

Dimensioni principali delle macchine elettriche rotanti

Le principali dimensioni sono:

- diametro ed altezza D
- lunghezza dei conduttori attivi L

$$V = \frac{\omega_e}{\sqrt{2}} \phi_p \frac{N_s}{2} k_{d1} = \frac{\omega_e}{\sqrt{2}} \frac{2}{\pi} B_{max} \frac{\pi RL}{p} \frac{N_s}{2} k_{d1}$$

$$L \rightarrow B_m \frac{\pi R}{p} L = \frac{2}{\pi} B_{max} \frac{\pi RL}{p}$$

$$A = \frac{3 N_s I}{2 \pi R} = D \quad I = \frac{2 \pi R A}{3 N_s}$$

$$\pi R^2 L = V = \frac{\pi D^2 L}{4}$$

$$S = 3VI \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{2}{\pi} \frac{\omega_e}{p} B_{max} A \frac{2 \pi^2 R^2 L}{3 N_s} \frac{N_s}{3} k_{d1}$$

\downarrow potenza apparente
 \downarrow ω_{M0} sfruttamento di materiali
 \downarrow I

$$\frac{S}{\omega_{M0}} = \frac{2}{\sqrt{2} \pi} B_{max} A \pi^2 R^2 L k_{d1} \quad \frac{S}{\omega_{M0}} \text{ è potenza delle coppie } T$$

macchina sincrona $\frac{S}{\omega_{M0} \cos \varphi} = \frac{P}{\omega_{M0}} = \text{coppie } T$

motore asincrono $S = \frac{P_{nom}}{\eta \cos \varphi} \quad \omega_M = (1-s) \frac{\omega_e}{p} = \frac{2\pi f}{p} (1-s)$

$$\frac{S}{\omega_{M0}} = \frac{P (1-s)}{\eta \cos \varphi \omega_M} = T \frac{1-s}{\eta \cos \varphi}$$

Le dimensioni delle macchine elettriche rotante di perdono delle coppie, ma non della potenza.

Ho due macchine geometricamente simili:

$$L_2 = k_L L_1$$

$$T_2 = k_T T_1$$

$$\pi R_2^2 L_2 = k_R^2 \pi R_1^2 L_1$$

Se costruisco le macchine a partire di B_{max} e \sqrt{A} ho che

$$\frac{T_1}{T_2} = \frac{D_1^2 L_1}{D_2^2 L_2} \quad A = \frac{3N_s I}{2\pi R} = \frac{(a \cdot d) K_u \sigma}{\gamma_d}$$

denatore di corrente superficiale.

Se $L_2 > L_1$ ($K_L > 1$) ed $\sqrt{A} = \text{cost.}$ allora $\sigma_2 < \sigma_1$

Possiamo anche imporre $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma$ (al posto di imporre $A = \text{costante}$)

$$A_2 = K_L A_1$$

$$\frac{T_2}{T_1} = K_L \frac{D_2^2 L_2}{D_1^2 L_1} \quad \left(\frac{T_2}{(D_2^2 L_2)} = K_L \frac{T_1}{(D_1^2 L_1)} \right)$$

Di solito viene fatto un confronto tra macchine geometricamente simili che usano gli stessi materiali e hanno lo stesso tipo di raffreddamento. (cioè confronto di macchine a partire di sovratemperature)

$$\Delta\theta_1 = \Delta\theta_2$$

$$\Delta\theta = \rho V A \sigma \Rightarrow A_1 \sigma_1 = A_2 \sigma_2$$

$$A = \frac{(a \cdot d) K_u \sigma}{\gamma_d}$$

$$\sigma = \frac{A \gamma_d}{a d K_u}$$

$$\Delta\theta = \rho V A^2 \frac{\gamma_d}{a d K_u}$$

Su macchine geometricamente simili $\frac{\gamma_d}{a} = \text{cost.}$ mentre $d \propto D$

$$\Delta\theta = \rho \frac{V A^2}{K D} \quad \text{voglio } \frac{V A^2}{D} \text{ costante usò } V \propto \sqrt{D}$$

$$\Delta\theta = \rho \frac{(K_1 \sqrt{D})^2}{K D}$$

$$T \approx \frac{S}{\omega_{inc}} = \frac{2}{\sqrt{2} \pi} B_{max} V A (\pi R^2 L K_{A1}) = \frac{2}{\sqrt{2} \pi} B_{max} K_A \sqrt{D} \pi R^2 L K_{A1}$$

$$T \approx \frac{S}{\omega_s} = \frac{2 \cdot q}{\sqrt{2} \pi} B_{max} K_1 \sqrt{D} \pi^2 \frac{D^2}{4} L K_{d1}$$

$$T \propto D^{3.5} L$$

Esempio:

Hi servono 100 Nm limitati da 1 macchina con $D = 1 \text{ m}$ e

$$L = 1 \text{ m} \quad \frac{D}{L} = 1$$

potenza mantenuta reppato $D/L = 1$, ne ho coppia

$$\text{richiesta} = 50 \text{ Nm}$$

$$T = k D^{3.5} L \Rightarrow k = 100 \text{ poiché } \frac{D}{L} = 1 \quad T = k D^{3.5}$$

$$50 = k D^{3.5} \Rightarrow D = \left(\frac{50}{100} \right)^{\frac{1}{3.5}} \cdot (0.9)^{\frac{1}{3.5}} = 0.82 \text{ m}$$

$\propto V_{\text{macchine}}$

$$2 D^3 L = 0.82^3 \text{ m}^3 = 1.1$$

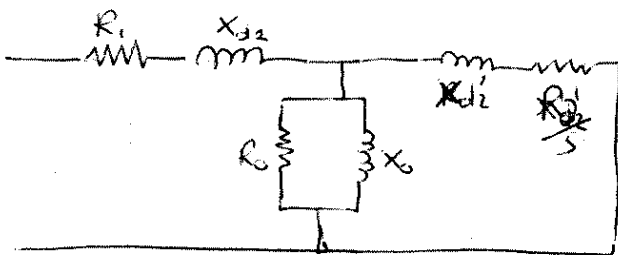
2 macchine da 100 Nm

Se uso 2 macchine da 50 Nm per fornire 100 Nm ma in 10% di potenza in più.

