



Il motore asincrono (3° parte): classificazione dei motori, coppie parassite e raccorciamento di passo, miglioramento del rendimento

Lucia FROSINI

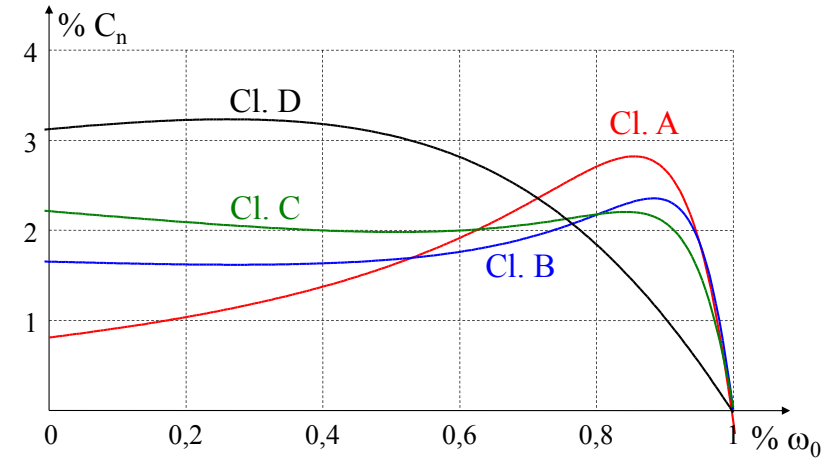
Dipartimento di Ingegneria Industriale e dell'Informazione
Università di Pavia
E-mail: lucia@unipv.it

1

L. Frosini

Classificazione motori asincroni

Le norme americane NEMA forniscono una classificazione dei motori asincroni a gabbia, ai fini delle applicazioni pratiche, a seconda del tipo di caratteristica elettromeccanica e della coppia di avviamento:



2

L. Frosini

Classificazione motori asincroni

I motori di classe A e B hanno rotore a gabbia a bassa resistenza e sono adatti per applicazioni in cui è importante privilegiare le prestazioni a funzionamento nominale a scapito di quelle all'avviamento (bassa coppia di spunto e alta corrente di spunto).

Entrambi tipi di motore (A e B) presentano barre di rotore a sezione elevata, ma quelli di classe B hanno barre più profonde (barre alte) e quindi correnti di spunto accettabili, pertanto sono i più largamente impiegati nelle applicazioni comuni.

I motori di classe C e D privilegiano invece le prestazioni all'avviamento, a scapito di quelle a funzionamento nominale (in particolare nel caso della classe D).

Entrambi i tipi di motore (C e D) presentano barre di rotore con resistenza più elevata rispetto ai precedenti: in particolare, quelli di classe C sono caratterizzati da una doppia gabbia, che permette di ottenere alta coppia di spunto, bassa corrente di spunto e scorrimento relativamente elevato a pieno carico (rispetto alle classi A e B); quelli di classe D hanno coppia di spunto maggiore rispetto alle altre classi, ma anche scorrimento nominale più elevato.

3

L. Frosini

Classificazione motori asincroni



Classe A - Coppia di spunto normale, corrente di spunto normale, basso scorrimento:

- rotore a gabbia singola a bassa resistenza;
- buone prestazioni a carico, a spese dell'avviamento;
- a carico nominale: scorrimento basso e rendimento elevato;
- $C_{max}/C_n \gg 2$ $s_{C_{max}} < 20\%$
- $C_{avv}/C_n = 1 \div 2$
- $I_{avv}/I_n = 5 \div 8$ (principale svantaggio di questo tipo di motore)

➡ È generalmente necessario un avviamento a tensione ridotta (tranne che per basse potenze).

$$\begin{cases} P_{J2} = sP_{em} \\ P_{mecc} = (1-s)P_{em} \end{cases}$$

4

Classificazione motori asincroni



Classe B - Coppia di spunto normale, corrente di spunto bassa, basso scorrimento:

- rotore a doppia gabbia (o a barre alte), elevata reattanza di dispersione;
- coppia di avviamento simile (poco superiore) a quella della Classe A;
- corrente di avviamento ridotta rispetto alla Classe A (75% di quella della Classe A);
- a carico nominale: scorrimento basso e rendimento elevato (circa come Classe A);
- $\cos\phi$ leggermente minore della Classe A;
- $C_{max}/C_n \approx 2$

➔ È il tipo più comune di motore per impiego a velocità costante, senza esigenze particolari di coppia di spunto (es.: ventilatori, soffianti, pompe, macchine utensili).

5

Classificazione motori asincroni



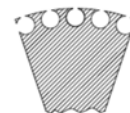
Classe C - Coppia di spunto elevata, corrente di spunto bassa:

- rotore a doppia gabbia (o a barre alte), con resistenza di rotore > della Classe B;
- coppia di avviamento superiore alle Classi A e B;
- corrente di avviamento inferiore alla Classe B;
- a carico nominale: scorrimento maggiore e rendimento minore rispetto alle Classi A e B;

➔ Motore impiegato per l'azionamento di compressori e nastri trasportatori.

6

Classificazione motori asincroni



Classe D - Coppia di spunto elevata, alto scorrimento:

- rotore a gabbia singola ad elevata resistenza;
- coppia di avviamento molto elevata;
- corrente di avviamento bassa;
- coppia massima elevata a $s_{Cmax} = 0,5 \div 1$;
- a carico nominale: elevato scorrimento e basso rendimento;

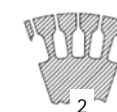
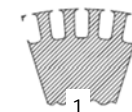
➔ Motore impiegato per l'azionamento di carichi intermittenti, che richiedono gravose accelerazioni, o carichi impulsivi, quali presse e tranciatrici. In quest'ultimo caso, il motore è generalmente accoppiato a un volano, che aiuta a fornire la potenza impulsiva e riduce le pulsazioni di potenza sulla rete di alimentazione: il motore presenta una velocità che cala sensibilmente al crescere della coppia resistente, in modo che il volano possa rallentare e cedere al carico parte della sua energia cinetica.

$$\begin{cases} P_{J2} = sP_{em} \\ P_{mecc} = (1-s)P_{em} \end{cases}$$

7

Osservazioni sulla forma delle cave di rotore

La forma delle cave di rotore influenza la caratteristica elettromeccanica del motore:



1) Cave con sezione elevata forniscono una bassa resistenza di rotore e, quando sono posizionate vicino alla superficie di rotore, la reattanza di dispersione di rotore è ridotta, dato che l'avvolgimento di rotore è più vicino a quello di statore e quindi accoppiato ad esso in modo migliore. Questo motore avrà basso scorrimento ed elevato rendimento a carico nominale ed elevata coppia massima, ma anche bassa coppia di avviamento ed elevata corrente di avviamento.

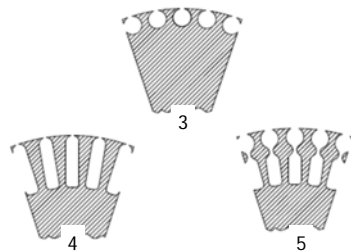
2) Questo rotore ha la stessa sezione di cava del precedente, ma le barre sono immerse profondamente nel rotore: questo aumenta la reattanza di dispersione di rotore e, di conseguenza, limita la corrente di avviamento, ma anche la coppia massima e la coppia di avviamento (la corrente è molto sfasata rispetto alla tensione). A carico nominale le caratteristiche rimangono simili a quelle del motore con rotore di tipo 1).

8

Osservazioni sulla forma delle cave di rotore

3) La reattanza di dispersione sarà simile a quella del rotore 1), dato che in entrambi i casi le barre sono vicine al traferro. Tuttavia, la sezione delle barre è ridotta rispetto al rotore 1) e questo augmenta la resistenza di rotore. Quindi questo rotore fornirà: elevata coppia di avviamento, bassa corrente di avviamento, elevato scorrimento e basso rendimento a carico nominale.

➔ I vantaggi dei rotor 2 e 3) possono essere combinati insieme nei rotor a barre profonde (4) e nei rotor a doppia gabbia (5).



9

Copie parassite

Poiché la distribuzione spaziale del campo magnetico rotante prodotto dagli avvolgimenti di statore non è mai perfettamente sinusoidale, si hanno delle armoniche del campo rotante di statore che generano altrettante armoniche del campo rotante di rotore.

Queste armoniche interagiscono tra loro dando origine a delle coppie parassite che introducono distorsioni nella caratteristica meccanica della fondamentale.

Esse sono pertanto da attenuare il più possibile.



10

Armoniche del campo rotante

Per capire qual è la velocità angolare di un'armonica di ordine h del campo rotante, si pensi alla differenza di velocità del campo rotante tra macchine a 2 poli e a 4 poli.

In una macchina a 2 poli vi è corrispondenza tra l'angolo ωt della sinusoide delle grandezze elettriche e lo spostamento angolare del campo magnetico ($\omega = 2\pi f$).

