

RIPASSIAMO LE BASI DELL'ELETTROTECNICA

L'articolo offre un quadro completo ed aggiornato delle leggi che regolano l'elettrotecnica, leggi che anche un tecnico pratico, quale può essere un installatore, non può esimersi dal conoscere per svolgere razionalmente il proprio lavoro.

Parte sette: L'AVVIAMENTO DEI MOTORI ASINCRONI

A cura della Redazione

8.1 - Struttura dello statore

Sullo statore si distinguono il pacco lamellare, nel quale sono ricavate le cave e gli avvolgimenti.

Il circuito magnetico dello statore (o pacco lamellare) dei motori asincroni è formato da lamierini magnetici, generalmente di spessore compreso tra 0,3 e 0,5 mm, isolati fra loro e sovrapposti. Nelle macchine di grande potenza il pacco è formato dalla riunione di più segmenti circolari.

In entrambi i casi, sulla periferia interna sono ricavate cave semichiuse di forma rettangolare o, più spesso, trapezoidale con gli angoli arrotondati (Figura 8.1). Le cave sono destinate ad accogliere gli avvolgimenti.

Il pacco lamellare viene posto entro la carcassa che assolve il duplice scopo di bloccare il complesso dei lamierini e di costituire, unitamente agli scudi che ne fanno parte integrante, il supporto per i cuscinetti. Alla carcassa sono affidate funzioni essenzialmente meccaniche e tramite essa si effettua il fissaggio della macchina al basamento.

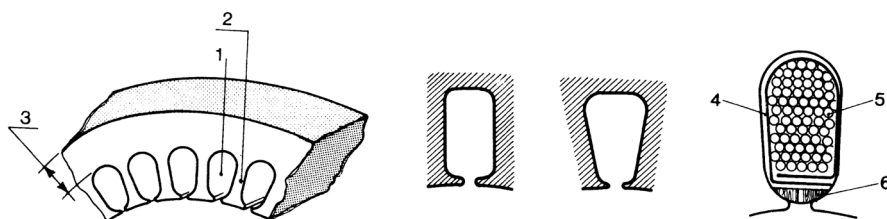


Figura 8.1 - Forma delle cave di statore:

- 1. cava;
- 2. dente;
- 3. corona;
- 4. cartoccio isolante;
- 5. conduttori;
- 6. zeppa di chiusura.

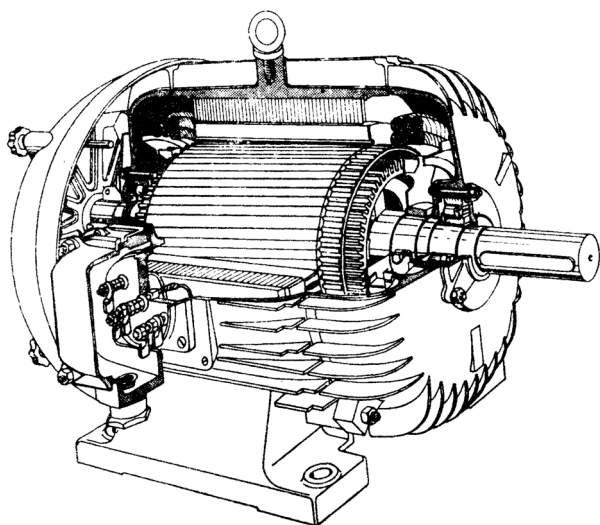


Figura 8.2 - Esempio di realizzazione di un motore asincrono trifase di media potenza, con rotore a doppia gabbia. Costruzione in ghisa, raffreddamento esterno attraverso una ventola che convoglia il flusso d'aria fra le alette poste all'esterno della carcassa.

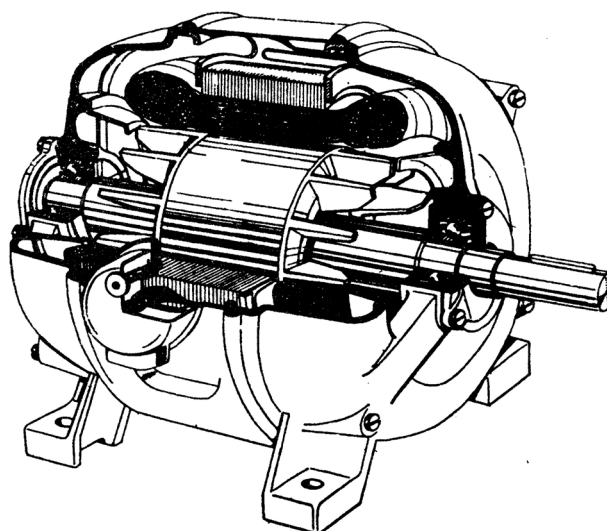


Figura 8.3 - Esempio di realizzazione di un motore asincrono di piccola potenza, con rotore a gabbia. Costruzione con due anelli di lamiera che serrano il pacco statorico e che recano le battute per il centraggio degli scudi. Raffreddamento con circolazione di aria all'interno.

Per le macchine di media potenza la carcassa è generalmente in ghisa. È essenzialmente costituita da un anello sul cui diametro interno sono disposte delle nervature.

Queste nervature sono tornite ad un diametro corrispondente a quello del pacco lamellare che deve essere opportunamente pressato.

In talune macchine di piccola potenza (fino a 3-5 kW) la carcassa è costituita da due anelli saldati fra loro attraverso l'interposizione di apposite traversine la cui forma interna è simile alle nervature della carcassa in ghisa. Pure analogo è il serraggio del pacco.

