se } K > 1 \text{ l'autotraf. è riduttore.}$$

$K < 1$ elevatore $\rightarrow V_2 > V_1$

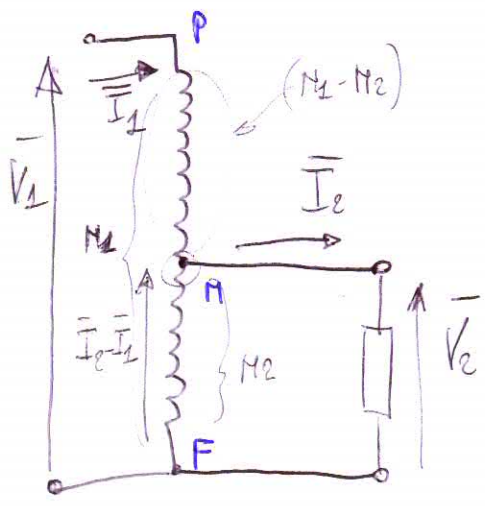
Se consideriamo $\bar{I}_0$ trascurabile vale studio delle maglie dell'autotrasformatore.

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{M_1}{M_2} = K$$

essendo in generale:

$$\underbrace{I_1 (M_1 - M_2)}_{M_1} = \underbrace{(I_e - I_2) (M_2)}_{M_2}$$

f.m.m. = $\bar{I}N$



$$\cancel{\bar{I}_1 M_1} - \cancel{\bar{I}_1 M_2} = \bar{I}_2 M_2 - \cancel{\bar{I}_1 M_2}$$

$$\bar{I}_1 M_1 = \bar{I}_2 M_2 \quad \bar{I}_1 \text{ e } \bar{I}_2 \text{ sono in fase}$$

Potenza apparente trasferita: Bilancio di Pa

$$V_1 I_1 = V_2 I_2 = P_a$$

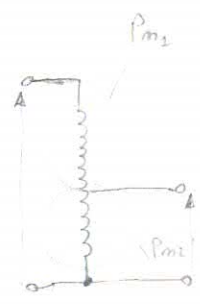
Pot. nominale

$$P_m = V_{1m} \cdot \bar{I}_{1m} = V_{2m} \bar{I}_{2m}$$

L'avvolgimento PM va dimensionato sulla tensione $(V_1 - V_2)$ e sulla corrente $\bar{I}_{1m}$
L'avvolgimento MF va dimensionato per V_2 e per la corrente $(\bar{I}_2 - \bar{I}_1)$

Potenza di dimensionamento

$$\underbrace{(V_{1m} - V_{2m}) \bar{I}_{1m}}_{P_{m1}} = \underbrace{V_{2m} (\bar{I}_{2m} - \bar{I}_{1m})}_{P_{m2}}$$



$$(V_{1m} - V_{2m}) I_{12} = \overbrace{V_{2m} (I_{2m} - I_{1m})}^{\text{potenza di dimensionamento } P_d}$$

prendere il primo membro e moltiplico e divido per $\left(\frac{V_{2m}}{V_{1m}}\right) = 1$

$$(V_{1m} - V_{2m}) \bar{I}_{1m} \left(\frac{V_{1m}}{V_{2m}}\right) \quad \text{compare una potenza} \quad P_m = \bar{I}_{1m} \cdot V_{1m}$$

$$\frac{(V_{1m} - V_{2m}) P_m}{V_{2m}} \quad \text{ora divido numeratore e denominatore per } V_{2m} \text{ (che è al secondo membro)}$$

$$\frac{\frac{V_{1m}}{V_{2m}} - \frac{V_{2m}}{V_{2m}}}{\frac{V_{1m}}{V_{2m}}} \cdot P_m \quad \text{e sostituisco } K = \frac{V_{1m}}{V_{2m}}$$

ottengo

$$\frac{K - 1}{K} \cdot P_m$$

definisco ora

$$K_d = \frac{K - 1}{K} \quad \text{fattore di dimensionamento}$$

sostituendo si ottiene

$$K_d \cdot P_m = P_d$$

La potenza trasferita dal primario al secondario sarà $\overbrace{\text{attraverso il circuito elettrico}}$

$$P_m - P_d = P_m - K_d \cdot P_m = \left(P_m - \frac{K - 1}{K} P_m \right)$$

$$\text{raccolgo } P_m = P_m \cdot \left(\frac{K - 1 - K + 1}{K} \right) = P_m \left(+\frac{1}{K} \right) = \frac{P_m}{K}$$

$$\text{quindi } P_m - P_d = \frac{P_m}{K}$$

20)

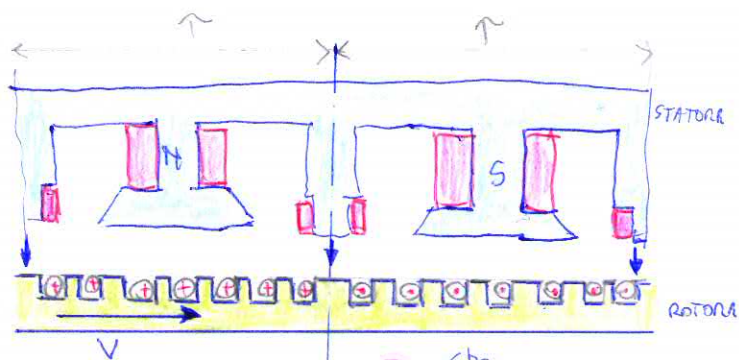
**POLI AUSILIARI ED AVVOLGIMENTI COMPENSATORI in una macchina a corrente continua.
Loro funzionamento, funzione, e diagrammi di f.m.m. e di induzione.**

Nelle macchine in corrente continua, si verifica il fenomeno della commutazione a livello dello spazzole/collettore con addensamento di arcole, riscaldamento dei punti di contatto, formazione di archi e scintillio. Vi sono degli accorgimenti che possono ridurre il fenomeno, uno di questi è l'utilizzo di avvolgimenti ^(Poli) ausiliari e compensatori.

L'utilizzo dei poli ausiliari permette di produrre una f.e.m. indotta E_2 atta a compensare quella di autoinduzione E_1 in ogni condizione di carico cercando di mantenere il piano di commutazione sul piano interpolare. L'espansione dei poli ausiliari è molto stretta rispetto ai principali.

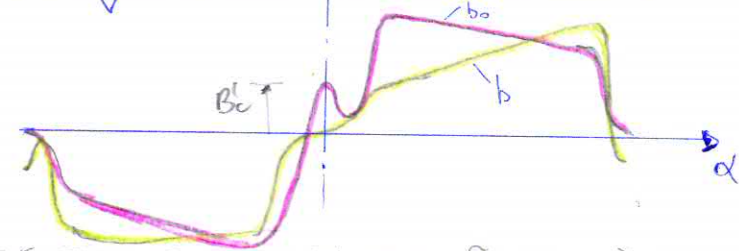
Il circuito di eccitazione è in serie con quello di allettare e sono disposti sul piano interpolare. Sono percorsi dalla stessa corrente di indotto, sono dimensionati in modo da lavorare non in saturazione.

NB. I POLI AUSILIARI HANNO LO SCOPO DI VINCOLARE IL PIANO DI COMMUTAZIONE A STARE SUL PIANO INTERPOLARE. PRODUCE UNA FORZA ELETTROMOTRICE E_2 ATTA A COMPENSARE QUELLA DI AUTOINDUZIONE E_1



■ induzione b_0 a vuoto

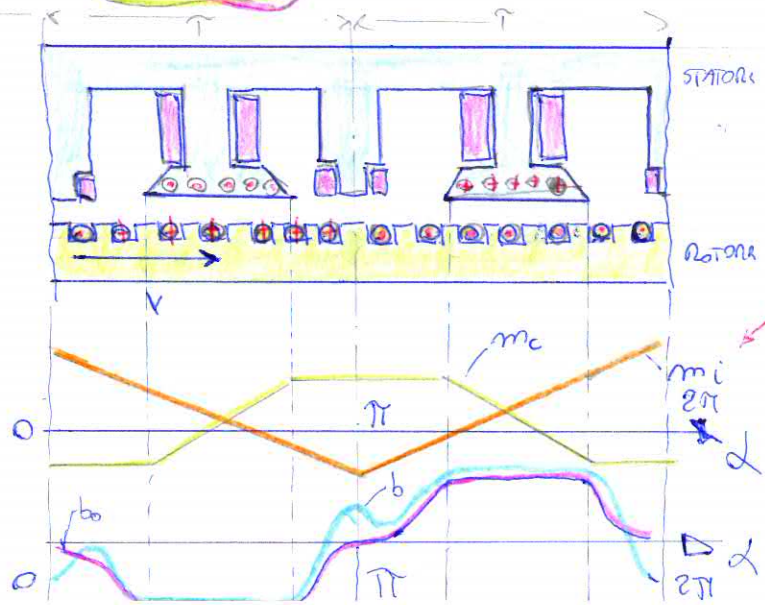
■ induzione b a carico



Il solo impiego dei poli ausiliari non risulta del tutto efficace perché la f.m.m. di reazione di indotto dà luogo a una deformazione della curva dell'induzione, e quindi nelle zone delle spire in commutazione si ha una deformazione dipendente dal carico. Nelle macchine di grande potenza si ricorre agli avvolgimenti compensatori in cui sulle espansioni polari con delle magneti sul piano interpolare e sempre in serie all'avvolgimento di indotto.

Prodotto, sulle espansioni polari, f.m.m. uguale e contraria alla reazione di indotto annulla l'effetto di deformazione della curva dell'induzione. L'assenza di deformazione sotto i poli principali permette un'uniforme distribuzione della tensione tra le lamielle consecutive.

Con i poli ausiliari e avv. compensatori gli effetti si sommano, oltre che con la reazione di indotto, l'induzione b non ha più nessuna deformazione sotto i poli principali e coincide con l'induzione a vuoto b_0 . In corrispondenza del piano di commutazione si ha una induzione B' che produce una f.e.m. E_2 automaticamente uguale a E_1 .



22)

DIAGRAMMI DI POTIER E BEHN-ESHEMBURG, INFLUENZA DEL FATTORE DI POTENZA DEL CARICO SULL'ECITAZIONE E SULLA VARIAZIONE DI TENSIONE

I due diagrammi si applicano alle macchine a rotore liscio

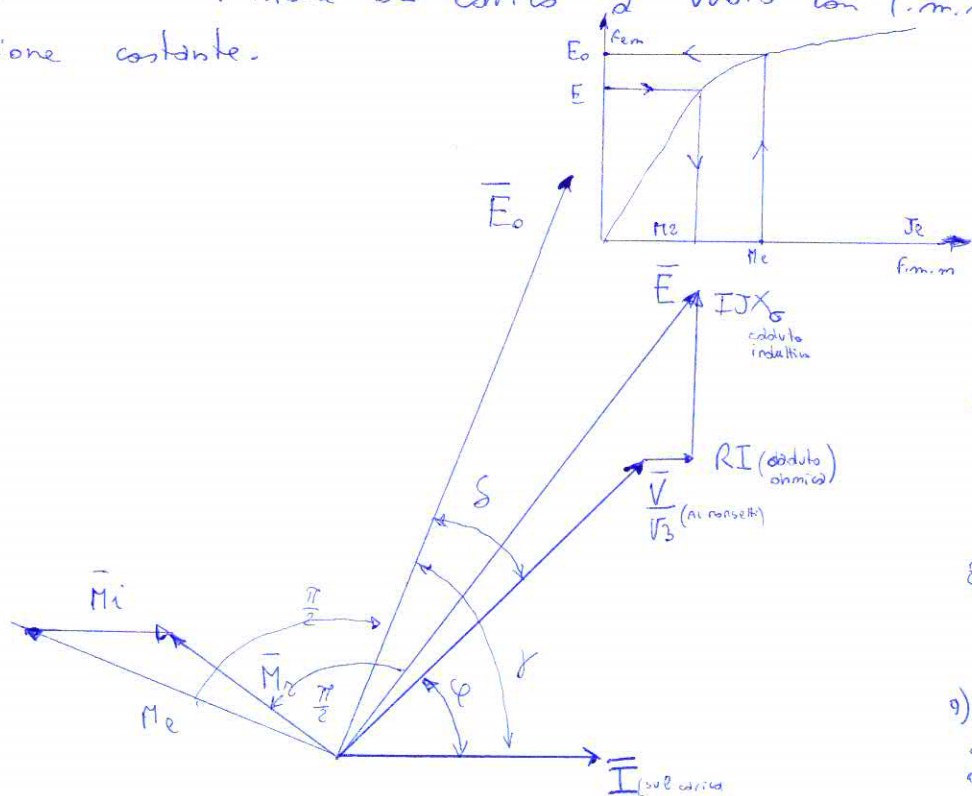
POTIER $\rightarrow$ CIRCUITO MAGNETICO SATURO

BEHN-ESHEMBURG $\rightarrow$ CIRCUITO MAGNETICO NON SATURO

Il motore liscio (trascurando l'effetto delle cune) comporta trasferimento costante quindi le f.m.m. di indotto agiscono su circuiti che hanno la stessa riluttanza qualunque sia il valore di γ (angolo tra la $\vec{E}_0$ a vuoto e la $\vec{I}$ sul carico). La reazione ha quindi lo stesso effetto al variare della natura del carico quindi si possono sommare direttamente i vettori delle f.m.m. di indotto e di induttore (sul diagramma di Potier) oppure sommare direttamente le fem indotte (sul diagramma di BEHN-ESHEMBURG)

POTIER NOTE R e X_o e fissate la tensione di fase $\frac{\bar{V}}{\sqrt{3}}$ in uscita e la corrente $\bar{I}$ sul carico, indipendentemente dalla saturazione, permette di calcolare:

- la f.m.m. di eccitazione che deve produrre l'induttore (e quindi dalla corrente di eccitazione) per ottenere in uscita la tensione nelle condizioni di carico fissate.
- la variazione di tensione da carico a vuoto con f.m.m. (o corrente) di eccitazione costante.