Questo significa che in un periodo $T = 1/f$ il campo magnetico percorrerà un giro, ossia 2π radianti, con una velocità angolare $\omega_0 = 2\pi/T = 2\pi f = \omega$, ossia uguale alla pulsazione della sinusoide delle grandezze elettriche.

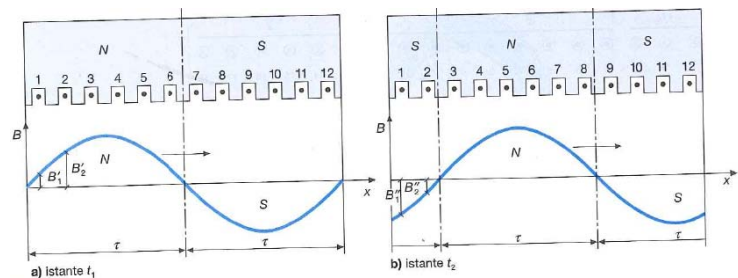
Per una macchina a 4 poli, invece, l'alternanza N-S si ha dopo mezza circonferenza statorica, ossia π radianti.

Quindi, in un periodo T , il campo magnetico percorre mezzo giro, ossia π radianti.

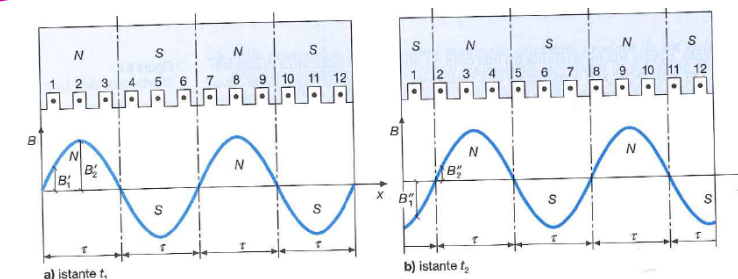
Di conseguenza, la velocità del campo sarà $\omega_0 = \pi/T = \pi f = \omega/2 = \omega/p_p$.

Però la frequenza della sinusoide che rappresenta la f.m.m. della macchina a 4 poli è doppia rispetto a quella che rappresenta la f.m.m. della macchina a 2 poli!

11



Distribuzione sinusoidale dell'induzione al traferro per una macchina a **2 poli**, in due diversi istanti.



Distribuzione sinusoidale dell'induzione al traferro per una macchina a **4 poli**, in due diversi istanti.

12

Armoniche del campo rotante

Quindi, supponiamo di avere, in generale, un'armonica del campo magnetico rotante di ordine h rispetto ad una fondamentale a frequenza f : essa è equivalente ad una componente sinusoidale a frequenza $f_h = h \cdot f$.

Con riferimento a quanto detto sulle macchine a 2 e a 4 poli, un'armonica di ordine h è come se fosse generata da un numero di paia poli p_{ph} :

$$p_{ph} = h \cdot p_p$$

Di conseguenza, la velocità angolare dell'armonica h del campo rotante sarà:

$$\frac{\omega}{h \cdot p_p} = \frac{\omega_0}{h}$$

Con riferimento alle grandezze elettriche, l'angolo elettrico fra due cave contigue diviene:

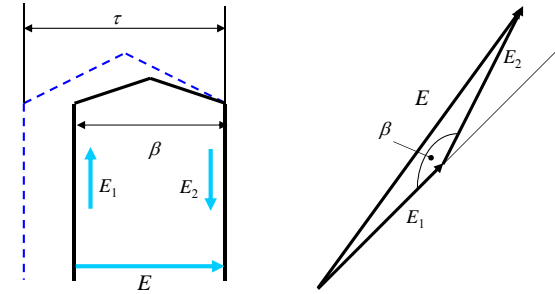
$$\theta_h = p_{ph} \theta_m = h \cdot p_p \theta_m = h \theta$$

13

Effetti del raccorciamento di passo

Ipotizziamo di avere due conduttori in serie, posti in due cave che distano geometricamente tra loro di un angolo inferiore al passo polare τ , dove $\tau = \pi/p_p$.

Definiamo β l'angolo elettrico tra questi due conduttori in serie, equivalente a questa distanza geometrica.



$$E_1 = E_2 = E_i$$

$$E < 2E_i$$

$$\text{fattore di passo } f_p = \frac{E}{2E_i}$$

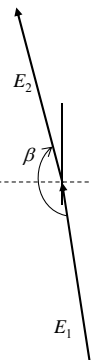
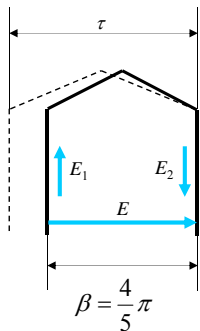
$$E = 2E_i \sin \frac{\beta}{2} \Rightarrow f_p = \frac{E}{2E_i} = \frac{2E_i \sin \beta/2}{2E_i} = \sin \frac{\beta}{2} \Rightarrow f_p = \sin \frac{\beta}{2} \Rightarrow E = 2E_i f_p$$

Se $f_p = 1 \rightarrow \beta = \pi$ (angolo elettrico).

14

Ricordiamo che un passo polare τ corrisponde a 180° elettrici. Vediamo cosa succede se si sceglie un raccorciamento di passo:

$$\beta = \frac{4}{5} \pi$$



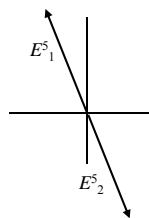
Per le componenti fondamentali delle f.e.m. E_i , l'angolo elettrico tra loro è:

$$\beta = \frac{4}{5} \pi$$

$$\bar{E} = \bar{E}_1 + \bar{E}_2$$

$$E = 2E_i f_p = 2E_i \sin \frac{1}{2} \frac{4}{5} \pi = 2E_i \cdot 0,951$$

$$f_p = \sin \frac{\beta}{2} = 0,951$$



Mentre per le rispettive componenti di 5° armonica (se esistenti) si ha un angolo elettrico:

$$\beta_5 = \beta \cdot 5 = \frac{4}{5} \pi \cdot 5 = 4\pi$$

$$\bar{E}^5 = \bar{E}_1^5 + \bar{E}_2^5 = 0$$

15

Effetti del raccorciamento di passo

Nei grafici riportati nelle due slide seguenti sono determinate geometricamente le tensioni che si ottengono ai capi della serie di 4 conduttori appartenenti alla stessa fase, sia nel caso di passo normale, sia nel caso di passo raccorciato con:

$$\beta = \frac{8}{9} \pi = 160^\circ$$

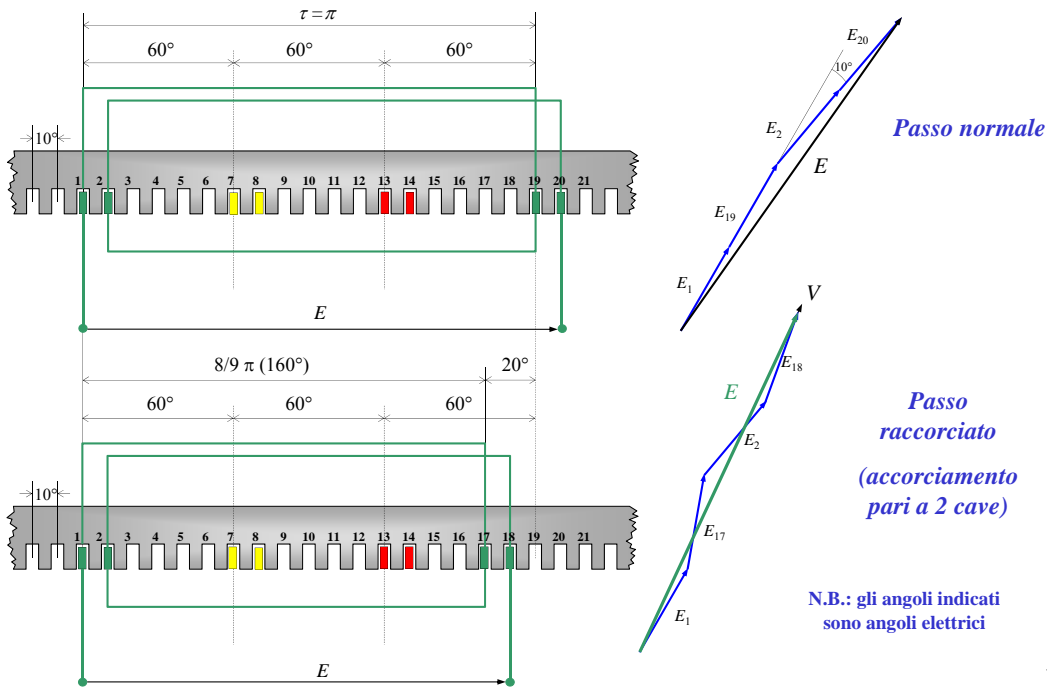
Non è specificato il numero di poli della macchina: questa informazione è in effetti superflua, perché tutti gli angoli a cui si fa riferimento sono angoli elettrici.