Le figure 8.2 e 8.3 riportano due soluzioni costruttive che consentono di rendersi conto della posizione reciproca delle varie parti.

8.2 - Avvolgimento di statore

L'avvolgimento di statore occupa le cave del pacco ed è distribuito regolarmente in modo da formare le tre fasi e il numero di poli richiesto.

Gli avvolgimenti di statore sono costituiti da tre circuiti, uno per ogni fase, facenti capo da un estremo alla linea di alimentazione. Gli altri estremi dei tre circuiti vengono collegati in modo da realizzare la stella o il triangolo.

Ogni fase è costituita da matasse di filo di rame isolato (per le piccole e medie potenze), oppure di piattine (per le grandi potenze), anch'esse isolate.

Gli assi geometrici di ogni avvolgimento devono trovarsi a 120° elettrici uno dall'altro. Precisamente, se il motore è a due poli, gli assi degli avvolgimenti delle tre fasi debbono trovarsi a 120° geometrici l'uno dall'altro (Figura 8.4), se il motore è a quattro poli gli assi delle tre fasi distano fra di loro $120^\circ / 2 = 60^\circ$ (Figura 8.5) e così di seguito.

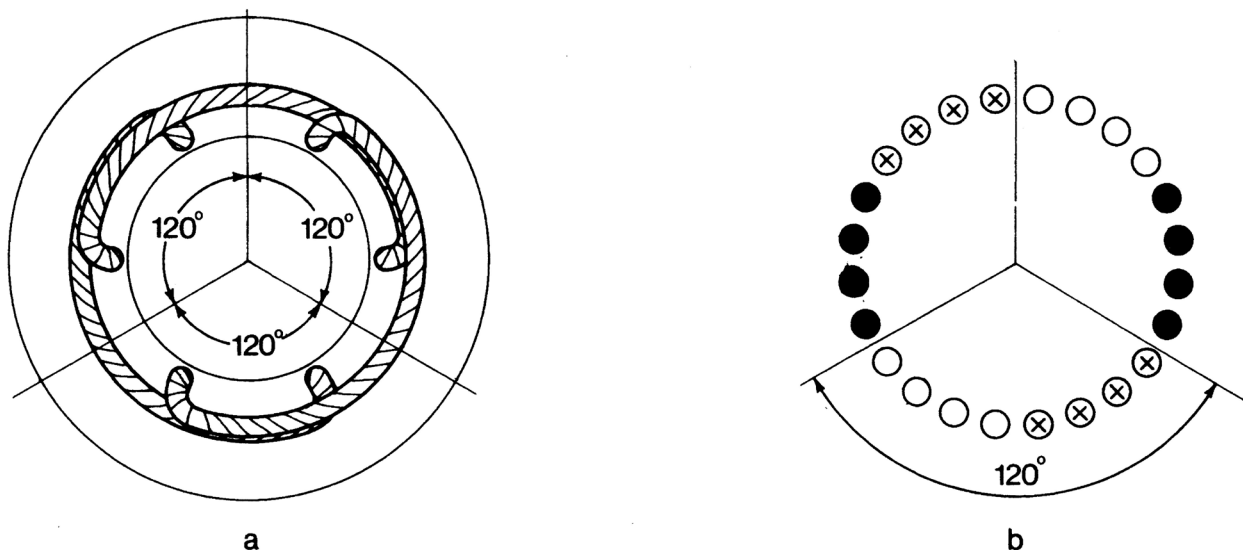


Figura 8.4 - Disposizione frontale dell'avvolgimento statorico di un motore a due poli. Per semplicità si è supposto che ogni fase sia costituita da una sola bobina (quindi lo statore reca solo 6 cave). In realtà l'avvolgimento è ripartito in più cave come è schematizzato ad esempio in b) (4 cave per polo e per fase).

In altri termini, gli assi degli avvolgimenti devono formare fra loro un angolo uguale a $120/p$ essendo p il numero di poli.

Le caratteristiche degli avvolgimenti vengono definite dal calcolo e dallo schema (quest'ultimo ne condiziona la costruzione).

Attraverso il calcolo si determina, in relazione alla tensione e alla corrente nominale, il numero dei conduttori e la loro sezione. Lo schema è necessario per stabilire l'esatta collocazione e collegamento delle varie parti dell'avvolgimento, in modo cioè che si abbia la formazione del voluto numero di poli e della loro esatta successione.

Nella costruzione dei motori si cerca, specie per le macchine di potenza più piccola, di adottare avvolgimenti che consentano il loro montaggio in cava mediante macchine automatiche.

