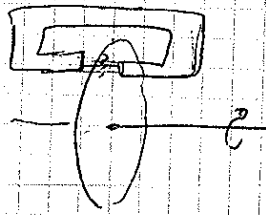


Come sfruttare il campo rotante

Mechine asincrona

Immaginiamo di avere un disco di alluminio libero di muoversi attorno al proprio asse. ~~Intra e circolano delle correnti all'interno~~ il disco in un campo magnetico e fanno ruotare il disco.

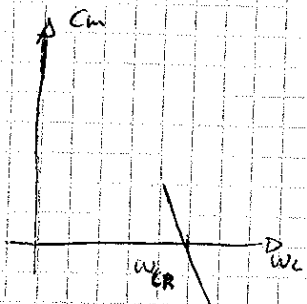


Si genera delle correnti all'interno del disco che tendono a accelerarlo. L'angolo più sottile il disco viene preso dall'energia magnetica - il disco diminuisce di velocità.

Questa è una sorta di funzione elettromagnetica. Non ha importanza se da parte il disco ruota.

Questo è il principio di funzionamento del motore asincrono.

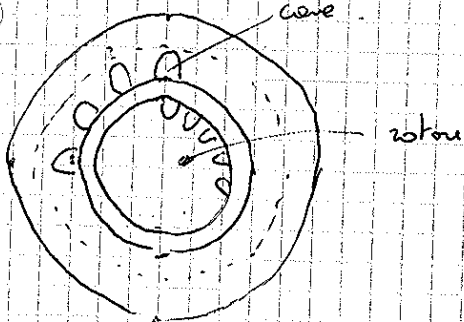
Immaginiamo che se il magnetico si muoveva intorno al disco, la corrente solidale al magnetico vedeva il disco muoversi e frenare. Dall'esterno si vede il disco che inizia a muoversi. Questo è un tipo di commutazione (nasce solo se non c'è sincronismo tra magnetico e disco).



w_{cr} è la velocità del campo rotante

È fondamentale che il disco ~~abbia~~ ^{non sia} un superconduttore.

Le attuali macchine ad induzione sono così:



Il no di cave è multiplo di 6

Il rotore può essere al più un tubo di alluminio (non molto lungo). In realtà oggi il tubo è rivestito

all'esterno con un avvolgimento e guaine di isolamento.

L'avvolgimento può essere fatto fondendo dentro le cave dell'alluminio (o del rame) in

modo da realizzare delle sbarre collegate agli estremi dei due piani

di cortocircuito. Il vantaggio è di ridurre il trasferimento. La costruzione

deve essere fatta con lamiere più spesse in Al. I fan del rotore

sono molto efficienti. Si vede il rotore in un pezzo dove si vede

mettuto dell'alluminio fuso. Il rotore si presenta con una superficie piana.

Il rotore viene laminato e lì si sceglie se aprire le cave di rotore

oppure no. A favore della cave chiuse c'è il vantaggio di avere

una superficie di ferro più omogenea.

I motori fino all'ordine del MW si realizzano motori con metodo di pieno flusso.

Un'altra tecnica è di disporre un avvolgimento trifase collegato a stella. I tre estremi esterni vengono portati su spazzole, si può scegliere se collegarli o meno e si può leggere la tensione indotta. Questi tipi di motori sono detti ad anelli o a rotore avvolto. Non si usano quasi più e non di grandissime potenze o dove non si riesce a fare un pieno flusso.

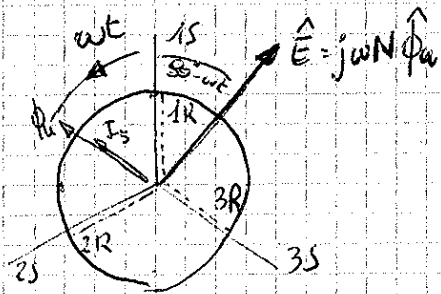
L'avvolgimento a gabbia può essere considerato come un avvolgimento polifase. Ogni conduttore è una fase.

Se l'avvolgimento statorico è trifase $A_1 = \frac{3}{2} N' I$

Sull'avvolgimento a gabbia $Z_p = 1$, $K_a = 1$. Quindi $N = \frac{1}{2}$ ed $N' = \frac{1}{\pi}$. Se il numero di sbarre vale m allora si ha che $A = \frac{m}{2} N' I$ con I la corrente che si produce all'interno della sbarra.

Quindi la gabbia di acciughe è in grado di reagire (e di produrre) ad un campo rotante se percorsa da correnti simmetriche.

Ora in più tratteremo l'avvolgimento del rotore ripartito a spazzole.



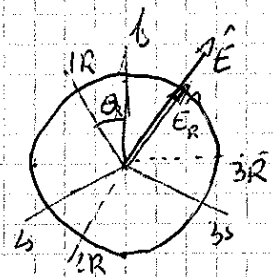
Se l'avvolgimento di rotore ripartito è sovrapposto rispetto a quello di statore si avrà che

$$E_2 = E_1$$

Si ha quindi realizzato un terzo a campo rotante.

$$\begin{aligned} e_{1s}(t) &= \hat{E} \cos(90^\circ - \omega t) \\ e_{1r}(t) &= \hat{E} \cos(90 - \omega t) \end{aligned}$$

} trasformata e rapporto unitario.



$$\begin{aligned} e_{1s}(t) &= \hat{E} \cos(90 - \omega t) \\ e_{1r}(t) &= \hat{E} \cos(90 + \theta_2 - \omega t) \end{aligned}$$

Questo meccanismo può essere utile per creare un vettore di fase.

Si utilizza non il rotore a gabbie, ma avvolto - ed è bloccato.

Ora immaginiamo che il rotore venga fatto ruotare a velocità ω_r .

$e_{12} = \omega_r t$. Allora le forze elettromotrici sono di questa natura

$$e_{12} = K \cos(90 + \omega_r t - \omega t) \rightarrow \text{avrà pulsazione } (\omega_r - \omega)$$

Metodo utilizzato per ottenere una terna simmetrica di tensioni o frequenze simmetriche.

$$K = j(\omega - \omega_r) N \hat{\phi}_m = E_R \text{ perché osservatore solidale al rotore vede } \hat{\phi}_m \text{ muoversi a velocità } (\omega - \omega_r).$$

Se il rotore si muove insieme col campo rotante $E_R = 0$ (non ci sono forze elettromotrici indotte). Quindi la macchina diventa un motore stesso a interazione col campo rotante.

Definiamo $s = \frac{\omega - \omega_r}{\omega}$ lo scorrimento del rotore rispetto al campo rotante.

Uno scorrimento del 100% si ottiene quando il rotore è fermo, mentre uno scorrimento 0 quando il rotore è sincrono.

$$\hat{E}_R = s \hat{E}_S \quad \text{Se consideriamo un valore efficace allora}$$

$$\tilde{E}_R = j \frac{\omega s}{\sqrt{2}} N \hat{\phi}_m, \quad \tilde{E}_S = j \frac{\omega S}{\sqrt{2}} N \hat{\phi}_m$$

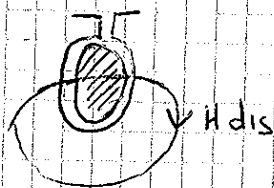
$s\omega$: velocità di scorrimento ed è positiva se il rotore gira più lento del campo rotante.

Analizziamo il funzionamento da motore.

$$\hat{E}_R = s \hat{E}_S = R_R \hat{I}_R + j s \omega L_{or} \hat{I}_R$$

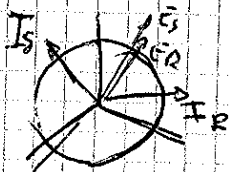
R_R : resistenza di fase dell'avvolgimento rotore.

Molte volte quando passa corrente nelle nei conduttori si generano dei campi magnetici dispersi. Sono molto piccoli e dire che un osservatore



solidale al rotore vede un campo rotante di rotore a pulsazione $s\omega$. Mentre un osservatore solidale con lo stator vede lo stesso campo a velocità $s\omega + \omega_r = \omega$. Quindi I_R è sincrono con I_S, ϕ_m , è alla velocità ω .

Ovviamente I_R



ha una certa fase in ritardo di E_R

Siamo sicuri che il flusso utile sia dipendente solo da I_S ? Problema delle reazioni d'indotto.

