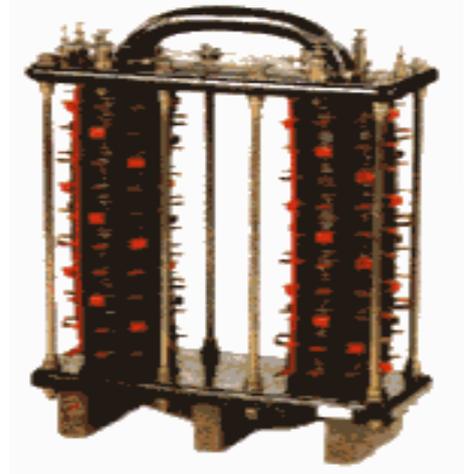


ELETTROTECNICA

MACCHINE ELETTRICHE

Saranno di seguito riportate le principali definizioni riguardanti le macchine elettriche, sarà proposta una sia pur generica classificazione delle stesse ed illustrati i principi di funzionamento delle macchine storicamente più diffuse.



Trasformatore - Lucien Gaulard, 1884

Anello di Pacinotti – Antonio Pacinotti, 1858

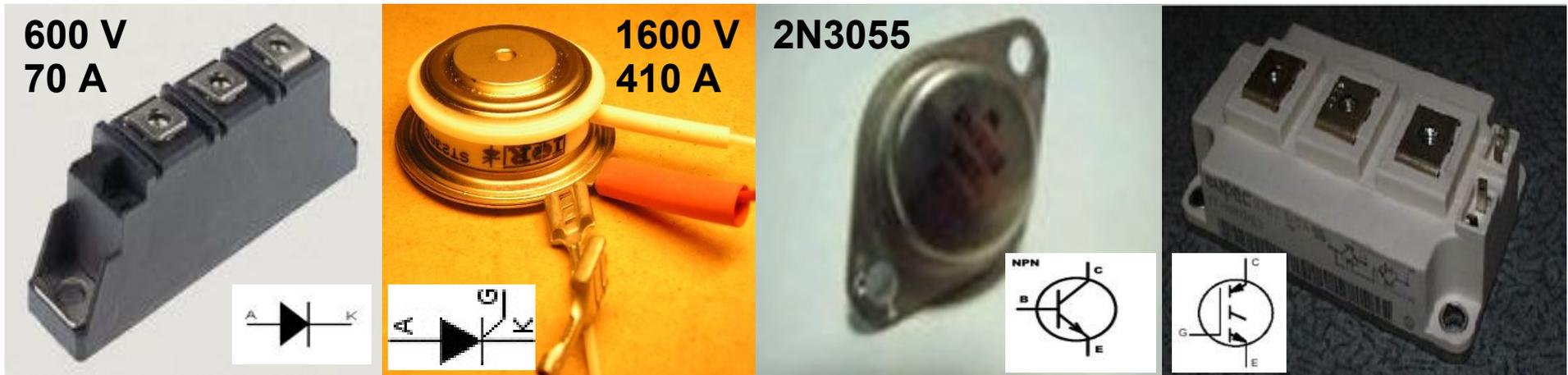


Macchina asincrona - Galileo Ferraris, 1885



Definizione

Recentemente si tende a ricomprendere nella famiglia delle macchine elettriche anche quei dispositivi (*raddrizzatori, invertitori, chopper e cicloconvertitori*) che realizzano conversioni di energia elettrica mediante componenti elettronici di potenza allo stato solido (*diodi, tiristori, transistori, IGBT*), anche se non sono reversibili e non basano il loro funzionamento sulle leggi dell'induzione.



