



Dimensionamento di un motore asincrono

Lucia FROSINI

Dipartimento di Ingegneria Industriale e dell'Informazione
Università di Pavia
E-mail: lucia@unipv.it

1

L. Frosini

Dimensionamento di un motore asincrono

Le specifiche di progetto per un motore asincrono sono:

- 1) numero di fasi m
- 2) potenza nominale P_n [W] potenza meccanica resa all'albero
- 3) tensione nominale V_n [V] valore efficace della tensione di alimentazione, concatenata se polifase
- 4) frequenza di statore f_1 [Hz] frequenza di alimentazione
- 5) n° di poli p
- 6) velocità nominale n_n [giri/min] o scorrimento nominale s_n
- 7) collegamento delle fasi: stella o triangolo o entrambi possibili

Ad esempio, l'indicazione può essere: 230V Δ , 400V Y.

2

L. Frosini

Collegamento delle fasi

Se gli avvolgimenti del motore sono stati dimensionati per una tensione di 230 V, un motore avente la doppia tensione di esercizio potrebbe essere utilizzato nelle seguenti configurazioni:

- avvolgimenti con collegamento a triangolo alimentati a 230 V;
 - avvolgimenti con collegamento a stella alimentati a 400 V;
 - avvolgimenti con collegamento Y/ Δ con configurazione a Y all'avviamento ed a Δ in marcia normale, possibile quando il valore inferiore della tensione nominale del motore (in questo caso, 230 V) coincide con la tensione della rete di alimentazione.
- Un motore del tipo 230V Δ , 400V Y non può essere collegato a triangolo con 400 V di tensione concatenata.

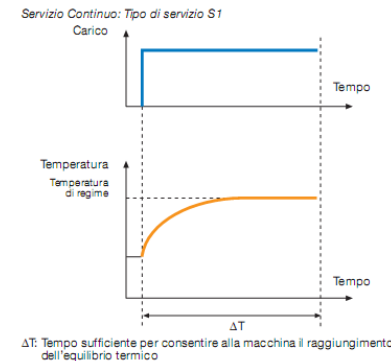
3

L. Frosini

Tipo di servizio

- 8) tipo di servizio, secondo la norma IEC 60034-1 (CEI 2-3): ad es. S1 = continuo, S2 = di durata limitata, S3 = intermittente periodico, ..., S6 = ininterrotto periodico con carico intermittente, ecc.

S1, servizio continuo:



Funzionamento a carico costante, di durata sufficiente a consentire alla macchina il raggiungimento dell'equilibrio termico.

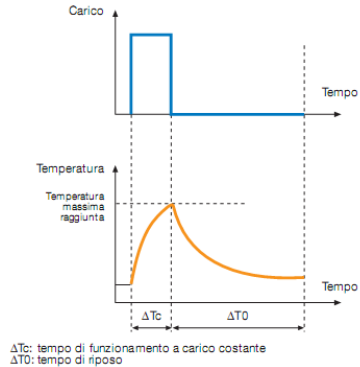
Se l'acquirente non specifica il tipo di servizio, il motore è da intendersi idoneo al tipo di servizio S1.

4

Tipo di servizio

S2, servizio di durata limitata:

Servizio di durata limitata : Tipo di servizio S2



Funzionamento a carico costante, per un periodo di tempo determinato, inferiore a quello richiesto per raggiungere l'equilibrio termico, seguito da un tempo di riposo di durata sufficiente a ristabilire l'uguaglianza tra la temperatura della macchina e quella del fluido di raffreddamento.

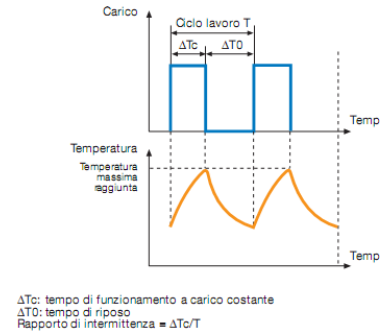
L'abbreviazione è S2 seguita dalla indicazione della durata del servizio, ad es. S2 60 min.

5

Tipo di servizio

S3, servizio intermittente periodico:

Servizio intermittente periodico : Tipo di servizio S3



Sequenza di cicli di funzionamento identici, ciascuno comprendente un tempo di funzionamento a carico costante e un tempo di riposo.

Il ciclo è tale che la corrente di avviamento non influenza la sovratemperatura in maniera significativa.

L'abbreviazione è S3 seguita dal rapporto di intermittenza, es. S3 25%

6

Tipo di servizio

S4, servizio intermittente periodico con avviamento:

Sequenza di cicli di funzionamento identici, ciascuno comprendente un tempo non trascurabile di avviamento, un tempo di funzionamento a carico costante e un tempo di riposo.

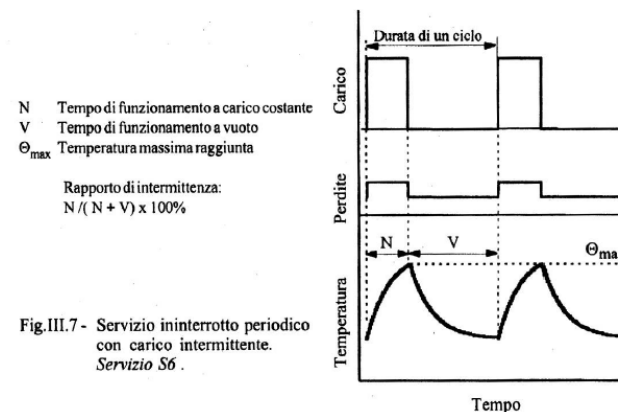
S5, servizio intermittente periodico con frenatura elettrica:

Sequenza di cicli di funzionamento identici, ciascuno comprendente un tempo di avviamento, un tempo di funzionamento a carico costante, un tempo di frenatura elettrica rapida e un tempo di riposo.

7

Tipo di servizio

S6, servizio ininterrotto periodico:



Sequenza di cicli di funzionamento identici, ciascuno comprendente un tempo di funzionamento a carico costante e un tempo di funzionamento a vuoto. Non esiste un tempo di riposo, perché la macchina è sempre alimentata.

L'abbreviazione è S6 seguita dal rapporto di intermittenza, es. S6 40%

8

Tipo di servizio

S7, servizio ininterrotto periodico con frenatura elettrica:

Sequenza di cicli di funzionamento identici, ciascuno comprendente un tempo di avviamento, un tempo di funzionamento a carico costante e un tempo di frenatura elettrica. Non esiste un tempo di riposo.

S8, servizio ininterrotto periodico con variazioni correlate di carico e velocità:

Sequenza di cicli di funzionamento identici, ciascuno comprendente un tempo di funzionamento a carico costante, corrispondente a una prestabilita velocità di rotazione, seguito da uno o più tempi di funzionamento con altri carichi costanti, corrispondenti a diverse velocità di rotazione. Non esiste un tempo di riposo.

Tipo di servizio

S9, servizio con variazioni non periodiche di carico e di velocità:

Servizio in cui generalmente il carico e la velocità variano in modo non periodico nel campo di funzionamento ammissibile. Questo servizio comprende sovraccarichi frequentemente applicati, che possono essere largamente superiori al valore di pieno carico.

S10, servizio con carichi distinti costanti:

Servizio che consiste in un numero specifico di valori distinti di carico e, se applicabile, di velocità; ciascuna combinazione di carico/velocità mantiene ogni valore per un tempo sufficiente per consentire alla macchina di raggiungere l'equilibrio termico.

Il carico minimo durante un ciclo di servizio può avere valore zero (a vuoto o in stato di riposo).

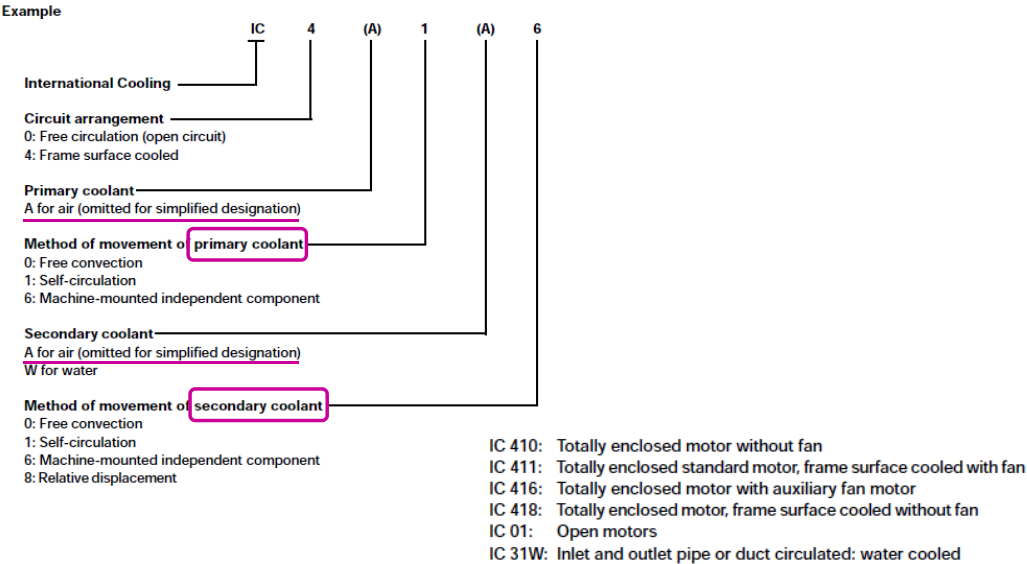
Raffreddamento di un motore asincrono

9) **raffreddamento**: per potenze medio-basse si hanno motori auto-ventilati (ventole calettate sull'albero); all'aumentare della potenza, il raffreddamento può essere ad aria forzata da ventilatori esterni o, per potenze maggiori, con scambiatori aria-aria o aria-acqua.

