MACCHINE ASINCRONE
MARTEDì 12 LUGLIO 2005

Le macchine asincrone sono di tipo isotropo.
Il rotore è privo di salienze come lo statore

Lo statore è munito di avvolgimento distribuito aperto di tipo polifase.
L'indotto è sul rotore

L'induttore è lo statorico (alimentazione esterna)

Questa condizione è opposta rispetto alle macchine sincrone.
Qui non vi sono parti alimentate in continua (lo era l'induttore delle sincrone)

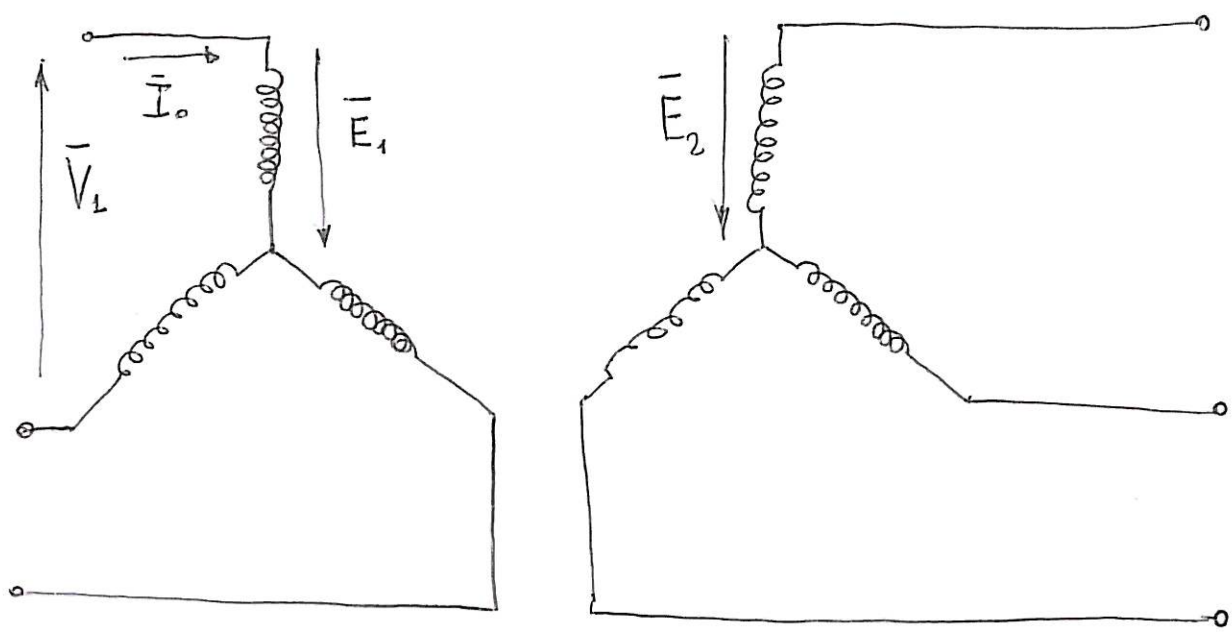
LA TEORIA DELLA MACCHINA ASINCRONA VIENE SVILUPPATA CON RIFERIMENTO ALLE CONVENZIONI DEL MOTORE.

A differenza delle macchine sincrone, nel funzionamento a regime permanente la velocità di rotazione della macchina asincrona pur dipendendo dalla frequenza della tensione di alimentazione dello statore e dal numero dei poli è funzione anche del carico

La velocità di sincronismo rimane come per le macchine sincrone

$$\boxed{n_0 = \frac{60f}{p}}$$

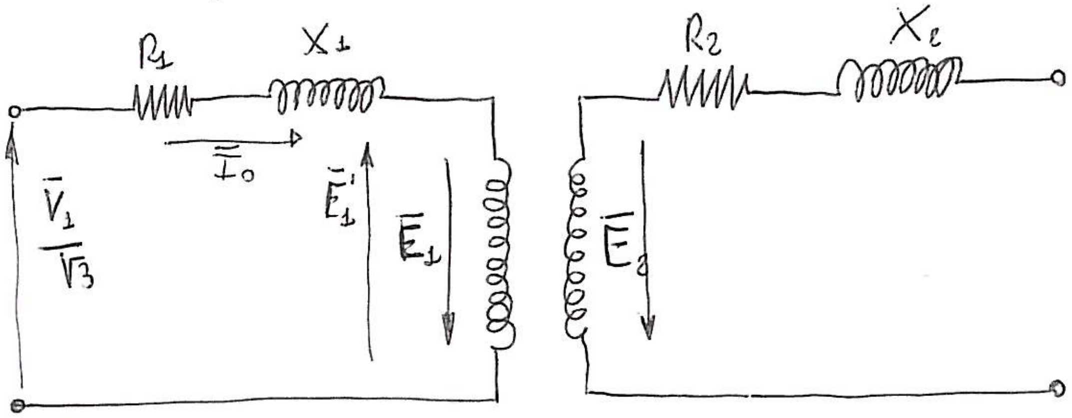
Velocità di sincronismo con circuiti rotorici (indotto) aperti e rotore bloccato.



Le fasi sono collegate a stella e il rotore è aperto e bloccato.

MODELLO DEL MAT. RELATIVO AD UNA FASE (circuiti rotorici aperti e rotore bloccato)

Quando gli assi magnetici sono affacciati la macchina asincrona è modellabile come un trasformatore



Vale solo se la fase è affacciata alla corrispondente fase di rotore. (assi magnetici delle fasi sono allineati)

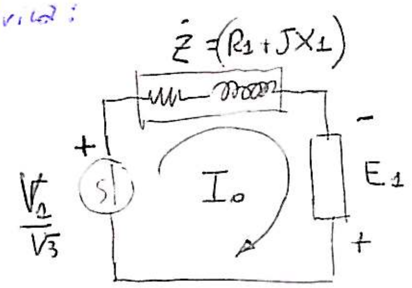
$$\boxed{t = \frac{E_1}{E_2}}$$ Rapporto tra i valori efficaci delle fem

$$t = \frac{E_1}{E_2} = \frac{K_1 N_1}{K_2 N_2} = \frac{K_1 n_1 q_1}{K_2 n_2 q_2} = \frac{K_1 N_S}{K_2 N_R}$$

Per ogni fase vale la equazione elettrica:

$$\boxed{\frac{\bar{V}_1}{\sqrt{3}} = -\bar{E}_1 + (R_1 + jX_1)\bar{I}_0}$$

$\dot{Z} = (R_1 + jX_1)$



$$\bar{I}_0 \dot{Z} - \bar{E}_1 - \frac{\bar{V}_1}{\sqrt{3}} = 0$$

da cui

$$\frac{\bar{V}_1}{\sqrt{3}} = \bar{I}_0 \dot{Z} - \bar{E}_1$$

$$\frac{V_1}{\sqrt{3}} = I_0 (R_1 + jX_1) - E_1$$

FORMALMENTE È LA STESSA EQUAZIONE CHE GOVERNA UN TRASFORMATORE A VUOTO CON RAPPORTO SPIRE t

vista la simmetria elettrica e magnetica è possibile fare riferimento ad una sola fase e tracciare in analogia al trasformatore monofase lo schema della figura sovrastante.

L'analogia trasformatore - macchina asincrona vale nelle ipotesi che la fase di rotore sia affacciata alla fase di statore, ossia i relativi assi magnetici siano allineati.

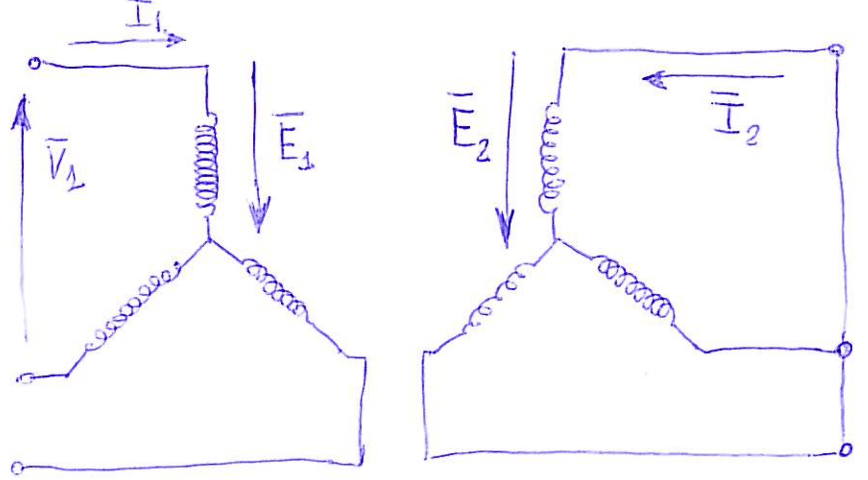
negli istanti in cui le fasi non sono allineate l'analogia non è valida perchè i flussi che producono $\bar{E}_1$ e $\bar{E}_2$ non è istante per istante ugualmente concatenato tra primario e secondario

FUNZIONAMENTO DEL MAT CON CIRCUITI ROTORICI IN CORTO CIRCUITO E ROTORE BLOCCATO

Si faccia l'ipotesi che il flusso ϕ_0 sia mantenuto costante e che i circuiti rotorici siano aperti.
La terna simmetrica di f.e.m. di rotore $\overline{E}_0$ da luogo ad una terna equilibrata di correnti $\overline{I}_2$ che produce una f.m.m a gradini rotante lungo il traferro con la stessa velocità e lo stesso verso della f.m.m rotante di statore. Infatti tale f.m.m si comporta, essendo il rotore bloccato, come una f.m.m. di reazione di indotto di una macchina sincrona di cui la f.m.m. di statore rappresenta la f.m.m. di induttore.

$$E_1 = 2K_f K_1 \phi_0 f N_1$$

$$E_2 = 2K_f K_2 \phi_0 f N_2$$



Rispetto a un riferimento solidale con lo statore, l'andamento temporale della fondamentale della f.m.m. rotorica è individuata da un vettore $\overline{M}_2$ di valore massimo

$$M_2 \approx 1.35\, n_2 q_2 K_2 I_2$$

I pedici 2 indicano che tutto è riferito al rotore.