Per semplicità, possiamo comunque far riferimento a una macchina a 2 poli.

Nella macchina analizzata sono presenti **18 cave per passo polare**, ossia $q = 6$ cave per polo e per fase ($\theta = 10^\circ$). Di conseguenza, per il calcolo effettivo del fattore di avvolgimento, dato dal prodotto del fattore di distribuzione per il fattore di passo, occorrerebbe considerare 12 conduttori in serie e non solo i 4 indicati: per fare questo, sarebbe necessario complicare eccessivamente i disegni, perciò facciamo riferimento solo alla serie di 4 conduttori per fase (senza calcolare il fattore di distribuzione).

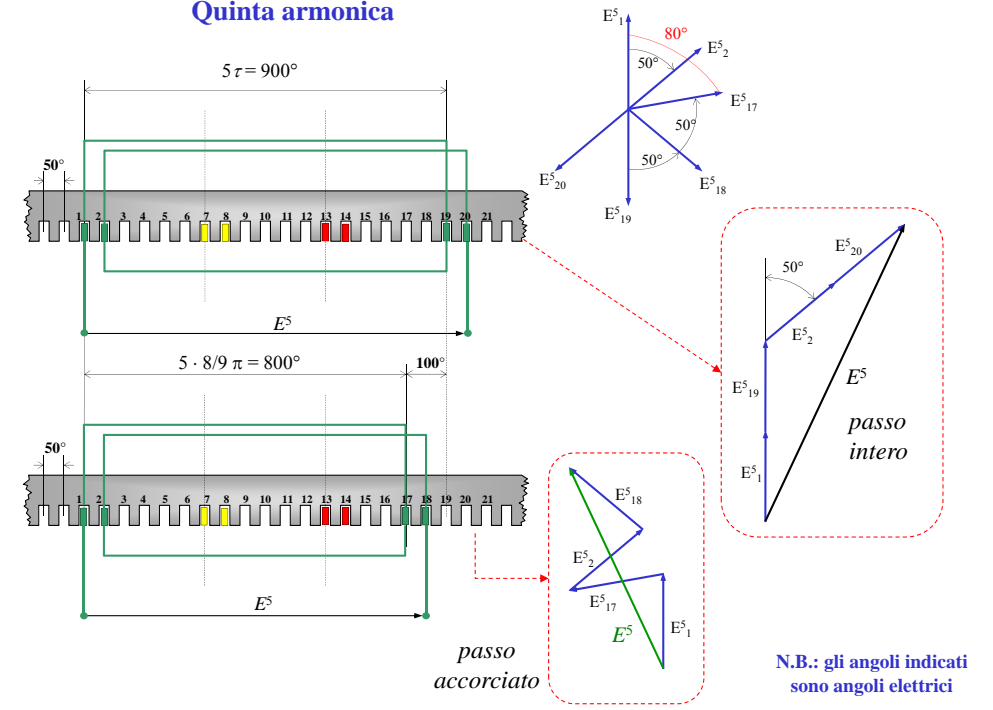
16

Armonica fondamentale



17

Quinta armonica

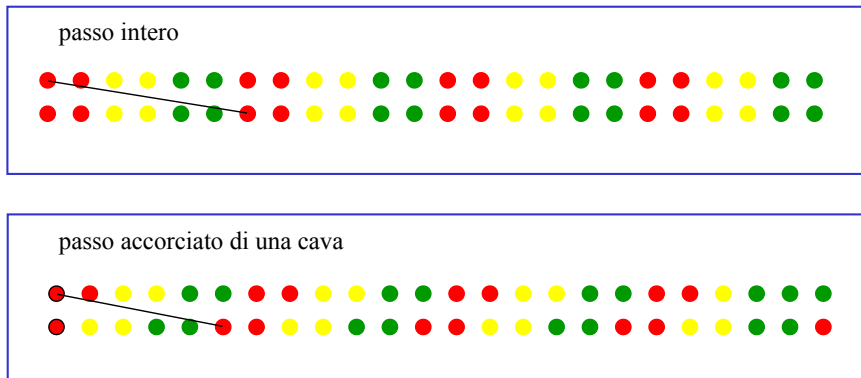


18

L. Frosini

Passaggio dal passo intero al passo accorciato

4 poli 24 cave
2 cave per polo per fase doppio strato

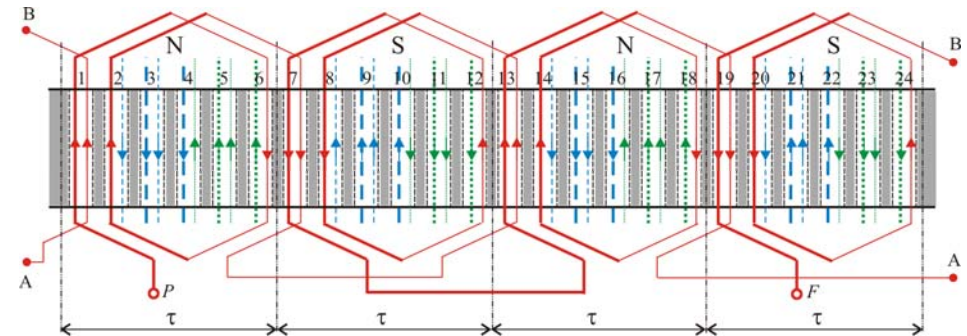


19

L. Frosini

Esempio di avvolgimento a passo accorciato

Riportiamo di seguito l'esempio, già visto, di un avvolgimento a **DOPPIO STRATO** a **PASSO RACCORCIATO** di una cava, con numero fasi **m = 3**, numero poli **p = 4**, numero cave per polo e per fase **q = 2**.



20

Effetti del raccorciamento di passo

Si osserva che il fattore di passo può anche essere definito in funzione dell'angolo elettrico di raccorciamento, anziché dell'angolo elettrico β tra due conduttori in serie:

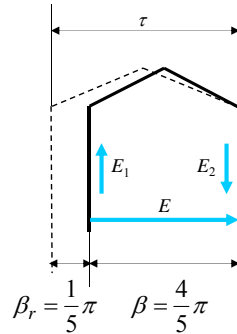
$$f_p = \sin \frac{\beta}{2} = \cos \frac{\beta_r}{2}$$

Inoltre, si può definire: $b = \frac{\beta}{\pi}$

E si hanno di conseguenza:

■ fattore di passo per l'armonica fondamentale: $f_p = \sin \frac{b\pi}{2}$

■ fattore di passo per l'armonica di ordine h : $f_{ph} = \sin h \frac{b\pi}{2}$



21

Effetti del raccorciamento di passo

Ad esempio:

• $h = 5$: $E_5 = 0$ per un passo raccorciato di 4/5 del passo polare

• $h = 7$: $E_7 = 0$ per un passo raccorciato di 6/7 del passo polare

Con passi intermedi alcune armoniche restano fortemente attenuate.

Ad esempio, con passo 5/6 (intermedio fra 4/5 e 6/7), per la 5^a e 7^a armonica si ha:

$$f_{p5} = \sin \frac{1}{2} \frac{5}{6} 5\pi = 0,259$$

$$f_{p7} = \sin \frac{1}{2} \frac{5}{6} 7\pi = 0,259$$

Mentre l'armonica fondamentale si attenua di poco: $f_p = \sin \frac{1}{2} \frac{5}{6} \pi = 0,966$

Importante: l'angolo elettrico di raccorciamento non può essere scelto a piacere, ma deve essere un multiplo dell'angolo elettrico tra due cave, in quanto è solo possibile accorciare il passo di una o più cave.

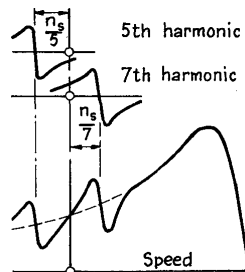
22

Coppie parassite: asincrone e sincrone

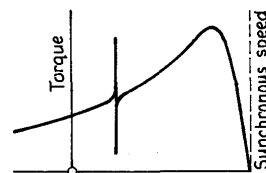
Ogni armonica del campo rotante creato dalle correnti di statore genera nel rotore un'armonica del campo rotante creato dalle correnti di rotore, che si sposta lungo il traferro in sincronismo con quella di statore, qualunque sia la velocità del rotore.

Una coppia che si sviluppa a qualunque velocità di rotore, ad eccezione della velocità di sincronismo, è detta **COPPIA ASINCRONA**. In pratica, le coppie parassite asincrone si hanno in prossimità dell'avviamento ($s \approx 1$).