Si può quindi dare una definizione ampliata di **macchina elettrica** come **quel dispositivo in cui le trasformazioni energetiche coinvolgono, nello stadio iniziale e in quello finale, l'energia elettrica e l'energia meccanica, oppure la sola energia elettrica.**

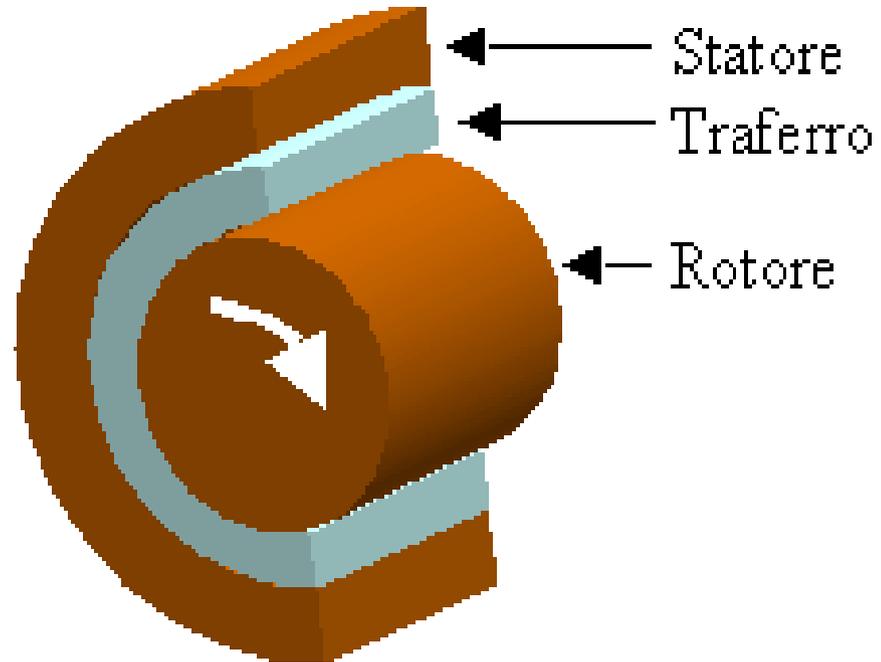
Classificazione: criteri

MACCHINE	Rotanti	Statiche	
Per c.a. <i>monofase</i> e <i>trifase</i>	Sincrone	Generatori (alternatori e turboalternatori) Motori Compensatori	Trasformatori Regolatori ad induzione Variatori di fase <i>Cicloconvertitori</i>
	Asincrone	Motori Generatori Compensatori	
	A commutazione	Motori monofasi in serie Convertitori di frequenza	
Per c.c.	A commutazione	Motori Generatori Amplificatori	<i>Chopper</i>
Per c.c e c.a.	A commutazione	Motori universali Convertitrici	<i>Raddrizzatori</i> <i>Inverter</i>

Classificazione: criteri

MACCHINE Rotanti	
Per c.a. <i>monofase</i> e <i>trifase</i>	Sincrone
	Asincrone
	A commutazione
Per c.c.	A commutazione
Per c.c e c.a.	A commutazione

Hanno masse in movimento. Sono usualmente costituite da due parti, una fissa detta *statore*, ed una mobile detta *rotore*, separate da una regione di aria detta *traferro* (o *interferro*), che consente il moto relativo delle due parti.



Classificazione: criteri

MACCHINE	Rotanti		Statiche
Per c.a. <i>monofase</i>	Sincrone	Generatori (alternatori e turboalternatori)	Trasformatori Regolatori ad induzione
Pe	<p>Non hanno masse in movimento. Possono essere ad induzione (che basano il loro funzionamento sulle leggi dell'induzione elettromagnetica) o convertitrici (che basano invece il loro funzionamento sui fenomeni di conduzione elettrica unidirezionale - libera o controllata - di componenti elettronici di potenza allo stato solido (detti <i>valvole</i>); questi componenti sono fondamentalmente di tre tipi: non controllati (<i>diodi</i>), controllati solo in accensione (<i>tiristori</i>), controllati in accensione e spegnimento (<i>transistori</i>). Lo spegnimento dei <i>diodi</i> e dei <i>tiristori</i> può essere affidato al normale andamento della tensione di alimentazione (<i>commutazione naturale</i>), oppure può essere forzato mediante l'ausilio di opportuni circuiti di spegnimento (<i>commutazione forzata</i>).</p>		
Pe			