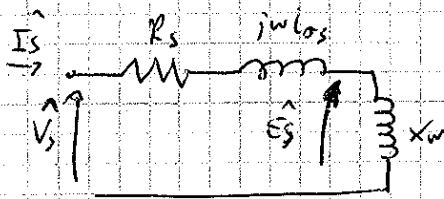
Supponiamo gli assi di riferimento uguali.

$$A = \frac{3}{2} N' \hat{I}_s \quad \text{Prima}$$

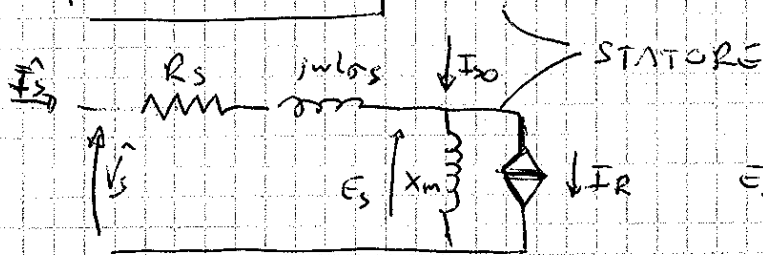
$$\Rightarrow \phi_u = \frac{3}{2} \frac{N'}{R_t} \hat{I}_s$$

$$A = \frac{3}{2} N' (\hat{I}_s - \hat{I}_R) \quad \text{Ora} \Rightarrow \phi_u = \frac{3}{2} \frac{N'}{R_t} (\hat{I}_s - \hat{I}_R)$$

Descriviamo le equazioni in termini di circuito equivalente.

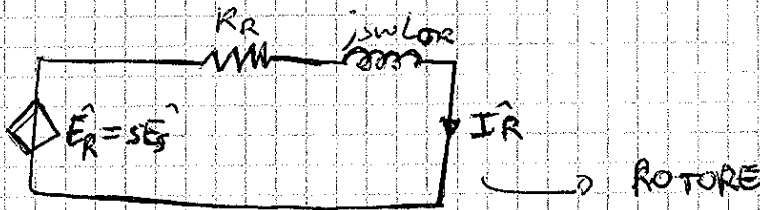


$$\hat{E}_s = j\omega N \frac{3}{2} \frac{N'}{R_t} \hat{I}_s \quad \text{a vuoto}$$



$$\hat{E}_s = j\omega N \frac{3}{2} \frac{N'}{R_t} (\hat{I}_s - \hat{I}_R)$$

I_R circuito non è risolvibile e nero di conoscere I_R



STATORE: $P_s = \frac{3}{2} \hat{E}_s \times \hat{I}_R = 3 \tilde{E}_s \times \tilde{I}_R$

ROTORE: $P_R = \frac{3}{2} s \hat{E}_s \times \hat{I}_R = 3 s \tilde{E}_s \times \tilde{I}_R$

sono diverse quindi il rotore non è equivalente ad un trasformatore

Motivo: genera potenza meccanica

Scorimento: $s = \frac{\omega - \omega_2}{\omega}$. Questa relazione è valida con una sola coppia polare. Se la macchina è a p coppie polari

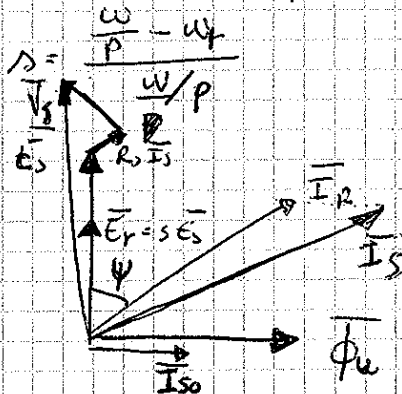
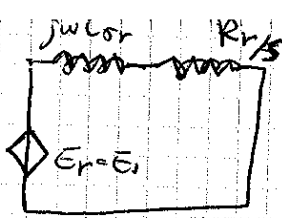


Diagramma vettoriale

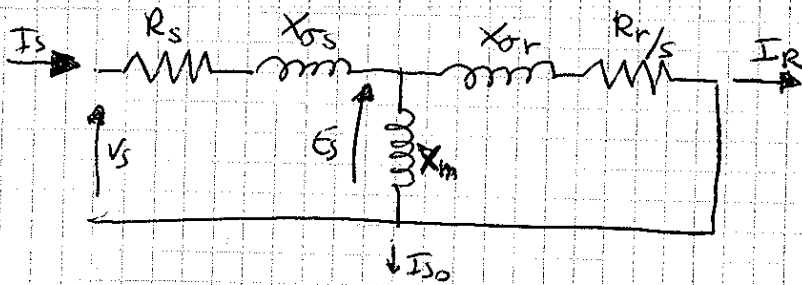
I vettori possono rappresentare sia valore di picco, sia valore efficace.

$$\vec{E}_s = j\omega N \vec{\Phi}_u$$

Modifichiamo il circuito secondario in modo da conservare la potenza.



I fenomeni sul rotore vanno descritti da un asse motore solidale allo statore. A questo punto possiamo unificare i 2 circuiti equivalenti.



Questo circuito equivalente è più semplice del punto di vista calcoli: $\frac{R_r}{s}$ rappresenta ciò che accade elettricamente e meccanicamente sul rotore. $\frac{R_r}{s}$ è fittizio!!

$$P_t = 3 \bar{E}_s \times \bar{I}_R = 3 \frac{R_r}{s} I_R^2 \quad \text{Potenza trasmessa.}$$

Questo circuito non è voluto se si vogliono conoscere le potenze sul rotore

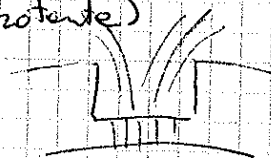
$$\begin{cases} P_t = P_{JR} + P_{mecc} = 3 \frac{R_r}{s} I_R^2 \\ P_J = 3 R_r I_R^2 \end{cases} \Rightarrow 3 \frac{R_r}{s} I_R^2 = 3 R_r I_R^2 + P_{mecc}$$

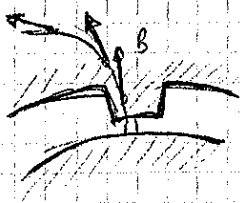
$$\begin{aligned} P_{mecc} &= 3 R_r I_R^2 \left(\frac{1}{s} - 1 \right) = \\ &= \frac{3 R_r I_R^2}{s} (1-s) = P_t (1-s) \end{aligned}$$

$$\begin{cases} P_{mecc} = P_t (1-s) \\ P_{mecc} = C_m \cdot \omega_r \\ \omega_r = \frac{\omega}{p} (1-s) \end{cases} \Rightarrow P_{mecc} = C_m \frac{\omega}{p} (1-s)$$

$$P_t = C_m \frac{\omega}{p} \quad \text{velocità campo rotante}$$

In un motore asincrono ci sono perdite nel ferro? Ogni elemento di ferro viene sottoposto ad induttore che varia nel tempo. Ogni pezzo di ferro è sottoposto a istressi (stressi rotante)

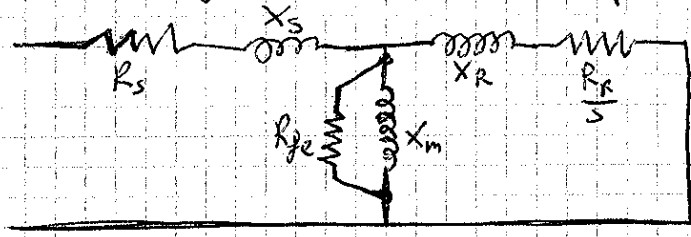




Sul gruppo non c'era più un corpo pulsante, ma una serie di corpi rotante.

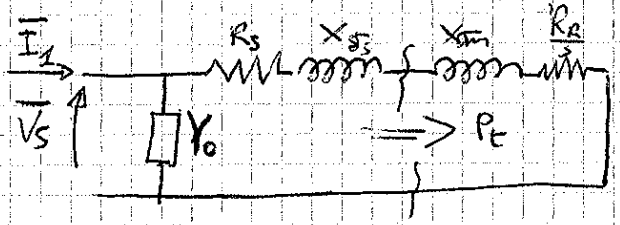
Questo comporta la mescolta di correnti parassite e di utensi. Istessi sul gruppo rotante; sul dente di tipo trasformatorio. Sul rotore si presentano perdite cicloghe. Differente: sulla statore si hanno perdite a pulsazione ω , sul rotore a pulsazione $s\omega$. Quindi le perdite nel ferro sono significative solo nello statore (infatti nella pratica $s \approx 1-4\%$ quindi $s\omega$ è dell'ordine di pochi Hertz.)

Possiamo realizzare il circuito equivalente



Possiamo pensare di spostare $R_r/s \parallel X_m$ e monte di R_s perché I_{s0} è molto bassa e non comporta grosse variazioni del punto di vista numerico.