La f.m.m (forza magneto motrice) M_2 essendo creata dalle correnti $\overline{I}_2$ indotte da ϕ_0, tenderebbe, per la legge di Lenz ad annullare ϕ_0; poiché tale flusso è supposto costante, le fasi di statore devono necessariamente richiamare dalla rete una nuova terna di correnti $\overline{I}_{12}$ tali da mettere in gioco al traferro una f.m.m la cui fondamentale $\overline{M}_{12}$ vale:

$$\overline{M}_{12} \approx 1.35\, n_1 q_1 K_1 \overline{I}_{12} = -1{,}35\, n_2 q_2 K_2 \overline{I}_2$$

quindi

$$\overline{I}_{12} = -\frac{\overline{I}_2}{t} = -\frac{n_2 q_2 K_2}{n_1 q_1 K_1} \overline{I}_2$$

si può quindi scrivere la relazione:

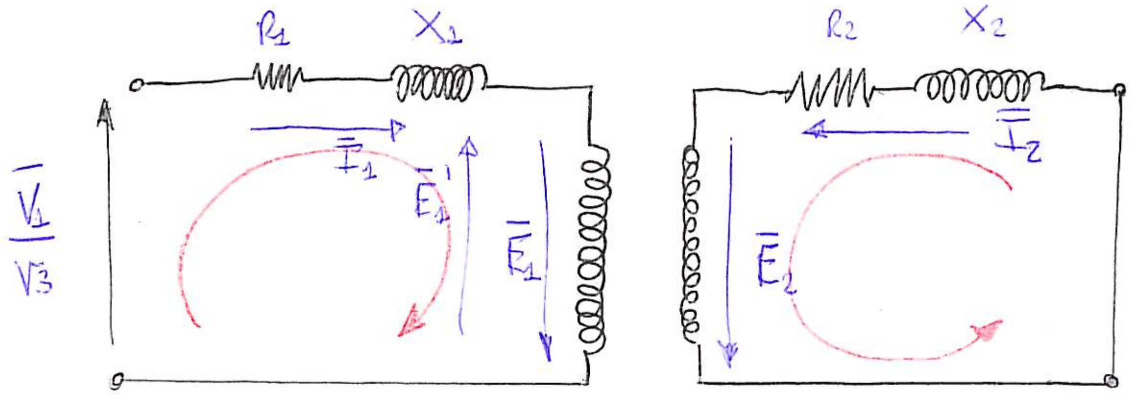
$$\boxed{\frac{\overline{V}_1}{\sqrt{3}} = -E_1 + (R_1 + jX_1) I_1 = \overline{E}_1' + (R_1 + jX_1)\overline{I}_1}$$

EQUAZIONE MAGLIA STATORE (INDUTTORE DEL MAT.)

analogamente per ogni fase di rotore vale:

$$\boxed{\overline{E}_2 = (R_2 + jX_2)\overline{I}_2}$$

EQUAZIONE MAGLIA ROTORE (INDOTTO DEL MAT)



Dalla l'ipotesi di flusso $\overline{\phi}_0$ e quindi $\overline{E}_1$ costante per essere valide le due equazioni di maglia la tensione $\frac{V}{\sqrt{3}}$ deve avere un valore diverso per il caso rotore bloccato e aperti e caso circuiti rotorici in corto e rotore bloccato. Dato che la tensione è imposta dalla rete, sarà il flusso a variare. passando dal ϕ_0 al valore ϕ a carico; le fem risultano pertanto:

$E_1 = 2K_f K_1 \phi f N_1$

$E_2 = 2K_f K_2 \phi f N_2$

con $K_f = 1.11$ fattore di forma

ϕ = flusso $\left[\frac{Weber}{m^2}\right]$

K_1 e K_2 = fattori armonici

Si ha una terna simmetrica equilibrata di fem $\overline{E}_2$ che danno luogo a una terna equilibrata di correnti I_2 che produce una fem a gradini rotante lungo il traferro con la stessa velocità e stesso verso della f.m.m. rotante di statore. infatti la f.m.m. di reazione è come nelle macchine sincrone. Quando i conduttori sono percorsi dalla corrente $\overline{I}$ e immersi nel campo $\overline{B}$ (nel rotore) dal essi ortogonali; sono sedi di forza tangenziale che indicano ~~loro~~ coppia risultante che porta in rotazione il rotore con $n < n_0$ per la presenza di attriti, se $n > n_0$ allora all'albero c'è una coppia esterna che la fa girare

FUNZIONAMENTO CON CIRCUITI ROTORICI IN CORTO CIRCUITO E ROTORE IN MOVIMENTO

Supponiamo che al rotore non sia applicata alcuna coppia resistente e che non vi sia neppure alcuna coppia motrice.

I conduttori del rotore sono percorsi da una corrente ed immersi in un campo magnetico ad essi perpendicolare essi sono sede di forze tangenziali che danno luogo ad una coppia risultante.

Essendo le correnti di rotore create sulla base della legge di Lenz esse si oppongono alla causa che le ha generate (cioè al campo prodotto dallo statore è rotante alla velocità di sincronismo n_0) essa tende a diminuire la velocità relativa tra campo e rotore, ossia a trascinare il rotore nello stesso verso del campo di statore.

In definitiva la coppia porta in rotazione il motore con una velocità del rotore pari a n che per la presenza di perdite e attriti è minore di n_0 anche in assenza di coppia resistente esterna applicata all'albero.

LA FREQUENZA DELLE Fem indotte nei conduttori di rotore risulta:

$$f_s = p\,\frac{n_0 - n}{60}$$

$n_0 =$ velocità del campo magnetico rotante di rotore e di statore.

$n =$ velocità meccanica del rotore

$p =$ numero di coppie polari

Posto $S = \dfrac{n_0 - n}{n_0}$ scorrimento relativo

Si ha

frequenza di rotore — frequenza di statore

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

scorrimento

La fem indotta e la REATTANZA DI DISPERSIONE X_s dipendono entrambe dalla frequenza

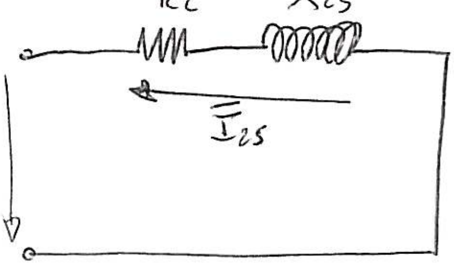
$E_{2s} = 2K_f K_2 \varnothing f_s N_2 = E_2 \cdot s$	$X_{2s} = 2\pi f_s L_2 = X_2 \cdot s$

Alle correnti I_{2s} di frequenza f_s prodotte dalla fem E_{2S}, corrisponde una f.m.m. rotante che ruota rispetto al rotore, con velocità:

$$n_s = \frac{60 \overset{\text{frequenza di rotore.}}{f_s}}{\underset{\text{numero dei poli}}{p}} = n_0 \cdot s = n_0 - \underset{\text{velocità meccanica del rotore}}{n} \quad \text{scorrimento assoluto}$$

La velocità rispetto allo statore è: $n_0 - n + n = n_0$

Quindi in frequenza f_s alle condizioni in esame si ha:



$$\overline{E}_{2S} = \left(R_2 + JX_{2S}\right)\overline{I}_{2S}$$

$$\overline{I}_{2S} = \frac{\overline{E}_{2S}}{R_2 + JX_{2S}}$$

CIRCUITO EQUIVALENTE DI UNA FASE ROTORICA. DI UNA MACCHINA ASINCRONA A ROTORE AVVOLTO CON CIRCUITI ROTORICI CORTO CIRCUITATI E CON ROTORE ROTANTE CON UNO SCORRIMENTO s QUALSIASI

DIVIDIAMO NUMERATORE E DENOMINATORE PER s e otteniamo

$$\overline{I}_{2S} = \frac{\frac{\overline{E}_{2S}}{s}}{\frac{R_2 + JX_{2S}}{s}}$$

SI RICORDA CHE $X_{2S} = X_2 \cdot s$

$$I_{2S} = \frac{\frac{\overline{E}_{2S}}{s}}{\frac{R_2}{s} + JX_2}$$

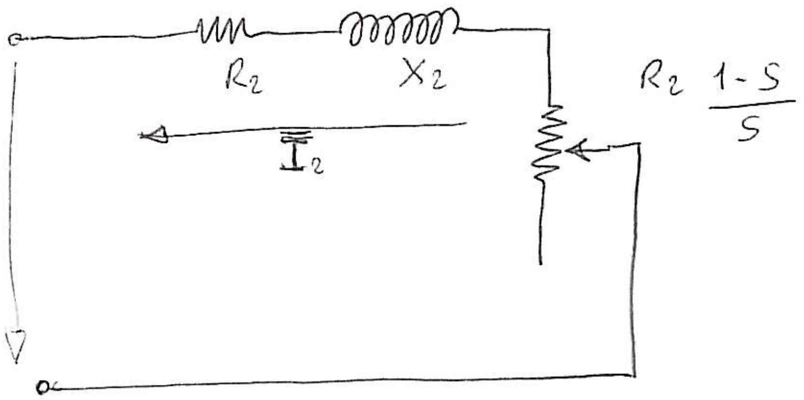
Se moltiplico ambo i membri per il rapporto $\dfrac{e^{J2\pi f \cdot t}}{e^{J2\pi f s t}}$

e tenendo conto che $E_{2S} = E_2 \cdot s$

si ottiene $\overline{I}_2 = \dfrac{\overline{E}_2}{\frac{R_2}{s} + JX_2}$ alla frequenza f e non più f_s

con valori efficaci $\underbrace{I_2 = \hat{I}_{2S}}_{\text{senza segno di vettore}}$ e $\overline{E}$ fem di valore efficace $E_2 = \dfrac{E_{2S}}{s}$ senza segno di vettore ne risulta: $\overline{E}_2 = \left(\frac{R_2}{S}\,\overline{I}_2 + JX_2 I_2\right) = R_2\overline{I}_2 + JX_2\overline{I}_2 + R_2\,\frac{1-S}{S}\,\overline{I}_2$

