



# Ripasso sul campo magnetico rotante e avvolgimenti in corrente alternata

Lucia FROSINI

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

1

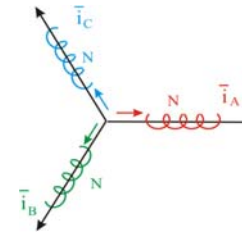
L. Frosini

## Il campo magnetico rotante

Il funzionamento della maggior parte delle macchine elettriche rotanti in corrente alternata (ad eccezione del motore universale a collettore e di altre macchine speciali) si basa sul principio del campo magnetico rotante.

Per ottenerlo, occorre soddisfare le seguenti condizioni:

- 3 avvolgimenti fissi nello spazio, uguali tra loro, con lo stesso numero di spire  $N$ , disposti con gli assi a  $120^\circ$  l'uno dall'altro;
- nei 3 avvolgimenti circolino 3 correnti alternate sinusoidali aventi la stessa frequenza  $f$ , lo stesso valore massimo  $I_M$  e sfasate tra loro nel tempo di  $120^\circ$ .



N.B.: Questa è solo una rappresentazione schematica dei 3 avvolgimenti, vedremo più avanti come si sviluppa la reale distribuzione dei 3 avvolgimenti lungo la periferia di statore.

2

L. Frosini

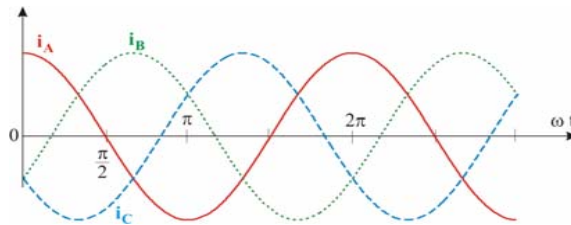
## Il campo magnetico rotante

Per il momento i 3 avvolgimenti sono rappresentati in modo schematico da 3 bobine di  $N$  spire ciascuna, come se fossero concentrate e avvolte attorno a ciascuno dei 3 assi sfasati di  $120^\circ$  l'uno dall'altro (in realtà sono distribuiti lungo la periferia di statore, come vedremo tra poco).

Le espressioni delle correnti sono state scritte prendendo come riferimento a fase zero la corrente  $i_A$ :

$$\begin{cases} i_A = I_M \cos \omega t \\ i_B = I_M \cos \left( \omega t - \frac{2\pi}{3} \right) \\ i_C = I_M \cos \left( \omega t - \frac{4\pi}{3} \right) \end{cases}$$

$$\omega = 2\pi f$$



3

L. Frosini

## Il campo magnetico rotante

Un solo avvolgimento percorso da corrente comunque variabile nel tempo sostiene una forza magnetomotrice (f.m.m.) fissa nello spazio e diretta secondo l'asse dell'avvolgimento stesso.

La legge di variazione nel tempo della forza magnetomotrice dipende dalla variazione nel tempo della corrente di alimentazione dell'avvolgimento, ossia ogni bobina crea una f.m.m.  $M(t) = N \cdot i(t)$ .

In realtà l'espressione della f.m.m. di ciascuno dei tre avvolgimenti non può essere semplicemente questa, ma deve tenere conto della distribuzione della f.m.m. nello spazio, ossia del fatto che è diretta secondo l'asse dell'avvolgimento stesso.

Iniziamo a rappresentare questa situazione graficamente, poi lo esprimeremo analiticamente.

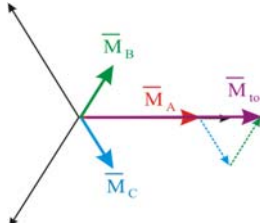
L'angolo  $\alpha$  indica la posizione lungo la periferia di statore.

4

## Il campo magnetico rotante

Si avranno pertanto 3 f.m.m. sinusoidali aventi lo stesso valore massimo  $M_M = N \cdot I_M$ , dirette nello spazio secondo gli assi delle rispettive correnti e sfasate tra loro nel tempo di  $120^\circ$ .