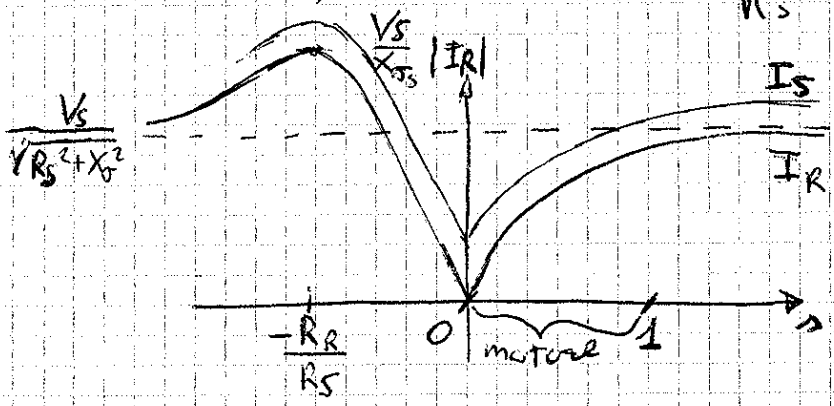
Circuito equivalente semplificato



Nelle macchine ed induttanze $\frac{X_m}{X_s}$ non è equipotenti a quello del trafo. Lo spostamento si monte di Y_0

non è così facile da pensare come nel caso del trafo.

$$\bar{I}_R = \frac{\bar{V}_s}{\left(\frac{R_r}{s} + R_s\right) + jX_s} \Rightarrow |\bar{I}_R| = \frac{V_s}{\sqrt{\left(\frac{R_r}{s} + R_s\right)^2 + X_s^2}}$$



$$\lim_{s \rightarrow \infty} |\bar{I}_R| = \frac{V_s}{\sqrt{R_s^2 + X_s^2}}$$

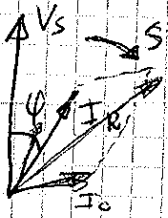
Un motore anodico la massima corrente per $s=1$ usò al momento dello spunto, la corrente poi diminuisce fino ad

annullarsi questo di reate sinuosa.

$$\angle \bar{I}_R \Rightarrow \operatorname{tg} \varphi = \frac{X_S}{\frac{R_R}{s} + R_S} = \Rightarrow \text{la fase sarà } 0 \text{ solo per } s=0$$

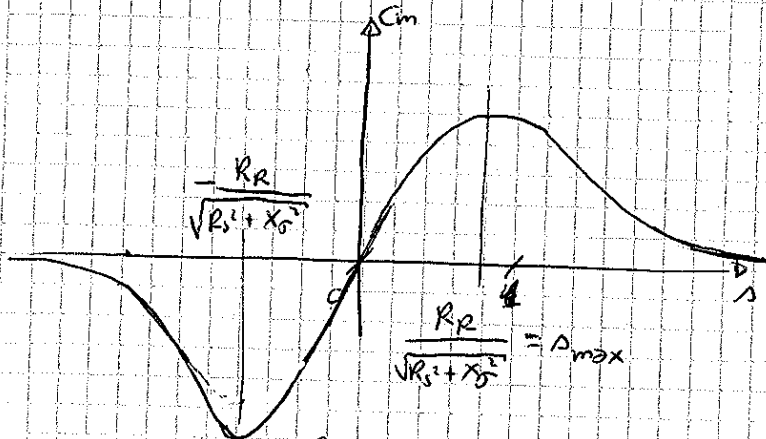
$$= \frac{s X_S}{R_R + R_S s}$$

cioè quando $I_R = 0$



L'evoluzione della corrente di statore è condizionale della corrente rotoria. Nella rete la macchina assorbe la max corrente durante lo spunto, dopo di che la corrente diminuisce. Raggiungerà un minimo quando lavora a vuoto.

Poiché $C_m = \frac{3P}{\omega} \frac{R_R I_R^2}{s} = \frac{3P}{\omega} \frac{R_R}{s} \frac{V_S^2}{\left(\frac{R_R}{s} + R_S\right)^2 + X_S^2}$



Per $s \rightarrow 0$ $C_m \rightarrow 0$ come un infinitesimo del 1° ordine mantenendo il segno di s

Per $s \rightarrow \infty$ denominatore cost mentre num $\rightarrow 0$ come infinit. del 1° ordine

$$C_m = \frac{3P}{\omega} \frac{R_R V_S^2}{s \left(\frac{R_R}{s} + R_S \right)^2 + X_S^2}$$

La coppia sarà max quando il denominatore sarà minimo

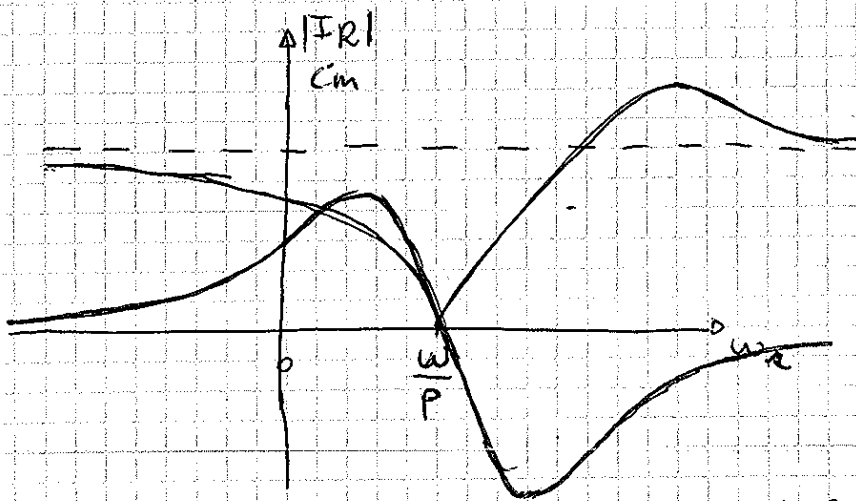
$$s \left(\frac{R_R^2}{s^2} + 2 \frac{R_R R_S}{s} + R_S^2 \right) + X_S^2 = \frac{R_R^2}{s} + 2 R_R R_S + (R_S^2 + X_S^2)$$

La somma sarà minima quando

$$s = \pm \frac{R_R}{\sqrt{R_S^2 + X_S^2}}$$

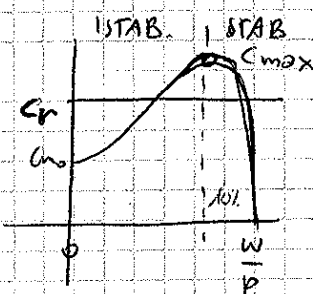
NB: il denominatore sarà minore per s_{max} negativo. cioè $|s_{min}| > |s_{max}|$.

Rifaccio il grafico I_R e C_m in funzione non dello scorrimento, ma della velocità di rotazione.



La corrente aumenta ed è crescente nel funzionamento da fermo a minimo. Le coppie invece ha un innalzamento ed una velocità di rotazione prossime alla velocità di massimo. Il motore sembra quindi si comporta peggio di un motore a olio spinto. Questo può creare problemi specie se la coppia di spinto è piccola.

Consideriamo $C_m(\omega_r)$ nel tratto $0 - \frac{\omega}{P}$ (funzionamento da motore). Il max divide la funzione in due rami: stabile (a dx) ed instabile (a sx).



Teoricamente il motore potrebbe funzionare a 2 velocità questo viene applicato una coppia $C_r \ll C_{rmax}$. Ma nel ramo stabile una piccola variazione ΔC_r o di ω_r farà allontanare la C_m dal punto di equilibrio.

Questo spiega il perché tutti i motori comuni funzionano ad $\omega_r \rightarrow \frac{\omega}{P}$. Questo perché è l'unico modo per avere un funzionamento stabile.

Spesso si parla di motori comuni a 3000 giri, 1500 giri questo da la velocità di ~~max~~ ^{funzionamento} sono prossime a quelle di massimo in condizioni nominali $s = 2-4\%$. Mentre $s_{max} \approx 10\%$.

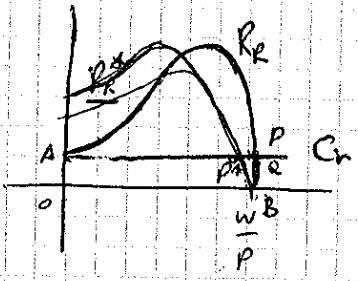
Immaginiamo che il motore debba avviarsi e restare in questo caso il motore si avvia tranquillamente. Se invece parte a carico serve che $C_r < C_{m0}$. Se $C_r > C_{m0}$ il motore non funziona parte.

