

Università degli Studi di Bologna
Scuola di Ingegneria e Architettura
“Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Elettrica”

Metodologie di Progettazione delle Macchine Elettriche M

Progetto di massima di una macchina asincrona e criteri di similitudine geometrica

Prof. Giovanni Serra

Dipartimento di
Ingegneria dell'Energia Elettrica e dell'Informazione “G. Marconi”
Università degli Studi di Bologna
Viale Risorgimento, 2
40136 Bologna
Tel. 051-2093582/ Fax 051-2093588
e-mail: giovanni.serra@mail.ing.unibo.it

Motore asincrono

Dimensionamento di massima

A = potenza apparente

P = potenza all'albero,

$$A = \frac{P}{\eta \cos \varphi} = 3 V I \cong 3 E I$$

$$E = \frac{\omega_s}{2\sqrt{2}} K_a N \Phi_M$$

trascurando le cadute sulla
resistenza e reattanza statorica

$$\Phi_M = \frac{2}{\pi} B_M L \tau$$

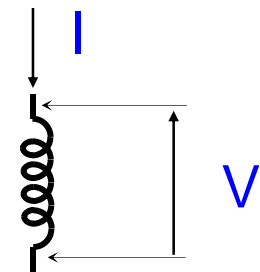
$$\pi D = 2 p \tau$$

$$\Delta = \frac{3 N I}{\pi D}$$

D diametro al traferro, $N=2pnq$

Δ densità lineare di corrente, (amperfili per unità di lunghezza periferica)

V e I = tensione e corrente di fase



Fase di motore

Motore asincrono

Dimensionamento di massima

Dalle precedenti si ricava

$$\frac{A}{n_0 L D^2} = \frac{\pi^2}{60\sqrt{2}} K_a B_M \Delta$$

La quantità a secondo membro prende il nome di “coefficiente di utilizzazione”

B_M e Δ sono due variabili che rappresentano lo sfruttamento magnetico ed elettrico della macchina

B_M e Δ presentano un range di variazione abbastanza limitato al variare della potenza del motore

Motore asincrono

Dimensionamento di massima

Si pone $m = \frac{L}{\tau}$

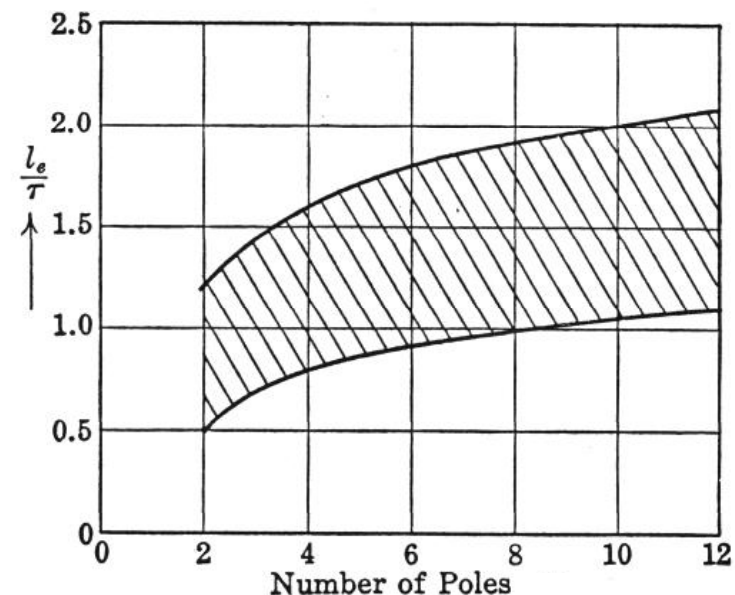
Valori elevati di m sono indicativi di macchine sviluppate prevalentemente in senso assiale, caratterizzate da un raffreddamento più difficoltoso di quello che si ha in macchine a maggior sviluppo radiale

Una formula di orientamento consigliata è la seguente:

$$m = (0.25 \div 0.5) \sqrt{2p}$$

oppure si può fare riferimento al seguente grafico

Dall'analisi dell'produzione
corrente ($p < 4$) $m = 0.3 \sqrt{2p}$



Dimensionamento avvolgimento

Equazione di una fase statorica

$$\bar{V} = R\bar{I} + jX_d\bar{I} + j\frac{\omega}{2\sqrt{2}}K_a N\bar{\Phi}_M \cong j\frac{\omega}{2\sqrt{2}}K_a N\bar{\Phi}_M$$

