

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

**Metodologie di Progettazione delle  
Macchine Elettriche M**

# **Dimensionamento di un motore asincrono trifase**

***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](mailto:giovanni.serra@mail.ing.unibo.it)

# Dati di specifica

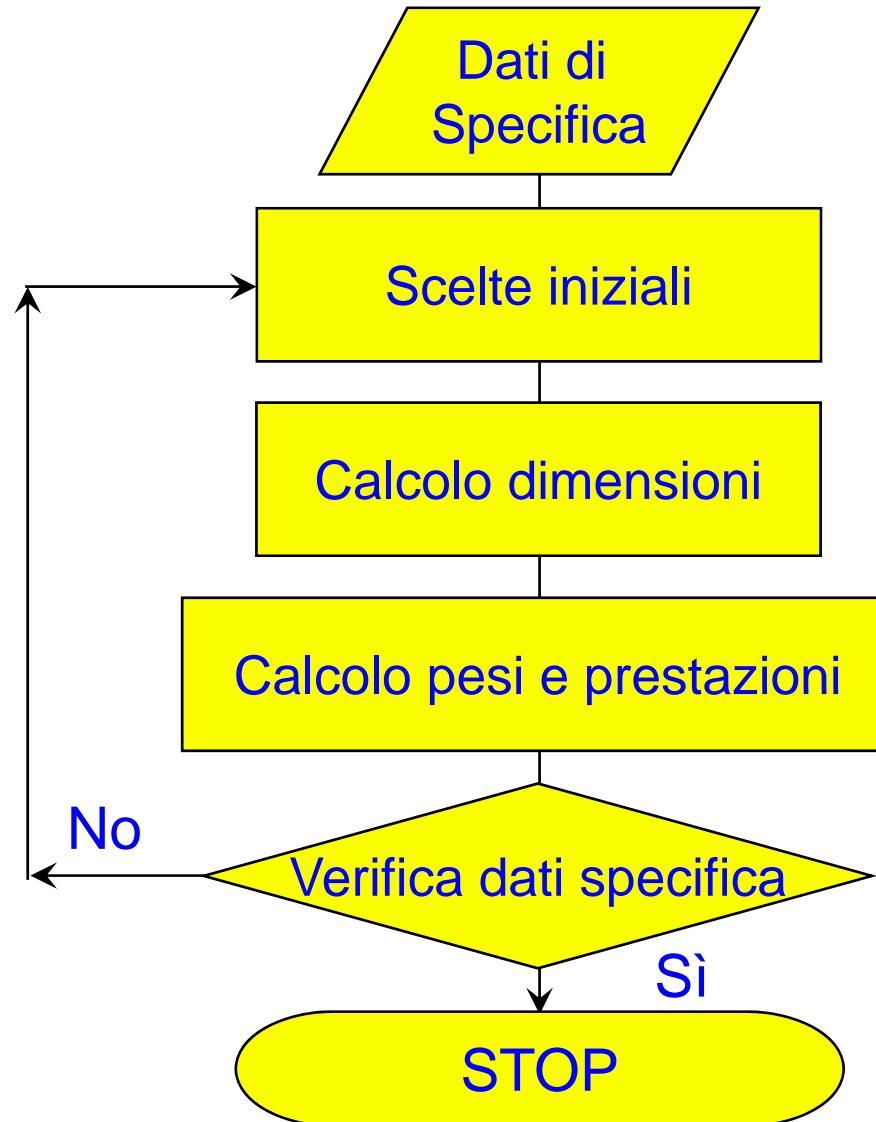
---

Potenza nominale	P	all'albero, alla velocità nominale
Tensione nominale	V	valore efficace della tensione concatenata
Frequenza nominale	f	
N. di poli	2p	
Collegamento delle fasi (D o Y)		
Rendimento	$\eta$	alla velocità nominale
Fattore di potenza	$\cos(\varphi)$	alla velocità nominale
Tipo di raffreddamento		
Tipi di rotore		
$C_{\max}/C_n$		
$C_s/C_n$		
$I_s/I_n$		

# Algoritmo di progettazione

---

- Le procedure possono risultare diverse ma, sostanzialmente, si possono ricondurre al seguente schema



# Relazioni costitutive

Dimensionamento di massima dello statore

$$\begin{aligned} A &= \sqrt{3} VI = \frac{P}{\eta \cos \varphi} = \\ &= 3 V_f I_f \cong 3 E_f I_f \end{aligned}$$

Collegamento a triangolo D  
 $\Rightarrow V_f = V, \quad I_f = I/1.73$

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

Collegamento a stella Y  
 $\Rightarrow V_f = V/1.73, \quad I_f = I$

Ponendo  $m = \frac{L}{\tau}$

# Calcolo valori di D' L'

$$D' = \sqrt[3]{\frac{P}{f} \frac{2\sqrt{2}}{\pi^3} \frac{p^2}{k_a n \cos \varphi} \frac{1}{B_M \Delta m}}$$

$$L' = m\tau = m \frac{\pi D'}{2p}$$

Scelte iniziali

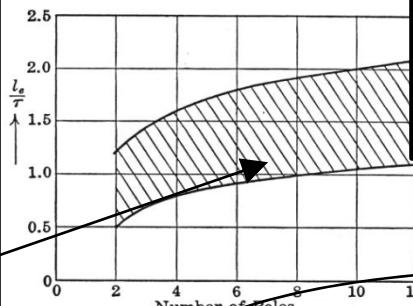
$B_M$  0.6 - 0.9 T

$\Delta$  20000 - 60000 A/m

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

$K_a$  unitario (o calcolato)

Dall'analisi della produzione corrente (p<4)  $m = 0.3 \ 2p$



Dall'analisi della produzione corrente (p<4)  $m = 0.3 \ 2p$

$$\Delta = \frac{3NI}{\pi D} = \frac{\text{Area}_{\text{cave}} F_J}{\pi D}$$

Esempio di dimensionamento di un motore asincrono trifase.5

# Caratteristiche e dimensioni lamierino

---

- Calcolato il valore di  $D'$  sono possibili due approcci
  - a) determinazione delle caratteristiche e dimensioni del lamierino
  - b) scelta di un lamierino tra quelli disponibili

# Caratteristiche e dimensioni lamierino

---

## a) Determinazione delle caratteristiche e dimensioni del lamierino

- Si assume  $D = D'$ ,  $L=L'$
- Si deve scegliere
  - Il numero di cave statorico e rotorico
  - Il tipo di avvolgimento
  - Eventuale skew rotorico
- Si deve calcolare
  - Lo spessore dei denti
  - L'altezza delle corone
  - L'altezza delle cave

# Caratteristiche e dimensioni lamierino

---

## b) Scelta di un lamierino tra quelli disponibili

Calcolato il valore di D' si procede alla

- Scelta della traciatura (lamierino commerciale o comunque disponibile)
- Conseguente scelta definitiva di D e calcolo di L

Individuato il lamierino, risultano noti i seguenti valori, per lo **stator** e per il **rotore**