Posso aumentare le coppie allo spinto?

$$C_m = \frac{3P}{\omega} \frac{R_r V_s^2}{(R_r + R_s) X_s^2} \Big|_{s=1} \text{fermo.}$$

Non posso aumentare V_s rischio di saturare il ferro.

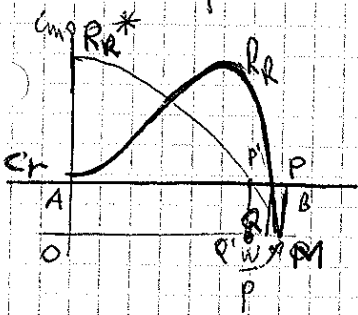
Posso aumentare R_r . Una resistenza rotazionale alta comporta un aumento della coppia. Però se aumento R_r diminuisce il rendimento.



$C_m \approx \frac{3P}{\omega} \frac{s V_s^2}{R_r}$ - Se aumentiamo R_r allora
 e adduciamo la curva. Il motore con R_r^*
 si avvia più facilmente, ne avrà velocità
 minore rispetto a quella con R_r .

Per saperne e C_r il rettangolo AOBQ rappresenta la potenza trasmessa.
 lo bisogno di trasferire la stessa potenza al motore.
 Quindi il motore con R_r^* dissipa più potenza in resistenza.

Se modifichiamo contemporaneamente R_r ed s in modo proporzionale
 contemporaneamente la coppia
 rimane sempre la stessa. Volendo si possono ottenere coppie
 completamente discendenti. Questa caratteristica di coppia presenta
 meno problemi allo spunto.



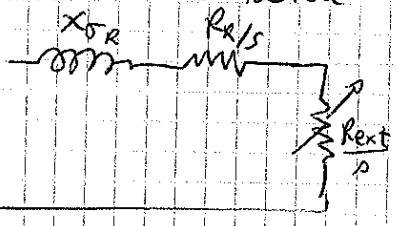
Quelli sono gli effetti non si producono da un aumento
 di R_r ?

Immaginiamo il carico costante C_r . Costuiamo
 il rettangolo OAPQ la cui ^{area} ~~parte~~ rappresenta la
 potenza meccanica che il motore cede al carico.

Consideriamo un secondo rettangolo OABH la cui area rappresenta la
 potenza trasmessa. La differenza di area tra i due rettangoli
 è la potenza dissipata per perdite Joule di motore.

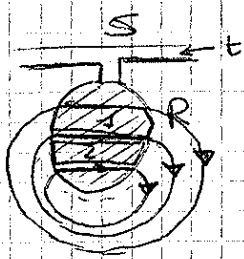
Se cambiamo la resistenza R_r fino a raggiungere R_r^* - il punto
 P si sposta in P' e Q in Q'. Si può notare come la potenza
 trasmessa sia sempre la stessa, ma la potenza meccanica è minore.
 Il motore dissipa di più nel rame.

Se vogliamo un motore ad alto rendimento dobbiamo avere una buona
 resistenza, ma poi si rischia che il motore faccia fatica a
 spuntare. Per risolvere questo dilemma, se si ha a disposizione
 un motore a rotore avvolto si può inserire un resistore variabile



in modo da modificare il valore di R_r .
 Poi mano a mano che il motore accelera si
 può ridurre fino a quando non è a piena
 velocità. Questa tecnica viene usata per

l'avviamento di grandi motori comuni e motore avvolto.
 Cosa ne è fatto oggi con i motori a gabbia? Si esalta l'effetto
 pelle sulla gabbia rotante. Come avviene l'effetto pelle su
 una gabbia rotante? Immagino una gabbia rotante di Al.



percorso da corrente alternate. Consideriamo la presenza del conduttore immerso in cave. Questo è sbando di rotore e percorso da corrente si crea linee di campo.

Supponiamo di dividere lo sbando di Al in strati di uguale spessore. Qui posso vedere gli strati tra loro in parallelo. In alternata la ripartizione delle correnti dipende anche dall'impedenza e non solo più delle resistenze. Le induttanze sono uguali o diverse?

Consideriamo lo strato 2: si connetterà con le linee di campo più esterne. Lo strato 1 si connetterà solo con quella più esterna. Quindi possiamo dire che

$L_1 < L_2 < L_3 < \dots < L_n$. Se siamo in alternata le correnti tendono ad addensarsi negli strati più esterni. Ad una frequenza f

possiamo dire che R_p è maggiore di $m \cdot c.c.$

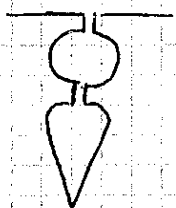
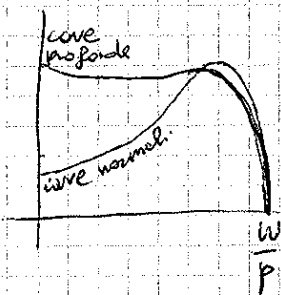


Al crescere della frequenza corrente è disuniformità. Se si fanno le sbarre molto profonde si esalta l'effetto pelle. Questo motore ha una resistenza rotazionale variabile con la frequenza di

rotore. Quando il rotore è fermo le correnti rotore sono a frequenza di alimentazione. Poi la frequenza diminuisce e con essa anche la resistenza. Le caratteristiche di un motore del genere si discostano da quelle teorica ed assume una forma di questo tipo. Questi

motori sono adatti allo spunto in condizioni gravose.

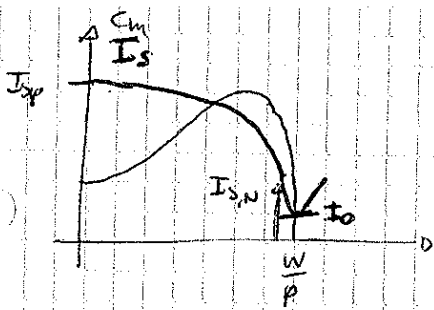
Per esaltare questo fatto le cave rotore possono avere sagome particolari



Allo spunto la parte base non è quasi percorsa da corrente. Quando si è a regime le freq delle correnti è dell'ordine dell' H_z viene usata tutta la sezione.

Si possono avere motori a coppia o a coppia fissa per esaltare l'effetto pelle.

Il problema di spunto è gravoso anche da un punto di vista elettrico. In particolare I_{sp} è elevata.



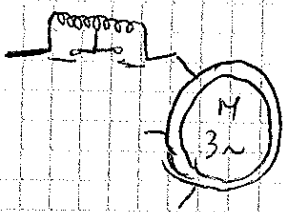
In un motore asincrono in funzionamento nominale $I_s \approx I_0$. In particolare il rapporto tipico $\frac{I_0}{I_s} \approx \frac{1}{2}$. La corrente di spunto invece può essere 3-7 volte la corrente nominale. All'atto dell'avviamento il motore richiede una corrente elevata che può essere interpretata delle perturbazioni di rete come corrente di questo. Quanto si sono consolidate diverse tipologie di avviamenti del motore asincrono. Oggi non sono più usate queste tecniche perché molti motori industriali sono alimentati da inverter.

Per diminuire la corrente bisogna diminuire la tensione. (Coppie di V/E). Questi metodi sono utilizzati con molta cautela. Per regolare la tensione di alimentazione si usa un autotrafo. Questo richiede l'impiego di un dispositivo oltre al motore. Un'altra tecnica è quella di inserire delle resistenze disposte in serie al motore. Queste sono costo irrimediabili. L'avviamento viene fatto con questo metodo e poi ponticellato nel caso in cui il motore si avvia.

Per diminuire la corrente bisogna diminuire la tensione. (Coppie di V/E). Questi metodi sono utilizzati con molta cautela.

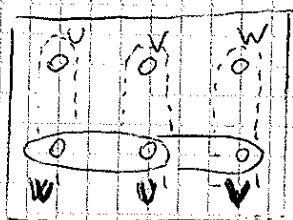
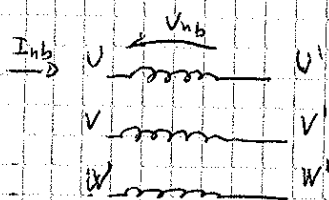
Per regolare la tensione di alimentazione si usa un autotrafo. Questo richiede l'impiego di un dispositivo oltre al motore.

Un'altra tecnica è quella di inserire delle resistenze disposte in serie al motore. Queste sono costo irrimediabili. L'avviamento viene fatto con questo metodo e poi ponticellato nel caso in cui il motore si avvia.



La tecnica più economica è la tecnica Y-Δ. Il principio è che 3 resistenze a triangolo collegate a stella analizzano $\frac{1}{3}$ della corrente. Se il motore è destinato ad essere collegato a triangolo durante l'avviamento posso collegarlo a stella in modo da ridurre la corrente di spunto a $\frac{1}{3}$.

