



Il motore asincrono (2° parte): aspetti costruttivi

Lucia FROSINI

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

Materiali usati per i motori asincroni

Ferro di tipo "strutturale"
(acciaio, ghisa):
carcasse, corpo del
rotore, alberi, cuscinetti,
flange, ecc.



Ferro di tipo magnetico:
leghe di ferro magnetico
dolce (ferro-silicio):
lamierini per il nucleo.



Materiali usati per i motori asincroni

Rame:
avvolgimenti.



Materiali isolanti:
carta, resine,
poliammide, ...



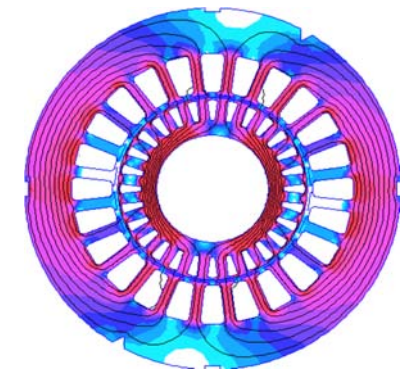
Alluminio:
avvolgimenti,
barre di rotore,
carcassa.



Caratteristiche costruttive dei motori asincroni

Lo statore e il rotore dei motori asincroni sono entrambi realizzati tramite impaccamento di lamierini di ferro-silicio (solitamente a cristalli non orientati), in quanto destinati entrambi ad essere percorsi da un flusso generato dalle correnti alternate che scorrono negli avvolgimenti di statore e di rotore.

Sia lo statore che il rotore presentano, in prossimità del traferro, delle scanalature (dette "cave") destinate a contenere gli avvolgimenti: le cave dei motori asincroni sono generalmente di tipo semichiuso sia per lo statore che per il rotore. Per rotore a gabbia pressofuso, possono essere anche chiuse. Per rotore a gabbia a barre saldate sono di tipo aperto. Per statori di grande potenza, possono essere di tipo aperto da chiudersi con biette. Le parti in ferro tra due cave contigue sono chiamate "denti" e servono per convogliare il flusso da statore a rotore (e viceversa).



Esempio di andamento delle linee di flusso in un motore asincrono

Caratteristiche costruttive dei motori asincroni

I lamierini con cui vengono realizzate le corone di statore e rotore, complete di cave, sono tranciati a partire dallo stesso foglio di lamiera e vengono impilati nel numero sufficiente a ottenere la lunghezza desiderata della parte attiva del motore.

La cavità interna del pacco lamellare di statore e la superficie esterna del rotore vengono sottoposte a tornitura, per correggere eventuali imperfezioni e assicurare la perfetta centratura del rotore (il traferro è nell'ordine di $0,3 \div 3$ mm).

I pacchi lamellari statorico e rotorico possono essere continui o, per potenze maggiori, interrotti da **canali di ventilazione trasversali** con opportuni distanziatori.

Il pacco rotorico viene reso solidale all'albero con accoppiamenti meccanici, mentre il pacco statorico è inserito in una **carcassa** metallica di **acciaio, ghisa o alluminio**.

Al fine di favorire lo smaltimento del calore prodotto dalle perdite di potenza, la carcassa è quasi sempre **alettata** e sull'albero è calettata una **ventola**.

Per potenze elevate, è necessario dotare il motore di uno **scambiatore di calore**.

5

Caratteristiche costruttive dei motori asincroni

Molto spesso, al fine di ridurre disturbi durante il funzionamento del motore, al pacco di lamiere di rotore (più raramente al pacco di statore) viene data una rotazione continua, in modo che ciascun lamierino si presenti leggermente ruotato di un piccolo angolo rispetto al precedente: così si ottengono strutture a **cave inclinate**.

Per evitare l'impuntamento del rotore, che tenderebbe a bloccarsi in posizione di minima riluttanza (denti di statore e rotore affacciati), il numero di cave di statore è sempre diverso da quello di rotore.

L'avvolgimento di statore è trifase, mentre quello di rotore può essere trifase avvolto o a gabbia.



6

Caratteristiche costruttive dei motori asincroni

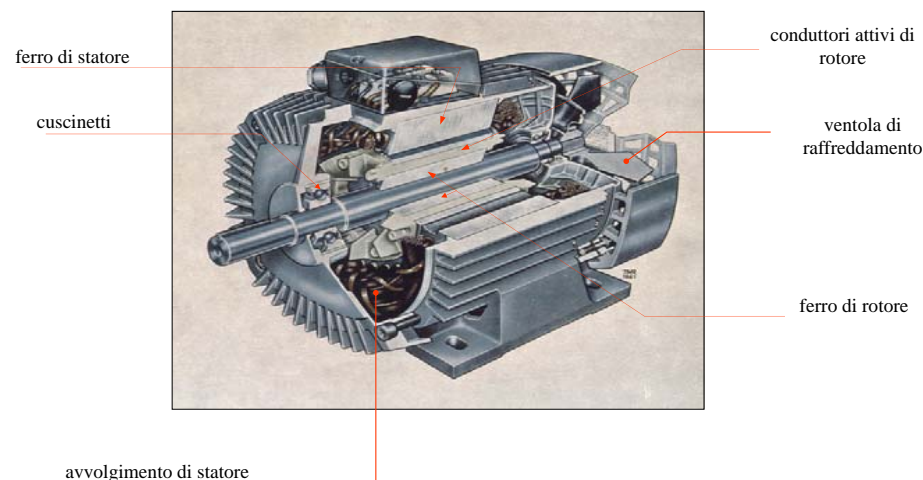
Principali componenti del motore precedente:

1. Statore con avvolgimenti, inserito nella carcassa, con morsettiera per collegamenti elettrici;
2. Rotore pressofuso a gabbia di scoiattolo, a barre inclinate;
3. Cuscinetto a sfere;
4. Scudo;
5. Viti per il fissaggio degli scudi allo statore;
6. Ventola di raffreddamento;
7. Copri-ventola.