$N_c$  numero di cave

A Area della sezione di cava

b spessore dente

$h_c$  spessore corona

# Fattore d'avvolgimento

---

Dalle caratteristiche del lamierino si possono dedurre i valori di  $q$ ,  $\alpha$ ,  $K_a$

$$q = N_c / (6p)$$

Numero di cave polo/fase

$$\alpha = \frac{2p\pi}{N_c}$$

Angolo di cava

$$K_a = \frac{\sin\left(\frac{q\alpha}{2}\right)}{q \cdot \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \cdot \cos\left(\frac{\beta}{2}\right)$$

Fattore d'avvolgimento

Eventuale fattore di raccorciamento.  
( $\beta$  multiplo di  $\alpha$ )

# Calcolo di $\tau$ , $\Phi_M$ , $N$ , $n$

---

Coerentemente con le scelte iniziali si puo' ricalcolare la lunghezza di pacco necessaria

dovendo essere  $L D^2 = L' D'^2$

si ha

$$L = L' \frac{D'^2}{D^2}$$

Si può quindi procedere al calcolo di  $\tau$ ,  $\Phi_M$ ,  $N$  e quindi  $n$

$$\tau = \frac{\pi D}{2 p}$$

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

$$N = V_f \frac{2\sqrt{2}}{\omega_s K_a \Phi_M} (0.95 - 0.98) \rightarrow n = \frac{N}{2pq}$$

La fem indotta è inferiore alla tensione applicata

**n** numero di conduttori per cava

---

□ Oppure, più direttamente

$$n = \frac{\sqrt{2} V_f}{K_a 2\pi f q B_M L D} \cdot (0.95 - 0.98)$$

**n** deve risultare intero (pari se doppio strato)

## **n** numero di conduttori per cava

---

$$n = \frac{\sqrt{2} V_f}{K_a 2\pi f q B_M L D} \cdot (0.95 - 0.98)$$

La necessità di rendere **n** intero può richiedere uno o più dei seguenti provvedimenti

- arrotondamento di n con conseguente variazione di  $B_M$
- variazione di L per rendere intero n, con  $B_M$  inalterato
- cambiare il tipo di collegamento delle fasi (D - Y)
- eseguire, se possibile, paralleli di rami

$$N = 2pnq$$

# Calcolo sezione conduttori statorici e area cave

## a) Determinazione delle caratteristiche e dimensioni del lamierino

$$S_{\text{cond}} = \frac{I_f}{J}$$



$I = \frac{P}{\sqrt{3}V\eta \cos(\varphi)}$

Collegamento a triangolo D  
 $I_f = I/1.73$

Collegamento a stella Y  
 $I_f = I$

$\left. \right\}$

La sezione del conduttore viene individuata scegliendo il valore della densità di corrente  $J$  nel conduttore

# Calcolo sezione conduttori statorici e area cave

## a) Determinazione delle caratteristiche e dimensioni del lamierino

$$S_{\text{cond}} = \frac{I_f}{J}$$

Diametri maggiori di 1-1.5 mm sono poco utilizzati. Si deve quindi ricorrere a fili in parallelo per realizzare la sezione richiesta.

Poiché  $n$  = numero di conduttori per cava, si ha

$$A = \frac{nS_{\text{cond}}}{F_r}$$

$F_r$  = fattore di riempimento della cava  
di solito compreso fra 0.38 e 0.42.

A = area londa cava.  
La conoscenza di A permette di calcolare l'altezza della cava e quindi le dimensioni di ingombro del motore (V. oltre)

# Calcolo sezione conduttori statorici e densità di corrente

## b) Scelta di un lamierino tra quelli disponibili

Poiché  $n$  = numero di conduttori per cava, si ha

$$S_{\text{cond}} = \frac{A \cdot F_r}{n}$$

ove  $F_r$  = fattore di riempimento della cava.

Diametri maggiori di 1-1.5 mm sono poco utilizzati. Si deve quindi ricorrere a fili in parallelo per realizzare la sezione richiesta.

La densità di corrente  $J$  effettiva nel conduttore risulta pertanto:

$$J = \frac{I_f}{S_{\text{cond}}} \quad \left. \begin{array}{l} \text{Collegamento a triangolo D} \\ I_f = I/1.73 \\ \text{Collegamento a stella Y} \\ I_f = I \end{array} \right\} I = \frac{P}{\sqrt{3}V\eta \cos(\phi)}$$

A verifica del  
valore assunto

# Calcolo spessore denti

## a) Determinazione delle caratteristiche e dimensioni del lamierino

Fissato il valore di  $B_M$  si può calcolare lo spessore dei denti assumendo che tutte le linee di flusso comprese al traferro in un passo di cava si incanalino esclusivamente attraverso il dente.

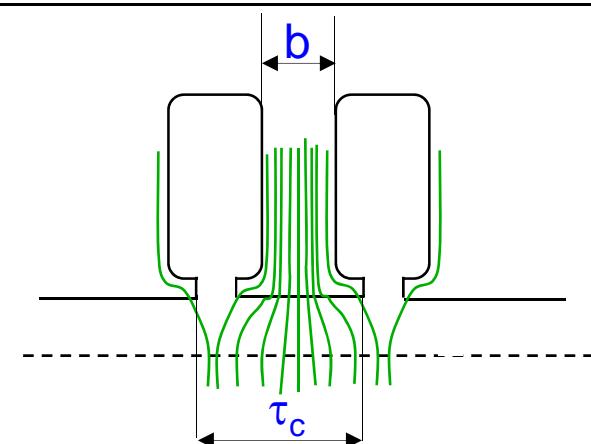
$$B_M \tau_c L = B_{dM} b L$$

ove

$$\tau_c = \frac{\pi D}{N_c}$$

e quindi

$$b = \frac{B_M}{B_{dM}} \tau_c$$



*Il calcolo viene eseguito con riferimento ai denti statorici e rotorici*

*E' opportuno che risulti*

$$(1.3) \leq B_{dM} \leq (1.6 - 1.8) T$$

# Calcolo induzione denti

## b) Scelta di un lamierino tra quelli disponibili

Noto il valore ricalcolato di  $B_M$  si può calcolare l'induzione nel dente considerando che tutte le linee di flusso comprese al traferro in un passo di cava si incanalino esclusivamente attraverso il dente.