- 1) $\bar{I}$
- 2) $\frac{\bar{V}}{\sqrt{3}}$
- 3) $R\bar{I}$
- 4) $\vec{I}X_o$
- 5) $\vec{E}$ fem risultante indotta in una fase alla ang. costante di carico
- 6) $\vec{M}_2$ che causa $\vec{E}$, è in anticipo di $\frac{\pi}{2}$
- 7) componenti di $\vec{M}_2 = \vec{M}_1 + \vec{I}$ (dalla caratteristica a vuoto trovare $\vec{M}_1$ e poi chiudendo poligono con $\vec{M}_1$)
- 8) $\vec{M}_2$ è in anticipo di $\frac{\pi}{2}$ su $\vec{E}_0$
- 9) mantenendo costante la f.m.m. di induttore, aprire il circuito di indotto (si annullano le cadute $R\bar{I}$ e $\vec{I}X_o$ e la $\vec{M}_1$ agisce la sola $\vec{M}_2$ e quindi sulle caratteristiche a vuoto. Trova il modulo di $\vec{E}_0$, che disegna in ritardo di $\frac{\pi}{2}$ sul Potier
- 10) in modulo, aritmeticamente $E_0 - \frac{V}{\sqrt{3}}$ è ΔV da vuoto a carico

IL DIAGRAMMA DI POTIER MOSTRA COME INFLUISCE IL FATTORE DI POTENZA DEL CARICO SULL'ECITAZIONE E SU ΔV . PER CORRETTI IN RITARDO SU V DA VOTO A CARICO SI HA SEMPRE UNA CADUTA DI TENSIONE, SE I è in anticipo di un angolo maggiore di un certo limite la tensione da vuoto a carico AUMENTA

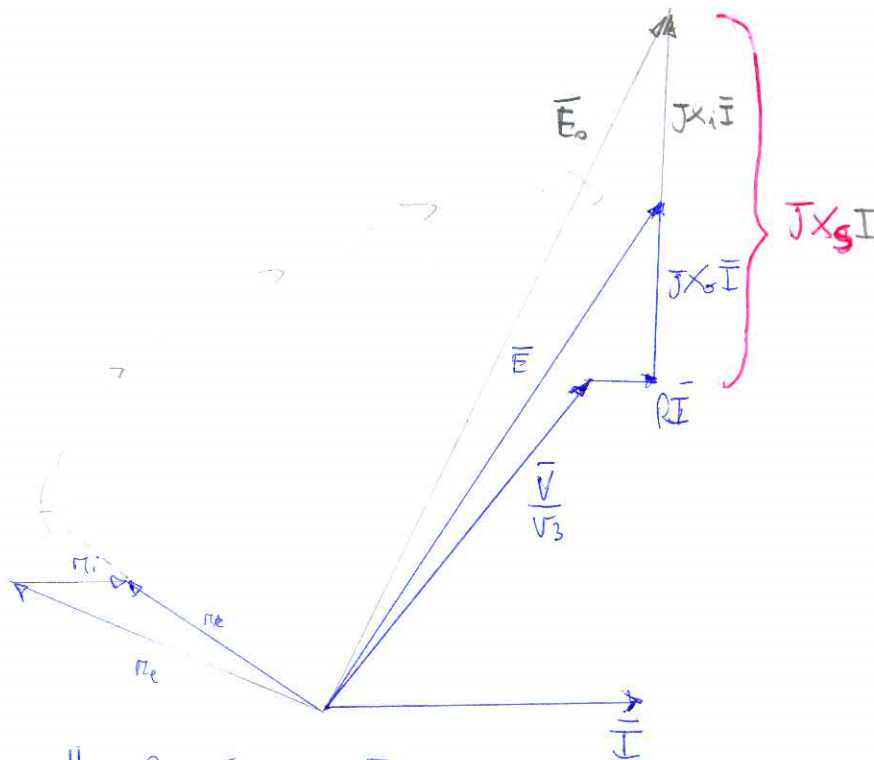
BEHN - ESHENBURG dato che la macchina non è saturata si considera il tratto rettilineo della caratteristica a vuoto quindi c'è proporzionalità tra le f.m.m. e la fem.
 Il triangolo delle f.m.m. di potier può essere sostituito, per queste proporzionalità e quello della fem. di Behn-Eshenburg; ruotato di $\frac{\pi}{2}$ in ritardo
 lo studio della macchina si può ricondurre a quello di una sola resistenza

$$X_s = X_i + X_\sigma \quad \text{della reattanza sincrona} \quad X_i = \text{reattanza di indotto} \quad X_\sigma = \text{reattanza di dispersione}$$

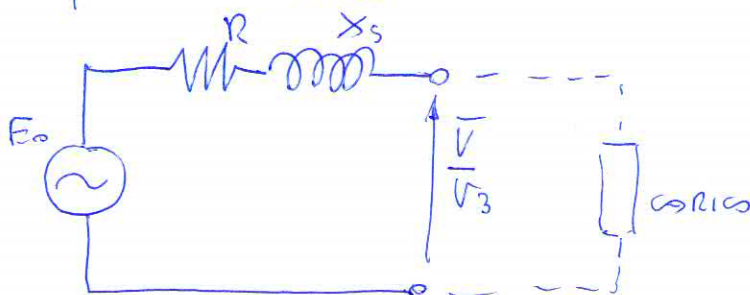
se consideriamo anche la resistenza di indotto otteniamo l'impedenza sincrona

$$\dot{Z}_s = R + jX_s \quad \text{ma } R \text{ di solito è piccolo e trascurabile.}$$

si ottiene quindi un diagramma vettoriale di sole tensioni.



La somma vettoriale è: $\vec{E}_0 = \frac{\vec{V}}{V_3} + (R + jX_s) \vec{I} = \frac{\vec{V}}{V_3} + \dot{Z}_s \vec{I}$
 che equivale al circuito:



- 1) $\vec{I}$ sul asse
- 2) $\frac{\vec{V}}{V_3}$ sui morsetti
- 3) caduta ohmica $R\vec{I}$
- 4) caduta induttiva $jX_s \vec{I}$
- 5) chiudo il triangolo e trovo $\vec{E}$ e carico.
- 6) considerato il triangolo delle f.m.m. di potier e trasformato per proporzionalità in quello della fem. la ruota e faccio corrispondere il modulo di M_2 a E trovo $\vec{E}_0$
- 7) il lato verticale che chiude il triangolo ruotato è $jX_i \vec{I}$ dato dalla reattanza dell'indotto
- 8) Resta definita la reattanza sincrona X_s come somma dei tratti verticali, che per $\vec{I}$ è la caduta induttiva

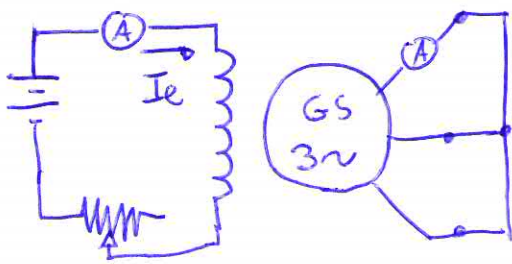
23)

GENERATORE SINCRONO TRIFASE: CURVE CARATTERISTICHE

Le curve caratteristiche sono 4

- caratteristica di corto circuito
- caratteristica di carico
- caratteristica esterna
- caratteristica di regolazione.

caratteristica di corto circuito: fornisce la corrente di indotto I_{cc} in funzione della corrente di eccitazione I_e per $V=0$



si fa riferimento al diagramma di Potier o di Behn - Eschburg (circuiti magnetici non saturati).

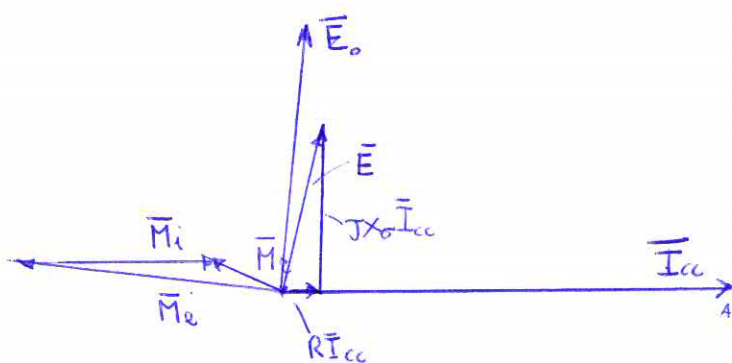
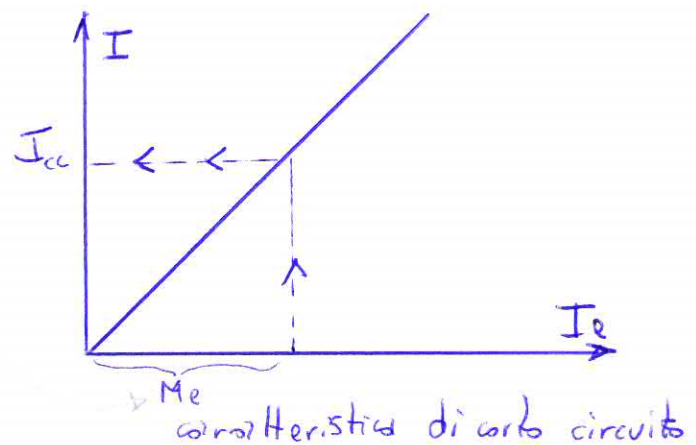
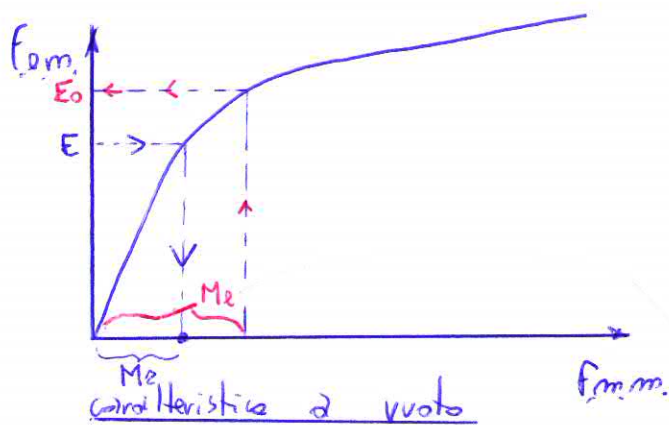


DIAGRAMMA POTIER PER $\frac{V}{\sqrt{3}} = 0$

sulla caratteristica a vuoto si riporta E sulle ordinate, e si scende in discesa trovando la M_r (magneto motrice di reazione di indotto) si traccia sul potier la somma $M_i + M_e = r$ e si trova M_e , si torna in su, nella ordinata si trova E_0 a cui corrisponde la I_{cc} nella caratteristica di corto circuito, trovata l'ampiezza M_e e riportato in scala della caratteristica a vuoto resta definita I_{cc}

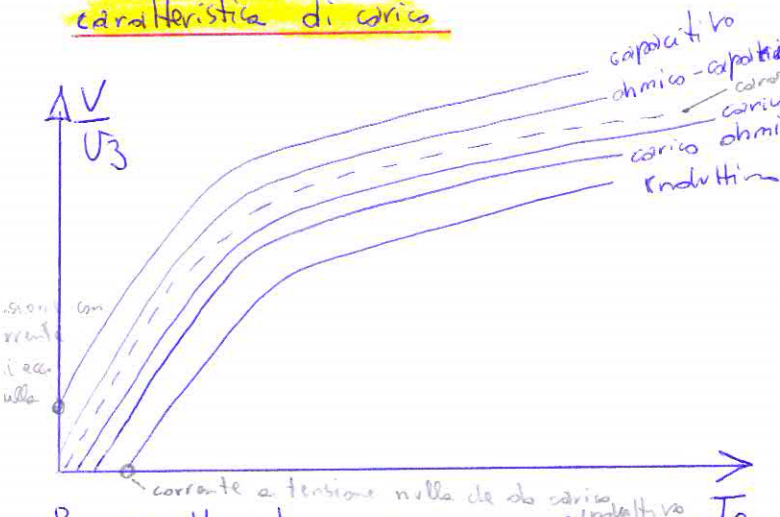
L'azione smagnetizzante della reazione di indotto fa sì che la caratteristica di corto circuito rimanga lineare anche in zona di saturazione della caratteristica a vuoto.

Continua

→ continua 23 Dalle caratteristiche a vuoto e di corto circuito, entrambe rettilinee nei diagrammi di Behn-Tschernburg (a causa della non saturazione) è possibile per ogni I_e trovare l'impedenza sincrona Z_s come rapporto dei corrispondenti valori E_0 e I_{cc} .