Classificazione: criteri

MACCHINE	Rotanti	Statische
<p>Per c.a. monofase e trifase</p>	<p>Asincroni</p>	<p>Motori ad induzione fase Convertitori</p>
<p>Per c.c.</p>	<p>A commutazione</p>	<p>Convertitori di frequenza Motori Generatori Amplificatori Chopper</p>
<p>Per c.c e c.a.</p>	<p>A commutazione</p>	<p>Motori universali Convertitrici Raddrizzatori Inverter</p>

Sono macchine nelle quali l'energia elettrica trasformata è, nello stadio iniziale e/o in quello finale, in corrente alternata sia monofase che trifase (anche se possono essere presenti sezioni interessate da correnti continue, che però hanno solo una funzione magnetizzante, i.e. di sostenere il flusso di induzione magnetica nella macchina).

Classificazione: criteri

MACCHINE	Rotanti		Statiche
Per c.a. <i>monofase</i> e <i>trifase</i>	Sincrone	Generatori (alternatori e turboalternatori) Motori Compensatori	Trasformatori Regolatori ad induzione Variatori di fase <i>Cicloconvertitori</i>
	Asincrone	Motori Generatori Compensatori	
	A commutazione	Motori monofasi in serie Convertitori di frequenza	
Per c.c.	A c.c.		
Per c.c. e c.a.	A c.c.	Convertitrici	Inverter

Sono macchine nelle quali l'energia elettrica trasformata è, nello stadio iniziale e/o quello finale, in *corrente continua*.

Classificazione: criteri

MACCHINE	Rotanti		Statiche
Per c.a. <i>monofase</i> e <i>trifase</i>	Sincrone	Generatori (alternatori e turboalternatori) Motori Compensatori	Trasformatori Regolatori ad induzione Variatori di fase <i>Cicloconvertitori</i>
	Asincrone	Motori Generatori Compensatori	
	A commutazione	Convertitori	
Per c.c.	A commutazione	Convertitori	
Per c.c. e c.a.	Convertitori	Convertitori	Inverteri

Sono macchine nelle quali l'energia elettrica trasformata può essere sia in *corrente alternata* che in *corrente continua* (e.g., motori universali) od anche simultaneamente in entrambe le forme (e.g., convertitrici statiche o rotanti).

Classificazione: criteri

MACCHINE	Rotanti	
Per c.a. monofase e trifase	Sincrone	ori d induzione fase rtitori
	Asincrone	
	A commutazioni	
Per c.c.	A commutazioni	
Per c.c e c.a.	A commutazioni	ri
Convertitrici		Inverter

La trasformazione energetica può avvenire se e soltanto se la velocità di rotazione del rotore, n_r , è uguale alla velocità di rotazione sincrona, n_c , definita in funzione della frequenza della rete di alimentazione, f , mediante la seguente relazione