Posso avere macchine lunghe, ne stulle oppure me lungo, ne corte.
 Se $D \uparrow$ e $L \downarrow$ ho problema legato alle lunghezze dei conduttori
 interni che è minore delle lunghezze dei conduttori frontali.

Se $D \downarrow$ e $L \uparrow$ ho il problema della velocità critica (problema meccanico) dell'albero.

Riparto grandezze da rotore e statore in m.e.t. (nota numero 3/20)



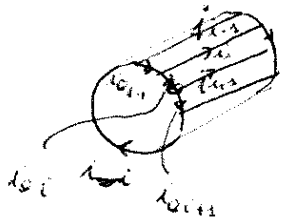
$\sigma = 1$ (rotore bloccato)

$$3 R_2 I_1^2 = P_{j2}$$

Rotore avvolto $P_{j2} = 3 R_2 I_1^2$

Rotore a jabbie $<$ no poli automaticamente eguali al no poli di statore
 e funzione
 ne fan uguali del numero di bore (Nb)

Sono con $s=1$



$$|\bar{i}_{a-1}| = |\bar{i}_a| = |\bar{i}_{a+1}|$$

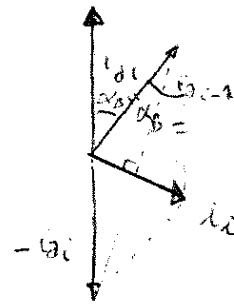
$$\text{spaziato}(\bar{i}_{a-1} - \bar{i}_a) = \frac{2\pi p}{N_b} = \alpha_B$$

$$|\bar{i}_{a0}| = |\bar{i}_{a+1}|$$

Al nodo i $\bar{i}_{a-1} - \bar{i}_a = \bar{i}_i$

Spaziato tra \bar{i}_{a0} e $\bar{i}_{a+1} = \alpha_B$

$$|\bar{i}_a| = \frac{|\bar{i}_i|}{2 \sin(\frac{\alpha_B}{2})} = \frac{|\bar{i}_i|}{2 \sin(\frac{2\pi p}{N_b} \frac{1}{2})}$$



$$\frac{|\bar{i}_i|}{2} = |\bar{i}_{a0}| \cdot \sin\left(\frac{\alpha_B}{2}\right)$$

Spesso $\sin\left(\frac{\pi p}{N_b}\right) < 0.5$ quindi $|\bar{i}_{a0}| \gg |\bar{i}_i|$

$s=1$ rotore bloccato (macchina in corto circuito)

i_a infese stator

i_i infesa rotore

Nel tiepo $N_s I_1 = N_r I_r$ $f_{mm} \text{ puros} = f_{mm} \text{ reattivo}$.

Se ho rotore ideale con distribuzione degli avvolgimenti sinusoidale su stator con avvolgimenti trifase allora ho fonte magneto-motrice rotante con ampiezza: ($p=1$)

$$f_{mm}^{\wedge} = \frac{3}{2} \left(\frac{N_s}{4} \right) \cdot \hat{I}_1 \quad (N(\alpha) = \frac{N_s}{4} \sin \alpha)$$

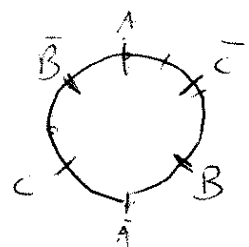
il 3 è il numero di fasi

Se ho avvolgimento diametrico con $q=1$

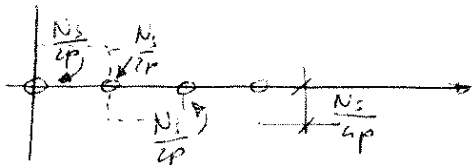
in questo caso considero solo la f_{mm}

fundamentale

$$f_{mm}^{\wedge} = \frac{3}{2} \frac{4}{\pi} \left(\frac{N_s}{4} \right) \hat{I}_1$$



Se $p > 1$ con avvolgimento diametrico $q = 1$



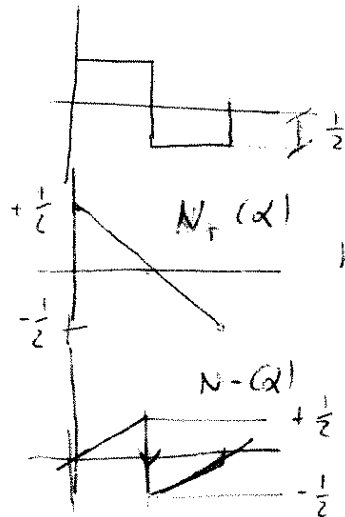
$$f_{imm}^1 = \frac{3}{2} \frac{4}{\pi} \left(\frac{N_s}{4p} \right) \hat{I}_1$$

Se $p \gg 1$ con avvolgimento ~~diametrico~~ qualsiasi ($q \gg 1$) e K_{01} noto

$$f_{imm}^1 = \frac{3}{2} \frac{4}{\pi} \left(\frac{N_s}{4p} \right) K_{01} \hat{I}_1 = \frac{3}{\pi} \left(\frac{N_s}{2} \right) K_{01} \hat{I}_1$$

Esempio

$N_s = 2$



1 spira \approx 1 bobina positiva + 1 bobina negativa.

bobina positiva

bobina negativa

$$N(\alpha) = N_+(\alpha) + N_-(\alpha)$$

$$N(\alpha) = \frac{4}{\pi} \left(\frac{1}{2} \right) \left[\sin \alpha + \frac{1}{3} \sin 3\alpha + \frac{1}{5} \sin 5\alpha + \dots \right]$$

$$N_+(\alpha) = \frac{1}{2} \frac{4}{\pi} \left(\frac{1}{2} \right) \left[\sin \alpha + \frac{1}{2} \sin 2\alpha + \frac{1}{3} \sin 3\alpha + \frac{1}{4} \sin 4\alpha + \frac{1}{5} \sin 5\alpha \right]$$

Nelle gabbie di un motore con n fasi esistono
 correnti di base con modulo $|\hat{I}_1|$ e fase tra correnti
 bobine adiacenti $\frac{2\pi p}{N_0}$

La gabbia è un avvolgimento con p coppie poli
 N_{sp}/p fasi e $N_s = 1$

Se abbiamo motore $p=2$ $N_b=20$. In totale sono 10 fasce
base 1 e 11 sono nelle stesse condizioni.