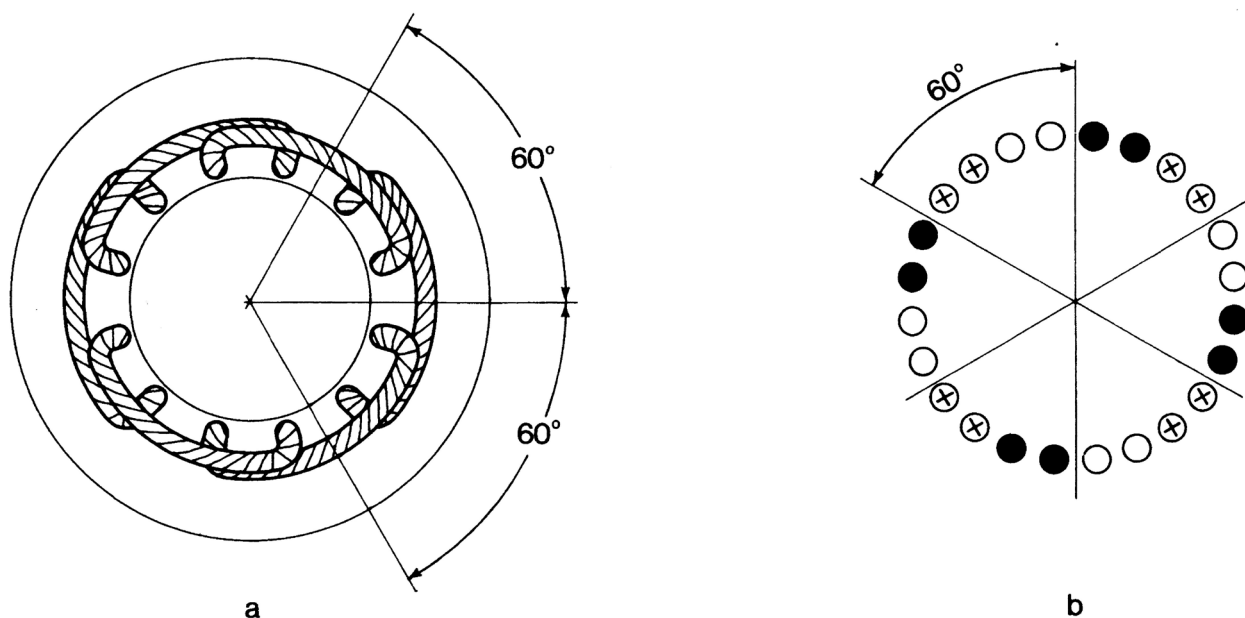


Figura 8.5 - Disposizione frontale dell'avvolgimento statorico di un motore a quattro poli. Nella figura a) è indicata per semplicità una cava per polo e per fase. Nella figura b) è schematizzato il caso in cui per ogni fase siano previste 2 cave per polo e per fase (complessivamente 24 cave).

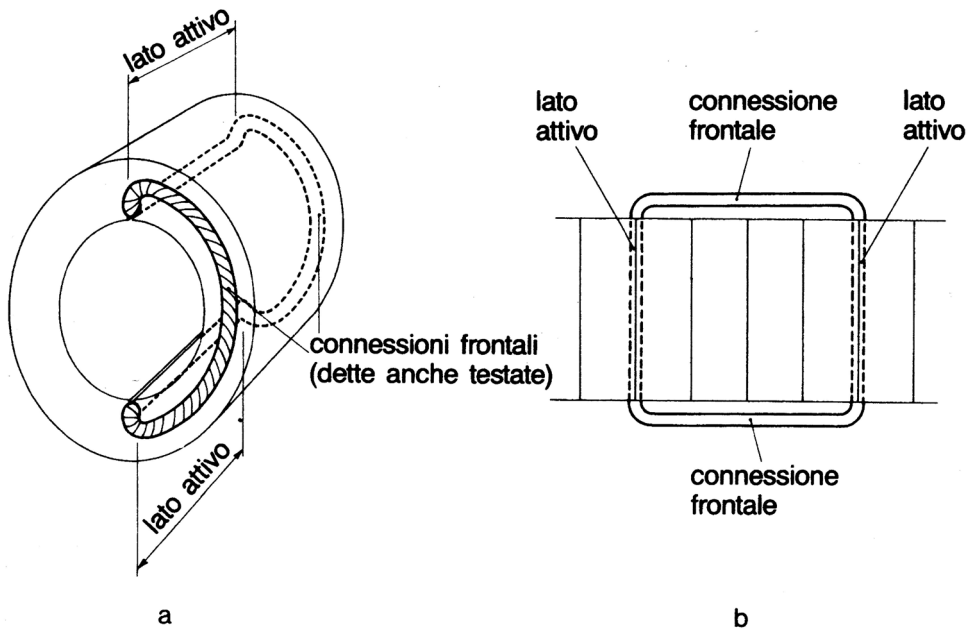


Figura 8.6 - Elementi di una bobina di avvolgimento statorico: rappresentazione prospettica (a) e rappresentazione sviluppata su un piano (b).

8.3 - Caratteristiche di un avvolgimento di statore

Nell'avvolgimento si distinguono le parti in cava e le connessioni frontali. L'avvolgimento è caratterizzato dal numero di cave per polo e per fase, dal passo e dalla forma delle testate.

Ogni fase dell'avvolgimento è costituita da una o più matasse (Figura 8.6); in ogni matassa si distinguono:

- i fasci o lati attivi, ossia le due parti contenute entro la lunghezza delle cave;
- le connessioni frontali o testate, destinate a collegare fra loro i fasci attivi.

Un avvolgimento è caratterizzato essenzialmente dai seguenti elementi:

- numero di cave per polo e fase;
- passo dell'avvolgimento;
- forma delle testate.

I primi due elementi sono legati al numero totale di cave dalle seguenti relazioni:

$$\text{numero di cave per polo e per fase} = \frac{\text{numero totale delle cave}}{\text{numero poli} \times \text{numero fasi}}$$

$$\text{passo dell'avvolgimento} = \frac{\text{numero totale cave}}{\text{numero poli}}$$

Il numero delle cave per polo e per fase non è mai molto grande. Nelle disposizioni delle figure 8.5 e 8.6 il numero delle cave per polo e per fase è di 4 e 2 rispettivamente. Questo numero è generalmente intero, ma non mancano avvolgimenti con numero di cave per polo e per fase frazionario per i quali si adottano schemi particolari (1).