7

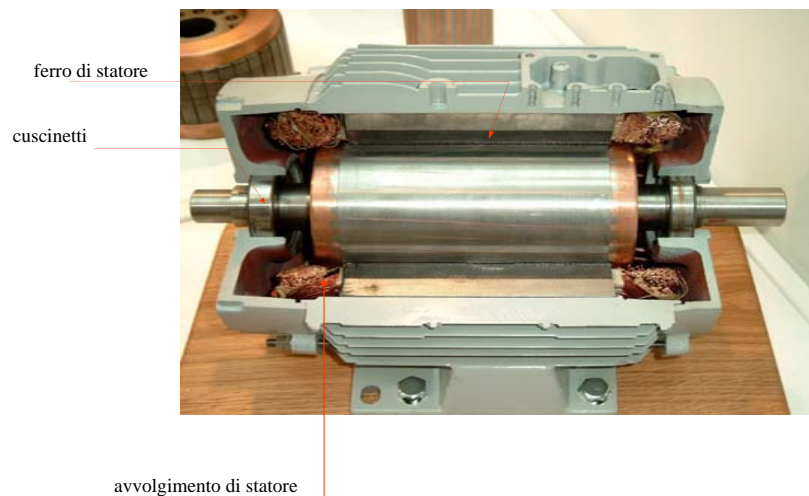
Caratteristiche costruttive dei motori asincroni



Spaccato di motore di piccola-media potenza con rotore pressofuso a gabbia

8

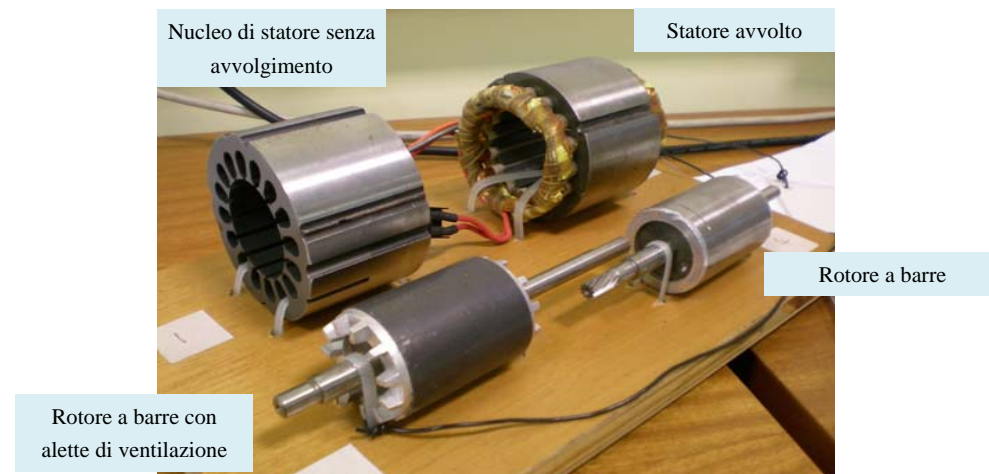
Caratteristiche costruttive dei motori asincroni



Spaccato di motore di piccola potenza con rotore pressofuso a gabbia di rame

9

Caratteristiche costruttive dei motori asincroni



Diverse parti di motori di piccola potenza con rotore a gabbia

10

Pacco lamellare statorico



Statore di motore di piccola potenza



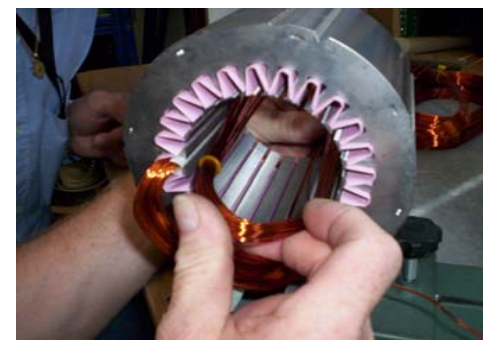
11

Avvolgimento di statore dei motori asincroni

Per motori di piccola-media potenza, alimentati in bassa tensione, l'avvolgimento di statore è tipicamente costituito da bobine in filo o in piattina di rame smaltato.

I lati attivi delle bobine vengono inseriti nelle cave attraverso le aperture che devono avere larghezza adeguata a favorire l'operazione.

I principi e le fini di ciascuna fase vengono riportati alla morsettiera, posta sulla carcassa.

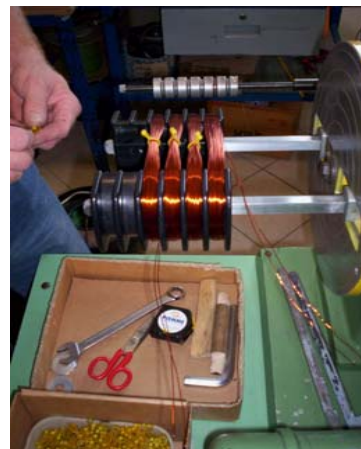


12

Preparazione delle bobine di statore

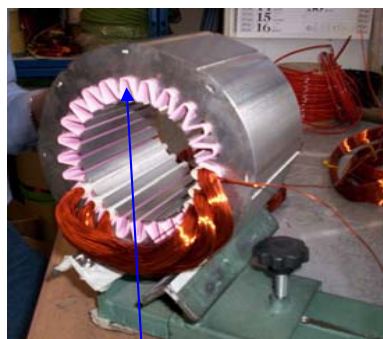


Preparazione bobine di statore e loro inserimento



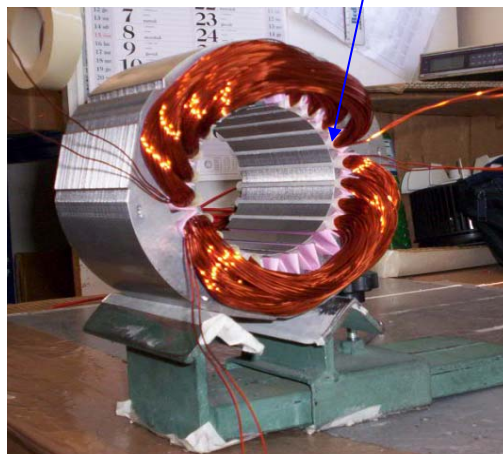
Inserimento primo strato di bobine di statore