All'istante  $t = 0$ :

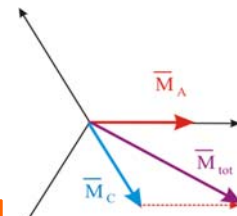
$$\begin{cases} M_A = M_M \\ M_B = -\frac{M_M}{2} \\ M_C = -\frac{M_M}{2} \end{cases}$$


➔ All'istante  $t = 0$ :  $M_{\text{tot}} = \frac{3}{2} M_M$   $\alpha = 0$

5

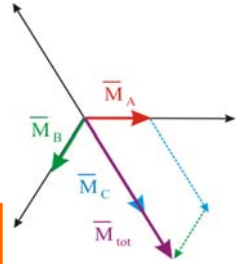
## Il campo magnetico rotante

Per  $\omega t = \pi/6$ :

$$\begin{cases} M_A = \frac{\sqrt{3}}{2} M_M \\ M_B = 0 \\ M_C = -\frac{\sqrt{3}}{2} M_M \end{cases}$$


➔ Per  $\omega t = \pi/6$ :  $M_{\text{tot}} = \frac{3}{2} M_M$   $\alpha = -30^\circ$

Per  $\omega t = \pi/3$ :

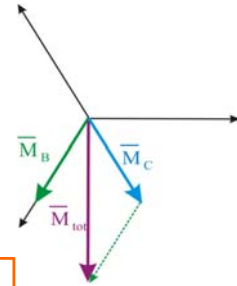
$$\begin{cases} M_A = \frac{M_M}{2} \\ M_B = \frac{M_M}{2} \\ M_C = -M_M \end{cases}$$


➔ Per  $\omega t = \pi/3$ :  $M_{\text{tot}} = \frac{3}{2} M_M$   $\alpha = -60^\circ$

6

## Il campo magnetico rotante

Per  $\omega t = \pi/2$ :

$$\begin{cases} M_A = 0 \\ M_B = \frac{\sqrt{3}}{2} M_M \\ M_C = -\frac{\sqrt{3}}{2} M_M \end{cases}$$


➔ Per  $\omega t = \pi/2$ :  $M_{\text{tot}} = \frac{3}{2} M_M$   $\alpha = -90^\circ$

La f.m.m. risultante dei 3 avvolgimenti ha, in ogni istante, lo stesso valore, pari a 1,5 volte quello massimo della f.m.m. di una fase, e ruota nello spazio con velocità angolare costante, pari alla pulsazione  $\omega$  delle correnti che l'hanno prodotta.

Infatti, nel tempo corrispondente a  $90^\circ$  della sinusoide della corrente, il vettore della f.m.m. ha avuto uno spostamento angolare di  $90^\circ$ .

7

## Il campo magnetico rotante

La f.m.m. produce un flusso magnetico, direttamente proporzionale ad essa (trascurando gli effetti della saturazione), tramite la legge di Hopkinson:

$$\Phi = \frac{M}{\mathfrak{R}}$$

Il campo magnetico è direttamente proporzionale al flusso magnetico:

$$B = \frac{\Phi}{A}$$

Pertanto i tre avvolgimenti percorsi da correnti alternate sinusoidali producono un campo magnetico rotante.

Questo campo magnetico rotante è equivalente a quello prodotto da un magnete con due poli (N-S) posto in rotazione da un sistema meccanico.

➔ Quindi con un sistema elettrico statico (tre bobine fisse), si ottiene un campo magnetico mobile (teorema di Galileo Ferraris).

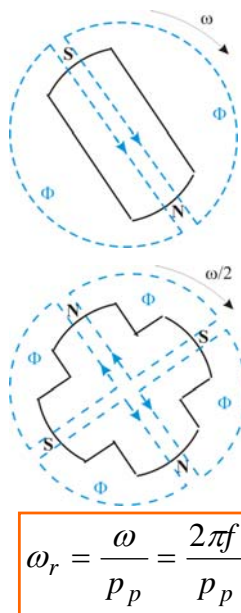
8

## Il campo magnetico rotante

Possiamo rappresentare il campo magnetico rotante come prodotto da un magnete con due poli (N-S) posto in rotazione a velocità angolare  $\omega$ : per riportare questo campo magnetico nella stessa condizione spaziale da cui è partito, occorre che il magnete percorra l'intera circonferenza ( $360^\circ$ ).

Invece, un magnete a quattro poli (N-S-N-S), per riportare il campo magnetico da esso prodotto nella condizione spaziale da cui è partito, deve percorrere solo mezza circonferenza ( $180^\circ$ ).

Quindi la velocità angolare che occorre a un campo magnetico prodotto da un magnete a quattro poli per riportarsi nella condizione iniziale sarà la metà di quella necessaria al campo magnetico prodotto dal magnete a due poli.