Nel caso di macchina anisotropa la caratteristica viene tracciata come Blondel, o quella delle due reattanze (se il circuito magnetico non è saturo).

caratteristica di carico



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

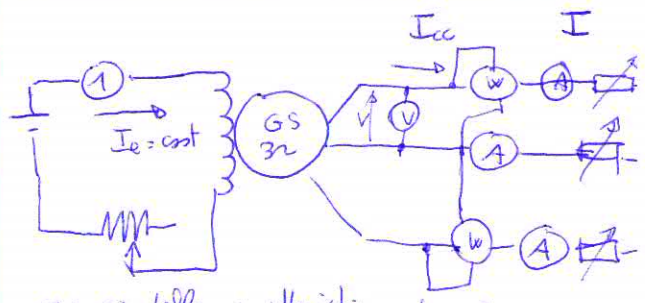
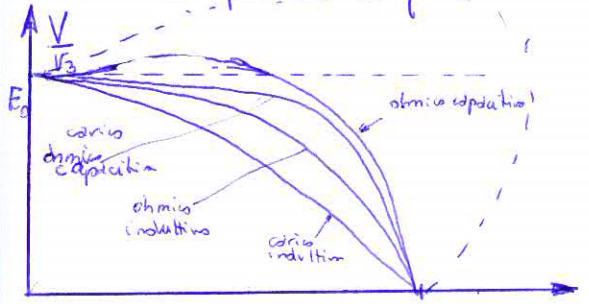
carico ohmico-induttivo o induttivo, solo ohmico
 colta più tensione, ovvero V/V_3 è più piccolo rispetto E_0 se diminuisce il fattore di potenza del carico a causa dell'aumento dell'effetto smagnetizzante della reazione di indotto. Sul piede delle curve, in discesa, si ha la corrente a tensione nulla per il dato tipo di funzionamento.

carico ohmico capacitivo, o solo capacitivo

L'effetto smagnetizzante della reazione di indotto può nel complesso dare luogo a un aumento della tensione di morsetti rispetto al valore a vuoto tanto maggiore tanto più grande è la componente capacitiva della corrente di carico. Il piede delle curve identifica la tensione di morsetti a causa dell'effetto smagnetizzante con corrente di eccitazione nulla.

CARATTERISTICA ESTERNA

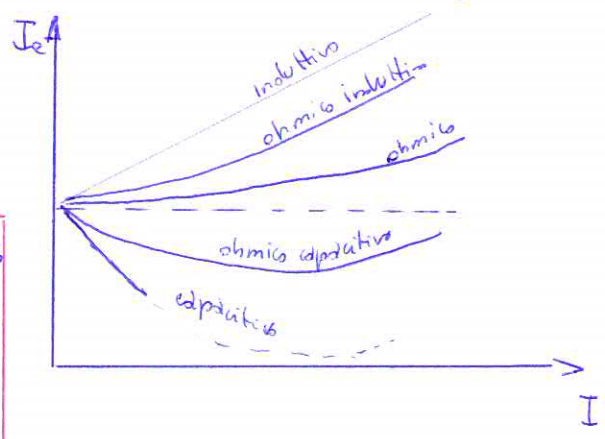
La caratteristica esterna fornisce la V/V_3 di morsetti in funzione della corrente I erogata per un dato valore della corrente di eccitazione I_e e del fattore di potenza $\cos\phi$.



misura della caratteristica esterna.

CARATTERISTICA DI REGOLAZIONE

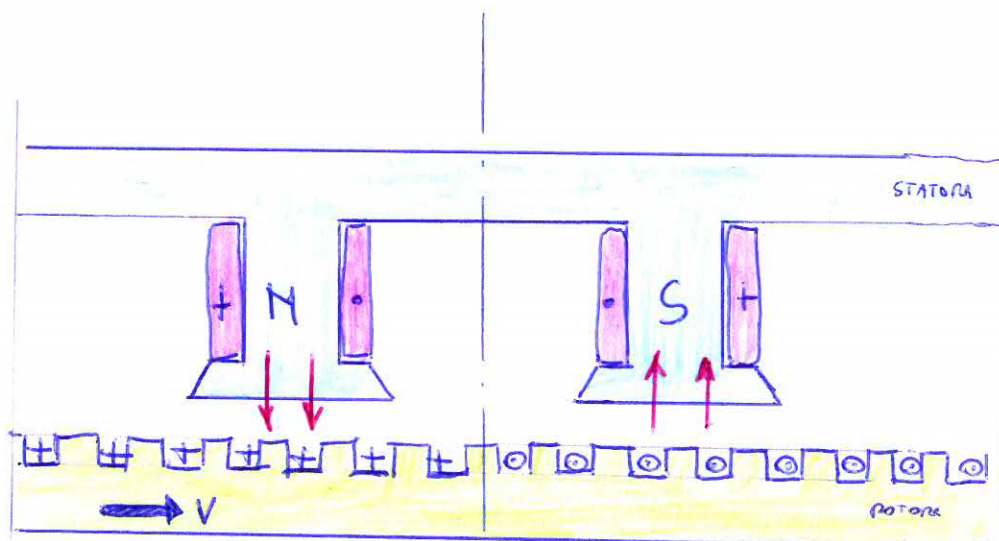
La caratteristica di regolazione fornisce la corrente di eccitazione I_e per ottenere un dato V/V_3 e un certo $\cos\phi$ variabili.



26

Fem indotta in un conduttore di rotore e fem indotta alla spazzola nel funzionamento a vuoto di una macchina a corrente continua.

La corrente continua che percorre l'avvolgimento statorico di eccitazione mette in gioco al traferro una f.m.m di tipo rettangolare fissa rispetto allo statore.



Se il rotore è in moto
Secondo $\vec{V}$, e si considerano

D = diametro rotore

L = parte attiva dei conduttori dell'avvolgimento di rotore

P = coppie poli:

$\tau = \frac{\pi D}{2P}$ semipasso polare

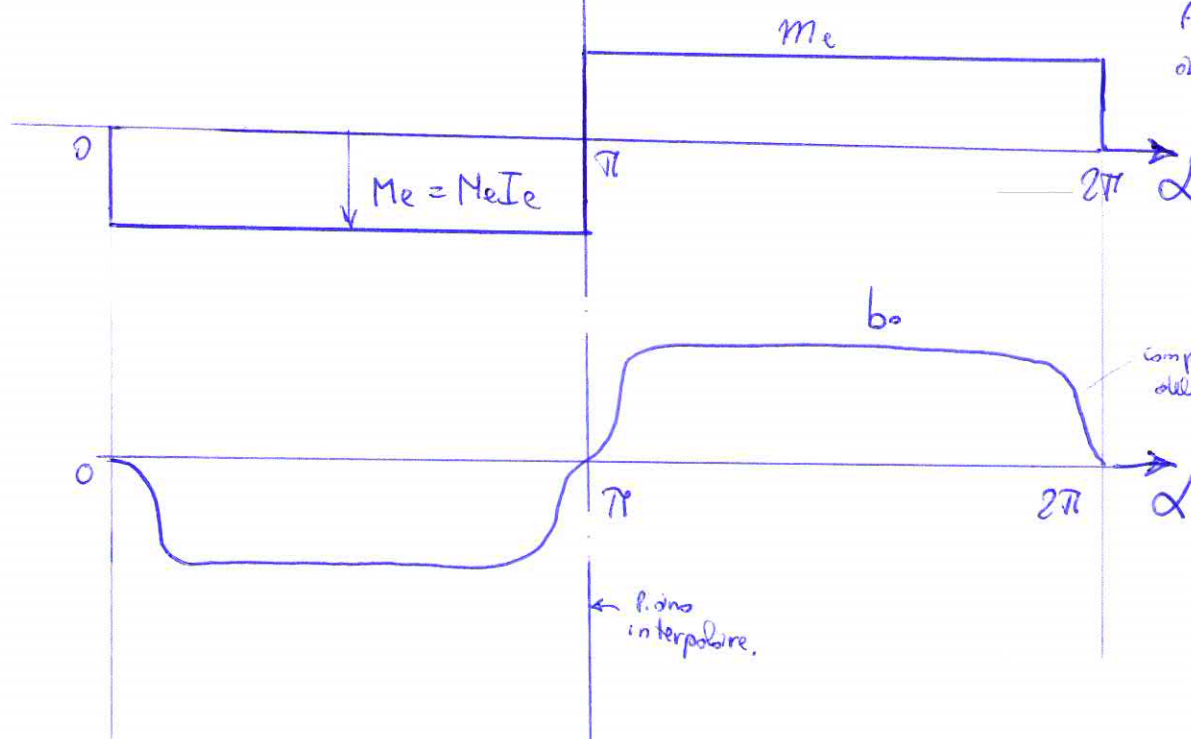
b_0 = induzione al traferro a vuoto

B_m = valore medio dell'induzione a vuoto

$\phi = B_m \tau L$ flusso medio per semipasso polare.

f.m.m. messa in gioco

al traferro dagli avvolgimenti statorici



$\Omega = \frac{2\pi n}{60}$ vel. angolari del rotore.

$V = \Omega D = \frac{\pi D n}{60} = \frac{2\pi \tau n}{60}$ velocità periferica. 60

componente radiale b_0 dell'induzione al traferro

← f.m.m. interpolare.

In un generico conduttore dell'avvolgimento di rotore si induce una fem di valore istantaneo $e = (\vec{v} \times \vec{b}_0) \cdot \vec{L}$ e tenuto conto delle direzioni dei 3 vettori si ha:

$\rightarrow e = b_0 L V = b_0 L \frac{2\pi \tau n}{60}$ e se il rotore ruota a V costante si

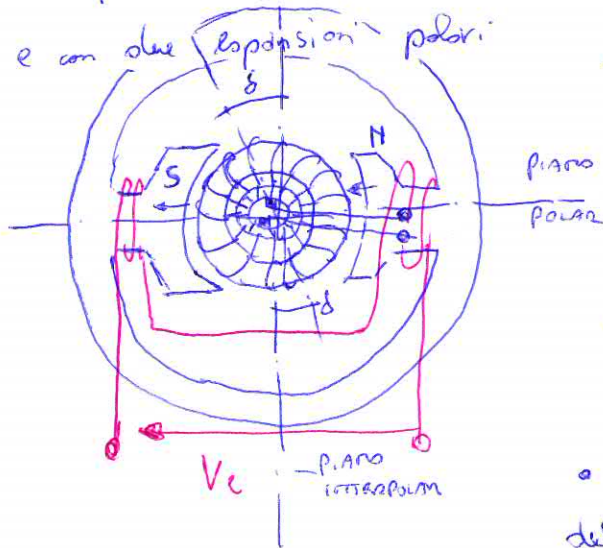
ha: fem segue la forma dell'induzione ed è quindi alternata che ha nel tempo lo stesso andamento di b_0 , il valore medio e la fem indotta a vuoto in un conduttore di statore vale:

$$e_m = B_m \frac{L P \tau n}{60} = \frac{2\pi n}{60} \phi_0 \rightarrow$$

continua 26 (Forza elettromotrice indotta a vuoto delle spazzole). Abbiamo visto che la fem indotta su un conduttore di rotore, segue la forma dell'induzione a vuoto ed è quindi alternata. Lo è anche la serie di più conduttori di rotore. TUTTAVIA collegando opportunamente le singole lamelle del collettore ad opportuni gruppi di indotto è possibile avere alle spazzole una fem unidirezionale quasi costante.

L'indotto deve presentare però sempre la stessa configurazione geometrica rispetto alle spazzole. Se l'avvolgimento è a tamburo con i conduttori equamente distribuiti, se le connessioni tra essi e le lamelle si ripetono ciclicamente si ottiene la continua.

Si porta l'esempio di una macchina ad avvolgimento rotorico toroidale e con due espansioni polari.



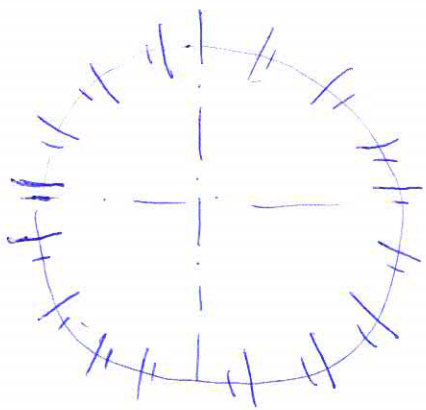
- OGNI SPIRA È SOGGETTA, DURANTE LA ROTAZIONE A una fem variabile che comporta una fem variabile

- La fem indotta in una spira è nulla quando passa per il piano interpolare, massima sul piano polare

- La fem della spira diametralmente opposta è uguale e contraria, la somma è quindi nulla.

- Le fem che si trovano nel semicircolo a destra del piano interpolare hanno tutte lo stesso segno. Quelle a sinistra hanno tutto segno opposto.

- preso un piano di riferimento, anche se la fem nelle singole spire è variabile, quando si passa per questo piano tenuto fisso presenta sempre lo stesso valore. ed è uguale per tutte le spire



27) Fem indotta a vuoto in una fase di statore di una macchina sincrona e coefficienti di avvolgimento e di raccorciamento.