Una coppia che si sviluppa solo alla velocità di sincronismo è detta **COPPIA SINCRONA**. Queste coppie si manifestano come delle discontinuità sovrapposte alla coppia fondamentale, in corrispondenza di un valore specifico di velocità.



a Induction torques



b Synchronous torque

23

Coppie parassite asincrone

Si può dimostrare che gli **ordini h delle armoniche di campo** prodotte da un avvolgimento trifase sono solo dispari e si trovano con la seguente regola:

✚ se il resto della divisione $h/3$ è nullo, è nulla l'armonica risultante;

✚ se il resto della divisione $h/3$ è 1, l'armonica risultante si sposta nel traferro nello stesso senso della fondamentale (+);

✚ se il resto della divisione $h/3$ è 2, l'armonica risultante si sposta nel traferro in senso contrario alla fondamentale (-).

Attribuendo segno negativo alle armoniche che si spostano nel traferro in senso contrario alla fondamentale, le armoniche create da un avvolgimento trifase sono:

$$- 5 \quad + 7 \quad - 11 \quad + 13 \quad - 17 \quad + 19, \dots$$

La velocità di spostamento è sempre pari a n_0/h , dove n_0 è la velocità di sincronismo e h è l'ordine dell'armonica.

24

Coppie parassite asincrone

Quando non è nulla, l'ampiezza dell'armonica è sempre inversamente proporzionale al suo ordine h .

Pertanto, le armoniche che provocano distorsioni maggiormente rilevanti nella caratteristica meccanica sono le prime, cioè la 5° e la 7°:

- la velocità di sincronismo di 5° armonica è $-1/5n_0$: la 5° armonica può provocare una diminuzione di coppia alle basse velocità;
- la velocità di sincronismo di 7° armonica è $+1/7n_0$: la 7° armonica corregge in parte l'influenza della 5°, ma introduce comunque una depressione nella caratteristica risultante. È la più "pericolosa", perché ruota nello stesso verso del campo fondamentale.

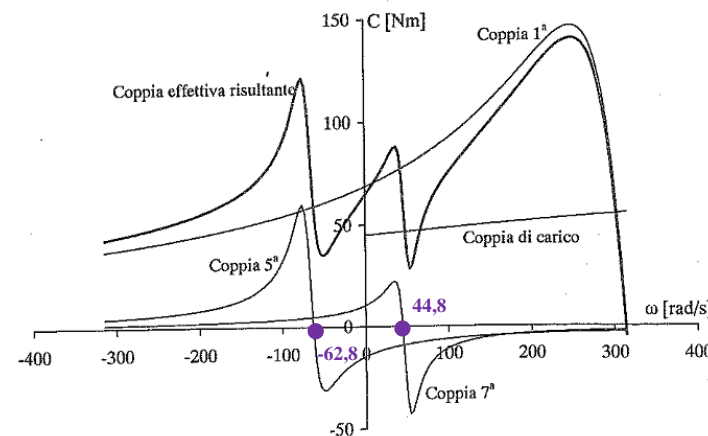


Se la coppia risultante è inferiore alla coppia resistente, il motore non riesce a raggiungere la sua velocità nominale (coppia di impuntamento, che può dare problemi all'avviamento).

25

Coppie parassite asincrone

Caratteristica risultante dalla presenza dell'armonica principale del campo e dalla 5° e 7° armonica: l'andamento presenta possibili zone di funzionamento stabile in prossimità delle velocità di sincronismo.



L. Ferraris, "Macchine elettriche, parte seconda", ed. CLUT, 1999.

26

Coppie parassite asincrone

Le **COPPIE PARASSITE ASINCRONE** si combattono cercando di rendere più sinusoidale possibile la forma della curva di f.m.m.:

- con un numero elevato di cave di statore per polo per fase (migliore distribuzione dell'avvolgimento);
- con l'accorciamento di passo di statore (solo negli avvolgimenti a due strati): per eliminare l'armonica di ordine h , è necessario dare all'avvolgimento un passo pari alla frazione $(h - 1)/h$ del passo intero.

Per eliminare la 5° armonica, occorre un passo pari a $4/5 = 0,8$ del passo intero, corrispondente a un angolo elettrico di raccorciamento = $180/5 = 36^\circ$.

Per eliminare la 7° armonica, il passo dovrebbe essere pari a $6/7 \cong 0,86$ del passo intero, corrispondente a un angolo elettrico di raccorciamento = $180/7 \cong 26^\circ$.

Con accorciamenti di passo diversi le armoniche non vengono eliminate ma comunque attenuate.

27

Coppie parassite asincrone

L'angolo di raccorciamento effettivamente realizzabile dipende dal numero di cave per fase, e quindi dal numero di cave per polo e per fase q .

Il rotore, come reazione alle armoniche di campo di statore, crea a sua volta delle armoniche di campo che si spostano nel traferro con velocità che dipendono dallo scorrimento.

Si ha una **COPPIA SINCRONA** quando un'armonica di campo creata dal rotore in reazione ad un'armonica di campo di statore entra in sincronismo con un'armonica di statore di ordine diverso, per una velocità particolare del rotore.

Le **COPPIE PARASSITE SINCRONE** si combattono con:

- una oculata scelta del numero di cave di rotore
- l'inclinazione delle cave di rotore.

L'inclinazione delle cave di rotore ha l'effetto di una distribuzione dell'avvolgimento di rotore: quella pari a un passo di cava di statore è la più adoperata.

28

Rendimento dei motori asincroni

La norma **IEC 60034-30:2008**, recepita a livello europeo nel 2009 e a livello italiano con la CEI EN 60034-30:2011 *Classi di rendimento dei motori asincroni trifase con rotore a gabbia ad una sola velocità*, ha lo scopo di definire nuove classi di rendimento (IE, *International efficiency*) per i motori asincroni trifase, a 50 Hz e a 60 Hz, con rotore a gabbia, a una sola velocità, aventi le seguenti caratteristiche:

- ✱ tensione nominale fino a 1000 V;
- ✱ 2, 4 o 6 poli;
- ✱ potenza nominale compresa tra 0,75 kW e 375 kW;
- ✱ targati per servizio S1 (servizio continuo) o S3 (servizio intermittente periodico) con un rapporto di intermittenza nominale uguale o superiore all'80%;
- ✱ in grado di funzionare collegati direttamente alla linea di alimentazione.

Nota: le norme precedenti sono state aggiornate rispettivamente con la IEC 60034-30-1:2014 e con la CEI EN 60034-30-1:2015.

29

Rendimento dei motori asincroni

Sono esclusi dall'applicazione della IEC 60034-30:

- i motori realizzati solo per funzionamento con convertitore;
- i motori realizzati per breve tempo di funzionamento (servizio S2) o per operazioni di commutazione (servizio da S3 con rapporto di intermittenza nominale < 80% a S10);
- i motori completamente integrati in una macchina (per es. pompe, ventilatori e compressori) che non possono essere provati separatamente dalla macchina.

Si ricorda che le norme funzionano come raccomandazioni, che possono essere osservate su base volontaria: le norme non sono di per sé giuridicamente vincolanti, ma potrebbero diventare tali in seguito a leggi imposte dal legislatore o attraverso contratti in cui l'osservanza è obbligatoria.

Nota: per le macchine a velocità variabile, è recentemente uscita la IEC TS 60034-30-2:2016 *Rotating electrical machines: Efficiency classes of variable speed AC motors*.

30

Rendimento dei motori asincroni

La norma IEC 60034-30 definisce le classi di rendimento per i motori, creando così una comune linea guida internazionale.

Tuttavia, la norma in sé non specifica se i motori sono tenuti a rispettare una particolare classe minima di rendimento.

Questo è specificato dalle leggi nazionali applicabili e dalle direttive.

In Europa, il **Regolamento 640/2009** in merito alle specifiche per la progettazione ecocompatibile dei motori elettrici (noto come **Direttiva UE sui motori elettrici**) stabilisce i requisiti minimi di rendimento da rispettare per legge.

Si noti che il campo di applicazione di questo Regolamento è più limitato di quello della norma IEC 60034-30, come indicato nella tabella seguente.