Inserimento delle bobine (primo strato) nelle cave di statore:



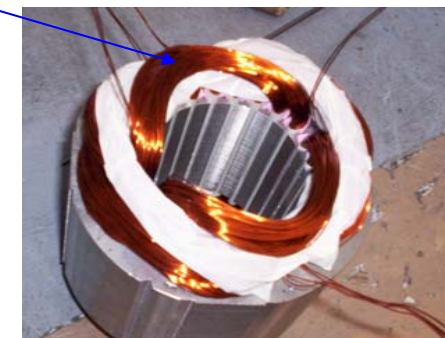
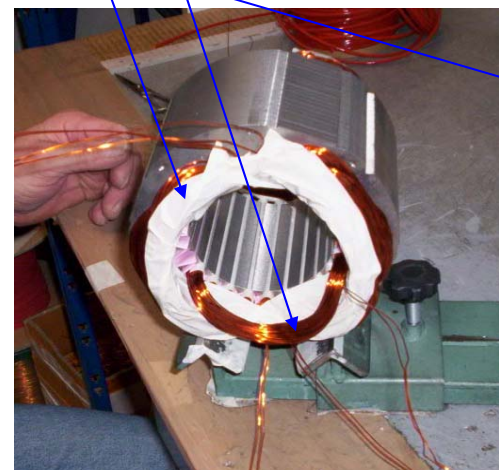
Isolamento delle cave con carta isolante

Chiusura della parte superiore del primo strato di bobine con carta isolante



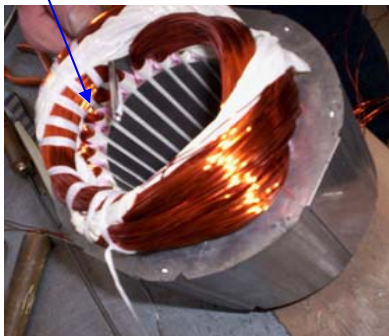
Inserimento secondo strato di bobine di statore

Isolamento delle bobine del primo strato con isolante adesivo e inserimento delle bobine del secondo strato:

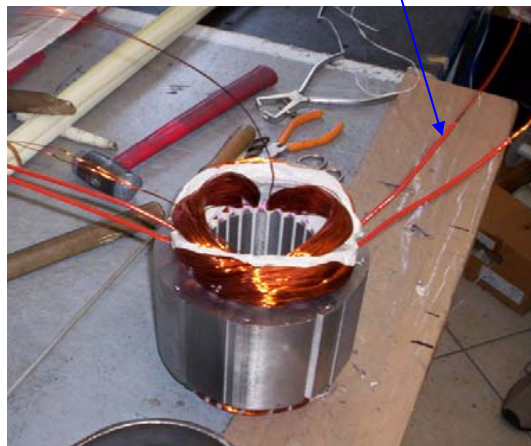


Finitura avvolgimento di statore

Legatura delle bobine con filo di nylon:



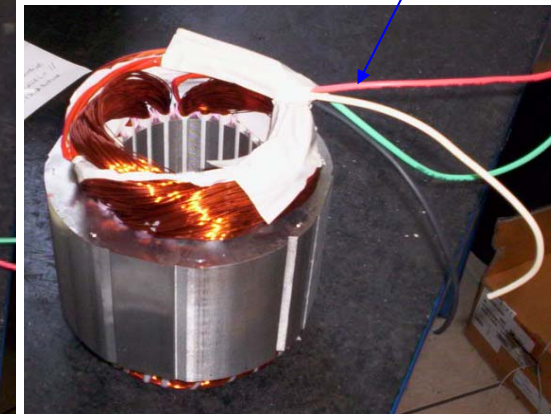
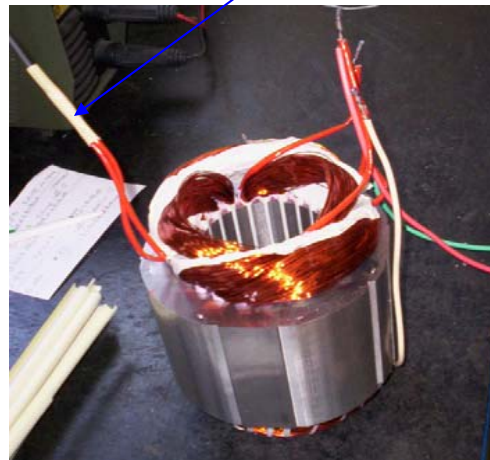
Inserimento delle guaine per ottenere le uscite per le tre fasi:



17

Finitura avvolgimento di statore

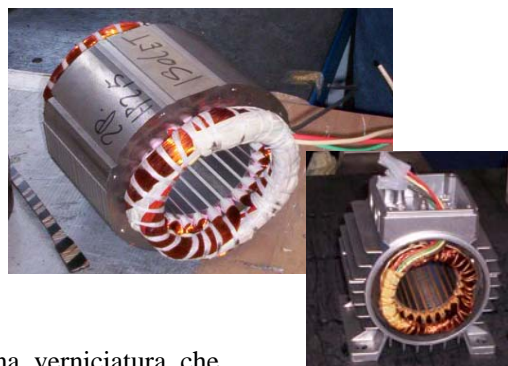
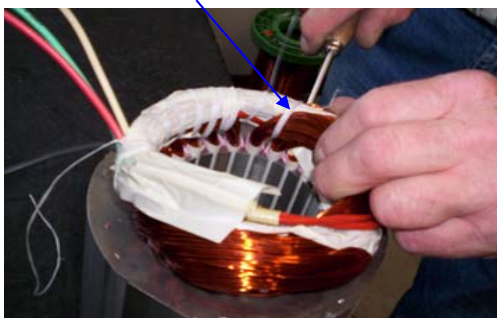
Posizionamento degli spinotti in gomma e raggruppamento dei tre cavi che andranno a collegarsi all'alimentazione:



18

Finitura avvolgimento di statore

Seconda legatura con filo di nylon e compattamento degli avvolgimenti:



Alla fine lo statore viene sottoposto a una verniciatura che conferisce resistenza agli stress ambientali (es. umidità), stabilità meccanica, ecc. In molti casi, lo statore subisce poi una impregnazione in resina, che può essere eseguita sottovuoto o tramite altri processi. Molto meno frequente è il processo di inglobamento in resina, che richiede uno stampo apposito.



19

Collegamenti esterni ai morsetti

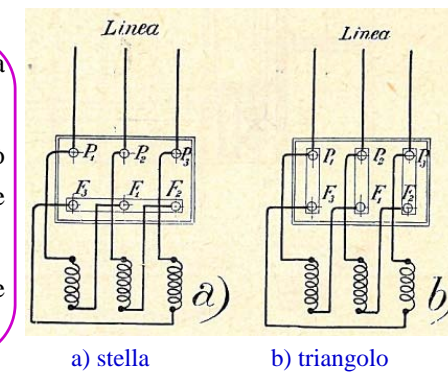
Le fasi ultimate possono essere collegate a stella o a triangolo.

Generalmente, i principi (P) e le fini (F) delle tre fasi vengono riportati a 6 morsetti situati sulla carcassa e coperti da una scatola: in questo modo è semplice cambiare il collegamento tra le fasi, modificando le connessioni tra i morsetti.

Con una barretta orizzontale si ottiene il collegamento a stella e con tre barrette verticali il collegamento a triangolo.

Se ad es. ciascuna fase è dimensionata per una tensione di 230 V:

- con connessione a triangolo, il motore può essere alimentato da rete trifase con tensione concatenata 230 V;
- con connessione a stella, il motore può essere alimentato con tensione concatenata 400 V.



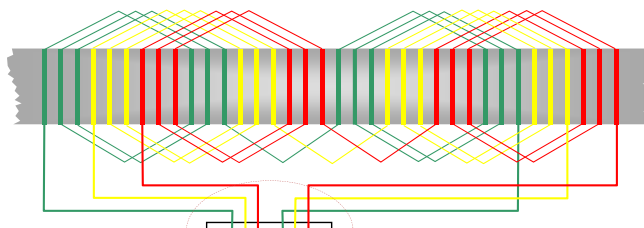
a) stella

b) triangolo

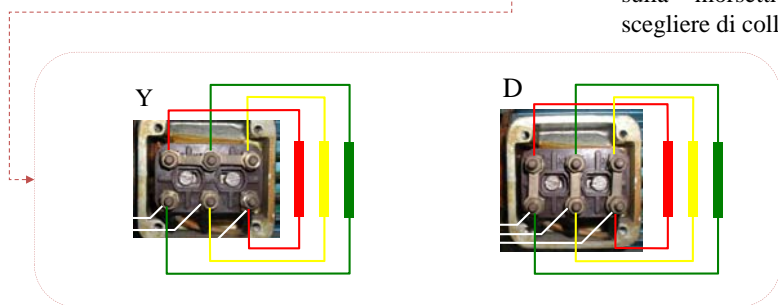
20

Collegamenti esterni ai morsetti

Avvolgimento trifase di statore, embricato, passo intero, 4 poli, 3 cave per polo e per fase.



I principi e le fini di ciascun avvolgimento di fase sono riportati sulla morsetteria: qui si può scegliere di collegarli a Y o D.

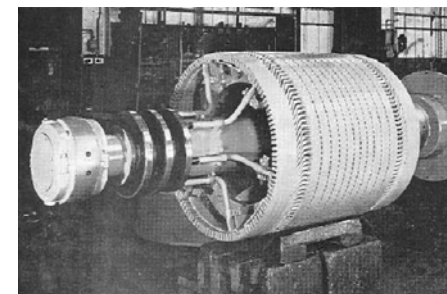
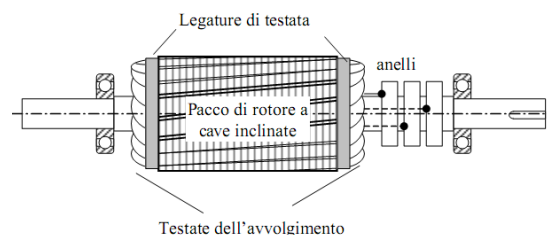


21

Rotori dei motori asincroni

Esistono due tipologie di avvolgimento di rotore: avvolto e a gabbia.

Nel caso di rotore avvolto, l'avvolgimento è trifase, realizzato con bobine inserite nelle cave e collegato generalmente a stella: esso deve avere lo stesso numero di polarità dello statore. Questo tipo di rotore presenta tre anelli a cui fanno capo i terminali liberi delle tre fasi di rotore e permette di accedere agli avvolgimenti rotorici attraverso dei contatti striscianti (spazzole), per l'inserimento di resistenze che possono essere necessarie all'avviamento.