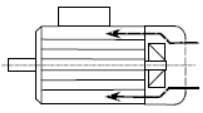

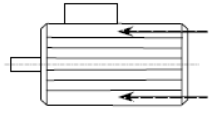
Il **metodo di raffreddamento** (IEC 60034-6, CEI 2-7) è classificato con una sigla che inizia con le lettere **IC** a cui seguono delle cifre ed eventualmente delle lettere, a seconda della disposizione del circuito di raffreddamento e del modo di circolazione dello stesso.

La sigla è più complessa se si utilizzano scambiatori di calore, per cui si hanno un fluido primario e un fluido secondario.

Esempi di codici IC



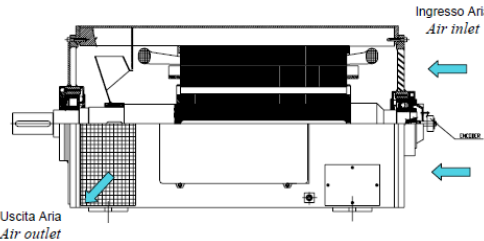
Esempi di codici IC

IC 411 Std	Motore autoventilato Macchina chiusa, alettata esternamente. Ventola esterna montata sull'albero del motore. Self ventilating motor. Enclosed machine. Externally finned. External shaft-mounted fan.	
IC 416 Su richiesta On request	Motore con ventilazione assistita. Macchina chiusa, alettata esternamente. Ventilatore indipendente montato sotto coprimentola. Motor with assisted ventilation. Enclosed machine. Externally finned. Independent external fan mounted inside the fan cover.	
IC 418 Su richiesta ¹⁾ On request	Motore con ventilazione esterna. Macchina chiusa, alettata esternamente. Raffreddamento assicurato da un dispositivo non montato sul motore. Motor with external ventilation. Enclosed machine. Externally finned. Ventilation provided by air flowing from the driven system.	

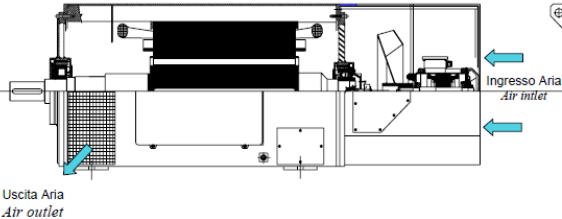
Esempi di codici IC e IP

GRADO DI PROTEZIONE Protection degrees	CODICE IC IC CODE	DESCRIZIONE Description
IP23 S	IC01	Motore Autoventilato con raffreddamento ad aria Self-ventilated by air
IP23S	IC06	Ventilazione indipendente ventilatore montato assialmente Independent cooling Independent external fan fixed axial of the motor
IP23S	IC06	Ventilazione indipendente ventilatore posto superiormente al motore Independent cooling Independent external fan fixet on the top of the motor
IP54 (IP55)	IC31	Autoventilato con bocche di ventilazione Self ventilated by ducts
IP54 (IP55)	IC37	Ventilazione indipendente con canali di ventilazione Independent cooling by ducts
IP54 (IP 55)	IC 01 61	Ventilazione indipendente con scambiatore aria-aria Independent cooling with air-air heat-exchanger
IP54 (IP 55)	IC W81	Ventilazione indipendente con scambiatore aria-acqua Independent cooling with air-water heat exchanger

Esempi di codici IC

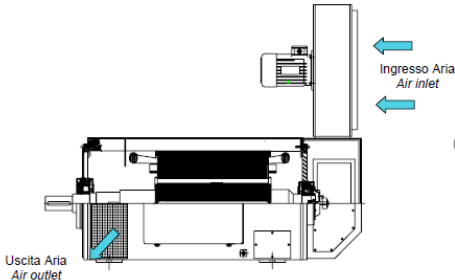


IC01
L'aria di raffreddamento, mediante una ventola calettata direttamente sull'albero del motore stesso, viene aspirata dal lato opposto accoppiamento ed espulsa da apposite griglie poste lateralmente in prossimità del lato accoppiamento.

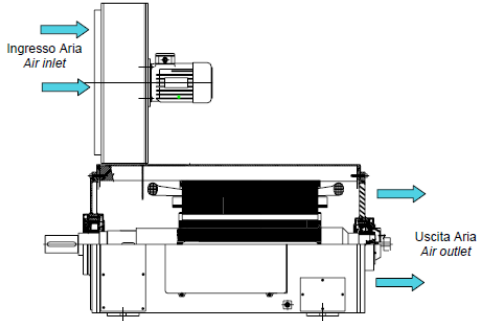


IC06
L'aria di raffreddamento, mediante una ventola azionata da un motore ausiliario, viene aspirata dal lato opposto accoppiamento ed espulsa da apposite griglie poste lateralmente in prossimità del lato accoppiamento.

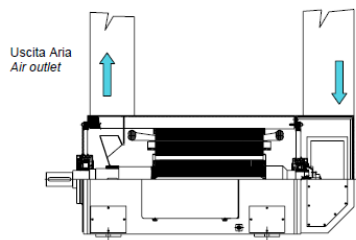
Esempi di codici IC



IC06
L'aria di raffreddamento, mediante un ventilatore radiale posto superiormente al motore, viene aspirata dal lato opposto accoppiamento ed espulsa da apposite griglie poste lateralmente in prossimità del lato accoppiamento.

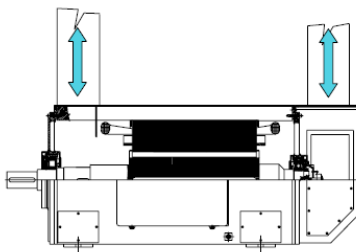


Esempi di codici IC



IC31

L'aria di raffreddamento, attraverso opportune canalizzazioni, viene aspirata da un locale esterno a quello in cui è installato il motore ed espulsa sempre all'esterno del locale. La circolazione dell'aria è determinata da una ventola posta all'interno del motore stesso. Tale soluzione è consentita solo nel caso in cui il circuito di ventilazione sia di lunghezza limitata.

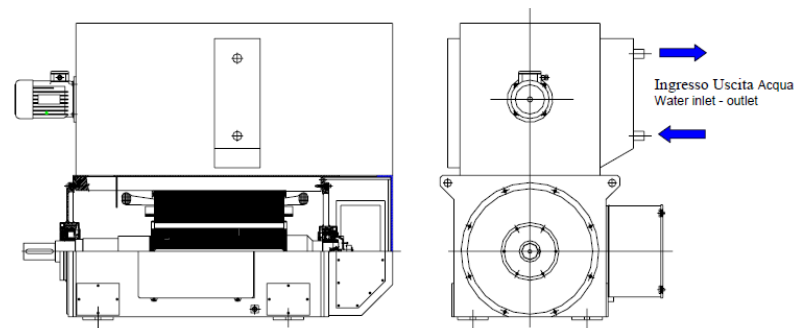


IC37

L'aria di raffreddamento, mediante una opportuna canalizzazione, viene aspirata all'esterno del locale in cui è posto il motore stesso e viene espulsa all'esterno del locale. La circolazione dell'aria è determinata da un opportuno ventilatore esterno al motore in grado di fornire la giusta portata d'aria al motore. Tale soluzione consente di avere anche canalizzazioni molto lunghe. L'ingresso dell'aria può avvenire sia dal lato accoppiamento che dal lato opposto.

17

Esempi di codici IC



IC W81

Motore raffreddato con **scambiatore aria-acqua** (con grado di protezione IP54).

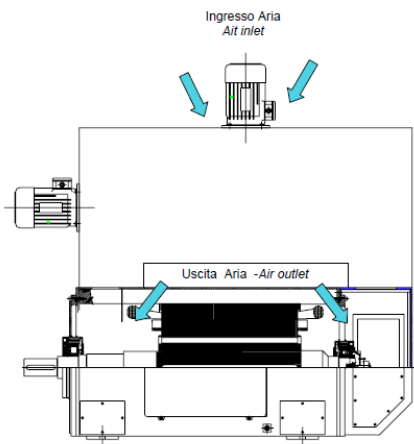
L'aria interna al motore è raffreddata mediante uno scambiatore aria-acqua posto sopra il motore.

Un apposito ventilatore centrifugo fa girare l'aria all'interno della macchina e dello scambiatore asportando il calore prodotto all'interno della macchina stessa.

L'ingresso-uscita dell'acqua di raffreddamento è posta lateralmente allo scambiatore.

18

Esempi di codici IC



IC 01 61

Motore raffreddato con **scambiatore aria-aria** (con grado di protezione IP54).

L'aria interna al motore è raffreddata mediante uno scambiatore aria-aria posto sopra il motore.

Un apposito ventilatore centrifugo fa girare l'aria all'interno della macchina e dello scambiatore asportando il calore prodotto all'interno della macchina stessa.

Un ulteriore ventilatore posto superiormente alla macchina aspira l'aria dall'ambiente, lo invia allo scambiatore e la espelle sulla parte inferiore.