Il passo indica il numero delle cave che intercorrono fra la cava che contiene un fascio attivo e quella che contiene il fascio attivo che deve essere collegato al primo. Ad esempio, avendo numerato progressivamente le cave, dire che un avvolgimento ha passo 12 vuole significare che il fascio attivo situato poniamo nella cava 1 deve essere collegato con il fascio collocato nella cava 13 (infatti $1 + 12 = 13$) (Figura 8.7a). Il passo, che si ricava dalla formula riportata sopra si dice intero. In pratica sono però oggi molto usati i passi accorciati, ossia passi un po' inferiori del passo intero i quali consentono una economia di rame, essendo minori le lunghezze delle connessioni frontali e una migliore forma del campo magnetico.

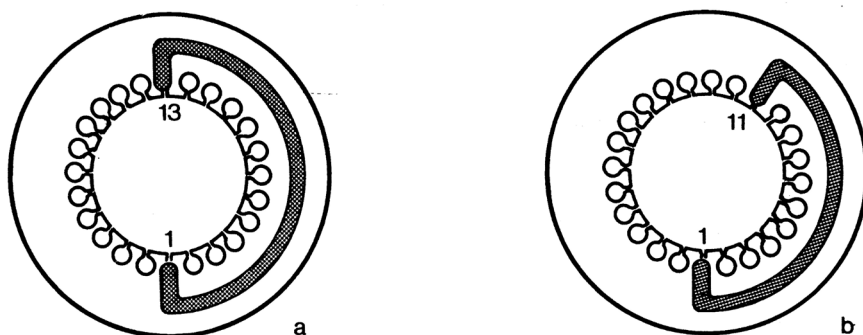


Figura 8.7 - Avvolgimento di una macchina bipolare
a) a passo intero
b) a passo accorciato

L'accorciamento non deve essere eccessivo (mai inferiore ai $\frac{2}{3}$ del passo interno) per evitare che due fasci attivi si vengano a trovare in un certo istante sotto lo stesso polo. Inoltre, l'accorciamento è possibile solo se l'avvolgimento è realizzato in due strati.

Si usa indicare il passo accorciato con il rapporto fra il passo effettivamente impiegato e il passo intero.

Forma delle testate di avvolgimento

La forma delle testate varia in relazione al tipo di schema adottato e alle dimensioni della macchina.

L'avvolgimento è inoltre caratterizzato dalla disposizione delle connessioni frontali che determinano la forma delle matasse e l'aspetto esteriore dell'intero avvolgimento.

Possono aversi connessioni in due ordini variamente ripiegate, in tre ordini o a corona (Figura 8.8). Secondo il modo con il quale le testate connettono fra loro i fasci attivi derivano vari tipi di avvolgimenti (vedere tabella 8.1):

- a. a matassa, concentrico: le matasse sono chiuse, disuguali, interne le une alle altre e non si incrociano;
- b. a matassa, embricato: le matasse sono chiuse, uguali e si incrociano;
- c. ondulato, concentrico: i fasci attivi sono collegati in modo da formare spirali aperte, interne le une alle altre, cioè non si incrociano;
- d. ondulato, embricato: i fasci attivi sono collegati in modo da formare spirali aperte, che però si incrociano;
- e. a corona: le sezioni sono tutte uguali e sono ottenute facendo il prolungamento dei fasci attivi fuori della cava, alternativamente corti e lunghi, cosicché la sezione assume, in pianta, una forma trapezoidale. Affinché ciò sia possibile occorre però che il passo sia dispari. Questo ultimo tipo di avvolgimento è oggi molto usato, perché consente la fabbricazione in serie delle sezioni con una sola sagoma e avvolgimenti molto regolari.

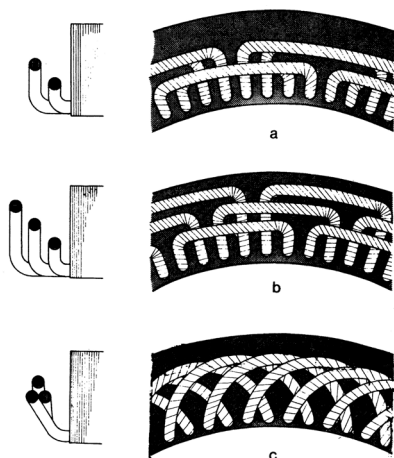


Figura 8.8- Avvolgimenti con testate disposti su due ordini (a) su tre ordini (b) ed aspetto delle testate in un avvolgimento a corona (c).