$$\left\{ f_{mm_s}^{\wedge} = \frac{3}{2} \frac{4}{\pi} \left(\frac{N_s}{2p} \right) \hat{I}_{k_{21}} \right\} \text{ per le 3 fasce}$$

$$f_{mm_2}^{\wedge} = \frac{N_b}{2p} \frac{4}{\pi} \frac{1}{2} \left(\frac{1}{2p} \right) \hat{I}_2 = f_{mm_s}^{\wedge}$$

$$I_2' = \frac{\frac{N_b}{2p} \frac{4}{\pi} \frac{1}{2} \frac{1}{2p}}{\frac{3}{2} \frac{4}{\pi} \left(\frac{N_s}{2p} \right) k_{21}} I_2$$

I_2' è la I_2 ripartito a stator

$$P_{gr} = (R_b I_2^2 + 2R_s I_2'^2) N_b \quad R_s \text{ Resistenza per anello coperto}$$

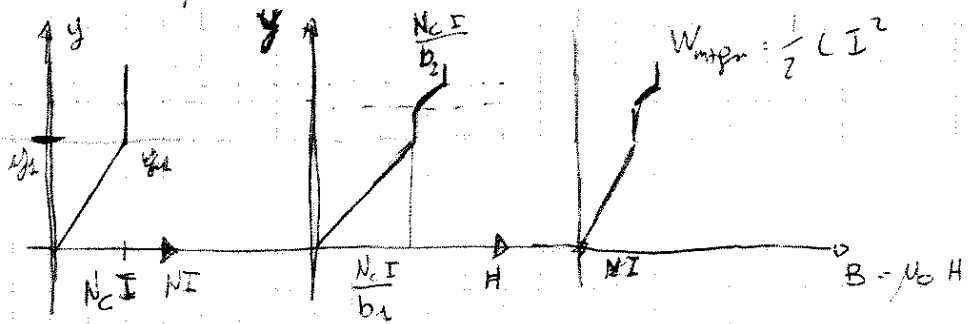
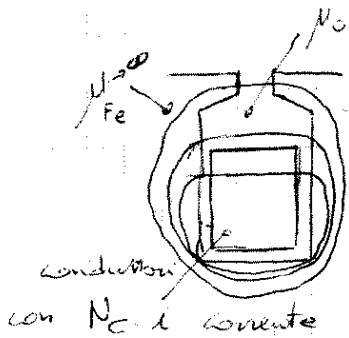
tra 2 basi

$$P_{gr} = P_{gr}' = 3 R_s' I_2'^2 \quad \text{noi possiamo pensare che } R_s \text{ e } R_s' \text{ perché}$$

conosciamo la relazione $I_2' \propto I_2$

Per le reattanze statorie riprendiamo ne si uso Q

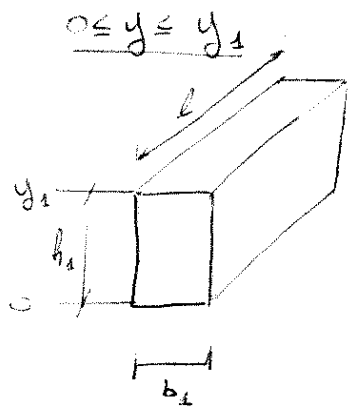
Soluzioni l di dispersione di core



δ = costante
 l = densità di corrente

Lo spessore in basso lo chiamerò b_1 e
quello in alto (più stretto) b_2 .

$$H = \frac{N_c I}{b_1} \frac{y}{y_2} \quad 0 < y < y_1 \quad \text{le conduttore è lungo } l$$



$$H(y) = \frac{N_c I}{b_1} \frac{y}{y_1}$$

$$B = \mu_0 H$$

$$W_m = \int_0^{y_1} \frac{1}{2} \mu_0 H^2 b_1 l dy$$

$$W_m = \frac{1}{2} \mu_0 \int_0^{y_1} \left(\frac{N_c I}{b_1 y_1} \right)^2 b_1 l y^2 dy =$$

$$= \frac{1}{2} \mu_0 \left(\frac{N_c I}{b_1 y_1} \right)^2 b_1 l \frac{1}{3} y_1^3 = \frac{1}{2} \mu_0 (N_c I)^2 \frac{y_1 l}{3 b_1} =$$

$$= \frac{1}{2} \mu_0 (N_c I)^2 \frac{b_1 l}{3 b_1} =$$

$$\underline{y_1 \leq y \leq y_2} \quad y_2 - y_1 = h_2$$

$$W_m = \frac{1}{2} \mu_0 \int_{y_1}^{y_2} H^2 b_1 l dy = \frac{1}{2} \mu_0 \int_{y_1}^{y_2} \left(\frac{N_c I}{b_1} \right)^2 b_1 l dy =$$

$$= \frac{1}{2} \mu_0 \left(\frac{N_c I}{b_1} \right)^2 b_1 l (y_2 - y_1) = \frac{1}{2} \mu_0 (N_c I)^2 \frac{l}{b_1} h_2$$

$$\underline{y_3 \leq y \leq y_4} \quad h_4 = y_4 - y_3$$

$$W_m = \frac{1}{2} \mu_0 \int_{y_3}^{y_4} \left(\frac{N_c I}{b_2} \right)^2 b_2 l dy = \frac{1}{2} \mu_0 (N_c I)^2 \frac{l}{b_2} h_4$$

$$\underline{y_2 \leq y \leq y_3} \quad h_3 = y_3 - y_2$$

$$H(y) = (N_c I) \frac{1}{b} \quad b_1 \leq b \leq b_2$$

$$b(y) = b_1 - (b_1 - b_2) \frac{y - y_2}{y_3 - y_2}$$

$$b(h) = b_1 - (b_1 - b_2) \frac{h}{h_3} \quad h = y - y_2$$

$$W_m = \frac{1}{2} \mu_0 (N_c I)^2 \int_0^{h_3} \frac{1}{b^2(h)} b l e dh$$

$$b(h) = b_1 - (b_1 - b_2) \frac{h}{h_3}$$

$$W_m = \frac{1}{2} \mu_0 (N_c I)^2 \ell \int_0^{h_3} \frac{1}{b_1 - (b_1 - b_2) \frac{h}{h_3}} dh$$