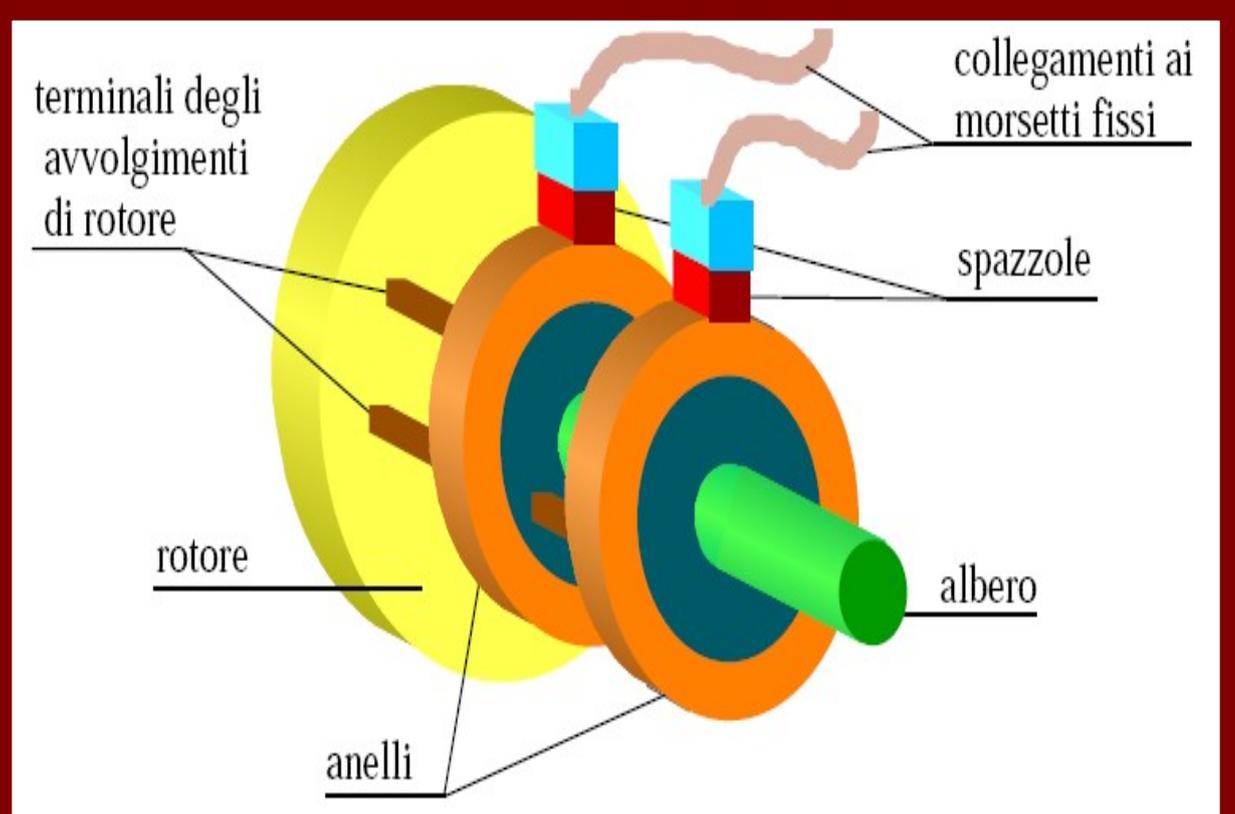
$$n_r = n_c = 60 f / p$$

dove p ($= 1, 2, 3, \dots, n$) è il numero di coppie polari della macchina.

Classificazione: criteri

MACCHINE	Rotanti	
Per c.a. <i>monofase</i> e <i>trifase</i>	Sincrone	<p>La trasformazione energetica può avvenire se e soltanto se la velocità di rotazione del rotore, n_r, è diversa dalla velocità di rotazione sincrona, n_c, definita in funzione della frequenza della rete di alimentazione, f, mediante la seguente relazione</p> $n_r \neq n_c = 60 f / p$ <p>dove p ($= 1, 2, 3, \dots, n$) è il numero di coppie polari della macchina.</p>
	Asincrone	
Per c.c.	A commutazione	
Per c.c. e c.a.	A commutazione	<p>Convertitrici</p> <p>Inverter</p>