9

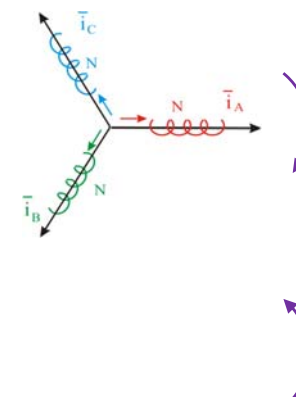
## Il campo magnetico rotante

Osservazione: Il verso di rotazione del campo magnetico rotante dipende dal senso ciclico delle fasi dell'avvolgimento di statore.

Invertendo tra loro due fasi, si inverte anche il verso di rotazione del campo.

$$\begin{cases} i_A = I_M \cos \omega t \\ i_B = I_M \cos \left( \omega t - \frac{2\pi}{3} \right) \\ i_C = I_M \cos \left( \omega t - \frac{4\pi}{3} \right) \end{cases}$$

$$\begin{cases} i_A = I_M \cos \omega t \\ i_B = I_M \cos \left( \omega t - \frac{4\pi}{3} \right) \\ i_C = I_M \cos \left( \omega t - \frac{2\pi}{3} \right) \end{cases}$$



10

## Il campo magnetico rotante

### Importante:

Il numero di coppie polari in una macchina asincrona (con rotore a gabbia) è determinato da come sono disposti gli avvolgimenti nelle cave di statore.

Infatti, nella realtà, rispetto a quanto visto fino ad ora:

- le bobine non sono concentrate lungo un asse, ma distribuite uniformemente lungo la circonferenza interna dello statore, nelle cave (avvolgimento distribuito).
- a seconda della disposizione delle bobine, il campo può avere un numero maggiore di coppie polari.

Queste considerazioni valgono non solo per le macchine asincrone, ma anche per le sincrone: gli statori sono infatti avvolti allo stesso modo, mentre molto diversa è la configurazione del rotore. Diversi sono invece i cosiddetti avvolgimenti concentrati intorno ai denti, che si utilizzano per alcuni tipi di motori brushless.

11

## Avvolgimenti in c.a. distribuiti nelle cave

I **conduttori attivi**, interessati dalle f.e.m. utili ai fini della conversione elettromeccanica, sono quelli disposti nelle cave.

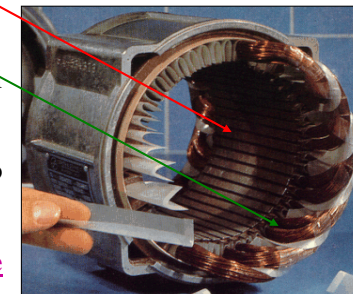
Le **connessioni frontali**, non sottoposte a f.e.m. utili, sono disposte sulle fronti del pacco lamellare e servono per il collegamento elettrico dei conduttori attivi.

L'insieme di **due conduttori attivi** collegati da **una connessione frontale** si definisce **spira**.

L'insieme delle **spire** i cui **conduttori attivi** sono disposti nella stessa coppia di cave è la **matassa (o bobina)**.

I **due lati di conduttori attivi** costituenti la matassa sono detti **lati di matassa**.

Le **due connessioni frontali** della matassa sono dette **teste (o testate) di matassa**.



12

## Avvolgimenti in c.a. distribuiti nelle cave

Faremo riferimento a macchine asincrone e sincrone TRIFASI ( $m=3$ ), aventi 3 avvolgimenti di fase disposti a  $120^\circ$  elettrici l'uno dall'altro.

Il legame tra **angolo elettrico  $\gamma$**  e **angolo meccanico (o geometrico)  $\alpha$**  è:

$$\gamma = p_p \cdot \alpha$$

$p_p$  = paia poli

Ad ogni **passo polare  $\tau$**  corrispondono  **$180^\circ$  elettrici**.

Ogni avvolgimento di fase occupa  $1/3$  delle cave complessive  $Q$ .

Considerando per il momento solo avvolgimenti **A PASSO INTERO**, in ciascun passo polare  $\tau$  ogni avvolgimento di fase occupa  $q$  cave su  $60^\circ$  elettrici ( $180^\circ/3$ ):

$$q = \frac{Q}{m \cdot p} \xrightarrow{\text{trifase}} q = \frac{Q}{3p}$$

$p$  = numero poli =  $2p_p$

$m$  = numero fasi = 3

13

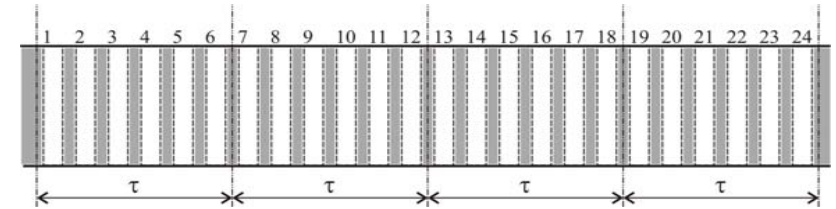
## Avvolgimenti in c.a. distribuiti nelle cave