$$\int_0^{h_3} \frac{1}{b_1 - (b_1 - b_2) \frac{h}{h_3}} dh$$

definisco $h' = \frac{b_1 - h_2}{h_3} h$

$h = 0 \rightarrow h' = 0$

$h = h_3 \rightarrow h' = b_1 - b_2$

$$\int_0^{b_1 - b_2} \frac{1}{b_1 - h'} \cdot \frac{h_3}{b_1 - b_2} dh'$$

$dh = \frac{h_3}{b_1 - b_2} dh'$

ora definisco $h'' = b_1 - h'$

$h' = 0 \rightarrow h'' = b_1$

$h' = b_1 - b_2 \rightarrow h'' = b_2$

$dh' = -dh''$

$$\frac{h_3}{b_1 - b_2} \int_{b_1}^{b_2} \frac{1}{h''} (-dh'') = -\frac{h_3}{b_1 - b_2} \ln\left(\frac{b_2}{b_1}\right) =$$

$$= \frac{h_3}{b_1 - b_2} \ln\left(\frac{b_1}{b_2}\right)$$

Da cui $W_m = \frac{1}{2} \mu_0 (N_c I)^2 \ell \frac{h_3}{b_1 - b_2} \ln\left(\frac{b_1}{b_2}\right)$ scappiamo con sviluppo in serie

$$W_m \approx \frac{1}{2} \mu_0 (N_c I)^2 \ell h_3 \frac{2}{b_1 + b_2}$$

Energia magnetica totale

$$W_{m,t} = \frac{1}{2} \mu_0 (N_c I)^2 \ell \left[\frac{h_1}{3b_1} + \frac{h_2}{b_1} + \frac{2h_3}{b_1 + b_2} + \frac{h_4}{b_2} \right]$$

$$\frac{1}{2} \mu_0 H^2 Vol = \frac{1}{2} L I^2 = \frac{1}{2} \frac{N^2}{R} I^2 = \frac{1}{2} (NI)^2 R_{\text{percorso}}$$

$$\mu_0 \ell \left[\frac{h_1}{3b_1} + \frac{h_2}{b_1} + \frac{2h_3}{b_1 + b_2} + \frac{h_4}{b_2} \right] = R_{\text{cavo}} \text{ percorso cavo}$$

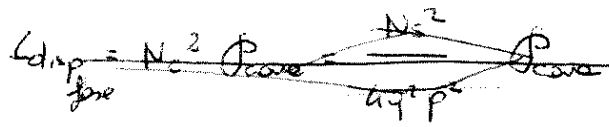
dipende dalle forme dello cavo

$$L_{\text{disp}} = \mu_0 N_c^2 \ell \left[\frac{h_1}{3b_1} + \frac{h_2}{b_1} + \frac{2h_3}{b_1 + b_2} + \frac{h_4}{b_2} \right] = N_c^2 R_{\text{cavo}}$$

Avvolgimento singolo strato con p, q

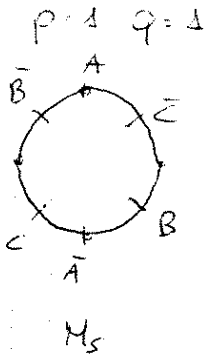
N_s = no conduttori serie per fase

$$N_c = \frac{N_s}{q \cdot 2p}$$

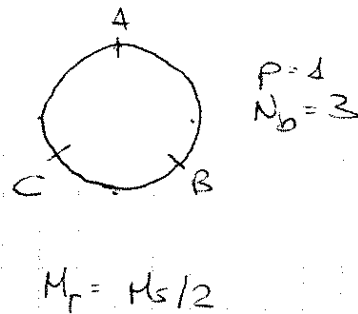


$$L_{disp \text{ fase}} = L_{disp \text{ cavo}} \cdot 2qp = N_c^2 \cdot 2qp \cdot \rho_{cavo} = \frac{N_s^2}{2qp} \rho_{cavo}$$

$L_{disp \text{ fase}}$ diminuisce all'aumentare del no di cavi.



è bobina
statorica
più semplice e



$$L_{disp \text{ cavo}} = N_c^2 \rho_{cavo}$$

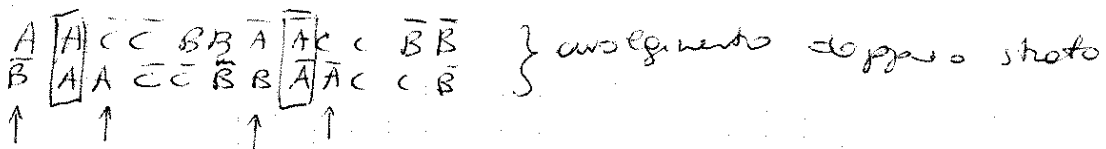
Esempio: avvolgimento singolo strato $p=1 \quad q=2$. Si hanno 12 cavi

angolo strato $\left\{ \begin{array}{l} AA \bar{C}\bar{C} \quad BB \bar{A}\bar{A} \quad CC \bar{B}\bar{B} \\ AA \bar{C}\bar{C} \quad BB \bar{A}\bar{A} \quad CC \bar{B}\bar{B} \end{array} \right.$ $\alpha_m = \alpha_e = \frac{360}{12} = 30^\circ$

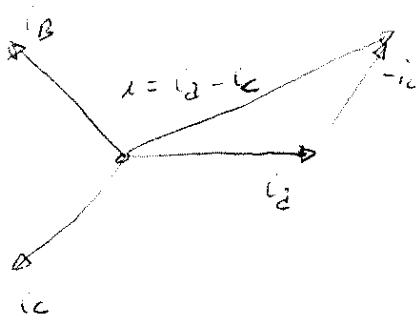
$$A = \frac{N_s}{8} \text{ conduttori} \quad N_c = 2 \cdot \frac{N_s}{8} = \frac{N_s}{4}$$

$$L_{disp \text{ fase}} = 4 L_{disp \text{ cavo}} = 4 \cdot \frac{N_s^2}{16} \cdot \rho_{cavo}$$

Per eliminare 5^a e 7^a armonica spartiamo il cavo strato di 4 cavi



le cavi ugualmente sono uguali al caso precedente
le cavi segnate con "1" hanno corrente di una fase più la
corrente di un'altra fase anziché di segno.



le core di tipo $\frac{A}{A}$ hanno

$$f_{mm} = N_c \cdot i_A = 2 \frac{N_c}{2} \cdot i_B$$

le core del tipo $\frac{A}{C}$ hanno $\frac{N_c}{2}$ conduttori

per core da i_B e $\frac{N_c}{2}$ per core da $-i_C$

$$f_{mm} = \left| \frac{N_c}{2} i_B - \frac{N_c}{2} i_C \right| = \frac{N_c}{2} \cdot 2 \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} |i_B| = N_c \frac{\sqrt{3}}{2} |i_A|$$

$$L_{dup \text{ fase } A} = 2 N_c^2 P_{cavo} + 4 \left(\frac{\sqrt{3}}{2} N_c \right)^2 P_{cavo} = (2N_c^2 + 3N_c^2) P_{cavo} = 5 N_c^2 P_{cavo}$$

L'effetto negativo è: aumenta l'induttanza di dispersione.