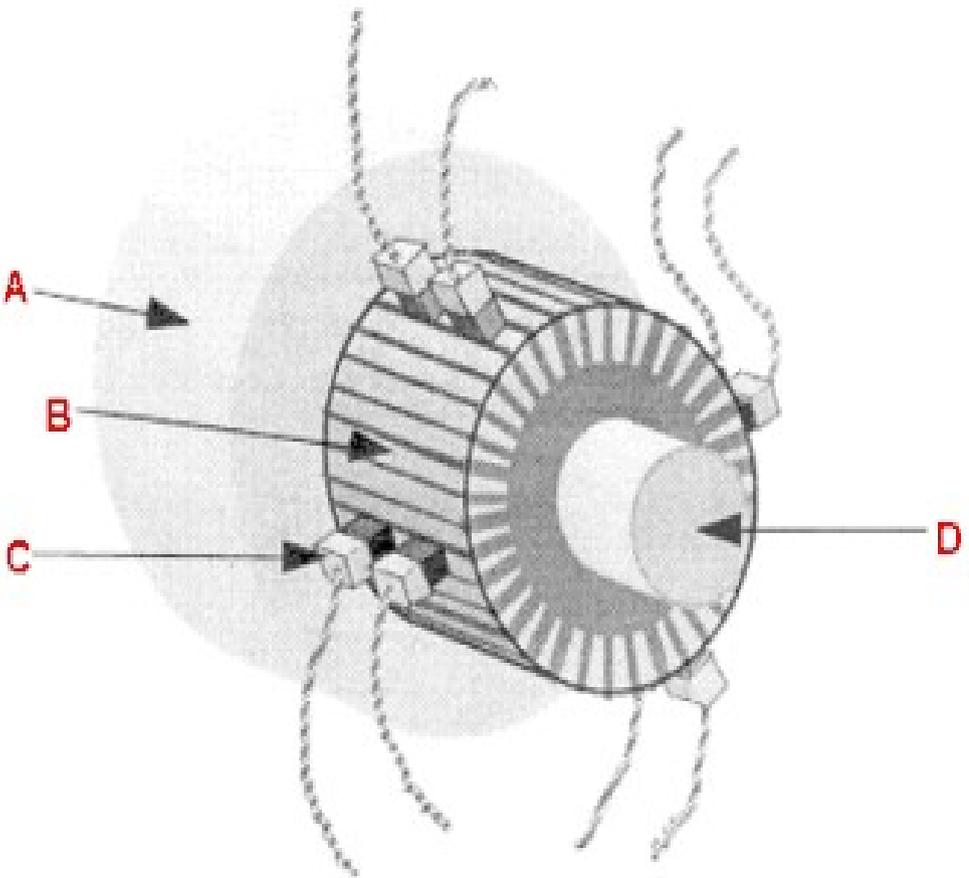
Classificazione: criteri

MACCHINE	Rotanti		
Per c.a. monofase e trifase	Sincrone	 <p>terminali degli avvolgimenti di rotore</p> <p>collegamenti ai morsetti fissi</p> <p>spazzole</p> <p>rotore</p> <p>albero</p> <p>anelli</p>	
	Asincrone		
	A commutazione		
Per c.c.	A commutazione		
Per c.c e c.a.	A commutazione	Motori universali Convertitrici	Raddrizzatori Inverter

Lo scambio di energia elettrica con il rotore può avvenire attraverso il contatto strisciante di spazzole su di un collettore ad anelli.

Classificazione: criteri

MACCHINE	Rotanti	
Per c.a. monofase e trifase	Sincrone	Ge Mo Co
	Asincrone	Mo Ge Co
Per c.c.	A commutazione	Mo Co Ge Am
Per c.c e c.	A commutazione	Mo Co