Si porta il rotore (induttore) in rotazione a velocità angolare $\Omega = \frac{2\pi f}{p}$ e si considera la fondamentale $b = B_m \sin \alpha$ della componente radiale dell'induzione prodotta dalla f.m.m. di eccitazione lungo il traferro. Ogni conduttore di statore è sottoposto nell'ipotesi di una scelta opportuna dell'istante iniziale a una induzione variabile nel tempo con legge sinusoidale $b = B_m \sin \omega t$ con pulsazione $\omega = p \cdot \Omega = p \frac{2\pi n}{60}$

D = diametro interno dello statore

L = lunghezza della parte attiva dei conduttori dell'avv. di indotto

$T = \frac{\pi D}{2p}$ semipasso polare.

$\phi = \frac{2}{\pi} B_m T L$ flusso medio per semipasso polare (flusso utile per pol)

$v = \Omega \frac{D}{2} = \frac{\pi D n}{60} = \frac{2 p T n}{60}$ velocità periferica in corrispondenza al raggio $\frac{D}{2}$ di una qualsiasi linea di flusso induttore che "taglia" i conduttori di statore.

e, e_m, l_m, l valori istantaneo massimo, medio ed efficienza della fem indotta a vuoto in un conduttore di statore

k_f fattore di forma (rapporto tra valore eff. e valore medio)

Il valore istantaneo della fem. indotta a vuoto in un generico conduttore di statore vale:

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

lunghezza del conduttore attiva di indotto.

ossia, tenendo conto delle direzioni $\vec{v}$, $\vec{b}$ e $\vec{L}$

$$e = b L v = B_m \sin \omega t L \frac{2 p T n}{60} \quad \text{posto} \quad e_m = B_m L \frac{2 p T n}{60}$$

si ha $e = e_M \sin \omega t$ e quindi anche la fem indotta ha un andamento sinusoidale.

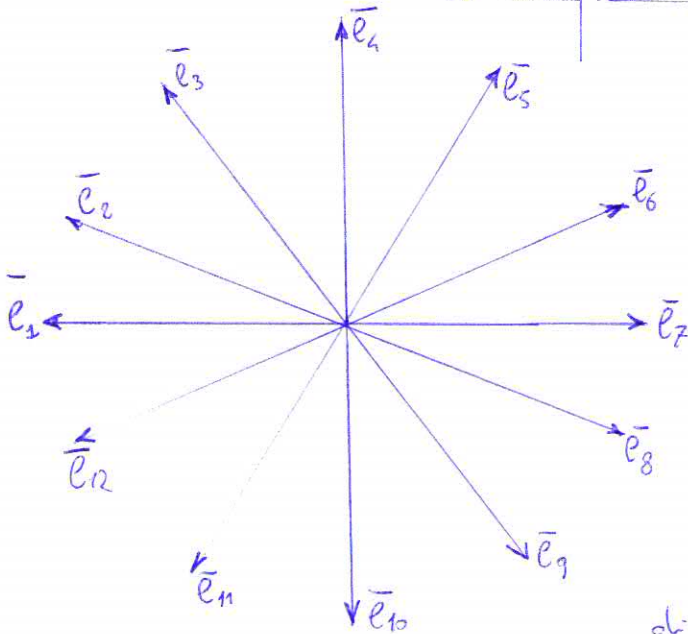
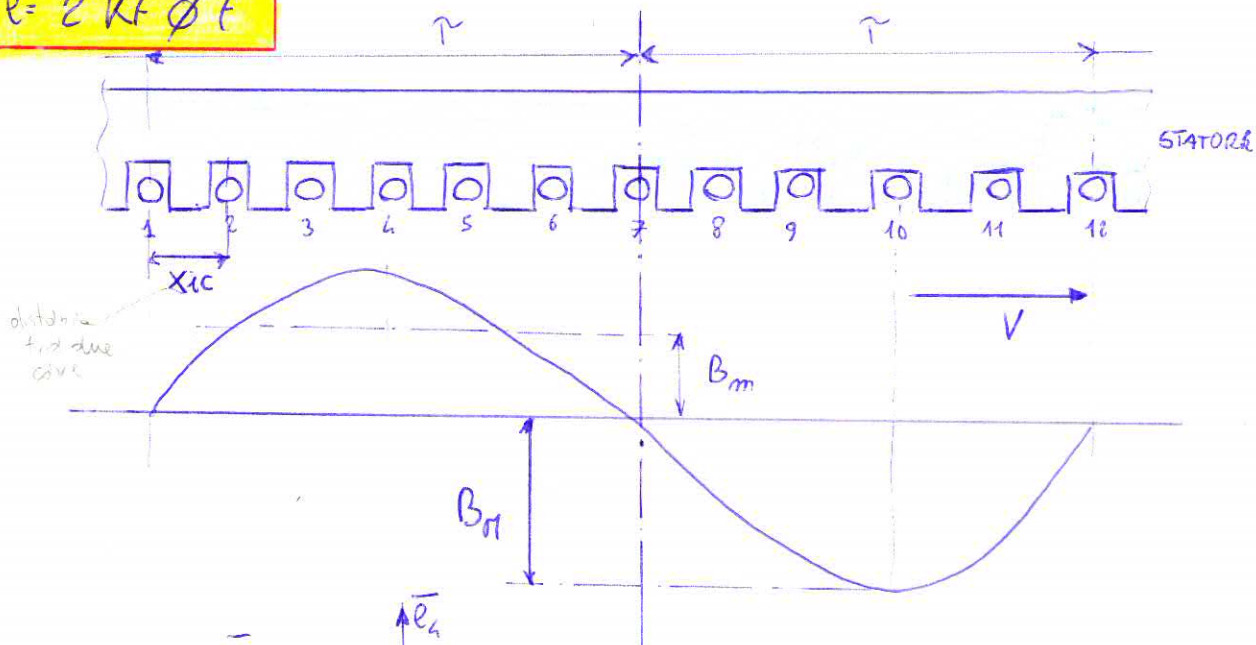
e quindi la fem ^{indotta} ha andamento sinusoidale con pulsazione ω .
 La corrispondente frequenza vale $f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{p_m}{60}$ ^{coppie poli} _{numero di g.}
 infatti si ha $n = \frac{60f}{p}$

valore medio

$$e_m = \frac{2}{\pi} e_M = 2 \cdot \frac{l}{\pi} B_M \tau L \cdot \frac{p_m}{60} = 2 \phi f$$

valore efficace

$$e = 2 K_f \phi f$$



Rappresentazione vettoriale delle forze elettromotrici indotte in ciascuno dei conduttori di statore.

Per formare una fase di statore bisogna collegare tra di loro più conduttori di statore.

Nei conduttori collegati in serie di statore, le ampiezze delle fem sono uguali ma sono spostate tra di loro di un angolo elettrico x_{12}

⇒ continua

continua 27

$$\alpha_{ic} = \frac{X_{ic}}{r} \pi = \frac{2p}{q_i} \pi = \frac{\pi}{q_i r}$$

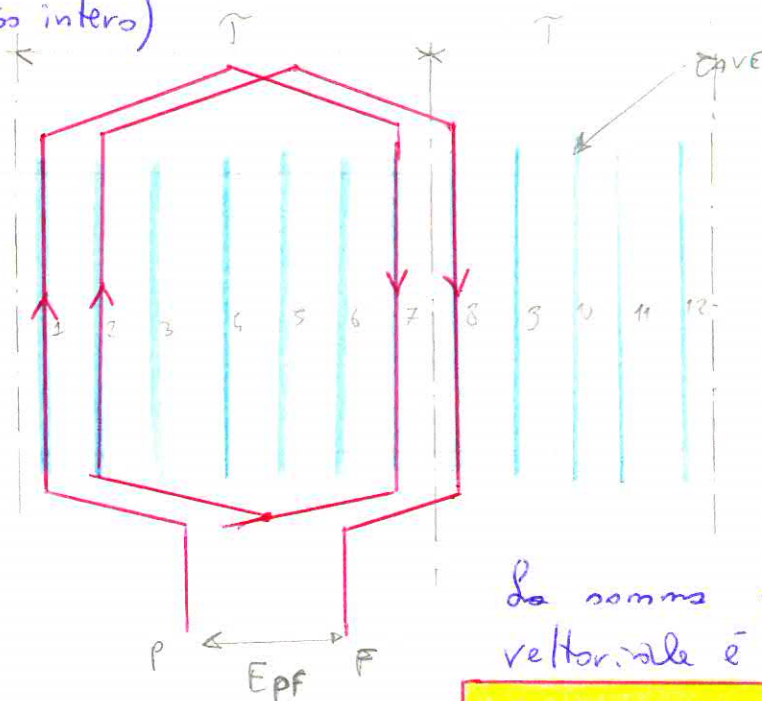
angolo elettrico

ave totali
di statore

ave per polo

Di solito gli avvolgimenti di indotto vengono collegati in serie e hanno più di un conduttore per cave.

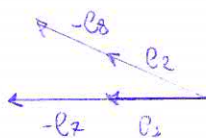
Si collega in serie collegando un conduttore sotto a un polo con un conduttore sotto al polo successivo, distante un semipasso τ (avvolgimento a passo intero)



Avvolgimento
trifase a passo
intero, molasse
embricate

$m_i = 1$ conduttori per cave

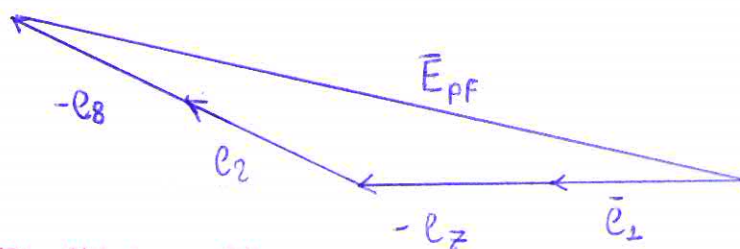
$q_i = 2$ cave per polo
per fase



sommando i vettori

La somma delle fem
vettoriale è

$$\bar{E}_{pf} = \bar{e}_1 + (-\bar{e}_2) + \bar{e}_3 + (-\bar{e}_4)$$



Risposta ALLA DOMANDA.

La fem indotta a vuoto di ogni di una fase di
statore (indotto) a passo intero è:

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

q_i = numero di cave per polo
e per fase

n_i = numero di conduttori per
cave

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

K_{i1} = coeff. di avvolgimento
di indotto riferito
alla fondamentale

E_o = valore eff. della fem
indotta a vuoto in una
fase di indotto.

(27 bis)
i due coefficienti K_{i1} e K_{iv} sono:

$$K_{i1} = \frac{\sin \frac{q_i \alpha_{ic}}{2}}{q_i \sin \frac{\alpha_{ic}}{2}} = \frac{\sin \frac{\pi}{2} \frac{q_i}{q_{it}}}{q_i \sin \frac{\pi}{2} \frac{1}{q_{it}}}$$

se rapportato $\frac{q_i}{q_{it}}$
e la frazione di
semipasso polare su
cui è distribuito
l'avvolgimento

K_{iv} è il medesimo coefficiente riportato all'armonica di ordine v
nel caso di induzione non sinusoidale

Gli avvolgimenti a passo raccorciato hanno lo scopo di ridurre o eliminare
le armoniche della fem

Si verifica che i conduttori collegati in serie non sono sfasati di π ma di
un angolo $(\pi - \beta_{ir})$ con β_{ir} pari all'angolo di raccorciamento.

La risultante delle fem indotte si riduce rispetto alla somma aritmetica
in ragione di $\cos \frac{\beta_{ir}}{2}$

La fondamentale a passo raccorciato è un fem di valore

$$E_0 = 2K_F K_{i1} K_{ir1} \Phi_f N_i$$

$$K_{ir1} = \cos \frac{\beta_{ir}}{2} \quad \text{coeff. di raccorciamento}$$

Per una generica armonica di ordine v si ha $\bar{E}_0 = 2K_F K_{iv} K_{irv} \Phi_v N_i$

$$\text{con } K_{irv} = \cos v \frac{\beta_{ir}}{2}$$

con il coefficiente di avvolgimento, per
una fse di un avvolgimento tipo $\frac{q_i}{q_{it}} = \frac{1}{3}$
e monofase $\frac{q_i}{q_{it}} = \frac{2}{3}$

Il coefficiente di raccorciamento in base all'angolo β_{ir} sono tabellati

IL PRODOTTO $K_{iv} \cdot K_{irv}$ TRA IL COEFFICIENTE DI AVVOLGIMENTO E DI RACCORCIAMENTO
È IL COEFFICIENTE DI AVVOLGIMENTO COMPRESSIVO

30)

MACCHINA A CORRENTE CONTINUA: Fenomeni legati al funzionamento a carico e reazione di indotto.