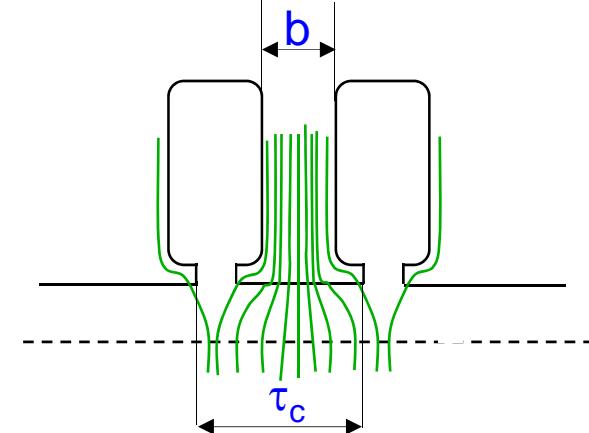
$$B_M \tau_c L = B_{dM} b L$$

ove

$$\tau_c = \frac{\pi D}{N_c}$$

e quindi

$$B_{dM} = B_M \frac{\tau_c}{b}$$



*Il calcolo viene eseguito con riferimento ai denti statorici e rotorici*

*E' opportuno verificare che risulti  $B_{dM} \leq (1.6 - 1.8) T$*

# Calcolo spessore corone

---

## a) Determinazione delle caratteristiche e dimensioni del lamierino

Fissato il valore di  $B_M$  si può calcolare lo spessore delle corone considerando che metà del flusso per polo si richiude attraverso le corone.

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

$$h_c = \frac{B_M}{B_{cM}} \frac{D}{2p}$$

*Il calcolo viene eseguito con riferimento alle corone statorica e rotorica*

*E' opportuno che risulti*  
 $1.1 \leq B_{cM} \leq 1.5 T$

# Calcolo altezza di cava

## a) Determinazione delle caratteristiche e dimensioni del lamierino

L'altezza  $H_{cava}$  della cava può essere determinata nota l'area A della cava e lo spessore b del dente.

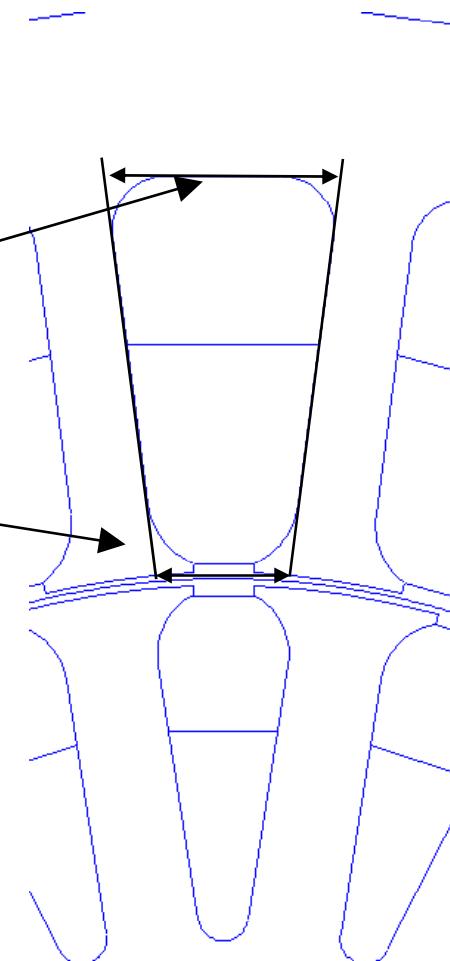
N.B. L'esempio è riferito alla cava statorica.

$$\text{FondoCava} = \frac{\pi(D + 2h_{cava})}{N_c} - b$$

$$\text{LarghezzaCava} = \tau_c - b$$

$$A_c = \frac{\text{FondoCava} + \text{LarghezzaCava}}{2} h_{cava}$$

Ne risulta un'equazione di secondo grado nell'incognita  $h_{cava}$ .



# Calcolo altezza di cava

## a) Determinazione delle caratteristiche e dimensioni del lamierino

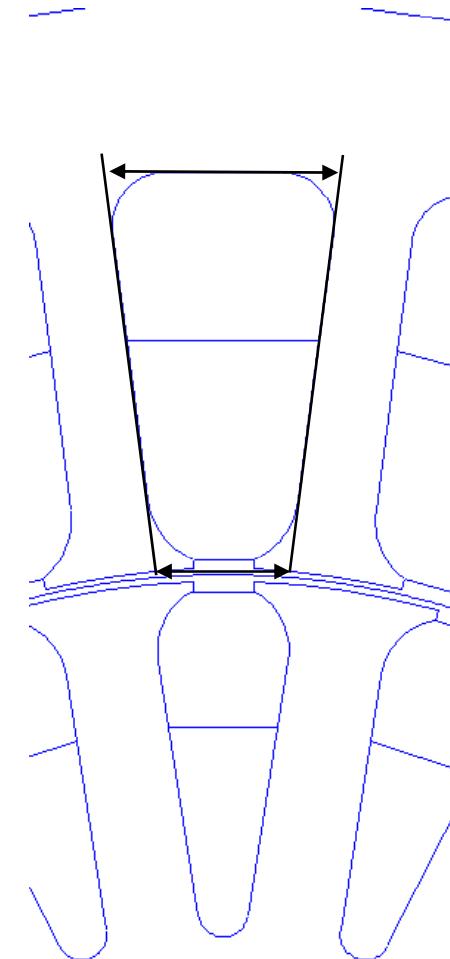
Ne risulta un'equazione di secondo grado nell'incognita  $h_{\text{cava}}$ .

$$h_{\text{cava}}^2 + \left(\tau_c - b\right) \frac{N_c}{\pi} h_{\text{cava}} - A \frac{N_c}{\pi} = 0$$

per la cava statorica

$$h_{\text{cava}}^2 - \left(\tau_c - b\right) \frac{N_c}{\pi} h_{\text{cava}} + A \frac{N_c}{\pi} = 0$$

per la cava rotorica



# Calcolo diametro esterno ed interno

---

## a) Determinazione delle caratteristiche e dimensioni del lamierino

Il diametro esterno  $D_e$  risulta

$$D_e = D + 2(h_{cavaStat} + h_c)$$

Per il lamierino rotorico si calcolerà il diametro interno  $D_i$

$$D_i = D - 2\delta - 2(h_{cavaRot} + h_c)$$

# Calcolo induzione corone

---

## b) Scelta di un lamierino tra quelli disponibili

Noto il valore ricalcolato di  $B_M$  si può calcolare l'induzione nelle corone considerando che metà del flusso per polo si richiude attraverso le corone.