19

Dimensionamento di un motore asincrono

- 10) **grado di protezione**: indicato con una sigla che inizia con le lettere **IP** a cui seguono due cifre: la prima definisce il grado di protezione delle persone contro i contatti con le parti in tensione o in movimento e il grado di protezione contro la penetrazione dei corpi solidi, la seconda il grado di protezione contro la penetrazione dannosa dell'acqua. Es.: **IP55** = protetto contro l'accesso a parti pericolose con un filo e contro la polvere, protetto contro i getti d'acqua.
- 10) **direzione dell'asse** durante il funzionamento: orizzontale o verticale (influenza la scelta del metodo di raffreddamento e dei cuscinetti).

20

Grado di protezione IP

Per **grado di protezione** si intende il livello di protezione di un involucro **contro l'accesso a parti pericolose**, **contro la penetrazione di corpi estranei solidi** e **contro l'ingresso di acqua** (CEI 70-1) e lo si codifica col codice IP, costituito da:

■ **1° cifra:** protezione dell'apparecchiatura contro la penetrazione di corpi solidi estranei e protezione delle persone contro l'accesso a parti pericolose;

■ **2° cifra:** protezione dell'apparecchiatura contro la penetrazione di acqua con effetti dannosi;

■ **Lettera addizionale** (opzionale): contro l'accesso a parti pericolose.

1^a CIFRA: protezione contro il contatto di corpi solidi esterni e contro l'accesso a parti pericolose

cifra	Protezione del materiale	protezione delle persone
0	Non protetto	
1	Protetto contro corpi solidi di dimensioni superiori a 50 mm.	Protetto contro l'accesso con il dorso della mano
2	Protetto contro corpi solidi di dimensioni superiori a 12 mm.	Protetto contro l'accesso con un dito
3	Protetto contro corpi solidi di dimensioni superiori a 2.5 mm.	Protetto contro l'accesso con un attrezzo
4	Protetto contro corpi solidi di dimensioni superiori a 1 mm.	Protetto contro l'accesso con un filo
5	Protetto contro la polvere e protetto contro l'accesso con un filo	
6	Totalmente protetto contro la polvere	protetto contro l'accesso con un filo

21

Grado di protezione IP

La 1° cifra va da 0 (non protetto) a 6 (totalmente protetto contro la polvere e contro l'accesso a parti pericolose con un filo).

La 2° cifra va da 0 (non protetto) a 8 (protetto contro la penetrazione di acqua in immersione continua).

2^a CIFRA: protezione contro la penetrazione dei liquidi

cifra	Protezione del materiale
0	Non protetto
1	Protetto contro la caduta verticale di gocce d'acqua
2	Protetto contro la caduta di gocce d'acqua con inclinazione max di 15°
3	Protetto contro la pioggia
4	Protetto contro gli spruzzi d'acqua
5	Protetto contro i getti d'acqua
6	Protetto contro le ondate
7	Protetto contro gli effetti dell'immersione
8	Protetto contro gli effetti della sommersione

Quando non sia richiesta una 1° e/o una 2° cifra caratteristica, questa deve essere sostituita da una X.

22

Grado di protezione IP

La **lettera addizionale** è usata solo:

➤ se la protezione effettiva contro l'accesso a parti pericolose è superiore a quella indicata dalla prima cifra;

➤ oppure se è indicata solo la protezione contro l'accesso a parti pericolose e la prima cifra viene quindi sostituita da una X.

Questa protezione superiore potrebbe essere fornita, per es., da barriere, da aperture di forma adeguata o da distanze interne all'involucro.

LETTERA aggiunta (Opzionale) (a)

lettera	protezione delle persone
A	protetto contro l'accesso con il dorso della mano
B	protetto contro l'accesso con un dito
C	protetto contro l'accesso con un attrezzo
D	protetto contro l'accesso con un filo

23

Grado di protezione IP

La lettera addizionale ha i seguenti significati:

lett.	Protezione delle persone	note
A	Protezione contro l'accesso a parti pericolose con il dorso della mano	Non devono poter penetrare parti del corpo umano, per esempio una mano, o corpi solidi di dimensioni superiori a 50 mm di diametro e deve essere mantenuta una adeguata distanza da parti pericolose.
B	Protezione contro l'accesso a parti pericolose con un dito	Non devono poter penetrare le dita od oggetti analoghi di lunghezza non eccedente gli 80 mm o corpi solidi di diametro superiore a 12 mm e deve essere mantenuta una adeguata distanza da parti pericolose.
C	Protezione contro l'accesso a parti pericolose con un attrezzo	Non devono poter penetrare fili di diametro o spessore superiore a 2.5 mm o corpi solidi di diametro superiore a 2.5 mm e deve essere mantenuta una adeguata distanza da parti pericolose.
D	Protezione contro l'accesso a parti pericolose con un filo	Non devono poter penetrare fili o piattine di diametro o spessore superiore a 1 mm o corpi solidi di diametro superiore a 1 mm e deve essere mantenuta una adeguata distanza da parti pericolose.

Un esempio di codice IP è IP55: protetto contro le polveri, contro l'accesso con un filo, contro i getti d'acqua.

Per apparecchiature all'aperto, senza altra protezione (es. tettoia), è prescritto un IP minimo IPX3 (la 2° cifra "3" indica la protezione dalla pioggia).

24

Dimensionamento di un motore asincrono

Sono specificati inoltre i seguenti parametri, da utilizzare come verifica del progetto:

- Rapporto tra coppia di spunto e coppia nominale C_{avv}/C_n
- Rapporto tra coppia massima e coppia nominale C_{max}/C_n
- Rendimento in condizioni nominali η_n
- Fattore di potenza in condizioni nominali $\cos\varphi$

Valori tipici del rapporto tra coppia massima e coppia nominale sono:

$$\frac{C_{max}}{C_n} = 1,6 \div 2,5$$

ma si può arrivare anche a: $\frac{C_{max}}{C_n} = 1,6 \div 4$ (per valori elevati può essere necessario il rotore avvolto con reostato di avviamento)

mentre il rapporto tra coppia di spunto e coppia nominale vale: $\frac{C_{avv}}{C_n} = 1 \div \frac{C_{max}}{C_n}$

Dimensionamento di un motore asincrono

Ricordiamo che la coppia nominale è definita come: $C_n = \frac{P_n}{\omega_m} \frac{[W]}{[rad/s]} = [N \cdot m]$

dove ω_m è la velocità angolare meccanica del rotore: $\omega_m = \frac{2\pi n_n}{60}$

n_n è la velocità nominale in [giri/min] : $n_n = n_0 (1 - s_n)$

n_0 è la velocità di sincronismo in [giri/min] : $n_0 = \frac{60 f_1}{p}$

s_n è lo scorrimento nominale: $s_n = \frac{n_0 - n_n}{n_0}$

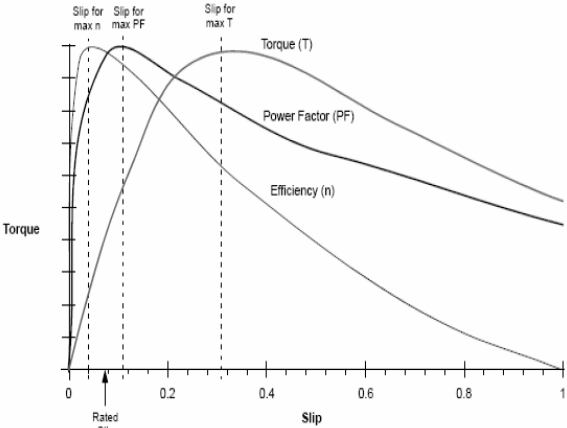
Scorrimento nominale

Valori tipici dello scorrimento nominale s_n sono (diminuisce all’aumentare della potenza nominale P_n):

P_n [kW]	s_n
0,5	0,07÷0,10
1	0,06÷0,08
5	0,04÷0,05
25	0,03÷0,04
100	0,02÷0,03
500	0,015÷0,018

Rendimento e fattore di potenza

Andamenti tipici di rendimento, fattore di potenza $\cos\varphi$ e coppia di motori asincroni trifase con tensione e frequenza di alimentazione costanti, al variare dello scorrimento:



Il fattore di potenza $\cos\varphi$ può variare tra 0,7 e 0,9, con valori più alti per un numero di poli p basso (motori più veloci).

Fattore di potenza

Si osserva che il fattore di potenza nei motori asincroni si riduce all'aumentare del numero di poli per i seguenti motivi.

A parità di altre condizioni (potenza, tensione, frequenza, induzione al traferro), per un numero di poli superiore (ad es. 4 rispetto a 2) il flusso magnetico attraversa il traferro più volte, ad es. il doppio nel caso si passi da 2 poli a 4.

Di conseguenza, a parità di flusso per polo, è richiesta una maggiore corrente magnetizzante perché è maggiore la riluttanza del percorso del flusso magnetico.

Ad un aumento della corrente magnetizzante (essenzialmente di tipo reattivo) corrisponde una diminuzione del fattore di potenza.

In realtà la questione è più complicata, perché la scelta progettuale prevede che, per un numero maggiore di poli, si scelga un valore di flusso inferiore (si vedano i grafici più avanti), tuttavia, complessivamente, all'aumentare del numero dei poli, aumenta la corrente magnetizzante e diminuisce il $\cos\varphi$.