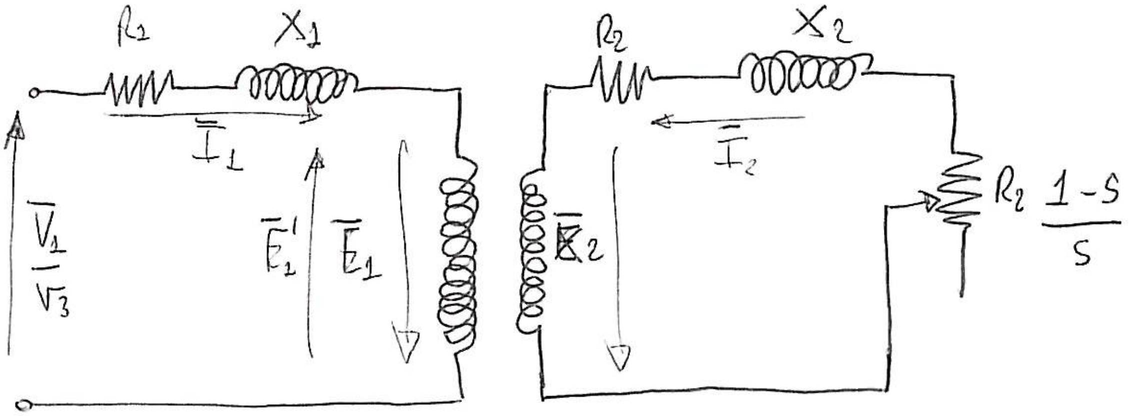
a cui corrisponde il circuito:



← è funzione dello scorrimento ed indica che il rotore ruota.

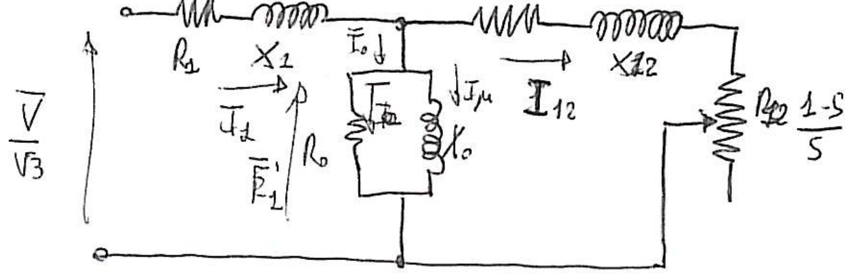
circuito equivalente di una fase di rotore di una macchina asincrona trifase a rotore avvolto nel funzionamento con circuiti rotorici corto circuitati e con rotore rotante con uno scorrimento S qualsiasi (fem e corrente rotoriche a frequenza f.)

NOTA: Anche se il rotore è in movimento possiamo studiare la macchina a rotore fermo con l'aggiunta del carico $R_2\,\frac{1-S}{S}$



TRASMISSIONE DEI PARAMETRI ALLO STATORE (CIRCUITO EQUIVALENTE DI UNA FASE)

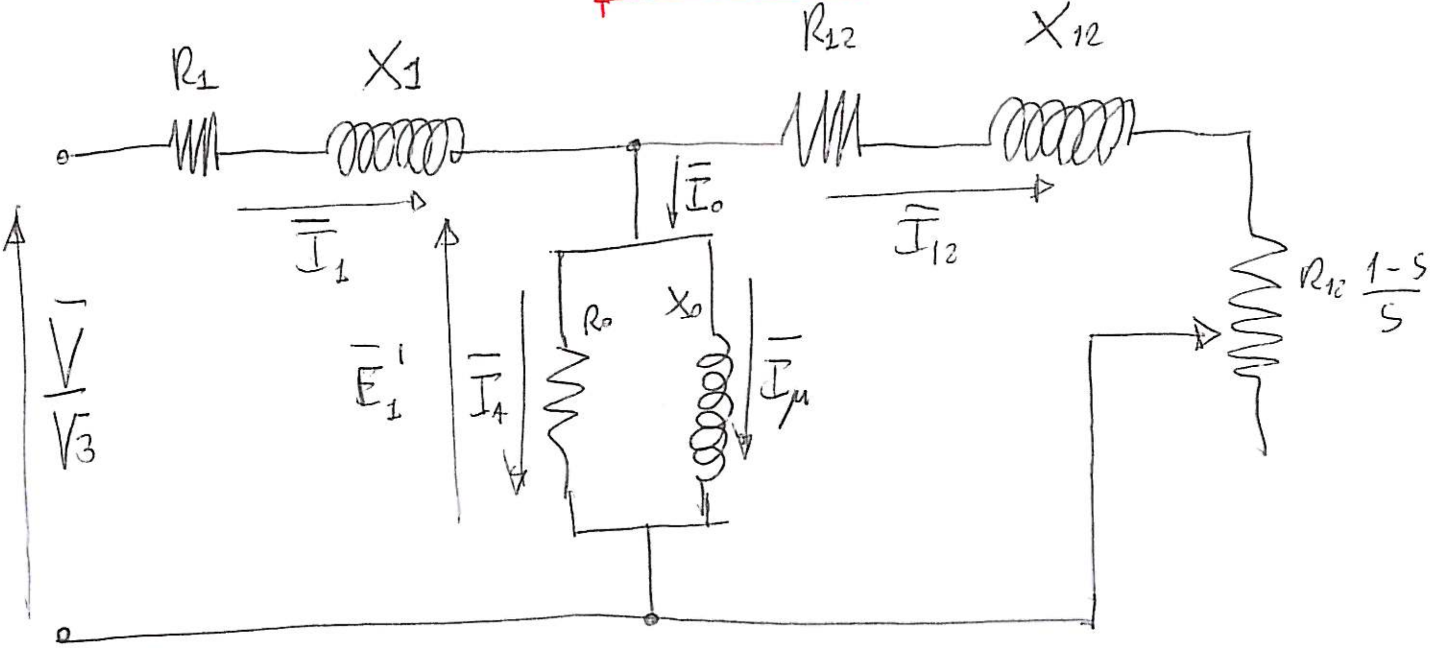
Le relazioni analitiche sono del tutto uguali a quelle di una fase di un trasformatore chiuso su un carico pari a $R_2\,\frac{1-S}{S}$.
È possibile quindi tramite i rapporti di trasformazione riportare tutti i parametri al primario $R_{12} = R_2 \cdot t^2$ e $X_{12} = X_2 \cdot t^2$



S indica quanti giri perde il rotore rispetto al campo rotante.

SCORRIMENTO

$$\boxed{S = \frac{n_0 - n}{n_0}}$$



1) Se il rotore va alla velocità di sincronismo $n = n_0$

$S = 0$ $\quad R_{12}\frac{1-S}{S} = \infty$

Funzionamento a vuoto

La macchina assorbe la sola corrente $\bar{I}_0$ condizione teorica che si verificherebbe in assenza di perdite meccaniche.

2) Quando il rotore è fermo $(n=0)$ si ha:

$S = 1$ $\quad R_{12}\frac{1-S}{S} = 0$

Funzionamento in cortocircuito

È formalmente uguale al funzionamento di un trasformatore con il secondario in cortocircuito.

3) caso di funzionamento generico con valori dello scorrimento $0<S<1$

Risulta $R_{12}\,\frac{1-S}{S} \neq 0$ e di valore finito.

$\boxed{\text{La potenza } 3\,R_{12}\,\frac{1-S}{S}\,I_{12}^2 \text{ corrisponde alla potenza all'albero } P_m}$ A MENO DELLE PERDITE P_{mp}

Le perdite sono nulle per $n=0$ e crescenti con la velocità.

Come per i trasformatori la resistenza trasmessa dal secondario al primario (resistenza del secondario riferita al primario) è dello stesso ordine di grandezza della resistenza del primario. R_1

NOTA BENE: i valori delle resistenze R_1 e R_{12} sono piccoli rispetto a quelli delle resistenze X_1 e X_{12}

Le perdite nel ferro variano con la velocità della macchina P_{fp} (dovute a correnti parassite ed a isteresi)

Queste perdite sono crescenti con la frequenza ed essendo la frequenza f_s delle grandezze rotoriche legate alla velocità ad ogni valore di n corrisponde un determinato valore delle perdite nel ferro di rotore.

Ne consegue che R_o del circuito equivalente dovrebbe essere variabile con lo scorrimento

La resistenza R_o rappresenta le ~~perdite~~ una parte delle perdite a vuoto.

R_o è supposta costante perché si osserva che le perdite meccaniche e le perdite nel ferro e nell'isteresi sono inversamente proporzionali se cala una l'altra aumenta ma la loro somma P_o è costante.

Le perdite nel ferro P_{fp} è massima per $n=0$ rotore bloccato e nulla per $(n=n_o)$ alla velocità di sincronismo.

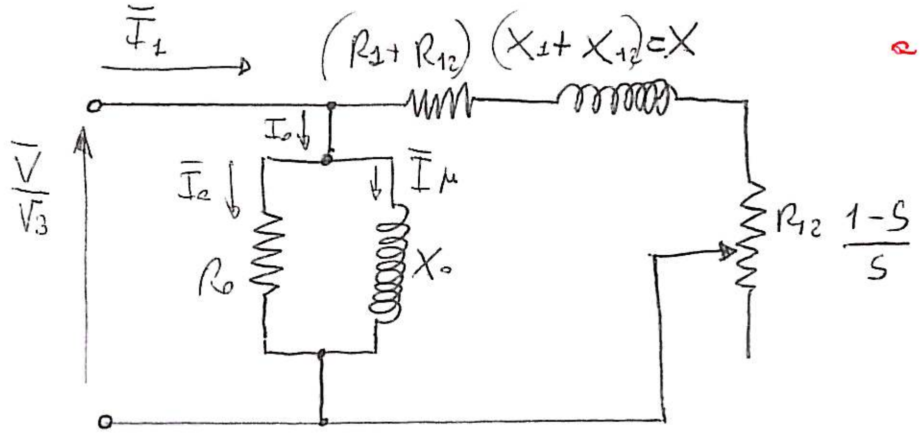
R_o è una costante quando si ritiene che essa sia la causa delle perdite non nel ferro ma $\frac{1}{3}$ delle perdite a vuoto.