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

$$B_{cM} = \frac{B_M}{h_c} \frac{D}{2p}$$

*Il calcolo viene eseguito con riferimento alle corone statorica e rotorica*

*E' opportuno verificare che risulti  $B_c \leq 1.5 T$*

# Calcolo corrente barra rotorica

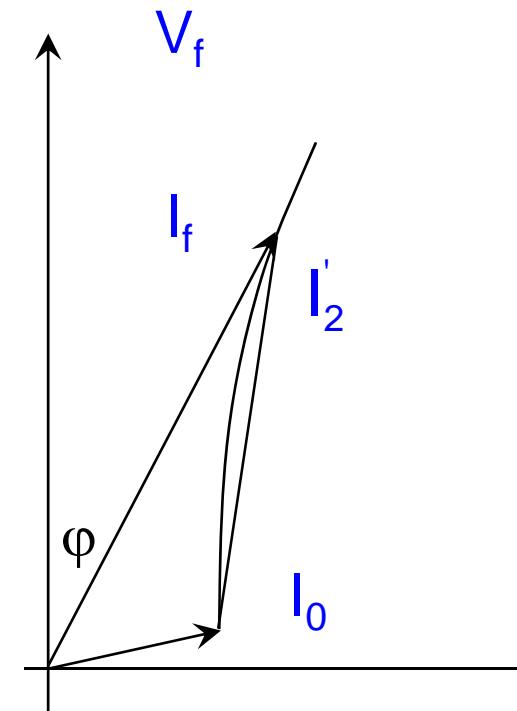
---

- La corrente di una fase (barra) rotorica  $I_b$ , riferita all'avvolgimento statorico vale

$$I'_2 = I_b \frac{N_b}{m_1} \frac{K_{\text{skew}}}{K_{a1} N_1} \approx I_f \cos(\varphi)$$

- da cui

$$I_b \approx I_f \cos(\varphi) \frac{m_1}{N_b} \frac{K_{a1} N_1}{K_{\text{skew}}}$$



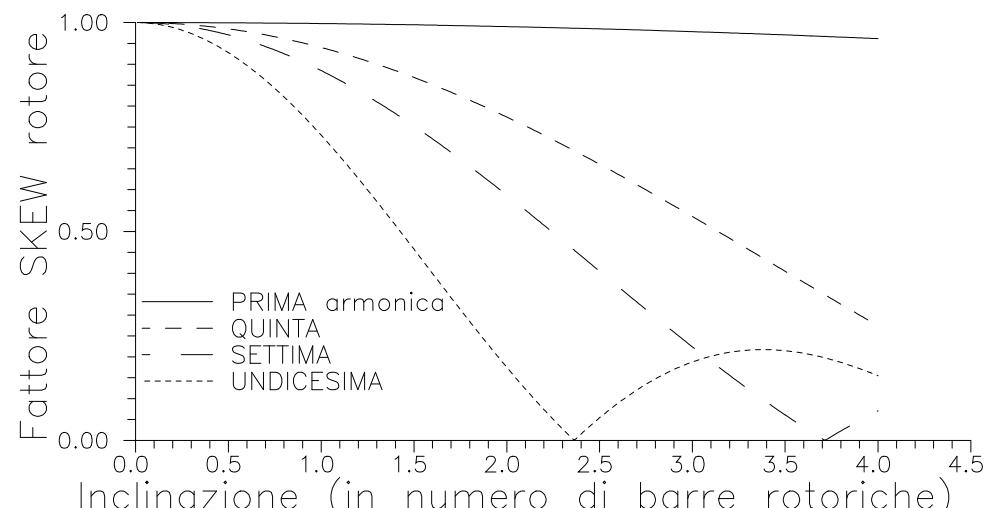
# Calcolo corrente di barra e di anello

$$I_b \approx I_f \cos(\phi) \frac{m_1}{N_b} \frac{K_{a1} N_1}{K_{\text{skew}}}$$

$$I_a \approx I_b \frac{1}{2 \sin\left(\frac{p\pi}{N_b}\right)}$$

$$\alpha_{\text{skew}} = \frac{2p\pi}{N_b} \cdot (\text{Passo, in numero di cave rotoriche})$$

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



*Esempio*

# Calcolo sezione anelli di corto circuito

---

- La sezione  $S_a$  degli anelli può essere calcolata imponendo la densità di corrente negli anelli stessi.
- Un criterio di riferimento è quello di adottare la stessa (o analoga) densità della barra.

$$S_{\text{anello}} \approx S_{\text{barra}} \frac{I_a}{I_b}$$

$$J_{\text{barra}} = \frac{I_b}{S_{\text{barra}}}$$

$$J_{\text{anello}} = \frac{I_a}{S_{\text{anello}}}$$

# Calcolo volume e peso Ferro

---

- Volume (V) e peso (G) dei denti statorici e rotorici

$$V_{ds} = N_{cs} b_s [(D_e - D)/2 - h_{cs}] L$$

$$G_{ds} = \gamma_{lam} V_{ds}$$

$$V_{dr} = N_{cr} b_r [(D - D_i)/2 - h_{cr}] L$$

$$G_{dr} = \gamma_{lam} V_{dr}$$

- Volume e peso corone statorica e rotorica

$$V_{cs} = \frac{\pi}{4} [D_e^2 - (D_e - 2h_{cs})^2] L$$

$$G_{cs} = \gamma_{lam} V_{cs}$$

$$V_{cr} = \frac{\pi}{4} [(D_i + 2h_{cr})^2 - D_i^2] L$$

$$G_{cr} = \gamma_{lam} V_{cr}$$

# Calcolo volume e peso conduttori

---

## □ Volume e peso rame statorico

$$V_{cu} = 3npqS_{cond}(L + 2.3\pi)2 \quad G_{cu} = \gamma_{cu} V_{cu}$$

*Il coefficiente dipende dalla modalità di esecuzione dell'avvolgimento*

## □ Volume e peso barre e anelli rotorici

$$V_{barre} = N_{cr} S_{barra} L \quad G_{barre} = \gamma_{al} V_{barre}$$

$$V_{anelli} = 2S_{anelli} \pi \frac{(D + D_i + 2h_{cr})}{2} \quad G_{anelli} = \gamma_{al} V_{anelli}$$

*Diametro medio anelli*

# Calcolo perdite

---

## □ Perdite ferro (statorico)

$$P_{fe} = c_p c_l \left( \frac{f}{f_{rif}} \right)^2 \left\{ G_{ds} \left( \frac{B_{dMs}}{B_{rif}} \right)^2 + G_{cs} \left( \frac{B_{cMs}}{B_{rif}} \right)^2 \right\}$$

*Valida, a rigore,  
per le perdite  
per correnti  
parassite*

- $c_p$  cifra di perdita del lamierino alla frequenza  $f_{rif}$  ed all'induzione  $B_{rif}$
- $c_l$  coefficiente di aumento delle perdite per effetto della lavorazione (tranciatura..)
- **N.B. Le perdite nel ferro rotorico sono trascurabili**

# Calcolo perdite

---

- Perdite Joule rame statorico

$$P_{cu} = V_{cu} \rho_{Cu75} J^2$$

- Perdite Joule barre e anelli rotorici

$$P_{barre} = V_{barre} \rho_{Al75} J_{barra}^2 \quad P_{anelli} = V_{anelli} \rho_{Al75} J_{anello}^2$$

- Perdite Joule complessive

$$P_j = P_{cu} + \underbrace{P_{barre} + P_{anelli}}_{P_{joule\ rotore}}$$

## Verifiche

---

---

### □ Scorrimento alla potenza nominale

$$s = \frac{P_{\text{Joule rotore}}}{\underbrace{P + P_{\text{joule rotore}} + P_{\text{av}}}_{\text{Potenza trasmessa a rotore}}}$$