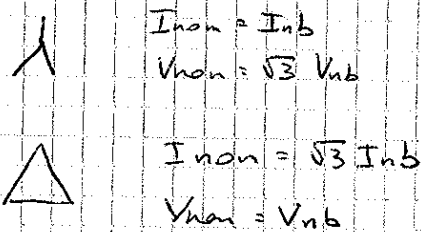
Per capire la connessione bisogna prima vedere come è fatto la morsetteria di un motore asincrono



— stelle
- - - triangolo

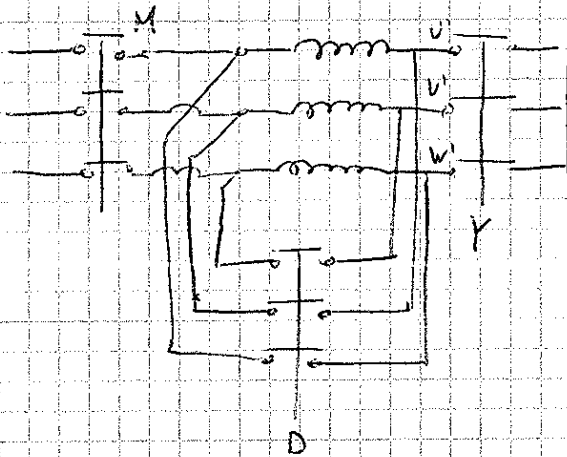
Poiché c'è queste doppia possibilità i motori asincroni presentano 2 valori di tensione nominale e di corrente nominale

Es.	V_{non}	230/400V
	I_{non}	17/10A
		Δ Y



Iniziamo di avere una rete 3φ a 230 V. Se si collega il motore a stella, circolerà solo $\frac{1}{3}$ della corrente che viene utilizzata a triangolo.

Posso quindi far avviare il motore a stella e quando questo ha raggiunto la velocità di regime commuto a triangolo.



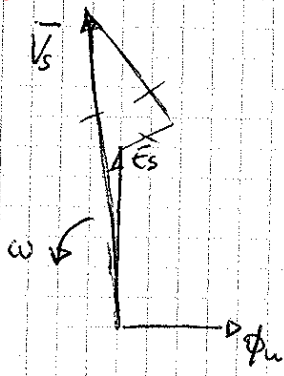
Sistema estremamente economico, e molto diffuso.

La sequenza dei telecontatti per produrre l'avviato in modo corretto.

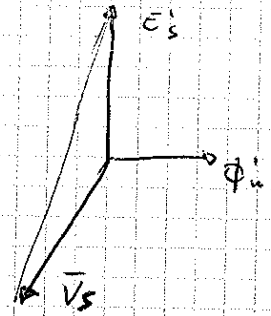
M - D - Y aperti. (condizione iniziale). Il motore non è alimentato.
 chiudere M. D - Y aperti. Motore non alimentato.
 chiudere Y. D aperto. Il motore è alimentato a stella. Y viene chiuso per un tempo predeterminato per far avviare compl. il motore.
 Aprire Y e poi chiudere D.
 aprire Y. D - aperto il motore è disalimentato.
 chiudere D. Y aperto. Motore alimentato nella condizione finale di funzionamento.

D e Y devono essere interbloccati tra loro. Non deve mai accadere che D e Y siano chiusi contemporaneamente.

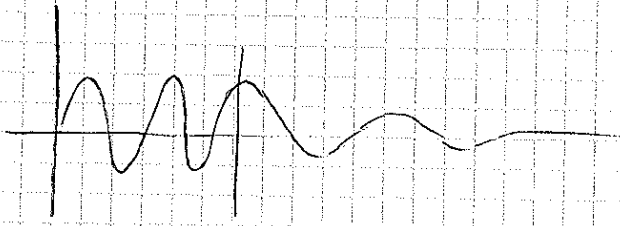
Osserviamo che esiste una fase di interruzione del motore durante la commutazione da Y-Δ. Questo fase di disalimentazione può essere nuova. Spesso questo viene reinserito in rete e Δ si hanno correnti di spunto dell'ordine di grandezza delle correnti che si volevano evitare. La sovvertente è bassissima e si smorza in poco tempo. Tuttavia possono scattare le protezioni come si spiega questo fatto? Il motore è quasi a sinuoidismo. Bisogna analizzare un modello dinamico. Costituiscono il diagramma vettoriale.



Se togliamo V_s vuol dire eliminare 3 vettori. Qu rimane perché il rotore tenta di mantenere il flusso costante. Qu moto solidale con il rotore, quindi moto a ω_r . Ma il vettore E_s continua ad esistere e motore anche lui e velocità ω_r . V_s continua a girare a velocità ω . Nel momento in cui richiudiamo l'alimentazione ci potremo trovare in una situazione in cui V_s si trova in controfase rispetto a E_s . La differenza di potenziale tra E_s e V_s è elevata. Quindi le correnti che passano circolano prima che il sistema si arresti sono molto intense.



Apertura elim. motore asincrono

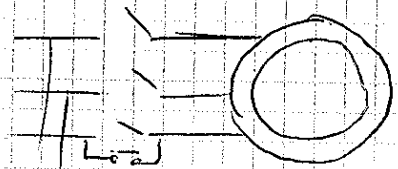


Nel caso di avviamento stelle triangolo si può semplificare il circuito mettendo appropriate resistenze da limitare le cc. In questo caso si chiude D. Poi si apre Y e in fine si disalimentano le resistenze.

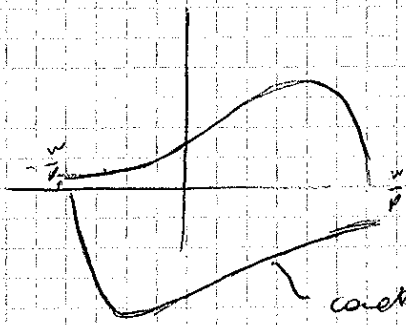
Oggi i motori asincroni vengono quasi sempre alimentati da inverter.

Vediamo quali possibilità abbiamo di fermare il motore asincrono. Possiamo essere frenate meccaniche o elettriche.

Sistemi di frenata elettrica.

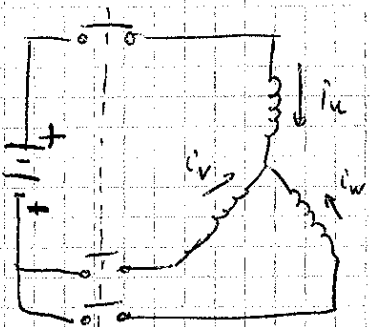


inverso 2 fasi.
Se in verso 2 fasi inverte il verso del campo rotante.

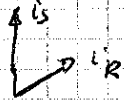


caratteristiche di coppia dopo che sono state invertite le fasi.

Altro metodo: circuito e notare in c.c.



$$i_{pr} = i_w = -\frac{L_m}{L_p} i_s$$



$$\bar{E}_R = j\omega_R L_m (\bar{I}_s - \bar{I}_R)$$

$$\bar{I}_R = \frac{\bar{E}_R}{j\omega_R L_{OR} + R_R}$$

$$\bar{E}_R = j\omega_R L_m (\bar{I}_s - \bar{I}_R) = (j\omega_R L_{OR} + R_R) \bar{I}_R$$

$$\bar{I}_R (j\omega_R L_m + j\omega_R L_{OR} + R_R) = j\omega_R L_m \bar{I}_s$$

$$\bar{I}_R = \frac{j\omega_R L_m \bar{I}_s}{j\omega_R L_R + R_R} \quad ; \quad L_R = L_m + L_{OR}$$

Se rotore è fermo $\bar{I}_R = 0$. Poiché $\omega = 0$ perché campo rotante che fermo non si Potente trasmessa - $C = \frac{P_c}{\omega} = \frac{0}{0}$ indeterminato. Dobbiamo determinarlo

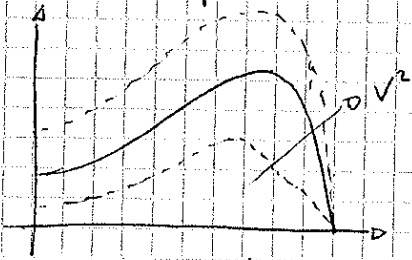
$$P_t = P_m + P_{JR} \Rightarrow P_m = -P_{JR} = -3R_R I_R^2 = -3R_R \frac{-\omega_R^2 L_m^2 I_s^2}{\omega_R^2 L_R^2 + R_R^2}$$

$$C_m = -\frac{3R_R}{\omega_R} \frac{-\omega_R^2 L_m^2 I_s^2}{\omega_R^2 L_R^2 + R_R^2}$$

la coppia ha sempre segno opposto a ω_R quindi sarà sempre generata.