29

Esempio di dimensionamento

Vogliamo dimensionare un motore asincrono avente le seguenti specifiche:

- 1) numero di fasi **$m = 3$**
- 2) potenza nominale **$P_n = 4 \text{ kW}$**
- 3) tensione nominale **$V_n = 400 \text{ V}$**
- 4) frequenza di statore **$f_1 = 50 \text{ Hz}$**
- 5) n° di poli **$p = 2$**
- 6) velocità nominale **$n_n = 2890 \text{ giri/min}$**
- 7) collegamento delle fasi **a stella**
- 8) tipo di servizio **continuo**

$$n_0 = \frac{60 f_1}{p_p} = \frac{60 \cdot 50}{1} = 3000 \text{ giri/min} \quad s_n = \frac{n_0 - n_n}{n_0} = \frac{3000 - 2890}{3000} \cong 0,037$$

30

Esempio di dimensionamento

Sono specificati inoltre i seguenti parametri, da utilizzare come verifica del progetto:

- Rapporto tra coppia di spunto e coppia nominale **$C_{avv}/C_n = 2,6$**
- Rapporto tra coppia massima e coppia nominale **$C_{max}/C_n = 3$**
- Rendimento in condizioni nominali **$\eta = 85\%$**
- Fattore di potenza in condizioni nominali **$\cos\varphi = 0,87$**

31

Dimensionamento preliminare

Per il dimensionamento preliminare esistono diversi approcci, che utilizzano formule, coefficienti e diagrammi empirici.

Per determinare le dimensioni principali (diametro interno di statore D e lunghezza lato attivo L) occorre prima di tutto individuare un valore preliminare del **flusso per polo Φ** .

È possibile utilizzare diagrammi empirici che forniscono il valore di Φ in funzione della potenza nominale P_n e del numero di poli p .

Questi diagrammi valgono per: **$C_{avv}/C_n \cong 1$** **$C_{max}/C_n \cong 2$**

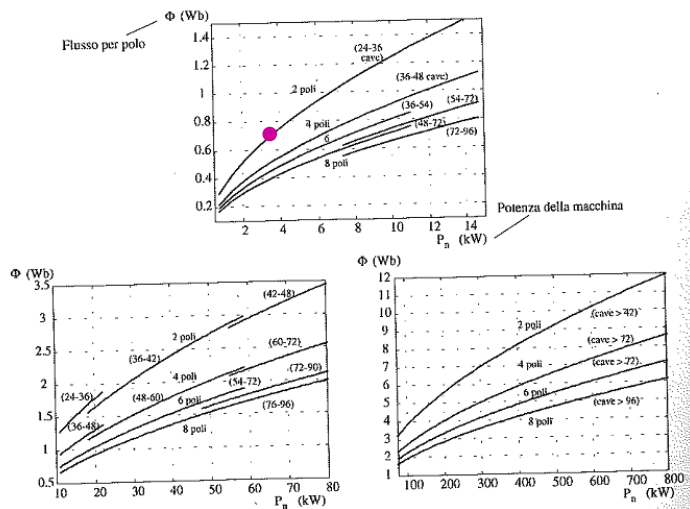
Per valori di **$C_{max}/C_n \neq 2$** , occorre aggiustare il valore di Φ trovato sui diagrammi, tenendo conto che:

$$C_{max} \propto \Phi^2 \Rightarrow \Phi \propto \sqrt{C_{max}}$$

Se per es.: **$C_{max}/C_n = 3$** \Rightarrow il valore di Φ trovato sui diagrammi va moltiplicato per un fattore $\sqrt{3/2}$

32

Dimensionamento preliminare



Nota: in questi diagrammi il flusso è da moltiplicare per 10^{-2} .

33

Dimensionamento preliminare

Nel nostro caso, sul diagramma troviamo: $\Phi \approx 0,75 \cdot 10^{-2} \text{ Wb}$

Il valore corretto è:

$$\Phi \approx 0,75 \cdot 10^{-2} \cdot \sqrt{3/2} \approx 0,92 \cdot 10^{-2} \text{ Wb}$$

Quindi si fissa un valore dell'induzione massima al traferro $B_{MAX \text{ traferro}}$:

$$B_{MAX \text{ traferro}} = 0,5 \div 0,9 \text{ [T]}$$

che è mediamente inferiore a quella delle macchine sincrone.

Il valore di $B_{MAX \text{ traferro}}$ può essere messo in relazione con il flusso per polo Φ , attraverso i seguenti passaggi. Il valore medio B_m dell'induzione all'interno di un passo polare τ è dato da:

$$B_m = \frac{\Phi}{L \cdot \tau} \quad \text{con:} \quad \tau = \frac{\pi D}{p}$$

34

Dimensionamento preliminare

Ipotizzando una distribuzione di B al traferro sinusoidale,

$$B_{eff} = \frac{B_{MAX}}{\sqrt{2}} \quad \rightarrow \quad B_m = B_{eff} \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \quad \rightarrow \quad B_m = B_{MAX} \frac{2}{\pi}$$

$$B_{MAX \text{ traferro}} = B_m \frac{\pi}{2} = \frac{\Phi}{L \cdot \tau} \cdot \frac{\pi}{2} = \frac{\Phi \cdot p}{L \cdot \pi D} \cdot \frac{\pi}{2} = \frac{\Phi \cdot p_p}{L \cdot D}$$

$$\Phi = B_{MAX \text{ traferro}} \frac{LD}{p_p} \quad \text{(espressione già vista, ma non ancora dimostrata, in una precedente dispensa)}$$

35

Dimensionamento preliminare

Per la scelta del **rapporto L/D** (L = lunghezza nucleo di statore, D = diametro interno statore) si può usare una tabella che fornisce i valori minimi e massimi di questo rapporto in funzione del numero di poli:

n° poli p	L/D
2	0,80÷1,60
4	0,55÷1,20
6	0,50÷0,95
8	0,45÷0,80

In generale, all'aumentare del numero dei poli, diminuisce il rapporto L/D , perché il diametro deve aumentare per permettere la distribuzione dell'avvolgimento con più polarità.

A parità di numero di poli, valori più bassi del **rapporto L/D** corrispondono ad un miglior raffreddamento della macchina, ad un più semplice dimensionamento del rotore, ma ad un costo generalmente superiore.

Nel nostro caso possiamo scegliere, per es., $L/D = 1$ e $B_{MAX \text{ traferro}} = 0,7 \text{ T}$.

36

Dimensionamento preliminare

Possiamo a questo punto ricavare i valori di **D**, **L** e del **passo polare τ** .

$$\left\{ \begin{array}{l} \Phi = 0,92 \cdot 10^{-2} \text{ Wb} \\ B_{MAX_{traferro}} = 0,7 \text{ T} \\ L/D = 1 \rightarrow L = D \\ \Phi = B_{MAX_{traferro}} \frac{LD}{p_p} \rightarrow 0,92 \cdot 10^{-2} = 0,7 \frac{L^2}{1} \end{array} \right.$$

$$L = \sqrt{\frac{0,92 \cdot 10^{-2}}{0,7}} = 0,115 \text{ m} = 115 \text{ mm} \quad D = L = 115 \text{ mm}$$

$$\tau = \frac{\pi D}{p} = \frac{\pi \cdot 115}{2} = 180 \text{ mm}$$

37

Dimensionamento dello statore

Se l'avvolgimento è collegato a triangolo, la tensione di fase è uguale alla tensione concatenata (ai morsetti).

Però, la **f.e.m. E_1** non è uguale alla tensione di fase, perché si deve tener conto della caduta di tensione nell'avvolgimento di statore.

In genere si assume: $E = 0,95V_n$ se l'avvolgimento è collegato a triangolo;

$$E = 0,95 \frac{V_n}{\sqrt{3}} \quad \text{se l'avvolgimento è collegato a stella.}$$

Più precisamente, se l'avvolgimento è collegato a triangolo:

	2 poli	4 poli	6 poli	8 poli
E/V _n	0,97	0,97	0,96	0,95

38

Dimensionamento dello statore

Nel nostro caso, abbiamo le fasi dell'avvolgimento di statore collegate a stella.

La **f.e.m. E_1** vale quindi:

$$E_1 = 0,97 \cdot \frac{V_n}{\sqrt{3}} = 0,97 \cdot \frac{400}{\sqrt{3}} = 0,97 \cdot 230 \cong 223 \text{ V}$$

Il **numero di conduttori in serie per fase N_1** si ricava da:

$$E_1 = 2k_f f_{a1} N_1 f \Phi \Rightarrow N_1 = \frac{E_1}{2k_f f_{a1} f \Phi}$$

Poiché il **fattore di forma $k_f \cong 1,11$** e il **fattore di avvolgimento f_{a1}** è in generale di poco inferiore a 1, in prima approssimazione si può considerare **$k_f f_{a1} \cong 1$** , per cui:

$$N_1 \cong \frac{E_1}{2 f \Phi} = \frac{223}{2 \cdot 50 \cdot 0,92 \cdot 10^{-2}} \cong 243 \quad (\text{ipotizzando il fattore di passo } f_{p1} = 1)$$

39

Potenza e corrente assorbita

Una volta calcolato il **numero di conduttori per fase N_1** è possibile verificare la **densità lineare di corrente A** sulla circonferenza del traferro, detta anche “carico elettrico” del motore, che rappresenta la somma dei valori efficaci delle correnti nei conduttori di statore per unità di lunghezza della circonferenza misurata al traferro.