## Verifiche

- Rendimento

$$\eta = \frac{P}{P + P_{fe} + P_j + P_{av}}$$

- ove  $P_{av}$  = Perdite per attrito e ventilazione
- Ad esempio una valutazione approssimata è data da:

$$P_{av} = (0.6 - 0.8)P\sqrt{n} \cdot 10^{-3} \text{ [W]}$$

Potenza in W

Giri/min

$$P_{av} = (1.8 - 2.2)P\sqrt{\omega_m} \cdot 10^{-3}$$

# Verifiche

## □ Fattore di potenza

$$\cos(\varphi) = \frac{P/\eta}{\sqrt{(P/\eta)^2 + Q_t^2}}$$

*Con una certa  
approssimazione...*

$$Q_t = \omega \frac{1}{2} \frac{B_M^2}{\mu_0} \pi D L \delta F_{\text{Corr1}}$$

ove  $F_{\text{corr1}} = 1.8 - 2.2$   
(Fattore di Carter, energia  
magnetica nel ferro, flussi  
dispersi)

*Coeff. empirico (meglio calcolo rigoroso)*

# Parametri circuito equivalente a stella

---

- Resistenza statorica del circuito equivalente a stella

$$R_s = \frac{1}{3} \frac{P_{cu}}{I^2}$$

- Resistenza rotorica del circuito equivalente a stella (in assenza di addensamento di corrente)

Tiene conto del tipo di collegamento del motore

$$R_r = \left[ \frac{1}{N_b} \frac{P_{barre} + P_{anelli}}{I_{barra}^2} \right] \frac{3(K_a N_1)^2}{N_b K_{skew}^2} \left( \frac{I_f}{I} \right)^2$$

all'avviamento il valore è maggiore

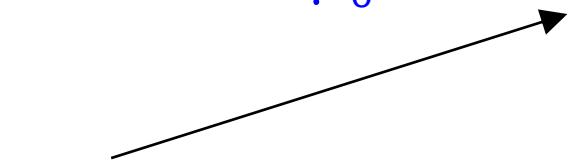
# Calcolo parametri circuito equivalente Y

---

## □ Reattanza magnetizzante $X_m$

Per una prima valutazione, può calcolarsi:

$$Q_m = \omega \frac{1}{2} \frac{B_m^2}{\mu_0} \pi D L \delta F_{corr2} = 3X_m I_\mu^2 = 3 \left( \frac{V}{\sqrt{3}} \right)^2 \frac{1}{X_m} = \frac{V^2}{X_m}$$



$$F_{corr2} = 1.6 - 1.8 \text{ (Fattore di Carter, energia magnetica nel ferro.)}$$
$$X_m = \frac{V^2}{Q_m} = \frac{V}{\sqrt{3} I_\mu}$$

## □ Resistenza rappresentativa delle perdite nel ferro

$R_{fe}$

$$R_{fe} = \frac{V^2}{P_{fe}}$$

# Calcolo parametri circuito equivalente Y

## □ Reattanza magnetizzante $X_m$

Per un calcolo più rigoroso

Ricordiamo che, dalla teoria del campo magnetico rotante:

Valor max della distribuzione sinusoidale di Fmm prodotta dall'avvolgimento



$$I_{\mu f} = A_{s\mu} \frac{\pi}{3n\sqrt{2}qK_a}$$

$$\begin{aligned} \frac{3}{2} \frac{4}{\pi} \frac{n\sqrt{2}I_{\mu f}}{2} qK_a &= A_{s\mu} = & I_\mu &= I_{\mu f} \frac{I}{I_f} \\ &= A_{s\delta} + A_{sds} + \underbrace{A_{sdr}}_{\text{traferro}} + \underbrace{A_{scs} + A_{scr}}_{\text{corone}} \end{aligned}$$

N.B. :  $I_{\mu f}$  rappresenta la corrente nella fase.  $I_f$  rappresenta la corrente nel circuito equiv. a stella

# Calcolo parametri circuito equivalente Y

## □ Reattanza magnetizzante $X_m$

**Traferro**

$$A_{s\delta} = \frac{B_M}{\mu_0} \delta K_c$$

Fattore di Carter (v. oltre)

- A) La distribuzione di induzione al traferro risulta appiattita a causa della saturazione del circuito magnetico.  
Ciò produce una diminuzione del valor max di B, a parità di flusso per polo

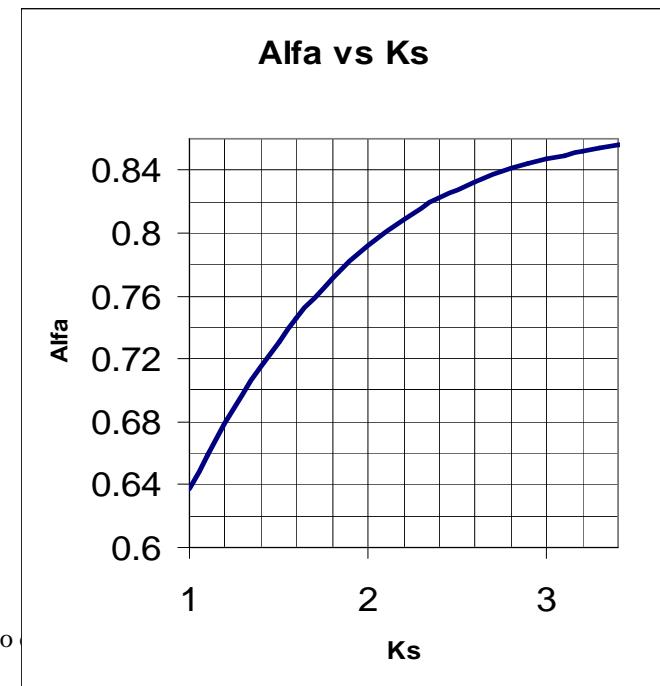
$$\Phi_M = \alpha B_M L \tau$$

$$K_s = \frac{A_{s\delta} + A_{sds} + A_{sdr}}{A_{s\delta}}$$

$$\alpha = .0108 * K_s^3 - .1147 * K_s^2 + .4234 * K_s + .3175$$

Valida per:  $1 < K_s < 3$

Esempio



# Calcolo parametri circuito equivalente Y

## □ Reattanza magnetizzante $X_m$

### Traferro

B) L'addensamento del flusso in corrispondenza dei denti produce un aumento del valor max dell'induzione.