Nel caso di collegamento in serie di tutte le matasse

$$N=2pnq$$

$$\Phi_M = \frac{2}{\pi} B_M L \tau$$

da cui

$$\pi D = 2 p \tau$$

$$V \cong \frac{\omega}{2\sqrt{2}} K_a N \bar{\Phi}_M = \frac{\omega}{\sqrt{2}} K_a n q B_M L D$$

N.B. V = tensione applicata alla fase

n numero di conduttori per cava

$$n \cong \frac{\sqrt{2V}}{K_a \omega q B_M L D} \quad \text{Intero (pari se doppio strato)}$$

Per un prefissato tipo di lamierino, a pari valor max dell'induzione:

n aumenta con l'aumentare della tensione

n diminuisce con l'aumentare della frequenza

n diminuisce con l'aumentare delle dimensioni L e D della macchina

Influenza di “n” sui valori di R e X_d

R resistenza elettrica delle pnq spire dell'avvolgimento, collegate **in serie** e disposte in q cave polo/fase

$$R = R_{\text{spira}} n q p = \rho \frac{(L + L_t)}{S_{\text{cond}}} 2 n q p$$

Fattore di
riempimento
della cava

$$\text{ove } S_{\text{cond}} = \frac{\text{Areacava } F_r}{n} \quad R = \rho \frac{2 p n q (L + L_t)}{S_{\text{cond}}}$$

Da cui risulta

$$R = \rho \frac{2 p n^2 q (L + L_t)}{\text{Areacava } F_r} \equiv n^2$$

Influenza di “n” sui valori di R e X

X reattanza di $p n q$ spire dell'avvolgimento, collegate **in serie** e disposte in q cave polo/fase

In molti casi può porsi, per semplicità

$$X = \omega \mu_0 q p n^2 (\lambda L + \lambda_t L_t)$$



λ = permeanza per
unità di lunghezza

Influenza di “n” sui valori di R e X_d

Dalle precedenti relazioni si deduce che:

- Per un prefissato lamierino
- Per un prefissato tipo di avvolgimento
- A parità di altezza di pacco L

i valori della resistenza e della reattanza degli avvolgimenti sono proporzionali a

$$n^2$$

Parallelo di *vie* o *rami*

- ❑ Nel caso di valori di n molto bassi è possibile realizzare paralleli di *vie* o *rami*.
- ❑ Nei rami le fem indotte devono essere coincidenti in modulo e ed in fase
- ❑ Il numero massimo di vie in parallelo dipende dal tipo di avvolgimento e comunque non può superare $2p$
- ❑ Ad ogni ramo viene applicata la tensione della fase e la corrente di ramo è una parte della corrente della fase

Parallelo di *vie* o *rami*

r numero di rami in parallelo

$n'=nr$ numero di conduttori per cava di sezione S_{cond}/r

Sezione teorica per
conduttori in serie

La resistenza R_r del ramo vale

$$R_r = \rho \frac{2p}{r} \frac{n'^2 q (L + L_t)}{\text{Areacava } F_r} = \rho \frac{2p n^2 r q (L + L_t)}{\text{Areacava } F_r}$$

E quindi la resistenza R_{rp} degli r rami in parallelo è data

$$R_{rp} = \frac{1}{r} R_r = \rho \frac{2p n^2 q (L + L_t)}{\text{Areacava } F_r} = R$$

N.B. nelle precedenti relazioni n è il numero di conduttori per cava nel caso di avvolgimento senza paralleli

Paralelo di *vie* o *rami*

Analoghe considerazioni valgono anche per le reattanze. Pertanto, **a parità di B_M e di riempimento di cava:**

Nel caso di esecuzione di un avvolgimento con rami in parallelo, la resistenza elettrica e le reattanze assumono lo stesso valore che avrebbero se l'avvolgimento fosse realizzato collegando in serie tutte le bobine.

Quindi, in ogni caso l'avvolgimento può essere considerato come costituito da $N=2pnq$ conduttori per fase, in serie.