Prima si calcola la **potenza assorbita** a carico nominale:

$$P_{ass} = \frac{P_n}{\eta_n} = \frac{4000}{0,85} \cong 4706 \text{ W}$$

La **corrente assorbita (di linea)** a carico nominale è data da:

$$I = \frac{P_n}{\sqrt{3} \cdot V_n \cdot \eta \cdot \cos \varphi} = \frac{4000}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 0,85 \cdot 0,87} \cong 7,81 \text{ A}$$

40

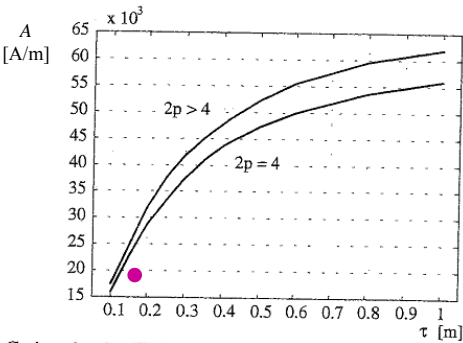
Densità lineare di corrente

La **densità lineare di corrente A** è data da:

A = m \frac{N_1 I}{\pi D} \Rightarrow A = 3 \frac{243 \cdot 7,81}{\pi \cdot 0,115} \cong 15795 \frac{A}{m}

Per la verifica, si utilizzano gli stessi diagrammi empirici che forniscono i limiti superiori della **densità lineare di corrente A** in funzione del **passo polare \tau** e del **numero di poli p** per le macchine sincrone, tenendo conto che le macchine asincrone possono sopportare un carico elettrico superiore di 1,5÷2 volte rispetto a quello delle macchine sincrone.

In questo caso, il limite è abbondantemente rispettato.



Scelta del numero di cave di statore

La scelta del **numero di cave Q_1** dipende dal **passo di dentatura p_{d1}**, che può valere:

p_{d1} = 20 \div 40 [mm]

con valori crescenti al crescere della potenza della macchina.

In realtà, per motori di piccola potenza (qualche kW), il passo di dentatura può essere anche pari a 10÷15 mm.

Il **numero di cave di statore Q_1** (che deve essere un numero intero) è dato da:

Q_1 = \frac{\pi D}{p_{d1}}

Una volta calcolato il **numero di cave di statore Q_1**, bisogna verificare che anche il **numero di cave per polo e per fase q_1** sia un numero intero (a meno di non voler realizzare un avvolgimento a cave frazionarie):

q_1 = \frac{Q_1}{mp} \xrightarrow{\text{trifase}} q_1 = \frac{Q_1}{3p}

Scelta del numero di cave di statore

Nel nostro caso, se scegliamo: **p_{d1} = 30 [mm]**

otteniamo:

Q_1 = \frac{\pi D}{p_{d1}} = \frac{\pi \cdot 0,115}{0,03} \cong 12 \rightarrow q_1 = \frac{Q_1}{3p} = \frac{12}{3 \cdot 2} = 2

Tuttavia, dobbiamo tener conto anche del fatto che, per i motori asincroni, esistono dei valori ottimali per la scelta del numero di cave di statore e di rotore.

Infatti, all'aumentare di q_1, diminuisce la reattanza di dispersione (c'è meno ferro) e migliora la dissipazione del calore, ma diminuisce la larghezza dei denti (che possono diventare troppo stretti) e aumenta il costo.

In particolare, per un motore asincrono trifase a 2 poli, generalmente si sceglie:

Q_1 = 18 - 24 - 36

cui corrisponde: **q_1 = 3 - 4 - 6**

Scelta del numero di cave di statore

Esistono varie teorie per determinare il numero ottimale di cave di statore e il corrispondente numero di cave di rotore.

Noi faremo riferimento alla seguente tabella:

Numero di poli	Cave di statore Q_1	Cave di rotore Q_2
2	18	25 - 26
	24	16 - 28 - 30 - 32
	36	24 - 30 - 42 - 46
4	24	18 - 30 - 34
	36	26 - 30 - 42 - 46
	48	30 - 40 - 58 - 62
6	36	26 - 28 - 46
	54	38 - 40 - 64 - 68 - 70
	72	52 - 56 - 58 - 92 - 94
8	48	34 - 36 - 38 - 60
	72	54 - 58 - 86 - 90 - 96

Scelta del numero di cave di statore

Scegliamo quindi:

$$Q_1 = 18 \quad \Rightarrow \quad q_1 = \frac{Q_1}{3p} = \frac{18}{3 \cdot 2} = 3$$

cui corrisponde un passo di dentatura:

$$p_{d1} = \frac{\pi D}{Q_1} = \frac{\pi \cdot 0,115}{18} \cong 0,0207 \text{ m} \rightarrow \text{OK!}$$

Infine, deve essere un numero intero anche il **numero di conduttori per cava (di statore) n_c** :

$$n_c = \frac{mN_1}{Q_1} = \frac{3 \cdot 243}{18} = 40,5$$

Se si prevede un avvolgimento in doppio strato (specie se si intende impiegare il passo raccorciato) il **numero di conduttori per cava n_c** deve essere pari.

45

Numero di conduttori per cava di statore

Perciò possiamo scegliere:

$$n_c = 40 \quad \Rightarrow \quad N_1 = \frac{n_c \cdot Q_1}{m} = \frac{40 \cdot 18}{3} = 240$$

Calcoliamo il fattore di distribuzione: $\theta = p_p \theta_m = p_p \frac{360^\circ}{Q_1} = \frac{360^\circ}{18} = 20^\circ$

$$f_{d1} = \frac{\sin\left(\frac{q_1 \theta}{2}\right)}{q_1 \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)} = \frac{\sin\left(\frac{3 \cdot 20^\circ}{2}\right)}{3 \sin\left(\frac{20^\circ}{2}\right)} \cong \frac{0,5}{3 \cdot 0,173} \cong \frac{0,5}{0,52} \cong 0,96$$

Il fattore di passo andrebbe scelto in modo da ridurre la 5° e/o la 7° armonica, scegliendo un angolo elettrico di raccorciamento intermedio tra 26° e 36°.

Il vincolo è dato dal fatto che questo angolo può essere solo un multiplo di θ .

46

Fattore di avvolgimento

Possiamo scegliere quindi un angolo di raccorciamento di 20° o di 40°, che equivalgono rispettivamente alla riduzione di 1 cava o di 2 cave.

$$0 \leq n_{r1} \leq q_1 \quad \text{riduzione di passo espressa in numero cave}$$

$$n_{r1} = 1 \quad \Rightarrow \quad f_{p1} = \cos\left(n_{r1} \frac{\theta}{2}\right) = \cos\left(1 \cdot \frac{20^\circ}{2}\right) \cong 0,985$$

$$\text{Fattore di avvolgimento: } f_{a1} = f_{d1} f_{p1} = 0,96 \cdot 0,985 = 0,945$$

$$k_f f_{a1} = 1,11 \cdot 0,945 \cong 1,05$$

Rivediamo quindi il valore del flusso per polo:

$$\Phi = \frac{E_1}{2k_f f_{a1} N_1 f} \cong \frac{223}{2 \cdot 1,05 \cdot 240 \cdot 50} \cong 0,89 \cdot 10^{-2} \text{ Wb} \rightarrow \text{OK!}$$

47

Sezione dei conduttori di statore

Per valutare la sezione indicativa dei conduttori di statore, si fissa un valore della **densità di corrente**:

$$J_1 = 5 \div 6 \frac{\text{A}}{\text{mm}^2} \quad \Rightarrow \quad \text{fissiamo: } J_1 = 5,5 \frac{\text{A}}{\text{mm}^2}$$

Ricaviamo quindi la **sezione indicativa dei conduttori di statore**:

$$S_{cond.stat. nudo} = \frac{I}{J} = \frac{7,81}{5,5} \cong 1,42 \text{ mm}^2$$

Questa è la sezione della parte in rame di ciascun conduttore di statore (conduttore nudo), considerando tutti i conduttori di statore collegati in serie.

Il valore calcolato della sezione del conduttore potrebbe essere troppo elevato, perché nei motori asincroni si usano normalmente cave semichiusate (tranne che per i motori di grossa potenza e a tensione elevata) per avere un basso valore del fattore di Carter.

48

Coefficiente di Carter

Analogamente a quanto osservato per la macchina a collettore, anche nel motore asincrono la presenza delle cave di statore e di rotore produce una riduzione locale dell'induzione al traferro e quindi un aumento della riluttanza del circuito magnetico della macchina rispetto al valore che si avrebbe se le superfici di statore e rotore fossero lisce.

Nei calcoli magnetici, questo effetto viene cumulativamente tenuto in conto attraverso un coefficiente moltiplicativo, maggiore di uno, da applicare alla lunghezza geometrica di traferro (Coefficiente di Carter):

$$k_c = k_{c1} \cdot k_{c2}$$

Per lo statore si ha:

$$k_{c1} = \frac{p_{d1}(5\delta + w_{c1base})}{p_{d1}(5\delta + w_{c1base}) - w_{c1base}^2}$$

49

Coefficiente di Carter

Analogamente, per il rotore si ha:

$$k_{c2} = \frac{p_{d2}(5\delta + w_{c2base})}{p_{d2}(5\delta + w_{c2base}) - w_{c2base}^2}$$

dove:

p_d = passo di dentatura (di statore o di rotore)

δ = traferro

w_{cbase} = apertura della cava alla base (di statore o di rotore)

Si osserva che il coefficiente di Carter k_c aumenta all'aumentare dell'apertura delle cave e diminuisce all'aumentare del traferro.

Nel caso, piuttosto frequente, di cave di rotore chiuse, si ha:

$$w_{c2base} = 0 \quad k_{c2} = 1$$

50

Sezione dei conduttori di statore

I conduttori devono quindi essere di sezione ridotta, per poter essere inseriti agevolmente nelle cave.