Gli studi del Carter consentono di tener conto di tale aumento mediante un fattore moltiplicativo maggiore di 1.

$$\text{Fattore di Carter} = \frac{1}{1 - \frac{a}{\tau_c} \frac{a/\delta}{5 + a/\delta}}$$

a = apertura di cava

### Fattore di Carter

valido nel caso di struttura dentata affacciata a struttura liscia

$$K_c = K_{cs} K_{cr}$$

# Calcolo parametri circuito equivalente Y

---

## □ Reattanza magnetizzante $X_m$

### Denti

$$A_{sd} = H_{dM} h_{cava}$$



Funzione di  $B_{dM}$   
dalla caratteristica del lamierino

Valida per denti a sezione costante, con  $B_d < 1.8$  T

In caso diverso è necessario tener conto anche del flusso in cava

# Calcolo parametri circuito equivalente Y

- Reattanza magnetizzante  $X_m$  Nel caso risulti:  $B_d > 1.8 \text{ T}$

Denti

Ipotesi: Le linee di campo magnetico attraversano sia il dente e sia la cava.

$$\left\{ \begin{array}{l} B_{dM}^* = B_M \frac{\tau_c}{b} \text{ Dente NON saturo} \\ B_M L \tau_c = B_{dM} L b + \mu_0 H_{dM} L (\tau_c - b) \text{ Dente saturo} \end{array} \right.$$

$$B_{dM} = B_{dM}^* - \mu_0 H_{dM} \frac{(\tau_c - b)}{b}$$

Possibile rappresentazione analitica della curva  $H=H(B)$

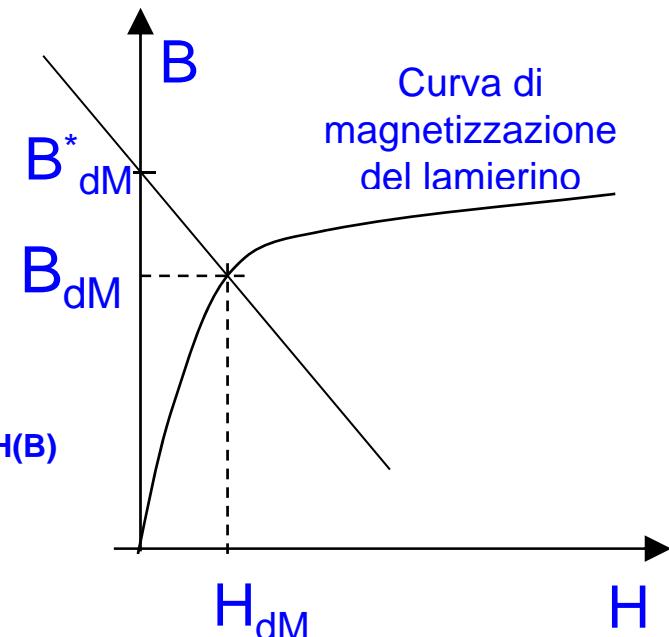
$$H = B_m * Q_n + Q_m * B_m ^ Q_k$$

Esempio: Lamierino M 400 – 50 A

$$Q_n = 150$$

$$Q_m = 4.461872$$

$$Q_k = 13.05286$$



# Calcolo parametri circuito equivalente Y

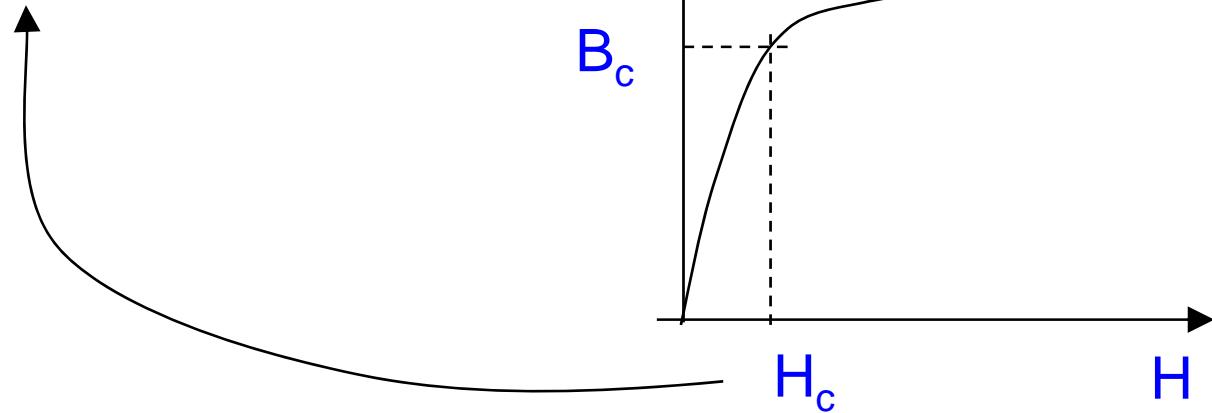
## □ Reattanza magnetizzante $X_m$

### Corone

Nel tratto di corona l'induzione varia da 0 al valor massimo  $B_{cM}$ .

Il valor medio  $B_c$  lo si può valutare in  $0.85 B_{cM}$ .

$$A_{sc} = H_c \frac{\tau_{corona}}{2}$$



# Calcolo parametri circuito equivalente Y

---

## □ Reattanza di dispersione statorica $X_s$

è somma di 3 contributi:

- cave

$$X_c = 2\pi f 2pq n^2 L \lambda_c \left( \frac{I_f}{I} \right)^2$$

- testate

$$X_t = 2\pi f 2pq^2 n^2 \tau \lambda_t \left( \frac{I_f}{I} \right)^2$$

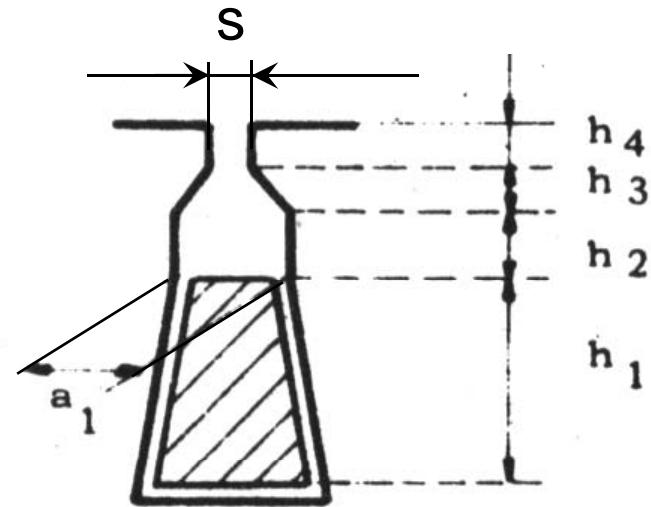
- campi armonici al traferro

$$X_\delta = 2\pi f 2pq^2 n^2 L \lambda_\delta \left( \frac{I_f}{I} \right)^2$$

# Calcolo parametri circuito equivalente Y

---

- Permeanza di cava  $\lambda_c$
- Il calcolo è funzione della forma della cava e del tipo di avvolgimento.
- Per cave trapezoidali semichiuse, avvolgimenti singolo strato, vale



$$\lambda_c = \mu_0 \left( \frac{h_1}{3a_1} + \frac{h_2}{a_1} + \frac{2.3h_3}{a_1 + s} + \frac{h_4}{s} \right)$$

# Calcolo parametri circuito equivalente Y

---

## □ Permeanza di testata $\lambda_t$

Il calcolo rigoroso è molto complesso e fortemente dipendente dalle modalità esecutive dell'avvolgimento.