22

Motori a rotore avvolto (*wound rotor o slip-ring*)

Attualmente motori asincroni a rotore avvolto vengono costruiti quasi esclusivamente per grosse taglie di potenza e tensione e/o dove si realizza una regolazione di velocità del motore con interventi sull'avvolgimento rotorico: ad es., nelle applicazioni industriali per materiale da costruzione (cementifici), nelle cave e nelle miniere in processi di estrazione. Le principali caratteristiche dei motori a rotore avvolto sono:

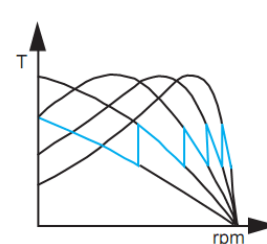
- Alta affidabilità ed efficienza, sia per applicazioni a velocità costante che per applicazioni a velocità variabile in condizioni operative gravose;
- Elevata coppia di spunto;
- Bassa corrente di spunto.

L'avviamento è ottenuto con l'impiego di un reostato: alla partenza, esso è completamente inserito, in modo da ridurre la corrente di spunto e aumentare la coppia. All'aumentare della velocità, il reostato viene gradualmente disinserito fino al completo distacco.

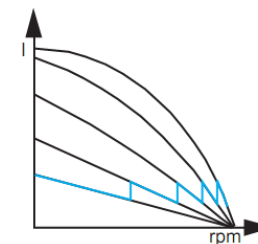
23

Motori a rotore avvolto (*wound rotor o slip-ring*)

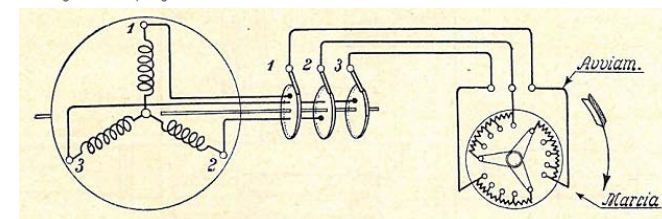
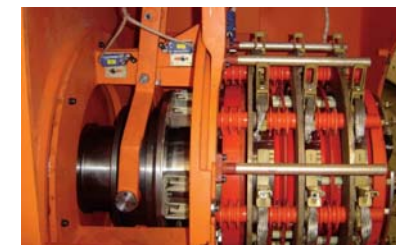
Tramite il reostato di avviamento, il motore lavora su caratteristiche meccaniche con resistenza di rotore di volta in volta decrescente. In questo modo l'avviamento può essere realizzato con coppia relativamente elevata e corrente relativamente bassa.



Torque diagram for a slip-ring motor



Current diagram for a slip-ring motor



4

Raffreddamento dei motori a rotore avvolto

Il collegamento fra gli anelli calettati sull'albero e il reostato è protetto da un vano collettore (da non confondere con il collettore della macchina in c.c.). Nel seguente esempio, questo vano è raffreddato con un piccolo scambiatore aria-aria a tubi, posizionato sopra di esso; l'aria nei tubi viene mossa tramite ventole.

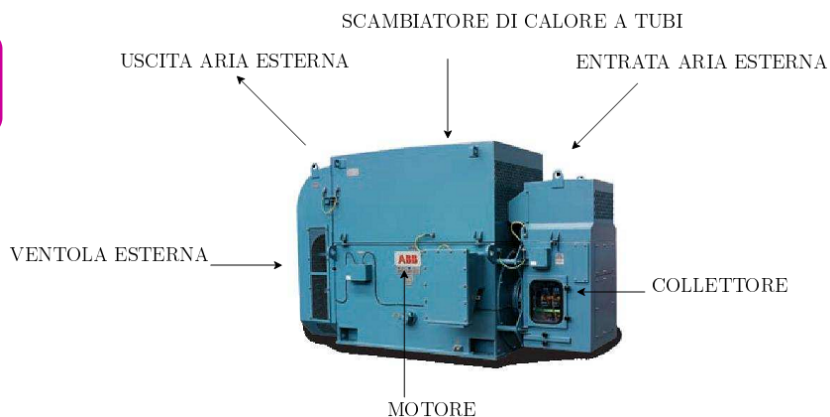
Esempio:

$$V_n = 10 \text{ kV}$$

$$P_n = 950 \text{ kW}$$

$$f_n = 50 \text{ Hz}$$

4 poli



Raffreddamento dei motori a rotore avvolto

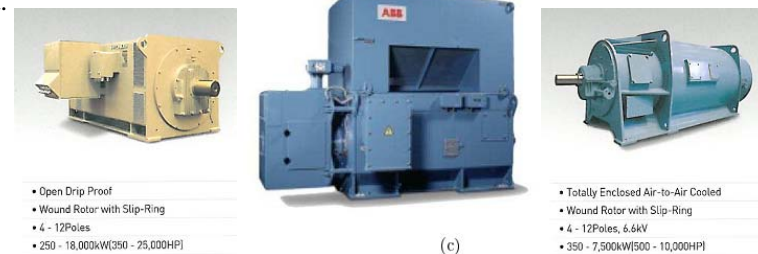
Motori a rotore avvolto con diversi tipi di raffreddamento con scambiatore di calore:

- aria-aria,
- aria-acqua,
- ventilazione aperta.

Taglie:

$$V_n = 400-13000 \text{ V}$$

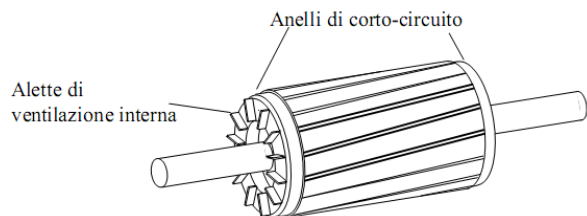
$$P_n = 150-10000 \text{ kW}$$



TEFC = Totally Enclosed Fan-Cooled: termine usato per indicare un motore elettrico totalmente chiuso e ventilato, con un telaio chiuso che non consente all'aria esterna di circolare liberamente all'interno del motore; un ventilatore esterno soffia aria esterna sul telaio del motore per raffreddarlo.

Rotore a gabbia (*squirrel cage*)

Nel campo delle applicazioni industriali, sia in bassa che in media tensione, la tipologia di motori a induzione maggiormente impiegata è quella con l'avvolgimento rotorico a gabbia di scoiattolo.