Per avere conduttori di sezione ridotta, si può operare in due modi:

1. con i **paralleli di macchina** (solo nel caso in cui la corrente sia troppo elevata): in questo caso i conduttori sono di sezione ridotta perché attraversati da una corrente ridotta I/n_{pm} , dove n_{pm} è il numero di paralleli di macchina;
2. Con i **paralleli di cava**: ciascun conduttore si suddivide in un numero di conduttori di sezione ridotta (fili) che sono collegati in parallelo tra loro. Il numero di paralleli di cava si indica con n_{pc} .

Ovviamente, non cambia nulla riguardo il flusso e la f.e.m della macchina.

Il numero di conduttori effettivi per ciascuna cava di statore risulta:

$$n_{c_{eff}} = n_c \cdot n_{pm} \cdot n_{pc}$$

51

Area e forma delle cave di statore

Nel nostro caso, la sezione indicativa dei conduttori di statore calcolata potrebbe essere sufficientemente ridotta per evitare paralleli di cava.

A partire dalla sezione indicativa, possiamo ricavare il diametro indicativo del conduttore nudo:

$$d_{cond .stat .nudo} = 2\sqrt{\frac{S_{cond .stat .nudo}}{\pi}} = 2\sqrt{\frac{1,42}{\pi}} \cong 1,34 \text{ mm}$$

La sezione effettiva del conduttore si trova scegliendo tra i conduttori in commercio quello che si avvicina maggiormente alla sezione calcolata. Si valuta quindi anche il diametro del conduttore isolato.

Nel nostro caso, potrebbe essere: $d_{cond .stat .nudo} = 1,32 \text{ mm}$

$$\rightarrow S_{cond .stat .nudo} = \pi \left(\frac{d_{cond .stat .nudo}}{2} \right)^2 = \pi \left(\frac{1,32}{2} \right)^2 \cong 1,37 \text{ mm}^2$$

52

Area e forma delle cave di statore

$$\rightarrow J_1 = \frac{I}{S_{cond.stat.nudo}} = \frac{7,81}{1,37} \cong 5,71 \frac{A}{mm^2} \rightarrow OK!$$

Se dovessimo valutare che il diametro trovato per ciascun conduttore è troppo elevato, potremmo decidere di realizzare dei **paralleli di cava**, per esempio:

$$n_{pc}=2 \rightarrow n_{ceff} = 2n_c = 80$$

Il diametro di ciascun conduttore nudo risulterebbe quindi:

$$d_{cond.stat.nudo} = 2\sqrt{\frac{0,5 \cdot S_{cond.stat.nudo}}{\pi}} = 2\sqrt{\frac{0,5 \cdot 1,42}{\pi}} \cong 0,95 \text{ mm}$$

$$\rightarrow d_{cond.stat.nudo} = 0,95 \text{ mm} \rightarrow d_{cond.stat.smaltato} \cong 1,05 \text{ mm}$$

Nel seguito consideriamo la prima scelta, ossia nessun parallelo di cava.

53

Area e forma delle cave di statore

L'**area della cava** di statore è data da:

$$S_{cava.stat.} = S_{cond.stat.nudo} \cdot \frac{n_c}{k_r}$$

valori crescenti all'aumentare del diametro del conduttore

dove k_r è un **fattore di riempimento della cava** che tiene conto dell'isolamento e della bietta di chiusura della cava (se presente):

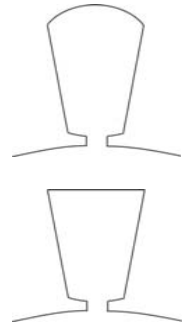
$$k_r = 0,4 \div 0,5$$



$$S_{cava.stat.} = 1,42 \cdot \frac{40}{0,4} = 142 \text{ mm}^2$$

La forma delle cave di statore è in genere di tipo trapezoidale, con denti rettangolari:

- a fondo semicircolare (maggior facilità nella sistemazione dei conduttori),
- a fondo piatto (migliore utilizzazione dello spazio).



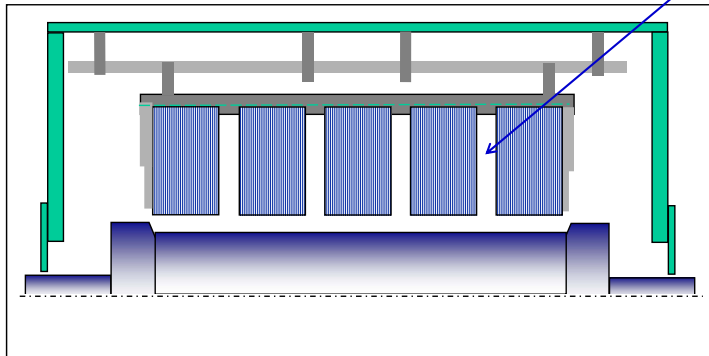
54

Lunghezza del ferro di statore

Il ferro di statore è formato da pacchi di lamierini in Ferro-Silicio (ciascun lamierino ha spessore $0,5 \div 0,65$ mm) isolati tra loro, per es. con vernice.

Inoltre, per il raffreddamento della macchina, il ferro di statore viene suddiviso in pacchi, separati tra loro da canali di raffreddamento.

canali di ventilazione



55

Lunghezza del ferro di statore

La **lunghezza del ferro di statore** L_f è data da:

$$L_f = k_{stip} \cdot (L - n_{canali} \cdot s_{canali})$$

N.B.: questa è una formula semplificata; per una migliore valutazione di L_f occorrerebbe tener conto anche delle linee di flusso che si sviluppano attraverso i canali di ventilazione.

dove:

- k_{stip} = coefficiente di stipamento dei lamierini $\cong 0,95$ (dovuto al loro isolamento);
- n_{canali} = numero di canali di ventilazione, uno ogni $80 \div 120$ mm di lamierini;
- s_{canali} = spessore dei canali di ventilazione $\cong 10$ mm.

Nel nostro caso, essendo $L = 115$ mm, possiamo non mettere nessun canale di ventilazione, perciò la lunghezza del ferro risulta:

$$L_f = L \cdot k_{stip} = 115 \cdot 0,95 = 109,25 \text{ mm}$$

56

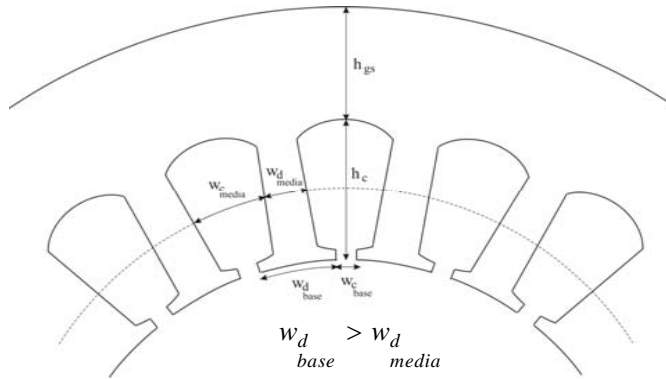
Larghezza dei denti di statore

La **larghezza media del dente** w_{dmedia} si ricava, dopo aver fissato un valore per l'**induzione massima nei denti**, supponendo che tutto il flusso utile al traferro entri nel ferro dei denti statorici (ipotesi valida fino a che $B_{MAXdente} < 2 \text{ T}$):

$$B_{MAXdente} = 1,5 \div 2 \text{ [T]}$$

$$B_{MAXtraferro} \cdot p_d \cdot L = B_{MAXdente} \cdot w_{dmedia} \cdot L_f$$

$$p_d > w_d \quad L > L_f \Rightarrow B_{MAXtraferro} < B_{MAXdente}$$



$$w_{dmedia} = \frac{B_{MAXtraferro} \cdot p_d \cdot L}{B_{MAXdente} \cdot L_f}$$

57

Larghezza e altezza di denti e cave di statore

Possiamo fissare: $B_{MAXdente} = 1,7 \text{ T}$

$$w_{dmedia} = \frac{B_{MAXtraferro} \cdot p_d \cdot L}{B_{MAXdente} \cdot L_f} = \frac{0,7 \cdot 0,0207 \cdot 0,115}{1,7 \cdot 0,10925} \cong 8,7 \text{ mm}$$

$$w_{cmedia} = p_d - w_{dmedia} \cong 20,07 - 8,7 = 11,37 \text{ mm} \quad \text{larghezza media cava}$$

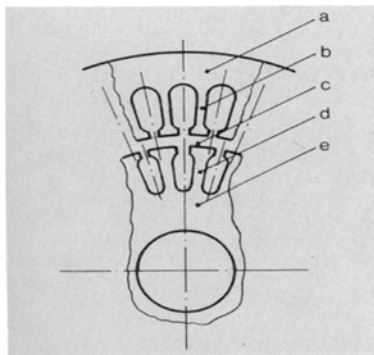
È possibile a questo punto ricavare le dimensioni della cava affinché soddisfi l'area richiesta (tralasciamo la formula, piuttosto complessa, essendo la cava di larghezza variabile).

Ricordiamo solo che, mediamente, l'**altezza della cava**, che è uguale all'**altezza del dente**, è circa 2÷3 volte la **larghezza media della cava**.