In prima approssimazione, per avvolgimenti trifase può assumersi

$$\lambda_t = \mu_0 0.52$$

# Calcolo parametri circuito equivalente Y

---

- Permeanza dei campi armonici al traferro  $\lambda_\delta$

$$\lambda_\delta = \mu_0 \frac{\tau}{\delta} \frac{3}{\pi^2} \sum_{\rho=5,7,11,13,\dots} \left( \frac{K_{ap}}{\rho} \right)^2$$

- ove

$$K_{ap} = \frac{\sin(\rho \cdot q\alpha/2)}{q \cdot \sin(\rho \cdot \alpha/2)} \cos(\rho\beta/2)$$

- $\alpha$  = angolo di cava =  $2p\pi/N_c$
- $\beta$  = angolo di raccorciamento

# Calcolo parametri circuito equivalente Y

---

## □ Reattanza di dispersione rotorica $X_r$

Per  $N_b$  elevato è somma dei soli contributi:

- cave
- testate (anelli)

e può porsi nella forma complessiva

$$X_r = 2\pi f \left[ L\lambda_c + 2 \frac{\pi D}{N_b} \lambda_t \frac{1}{\left( 2 \sin \left( \frac{p\pi}{N_b} \right) \right)^2} \right] \frac{3(K_a N_1)^2}{N_b K_{\text{skew}}^2} \left( \frac{I_f}{I} \right)^2$$

ove  $\lambda_c$  e  $\lambda_t$  hanno le espressioni già viste, con riferimento alle dimensioni rotoriche

# Tracciamento curve caratteristiche

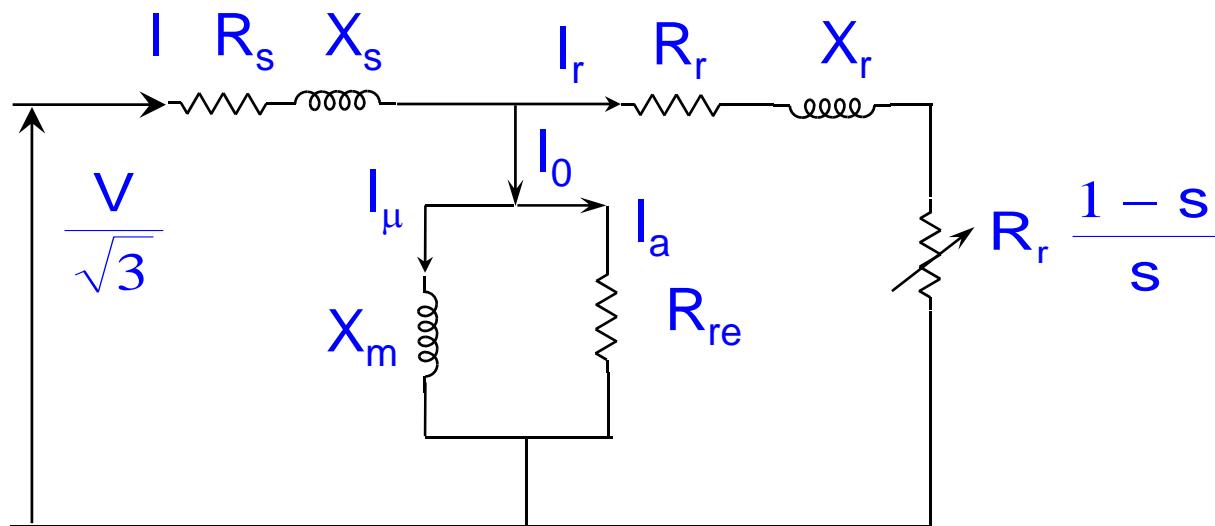
---

- La conoscenza dei parametri del circuito elettrico equivalente consente di dedurre tutte le curve caratteristiche del motore.
- Occorre tuttavia tenere conto degli effetti imputabili all'addensamento di corrente nelle barre rotoriche all'avviamento.
- Tale fatto determina un **aumento della resistenza rotorica** ed una **diminuzione della reattanza di dispersione rotorica**

# Circuito elettrico equivalente Y

---

- Circuito elettrico equivalente di una fase del motore trifase



- N.B. Tensioni e correnti sono rappresentate da numeri complessi

# Coppie e correnti

- Con le formule note si possono calcolare la coppia, la coppia massima, la coppia e la corrente all'avviamento

$$C = \frac{p R_r}{\omega s} \frac{V^2}{\left( R_s + \frac{R_r}{s} \right)^2 + (X_s + X_{dr})^2}$$

Espressione approssimata

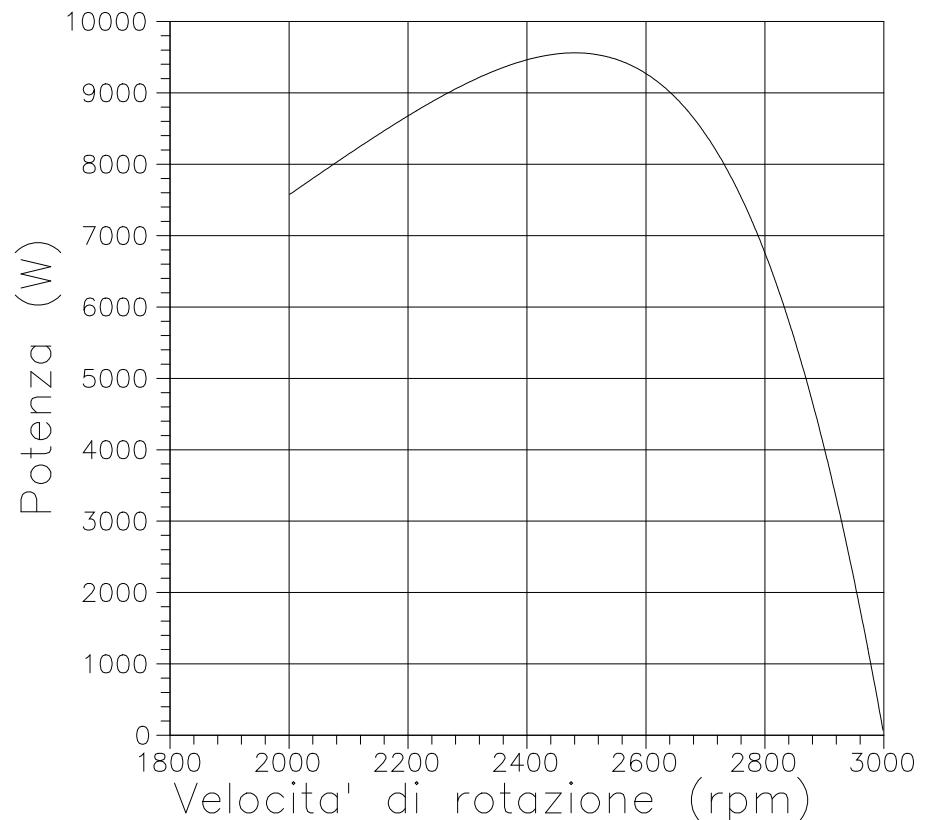
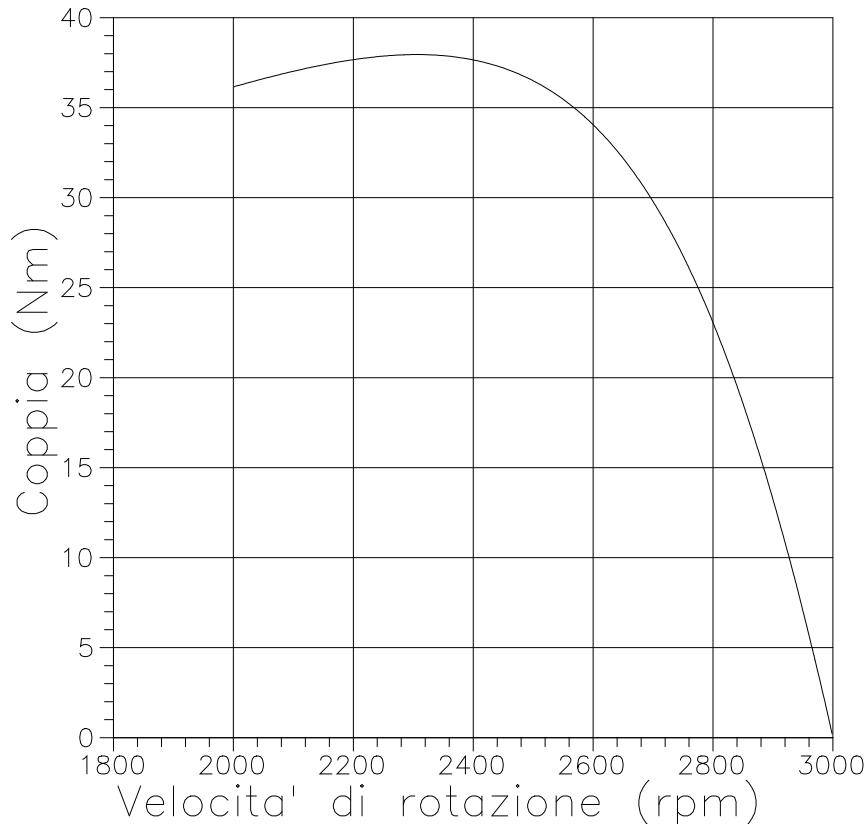
$$S_{C_{max}} = \pm \frac{R_r}{\sqrt{R_s^2 + (X_s + X_r)^2}} \quad C_{max} = \pm \frac{p}{\omega} \frac{V^2}{2 \left[ \sqrt{R_s^2 + (X_s + X_r)^2} \pm R_s \right]}$$