$\frac{1}{3}$ delle perdite a vuoto $\Rightarrow$ $P_0 = P_{fe} + P_{mp}$ quando la macchina funziona senza coppia esterna applicata all'albero ($n \simeq n_0$) e si assume tale valore costante qualunque sia la velocità effettiva della macchina.

POTENZA MECCANICA

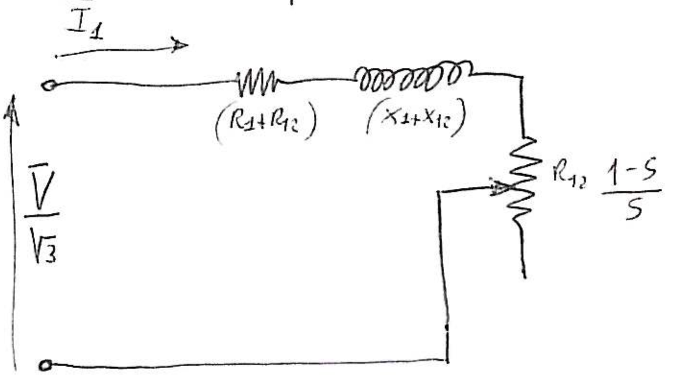
Dato che la potenza persa a vuoto P_0 dovuta alla presenza di R_0 è relativamente piccola rispetto alle perdite nelle componenti resistive del circuito, comporta che la potenza $3R_{12}\frac{1-S}{S}I_{12}^2$ coincida con la potenza meccanica P_m

CIRCUITO EQUIVALENTE SEMPLIFICATO della macchina asincrona trifase M.A.T. a rotore avvolto.



POTENZA, COPPIA E CARATTERISTICA MECCANICA

Se si trascurano le perdite a vuoto P_0 si semplifica ulteriormente il circuito semplificato



P_e = Potenza elettrica attiva ai morsetti dell'avvolgimento trifase di statore

P_t = Potenza trasmessa elettromagneticamente al rotore.

$P_m = P_{em}$ = Potenza meccanica all'albero, coincidente con quella convertita da elettrica in meccanica.

$P_{ep} = P_{ep1} + P_{ep2}$ Potenza perduta per effetto Joule negli avvolgimenti di statore e di rotore.

$\Omega_0 = \frac{2\pi n_0}{60}$ velocità angolare del campo rotante di statore

$$\Omega = \frac{2\pi n}{60} = \Omega_0(1-S)$$

$$I_{12} = \frac{\frac{V_1}{\sqrt{3}}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_{12}}{S}\right)^2 + X^2}}$$

$\boxed{X = X_1 + X_{12}}$

$$\boxed{P_m = 3R_{12}\frac{1-S}{S}I_{12}^2}$$

$$C = \frac{P_{em}}{\Omega} = \frac{P_m}{\Omega} = 3R_{12}\frac{1-S}{S\cdot\Omega}I_{12}^2 = \frac{3R_{12}}{S\Omega}I_{12}^2 = \frac{P_t}{\Omega_0}$$ coppia elettromagnetica

La coppia risulta proporzionale alla potenza P_t trasmessa trasmessa elettromagneticamente al rotore.

$$\boxed{C = \frac{P_m}{\Omega} = 3 R_{12} \frac{1-S}{\Omega \cdot S} = \frac{3 R_{12}}{S \cdot \Omega_0} I_{12}^2 = \frac{P_t}{\Omega_0}}$$

P_m = potenza meccanica

Posto $Z^2 = R_1^2 + X^2$ con $X = X_1 + X_{12}$

L'espressione della coppia diventa:

$$I_{12}^2$$

$$C = 3 \frac{R_{12}}{S \cdot \Omega_0} I_{12}^2 = \frac{R_{12}}{S \cdot \Omega_0} \frac{V_1^2}{\left(R_1 + \frac{R_{12}}{S}\right)^2 + X_B^2} = \frac{V_1^2}{\Omega_0 \cdot Z \left(\frac{Z S}{R_{12}} + \frac{R_{12}}{S \cdot Z} + \frac{2 R_1}{Z}\right)}$$

Da queste ultime considerazioni si possono fare delle considerazioni sul funzionamento della macchina al variare dello scorrimento e quindi della velocità del rotore.

Rotore fermo ($n = 0$, $S = 1$)

A rotore fermo, sostituendo $S = 1$ nelle precedenti relazioni:

- Potenza meccanica nulla. $P_m = 0$
- Potenza elettrica uguale alla potenza perduta. $P_e = P_{ep}$
- Coppia elettromagnetica = $C = \frac{R_{12}}{\Omega_0} \frac{V_1^2}{(R_1 + R_{12})^2 + X^2} = \frac{V_1^2}{\Omega_0 \cdot Z \left(\frac{Z}{R_{12}} + \frac{R_{12}}{Z} + \frac{2 R_1}{Z}\right)} = C_a$

La coppia C_a è della coppia di AVVIAMENTO

A velocità nulla la macchina assorbe dalla rete una potenza elettrica pari alla potenza perduta per effetto Joule negli avvolgimenti di rotore e di statore

I termini $\frac{R_{12}}{Z}$ e $\frac{R_1}{Z}$ sono piccoli rispetto a $\frac{Z}{R_{12}}$ e pertanto la coppia di avviamento può essere scritta nella forma

$$C_a \approx \frac{V_1^2}{\Omega_0 \cdot Z^2} R_{12}$$

La coppia di avviamento è proporzionale alla resistenza di una fase

Rotore in moto nello stesso verso del campo rotante con $0 < n < n_0$ $0 < s < 1$

Per $0 < s < 1$

- Coppia elettromagnetica positiva
- Potenza meccanica $P_m = C \cdot \Omega_0 (1 - s)$ positiva
- Potenza elettrica P_e positiva e pari alla somma di P_{ep} e P_m

La macchina assorbe potenza elettrica dalla rete che in parte compensa le perdite per effetto Joule negli avvolgimenti di rotore e di statore e in parte viene convertita in potenza meccanica: la macchina asincrona funziona da motore.

Se analizziamo l'espressione della coppia C nelle sue derivate:

$$C = 3 \frac{R_{12}}{s \cdot \Omega_0} I_{12}^2$$

$$\frac{dC}{ds} = 0 \Rightarrow \frac{dC}{ds} = 0 \rightarrow s = \frac{R_{12}}{Z} = s_M$$

Per questo valore dello scorrimento si ricava

$$C = \frac{V_1^2}{2 \cdot \Omega_0 \cdot Z \left(1 + \frac{R_1}{Z}\right)} = C_M$$

Trascurando il termine $\frac{R_{12}}{Z}$ la coppia massima può essere scritta anche nella forma:

$$\boxed{C_M \simeq \frac{V_1^2}{2 \cdot \Omega_0 \cdot Z}}$$

Rotore in moto alla velocità di sincronismo ($n = n_0$, $s = 0$)

Alla velocità di sincronismo ($s = 0$) sono nulle la potenza elettrica, le perdite per effetto Joule, la coppia elettromagnetica e la potenza meccanica: la macchina non assorbe né fornisce alcuna potenza.

Rotore in moto nello stesso verso del campo rotante con ($n_0 < n < \infty$) ($-\infty < s < 0$)

velocità superiore a quella di sincronismo ($0 > s > -\infty$)

- Coppia elettromagnetica negativa
- Potenza meccanica $P_m = C \cdot \Omega_0 (1 - s)$ negativa
- Potenza elettrica P_e con il primo addendo P_{ep} positivo e il secondo P_m negativo.

La macchina in queste condizioni assorbe potenza meccanica dall'albero.
Il minimo della coppia motrice C_M aumenta fino ad annullarsi per $s = -\infty$. Il valore minimo si ottiene per

$$s = -\frac{R_{12}}{Z} = s'_M$$

e per la formula

$$C = 3 \frac{R_{12}}{s \cdot \Omega_0} I_{12}^2$$

vale

$$C'_M = -\frac{V_1^2}{2 \cdot \Omega_0 \cdot Z \left(1 - \frac{R_1}{Z}\right)}$$

La potenza elettrica si annulla per

$$s = -\frac{R_{12}}{R_1} = s_R$$

è il valore di scorrimento che rende la potenza elettrica erogata uguale alla potenza meccanica fornita dall'albero che è circa uguale a $s \cong -1 = s_R$

visto che R_1 e R_{2}' sono dello stesso ordine di grandezza il valore dello scorrimento che annulla la potenza elettrica è $S \cong -1$

$S_R < S < 0$ si ha $|P_m| > P_{ep}$ la potenza elettrica è negativa quindi la macchina eroga potenza elettrica.

La macchina assorbe potenza meccanica e la converte in elettrica perciò in queste condizioni di funzionamento si comporta da generatore sincrono

GENERATORE SINCRONO

Per $S_R > S > -\infty$ si ha per $|P_m| < |P_{ep}|$ la potenza elettrica è positiva e quindi la macchina assorbe sia potenza elettrica sia potenza meccanica che vanno entrambe a compensare le perdite:

La macchina in queste condizioni funziona da <u>freno</u> $S_R > S > -\infty$

$|P_m| < |P_{ep}|$

FRENO

Rotore in moto in verso contrario al campo rotante con $(-\infty < n < 0)$, $(\infty > S > 1)$

Per $\infty < S < 1$ si ha:

- Coppia elettromagnetica positiva
- Potenza meccanica $P_m = C \cdot \Omega_0 (1 - S)$ negativa
- Potenza elettrica P_e con primo addendo P_{ep} positivo e il secondo P_m negativo.

La macchina assorbe potenza meccanica all'albero. Poiché inoltre risulta sempre $|P_m| < |P_{ep}|$ la potenza elettrica P_e è comunque positiva, la macchina assorbe pertanto sia potenza meccanica sia potenza elettrica che vanno entrambe a compensare le perdite.