Il nome deriva dall'idea che, se si eliminassero i lamierini di rotore, le sbarre e gli anelli di cortocircuito realizzerebbero una struttura simile a quella delle ruote per far giocare i criceti e gli scoiattoli.



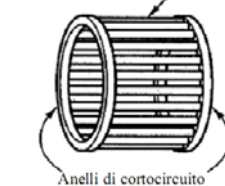
- Totally Enclosed Air-to-Air Cooled
- Squirrel Cage Rotor
- 4 - 12Poles
- 750 - 5,000kW(1,000 - 7,000HP)

TEFC Cast Iron Frame Motor



Output Range 0.75 - 200kW(1 - 250HP)
Voltage ~ 600V
Frequency 50Hz, 60Hz
Number of Poles 2, 4, 6, 8

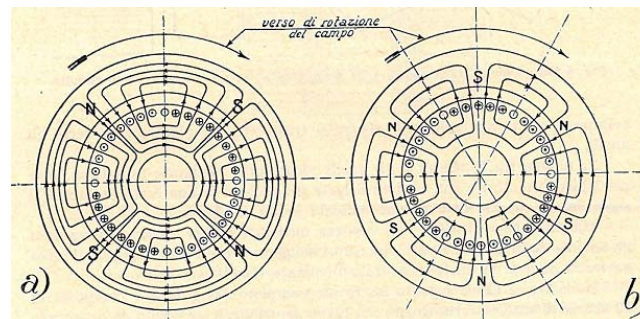
Sbarre di rotore



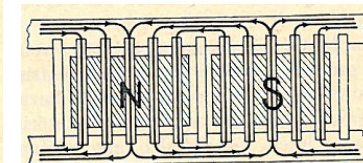
Anelli di cortocircuito

Funzionamento del rotore a gabbia

Questo tipo di rotore non ha un numero di poli suo proprio, ma le correnti indotte circolano nelle barre in modo da generare tanti poli quanti sono quelli del campo rotante induttore: tutte le barre soggette all'azione di un polo sono percorse da corrente in un senso, mentre le barre soggette all'azione del polo opposto sono percorse da corrente in verso contrario.



Distribuzione delle correnti indotte nelle barre di rotore:
a) con induttore a 4 poli; b) con induttore a 6 poli



Andamento delle correnti nelle barre e negli anelli frontali

Funzionamento del rotore a gabbia $K = \frac{E_1}{E_{20}} = \frac{K_1 N_1}{K_2 N_2}$

Quindi, in generale, un rotore a gabbia si presta a funzionare con qualunque numero di poli, dato che le polarità rotoriche sono determinate dal campo rotante induttore.

Il rotore a gabbia può essere considerato come provvisto di un avvolgimento polifase, con tante fasi quante sono le barre comprese sotto una coppia di poli del campo rotante induttore ($m_2 = Q_2/p_p$):

- ciascuna fase ha l'avvolgimento ridotto a una barra per paio poli;
- uno degli anelli rappresenta il centro stella in cui sono riuniti tutti i principi delle diverse fasi; l'altro anello, collegando fra loro i capi liberi opposti delle diverse fasi, le chiude in corto circuito.

Ne consegue che il rapporto di trasformazione tra statore e rotore è elevato, pertanto le tensioni indotte in ogni barra sono nell'ordine di qualche volt (se il motore è in bassa tensione), mentre le correnti sono relativamente elevate; dati i bassi valore di tensione, le barre non sono generalmente isolate rispetto al ferro di rotore.

29

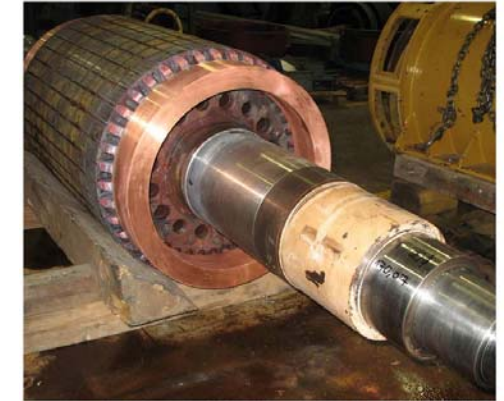
Costruzione del rotore a gabbia

I rotor a gabbia possono essere costruiti secondo due tecniche principali.

Per potenze elevate, viene inserita una barra in rame per ogni cava; la richiusura elettrica e meccanica è realizzata con due anelli frontali a cui tutte le barre vengono collegate con innesti e saldature.



Rotore a gabbia a barre di rame saldate



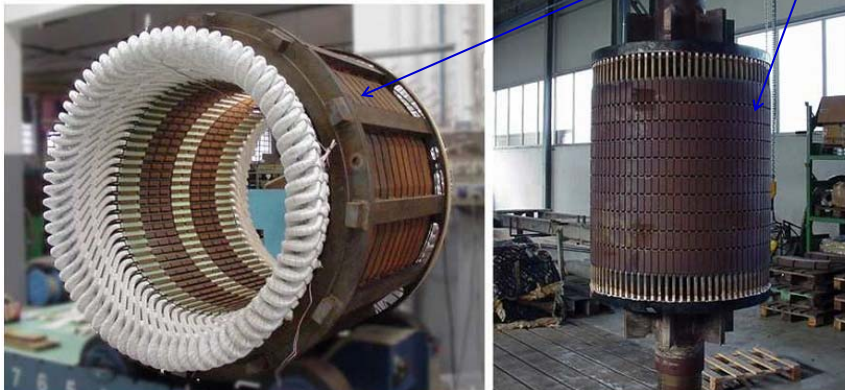
Rotore a gabbia a barre di rame saldate per motore da 3 MW, 6 kV, 2 poli

30

Costruzione del rotore a gabbia

canali di ventilazione

Statore e rotore (a gabbia a barre di rame saldate) di un motore da 1,8 MW, 6 kV, 6 poli



Nota: anche quando l'avvolgimento di statore è alimentato a 6÷10 kV, grazie al rapporto di trasformazione, l'avvolgimento di rotore è soggetto a tensioni nell'ordine di 100÷800 V.