Variatione di velocità

Non è semplice variare la velocità del motore asincrono.



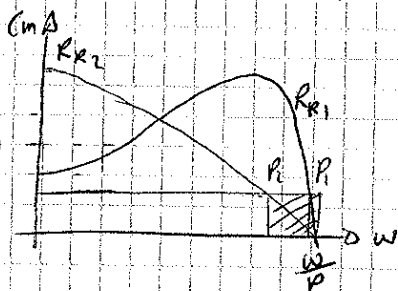
Se veniamo la tensione si avrebbe una variazione della coppia, ma la velocità non varia sensibilmente.

Possiamo regolare la frequenza di alimentazione

oppure cambiare il no di coppie polari.

Inoltre con il motore a rotore avvolto la $\cos(\phi)$ nome al cambio della resistenza rotoria.

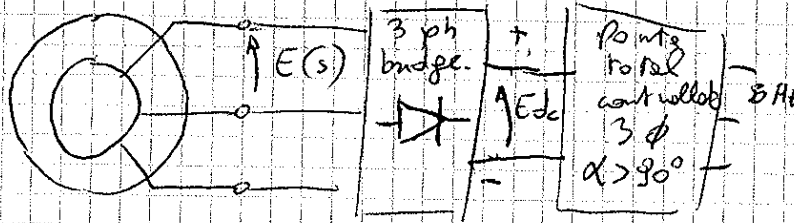
la regolazione di velocità per variazione della resistenza rotoria ha inconvenienti:



$R_{k2} > R_{k1}$

- 1) Regolazione a bassa efficienza
- 2) Una regolazione resistiva richiede tempo, quindi è lenta.
- 3) Aumentando troppo R_k si rischia che il sistema diventi instabile.

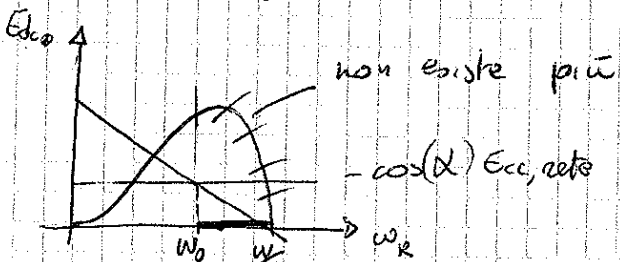
Con l'avvento dell'elettronica di potenza si possono ~~evitare~~ ^{eliminare} questi 3 inconvenienti. Si prende la potenza che va su R_k la si recupera e la si manda in rete. Problema: la sorgente è a tensione e frequenza variabili. Una soluzione è trasformare la potenza da ^{freq.} variabile a freq. zero. Poi con un PTC 3φ posso riutilizzare 50 Hz in rete. Questo a livello di principio, ma così è possibile regolare la velocità



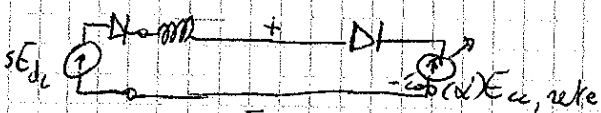
a freq. zero. Poi con un PTC 3φ posso riutilizzare 50 Hz in rete. Questo a livello di principio, ma così è possibile regolare la velocità

del motore ed entro dei margini.

Analizziamo il ponte a diodi. Se morsetti in uscita aperti il rotore funziona a moto. Ricordiamo che $E_2 = s\omega\phi N$.



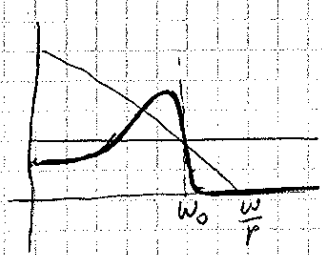
Se il ponte diodi è curciato dal ponte t. controllato.



Se $\omega > \omega_0$ non si ha più corrente di circolazione nello meglio in DC.

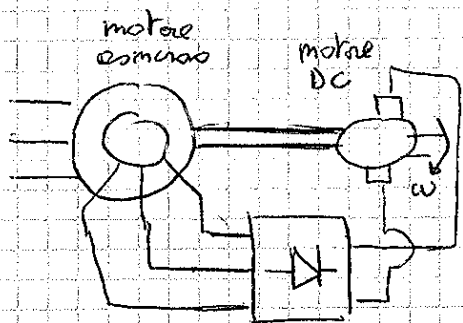
Quindi la corrente rotante verso è zero, e lo coppia ve è zero.

Se $\omega < \omega_0$ la caratteristica di coppia è quella.



Si genera un tratto stabile della caratteristica di coppia in corrispondenza di ω_0 . In quel punto si hanno perdite rotante contenute.

Anticamente veniva usata una soluzione omib con un motore dc.



Regolando l'ecutazione del motore DC viene la E_m . Viene detto a cascata (comarione).

Le versioni e punti scil sussiste ancora per quelle soluzioni in cui il motore avvolto non è eccessivamente costoso. (grossi motori asincroni).

Abb. la regolazione in velocità è \propto cost. Per misurare la coppia si misura la corrente in uscita del raddrizzatore.

Macchine non a rotore avvolto (regol. velocità)

-Variazione del numero di poli. Non è una vera variazione, ma una commutazione di velocità.

Si possono mettere 2 tipologie di avvolgimenti sulle macchine e collegare le seconda delle velocità usate uno dei 2 avvolgimenti.

Esistono anche un unico avvolgimento di x bobine e cambiando il collegamento cambia il no dei poli. Usato per lungo tempo anche nelle lavatrici.



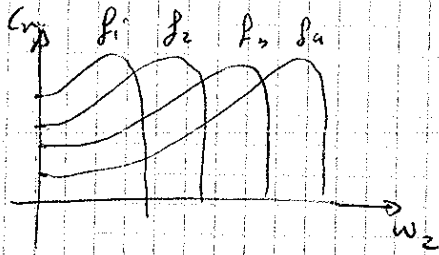
Se si mette tutte le bobine nello stesso nodo ho 8 poli, 4 coppie poli. Ha al invece 2 bobine (es la 2^a e la 4^a), si generano 4 poli magnetici quindi 2 coppie poli.

Questi sono gli avvolgimenti de l'andea. Il modo di funzionamento delle macchine è ottimizzato per una delle 2 configurazioni. Di conseguenza si sono una configurazione e bene rendimento e ma ad alto rendimento.

Questa soluzione è messa in d'armonia dell'elettronica di potenza.

- variazione delle frequenze di ^{alimentazione} ~~variazione~~ del motore. In questo modo si ha la max flessibilità del motore (velocità regolabile anche sopra 100 Hz).

Potremo ottenere una situazione del genere. Otteniamo la stessa flessibilità del motore da:



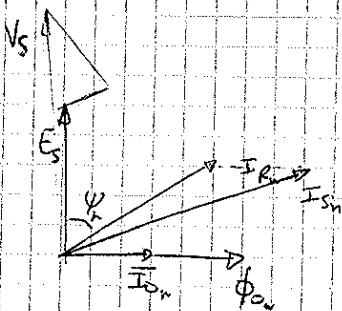
Dobbiamo fare scelte, anche su dati nominali del motore.

Ricordiamo che il costruttore dimensiona il motore in base all'induzione max al trafero, (come nei trifasi).

Una volta fissate l'induzione e fissato il filo di macchina.

Se la frequenza scende a 100 Hz per avere lo stesso flusso dove:

- 1) dobbiamo cambiare la tensione. Quindi cambiare la frequenza ne basta, ma bisogna garantire che il Φ e J sono in condizioni nominali. Così il motore lavora in condizioni nominali quando i materiali sono sfruttati in condizioni nominali. Gli indici di sfruttamento sono l'induzione al trafero e la densità di corrente.



$$\tan \varphi_n = \frac{S_n \omega L_{\sigma}}{R_s}$$

- 1) Per mantenere inalterati B e J devo mantenere costanti Φ_0 , Φ_r , I_s . In particolare minore costante φ_n quale coppia che il motore produce.

$$\vec{E}_s = j\omega N \vec{\Phi}_0 \quad E_s = \omega \Phi_0 N \quad C_m = 3 E_s I_r \cos \varphi_n \cdot \frac{p}{\omega} = 3 \Phi_0 N I_r \cos \varphi_n \cdot p$$

Cambiano la frequenza di alimentazione.