Calcolo dei parametri equivalenti rotorici

I valori delle resistenze e reattanze rotoriche, riferite a statore, si calcolano con le relazioni

$$R_2^1 = R_2 \frac{m_1}{m_2} \frac{(K_{a1} N_1)^2}{(K_{a2} N_2)^2}$$

$$X_2^1 = X_2 \frac{m_1}{m_2} \frac{(K_{a1} N_1)^2}{(K_{a2} N_2)^2}$$

N.B. I valori riferiti a statore della resistenza e della reattanza degli avvolgimenti sono proporzionali a

n^2

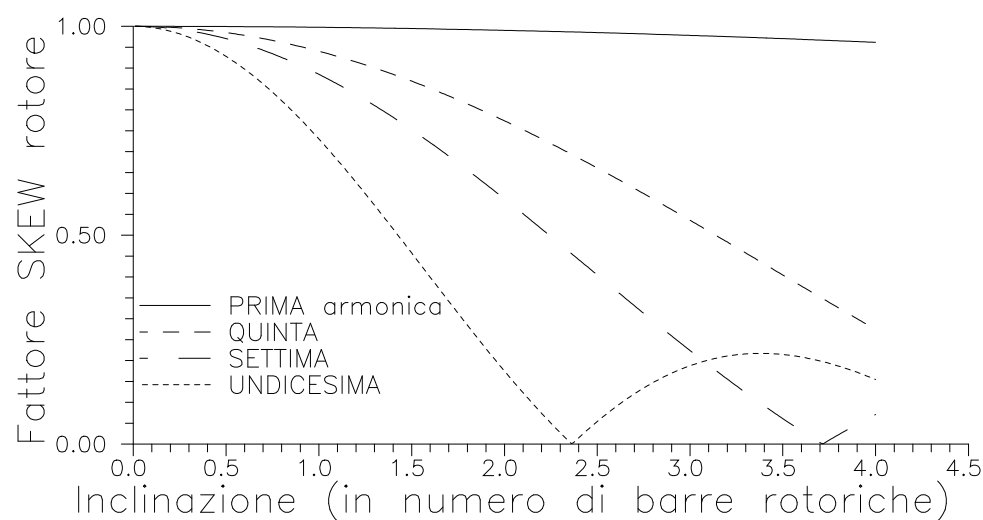
Calcolo parametri equivalenti rotorici

Nel caso di barre rotoriche inclinate, occorre tenere conto del “fattore di inclinazione o skew”

$$\alpha_{\text{skew}} = \frac{2p\pi}{N_b} \cdot (\text{PassoCavaRotorica})$$

$$K_{\text{skew}} = \frac{2 \sin\left(\frac{\alpha_{\text{skew}}}{2}\right)}{\alpha_{\text{skew}}}$$

$$K_{\text{skew}_p} = \frac{2 \sin\left(\frac{\rho \alpha_{\text{skew}}}{2}\right)}{\rho \alpha_{\text{skew}}}$$



Rotore a gabbia di scoiattolo

- ❑ Nel caso di rotore a gabbia di scoiattolo l'avvolgimento può essere considerato come un avvolgimento polifase caratterizzato da:
 - ❑ $m_2 = N_b$ N. numero di barre
 - ❑ $N_2 = 1$
 - ❑ $R_2 = R_b^*$ Resistenza equiv. di barra
 - ❑ $X_{d2} = X_{db}^*$ Reatt. di dispersione equiv. di barra
 - ❑ $K_{a2} = K_{skew}$ Fattore di SKEW (se presente)

Rotore a gabbia di scoiattolo

- Pertanto i valori di resistenza di barra e reattanza di dispersione, riferiti allo statore, valgono rispettivamente:

$$R_2^1 = R_b^* \frac{m_1}{N_b} \frac{(K_{a1} N_1)^2}{(K_{skew})^2}$$

$$X_{d2}^1 = X_{db}^* \frac{m_1}{N_b} \frac{(K_{a1} N_1)^2}{(K_{skew})^2}$$

Criteri di similitudine geometrica delle macchine elettriche

Criteri di similitudine delle macchine elettriche

Si considerino due macchine elettriche dello stesso tipo, perfettamente simili

Le dimensioni geometriche della seconda siano **s** volte le corrispondenti della prima.