COLLEGANDO LE SPAZZOLE A UN CIRCUITO ESTERNO, SI VERIFICA (NEL FUNZIONAMENTO DA GENERATORE);

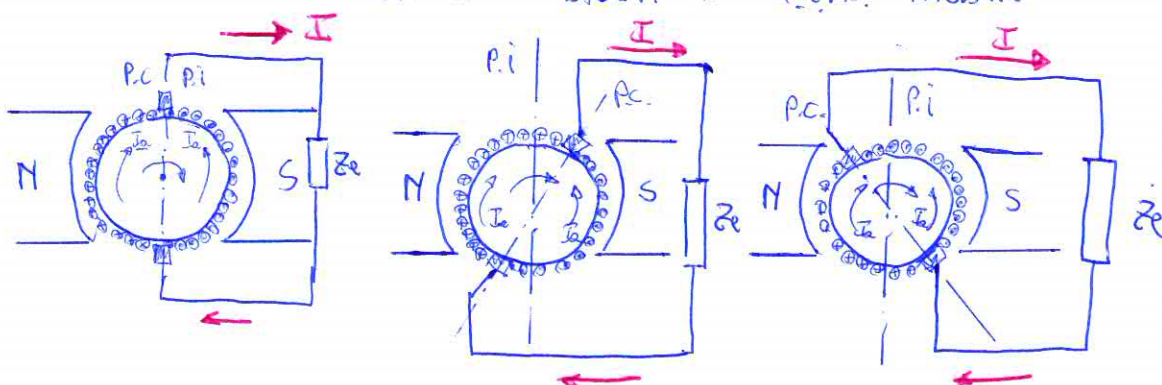
- A)
- 1) COMPARE UNA CORRENTE I CHE NELL'AVVOLGIMENTO DI INDOTTO È SUDDIVISA IN TANTE VIE IN PARALLELO QUANTE SONO LE VIE INTERNE " $2a$ " DELL'AVVOLGIMENTO, TALE CORRENTE VALE $I_a = \frac{I}{2a}$ PER OGNI VIA INTERNA.
 - 2) La posizione delle spazzole definiscono un piano detto piano di commutazione, ed è in corrispondenza di esso che si ha l'inversione della corrente nelle spire che lo sta attraversando.

B) DIMINUISCE LA D.D.P. AI TERMINI ESTERNI PER EFFETTO DELLA CADUTA DI TENSIONE PROVOCATA DALLA RESISTENZA ~~DEGLI~~ AVVOLGIMENTI, DA QUELLA DI CONTATTO SPAZZOLE/COLLETTORI, DA QUELLA PROPRIA DELLE SPAZZOLE.

C) LE CORRENTI I_a CIRCOLANDO NELL'AVVOLGIMENTO A COLLETTORI, DANNO LUOGO A UNA P.m.m. DI REAZIONE DI INDOTTO CHE COMPLETTANDOSI CON QUELLA DI INDUTTORE, MODIFICA IL VALORE E LA DISTRIBUZIONE LUNGO IL TRAPASSO DELL'INDUZIONE PRODOTTA DALLA SOLA P.m.m. di induttore E VIENE A MODIFICARE, NEL CASO DI SATURAZIONE DEL CIRCUITO MAGNETICO DI PIANO DI COMMUTAZIONE SPOSTATO RISPETTO AL PIANO INTERPOLARE, IL FLUSSO UTILE PER PRO ROLVITI LA f_{em} indotta.

D) NASCE UNA COPPIA FREMANTE ADDE CONSEGUENZA DELL'EROGAZIONE DI POTENZA DALLE SPAZZOLE, DA PARTE DELLA MACCHINA

E) SI POSSONO AVERE FENOMENI DI SCINTILLIO ALLE SPAZZOLE, CON POSSIBILI FORMAZIONI DI ARCHI DAVUTI A f_{em} indotte nelle spire in commutazione



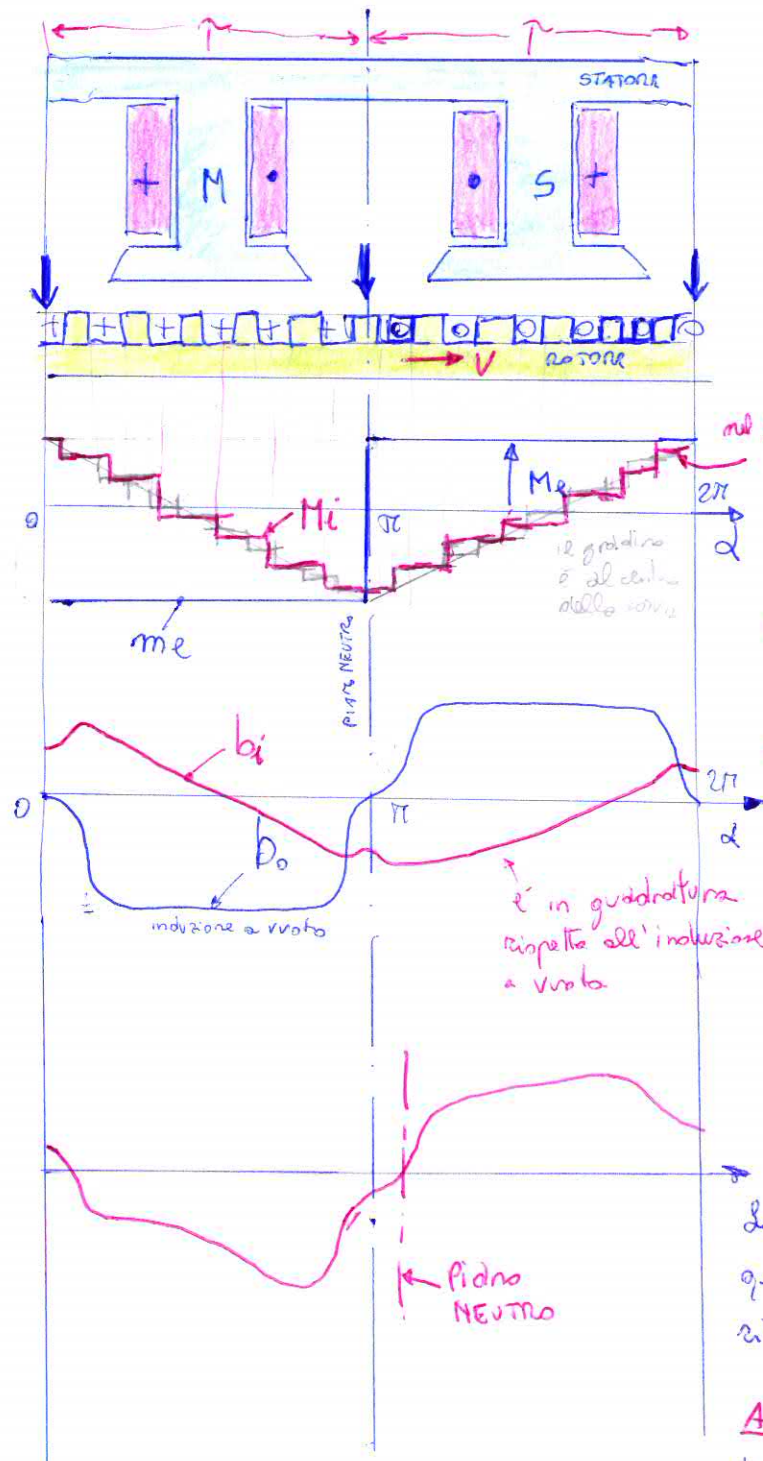
$$I_a = \frac{I}{2}$$

P.i. = PIANO INTERPOLARE

P.C. = PIANO COMMUTAZIONE

3) continua REAZIONE DI INDOTTO CONSIDERIAMO LA MACCHINA IN CONTINUA IN CUI IL PIANO DI COMMUTAZIONE E' POSTO SUL PIANO INTERPOLARE. SI ANALIZZANO I TRE CASI

- FUNZIONAMENTO A VUOTO ($I_e \neq 0, I_a = 0$)
- FUNZIONAMENTO CON LA SOLA CORRENTE DI INDOTTO ($I_e = 0, I_a \neq 0$)
- FUNZIONAMENTO A CARICO



nel funz. con la sola corrente I_a imposta a circolare nell'indotto, senza corrente di eccitazione, inviermo quindi la continua I_a alle spazzole, facendo ruotare la macchina. I gradini sono fissi rispetto allo statore e se i conduttori sono tanti allora si può assimilare a un'onda frangibile. Il valore massimo M_i , si trova sul piano di commutazione. E' in quadratura rispetto all'induzione a vuoto. indicati con n_i e q_i i conduttori per polo e le core si ha:

$$M_i = \frac{M_i q_i I_a}{2} = \frac{1}{2} \frac{N}{2p} \frac{I}{2a}$$

La f.m.m. di reazione di indotto crea quindi un campo magnetico in quadratura rispetto a quello prodotto a vuoto B_i

A CARICO Se f.m.m. di eccitazione e di indotto si compongono. Si devono sommare le f.m.m. di "causa" e non di "effetto" per ottenere la risultante e si deve fare attenzione alle saturazioni perché - involgarino la sovrapposizione degli effetti. A carico succede: distorsione della distribuzione dell'induzione, diminuzione del flusso per polo, spostamento del piano di commutazione. B_c E' diverso da zero sul piano di commutazione

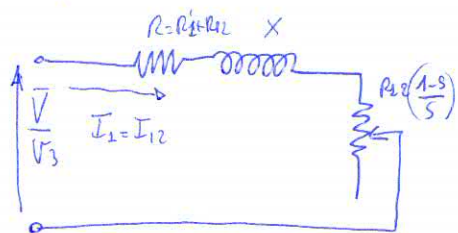
$$E = \frac{p}{a} \frac{N}{60} \phi_m = k_e \phi_m$$

- spostamento del piano di inversione di B legato al valore della f.m.m. di reazione M_i e quindi al valore delle corrente di indotto. tale piano, che a vuoto sta nell'interpolare, si chiama Piano NEUTRO

33)

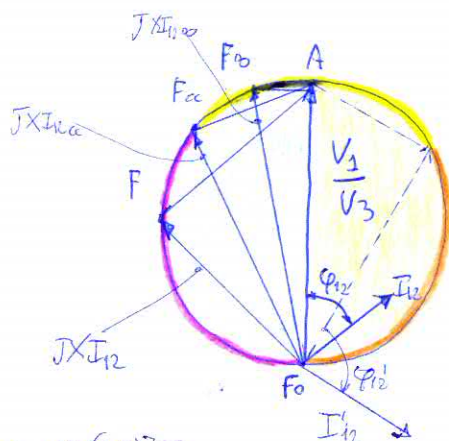
TRACCIAMENTO DEL DIAGRAMMA CIRCOLARE DI UN MOTORE ASINCRONO TRIFASE IN SEDE DI PROGETTO E DI COLAUDO

Il diagramma circolare rappresenta il funzionamento della macchina a regime permanente a tensione e frequenza costante al variare della velocità. Nell'ipotesi iniziale di trascurare la corrente I_0 a vuoto si ha il circuito equiv.

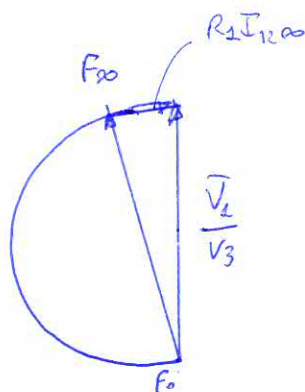
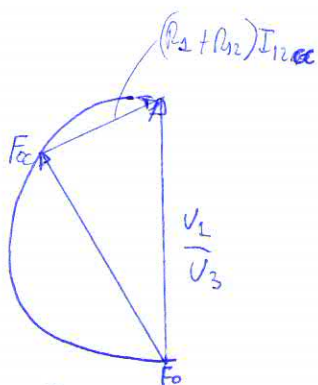
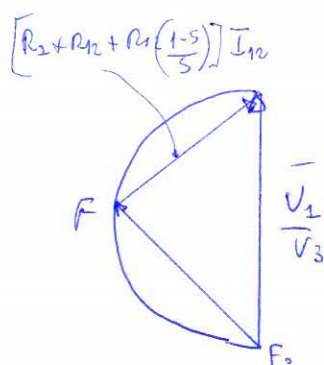


$$\frac{V_1}{\sqrt{3}} = \left(R_1 + R_2 + R_2 \frac{(1-s)}{s} \right) \bar{I}_{12} + jX_{12} \bar{I}_{12}$$

al cui corrisponde il diagramma vettoriale:



- FUNZIONAMENTO COME MOTORE
- ZONA FUNZIONAMENTO DA FRENO
- ZONA GENERATORE
- AREA MOTORE
- AREA GENERATORE



Le condizioni di lavoro della macchina sono:

- $s=0$ ($n=n_0$) funz. a vuoto

$$R_2 \frac{1-s}{s} = \infty \quad I_{12} = 0 \quad F \text{ cade in } F_0$$

- $s=1$ ($n=0$) funzionamento in corto circuito (o rotore bloccato)