31

Rendimento dei motori asincroni

Quali motori rientrano nel campo di applicazione?	IEC 60034-30:2008	Direttiva EuP / Regolamento 640/2009 Richieste legali
Motori asincroni trifase 0,75 – 375 kW 2, 4, 6 poli, servizio continuo, S1	Sì (Nota: anche per servizio S3 con rapporto di intermittenza nominale \geq 80%)	Sì
Motori asincroni trifase con dispositivi ausiliari (tenuta d'albero, sensori di velocità, ecc...) 0,75 – 375 kW 2, 4, 6 poli, servizio continuo, S1	Sì (Nota: anche per servizio S3 con rapporto di intermittenza nominale \geq 80%)	Sì
Motori per riduttori, pompe, ventilatori, compressori, nei quali il rendimento può essere misurato indipendentemente dalla macchina	Sì	Sì
Motori per atmosfere esplosive	Sì	NO
Autofrenanti: un motore equipaggiato con un freno elettromeccanico che opera direttamente sull'albero del motore senza giunti di accoppiamento	Sì	NO
Motori completamente integrati dentro una macchina (per esempio riduttori, pompe, ventilatori, compressori) nei quali il rendimento non può essere misurato indipendentemente dalla macchina	NO	NO
Altri tipi di motori (ad esempio motori a magneti permanenti, motori a commutazione di poli, motori realizzati solo per funzionamento con convertitore in accordo con la Norma IEC 60034-25)	NO	NO

32

Rendimento dei motori asincroni

Le classi di rendimento definite dalla norma e dalla Direttiva UE sono tre:

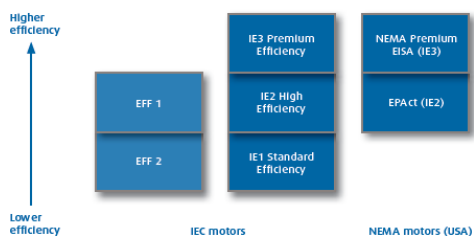
- IE1 – Efficienza standard
- IE2 – Alta efficienza
- IE3 – Efficienza premium

Potenza nominale [kW]	IE1			IE2			IE3		
	Numero di poli								
	2	4	6	2	4	6	2	4	6
0,75	72,1	72,1	70,0	77,4	79,6	75,9	80,7	82,5	78,9
1,1	75,0	75,0	72,9	79,6	81,4	78,1	82,7	84,1	81,0
1,5	77,2	77,2	75,2	81,3	82,8	79,8	84,2	85,3	82,5
2,2	79,2	79,2	77,7	83,2	84,3	81,8	85,9	86,7	84,3
3	81,5	81,5	79,7	84,6	85,5	83,3	87,1	87,7	85,6
4	83,1	83,1	81,4	85,8	86,6	84,6	88,1	88,6	86,8
5,5	84,7	84,7	83,1	87,0	87,7	86,0	89,2	89,6	88,0
7,5	86,0	86,0	84,7	88,1	88,7	87,2	90,1	90,4	89,1
11	87,6	87,6	86,4	89,4	89,8	88,7	91,2	91,4	90,3
15	88,7	88,7	87,7	90,3	90,6	89,7	91,9	92,1	91,2
18,5	89,3	89,3	88,6	90,9	91,2	90,4	92,4	92,6	91,7
22	89,9	89,9	89,2	91,3	91,6	90,9	92,7	93,0	92,2
30	90,7	90,7	90,2	92,0	92,3	91,7	93,3	93,6	92,9
37	91,2	91,2	90,8	92,5	92,7	92,2	93,7	93,9	93,3
45	91,7	91,7	91,4	92,9	93,1	92,7	94,0	94,2	93,7
55	92,1	92,1	91,9	93,2	93,5	93,1	94,3	94,6	94,1
75	92,7	92,7	92,6	93,8	94,0	93,7	94,7	95,0	94,6
90	93,0	93,0	92,9	94,1	94,2	94,0	95,0	95,2	94,9
110	93,3	93,3	93,3	94,3	94,5	94,3	95,2	95,4	95,1
132	93,5	93,5	93,5	94,6	94,7	94,6	95,4	95,6	95,4
160	93,8	93,8	93,8	94,8	94,7	94,8	95,6	95,8	95,6
Da 200 a 375	94,0	94,0	94,0	95,0	95,1	95,0	95,8	96,0	95,8

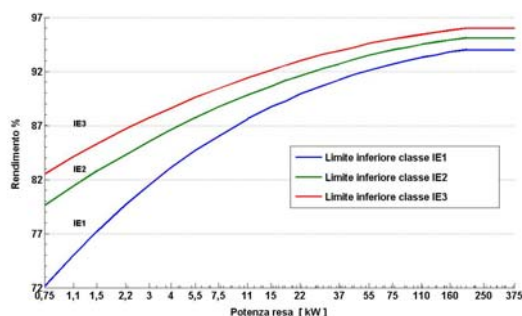
Rendimento dei motori asincroni

L'entrata in vigore dei nuovi standard di efficienza è avvenuto in tre fasi differenti:

Tappe	Requisiti	Note
Fase 1: Dal 16 giugno 2011	Tutti i motori commercializzati dovranno avere livello di efficienza IE2	
Fase 2: Dal 1° gennaio 2015	I motori con potenza tra 7,5 e 375 kW dovranno avere efficienza IE3	In alternativa efficienza IE2 se alimentati da inverter
Fase 3: Dal 1° gennaio 2017	I motori con potenza tra 0,75 e 375 kW dovranno avere efficienza IE3	In alternativa efficienza IE2 se alimentati da inverter



Limiti di rendimento per motori a 4 poli:



Costo complessivo medio per un motore nella sua vita utile:

- Costo di utilizzo in energia - 97%
- Acquisto iniziale - 2%
- Un riavvolgimento - 1%



Operating hours per year	2000 h	4000 h	6000 h
Purchase price	3,8%	1,9%	1,3%
Maintenance and repair	1,0%	1,0%	1,0%
Energy costs	95,2%	97,1%	97,7%

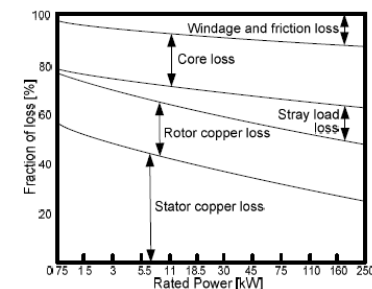
Come migliorare il rendimento

Migliorare il rendimento significa ridurre le perdite.

Non tutte le perdite pesano allo stesso modo sul rendimento di un motore asincrono e inoltre il loro peso varia a seconda della taglia del motore.

Per questi motivi, le tecnologie che sono risultate più vantaggiose per raggiungere i livelli minimi di rendimento richiesti dalle nuove norme sono:

- impiego di rame anziché di alluminio per la pressofusione delle barre di rotore (fino a qualche decina di kW di potenza nominale);
- utilizzo di lamierini a basse perdite;
- allungamento del nucleo statorico e rotorico;
- ottimizzazione del design della cava di rotore.



Rotori pressofusi in rame

L'utilizzo del rame per la costruzione delle barre di rotore è sempre stato una tecnica comune per i rotorì a gabbia assemblati (detti anche saldati), mentre fino a pochissimi anni fa era una tecnica scarsamente impiegata per i rotorì pressofusi.

I motivi alla base della scarsa diffusione di questa tecnica risiedono principalmente nel fatto che il rame fonde a una temperatura decisamente superiore rispetto all'alluminio (1083°C vs. 658 °C) e quindi la pressofusione del rame risulta più costosa energeticamente e più complessa, col rischio di ottenere scarso riempimento delle cave di rotore, formazione di porosità da gas, formazione di cavità da ritiro:



37

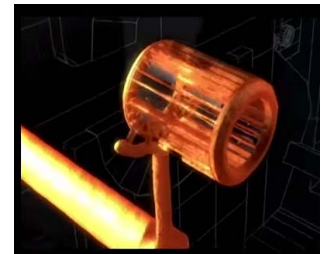
Rotori pressofusi in rame

Con l'introduzione dei nuovi livelli di efficienza, resi obbligatori dalla Direttiva UE, le tecniche di pressofusione dei rotorì in rame si sono diffuse su larga scala e sono diventate competitive anche per motori asincroni di piccola taglia.

Il pacco di lamierini rotorici viene caricato all'interno di uno stampo in acciaio riutilizzabile e il metallo liquido viene iniettato ad alta pressione nello stampo per costituire gli anelli di corto circuito e le barre conduttrici. Una volta che il metallo si solidifica, il rotore pressofuso viene rimosso dallo stampo.

Nuove soluzioni tecnologiche:

- leghe di Nichel per migliorare la resistenza dello stampo;
- utilizzo di software che simulano il processo di riempimento dello stampo;
- isolamento del pacco di lamierini, preriscaldamento dello stampo e raffreddamento immediato.



38

Rotori pressofusi in rame

Rispetto all'alluminio, il rame nelle barre di rotore porta a:

- Riduzione delle perdite ohmiche di rotore, perché si riduce la resistenza di rotore;
- Conseguente riduzione delle perdite ohmiche di statore, perché si riduce la corrente di rotore e quindi anche quella richiamata dallo statore.

Si ha inoltre una riduzione dello scorrimento a carico nominale (e quindi della frequenza delle correnti di rotore s_f), che può portare alla riduzione delle perdite nel ferro e delle perdite addizionali. Tuttavia, l'impatto che il ridotto scorrimento può avere su queste perdite non è scontato e deve essere valutato caso per caso: ad es., occorre tener conto del fatto che i rotorì pressofusi in rame presentano una minore resistenza tra barre, il che può portare a maggiori perdite nel ferro e addizionali.