Tutte le volte che fanno un avvolgimento doppio stato aumenta l'induttanza di dispersione.

$$q=4 \quad p=4$$

AA AA $\bar{c} \bar{c} \bar{c} \bar{c}$ BB BB $\bar{A} \bar{A} \bar{A} \bar{A}$ $\bar{c} \bar{c} \bar{c} \bar{c}$ $\bar{B} \bar{B} \bar{B} \bar{B}$ $\alpha_m = \alpha_e = \frac{360}{24} = 15^\circ$

avvolgimento stretto

$$L_{dup \text{ fase}} = 8 N_c^2 P_{cavo} + 8 \left(\frac{N_c}{2} \right)^2 P_{cavo}$$

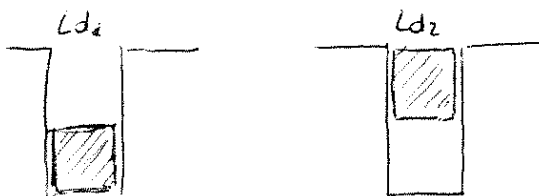
AAAA $\bar{c} \bar{c} \bar{c} \bar{c}$ BBBB $\bar{A} \bar{A} \bar{A} \bar{A}$ $\bar{c} \bar{c} \bar{c} \bar{c}$ $\bar{B} \bar{B} \bar{B} \bar{B}$
 BBAA AA $\bar{c} \bar{c} \bar{c} \bar{c}$ BBBB $\bar{A} \bar{A} \bar{A} \bar{A}$ $\bar{c} \bar{c} \bar{c} \bar{c}$ $\bar{B} \bar{B} \bar{B} \bar{B}$

Abbiamo 4 core tipo $\frac{A}{A}$ e 8 core tipo $\frac{A}{\bar{x}}$

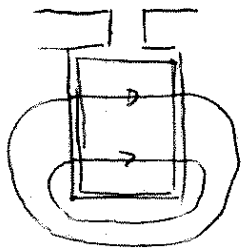
$$L_{dup \text{ fase}} = \left(4 + 8 \cdot \frac{3}{4} \right) N_c^2 P_{cavo} = (10) N_c^2 P_{cavo}$$

Anche in questo caso l'induttanza di dispersione è aumentata.

Confronto tra disposizione di conduttori in core



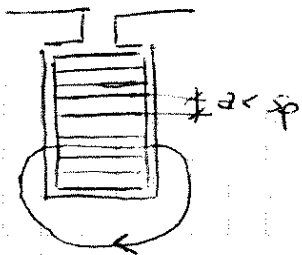
core identiche, N_c costante
 viene la posizione dei conduttori



Nel conduttore esistono correnti parassite, cioè le correnti nel conduttore non è distribuito in modo uniforme. Quindi esistono perdite addizionali.

Se il conduttore è una sbarra rotante di un motore asincrono trifase si possono sfruttare le perdite addizionali e le perdite addizionali possono essere viste come resistenza equivalente di un resistore di avviamento. Per questo fanno un rotore con fessure profonde.

Per quanto riguarda lo statore è necessario evitare le perdite addizionali.

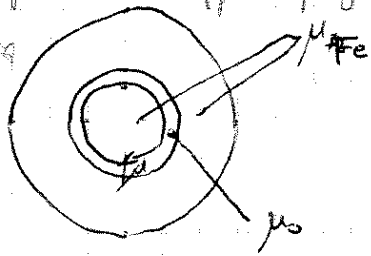


Poiché i conduttori vengono infilati dall'esterno il cavo devono avere spessore minore dell'estremità di cavo. Quindi i conduttori devono essere messi in parallelo.

Se il motore asincrono trifase è a vuoto l'energia magnetica è tutta nel trasegno. Calcoliamo l'induttanza di magnetizzazione.

Esiste una fmm rotante con ampiezza $A = \frac{3}{2} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{4}{\pi} \cdot \frac{N_s}{2p} K_{s1} \hat{I}$

vedi caso di opposti poli

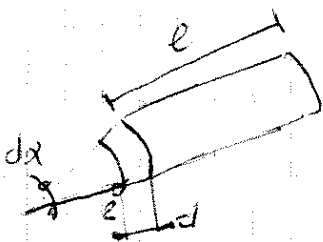


$$H = \frac{M}{d} \quad B = \mu_0 H \quad \text{nel trasegno}$$

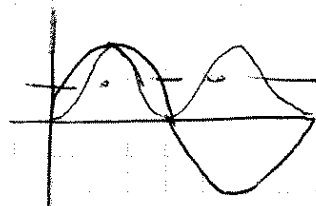
$$H(d) = \frac{1}{d} \cdot \frac{3}{2} \cdot \frac{4}{\pi} \cdot \frac{N_s}{2p} K_{s1} \hat{I} \quad \text{in (p.d.)}$$

$$W_m = \int_V \frac{1}{2} \mu_0 H^2 dv = \frac{1}{2} \mu_0 \int H^2(r) 2\pi r dr =$$

$$= \frac{1}{2} \mu_0 \frac{1}{d^2} \left[\frac{3}{2} \cdot \frac{4}{\pi} \cdot \frac{N_s}{2p} K_{s1} \hat{I} \right]^2 p \int_0^{2\pi} \int_0^R r^2 dr d\alpha =$$



$$= \frac{1}{2} \mu_0 \left[\frac{3}{2} \cdot \frac{4}{\pi} \cdot \frac{N_s}{2p} K_{s1} \hat{I} \right]^2 p e \cdot 2 \cdot \frac{1}{d} \cdot \frac{2\pi}{2}$$