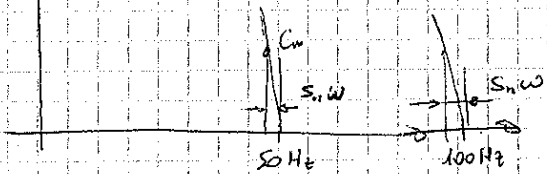
Si osserva che $E_s \propto \omega$. A E_s devo sommare $R_s I_s$ e $j\omega L_{\sigma} I_s$ che rimangono costanti perché I_{r1} e I_{r2} costanti. Ricavo quindi:

V_{sn} alle pulsazione ω .

Ad alte frequenze V_{sn} deve essere proporzionale alle frequenze. (ed alte freq possiamo trascurare $R_s I_s$).

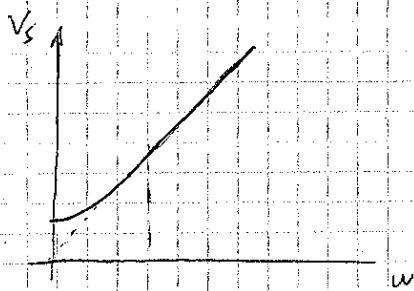
N.B. se alimento il motore in queste condizioni φ_n è costante, quindi anche $\tan \varphi_n = \text{cost} \Rightarrow S_n \omega = \text{cost}$. Così mantenere la velocità di scorrimento sempre uguale. (lo scorrimento di minima)

In questo modo la coppia tra le rigole è regolata mantenendo sempre lo stesso percorso.



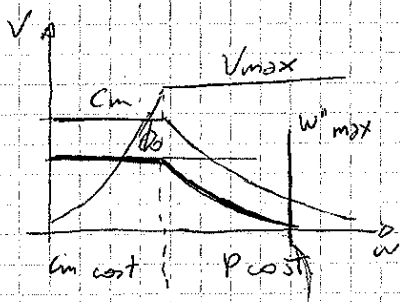
N.B. Le dimensioni di un motore sono dettate dalle coppie che è in grado di fornire.

Questa tecnica risolve brillantemente il problema dell'ambiente, inoltre risolve anche il problema della frenata del motore.



Condizionamenti pratici:

1) L'inverter è alimentato dalla rete 3φ e 400V. Oltre una certa tensione l'inverter non può aumentare e causa del bus in continuo. In generale si troverà ad avere una V_{max} che varia leggermente



V_{max} ϕ diminuisce un poco inversamente proporzionale a w , la coppia sarà $\propto \phi$.

Analizziamo la coppia max fornibile del motore

$$C_{max} \approx \frac{3P}{\omega} \frac{V_s^2}{2X_s}$$

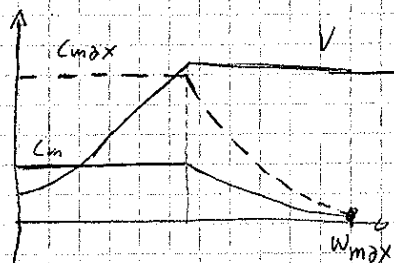
V_s e X_s dipendono da ω

$$= \frac{3P}{\omega} \frac{(k\omega)^2}{2\omega L_s}$$

nelle zone in cui $V_s \propto \omega$ la coppia max è costante.

$$= \frac{3P}{\omega} \frac{V_s^2}{2\omega L_s}$$

zone in cui $P = \text{cost}$ - C_{max} diminuisce con $\frac{1}{\omega^2}$

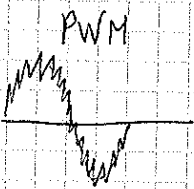
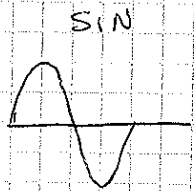


Alle freq w_{max} il motore è in grado di sopportare alla C_{min} solo se si trova a fornire C_{max} . Oltre quel punto non può più fornire la coppia nominale.

Analizziamo le perdite:

- Perdite nel rame: nelle maggior parte dei casi sono trascurabili.
- Perdite nel ferro: aumentano proporzionalmente e quadraticamente rispetto alla ~~flusso~~ ^{frequenza}. ~~in~~ ^{da} dove queste possono essere trascurabili o meno, dipende dai casi.
- Fune d'onda: non sono mai sinusoidali, ne effetto da ripple ad alta frequenza. Abbiamo quindi perdite maggiorate. Tipicamente si hanno decadimenti di circa il 10%.
- Perdite meccaniche dovute agli attriti (cuscinetti, ...)
- Perdite addizionali dovute anche allo studio delle sole em. fondamentali

L'alimentazione statica, a punti di tensione e corrente fondamentali, la corrente e la tensione efficaci sono $>$ rispetto ad una alimentazione sinusoidale. Il ripple dovuto ad un'alimentazione PWM comporta un aumento delle perdite nel rame. Di solito queste ~~sono~~ ^è abbastanza contenute perché si aumenta la freq. di commutazione del PWM.



Perdite nel ferro: l'inverter non aumenta le perdite per isteresi. Il ciclo di isteresi risulta essere praticamente sinusoidale e quindi P_h sono inalterate. Invece le perdite per correnti parassite cambiano.

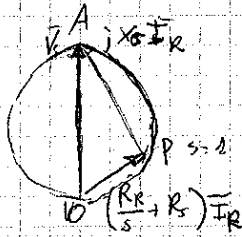
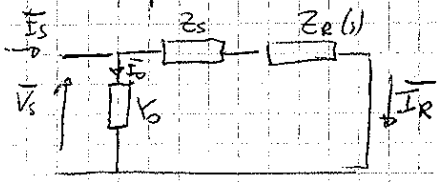
$P_{cp} = \frac{V^2}{R_{fe}}$ in regime sinusoidale. In una tecnica PWM si ha che $v(t) = \sum V_n(t)$. Quindi una armonica darà un contributo alle perdite per correnti parassite.

$P_{cp} = \sum \frac{V_n^2}{R_{fe}} \propto$ al valore efficace della tensione. Il valore efficace della tensione PWM è $>$ rispetto al sinusoidale, quindi P_{cp} aumentano molto.

Le perdite nel ferro tipicamente sono nello statore (quando l'alimentazione è sinusoidale). Con PWM si hanno perdite nel ferro nel rotore perché si generano comp. rotanti a velocità multiple rispetto alle velocità delle macchine.

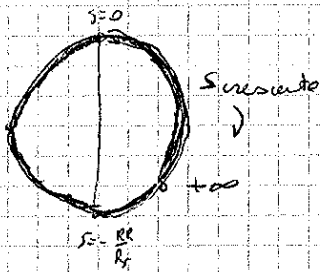
Diagramma circolare della macchina ad induzione (HEYLAND)

Consente di valutare la macchina ad induzione come generatore, motore e dissipatore.



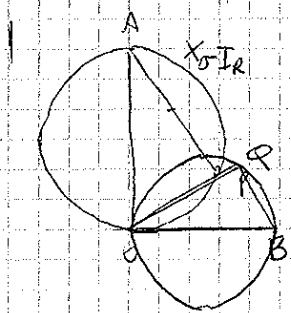
Il punto P si muove su una semicirconferenza di diametro OA al variare di s .

Per $s \rightarrow \infty$ $P \equiv A$ solo caduta resistiva
 Per $s = -\frac{R_r}{R_s}$ $P \equiv O$ solo caduta reattiva



$s > 0$
 $s < 0$

Concentriamo sul luogo descritto da \vec{I}_r



$$\overline{OB} = \frac{V_s}{X_s}$$

APQ è simile a OQB quindi:

$$\frac{\overline{OQ}}{\overline{AP}} = \frac{\overline{OB}}{\overline{OA}} \Rightarrow \overline{OQ} = \frac{\overline{AP} \cdot \overline{OB}}{\overline{OA}}$$

$$\overline{OQ} = \frac{X_s I_r \cdot \frac{V_s}{X_s}}{V_s} = I_r$$

Inoltre la fase di \overline{OQ} è come quella di \vec{I}_r . Quindi il punto Q è l'estremo del vettore \vec{I}_r quando s varia tra $-\infty$ e $+\infty$.