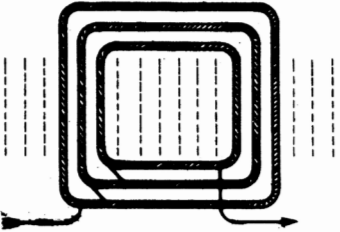
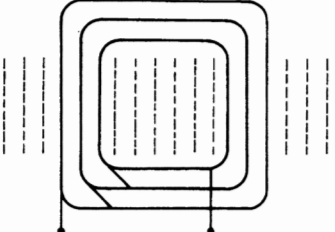
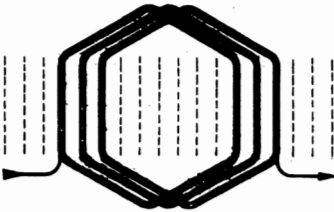
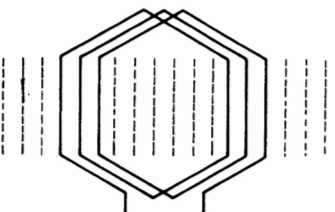
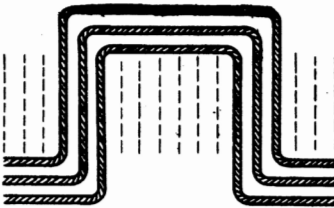
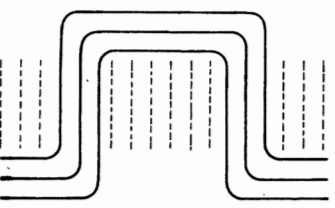
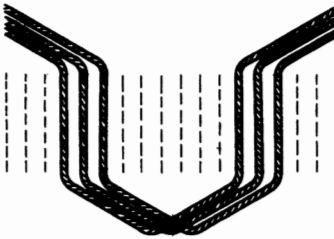
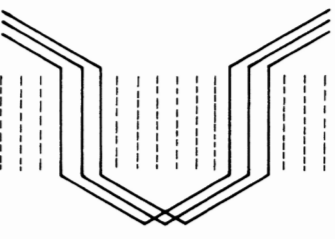
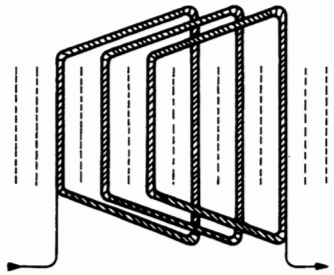
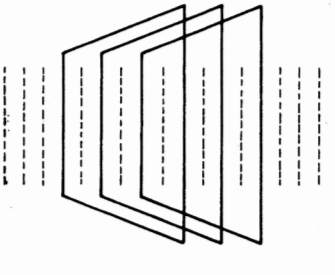
Tipo	Forma costruttiva	Rappresentazione schematica
A matasse concentrico		
A matasse embricato		
Ondulato concentrico		
Ondulato embricato		
A matasse uguali o a corona		

Tabella 8.1 - Tipi di avvolgimenti.

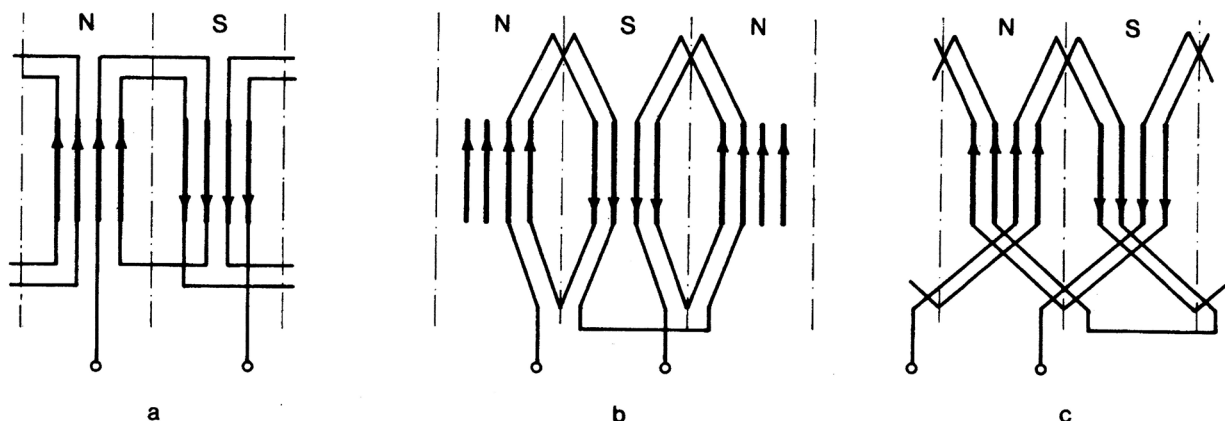


Figura 8.9 - Schematizzazione di avvolgimenti di tipo B:

a - a matasse concentrico;

b - a matasse embricato;

c - ondulato embricato.

Gli avvolgimenti ondulati sono usati di solito soltanto con piattine o sbarre e quindi per macchine di grande potenza.

Gli avvolgimenti a matassa e ondulati possono inoltre essere di tipo A e di tipo B. Con il tipo A il gruppo di fasci attivi sotto un polo è collegato al gruppo di fasci sotto un solo polo adiacente; nel tipo B, invece, la prima metà dei fasci sotto un polo è collegata con la seconda metà di quelli sotto il polo che precede, ed i restanti con la prima metà dei fasci sotto il polo che segue (Figura 8.9).

8.4 - Tracciamento degli schemi di avvolgimento

Il tracciamento degli schemi si può effettuare con due procedimenti:

- *con sviluppo in piano;*
- *frontale, o circolare.*

Gli schemi possono essere tracciati con sviluppo in piano oppure con vista frontale. Il primo sistema raffigura l'avvolgimento come se la superficie cilindrica interna dello statore fosse svolta su di un piano. I fasci attivi, qualunque sia il numero dei conduttori attivi che li compongono, vengono rappresentati da un solo segmento: si impiegano colorazioni diverse, o linee di tipo diverso (a tratto pieno, punteggiato, ecc.) per distinguere le tre fasi fra di loro.

Nelle tabelle 8.2 e 8.3, è illustrato il modo di tracciare con questo sistema gli schemi di avvolgimento rispettivamente del tipo embricato e del tipo a corona.