La macchina funziona ancora da freno.

Rotore in moto con $n = \pm\infty$ $\quad S = \mp\infty$

Questa è una condizione teorica in cui $S = \mp\infty$ risulta $R_{12}\dfrac{1-S}{S} = -R_{12}$

e quindi $I_{12} = \dfrac{\frac{V_1}{\sqrt{3}}}{\sqrt{R_1^2 + X_\varphi^2}} = I_{12\infty}$ ne consegue che si ha:

- coppia elettromagnetica nulla;
- potenza elettrica $P_e = R_1 \dfrac{V_1^2}{R_1^2 + X^2}$ positiva
- Potenza meccanica $P_m = -R_{12}\dfrac{V_1^2}{R_1^2 + X^2}$ negativa

La macchina assorbe da un lato la potenza elettrica corrispondente alle sole perdite per effetto Joule negli avvolgimenti rotorici.

CARATTERISTICA MECCANICA

La caratteristica meccanica è l'andamento della coppia elettromagnetica C in funzione della velocità n o dello scorrimento S

Le aree di funzionamento stabile da motore o da generatore sono nei pressi di $n = n_0$ dove cioè $S=0$.
Valori tipici ottimali per lo scorrimento che porta la macchina a funzionamenti stabili sono compresi tra 0,01 e 0,06 (a parte il caso di piccoli motori in cui il valore può essere maggiore).

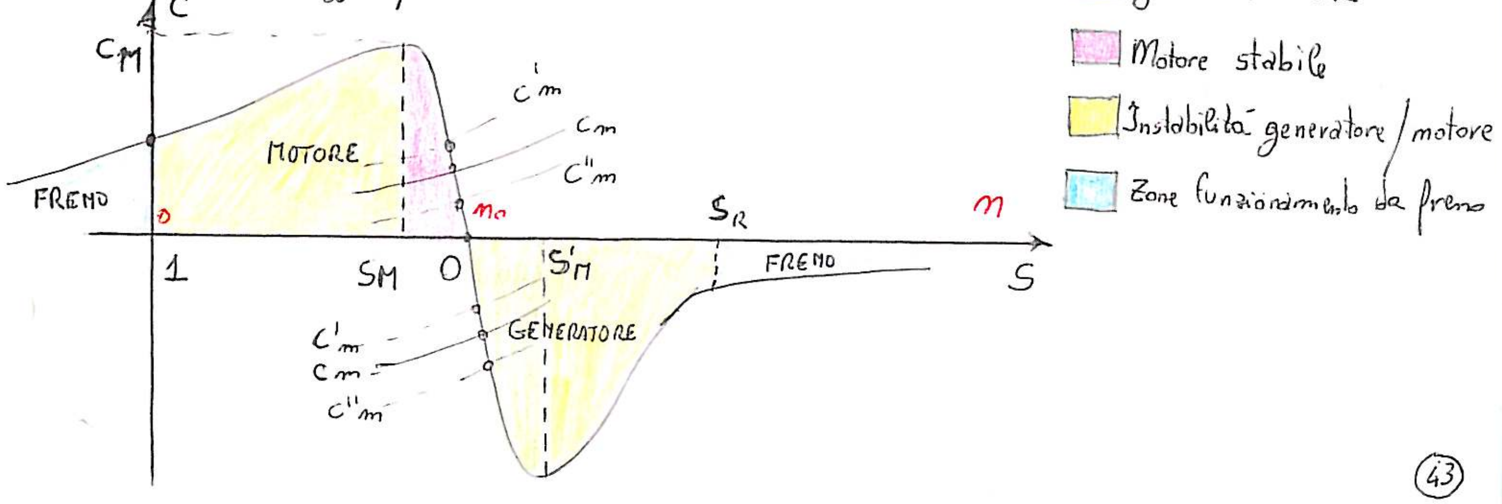
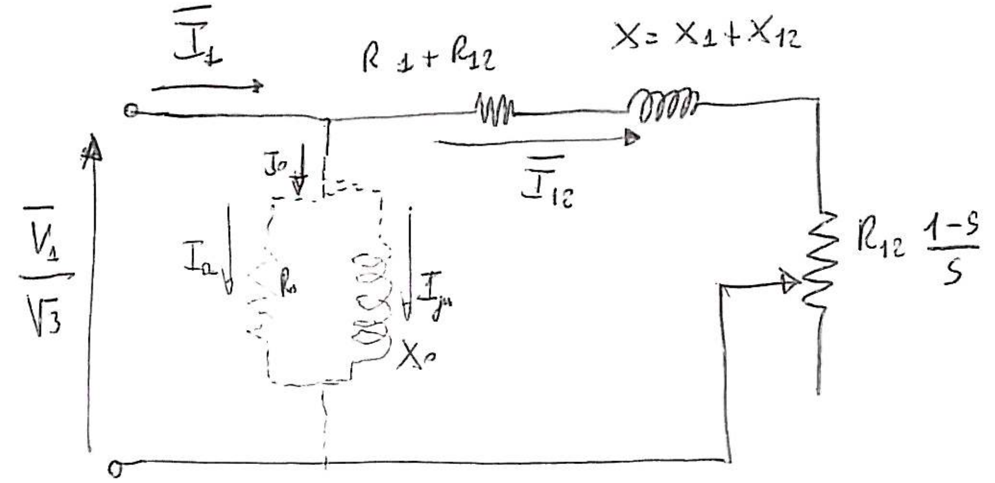


DIAGRAMMA CIRCOLARE

Si usa per il funzionamento a regime permanente della macchina, a tensione e frequenza costanti e per diverse velocità.
Gli autori sono Heyland e Ossana più altri in forme diverse.
Fa riferimento al circuito equivalente semplificato.
Nell'ipotesi di trascurare inizialmente la corrente a vuoto I_0 per il diagramma sottostante:

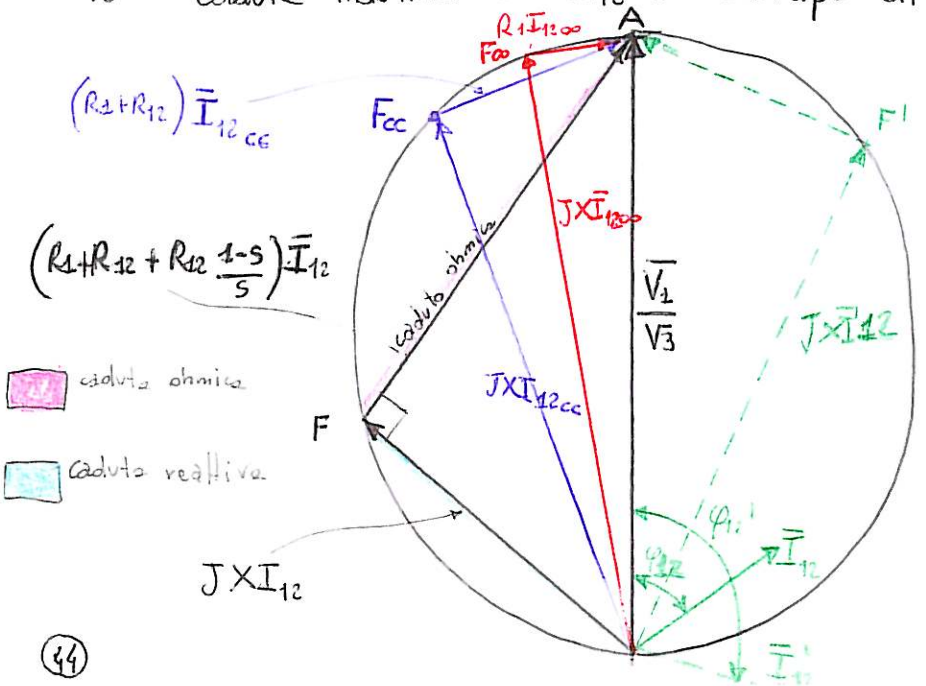


$$\frac{V_1}{\sqrt{3}} = \left(R_1 + R_{12} + R_{12}\frac{1-s}{s}\right)\overline{I}_{12} + JX\overline{I}_{12}$$

$\overline{F_0A}$ tensione di fase $\frac{\overline{V}_1}{\sqrt{3}}$

$\overline{F_0B}$ corrente $\overline{I}_{12}$ assorbita, in ritardo su $\overline{F_0A}$ dell'angolo $\varphi_{12} = \tan^{-1}\frac{X}{R_1 + \frac{R_{12}}{s}}$

$\overline{F_0F}$ caduta induttiva $JX\overline{I}_{12}$ in anticipo di $\frac{\pi}{2}$ su $\overline{F_0B}$



Siccome il circuito equivalente si è ridotto a un RL le cadute di tensione risultano sempre in quadratura e quindi il diagramma è sempre inscrivibile in una semicirconferenza.
Al variare dello scorrimento varia la R_{TOT} e quindi la corrente I_{12} però dovendo risultare sempre più di 90° l'angolo cade sempre in un punto della circonferenza.

Per $S=0$ $n=n_0$ funzionamento a vuoto della macchina risulta $R_{12}\dfrac{1-S}{S}=\infty$ $\overline{I}_{12}=0$ e il punto F cade in F_0.