Le due macchine abbiano medesimi valori di

- ❑ Velocità angolare (freq. e N. di poli)
- ❑ B_M , valor max induzione al traferro
- ❑ J ,densità di corrente

Criteri di similitudine delle macchine elettriche

□ Poiché risulta

$$A = \frac{P}{\eta \cos \varphi} = 3 V I \cong 3 E I$$

$$E = \frac{\omega_s}{2\sqrt{2}} K_a N \Phi_M \equiv s^2 \quad I = J S_{\text{cond}} \equiv s^2$$

$$\Phi_M = \frac{2}{\pi} B_M L \tau$$

$$A \cong 3 E I \equiv s^4$$

$$s \equiv A^{1/4} \equiv \sqrt[4]{A}$$

Criteri di similitudine delle macchine elettriche

- Poiché risulta inoltre

$$\text{Peso} \equiv s^3 \equiv A^{3/4} \quad \Delta P \equiv s^3 \equiv A^{3/4}$$

- si ha

$$\frac{\text{Peso}}{\text{Potenza}} \equiv \frac{s^3}{s^4} = s^{-1} \equiv A^{-1/4} = \frac{1}{\sqrt[4]{A}}$$

$$\frac{\Delta P}{A} \equiv \frac{s^3}{s^4} = s^{-1} \equiv A^{-1/4} = \frac{1}{\sqrt[4]{A}}$$

Criteri di similitudine delle macchine elettriche

In definitiva, **a parità di B_m e J** , in macchine “**simili**”:

la potenza specifica aumenta con l'aumentare della potenza (sono più economiche le macchine di elevata potenza)

le perdite specifiche diminuiscono con l'aumentare della potenza (le macchine di elevata potenza hanno rendimento maggiore)

Criteri di similitudine delle macchine elettriche

PROBLEMA TERMICO

Nelle ipotesi suddette si ha:

Calore sviluppato $\equiv s^3$

Calore smaltito $\equiv s^2 \Theta$

quindi $\Theta \equiv \textcircled{S} \equiv A^{1/4}$

Sovratemperatura

***La sovratemperatura aumenta con
l'aumentare della potenza***

Criteri di similitudine delle macchine elettriche

PROBLEMA TERMICO

In pratica, tuttavia, con l'aumentare delle dimensioni:

- ❑ aumenta la velocità periferica
- ❑ sono possibili provvedimenti atti a migliorare la dissipazione (canali di raffreddamento, dispositivi di raff. più complessi e costosi)

Pertanto non solo si giustifica un utilizzo costante dei materiali (B_M e J) ma anzi tale utilizzo risulta più spinto nelle grandi unità

Relazione fra dimensioni e numero di poli

Potenza
resa

$$\frac{P}{f L D^2} = \frac{\pi^2}{\sqrt{2}} K_a B_M \Delta \frac{1}{p} \eta \cos \varphi$$

Coppie di poli

Ne consegue che all'aumentare del numero di poli le dimensioni ed il peso aumentano.

$$P \cong C \frac{\omega}{p}$$

$$\frac{C}{L D^2} \cong \frac{\pi}{2\sqrt{2}} K_a B_M \Delta \eta \cos \varphi$$

*Le dimensioni della macchina dipendono sensibilmente dalla **coppia** sviluppata*

Diminuisce
all'aumentare del
numero di poli

Relazione fra dimensioni e numero di poli

SPESSORE CORONE

$$\frac{1}{2} \frac{2}{\pi} B_M L \tau = B_c h_c L \quad \pi D = 2 p \tau$$

Metà del flusso per polo
interessa la corona

$$\frac{1}{2} \frac{2}{\pi} B_M L \frac{\pi D}{2p} = B_c h_c L$$

$$h_c = \frac{B_M}{B_c} \frac{D}{2p}$$

*All'aumentare del numero di poli diminuisce lo spessore delle corone e quindi, a **parità di coppia**, diminuisce il peso.*

Relazione fra dimensioni e potenza reattiva

- Con buona approssimazione si può ritenere la potenza reattiva Q richiesta dalla macchina sia praticamente coincidente con

$$Q \cong 3VI_{\mu} \cong 3 \frac{E^2}{\omega L_m}$$

- Ricordando che

$$L_m = \frac{3N_1^2 K_{a1}^2 \mu_0 L \tau}{2\pi^2 \delta p}$$

- Risulta

$$Q \cong 3VI_{\mu} \cong \frac{1}{2} \frac{B_M^2}{\mu_0} \omega \pi D L \delta$$