Nel sistema frontale l'avvolgimento è invece visto da un osservatore situato di fronte al motore, qualora fosse tolto lo scudo e le testate non nascondessero le cave. In questo caso ogni fascio attivo è rappresentato da un circoletto e le connessioni frontali da linee che li uniscono secondo il passo stabilito. Anche qui si distinguono le tre fasi con colorazioni o diverso tipo di linee e di circoletti.

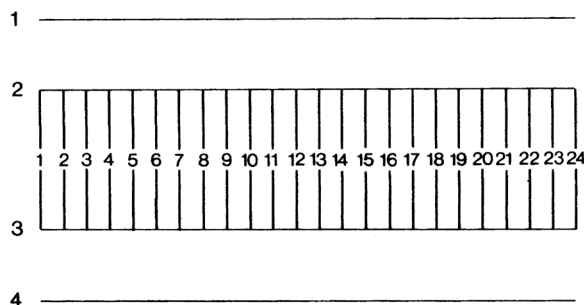
Di solito si usa indicare le connessioni frontali anteriori nella parte superiore del disegno e quelle posteriori (che a rigore non sarebbero visibili) nella parte interna con linee punteggiate; spesso però, per chiarezza del disegno, queste ultime si omettono. La tabella 8.4 mostra il modo di tracciare uno schema di avvolgimento con questo sistema.

La scelta dell'uno e dell'altro sistema di tracciamento dello schema dipende più che altro dall'abitudine dell'avvolgitore: in caso di avvolgimenti complicati può essere utile impiegarli entrambi, a titolo di reciproca verifica.

Come già accennato, i principi e rispettivamente le fini di ogni fase debbono essere esattamente collocati e collegati: essi debbono trovarsi a 120° elettrici l'uno dall'altro. La loro posizione, che deve essere chiaramente indicata nello schema. A completamento di quanto è stato detto si riportano nelle tabelle 8.5 e 8.6 alcuni esempi di schemi completi.

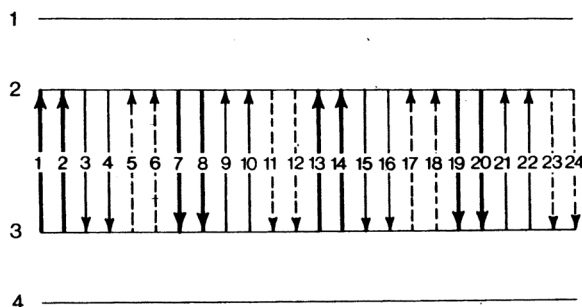
1) Si tracciano 4 parallele orizzontali: le estreme 1 e 4 indicano l'ingombro delle connessioni frontali; quelle interne 2 e 3 limitano il pacco magnetico dello statore.

2) Nello spazio delimitato dalle righe 2 e 3 si tracciano tanti segmenti perpendicolari quante sono le cave o i fasci attivi e si numerano.



3) Si distinguono con linee a colorazioni diverse (oppure con linee di diverso spessore o tipo) i fasci appartenenti a fasi diverse tenendo conto del numero di cave per polo e per fase (nel caso della figura: motore a 4 poli $24/(4 \times 3) = 2$).

4) Si indicano con frecce i sensi di avvolgimento che risultano inversi per i gruppi di fasci attivi appartenenti a fasi adiacenti.



5) Si riuniscono i fasci attivi che distano di un passo (nel caso della figura $24/4 = 6$), in modo da formare bobine chiuse: le bobine di una stessa fase si collegano in serie.

6) Si indicano il principio e la fine di ogni fase, tenendo presente che il principio della fase 2 deve distare dal principio della fase 1 di tante cave quante ne contiene un arco di 120° elettrici e così il principio della fase 2 da quello della fase 3. Nel caso della figura: $(120 \times 24)/(2 \times 360) = 4$.

7) Si effettua la verifica dello schema: percorrendo ogni fase dal principio alla fine ci si deve trovare nei singoli fasci attivi nel senso delle frecce.

8) Infine si collegano le tre fasi a stella o a triangolo.

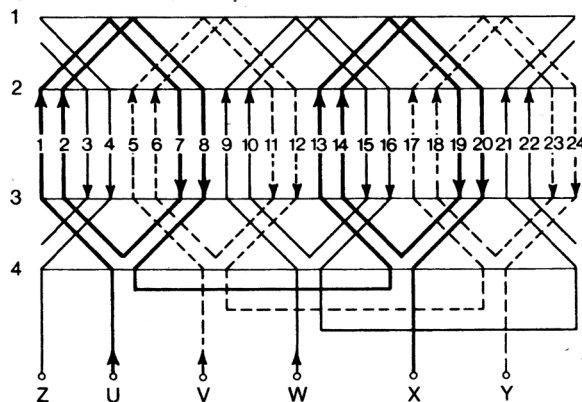
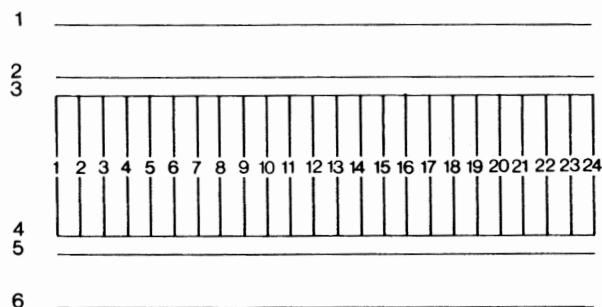


Tabella 8.2 - Tracciatura di un avvolgimento embricato sviluppato in piano.