I gruppi di  $q$  cave occupate dallo stesso avvolgimento di fase che si susseguono lungo lo statore distano tra loro di  $180^\circ$  gradi elettrici, cioè di un **passo polare  $\tau$** . I successivi gruppi di lati attivi devono essere percorsi alternativamente in un senso e nell'altro. Con questi criteri, è possibile assegnare le cave alle 3 fasi e stabilire i sensi di percorrenza.

Consideriamo una macchina asincrona trifase, a 4 poli, con 2 cave di statore per polo e per fase:  $m = 3$ ,  $p = 4$ ,  $q = 2$

$\Rightarrow$  n° cave di statore  $Q = q \cdot m \cdot p = 2 \cdot 3 \cdot 4 = 24$ .

Disegniamo lo sviluppo in piano dello statore:



14

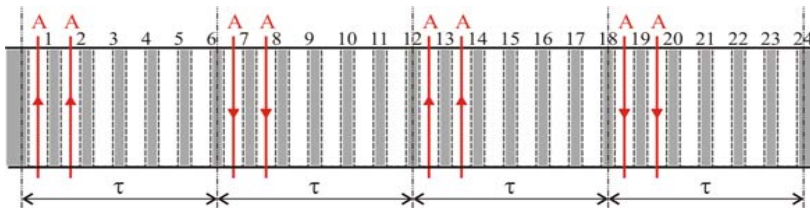
## Avvolgimenti in c.a. distribuiti nelle cave

Il criterio è di assegnare la cava 1 alla prima fase (A).

Poiché  $q = 2 \Rightarrow$  si assegnerà anche la cava 2 alla prima fase (A).

Si assegneranno quindi alla prima fase (A) anche i gruppi di cave 7-8, 13-14, 19-20 che si trovano a  $180^\circ$  gradi elettrici l'uno dall'altro.

I versi di percorrenza delle cave 7-8 saranno opposti a quelli delle cave 1-2.

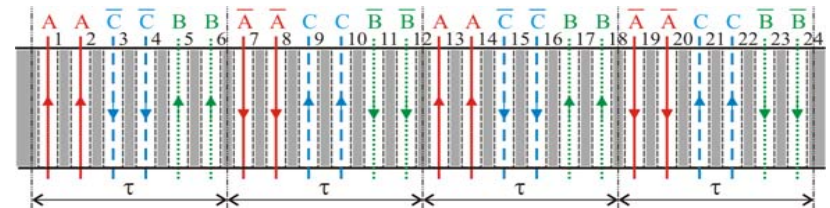


Poiché **la seconda fase (B) deve essere distante  $120^\circ$  dalla prima fase (A)**, ad essa verranno assegnati i gruppi di cave 5-6, 11-12, 17-18, 23-24.

15

## Avvolgimenti in c.a. distribuiti nelle cave

Alla **terza fase (C), distante  $120^\circ$  dalla seconda fase (B)**, si assegnano i gruppi di cave 9-10, 15-16, 21-22, 3-4:



Supponiamo di avere un solo conduttore per cava (**singolo strato**):

$\Rightarrow$  n° totale conduttori  $N_t = 24 \Rightarrow$  n° conduttori per fase:  $N = N_t/3 = 8$

Quindi ogni avvolgimento di fase sarà costituito da  $N = 8$  conduttori che dovranno essere collegati tra loro.

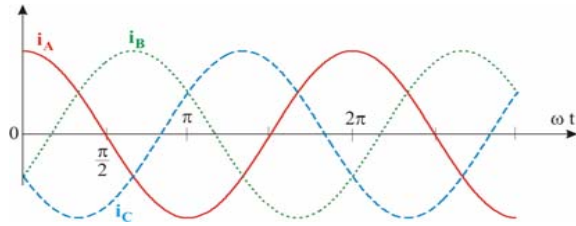
I versi indicati nei disegni rappresentano i versi di percorrenza dei conduttori inseriti nelle cave. Il verso della f.m.m. è determinato dall'andamento nel tempo delle correnti che circolano nei tre avvolgimenti di fase.