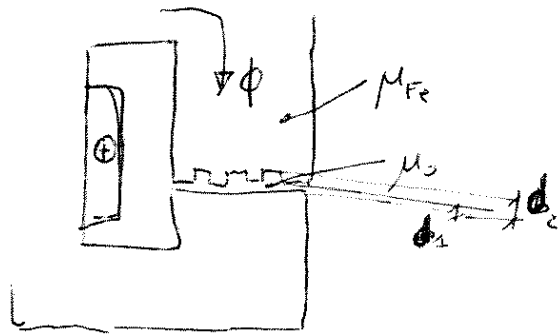
$$W_m = \left(\frac{1}{2} L_m \hat{I}^2 \right) \cdot 3$$

$$L_m = \frac{1}{2} \cdot \frac{3}{\pi} \cdot \frac{N_s^2}{4} K_{s1}^2 \cdot \frac{p l^2}{d}$$

Uguagliando le due espressioni otteniamo che:

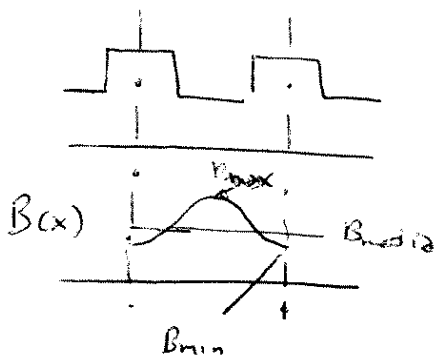
$$L_m = \frac{3}{4} \frac{\mu_0}{b} \left[\frac{3}{2} \frac{4}{\pi^2} \frac{N_s}{2\varphi} K_{a1} \right] \rho l 2\pi = \frac{\mu_0^3}{\pi} \left[\frac{N_s}{2\varphi} K_{a1} \right]^2 \frac{\pi r^2}{d}$$

Abbiamo considerato $M_{Fe} \rightarrow \infty$ cioè acciaio trasformato, il fatto che il ferro sia ^{non} ~~considerato~~ ^{considerato} neanche è dentato



con una tiefura $d \cdot b$

$$\frac{NI}{\frac{1}{\mu_0} \frac{d_c}{ab}} \leq \phi \leq \frac{NI}{\frac{1}{\mu_0} \frac{d_1}{a \cdot b}}$$



$B(x) \neq \text{costante}$

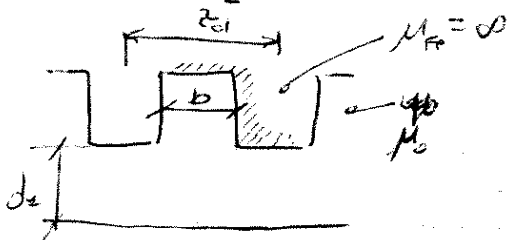
$\exists d_1 \leq d_c \leq d_2$ tale che

$$\frac{NI}{\frac{1}{\mu_0} \frac{d_c}{ab}} = B_{media} \cdot d \cdot b$$

stesse J_{mm} applicate tra 2 superfici piane e distanze d_c produce lo stesso ϕ magnetico nel nucleo e c con una superficie dentata.

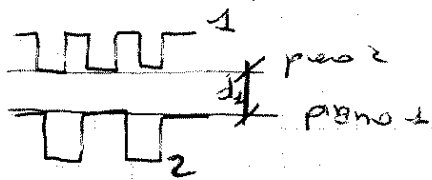
$$\phi = \frac{NI}{\frac{1}{\mu_0} \frac{d_c}{ab}}$$

$$d_c = K_c d_1$$



$$K_c = \frac{z_d}{z_d - \frac{4}{\pi} \left[\frac{b}{2} \operatorname{tg}^{-1} \frac{b}{d_1} - \frac{d_1}{2} \ln \left(1 + \left(\frac{b}{d_1} \right)^2 \right) \right]}$$

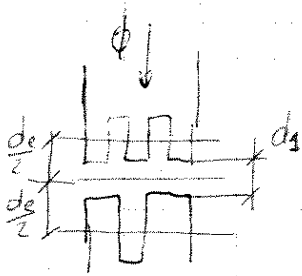
Caso due superfici dentate



de sup. dentate 1 e piano 1 colui
 K_{c1}

Fermo lo stuo con piano 2 e sup. 2 - Travo
 K_{c2}

Risulta che $d_c = K_{c1} \cdot K_{c2} d_1$



$$V = \frac{we}{\mu_0} \hat{\phi} N$$

$$\hat{B} = \frac{\hat{\phi}}{S}$$

$$NI = \int H dl = \sum H \Delta l = \sum_{\text{referso}} H \Delta l + \sum_{\text{nel ferro}} H \Delta l$$

Nel trafeuo μ e costante, nel ferro no!!

Poiche $\mu_{Fe} \gg \mu_0$ diamo che $\mu_{Fe} \rightarrow \infty$ (ferro ideale)

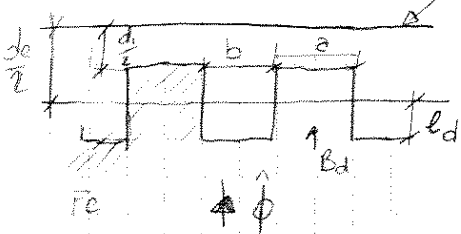
$$K_c = K_{c1} K_{c2}$$

Spessore del trafeuo che mantiene stuo md media $d_c = K_c d_1$

$$\text{In questo caso } NI = \hat{H}_f d_c = \frac{\hat{B}_f}{\mu_0} d_c = \frac{\hat{\phi}}{S \mu_0} d_c$$

Bisogna tener conto anche del ferro $\mu_{Fe} < \infty$

linea neutra
 trafeuo meccanico



Supponiamo d_c nel percorso in Fe

il flusso pero uniforme nei denti

$$\hat{B} = \frac{\hat{\phi}}{S}$$

S. sezione ferro dove non e presente la dentatura.

$$B_d = B \frac{a+b}{2}$$

All'induzione B_d posso associare un campo H_d osservando le caratteristiche magnetiche.