In generale, passando da un rotore in alluminio a un rotore in rame, a parità di tutto il resto, si può migliorare il rendimento al massimo del 3% (per piccoli motori).

$$s_{C_{max}} \cong \frac{R'_2}{X_{dot}}$$

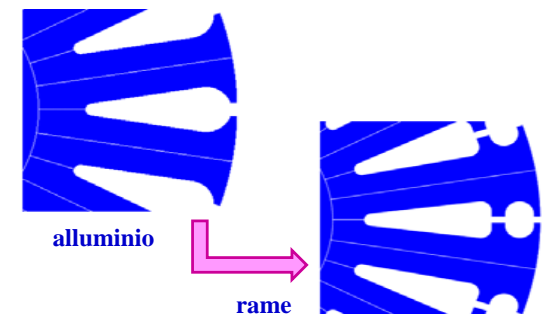
39

Ottimizzazione del design della cava di rotore

L'ottimizzazione del design risiede principalmente nel progettare la forma della cava di rotore più adatta al materiale conduttore impiegato.

Si osserva infatti che, passando da un rotore in alluminio ad un rotore in rame, mantenendo stessa forma e stessa dimensione della cava, si riduce la resistenza di rotore e, di conseguenza, si ha una maggiore corrente all'avviamento e una ridotta coppia all'avviamento: queste ultime sono da considerarsi condizioni svantaggiose.

Pertanto, se ad es. il rotore originale in alluminio aveva cave del tipo a gabbia singola, si possono ottenere miglioramenti, in termini di minore corrente all'avviamento e maggiore coppia all'avviamento, adottando per il rotore in rame la doppia gabbia:



40

Rotore in rame e ottimizzazione della cava

CASI	Coppia allo spunto [Nm]	Corrente allo spunto [A]	Perdite ohmiche di statore [W]	Perdite ohmiche nelle barre di rotore [W]	Perdite nel ferro compressive [W]	Perdite addizionali [W]	Perdite per attrito e ventilazione [W]	Rendimento [%]	
Rotore in alluminio	65,53	52,82	568,7	138,8	88,87	69,2	35,5	88,6	IE1
Rotore in rame	61,77	54,6	538,5	76,39	88,83	69,2	35,5	89,2	IE2
Rotore in rame a doppia gabbia	82,26	42,1	380,2	117,7	89,4	69,2	35,5	90,7	IE3

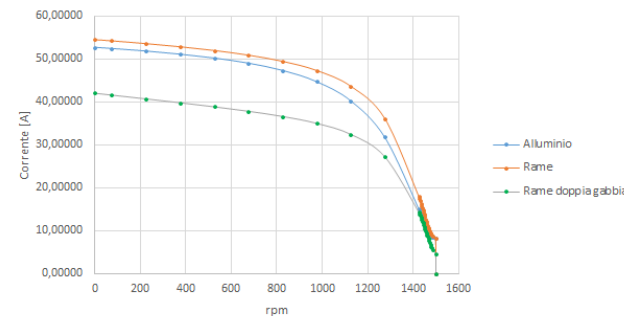
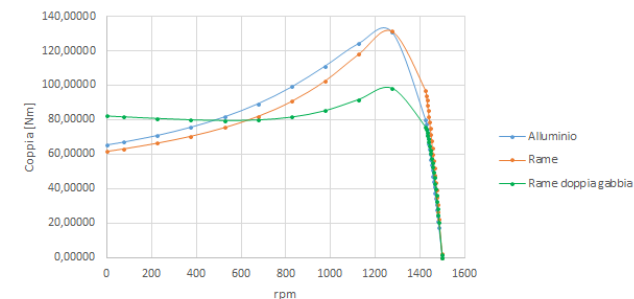
Risultati ottenuti con simulazioni in FLUX nella tesi di laurea magistrale di Cecilia Brenna, Aprile 2015 (Nota: le perdite addizionali e per attrito e ventilazione sono state mantenute costanti).

41

Rotore in rame e ottimizzazione della cava

Motore asincrono trifase:

- ✓ Potenza nominale $P_n = 7,5 \text{ kW}$
- ✓ Tensione nominale $V_n = 400 \text{ V}$
- ✓ Frequenza nominale $f = 50 \text{ Hz}$
- ✓ 4 poli, collegamento a stella.



Come svantaggio del rotore in rame a doppia gabbia, si osserva una riduzione della coppia massima, dovuta alla aumentata reattanza di dispersione nel funzionamento a carico nominale.

42

Allungamento del nucleo

Per comprendere gli effetti dell'allungamento del nucleo, occorre ricordare alcune equazioni che regolano il funzionamento dei motori asincroni.

Innanzitutto la f.e.m. di statore è data da: $E_{10} = K_1 \Phi f N_1$

dove Φ è il valore massimo del flusso per polo, che può essere espresso come:

$$\Phi = B_{MAX} \frac{LD}{\text{traferro} \cdot p_p} \quad (\text{relazione dimostrata nella dispensa 18})$$

dove: L = lunghezza ferro di statore, D = diametro interno statore.

Un parametro importante sia per i costruttori che per gli utilizzatori, che si cerca di mantenere invariato, è l'altezza d'asse del motore, la quale è strettamente legata al diametro del motore stesso e quindi a D . Ipotizzando pertanto di non variare D , e naturalmente nemmeno il numero di paia poli p_p , né la frequenza f , si ha:

$$V_{1f} \propto E_{10} \propto B_{MAX} \cdot L \cdot N_1$$

43

Allungamento del nucleo

Riprendiamo ora il concetto di potenza elettromagnetica trasmessa da statore al rotore, che abbiamo espresso come:

$$P_{em} = 3 \frac{R_2}{s} I_2^2 = C_{em} \omega_0 \quad \omega_0 = 2\pi f / p_p$$

Facendo riferimento al circuito equivalente e al diagramma vettoriale, la stessa potenza può anche essere espressa come:

$$P_{em} = 3E_{20}I_2 \cos \varphi_2$$

dove: $E_{20} = K_2 \Phi f N_2$ \rightarrow $P_{em} = 3K_2 \Phi f N_2 I_2 \cos \varphi_2$

Supponendo di non variare il numero di barre di rotore N_2 , né la loro sezione (ossia, mantenendo inalterata la geometria del lamierino), è possibile affermare che la coppia dipende dai seguenti parametri:

$$C_{em} \propto B_{MAX} \cdot L \cdot J_2$$

dove J_2 è la densità di corrente nelle barre di rotore.

44

Allungamento del nucleo

Consideriamo quindi le due relazioni di proporzionalità trovate (usiamo per semplicità B al posto di $B_{MAXtraferro}$):

$$\begin{aligned} V_{1f} &\propto B \cdot L \cdot N_1 \\ C_{em} &\propto B \cdot L \cdot J_2 \end{aligned}$$

Supponiamo ora di voler riprogettare un motore avente altezza d'asse uguale a quella iniziale, uguale frequenza, uguale numero di paia poli, stessa tensione di alimentazione e stessa coppia nominale. Indichiamo con un apice le grandezze relative al nuovo motore e introduciamo i seguenti rapporti adimensionali:

$$\lambda = \frac{L'}{L} \quad \beta = \frac{B'}{B} \quad \sigma = \frac{J_2'}{J_2} \quad \nu = \frac{N_1'}{N_1}$$

$$\begin{aligned} \beta \cdot \lambda \cdot \nu &= 1 \\ \beta \cdot \lambda \cdot \sigma &= 1 \end{aligned} \quad \Rightarrow \quad \nu = \sigma$$

45

Allungamento del nucleo

L'ultima identità trovata ha come conseguenza che, una volta definita la nuova lunghezza d'asse L' , solo uno degli altri parametri considerati può essere scelto in modo indipendente. Poiché il numero di conduttori per fase di statore può essere variato solo come multiplo del numero di cave per fase, è conveniente considerare come parametro indipendente N'_1 (e quindi ν). Di conseguenza si ha:

$$\beta = \frac{1}{\lambda \cdot \nu} \quad \sigma = \nu$$

Sulla base di queste equazioni e di studi recenti in letteratura, si può affermare che un aumento della lunghezza del nucleo di statore e di rotore produce una limitata riduzione dell'induzione al traferro B e una più consistente riduzione del numero di conduttori per fase di statore N_1 . Ad es:

$$\lambda = 1,16 \quad \beta = 0,96 \quad \sigma = \nu = 0,90$$

46

Allungamento del nucleo

Variando i parametri del motore come indicato, si ottiene che, contrariamente alle aspettative, le perdite nel ferro non diminuiscono, anzi, aumentano leggermente.

Questo è dovuto al fatto che le perdite nel ferro non dipendono solo dal valore dell'induzione (che è calato leggermente), ma anche dal volume del ferro, che invece aumenta maggiormente.

Al contrario, diminuiscono le perdite per effetto Joule sia di statore sia di rotore, in quanto:

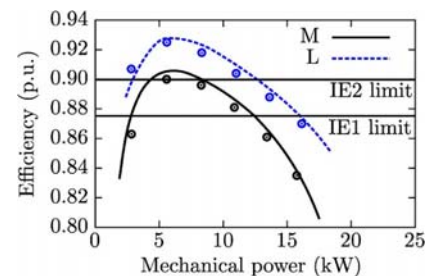
- diminuisce il numero di conduttori N_1 di statore e aumenta la loro sezione (perché c'è più spazio libero in cava) e quindi diminuisce complessivamente la resistenza dell'avvolgimento di statore;
- diminuisce la densità di corrente di rotore J_2 .