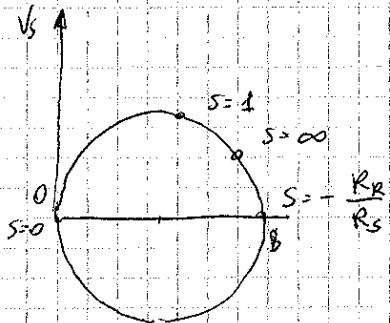


diagramma di Heyland

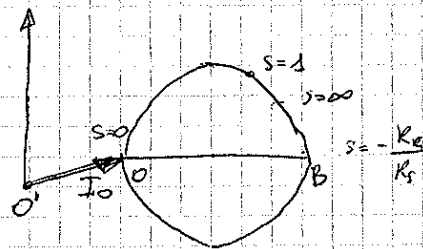
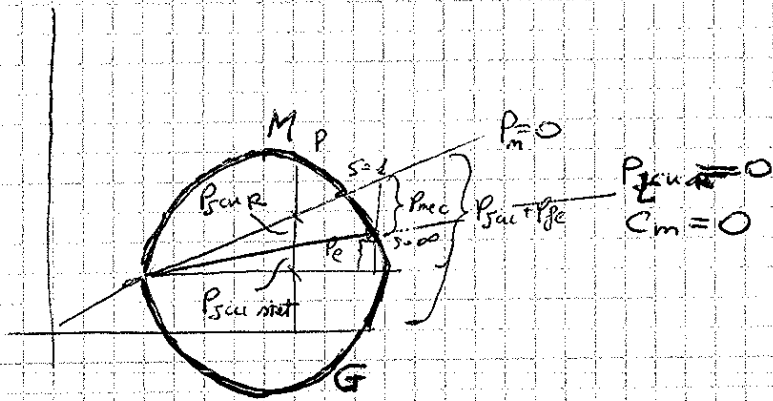
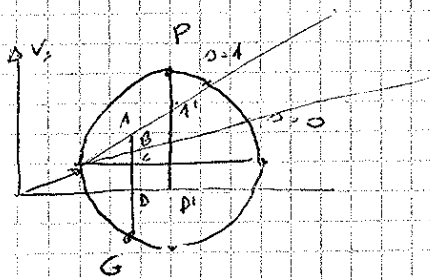


DIAGRAMMA CIRCOLARE di HEYLAND



Possiamo approssimare le perdite nel core di statore e di rotore, la retta che passa per $s=\infty$. Infatti per $s \rightarrow \infty$ $P_e = 3 \left(\frac{R_g}{s} \right) I_e^2 \rightarrow \infty$ e $s=\infty$ si ha che viene trasmessa P_m al rotore che la dissipa tutta.

Quindi possiamo dividere il diagramma circolare con 4 rette che permette di fare considerazioni energetiche.



- GD: potenza elettrica trasmessa alla rete
- GA: potenza meccanica fornita all'albero
- CB: perdite nello statore
- AB: " nel rotore
- CD: perdite nel ferro

$$\eta_G = \frac{GD}{GA} \quad \eta_M = \frac{PA'}{PD'}$$

Con l'avvento dell'olio la macchina ad induzione ~~può essere~~ ^{viene} utilizzata come generatore più spesso rispetto al pannello.

Aspetti di seconda approssimazione

Parlando del campo rotante abbiamo considerato solo la fondante del campo magnetico rotante, lasciando perdere tutte le armoniche di ordine superiore.

Se la distribuzione di campo rispetto al traferro non è sinusoidale posso usare la sovrapposizione degli effetti (sopponendo le componenti del circuito magnetico).

$$B(\alpha) = \sum B_n \sin(n\alpha) \quad n = 6k + 1 \quad k \in \mathbb{Z}$$

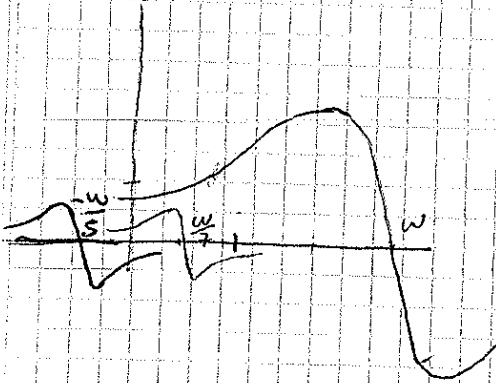
Se l'inviluppo è a 4 coppie pole le armoniche hanno un

numero di coppie polari pari all'ordine di armonica.

All'interno della macchina esiste un infinito "numerabile" di campi rotanti, molte le armoniche motrici in senso variabile e seconde del segno di n .

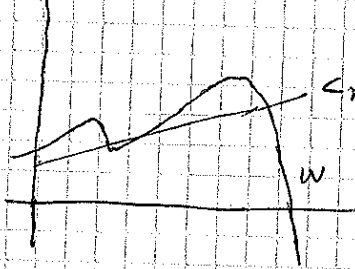
So che per una certa armonica

- C_m per $n=1$ supponiamo $p=1$
- C_m per $n=7$
- C_m per $n=-5$



Le retine armoniche è una delle più nuove perché sommate con C_m posso ottenere le caratteristiche di coppia del genere:

$C_m(1+7)$

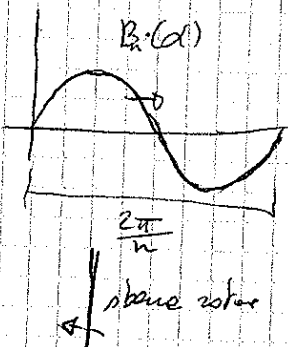


L'insellamento può provocare problemi. Ad esempio con il carico C_r in figura il motore si ferma a una velocità stabile pari a $\frac{1}{7}$ della velocità a cui sarebbe richiesta funzione.

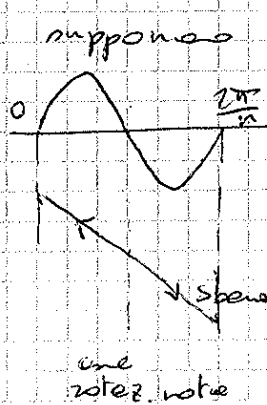
Una situazione del genere si forma solo quando $q=1$.
 Già a $q=2$ tra la retine armonica è molto ridotta.

Se $p=1$ si possono usare diverse tecniche:

- posso usare la tecnica dell'ancoramento di peso
- posso inclinare le sbarre di rotore. I vantaggi sono:
 - viene attenuata la riluttanza dovuta alle anelature di rotore e statore.



armonica si muove lungo un sbarra rotore. Sulle barre a fase n sem α B

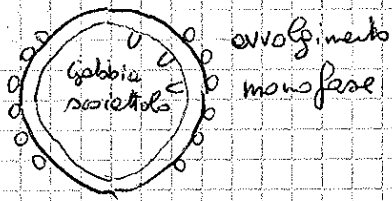


supponiamo che E oblate non sia // all'asse del rotore
 in questo caso $f_{em} = 0$.
 Di conseguenza non c'è corrente prodotta da quell'armonica.
 L'inclinazione delle sbarre di rotore è una prova molto utile.
 N.B. si può annullare una 2^a armonica.

L'eccentricamento del polo dell'avo spinato è già visto con l'armonica fondamentale, ma può essere ancora più efficace con le altre.

MOTORE ASINCRONO MONOFASE

Motori di piccola potenza. Usati specialmente negli elettrodomestici.

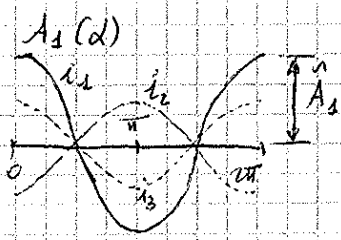


Ci sono Z_f conduttori attivi. È caratterizzato da un coeff. di avvolgimento K_A e

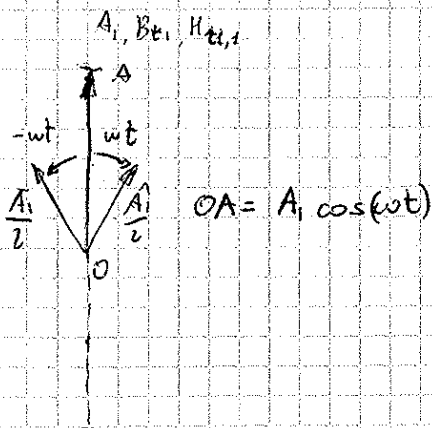
$$\hat{A}_1 = \frac{Z_f}{\pi} K_A \hat{I}$$

fondamentale di fonte magnetica motrice

Il \hat{A}_1 corrisponde a H_{z1} e B_{z1} .



La gabbia reagisce a quest'onda mettendo in gioco correnti in modo da bilanciare il flusso, ma il rotore non è in grado di muoversi.



Il vettore \hat{A}_1 non è costante, ma oscilla tra due valori. L'oscillazione è legata ed è ad una funzione temporale $\cos(\omega t)$.

Possiamo vedere il vettore \hat{A}_1 oscillante come somma di due vettori rotanti, che ruotano con velocità opposte. Quindi \hat{A}_1 è scomponibile in 2 onde controrotanti di ampiezza pari alle metà di ampiezza originale di \hat{A}_1 .