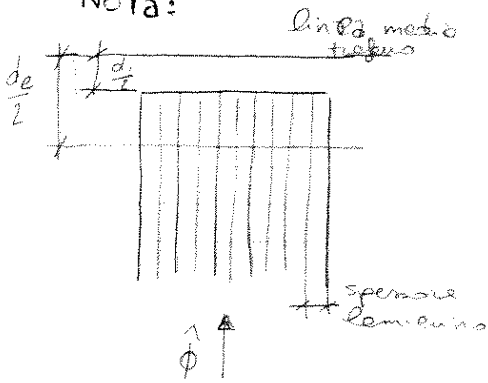
La caduta di f_{mm} nel dente e uguale $\hat{H}_d \cdot l_d$

La caduta di f_{mm} nel nucleo vero $\frac{\hat{\phi}}{S_n} = \hat{B}_n \rightarrow \hat{H}_n$ in corel magn.

caduta f_{mm} vero $\hat{H}_n l_n$ l_n lunghezza nucleo rispetto di fondo core a ferro core.

Ne risulta che $N \hat{I} = \frac{\phi}{\mu_0} \frac{de}{2} + \underbrace{H_{ed}}_{\text{dentata superiore}} + \underbrace{H_{ed}}_{\text{dentata inferiore}} + \underbrace{H_n e_n}_{\text{nucleo in zona non dentata}}$

Nota:



Il flusso passa nel ferro, ma tra un laminario e l'altro ho uno strato di solente. Devo quindi tenere presente che i laminari hanno un fattore di stipamento!!!

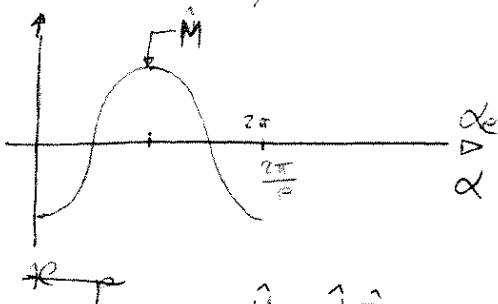
Come trasportiamo quello che abbiamo appena visto su un motore sinusoidal trifase?

$$V = \frac{\omega_e}{\sqrt{2}} \phi_p \frac{N_s}{2} K_{d1}$$

Il flusso che passa nel traferro della macchina.

$$\phi_p = \left(\hat{B} \frac{2}{\pi} \right) \frac{\pi r l}{p}$$

Nella macchina elt. esiste onde di induzione rotante al traferro (in aria) di valore massimo \hat{B} . Quindi nel traferro esiste $\hat{H} = \frac{\hat{B}}{\mu_0}$

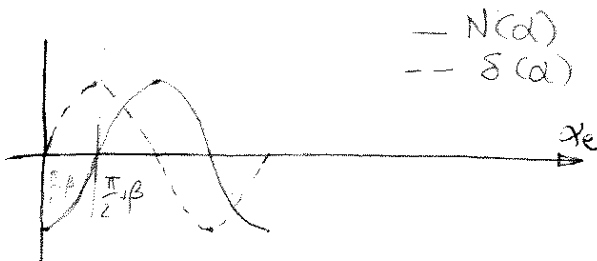


$$M = \frac{3}{2} \frac{4}{\pi} \frac{1}{2} \frac{N_s}{2p} K_{d1} \hat{I}$$

Immaginiamo di avere una corrente costante che in un avvolgimento da ruota.

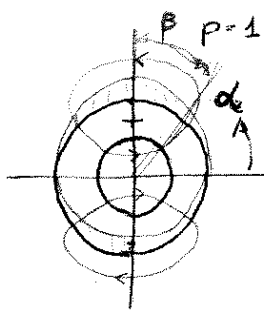
$$\hat{M} = \hat{N} \hat{I} \quad \text{con} \quad N(de) = \frac{3}{\pi} \left(\frac{N_s}{2p} \right) K_{d1} (-\cos de) \quad t=0$$

Nel tempo si ha che $N(de, t) = \frac{3}{\pi} \frac{N_s}{2p} K_{d1} (-\cos(de - \omega t))$



$$N(de) = \frac{3}{\pi} \frac{N_s}{2p} (-\cos de) K_{d1} \quad t=0$$

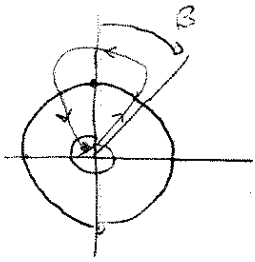
$$S(de) = \frac{3}{\pi} \frac{N_s}{2p} \sin(de) K_{d1} \quad t=0$$



Avvolgimento a distribuzione sinusoidale.

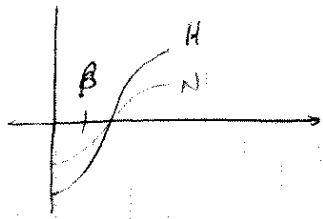
Le linee di campo sono simmetriche rispetto all'asse verticale

$$N_i = \int H d\ell \quad \mu_{Fe} = \infty$$



Per $\alpha = 90^\circ$ $H = 0$

$$H(\alpha) = \frac{1}{\mu_0} \hat{B}(-\cos \alpha) = -\frac{1}{\mu_0} \frac{4p}{2} \frac{\pi}{\pi} \frac{F}{2e} (-\cos \alpha)$$



$$\int_{\frac{\pi}{2}-\beta}^{\frac{\pi}{2}+\beta} d(\alpha) d\alpha = \frac{3}{\pi} \frac{N_s}{2p} K_{d1} \int_{\frac{\pi}{2}-\beta}^{\frac{\pi}{2}+\beta} \cos(\alpha) d\alpha =$$

$$= \frac{3}{\pi} \frac{N_s}{2p} K_{d1} \int_{-\beta}^{+\beta} \cos(\alpha) d\alpha = \frac{3}{\pi} \frac{N_s}{2p} K_{d1} 2 \sin \beta = N(\beta) - N(-\beta)$$

$$\frac{3}{\pi} \frac{N_s}{2p} K_{d1} 2 \sin \beta \hat{I} = \frac{B}{\mu_0} d$$

$$(N_i = \int H d\ell)$$

$$\hat{I} = \frac{\hat{B} d}{\mu_0 \left(\frac{3}{\pi} \right) \frac{N_s}{2p} K_{d1}}$$

Le linee chiuse sono scelte in modo da avere punti simmetrici rispetto ai 90°

Completiamo il problema: esistono le curve (ma considero ancora $\mu_{Fe} = \infty$)