31

Raffreddamento dei motori con rotore a gabbia

Anche nel caso di motori con rotore a gabbia, per potenze elevate è necessario un raffreddamento con scambiatore di calore:

- a) aria-aria,
- b) aria-acqua,
- c) ventilazione aperta.

Taglie:

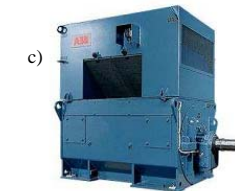
$$V_n = 400-15000 \text{ V}$$

$$P_n = 180-20000 \text{ kW}$$



a)

b)



c)



- Totally Enclosed Water-to-Air Cooled
- Squirrel Cage Rotor
- 2 - 32Poles
- 1,030 - 10,800kW(1,300 - 15,000HP)



- Totally Enclosed Fan Cooled
- Squirrel Cage Rotor
- 2 - 8Poles
- 120 - 1,000kW(160 - 1,400HP)

32

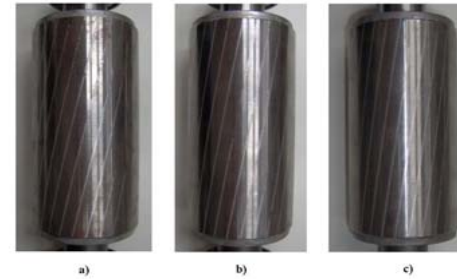
Rotore a gabbia di tipo pressofuso

Per potenze inferiori (orientativamente <250 kW), il rotore a gabbia può essere realizzato tramite **pressofusione**, ossia con l'immissione del rotore in un apposito stampo, ove gli spazi delle cave e opportuni spazi frontali vengono riempiti con leghe di alluminio fuso in pressione (più frequentemente) oppure rame.



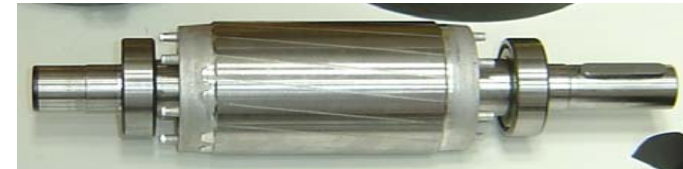
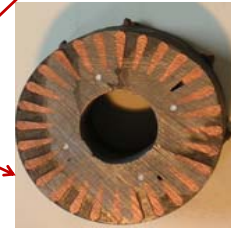
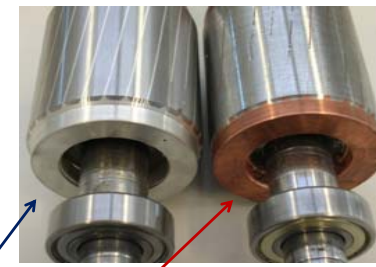
Rotore a gabbia pressofuso

Rotore a gabbia a cave inclinate con diversi valori di inclinazione:



Gabbia in alluminio

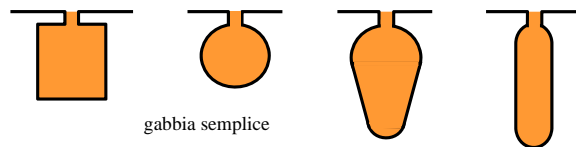
Gabbia in rame:



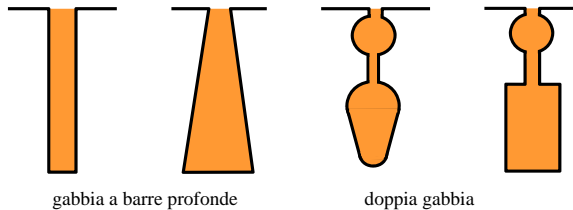
Nota: la pressofusione del rame è più costosa energeticamente (il rame fonde a 1083°C, l'alluminio a 658 °C) e più complessa, ma il motore che ne deriva ha rendimento più elevato.

Rotore a gabbia di tipo pressofuso

La tecnica di pressofusione permette di realizzare forme di cava anche molto complesse.



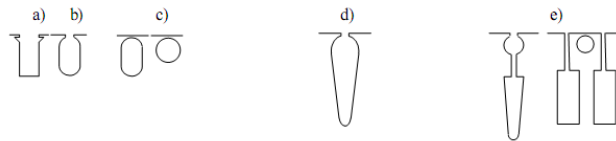
gabbia semplice



gabbia a barre profonde

doppia gabbia

Ciò consente di ottenere valori di reattanza di dispersione più o meno elevati e, di conseguenza, diverse caratteristiche elettromeccaniche.



Forme di cave rotoriche

a) cava aperta
d) cava profonda

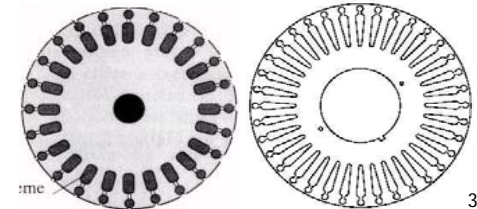
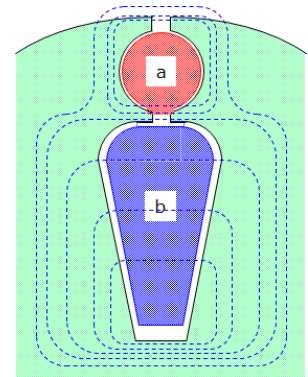
b) cava semichiusa
e) cave per doppia gabbia