16

## Avvolgimenti in c.a. distribuiti nelle cave

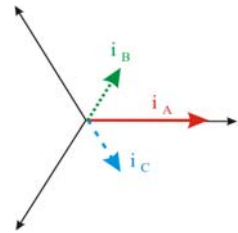
Gli andamenti nel tempo di  $i_A(t)$ ,  $i_B(t)$  e  $i_C(t)$  sono sfasati di  $2\pi/3$ :

$$\begin{cases} i_A = I_M \cos \omega t \\ i_B = I_M \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \\ i_C = I_M \cos\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) \end{cases}$$



All'istante  $t = 0$ :

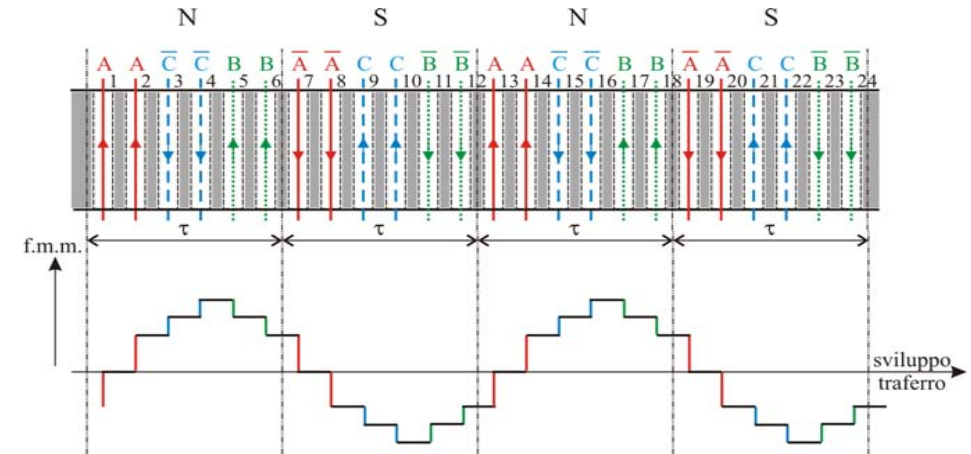
$$\begin{cases} i_A(t) = I_M \\ i_B(t) = -I_M/2 \\ i_C(t) = -I_M/2 \end{cases}$$



17

## Avvolgimenti in c.a. distribuiti nelle cave

Perciò, all'istante  $t=0$ , la f.m.m. sviluppata dalle correnti circolanti nei 3 avvolgimenti di fase dello statore avrà questa forma (si notino le 4 alternanze della f.m.m., dovute al fatto che l'avvolgimento è progettato per ottenere 4 poli):



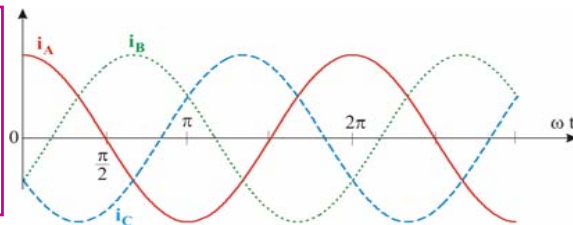
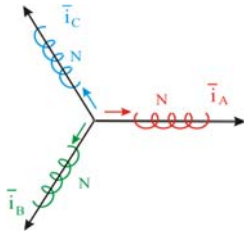
18

## Avvolgimenti in c.a. distribuiti nelle cave

Vediamo ora analiticamente come può essere rappresentata la f.m.m. prodotta da ciascuno dei tre avvolgimenti prima considerati.

Per  $t = 0 \Rightarrow \alpha = 0$ .

$$\begin{cases} M_A(t, \alpha) = M_M \cos \omega t \cos \alpha \\ M_B(t, \alpha) = M_M \cos\left(\omega t - \frac{2}{3}\pi\right) \cos\left(\alpha + \frac{2}{3}\pi\right) \\ M_C(t, \alpha) = M_M \cos\left(\omega t - \frac{4}{3}\pi\right) \cos\left(\alpha + \frac{4}{3}\pi\right) \end{cases}$$



$\alpha$  rappresenta lo "spostamento" del campo magnetico rotante lungo la circonferenza di statore.

$\omega t$  rappresenta la variazione nel tempo delle correnti che producono il campo.