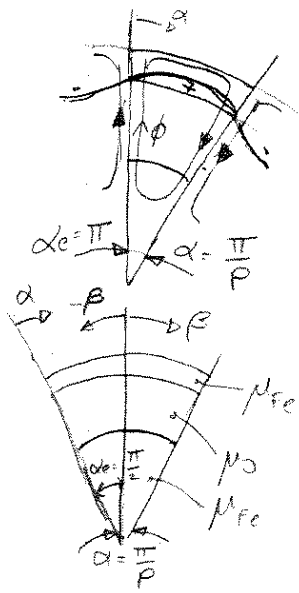
K_{cs} = fattore di Carter di statore

K_{cr} = " " " " " " " rotore

$K_c = K_{cs} \cdot K_{cr}$ = fattore Carter di macchina

$d_e = K_c \cdot$ trafero meccanico

$$\hat{I} = \frac{\hat{B} d_e}{\mu_0 \left(\frac{3}{\pi} \right) \frac{N_s}{2p} K_{d1}}$$



Ho distribuzione sinusoidale di conduttori.
 Il flusso è rettilineo come in figura
 Per $\alpha=0$ e $\alpha=\pi/p$ ho il minimo flusso. L'induzione
 al taglio è nulla per $\alpha = \frac{\pi}{2p}$

$$\frac{3}{\pi} \frac{N_s}{2p} K_{d1} 2 \sin \beta \hat{I} = \frac{\hat{B}}{\mu_0 \mu_r} \sin \beta \cdot 2 \quad \text{se } \mu_r \rightarrow \infty$$

ho ferro ideale!!

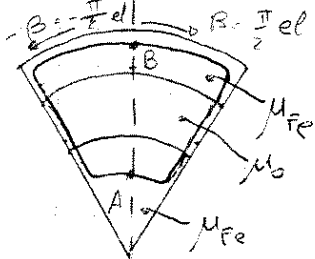
Se esistono core e $\mu_{fe} \neq \infty$ (uso ferro reale)

si succede che =

$$\frac{3}{\pi} \frac{N_s}{2p} K_{d1} 2 \sin \beta \hat{I} = \underbrace{\oint H dl - \sum H dl}_{\text{lungo linea di flusso}}$$

Scegliamo $\beta = 90^\circ$ elettrici - Considero due punti dove ho

minimo induzione al taglio



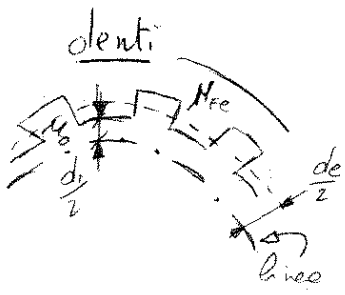
$$\oint H dl = \int_A^B H dl + \int_B^A H dl = 2 \int_A^B H dl = \frac{3}{\pi} \frac{N_s}{2p} K_{d1} 2 \sin \beta \hat{I}$$

$\int_A^B H dl$ è un pezzo di percorso nel gioco rotore, dente
 rotore, taglio, dente statore, gioco statore.

K_{cs} : fattore Carter statore
 K_{cr} : fattore Carter rotore
 K_c : fattore Carter macchina
 $K_c = K_{cs} K_{cr}$
 $de = K_c \cdot d$

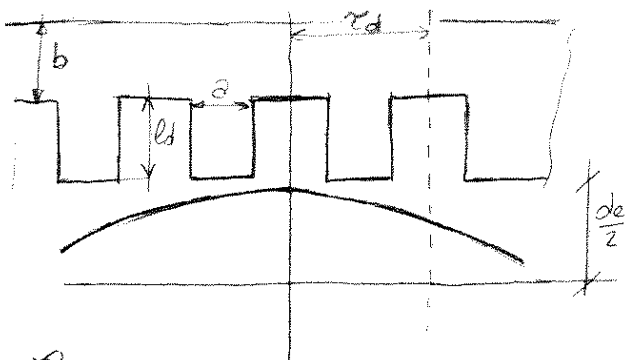
$$V \rightarrow \phi_p = \left(\frac{B}{\mu} \frac{2}{\pi} \right) \frac{\pi r l}{p}$$

Al taglio $H dl = \hat{B} \frac{1}{\mu} de$



Per i calcoli rettifichiamo il
 disegno

linea rettilinea al taglio



— induzione B

Le zone di traffico di corrente \tilde{c}_i in prossimità del max valore di induzione è attraversata da un flusso magnetico pari a

$$\phi = \int_{-\frac{\tau_d}{2}}^{\frac{\tau_d}{2}} B \cos \alpha \cdot 2l_d d\alpha$$

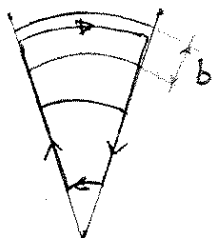
$$\text{con } \gamma = \frac{2\pi}{N_{cs}} \cdot p$$

Numero core di statore

$$B_d = \frac{\phi}{a \cdot l} \quad , \quad \text{e lunghezza meridiana}$$

$$\int H_{de} = \frac{B_d}{\mu_{Fe}(B_d)} \cdot l_d$$

giogo = premessa: Nel giogo e mano e mano di cui si muove nel verso della linea di tempo si ha sempre più flusso fino a quando raggiunge il valore max di flusso, poi torna a scendere.

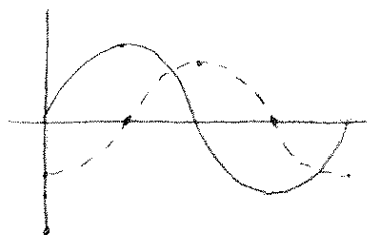


Ne segue che B nel giogo non è costante

Poiché la sezione del giogo è costante

allora il flusso nel giogo ^{non} è costante

$$\phi_{\max \text{ giogo}} = \frac{\phi_p}{2} \Rightarrow \hat{B}_{\text{giogo}} = \frac{\phi_p}{2 b \cdot l}$$



— B_{stator}

-- B_{giogo}

$$\int_{\text{giogo}} H_{de} = \int \frac{B_{\text{giogo}}}{\mu_{Fe}(B_{\text{giogo}})} dl$$

lunghezza del percorso magnetico nel giogo.