Per $(S=1)$ $(n=0)$ si ha il funzionamento in corto circuito

Risulta $R_{12}\dfrac{1-S}{S}=0$

$R_1+R_{12}=R_1+R_{12}$ e $\overline{I}_{12}=\overline{I}_{12cc}$ la caduta ohmica diminuisce rispetto a quella induttiva ed il punto F cade in F_{cc} con $\overline{F_0F_{cc}}$

$$\overline{F_0F_{cc}}=JX\overline{I}_{12cc} \quad e \quad \overline{F_{cc}A}=(R_1+R_{12})\overline{I}_{12cc}$$

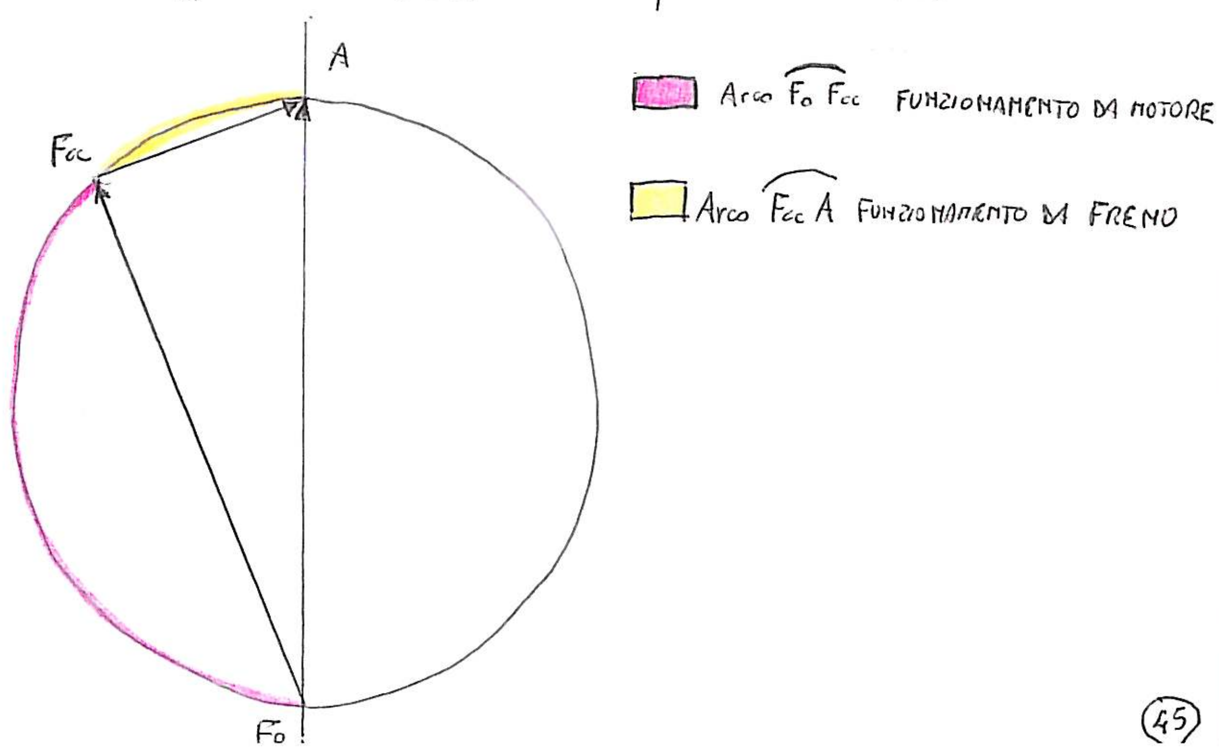
Per $S=\infty$ $(n=\infty)$ risulta $R_1+\dfrac{R_{12}}{S}=R_1$ e $\overline{I}_{12}=\overline{I}_{12\infty}$

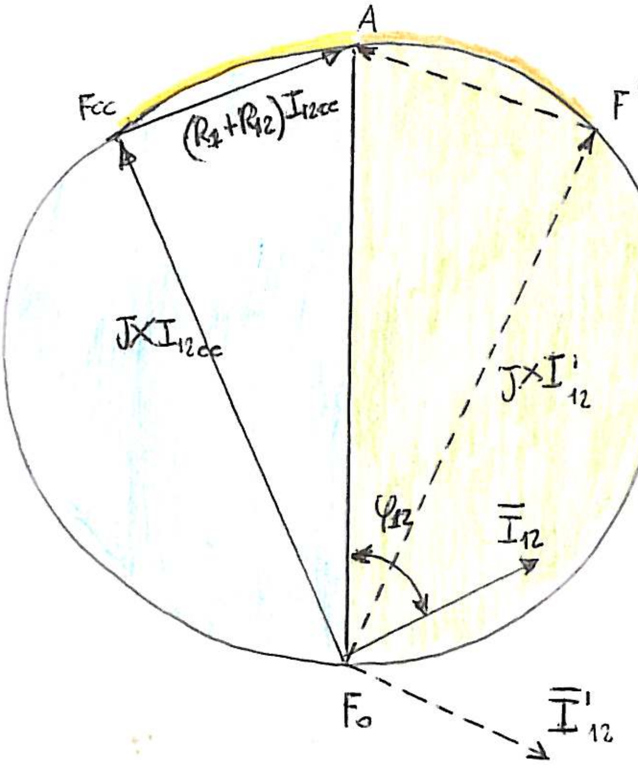
La caduta ohmica diminuisce ulteriormente rispetto a quella induttiva ed il punto F cade in F_∞ con $\overline{F_0F_\infty}=JX\overline{I}_{12\infty}$

e $\overline{F_\infty A}=R_1\overline{I}_{12\infty}$

Per $S=S_R$ risulta $R_1+\dfrac{R_{12}}{S}=0$

La caduta ohmica si annulla ed il punto F coincide con A



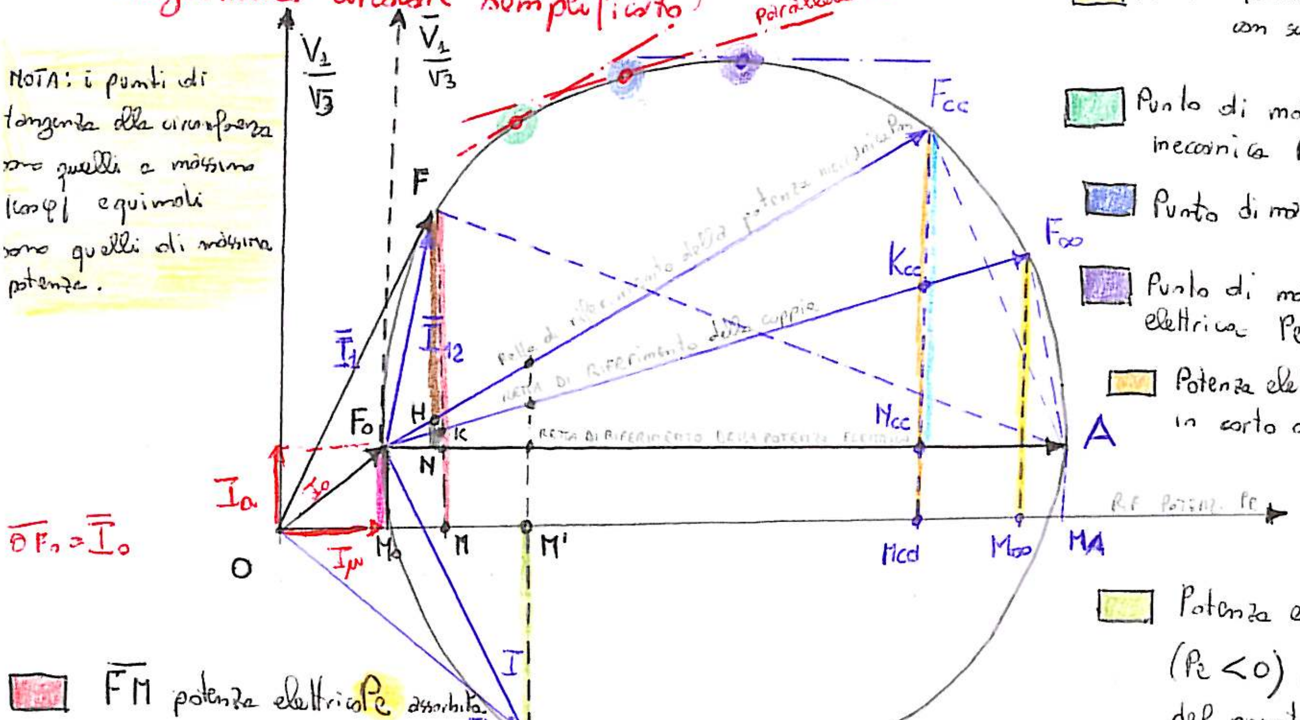


- Area di funzionamento da motore
- Area di funzionamento da generatore.
- generatore come freno
- motore come freno

Dividendo ogni vettore per JX si ottiene il diagramma delle correnti

Diagramma circolare semplificato

NOTA: i punti di tangenza della circonferenza sono quelli a massimo $|\cos\varphi|$ equivoli sono quelli di massima potenza.



- $\overline{F_\infty M_\infty}$ Potenza elettrica assorbita con scorrimento infinito
- Punto di massima potenza meccanica P_m
- Punto di massima coppia
- Punto di massima potenza elettrica P_e
- Potenza elettrica assorbita in corto circuito $(\overline{F_{cc}M_{cc}})$
- $\overline{FM}$ potenza elettrica P_e assorbita in corrispondenza di un generico punto F di funzionamento
- $\overline{FH}$ potenza meccanica P_m
- $\overline{HM}$ proporzionale alla potenza elettrica perduta P_{ep}
- Potenza elettrica erogata $(P_e < 0)$ in corrispondenza del punto F' $(\overline{F'M'})$
- $\overline{F_0M_0}$ Potenza assorbita a vuoto
- $\overline{F_{cc}M_{cc}}$ = Perdite per effetto Joule nel funzionamento in corto circuito con $S=1$