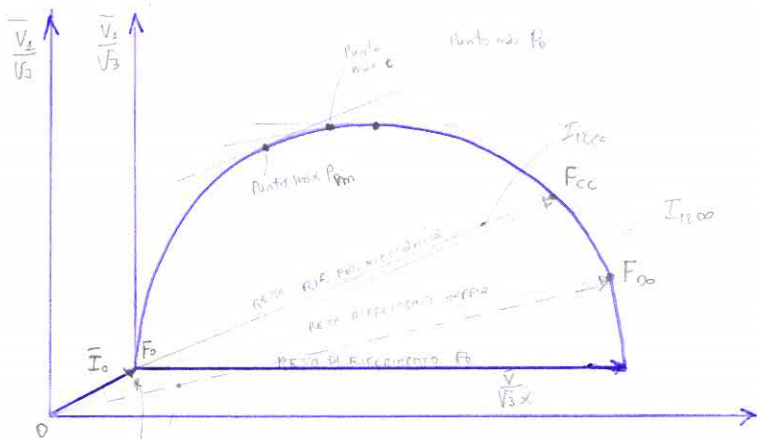
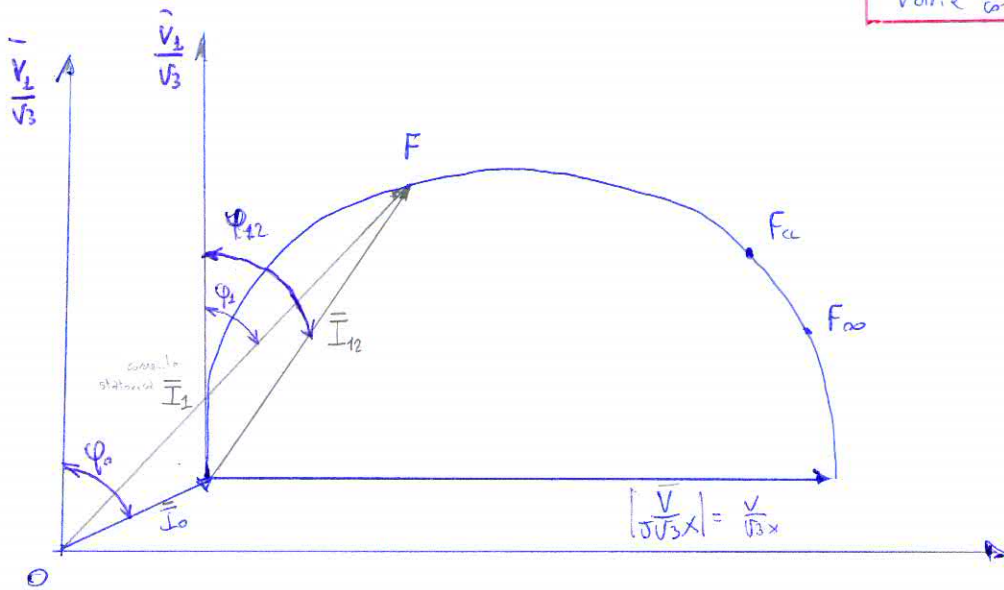
$$R_2 \frac{1-s}{s} = 0 \quad R_1 + \frac{R_2}{s} = R_1 + R_2 \quad \text{e} \quad I_{12} = I_{12cc} \quad \text{La caduta ohmica diminuisce rispetto all'induttiva il punto } F \text{ cade in } F_c$$

- $s=\infty$ ($n=\infty$) risulta $R_1 + \frac{R_2}{s} = R_1$ e $I_{12} = I_{12\infty}$ la caduta ohmica si riduce ancora rispetto all'induttiva F cade su F_{cc}
 $\overline{F_0 F_{cc}} = jX_{12} \bar{I}_{12\infty}$ e $\overline{F_{cc} A} = R_2 \bar{I}_{12\infty}$
- Per $s=s_R$ risulta $R_1 + \frac{R_2}{s} = 0$ il punto F coincide con A

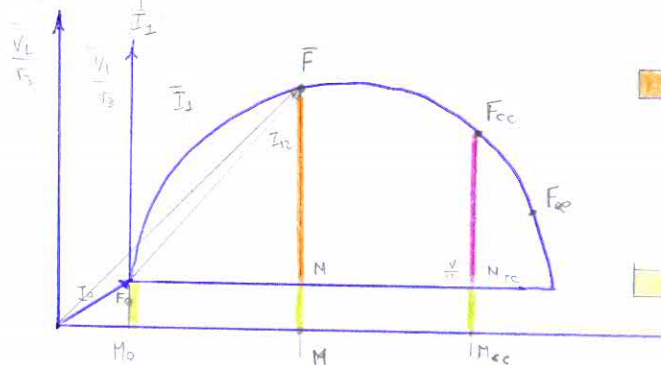
continua
→

Dividiamo tutti i vettori per $\sqrt{3}X$ per ottenere il vero diagramma circolare dopo aver adagiato il vettore $\frac{V_1}{\sqrt{3}X}$ sulle ascisse. dal punto F_0 portiamo la corrente I_0 alle cui origini si traccia una coordinata traslata rispetto a $\frac{V}{\sqrt{3}X}$

il vettore $\overline{OF}$ è la corrente statorica nelle varie condizioni



$\overline{OF_0}$ corrente a vuoto $S=0, m=m_0$
 $\overline{OF_{cc}}$ corrente di c.c. $S=1, n=0$
 $\overline{OF_0}$ corrente di scorrimento infinito $S=\infty, m=\infty$



FM Potenza elettrica. $P_e = 3 \frac{V_1}{\sqrt{3}} I_1 \cos \phi_1$
 In generale ogni tratto $\overline{FM}$ rappresenta una potenza, quindi $\overline{F_0M_0}$ è, ad esempio, la potenza persa a vuoto, mentre $\overline{FM}$ è la potenza persa $\overline{FM}$ è quella assorbita
 P_0 = Potenza persa a vuoto, perdite nel ferro P_{fe} e perdite meccaniche per attrito e venti bobine.

$$FM = FN + NM = FN + F_0M_0 = P_0 + FN$$

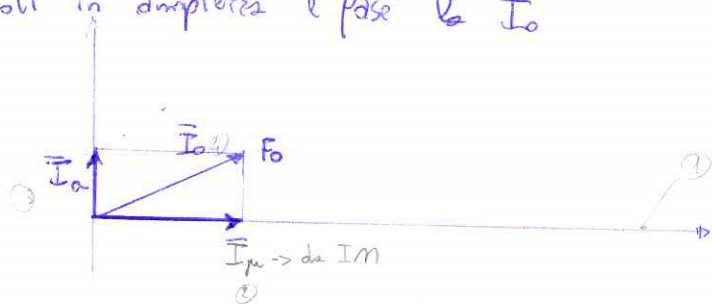
FM Potenza persa in corto circuito per effetto joule negli avvolgimenti di rotore e di statore. $\overline{F_{cc}M_{cc}}$ Mentre tutto il segmento $\overline{F_{cc}M_{cc}}$ è la potenza assorbita in corto circuito, infatti contiene anche $P_0 = F_0M_0$

continua domanda 33. La vera risposta inizia da qua.

Per costruire il diagramma circolare e le relative rette di riferimento è suff. conoscere i punti F_0 ($m=m_0$), F_{cc} ($m=0$) e F_{∞} ($m=\infty$) il tracciamento si può fare in sede di progetto o in sede di collaudo.

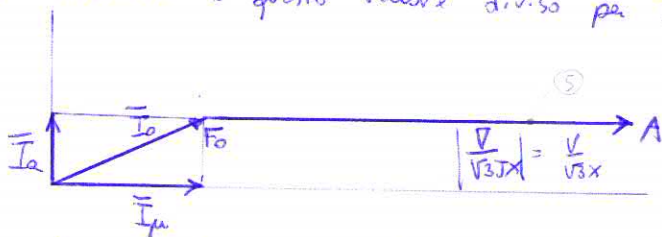
IN SEDE DI PROGETTO si parte dalla tensione di alimentazione e dai parametri del circuito equivalente. si devono calcolare le perdite nel ferro di statore e le perdite meccaniche per ($m=m_0$). Si ricava I_a dalla I_0 , dal calcolo delle ampere/spire assorbite dal circuito magnetico si ricava la I_{μ} .

sugli assi cartesiani si traccia I_{μ} in ascissa e I_a in ordinata. Si trova quindi in ampiezza e fase la I_0



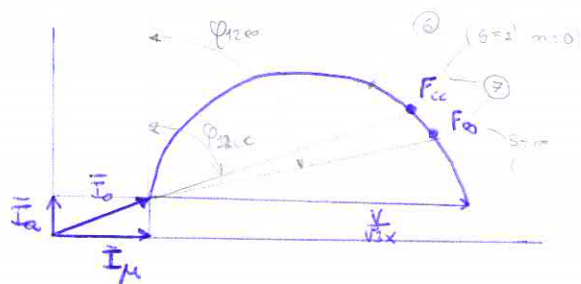
- ① tracciare assi cartesiani
- ② tracciare I_{μ} in ascissa
dal calcolo delle perdite per magnetizzazione (I_M)
- ③ tracciare I_a in ordinata
- ④ si ricava I_0 in modulo e fase quindi F_0

Tracciando la parallela alle ascisse che passa per il punto F_0 si trova il diametro F_0A dato che la tensione ai morsetti $\frac{V}{\sqrt{3}}$ è nota e il diametro è questo valore diviso per JX , ovvero una corrente.



A questo punto, fissato il diametro $\frac{V}{\sqrt{3}X}$ (in modulo) si può tracciare la semicirconferenza.

- ⑤ traccia il diametro $F_0A = \left| \frac{V}{\sqrt{3}JX} \right| = \frac{V}{\sqrt{3}X}$
- ⑥ traccia la semicirconferenza.
- ⑦ restano indi individuati i punti per ($s=1$): F_{cc} e F_{∞} ($s=\infty$)



spostamento assoluto
all'angolo $m_0 + m$
max campo magnetico
di rotore ed
statore
m velocità meccanica
di rotore

tramite gli angoli

$$\phi_{120c} = \arctan \frac{X}{R_1 + R_2}$$

$$\phi_{1200} = \arctan \frac{X}{R_1}$$

scorrimento relativo

$$s_A = \frac{n_2 - n}{n_2}$$

$$s_{\%} = \frac{n_2 - n}{n_2} \cdot 100$$

IN SEDE DI COLLAUDO con la macchina funzionante come motore si fanno le

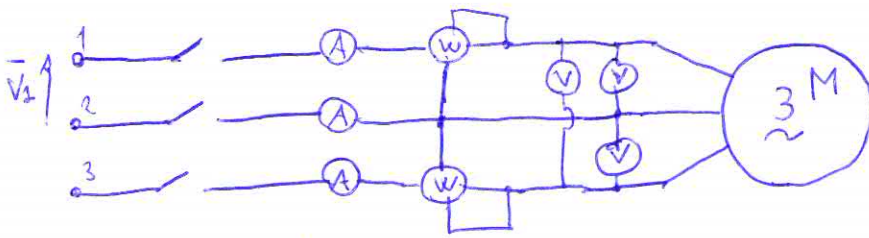
prove:

CONTROLLO

PROVA A VUOTO

PROVA IN CORTO CIRCUITO

MISURA VOLT-AMPEROMETRICA DELLA R_1 DI UNA FASE DI STATORE.



PROVA A VUOTO alimentare il motore con tensione nominale, senza coppia resistente, si ha circa $m=0$ s.d.o. misurare: valore eff. della tensione concatenata V_1 , la media I_0 dei valori efficaci delle correnti assorbite dalle tre fasi di statore. La potenza elettrica assorbita $P_0 = P_{10} + P_{20}$ (somma algebrica)

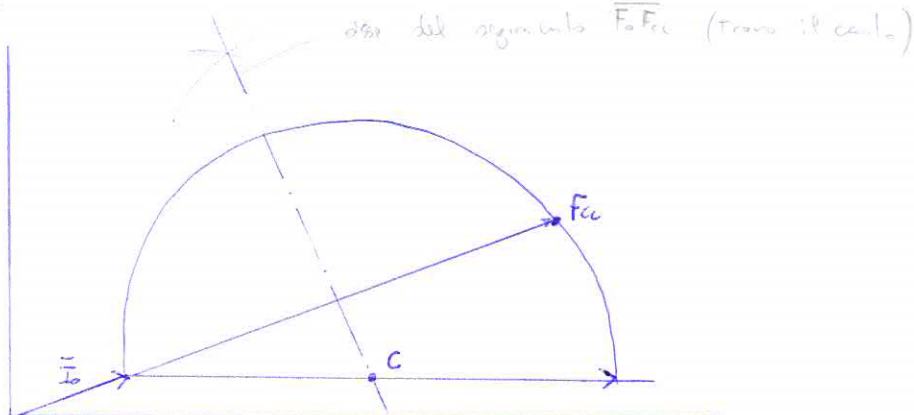
Da queste misure si ricava $\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{\sqrt{3} I_0 V_1}$ e quindi φ_0

PROVA IN CORTO (ROTOR BLOCCATO $m=0, s=1$)

misurare di nuovo il valore eff. della V_1 concatenata, la media I_{cc} dei valori eff. cui della corrente assorbita dalle 3 fasi di statore. La potenza elettrica assorbita $P_{cc} = P_{1cc} + P_{2cc}$ somma algebrica.

Da queste misure si ricava il fattore di potenza in corto circuito $\cos \varphi_{cc} = \frac{P_{cc}}{\sqrt{3} V_1 I_{cc}}$ e quindi l'angolo φ_{cc} . (NOTA, LA TENSIONE DI ALIMENTAZIONE VA RIDOTTA DI UN FATTORE $\frac{1}{K}$. Le misure si ripartono alle reali moltiplicando le correnti per K e le ~~potenze~~ per K^2)

con queste misure si tracciano le correnti $\bar{I}_0$ (a vuoto) e $\bar{I}_{cc}$ (in corto) in ampiezza e fase, quindi si trovano i punti F_0 e F_{cc} ($s=0$) e ($s=1$). Il centro della circonferenza da tracciare si trova sull'asse delle corde $\bar{F}_0 \bar{F}_{cc}$ nel punto in cui interseca la parallela all'asse delle corde di I_0 .