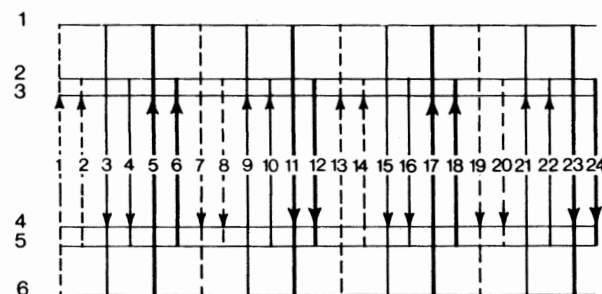
1) Si tracciano 6 parallele orizzontali: le estreme 1 e 6 indicano l'ingombro massimo delle connessioni, le 2 e 5 l'ingombro minimo; quelle interne 3 e 4 limitano il pacco magnetico dello statore.

2) Nello spazio delimitato dalle linee 3 e 4 si tracciano tanti segmenti perpendicolari quante sono le cave o i fasci attivi e si numerano.



3) Si distinguono con linee a colorazioni diverse, oppure con linee di diverso spessore o tipo, i fasci appartenenti a fasi diverse, tenendo conto del numero di cave per polo e fase (nel caso della figura: motore a 4 poli $24/(4 \times 3) = 2$), prolungandoli alternativamente fino alle linee 1-6 e 2-5.

4) Si indicano con frecce i sensi di avvolgimento che risultano appartenenti a fasi adiacenti.



5) Si riuniscono i fasci attivi, tenendo presente che ogni sezione dovrà essere composta di un fascio lungo e di un fascio corto in modo da avere forma trapezia (nel caso in cui il passo sia un numero pari, caso della figura, la cosa non è possibile; si prende allora come passo il numero immediatamente inferiore: nel caso della figura passo 5 invece di passo 6).

6) Si procede come per l'avvolgimento embricato (tabella 8.2)

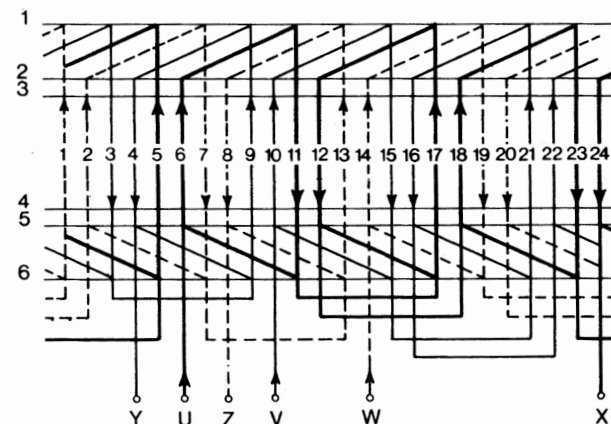
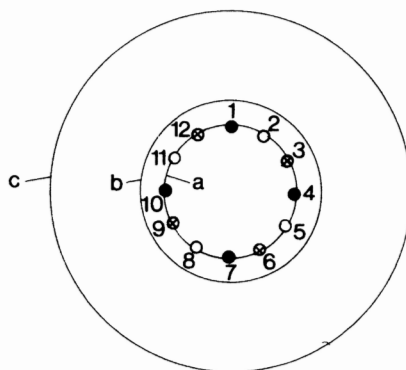


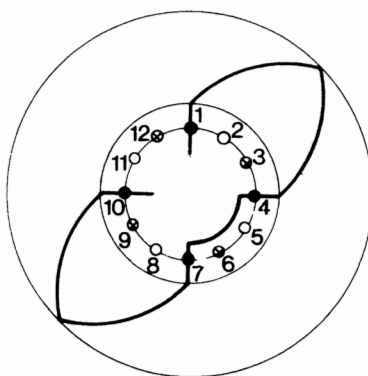
Tabella 8.3 - Tracciatura di un avvolgimento a corona sviluppato in piano.

- 1) Si tracciano tre cerchi concentrici che delimitano rispettivamente dall'interno all'esterno:
 - a) la posizione delle cave;
 - b) le uscite dalle cave;
 - c) le connessioni frontali.
- 2) Dividere il cerchio a in tanti parti quante sono le cave (nell'esempio della figura 12 parti).
- 3) Tracciare in corrispondenza delle divisioni sul cerchio a dei piccoli cerchi per indicare le cave, poi numerarle.



- 4) Suddividere i circoletti indicanti le cave in relazione al numero delle cave per polo, o con colorazione diverse o con segni particolari (il caso illustrato si riferisce ad un avvolgimento per un motore a 4 poli avente 12 cave, quindi una cava per polo fase).

- 5) Partendo dalla cava 1 tracciare la sezione di avvolgimento relativa ad una fase, seguendo i medesimi concetti esposti nella tabella 8.2.



- 6) Completare la tracciatura delle altre due fasi come già indicato nella tabella 8.2.