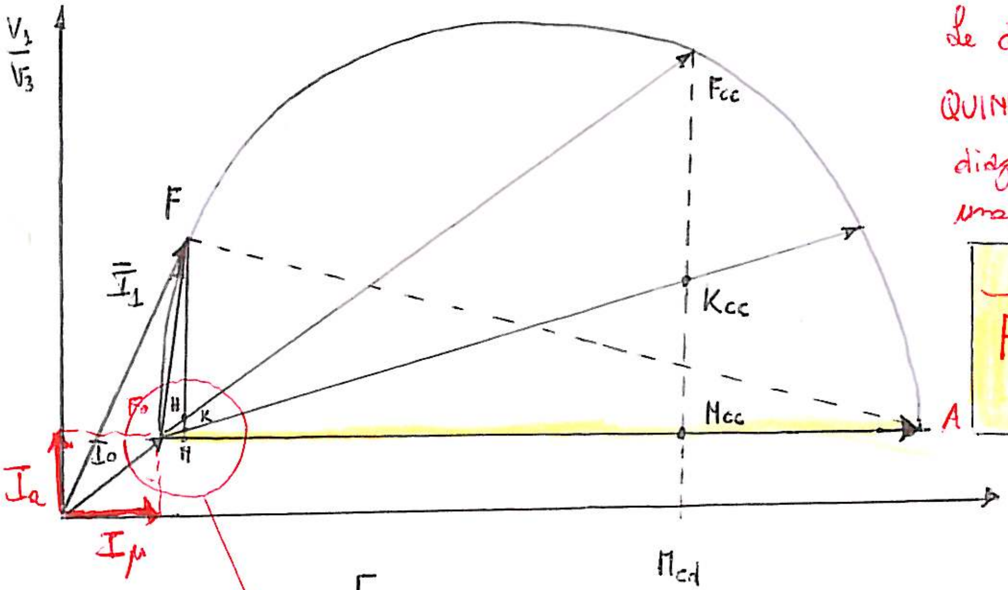
$\overline{FK} = C \equiv P_t$ la coppia è proporzionale alla potenza trasmessa

Scorrimento e Rendimento

Lo scorrimento S in un generico punto di funzionamento è ricavabile dalla relazione:

$$S = \frac{3 R_{12} I_{12}^2}{3 \frac{R_{12}}{S} I_{12}^2}$$

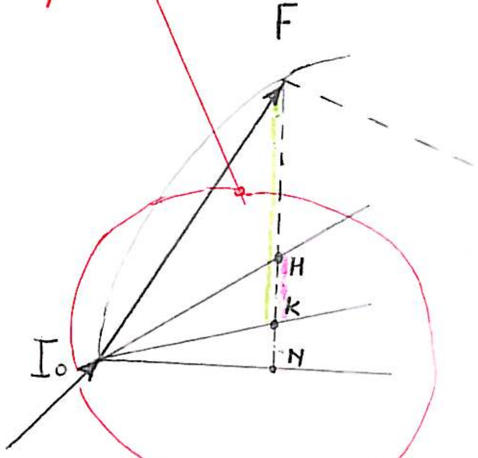
N.B. Anche se le ordinate sono una scala per la tensione di fase $\frac{V_1}{\sqrt{3}}$ in realtà esse hanno origine dalla componente I_a della corrente di perdita.
Le ascisse sono la componente I_μ
QUINDI: Il diametro $F_0 A$ del diagramma circolare è dimensionalmente una corrente.



DIAMETRO

$$F_0 A = \frac{V_1}{\sqrt{3} X}$$ dimensionalmente è una corrente

LO SCORRIMENTO È IL RAPPORTO TRA I SEGMENTI $\overline{HK}$ E $\overline{FK}$ DEL DIAGRAMMA CIRCOLARE



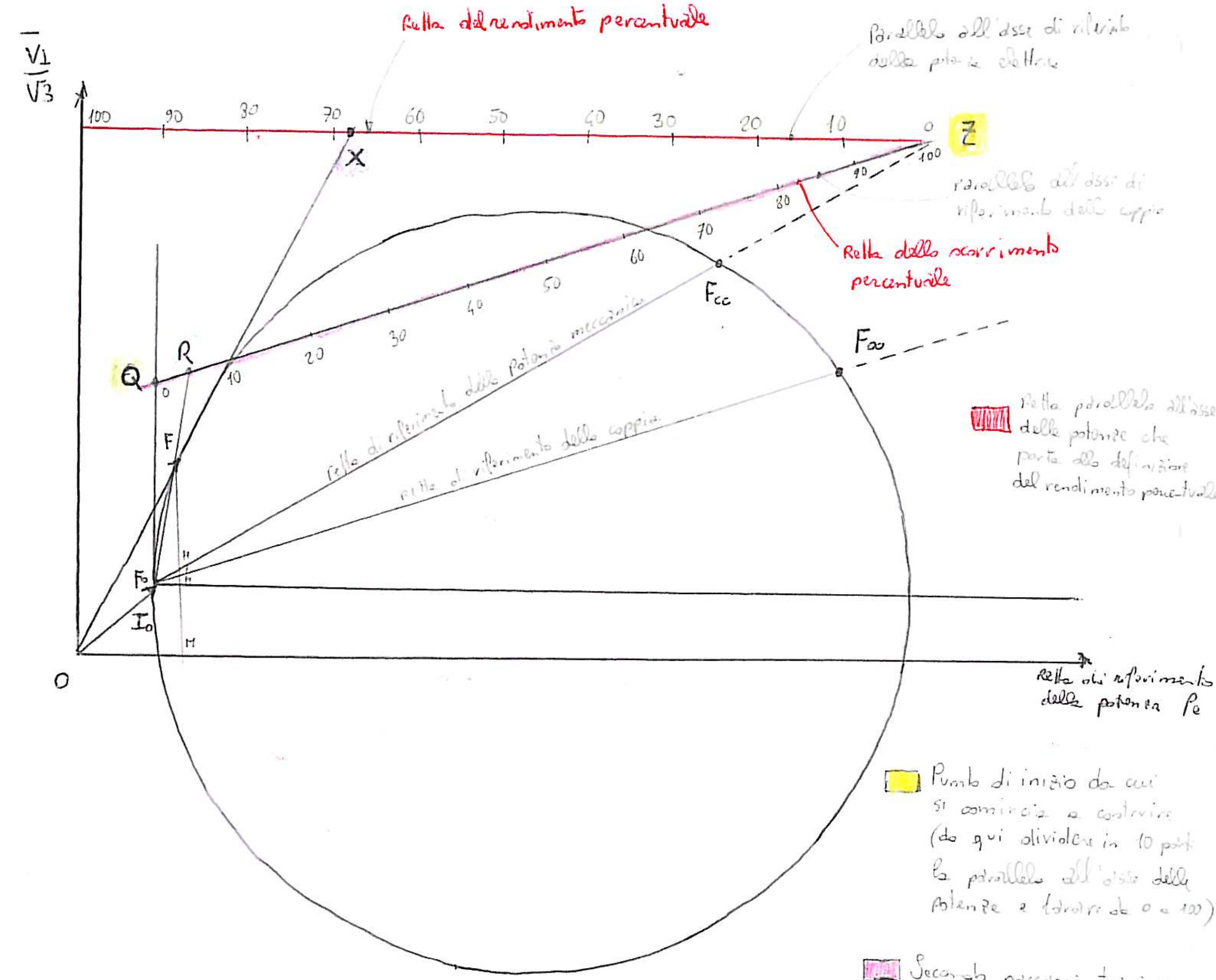
$$S = \frac{HK}{FK}$$

segmento $\overline{HK}$

segmento $\overline{FK}$

Lo scorrimento è in linea generale durante il normale funzionamento piuttosto piccolo quindi la sua deduzione con questo rapporto e per via grafica risulta troppo grossolana

Esiste una tecnica grafica meno grossolana che mette meglio in evidenza lo scorrimento (vedi pag 202)



Punto di inizio da cui si comincia a costruire (da qui dividere in 10 parti la parallela all'asse delle potenze e tararla da 0 a 100)

Secondo passaggio tracciare le retta parallela all'asse delle coppie e tararla.

terzo: trovare il punto Q tramite la parallela all'asse della tensione di fase $\frac{\overline{V_1}}{\sqrt{3}}$

Quarto: trovare il punto X prolungando $\overline{OF}$ che da il rendimento percentuale (considerazioni sui triangoli simili).

Quinto: trovare il punto R prolungando $\overline{F_0F}$ e con considerazioni sui triangoli simili

Il punto X = rendimento percentuale si ottiene prolungando $\overline{OF}$

Il punto R = scorrimento percentuale si ottiene prolungando $\overline{F_0F}$

$$\boxed{\eta = \frac{P_m}{P_e} = \frac{P_m}{P_m + P_{ep} + P_0}}$$

$$QR = \frac{HK}{FK} 100 = \text{scorrimento percentuale.}$$

$$\eta = \frac{\overline{FH}}{\overline{FM}}$$

TRACCIAMENTO DEL DIAGRAMMA CIRCOLARE

Per costruire il diagramma circolare e le relative rette di funzionamento è sufficiente conoscere i punti F_0 $(n = n_0)$, F_{cc} $(n = 0)$, e F_∞ $(n = \infty)$. Si può tracciare in sede di **PROGGETTO** o in sede di **COLLAUDO**

In sede di Progetto il diagramma circolare si costruisce partendo dalla tensione di alimentazione e dai parametri del circuito equivalente ricavati in base ad un dimensionamento di massima della macchina. In particolare, dal calcolo delle perdite nel ferro di statore e di quelle meccaniche per $n = n_0$ si ricava la componente I_a della corrente I_0 mentre dal calcolo delle ampère/spire assorbite dal circuito magnetico della macchina si ricava la componente I_μ.