## Avvolgimenti in c.a. distribuiti nelle cave

Ricordando che:

$$\cos \omega t \cos \alpha = \frac{1}{2} (\cos(\omega t + \alpha) + \cos(\omega t - \alpha))$$

Sviluppando, si ottiene:

$$\begin{cases} M_A(t, \alpha) = \frac{1}{2} M_M (\cos(\omega t + \alpha) + \cos(\omega t - \alpha)) \\ M_B(t, \alpha) = \frac{1}{2} M_M \left( \cos(\omega t + \alpha) + \cos\left(\omega t - \alpha - \frac{4}{3}\pi\right) \right) \\ M_C(t, \alpha) = \frac{1}{2} M_M \left( \cos(\omega t + \alpha) + \cos\left(\omega t - \alpha - \frac{8}{3}\pi\right) \right) \end{cases}$$

Si può verificare che la somma dei secondi termini di queste tre espressioni dà zero (sono tre fasori di uguale ampiezza e sfasati tra loro di  $4/3\pi$  l'uno dall'altro).

20

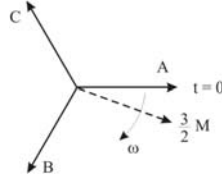
## Avvolgimenti in c.a. distribuiti nelle cave

Sommando le espressioni ottenute di  $M_A$ ,  $M_B$  e  $M_C$  si ottiene:

$$\frac{3}{2} M \cos(\alpha + \omega t)$$

**F.M.M. RISULTANTE**

Il campo magnetico risultante è quindi a distribuzione spaziale sinusoidale (con asse coincidente con quello della fase A per  $t = 0$ ), con valore massimo costante nel tempo e ruota con velocità angolare elettrica coincidente con la pulsazione di alimentazione nel verso:  $A \rightarrow B \rightarrow C$  (orario).



È possibile invertire il verso di rotazione del campo magnetico rotante scambiando il senso ciclico del sistema di alimentazione:

$$\frac{3}{2} M \cos(\alpha - \omega t)$$

21

## Avvolgimenti trifase a più poli

Importante: tutto questo vale nel caso di macchina a due poli.

Cosa succede nel caso di macchina a più poli?

$$\begin{cases} M_A(t, \alpha) = M_M \cos \omega t \cos p_p \alpha \\ M_B(t, \alpha) = M_M \cos \left( \omega t - \frac{2}{3} \pi \right) \cos \left( p_p \alpha + \frac{2}{3} \pi \right) \\ M_C(t, \alpha) = M_M \cos \left( \omega t - \frac{4}{3} \pi \right) \cos \left( p_p \alpha + \frac{4}{3} \pi \right) \end{cases}$$

$$\frac{3}{2} M \cos(p_p \alpha + \omega t)$$

**F.M.M. RISULTANTE**  
per paia poli  $> 1$

22

## Avvolgimenti trifase a più poli

$$B = \frac{\mu_0}{2\delta} \frac{3}{2} M \cos(p_p \alpha + \omega t)$$

**Campo rotante per paia poli  $> 1$**

Questa espressione rappresenta un'onda a distribuzione sinusoidale lungo il traferro, che viaggia lungo il traferro con velocità angolare:

$$\frac{\omega}{p_p}$$

Quindi, con un numero di paia poli  $> 1$ :

- la frequenza della tensione e della corrente di alimentazione rimane  $\omega$ ;
- la velocità del campo magnetico rotante (e della distribuzione di f.m.m.) al traferro diventa  $\omega/p_p$ .

23

## Avvolgimenti in c.a. distribuiti nelle cave

Gli avvolgimenti distribuiti nelle cave si possono distinguere principalmente a seconda di:

- disposizione in cava  $\rightarrow$ 
  - singolo strato
  - doppio strato
- forma delle teste di matassa  $\rightarrow$ 
  - concentrici
  - embricati
- collegamenti tra matasse  $\rightarrow$ 
  - a spirale
  - ondulato
- raccorciamento  $\rightarrow$ 
  - a passo intero
  - a passo raccorciato

24

## Disposizione in cava: singolo o doppio strato

Gli avvolgimenti in alternata possono essere disposti in cava:

■ a **SINGOLO STRATO**, quando ogni cava contiene un solo lato di matassa:

⇒ il numero di matasse è uguale alla metà del numero di cave:  $N_m = Q/2$

■ a **DOPPIO STRATO**: quando ogni cava contiene due lati di matassa:

⇒ il numero di matasse è uguale al numero di cave:  $N_m = Q$

Gli avvolgimenti a **DOPPIO STRATO** sono più vantaggiosi perché:

- le matasse sono tutte uguali fra loro (possono essere solo embricati e non concentrici);
- si adattano a un numero di cave tale per cui  $Q/m$  sia un intero (a singolo strato deve essere un intero  $Q/2m$ );
- presentano la massima simmetria sia meccanica sia elettromagnetica;
- permettono la costruzione di avvolgimenti raccorciati.