34)

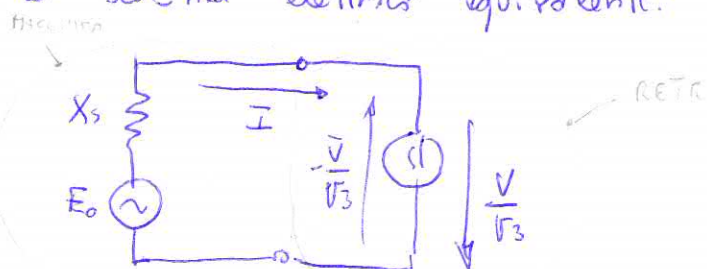
RIPARTIZIONE DELLA POTENZA ATTIVA E REATTIVA NEL FUNZIONAMENTO COME GENERATORE E COME MOTORE DI UNA MACCHINA SINCRONA COLLEGATA ALLA RETE

Ipotesi: la macchina è inserita correttamente in parallelo alla rete.

La rete si considera di potenza infinita quindi con tensione e frequenza costanti. La macchina non sia saturata, la macchina abbia resistenza di indotto nulla.

TRA MOTORE LISCIO O A POLI SPORSENTI I RAGIONAMENTI SONO ANALOGHI MA I GRAFICI HANNO CHIEVI DIFFERENTI.

Allo schema della macchina sincrona in parallelo alla rete corrisponde lo schema elettrico equivalente:



CONVERSIONI POTENZE

La potenza attiva è positiva se erogata dalla macchina.

La potenza reattiva è positiva se erogata dalla macchina ma di tipo induttivo.

$$X_s = X_o + X_i \quad X_i = \text{reattanza di reazione di indotto.}$$

SOPRARECITATA = E_0 in modulo $>$ di $\frac{V}{\sqrt{3}}$

A VUOTO, IN PARALLELO

SOTTORECITATA $|\bar{E}_0| < \left| \frac{V}{\sqrt{3}} \right|$

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

NELL'IPOTESI CHE TUTTE LE PERDITE SIANO NULLE SI HA:

$$C = \frac{P_e}{\Omega} = \frac{P_m}{\Omega} \quad \text{con } P_e = VI \cos \phi \quad \text{POT. ATTIVA}$$



NOTA IMPORTANTE: SE NON SI ANNULLANO I VETTORI $\bar{E}_0$ E $\frac{V}{\sqrt{3}}$ ALLORA L'INDOTTO È SOPOPOSTO A UNA TENSIONE

$\frac{V'}{\sqrt{3}} = \bar{E}_0 - \frac{V}{\sqrt{3}}$ che fa circolare una corrente e che comporta uno scambio di potenza

Nelle pagine successive si riassumono i casi e si classifica la ripartizione di energia attiva e reattiva a seconda di come viene scambiata con la rete.

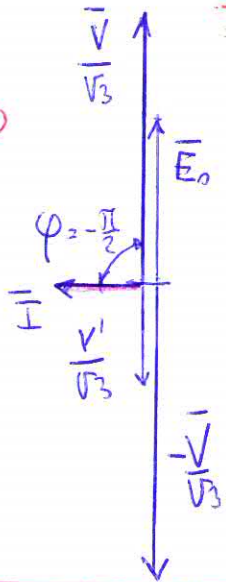
SOTTOECCITATA (eccitazione ridotta)

SENZA C APPLICATA (A VUOTO)

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

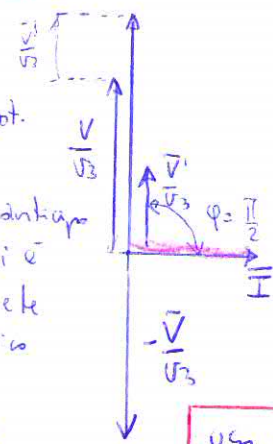
$$\varphi = -\frac{\pi}{2}$$

$$\bar{I} = \frac{\bar{V}'}{\sqrt{3} jX_s} \text{ in anticipo } \frac{\pi}{2} \text{ su } \frac{\bar{V}}{\sqrt{3}}$$

 $Q < 0$ quindi ergo potenza capacitivaLa corrente è in ritardo di $\frac{\pi}{2}$ su $\frac{\bar{V}}{\sqrt{3}}$
Quindi è vista dalla rete come un carico **INDUTTIVO**.SOPRAECCITATA (eccitazione aumentata)

(A VUOTO)

$$\varphi = +\frac{\pi}{2}$$

 $Q > 0$ ergo pot. induttivaLa corrente è in anticipo su $\frac{\bar{V}}{\sqrt{3}}$ quindi è vista dalla rete come un carico **capacitivo**.NON SCAMBIA POTENZA ATTIVA P_e 

USO DELLA MACCHINA COME CONDENSATORE ROTANTE

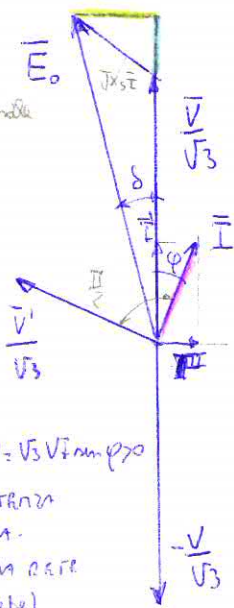
SOPRAECCITATA CON COPPIA MOTRICE ALL'ALBERO (AMMORTITA)comparsa l'angolo δ tra E_0 e $\frac{\bar{V}}{\sqrt{3}}$ $\delta > 0$ Se $E_0 \cos \delta > \frac{\bar{V}}{\sqrt{3}}$ la corrente è in ritardo rispetto a $\frac{\bar{V}}{\sqrt{3}}$ quindi $\varphi > 0$

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

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

EROGA POTENZA ELETTRICA ALLA RETE ASSORBENDO ENERGIA MECCANICA ALL'ALBERO.

FUNZIONA DA GENERATORE E SVILUPPA COPPIA FREMANTE PER BILANCIARE LA COPPIA APPLICATA

Se $E_0 \cos \delta < \frac{\bar{V}}{\sqrt{3}}$ le condizioni di potenza si invertono

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

EROGA POTENZA INDUTTIVA VISTA DALLA RETE (V è la rete)

ASSORBE POTENZA CAPACITIVA

SOTTOECCITATA $E_0 < \frac{\bar{V}}{\sqrt{3}}$ con coppia motrice C_m applicata all'albero $\delta > 0$ $\varphi < 0$

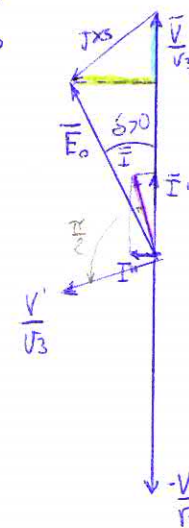
La macchina mette in gioco una potenza attiva diversa da zero

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

EROGA POTENZA ELETTRICA ALLA RETE QUINDI FUNZIONA DA GENERATORE

• EROGA POTENZA CAPACITIVA

• LA RETE VEDER LA MACCHINA COME UN CARICO INDUTTIVO CIOE' LA CORRENTE E' IN RITARDO SULLA TENSIONE.

MACCHINA SOTTOECCITATA CON COPPIA FREMANTE C_m applicata all'albero. $\delta < 0$

LA MACCHINA ASSORBE POTENZA DALLA RETE

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

quindi assorbe potenza elettrica pari a quella meccanica erogata all'albero, sviluppa una coppia motrice che bilancia la frenante applicata dall'esterno.

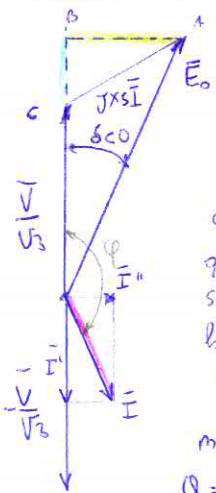
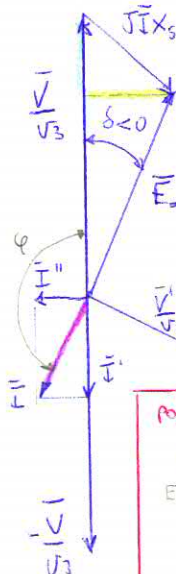
FUNZIONA DA MOTORE

mette in gioco potenza reattiva Q

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

• EROGA POTENZA INDUTTIVA

• LA RETE LA VEDER COME UN CARICO CAPACITIVO

MACCHINA SOTTOECCITATA $E_0 < \frac{\bar{V}}{\sqrt{3}}$ E COPPIA FREMANTE C_m ALL'ALBERO E_0 in ritardo su $\frac{\bar{V}}{\sqrt{3}}$ $\delta < 0$ La corrente I è in anticipo su $\frac{\bar{V}}{\sqrt{3}}$ $\varphi < 0$

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

FUNZIONA DA MOTORE

mette in gioco $Q = -\sqrt{3} V I'' = \sqrt{3} V I \sin \varphi$

EROGA POT. CAPACITIVA

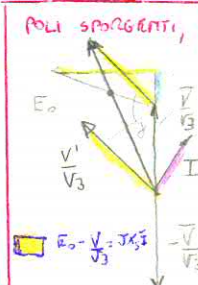
LA RETE LA VEDER COME CARICO INDUTTIVO

POLI SPORGENTI, SOPRAECCITATA, GENERATORESI DEVE FARE CONSIDERAZIONE SUL RAPPORTO TRA LA REATTANZA SINCRONA DIRETTA X_d E QUELLA IN QUADRATURA X_q

$$\frac{H_K}{K_M} = \frac{X_q}{X_d}$$

 $\delta > 0$ $\varphi < 0$ $\gamma > 0$

Continua Tabella



34)

TABELLA RIASSUNTIVA CHE RIASSUME LE QUATTRO COMBINAZIONI DEI FLUSSI DI POTENZA ATTIVA E REATTIVA DELLA MACCHINA SINCRONA POSTA IN PARALLELO ALLA RETE.

δ = ANGOLO DI CARICO

$$|P_e| = \sqrt{3} V I \cos \varphi$$

$$|Q| = \sqrt{3} V I \sin \varphi$$

MACCHINA SOPRAECCITATA

EROGA POTENZA INDUTTIVA

ASSORBE POTENZA CAPACITIVA

$$(Q > 0)$$

MACCHINA SOTTOECCITATA

EROGAZIONE POTENZA CAPACITIVA

ASSORBIMENTO POTENZA INDUTTIVA

$$(Q < 0)$$

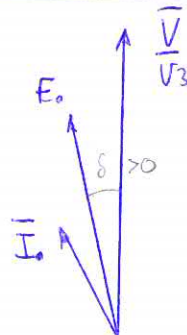
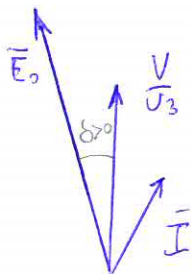
GENERATORE

• EROGAZIONE POTENZA ATTIVA

• ASSORBIMENTO POT. MECCANICA

$$(P_e > 0)$$

E_0 IN ANTICIPO SU $\frac{\bar{V}}{\sqrt{3}}$



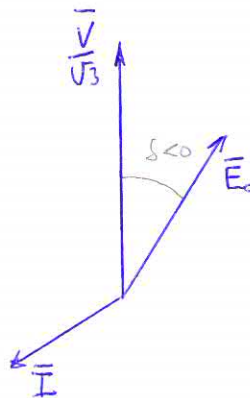
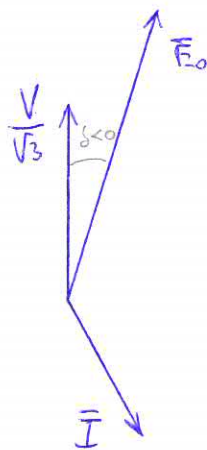
MOTORE

• EROGAZIONE POT. MECCANICA

• ASSORBIMENTO POT. ATTIVA

$$(P_e < 0)$$

E_0 IN RITARDO SU $\frac{\bar{V}}{\sqrt{3}}$



35)

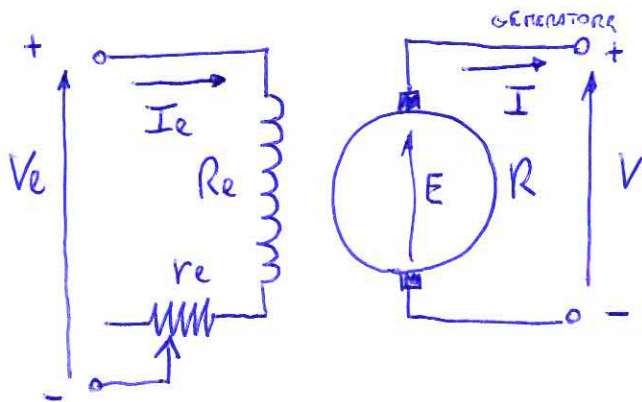
MOTORE A CORRENTE CONTINUA CON ECCITAZIONE INDIPENDENTE: CARATTERISTICHE ELETTROMECCANICHE E MECCANICHE E REGOLAZIONE DELLA VELOCITÀ

Nelle macchine a corrente continua, gli avvolgimenti di eccitazione e di indotto, entrambi percorsi da corrente continua possono essere elettricamente indipendenti oppure connessi tra loro. I casi sono:

- INDIPENDENTI → eccitazione indipendente o separata,
- CONNESSI TRA LORO → MACCHINE AUTOECCITATE.

MACCHINA CON ECCITAZIONE INDIPENDENTE.

La corrente di eccitazione è fornita dall'esterno tramite una dinamo o una batteria o convertitori statici, e si può variare per regolare i parametri della macchina agendo sulla tensione della sorgente esterna o sul valore ohmico del reostato posto in serie.