Si può quindi stimare in questo caso: $h_c = h_d = 23 \text{ mm}$

58

Larghezza e altezza di denti e cave di statore



- a) Corona (o giogo) di statore
- b) Denti di statore
- c) Traferro
- d) Denti di rotore
- e) Corona di rotore

Si noti infine che la **larghezza alla base della cava (apertura della cava)** è molto minore della sua larghezza media:

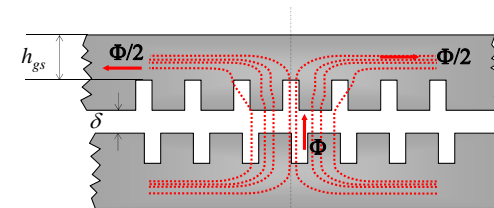
$$w_{cbase} = 1,5 \div 3,5 \text{ mm}$$

L'apertura della cava deve essere comunque maggiore del diametro del conduttore isolato che dovrà essere introdotto nella cava.

Nel nostro caso, sia che si scelga di effettuare paralleli di cava o meno, l'apertura della cava risulta comunque sufficiente per l'introduzione del conduttore isolato.

59

Corona (o giogo) di statore



La corona (o giogo) di statore è interessata a metà del flusso per polo:

$$\Phi_{gs} = \frac{\Phi}{2} = B_{MAXgs} \cdot h_{gs} \cdot L_f$$

L'altezza della corona di statore si trova fissando un valore dell'induzione massima nella corona:

$$B_{MAXgs} = 1,5 \div 1,6 \text{ [T]}$$

Fissando per esempio:

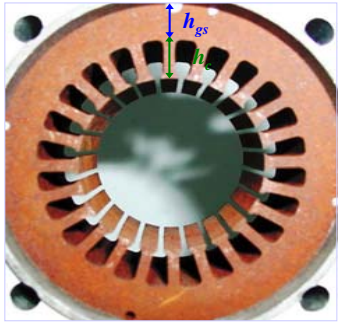
$$B_{MAXgs} = 1,5 \text{ [T]}$$

$$\text{Si ha: } h_{gs} = \frac{\Phi}{2 \cdot B_{MAXgs} \cdot L_f} = \frac{0,89 \cdot 10^{-2}}{2 \cdot 1,5 \cdot 0,10925} \cong 0,0271 \text{ m}$$

Scegliamo: $h_{gs} = 28 \text{ mm}$

60

Diametro esterno di statore e traferro



Il **diametro esterno di statore** è quindi dato da:

$$D_{est.stat.} = D + 2(h_c + h_{gs}) = 115 + 2(23 + 28) = 217 \text{ mm}$$

Per il calcolo dell'ampiezza del **traferro** δ si può usare la seguente formula:

$$\delta = 0,0055 \cdot \frac{D}{\sqrt{p}} = 0,0055 \cdot \frac{115}{\sqrt{2}} \cong 0,45 \text{ mm}$$

L'ampiezza del **traferro** δ può variare da 0,35 mm per piccole potenze fino a 2÷3 mm per potenze elevate.

Più il traferro è piccolo, minore è la corrente necessaria per sviluppare la stessa coppia all'albero, però aumenta il rischio di contatto tra statore e rotore nel caso si crei un'eccentricità del rotore rispetto allo statore.

61

Dimensionamento del rotore

Nel nostro caso, essendo il motore di potenza $P_n = 4 \text{ kW}$, sceglieremo un rotore a gabbia semplice, di tipo pressofuso.

Per la scelta del numero delle cave di rotore, facendo riferimento alla tabella dei valori ottimali, potremo scegliere $Q_2 = 25$ oppure $Q_2 = 26$, poiché abbiamo scelto $Q_1 = 18$ e $p = 2$. Scegliamo $Q_2 = 26$.

Per calcolare la **f.e.m. per sbarra** di rotore, consideriamo che, per lo statore la f.e.m. per fase è data da:

$$E_1 = 2k_f f_{a1} N_1 f \Phi \quad \text{con } N_1 = \text{numero di conduttori di statore in serie per fase}$$

Analogamente, per il rotore (fermo) la f.e.m. per fase è data da:

$$E_{20} = 2k_f f_{a2} N_2 f \Phi \quad \text{con } N_2 = \text{numero di conduttori di rotore in serie per fase}$$



$$\frac{E_1}{E_{20}} = \frac{2k_f f_{a1} N_1 f \Phi}{2k_f f_{a2} N_2 f \Phi} = \frac{f_{a1} N_1}{f_{a2} N_2}$$

62

F.e.m. per sbarra di rotore

Ricordiamo cosa si intende per **numero di fasi del rotore** nel caso di rotore a gabbia.

Convenzionalmente si assume:

$$m_2 = \frac{Q_2}{p_p}$$

Di conseguenza, il **numero di conduttori di rotore per fase** è:

$$N_2 = \frac{Q_2}{m_2} = p_p$$

(una fase è costituita da N_2 conduttori)

Definita E_b la **f.e.m. per sbarra** di rotore, la f.e.m. per fase di rotore è:

$$E_{20} = f_{a2} N_2 E_b = N_2 E_b \quad \text{con } f_{a2} = \text{fattore di avvolgimento di rotore (= 1 per i rotori a gabbia)}$$

$$\frac{E_1}{E_{20}} = \frac{f_{a1} N_1}{f_{a2} N_2} \Rightarrow E_b = \frac{E_{20}}{N_2} = \frac{E_1}{f_{a1} N_1}$$

63

F.e.m. per sbarra di rotore

Nel nostro caso, la **f.e.m. per sbarra** di rotore risulta:

$$E_b = \frac{E_1}{f_{a1} N_1} = \frac{0,97 \cdot 230}{0,945 \cdot 240} \cong 1,03 \text{ V}$$

Di conseguenza, la **f.e.m. per fase** di rotore risulta:

$$E_{20} = N_2 E_b = E_b \cong 1,03 \text{ V} \quad \text{con: } N_2 = p_p = 1$$

e la f.e.m. di tutte le m_2 fasi risulta:



$$m_2 E_{20} = m_2 N_2 E_b = Q_2 E_b = 29,12 \text{ V} \quad \text{con: } Q_2 = 26$$

La **corrente di rotore per sbarra** è data da:

$$I_b = \frac{P_{em}}{m_2 E_{20}} = \frac{P_{em}}{Q_2 E_b}$$

con P_{em} = potenza trasmessa al rotore (potenza elettromagnetica), da calcolare.

64

Potenza e perdite

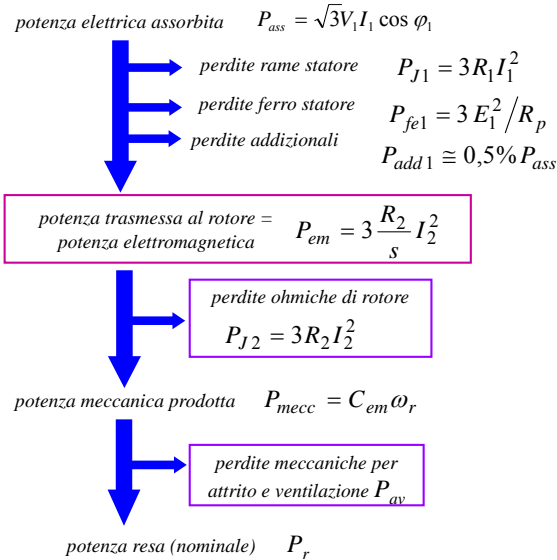
La potenza trasmessa al rotore è:

$$P_{em} = P_r + P_{av} + P_{J2}$$

Le **perdite meccaniche** P_{av} sono fortemente influenzate dalla velocità del rotore e pertanto dal numero di poli.

Possono quindi essere stimate in funzione del numero di poli:

- $p = 2$: $P_{av} = 2,2\% P_r$
- $p = 4$: $P_{av} = 1,4\% P_r$
- $p = 6$: $P_{av} = 1,2\% P_r$
- $p = 8$: $P_{av} = 0,9\% P_r$



65

Potenza e perdite

Le perdite ohmiche di rotore possono quindi essere espresse come:

$$P_{J2} = 3 R_2 I_2^2 = s P_{em}$$



$$P_{em} - P_{J2} = P_r + P_{av}$$



$$P_{em}(1-s) = P_r + P_{av}$$



$$P_{em} = \frac{P_r + P_{av}}{(1-s)}$$

Nel nostro caso: $P_{em} = \frac{P_r(1+0,022)}{(1-s_n)} = \frac{4000 \cdot (1+0,022)}{(1-0,037)} \cong 4245,07 \text{ W}$

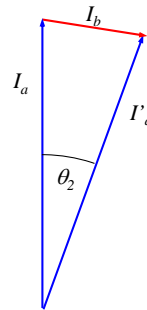
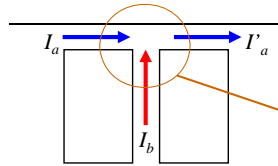
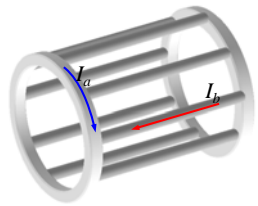
A questo punto possiamo calcolare la **corrente di rotore per sbarra**:

$$I_b = \frac{P_{em}}{Q_2 E_b} = \frac{4245,07}{26 \cdot 1,03} \cong 159 \text{ A}$$

66

Corrente negli anelli e nelle barre

Applicando la legge di Kirchhoff al nodo: $\bar{I}_a + \bar{I}_b = \bar{I}'_a$



$$\theta_2 = p_p \theta_{m2} = p_p \frac{360^\circ}{Q_2} = p \frac{\pi}{Q_2}$$

θ_2 = angolo elettrico fra due cave vicine
 Q_2 = numero di cave della gabbia

$$I_b = 2 I_a \sin(\theta_2/2) = 2 I_a \sin \frac{\pi p}{2 Q_2}$$

per Q_2 grande,
 θ_2 piccolo $\rightarrow \sin \frac{\theta_2}{2} \approx \frac{\theta_2}{2}$