25

## Forma delle teste di matassa

Gli avvolgimenti **CONCENTRICI** presentano matasse disuguali, interne le une alle altre e non presentano incroci alle testate:

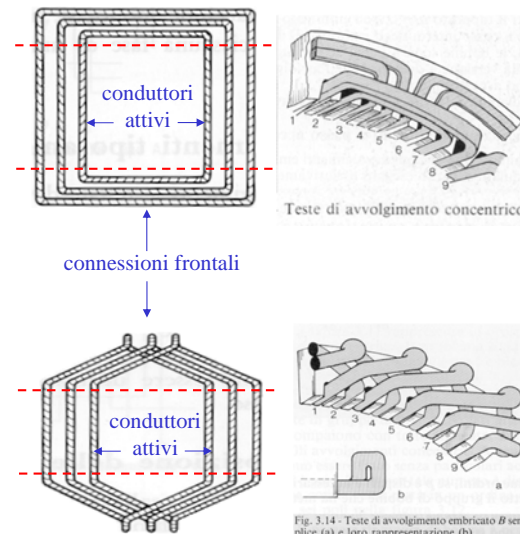
⇒ disposizione su ordini distinti

⇒ non consentono il doppio strato, né il raccorciamento.

Gli avvolgimenti **EMBRICATI** presentano matasse tutte uguali, disposte in modo contiguo e parzialmente sovrapposte tra loro:

⇒ di più facile realizzazione pratica;

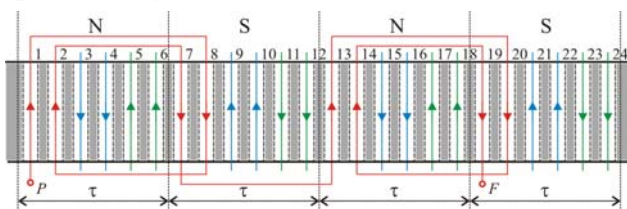
⇒ consentono il doppio strato.



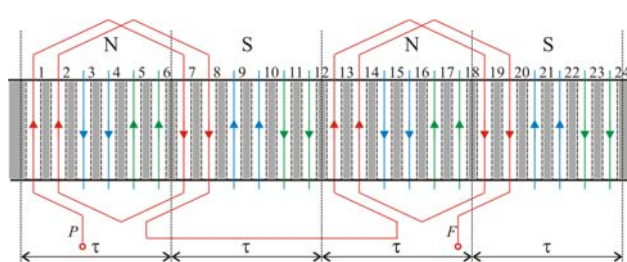
26

## Concentrici o embricati

Esempio di avvolgimenti **CONCENTRICI**:



Esempio di avvolgimenti **EMBRICATI**:



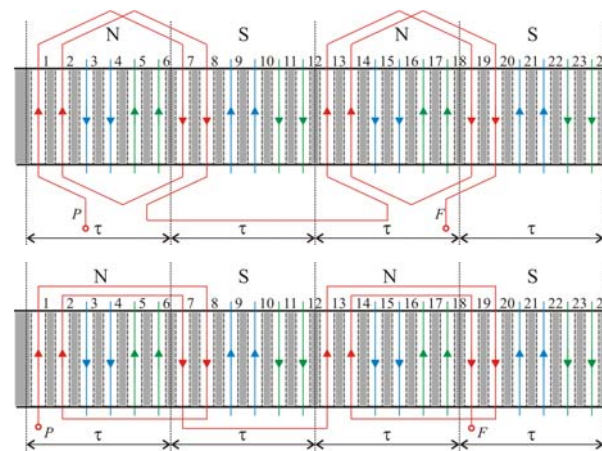
27

## Collegamenti tra matasse

I collegamenti tra matasse, per formare gli avvolgimenti di fase, possono essere:

■ **A SPIRALE**, quando le matasse sotto una coppia di poli sono collegate tra loro.

Adatto quando si hanno molti conduttori per cava.