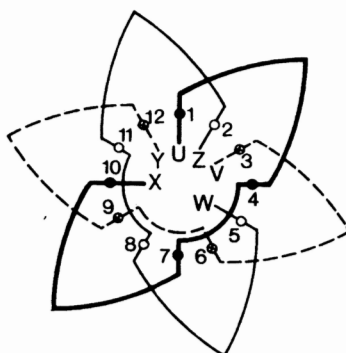
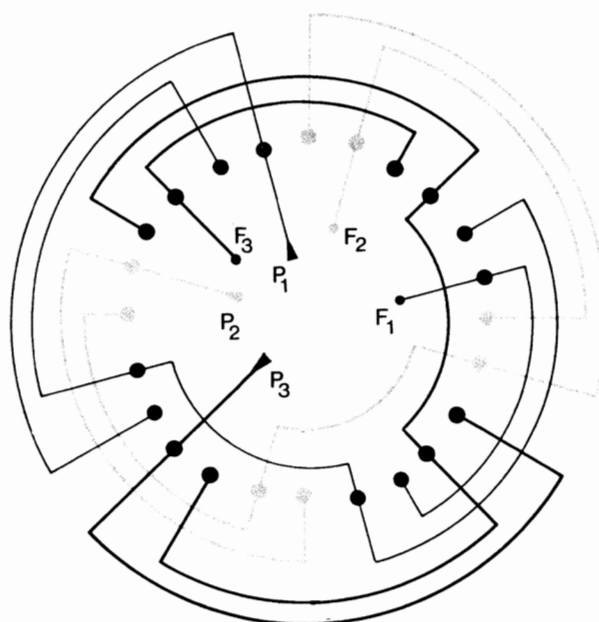


Tabella 8.4 - Tracciatura di un avvolgimento embricato in rappresentazione frontale.

Motore a 2 poli 24 cave; 4 cave per polo e per fase



Motore a 4 poli, 24 cave; 2 cave per polo e per fase

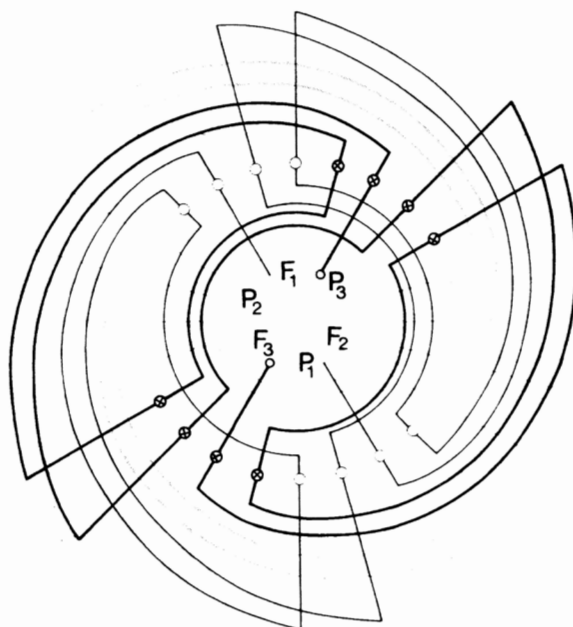
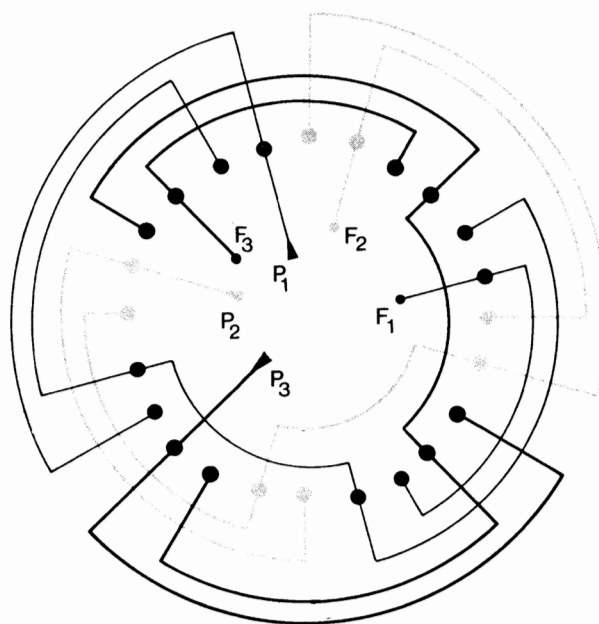


Tabella 8.5 - Esempi di avvolgimenti embricati.

Motore a 2 poli 24 cave; 4 cave per polo e per fase



Motore a 4 poli, 24 cave; 2 cave per polo e per fase

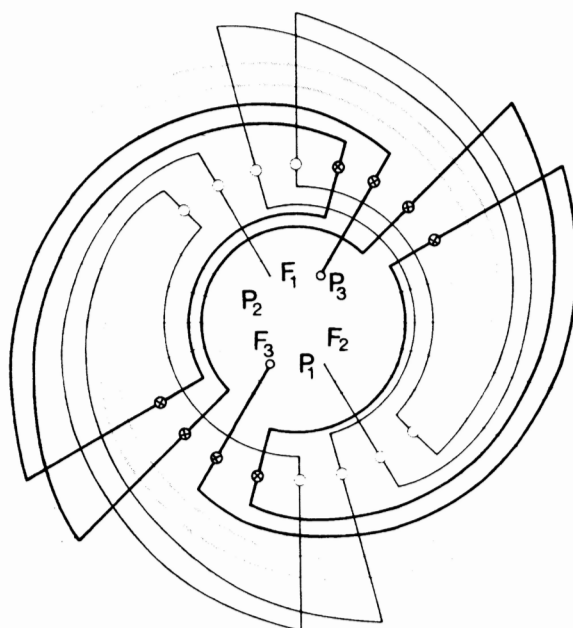


Tabella 8.6 - Esempi di avvolgimenti embricati e concentrici.