Si noti che questa conclusione non è generalizzabile in assoluto, ma è sensato considerarla verosimile per la maggior parte dei motori asincroni industriali.

47

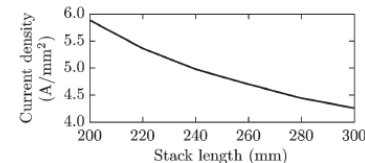
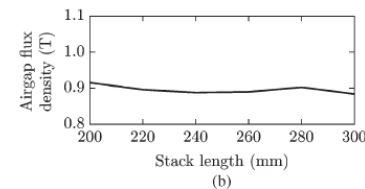
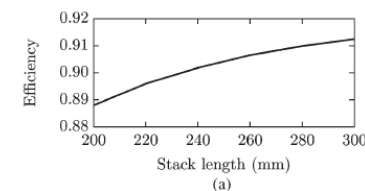
Allungamento del nucleo

L. Alberti, N. Bianchi, A. Boglietti, A. Cavagnino, "Core axial lengthening as effective solution to improve the induction motor efficiency classes", *IEEE Trans. Industry Applications*, Vol. 50, No. 1, 2014.



(M curve) Original motor and (L curve) prototype. Efficiency versus the mechanical power (lines: simulations; dots: measurements).

Il motore analizzato ha potenza nominale 11 kW, tensione 400 V, 4 poli, frequenza 50 Hz.



48

Come migliorare il rendimento

IE1
rotore con barre in rame e anelli di cortocircuito in alluminio

IE2
allungamento del nucleo statorico

IE3

La strategia adottata ad esempio da Siemens consiste nell'aver investito in tecnologie in grado di incrementare il rendimento dei motori asincroni senza stravolgerne la forma costruttiva, contenendo quindi costi e tempi di commercializzazione.



49

Come migliorare il rendimento

$P_n = 7,5 \text{ kW}$	Motore IE1	Motore IE2	Motore IE3
Corrente nominale [A]	15,2	14,7	14,3
Coppia nominale [Nm]	49	49	49
Corrente allo spunto [A]	100,32	101,4	105,8
Coppia allo spunto [Nm]	127,4	112,7	117,6
Coppia massima [Nm]	151,9	144	172
Fattore di potenza	0,82	0,83	0,84
Rendimento [%]	86	88,7	90,4

IE1 vs. IE2

- Leggero incremento della corrente in avviamento;
- Riduzione della coppia allo spunto e della coppia massima.

IE2 vs. IE3

- Ulteriore incremento della corrente in avviamento;
- Leggero aumento della coppia allo spunto;
- Aumento della coppia massima;
- Ulteriore incremento del fattore di potenza.

50

Come migliorare il rendimento

Quindi, un motore a rendimento maggiore:

- è più costoso;
- può richiedere un impiego di una quantità maggiore dei materiali (ferro, rame, alluminio) e presentare di conseguenza un volume maggiore.

Considerato che il costo operativo annuo di un motore in funzionamento continuo può essere circa 8÷9 volte il costo iniziale del motore stesso, si può intuire che i tempi di ritorno dell'investimento di un motore ad alta efficienza siano estremamente ridotti.

	Motore da 11 kW, IE1		Motore da 11 kW, IE2	
	Kg medi per kW	Tolleranza	Kg medi per kW	Tolleranza
Acciaio elettrico	3,60	-	4,80	-
Altri acciai	0,95	-	1,00	-
Ghisa	1,30	0,0 - 2,0	1,30	0,0 - 2,0
Alluminio	0,90	0,2 - 1,5	1,00	0,25 - 1,8
Rame	0,64	-	0,90	-
Materiale isolante	0,02	-	0,02	-
Materiale da imballaggio	0,90	-	0,90	-
Resina di impregnazione	0,10	-	0,10	-
Vernice	0,05	-	0,05	-

51

Come migliorare il rendimento

Ulteriori metodi per migliorare il rendimento, oltre a quelli già considerati:

Perdite nel ferro: si possono ridurre utilizzando lamierini con cifra di perdita più bassa (migliore qualità e minore spessore).

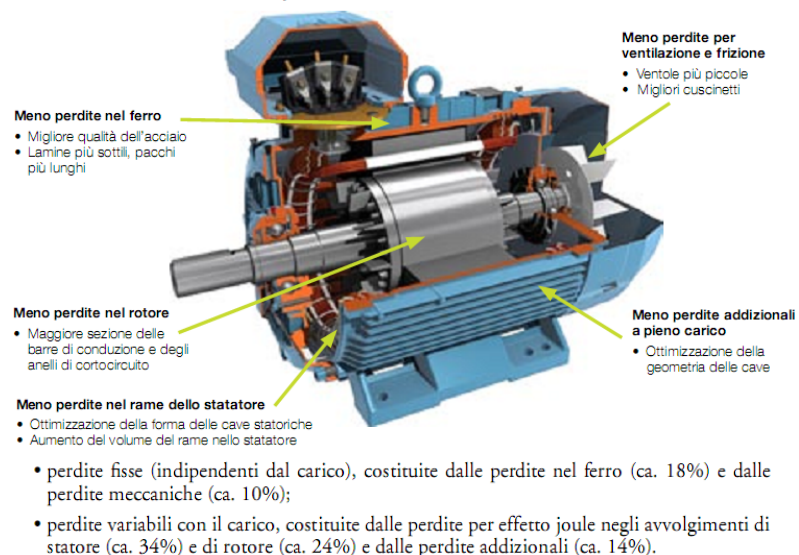
Perdite negli avvolgimenti: si possono ridurre aumentando la sezione degli avvolgimenti (oltre che di statore) anche di rotore (e quindi anche degli anelli di corto circuito), modificando il numero di cave di rotore e la loro sezione. Risultati simili a quelli ottenuti con l'allungamento del nucleo si possono ottenere aumentando i diametri dei lamierini di statore e rotore, modificando però l'altezza d'asse del motore.

Perdite per attrito e ventilazione: si possono ridurre con una ventola più piccola o con maggiore efficienza e con cuscinetti a rendimento maggiore (minore attrito). Togliendo le alettature sugli anelli di cortocircuito si riducono le perdite per attrito e ventilazione, ma possono peggiorare le condizioni termiche, quindi questa scelta potrebbe essere controproducente.

52

Come migliorare il rendimento

La riduzione delle perdite fisse e variabili nei motori ABB



53

Esempi di rendimento dei motori asincroni

Si riportano di seguito i risultati ottenuti, tramite simulazioni software e prove sperimentali, su motori asincroni trifase a gabbia di scoiattolo:



- o Potenza nominale 1,5 kW
- o Numero di poli 4
- o Numero di cave statore 36
- o Gabbia in alluminio 46 barre
- o Tensione di alimentazione 400 V
- o Frequenza 50 Hz
- o Coppia nominale 10,4 Nm
- o Lunghezza pacco statorico 100 mm
- o Avvolgimento a matasse concentriche a singolo strato
- o Collegamento a stella
- o Conduttore statore in rame \varnothing 0,85 mm

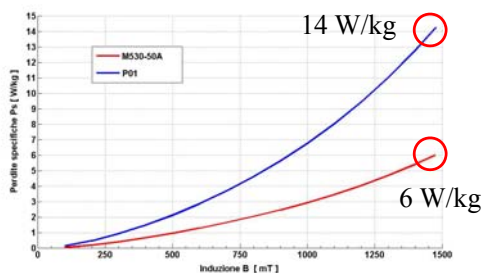
Risultati ottenuti con simulazioni in SPEED e prove sperimentali presso SPIN, nella tesi di laurea magistrale di Christian Lorusso, Aprile 2010

54

Esempi di rendimento dei motori asincroni

I due motori presi in esame sono perfettamente identici, tranne che per i lamierini utilizzati per la realizzazione dello statore e del rotore, differenti sia nel materiale che nello spessore:

- lamierini in ferro P01 spessore $\delta = 0,65$ mm
- lamierini in lega ferro silicio M530-50 A spessore di $\delta = 0,5$ mm



Perdite specifiche alla frequenza di 50 Hz, in funzione dell'induzione B

55

Esempi di rendimento dei motori asincroni

Risultati delle simulazioni con il programma SPEED per il motore con statore e rotore in ferro **P01** alla potenza resa nominale di 1500 W:

Grandezze rilevate	$T_{avv} = 20^\circ\text{C}$	$T_{avv} = 100^\circ\text{C}$
Coppia all'albero [Nm]	10,1	10,4
Corrente di fase [A]	3,31	3,54
Potenza assorbita [W]	1929,9	2123,3
Perdite per eff. Joule [W]	381,0	577,3
Perdite nel ferro [W]	30,8	27,9
Perdite aggiuntive [W]	18,2	18,2
Rendimento	77,72 %	70,64 %
Cos φ	0,8415	0,8661