Schema di principio della macchina ad eccitazione indipendente.

V_e : tensione eccitazione.

I_e : corrente eccitazione

R_e : resistenza avvolg. di eccitazione

ℓ_e : reostato di regolazione della I_e

E : fem di indotto a carico

V : tensione di morsetti

R : resistenza avvolgimento di indotto compresa le spazzole e gli eventuali poli ausiliari e compensatori.

I : corrente di indotto che coincide con quella erogata.

N : numero totale dei conduttori di indotto

$2a$: numero delle vie interne.

E : fem indotto

ϕ : flusso a carico

equazione elettrica generica

$$V = E - RI$$

generatore

$V = E + RI$ (motore)

Per la macchina ad eccitazione indipendente valgono:

$$I = \frac{E - V}{R}$$

$$E = K_e \phi \omega \quad \text{con } K_e = \frac{PN}{60a}$$

$$V_e = (R_e + r_e) I_e$$

→ 35 L'espressione della coppia elettromagnetica C si ricava a partire dalla potenza convertita da meccanica in elettrica

$$P_{me} = P_e + P_{ep} = VI + R'I^2 = V + R'I = EI$$

$R' = R$ nell'eccitazione indipendente.

$$C = \frac{P_{me}}{\Omega} = \frac{EI}{\Omega} = K_e \phi_m I \left(\frac{60}{2\pi n} \right)^{\frac{1}{a}} = K_c \phi I$$

vale per ogni sistema di eccitazione.

con $K_c = \frac{60}{2\pi} K_e = \frac{P}{a} \frac{N}{2\pi}$ $a =$ numero di poli interni

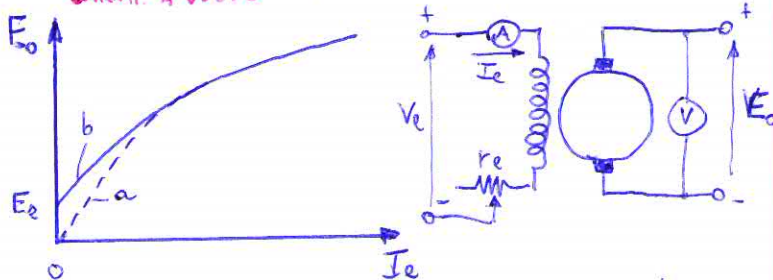
A velocità n costante le caratteristiche di interesse sono:

- caratteristica a vuoto (P_{em} in funzione di I_e con $I=0$ nell'indotto)
- caract. di carico (tensione ai morsetti in funzione di I_e con $I=const$)
- caract. esterna (tensione ai morsetti in funzione di I erogata con $I_e=const$)
- caract. di regolazione (corrente di eccitazione in funzione della corrente erogata con $V=const$ ai morsetti).

DEL GENERATORE D.C.

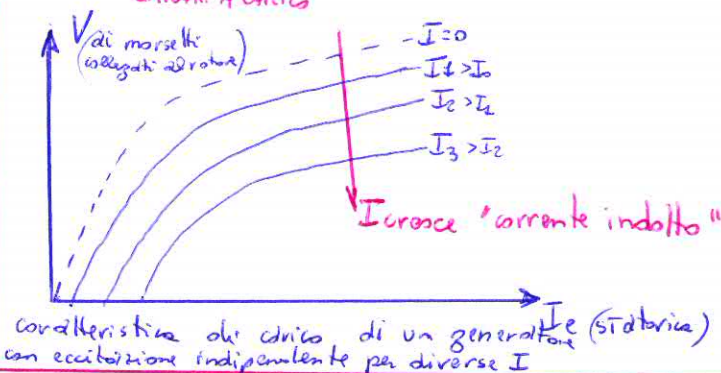
Le curve dipendono dal grado di saturazione e dal tipo di eccitazione.

CARATT. A VUOTO



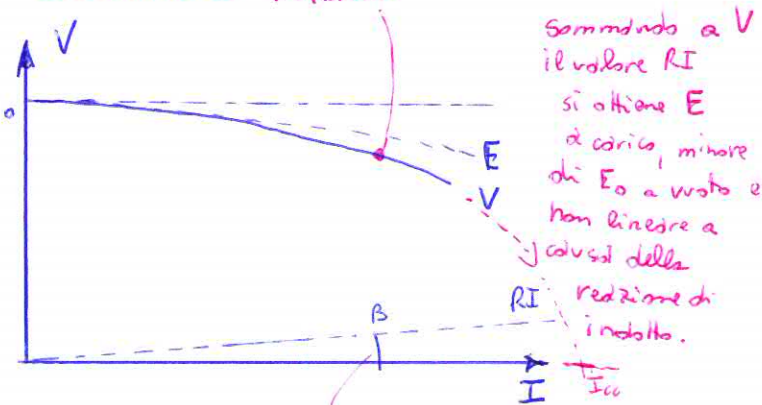
curva "a" macchina senza magnetizzazione residua
curva "b" macchine con magnetizzazione residua

CARATT. A CARICO



caratteristiche di carico di un generatore (statico) con eccitazione indipendente per diverse I

caratteristica ESTERNA



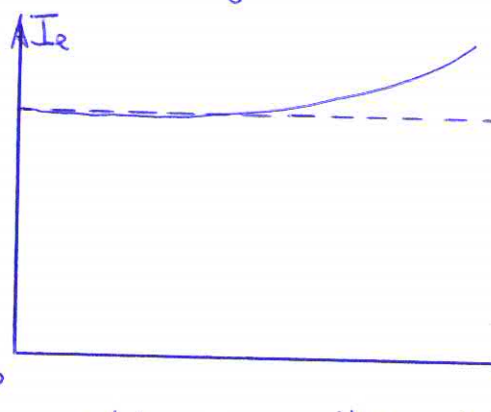
Sommando a V il valore RI si ottiene E di carico, minore di E_0 a vuoto e non lineare a causa della reazione di indotto.

$$\tan \beta = R$$

con i morsetti in corto la V si annulla; prolungando la curva V si trova I_{cc} nell'ascissa.

caratteristica di regolazione.

come variare l'eccitazione per tenere costante la tensione generata.

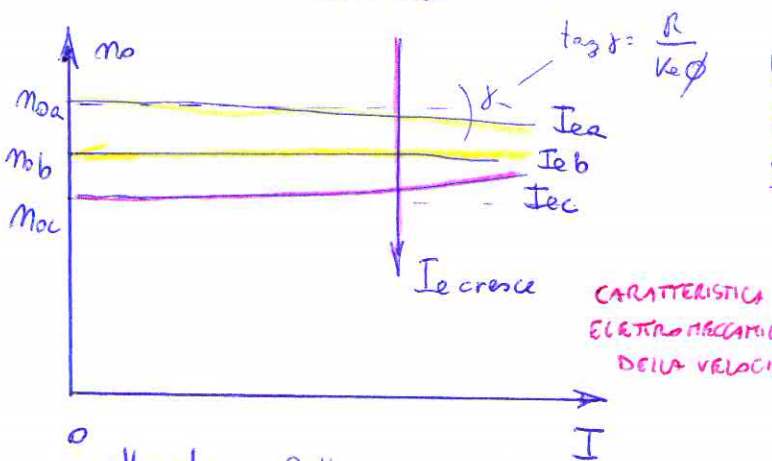


La macchina con eccitazione indipendente si presta bene a funzionare a $V=constante$ perché si compensano facilmente le cadute di V dovute al resistito di eccitazione.

Per l'eccitazione indipendente sono: $n = \frac{V - RI}{K_e \phi}$ non in saturazione è una retta che ha discende forma $y \rightarrow$

$\tan(\gamma) = \frac{R}{K_e \phi}$

a V costante la n del motore diminuisce al crescere della caduta RI ed è inversamente proporzionale al flusso per polo ϕ . L'indimento è diverso a seconda del grado di saturazione e della presenza o meno di avvolgimenti compensatori. Se il circuito magnetico non è saturo $K_e \phi$ non varia per effetto della reazione di indotto.



- macchina non saturata
- macchina poco saturata
- macchine molto saturate

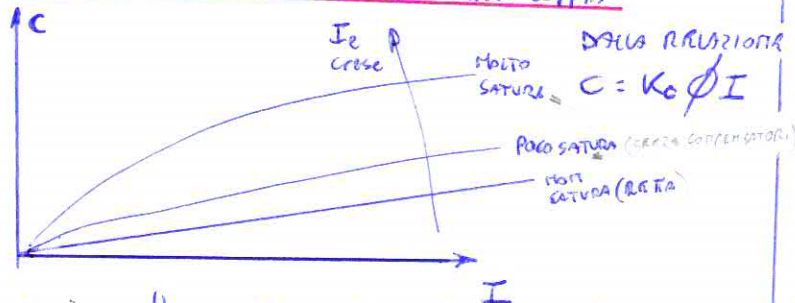
caratteristica elettromeccanica macchina a corrente continua eccitazione indipendente senza circuiti compensatori

NOTA IMPORTANTE

da $n = \frac{V - RI}{K_e \phi}$ si ha che n rimane positivo anche se il funzionamento è da generatore, $E > V, I < 0$ quindi la macchina con eccitazione indipendente passa da motore a generatore senza invertire il senso di rotazione ma solo cambiando il verso della corrente I e quindi il segno della potenza.

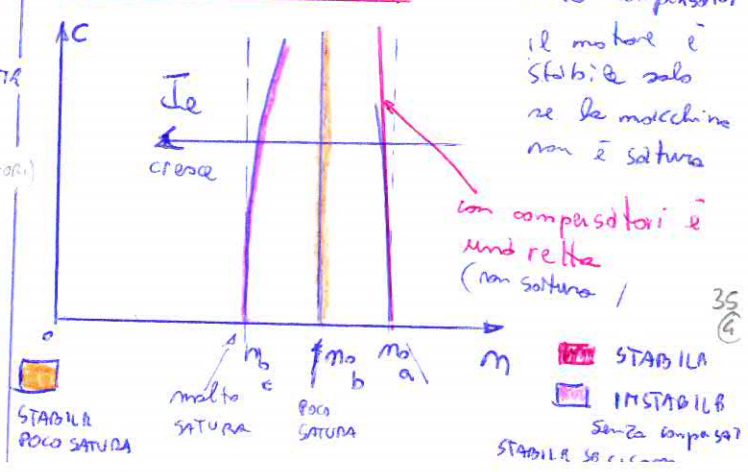
- Ieb si ha perché la reazione di indotto compensa la caduta RI e la velocità di funzionamento risulta costante.
- A macchina molto saturata la velocità aumenta all'aumentare di I
- A macchina non saturata la velocità diminuisce anche se aumenta

CARATTERISTICA ELETTROMECCANICA DELLA COPPIA



se si mettono gli avvolgimenti compensatori avviene deflusso e le curve sono ancora delle rette.

CARATTERISTICA MECCANICA



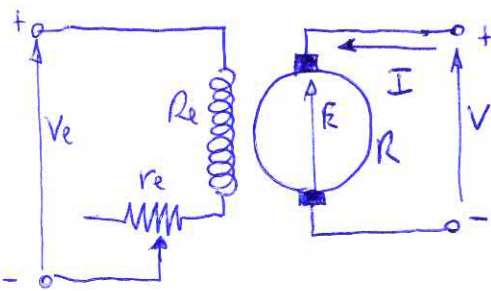
senza i compensatori il motore è stabile solo se la macchina non è saturata

con compensatori è una retta (non saturata)

→ 35 secondo foglio La macchina a corrente continua ha importanza più come motore data l'ampiezza della regolazione possibile nella velocità.

Per funzionare da motore bisogna alimentare l'indotto con V e fare circolare i conduttori di indotto, immersi in B sviluppato da I_e sono soggetti a forze tangenziali e quindi una coppia motrice che si equilibria alla coppia resistente esterna. Le formule trovate per il generatore rimangono valide nel motore. nell'indotto si genera una f.c.e.m. data da $E = K_e \phi \omega$.

convenzionati da motore l'equazione elettrica diventa: $V = E + RI$



$$I = \frac{V - E}{R} \quad E = K_e \phi \omega \quad \text{con } K_e = \frac{P}{a} \frac{N}{60}$$

$$V_e = (r_e + R_e) I_e$$

$$C = K_c \phi I$$

• Senza carico meccanico la corrente assorbita è nulla, f.c.e.m. coincide con la tensione, la velocità di rotazione vale $\omega_0 = \frac{V}{K_e \phi_0}$ velocità a vuoto

• A motore fermo ($\omega = 0$) la f.c.e.m. è nulla, la macchina assorbe una elevata corrente di ampiezza $\frac{V}{R}$ (in caso di eccitazione indep.,

Per limitare la corrente a un valore accettabile, si inserisce dell'avvidamento, in serie all'indotto, un resistore R_a , la cui corrente di avvidamento diventa: $I_a = \frac{V}{R + R_a}$

La coppia diventa: $C_e = K_c \phi I_a$

$$\text{con } K_c = \frac{60}{2\pi} K_e = \frac{P}{2} \frac{N}{2\pi}$$

Le caratteristiche sono: (diverse per tipo di eccitazione)

- Elettromeccanica della velocità (velocità in funzione della corrente assorbita).
- Elettromeccanica della coppia (coppia elettromagnetica in funzione della corrente assorbita)
- meccanica (coppia elettromagnetica in funz. della velocità)