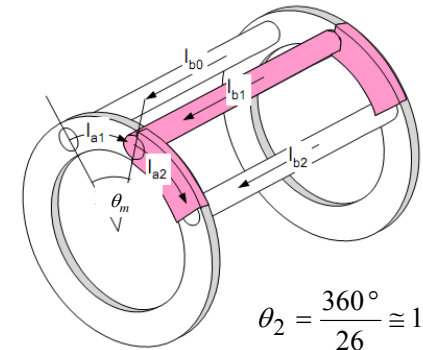
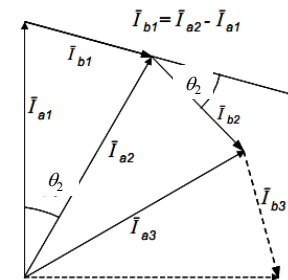
$$I_b = I_a \frac{\pi p}{Q_2}$$

$$I_a = \frac{Q_2 \cdot I_b}{\pi \cdot p}$$

67

Corrente negli anelli e nelle barre

Più precisamente: $I_a = \frac{I_b}{2 \sin\left(\frac{\theta_2}{2}\right)}$



$$\theta_2 = \frac{360^\circ}{26} \cong 13,85^\circ$$

La **corrente di rotore per anello** può essere calcolata come:

$$I_a = \frac{Q_2 \cdot I_b}{\pi \cdot p} = \frac{26 \cdot 159}{2\pi} \cong 658 \text{ A} \quad \text{oppure:} \quad I_a = \frac{I_b}{2 \sin\left(\frac{\theta_2}{2}\right)} = \frac{159}{2 \cdot 0,12} \cong 660 \text{ A}$$

68

Sezione della barra

Anche per il rotore, per valutare la sezione indicativa delle sbarre, si fissa un valore della **densità di corrente**:

$$J_b = 3 \div 4,5 \frac{\text{A}}{\text{mm}^2} \quad \text{fissiamo: } J_b = 3,5 \frac{\text{A}}{\text{mm}^2}$$

Ricaviamo quindi la **sezione indicativa delle sbarre**:

$$S_b = \frac{I_b}{J_b} = \frac{159}{3,5} \cong 45 \text{ mm}^2$$

Per gli **anelli di corto circuito** si utilizza una densità di corrente:

$$J_a = 2 \div 4 \frac{\text{A}}{\text{mm}^2} \quad \text{fissiamo: } J_a = 3 \frac{\text{A}}{\text{mm}^2}$$

$$S_a = \frac{I_a}{J_a} = \frac{658}{3} \cong 219 \text{ mm}^2$$



69

Rotore avvolto

Nel caso di rotore avvolto, i calcoli sono differenti.

Per lo **statore** la f.e.m. per fase è sempre data da:

$$E_1 = 2k_f f_{a1} N_1 f \Phi \quad \text{con } N_1 = \text{numero di conduttori di statore in serie per fase}$$

Analogamente, per il **rotore** la f.e.m. per fase è data da:

$$E_{20} = 2k_f f_{a2} N_2 f \Phi \quad \text{con } N_2 = \text{numero di conduttori di rotore in serie per fase}$$

$$\frac{E_1}{E_{20}} = \frac{2k_f f_{a1} N_1 f \Phi}{2k_f f_{a2} N_2 f \Phi} = \frac{f_{a1} N_1}{f_{a2} N_2} \cong \frac{N_1}{N_2}$$

Il rotore avvolto è generalmente collegato a stella.

La tensione di una fase di rotore deve essere minore o al più uguale a 230 V.

Di conseguenza viene scelto il numero di conduttori in serie per fase di rotore N_2 .

70

Osservazioni e calcolo delle perdite

Si osserva che, all'aumentare del numero di poli:

➤ diminuisce, relativamente al resto, l'altezza della corona di statore, perché diminuisce il flusso per polo (questo accade anche nelle macchine in corrente continua e sincrone).

➤ diminuisce il rapporto tra sezione di anello e sezione di barra di rotore.

Dopo aver svolto i calcoli precedenti, è possibile calcolare, approssimativamente, le perdite nei materiali.

Per quanto riguarda le perdite per effetto Joule, vale la formula:

$$P_{Joule} = RI^2 = \rho \frac{l}{A} (J \cdot A)^2 = \rho \cdot J^2 \cdot (l \cdot A) \text{ [W]}$$

Occorre calcolare separatamente le perdite negli avvolgimenti di statore (in rame) e in quelli di rotore (in alluminio).

71

Calcolo delle perdite

Per l'avvolgimento di statore, occorre considerare che la lunghezza media di ciascun conduttore è superiore a quella del pacco di statore, perché sono presenti anche le testate (per il calcolo della lunghezza complessiva di ciascun conduttore, esistono formule semi-empiriche). Quindi si calcola il volume di rame:

$$Vol_{rame} = 3 \cdot N_1 \cdot L_{cond.stat.} \cdot S_{cond.stat.nudo} \text{ [m}^3\text{]}$$

Si calcola poi la resistività del rame a una temperatura prossima al funzionamento normale (es. 75 °C):

$$\rho_{rame}(75^\circ\text{C}) = \rho_{0rame}(1 + \alpha_{0rame}\theta) = 1,72 \cdot 10^{-8} (1 + 0,0039 \cdot 75)$$

$$\rho_{rame}(75^\circ\text{C}) \cong 2,1 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot \text{m} = 0,021 \Omega \cdot \frac{\text{mm}^2}{\text{m}}$$

$$P_{rame} = \rho_{rame} \cdot J_1^2 \cdot Vol_{rame} \text{ [W]}$$

72

Calcolo delle perdite

Analogamente, per l'avvolgimento di rotore, si calcolano le perdite nelle barre e negli anelli di alluminio, calcolando prima i rispettivi volumi:


Vol_{barre} = Q_2 \cdot L \cdot S_b [m^3]

Vol_{anelli} \cong 2 \cdot \pi D_{est.rot.} \cdot S_a [m^3]

Si calcola poi la resistività dell'alluminio a una temperatura prossima al funzionamento normale (es. 75 °C):

\rho_{al}(75^{\circ}C) = \rho_{0al}(1 + \alpha_{0al}\theta) = 2,82 \cdot 10^{-8} (1 + 0,0039 \cdot 75)

\rho_{al}(75^{\circ}C) \cong 3,42 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m = 0,0342 \Omega \cdot \frac{mm^2}{m}

 P_{al} = \rho_{al} \cdot (J_b^2 \cdot Vol_{barre} + J_a^2 \cdot Vol_{anelli}) [W]

Calcolo delle perdite

Per le perdite nel ferro, occorre conoscere la cifra di perdita nel materiale ferromagnetico ai valori di induzione presunti, rispettivamente, per i denti di statore (B_{MAXdente}) e per la corona di statore (B_{MAXgs}).

Talvolta vengono fornite le curve della cifra di perdita in funzione dell'induzione, altrimenti, a partire dalla cifra di perdita P_0 nota ad es. per B_0 = 1 T, si calcola la cifra di perdita P_{fs} per un valore B_x generico con la relazione:

P_{fs} = P_0 \cdot \left(\frac{B_x}{B_0} \right)^2 \left[\frac{W}{kg} \right]

Quindi si moltiplica la cifra di perdita per il peso del ferro di statore.

Si trascurano le perdite nel ferro di rotore.

Le perdite per attrito e ventilazione e le perdite addizionali si stimano con le formule già viste. Quindi si può calcolare il rendimento del motore.

Calcolo delle perdite

Dai conti approssimativi svolti otteniamo:	% P_{ass}	% Perdite tot.
Perdite per effetto Joule nel rame di statore: 144 W	3,1%	28,5%
Perdite per effetto Joule nell'Al di rotore: 105 W	2,2%	20,7%
Perdite nel ferro di statore: 145 W	3,1%	28,5%
Perdite per attrito e ventilazione: 88 W	1,9%	17,4%
Perdite addizionali: 23 W	0,5%	4,6%
PERDITE TOTALI: 505 W	10,8%	100%
RENDIMENTO: 89,2%		

Il rendimento calcolato è superiore a quello previsto normalmente per un motore di questa taglia, perché i calcoli svolti sono teorici e non tengono conto di tutte le non idealità presenti nella macchina reale.

Calcolo delle perdite

Con i dati geometrici ricavati, conoscendo il peso specifico di rame, ferro e alluminio, è possibile calcolare il peso approssimativo del motore, che risulta 26,2 kg: è un valore compatibile con motori della stessa potenza e con lo stesso numero di poli.

Avendo già calcolato P_{em}, si ricava la coppia a carico nominale:

C_{em} = \frac{P_{em}}{\omega_0} = \frac{4245,07}{314,16} \cong 13,5 Nm

Per il calcolo della coppia massima, occorre prima determinare la reattanza di dispersione totale della macchina X_{dtot} = X_1 + X'_{20} : per questo calcolo, è necessario utilizzare delle formule semi-empiriche. Quindi si calcola:

C_{max} \approx \frac{3 p_p}{\omega} \frac{V^2}{2 X_{dtot}} \quad (\text{nella formula più precisa c'è } V_{eq})