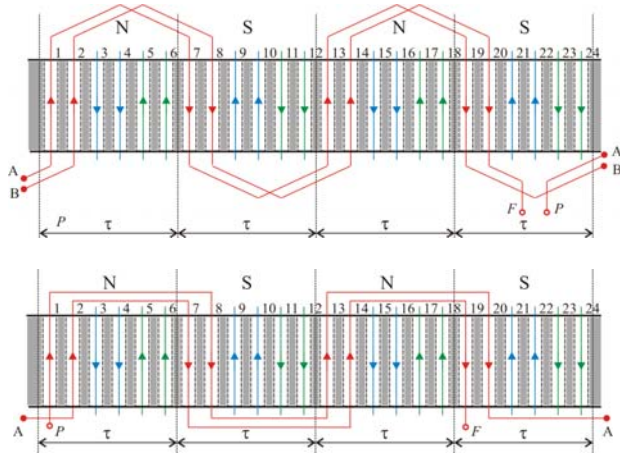
**A SPIRALE**,  
embricato

**A SPIRALE**,  
concentrico

28

## Collegamenti tra matasse

■ **ONDULATI**, quando si collegano i conduttori sotto i poli successivi procedendo lungo le cave sempre nello stesso senso. Adatto quando si hanno pochi conduttori per cava o per gli avvolgimenti a sbarre. Non consentono il raccorciamento.



**ONDULATO,**  
embricato

**ONDULATO,**  
concentrico

29

## Raccorciamento

■ a **PASSO INTERO**: quando la distribuzione dei lati di matassa nelle cave per ogni fase interessa un terzo del passo polare ( $\tau/3$ ) ed è distante un passo polare ( $\tau$ ) da quella successiva (lo sviluppo periferico medio della spira è  $= \tau$ ).

■ a **PASSO RACCORCIATO**: quando i lati di matassa di ciascuna fase disposti sotto un polo coprono più di un terzo del passo polare (lo sviluppo periferico medio della spira è più piccolo del passo polare).

Gli avvolgimenti a **PASSO RACCORCIATO** hanno i seguenti vantaggi:

- minore lunghezza delle testate  $\Rightarrow$  minori perdite per effetto Joule;
- si eliminano o si attenuano alcune armoniche nella f.e.m. risultante.

e svantaggi:

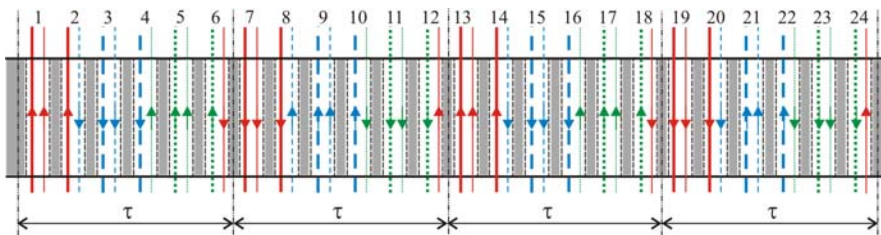
- la f.e.m. risultante ha un valore più piccolo (3-10% in meno);
- difficoltà per l'isolamento elettrico (entro alcune cave si trovano lati di matassa appartenenti a due fasi).

30

## Raccorciamento

Esempio di un avvolgimento a **DOPPIO STRATO** a **PASSO RACCORCIATO** di una sola cava:

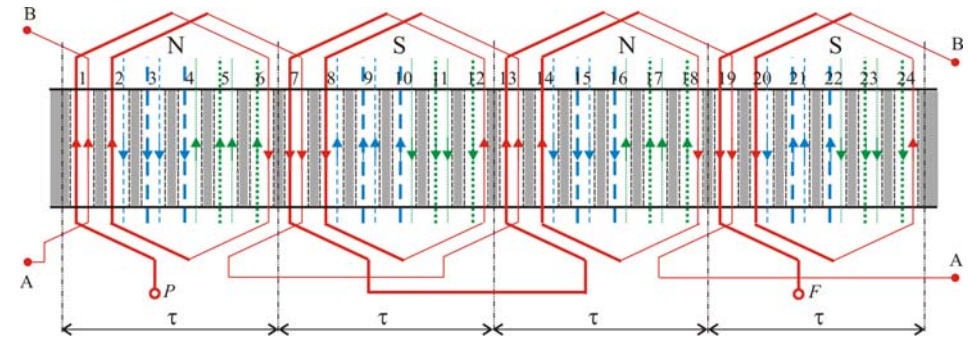
- i lati di matassa di ciascuna fase coprono più di  $60^\circ$  elettrici ( $= 180^\circ/3 = \tau/3$ ) sotto ciascun polo;
- in alcune cave sono presenti lati attivi di fasi diverse.



31

## Raccorciamento

Esempio di avvolgimento a **DOPPIO STRATO** a **PASSO RACCORCIATO** di una sola cava con collegamento **A SPIRALE**, con  $m = 3$ ,  $p = 4$ ,  $q = 2$ .



32