56

Esempi di rendimento dei motori asincroni

Risultati delle simulazioni con il programma SPEED per il motore con statore e rotore in lega **M530-50A** alla potenza resa nominale di 1500 W:

Grandezze rilevate	$T_{avv} = 20\text{ °C}$	$T_{avv} = 100\text{ °C}$
Coppia all'albero [Nm]	10,1	10,4
Corrente di fase [A]	3,23	3,46
Potenza assorbita [W]	1897,3	2084,3
Perdite per eff. Joule [W]	365,8	554,0
Perdite nel ferro [W]	13,4	12,1
Perdite addizionali [W]	18,2	18,2
Rendimento	79,06 %	71,96 %
Cosφ	0,8474	0,8706

57

Esempi di rendimento dei motori asincroni

I due motori analizzati sono stati testati al banco prova e i risultati ottenuti sono stati confrontati con quelli delle simulazioni:

Motore in P01			Motore in M530-50A		
Grandezze	Risultati Sperimentali	Risultati Simulati	Grandezze	Risultati Sperimentali	Risultati Simulati
Tensione	395,2 V	400 V	Tensione	397,7 V	400 V
Frequenza	50,01 Hz	50 Hz	Frequenza	49,98 Hz	50 Hz
Corrente di fase	3,48 A	3,31 A	Corrente di fase	3,31 A	3,23 A
Potenza resa	1526 W	1500 W	Potenza resa	1548 W	1500 W
Potenza assorbita	1997 W	1929,9 W	Potenza assorbita	1929 W	1897,3 W
Rendimento	76,41 %	77,72 %	Rendimento	80,25 %	79,06 %
Cosφ	0,836	0,8415	Cosφ	0,822	0,8474

58

Esempi di rendimento dei motori asincroni

Si osserva che, in generale e soprattutto per un motore di piccola taglia, le perdite nel ferro non sono particolarmente rilevanti, per cui la modifica del tipo di lamierino non incide fortemente sull'aumento del rendimento del motore.

Si è quindi deciso di prendere in esame il motore precedentemente modellizzato e utilizzare il software SPEED per valutare altre possibili modifiche per migliorare l'attuale livello di efficienza.

Modifiche ipotizzate:

- ✚ Aumento della sezione del conduttore dell'avvolgimento di statore e diminuzione del numero di spire delle bobine.
- ✚ Aumento del numero e diminuzione della sezione delle barre di rotore.
- ✚ Diminuzione del numero e aumento della sezione delle barre di rotore.
- ✚ Aumento della lunghezza del pacco statorico.

59

Esempi di rendimento dei motori asincroni

	Motore originale	Variante 1	Variante 2
Barre rotoriche	46	44	48
Spire bobina statore	50	47	45
Lunghezza pacco statorico	100 mm	102 mm	107 mm
Valori rilevati			
Diametro conduttore di statore	0,85 mm	0,88 mm	0,9 mm
Sezione barre rotore	22,1 mm ²	24,4 mm ²	20,1 mm ²
Coppia all'albero	10,4 Nm	10,1 Nm	10,2 Nm
Corrente di fase	3,46 A	3,32 A	3,33 A
Potenza assorbita	2084,3 W	1948,9 W	1928,2 W
Perdite per effetto Joule	554,0 W	415,9 W	394,4 W
Perdite nel ferro	12,1 W	14,7 W	15,7 W
Rendimento	71,96 %	76,97 %	77,79 %

Simulazioni condotte per una potenza resa di 1500 W e $T_{avv} = 100\text{ °C}$.

60

Esempi di rendimento dei motori asincroni

	Variante 3	Variante 4	Variante 5
Spire bobina statore	45	43	43
Lunghezza pacco statorico	107 mm	107 mm	115 mm
Materiale lamierino	M530-50A	M250-50A	M530-50A
Valori rilevati			
Diametro conduttore di statore	0,9 mm	0,93 mm	0,93 mm
Coppia all'albero	10,2 Nm	10,1 Nm	10,1 Nm
Corrente di fase	3,33 A	3,41 A	3,30 A
Potenza assorbita	1928,2 W	1900,9 W	1893,3 W
Perdite per eff. Joule	394,4 W	368,2 W	358,8 W
Perdite nel ferro	15,7 W	14,5 W	16,5 W
Rendimento	77,79 %	78,9 %	79,22 %

Simulazioni condotte per una potenza resa di 1500 W e $T_{avv} = 100$ °C.

61

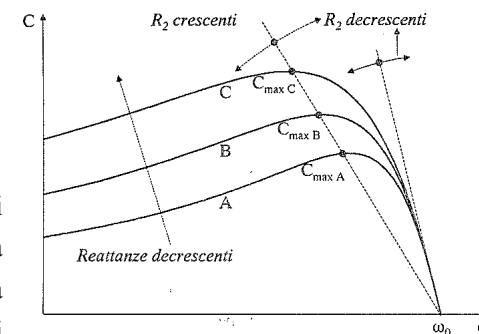
Altre osservazioni sui motori asincroni

Si osserva che, nella caratteristica elettromeccanica dei motori asincroni, il punto di coppia massima si sposta, al variare della reattanza di dispersione totale, su una retta la cui pendenza dipende da R_2 : diminuendo R_2 , la pendenza di questa retta aumenta e i punti di massima coppia si spostano verso destra.

$$s_{C_{\max}} \cong \frac{R'_2}{X_{dot}} \quad C_{\max} \cong \frac{3p_p}{\omega} \frac{V_{eq}^2}{2X_{dot}}$$

$$\rightarrow \frac{C_{\max}}{s_{C_{\max}}} \cong \frac{3p_p}{\omega} \frac{V_{eq}^2}{2R'_2}$$

Si noti infine che una bassa reattanza di dispersione aumenta il valore di coppia massima, ma anche i valori di corrente a parità di scorrimento, col rischio di correnti di avviamento troppo elevate (se non vengono presi ulteriori provvedimenti).



L. Ferraris, "Macchine elettriche, parte seconda", ed. CLUT, 1999.

62

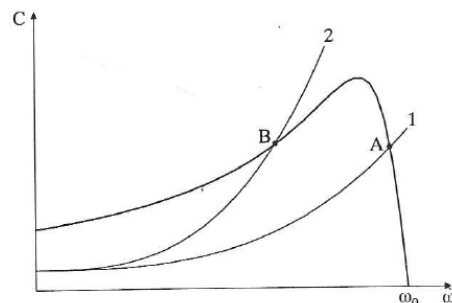
Altre osservazioni sui motori asincroni

Per quanto riguarda la stabilità del punto di lavoro, nella maggior parte dei casi risulta evidente che i punti di lavoro stabili siano quelli a destra della coppia massima, nel tratto a pendenza negativa.

In altri casi, come quello illustrato in figura, può accadere che un punto a sinistra della coppia massima sia stabile (punto B di intersezione con la coppia resistente n° 2).

Il punto B è stabile, ma presenta uno scorrimento elevato e quindi una corrente elevata:

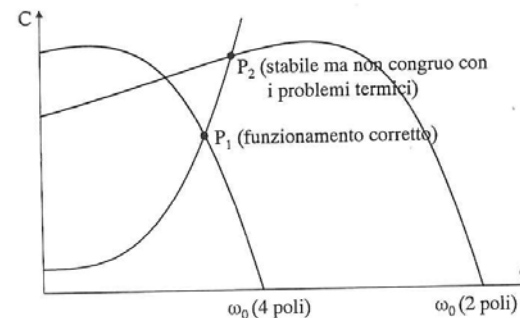
in queste condizioni il motore potrebbe essere soggetto ad un surriscaldamento pericoloso, incompatibile con il buon funzionamento della macchina (ricordiamo che $P_{J2} = sP_{em}$).



63

Altre osservazioni sui motori asincroni

La situazione precedente potrebbe verificarsi nel caso in cui sia stata scelta una macchina utilizzatrice con caratteristiche inadeguate, ad es. quando si sia pensato all'accoppiamento di una pompa con un motore asincrono a 4 poli, facendola invece funzionare con un asincrono a 2 poli, come illustrato in figura.



L. Ferraris, "Macchine elettriche, parte seconda", ed. CLUT, 1999.

64

Altre osservazioni sui motori asincroni

Infine, si osserva che in tutta la trattazione si è assunto che i parametri della macchina rimangano costanti. In realtà essi variano durante il funzionamento della macchina:

- le resistenze aumentano all'aumentare della temperatura;
- la reattanza di dispersione diminuisce all'aumentare della corrente, quando questa diventa molto maggiore di quella nominale, perché la relazione tra flusso e corrente non è più lineare (ricordiamo che $L = \Psi/i$).

Di conseguenza, al di sopra della corrente nominale, a valori più o meno grandi a seconda dello specifico motore, la caratteristica elettromeccanica si modifica come se diminuisse la sua reattanza.