Relazione fra dimensioni e potenza reattiva

- ❑ Ovvero, con buona approssimazione si può ritenere la potenza reattiva richiesta dalla macchina sia proporzionale all'energia necessaria per la magnetizzazione del volume di traferro.

$$3VI_{\mu} \cong \frac{1}{2} \frac{B_M^2}{\mu_0} \omega \pi DL \delta$$

Potenza reattiva

Energia magnetica specifica (Valor max)

Volume traferro

Relazione fra dimensioni e potenza reattiva

La potenza reattiva Q può essere posta nella seguente forma

$$Q = 3VI_{\mu} = \frac{1}{2} \frac{B_M^2}{\mu_0} \omega \pi D^2 L \frac{\delta}{D}$$

Ovvero

$$\frac{Q}{fLD^2} = \frac{\pi^2}{\mu_0} B_M^2 \frac{\delta}{D}$$

La precedente relazione mostra che a parità di valori di:

$$LD^2, \quad B_M, \quad \Delta$$

quindi a parità di coppia, la potenza reattiva è

proporzionale al rapporto $B_M^2 \delta/D$, cioè NON dipende dal numero di poli.

Relazione fra numero di poli e fattore di potenza

Il rapporto Q/A rappresenta $\sin(\varphi)$ e ricordando che

$$\frac{A}{f L D^2} = \frac{\pi^2}{\sqrt{2}} K_a B_M \Delta \frac{1}{p} \qquad \frac{Q}{f L D^2} = \frac{\pi^2}{\mu_0} B_M^2 \frac{\delta}{D}$$

Si ottiene

$$\sin(\varphi) = \frac{Q}{A} = \frac{\sqrt{2}}{\mu_0} \frac{1}{K_a} \frac{B_M}{\Delta} \frac{\delta}{D} p$$

Si ricordi inoltre che

$$\Delta = \frac{3NI}{\pi D} = \frac{\text{Area}_{\text{cave}} F_r J}{\pi D} \equiv \frac{D^2 J}{D} = D J$$

Relazione fra numero di poli e fattore di potenza

Si ottiene $\sin(\varphi) \equiv \frac{B_M}{J} \frac{\delta}{D^2} p$

Pertanto:

a parità di B_M e J , il fattore di potenza [**$\cos(\varphi)$**]

- aumenta all'aumentare del diametro
- diminuisce all'aumentare del traferro e del numero di poli

$$\delta = 3.06 - \frac{6560}{D + 2280} [\text{mm}]$$

Valore minimo
del traferro

PERDITE NEI CONDUTTORI E NEL FERRO

$$P_{fe} = c_p c_l B_{Ferro}^2 \gamma L Area_{ferro}$$

Perdite nel ferro (espressione approx. a frequenza costante)

$$P_{joule} = 3\rho \frac{(L + L_t)}{S_{cond}} 2 n q p l^2 = 3\rho \frac{(L + L_t)}{S_{cond}} N I^2$$

Perdite nel rame

Ricordando che

$$3NI = Area_{cave} F_r J$$

$$J = \frac{I}{S_{cond}}$$

$$P_{joule} = \rho(L + L_t) Area_{cave} F_r J^2$$

PERDITE NEI CONDUTTORI E NEL FERRO

$$P_{fe} = c_p c_l B_{Ferro}^2 \gamma L Area_{ferro} =$$

$$= c_p c_l B_{Ferro}^2 \gamma L D^2 K_{ferro}$$

$$K_{ferro} = \frac{Area_{ferro}}{D^2}$$

$$P_{joule} = \rho(L + L_t) Area_{cave} F_r J^2 =$$

$$= \rho(L + L_t) D^2 K_{cave} F_r J^2$$

$$K_{cave} = \frac{Area_{cave}}{D^2}$$

$$K_{ferro} + K_{cave} \cong Cost$$

Prestazioni al variare delle dimensioni principali

Sulla scelta del rapporto L/τ

In sintesi, alcuni Autori forniscono le seguenti indicazioni di massima sui valori del rapporto L/τ :

- $L/\tau = 1$ buon compromesso
- $L/\tau = 1 \div 1.5$ buon fattore di potenza
- $L/\tau = 1.5$ buon rendimento
- $L/\tau = 1.5 \div 2$ minimo costo



F i n e