$$I_{Av} \approx \frac{V}{\sqrt{3} \sqrt{(R_s + R_{rAv})^2 + (X_s + X_{rAv})^2}}$$

$$C_{Av} = \frac{p}{\omega} R_{rAv} \frac{V^2}{(R_s + R_{rAv})^2 + (X_s + X_{rAv})^2}$$

# Impiego del circuito elettrico equivalente Y

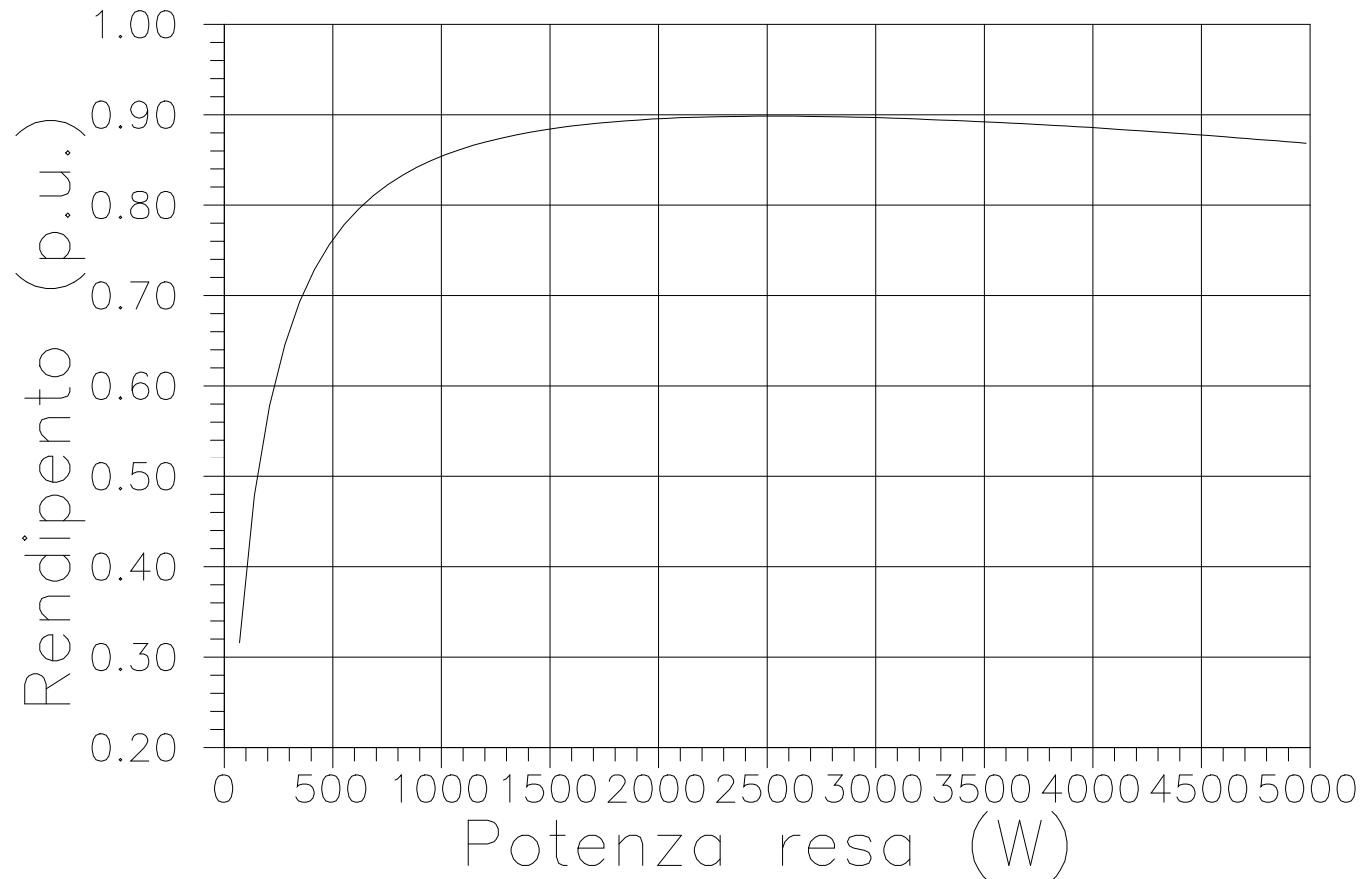
---



Esempio di curve caratteristiche del motore

# Impiego del circuito elettrico equivalente Y

---



Esempio di curve caratteristiche del motore

---

F i n e