c) cave chiuse

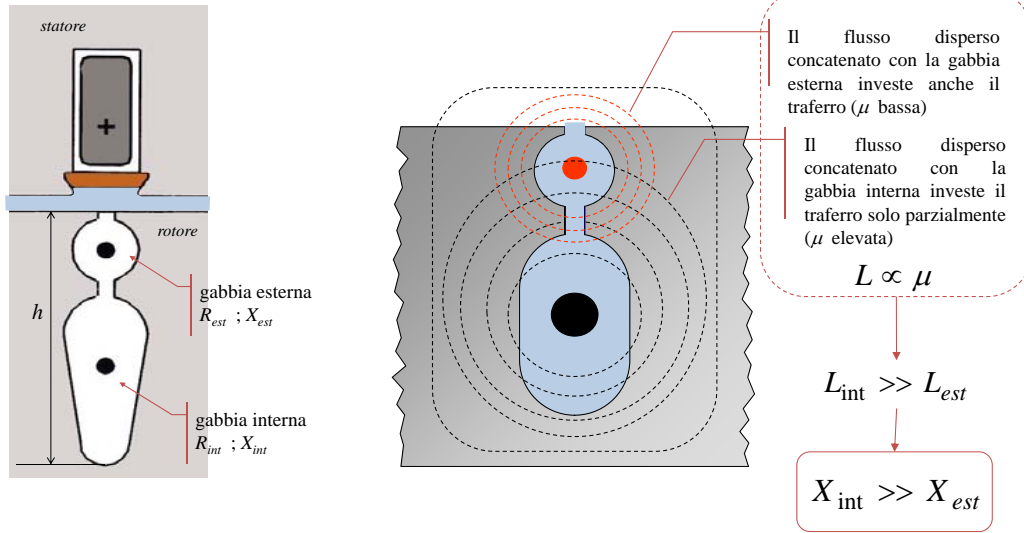
Rotore a doppia gabbia o a barre profonde

Una soluzione spesso adottata nei rotor a gabbia, per risolvere il problema dell'avviamento, prevede una forma di cava che consente di ottenere praticamente due gabbie sullo stesso rotore:

- la gabbia esterna ("a"):
 - sezione sbarre ridotta ⇒ elevata R
 - flusso disperso praticamente tutto in aria ⇒ bassa X_d
- la gabbia interna ("b"):
 - sbarre di sezione elevata ⇒ bassa R
 - flusso disperso con un percorso in ferro maggiore ⇒ elevata X_d



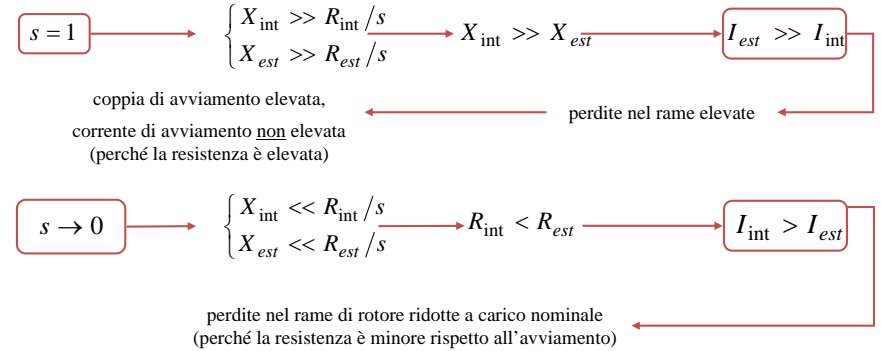
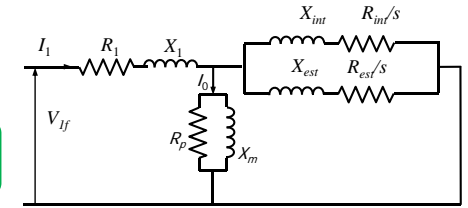
Rotore a doppia gabbia o a barre profonde



Rotore a doppia gabbia o a barre profonde

Circuito equivalente: si può pensare a due rami rotorici interpretati come due sistemi non interagenti.

All'avviamento ($s = 1$) prevale la X, a carico nominale ($s \rightarrow 0$) prevale la R.



Rotore a doppia gabbia o a barre profonde

Funzionamento:

- all'avviamento: ($f_r \approx f$) la corrente si distribuisce maggiormente nella **gabbia "a" esterna** (Z minore);
- a velocità nominale: la corrente si distribuisce maggiormente nella **gabbia "b" interna** (Z minore, poiché per $s \approx 0$ "pesano" le resistenze e poco le reattanze).

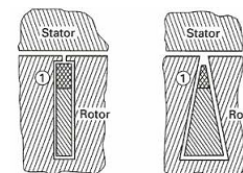
In definitiva, la **caratteristica è ottimizzata** sia all'avviamento che in **funzionamento normale**.

Un funzionamento analogo si ha con la **gabbia a barre profonde**: oltre all'effetto che si ha sulla reattanza di dispersione (minore verso l'esterno, ossia verso il traferro), occorre considerare anche l'effetto pelle che, quando la corrente è alternata ($f_r \approx f$, all'avviamento), tende a far addensare la corrente verso l'esterno della barra (resistenza relativamente alta), mentre quando la corrente ha frequenza quasi nulla (a carico) si distribuisce uniformemente in tutta la sezione della barra (resistenza bassa).

Rotore a doppia gabbia o a barre profonde

Caratteristiche meccaniche dovute alle singole gabbie :

- la caratteristica della **gabbia "a" esterna** presenta un valore massimo prossimo all'avviamento (coppia di avviamento elevata, ma anche elevate perdite negli avvolgimenti di rotore a carico nominale);
- la caratteristica della **gabbia "b" interna** presenta un andamento usuale (coppia di avviamento non elevata, ma relativamente basse perdite negli avvolgimenti di rotore).



Gabbie a barre profonde:
⓪ localizzazione delle correnti all'avviamento