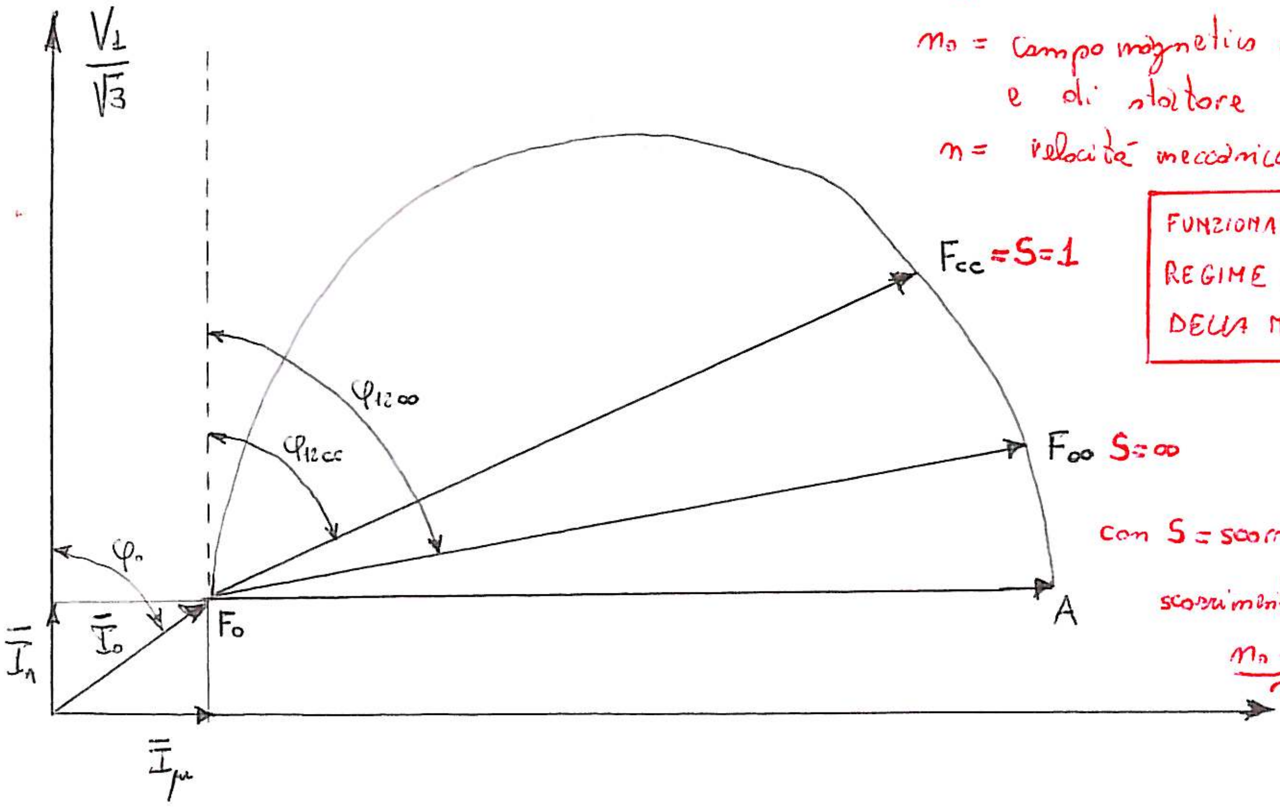
Fissati un sistema di assi cartesiani ed una scala per le correnti, si riportano la corrente I_μ lungo l'asse delle ascisse e la corrente I_A lungo le ordinate. Resta pertanto determinata in ampiezza e fase la corrente I_0 e quindi il punto F_0

Si tenga presente che l'asse delle ordinate rappresenta la direzione di riferimento della tensione applicata $\frac{V_1}{\sqrt{3}}$ Sia le ascisse che le ordinate alla fine sono correnti

S = scorrimento assoluto = differenza $n_0 - n$

n_0 = Campo magnetico di rotore e di statore

n = velocità meccanica di rotore.



FUNZIONAMENTO A REGIME PERMANENTE DELLA MACCHINA

con S = scorrimento

scorrimento relativo

$\frac{n_0 - n}{n_0}$

TRACCIAMENTO DEL DIAGRAMMA CIRCOLARE IN SEDE DI COLLAUDO

Il diagramma circolare può essere tracciato eseguendo sulla macchina funzionante da motore come motore le seguenti prove:

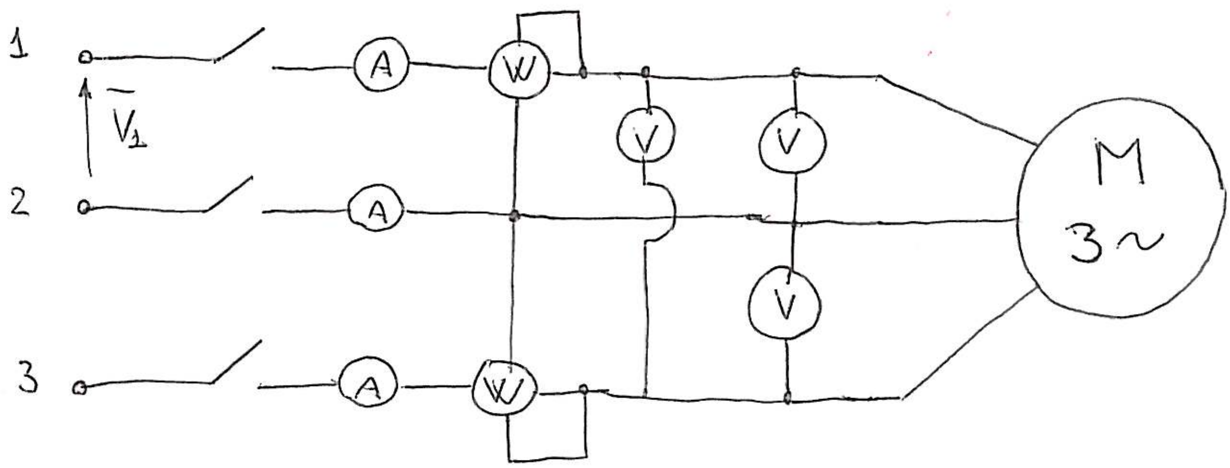
1) Prova a Vuoto
2) Prova in corto circuito
3) Misura Volt-Amperometrica della resistenza R_1 di una fase dell'avvolgimento di statore.

Prova a Vuoto e prova in corto circuito

Si alimenta il motore con un sistema simmetrico di tensioni concatenate.

La prova a vuoto si effettua senza applicare alcun carico all'albero e alimentando il motore alla frequenza e tensioni nominali. In tali condizioni risulta $n \simeq n_0$ $s \simeq 0$ si misurano:

1) Il valore efficace della tensione applicata concatenata V_1
2) La media I_0 dei valori efficaci delle correnti assorbite dalle 3 fasi di statore
3) La potenza assorbita $P_0 = P_{120} + P_{320}$ (somma algebrica)



Da tali misure si calcola il fattore di potenza a vuoto $\cos\varphi_0 = \frac{P_0}{\sqrt{3}V_1 I_0}$ e quindi l'angolo di fase φ_0

PROVA DI CORTO CIRCUITO con ROTORE BLOCCATO $(n=0,\ S=1)$ si misurano:

1) Il valore efficace della tensione applicata V_1
2) La media I_{1cc} dei valori efficaci della corrente correnti assorbite dalle tre fasi di statore
3) La potenza elettrica assorbita $P_{cc} = P_{12cc} + P_{32cc}$ somma algebrica

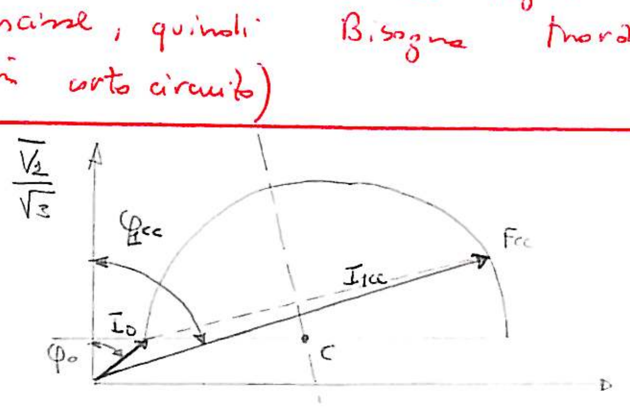
Con queste misure si determina il fattore di potenza in corto circuito

$$\cos\varphi_{12} = \frac{P_{cc}}{\sqrt{3}\,V_1 I_{1cc}}$$ e quindi l'angolo di fase φ_{1cc}

NOTA BENE nelle prove di cortocircuito la corrente di cortocircuito è generalmente 4÷8 (da 4 a 8 volte) la corrente nominale e quasi sempre opportuno ridurre la tensione applicata ad una frazione $\frac{1}{K}$ della tensione nominale, riportando poi le misure effettuate alle effettive moltiplicando per K le correnti e le potenze per K^2

Facendo queste misure è possibile tracciare le correnti $\bar{I}_0$ e $\bar{I}_{cc}$ in ampiezza e fase

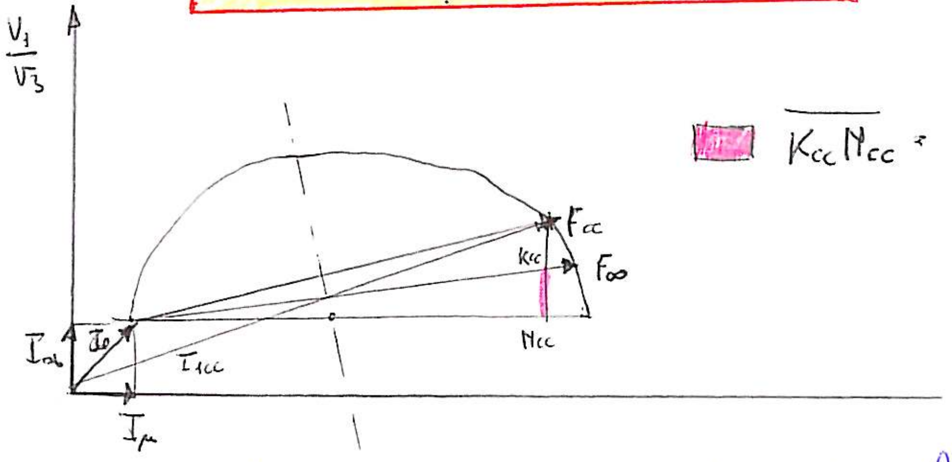
Per trovare il centro del diagramma circolare bisogna sapere che esso si trova sull'asse del segmento $\overline{F_0 F_{cc}}$, e sulla parallela alle ascisse, quindi Bisogna trovare I_0 (prova a vuoto) e I_{cc} (prova in corto circuito)



Potenza dissipata per effetto Joule

La misura della resistenza R_1 permette nella prova in corto circuito di misurare la potenza dissipata per effetto Joule.

$$\boxed{P_{cp} = 3 R_1 I_{12cc}^2 \quad \text{in corto circuito}}$$



$\overline{K_{cc} N_{cc}}$ = Potenza dissipata nello statore per effetto Joule

Tracciamento del diagramma circolare in fase di collaudo.