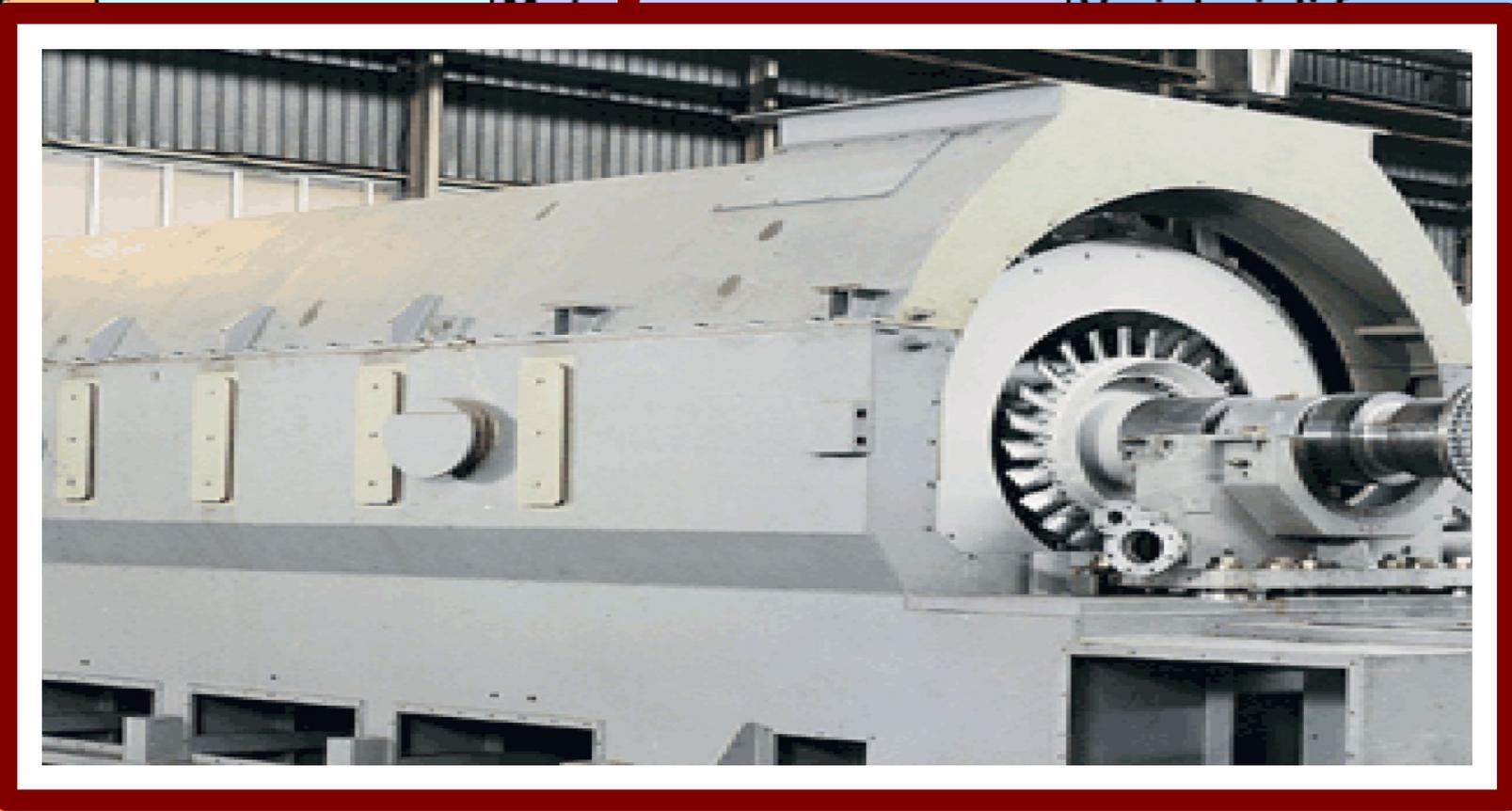
Lo scambio di energia elettrica con il rotore avviene attraverso il contatto strisciante di spazzole su di un collettore a lamelle.

Classificazione: criteri

MACCHINE	Rotanti		Statiche
Per c.a. <i>monofase</i> e <i>trifase</i>	Sincrone	Generatori (a turbo) Motori Compensatori	Trasformano l'energia meccanica fornita da un motore primo idraulico (turbine idrauliche di tipo Pelton, Francis o Kaplan) o termico (turbine a vapore o a gas, motori a combustione interna ecc.) in energia elettrica di corrente continua (macchine a commutazione dette dinamo) od alternata (macchine con o senza anelli, dette alternatori o turbo-alternatori).
	Asincrone	Motori Generatori Compensatori	
	A commutazione	Motori monofase Convertitori di	
Per c.c.	A commutazione	Motori Generatori Amplificatori	
Per c.c e c.a.	A commutazione	Motori universali Convertitrici	Raddrizzatori Inverter

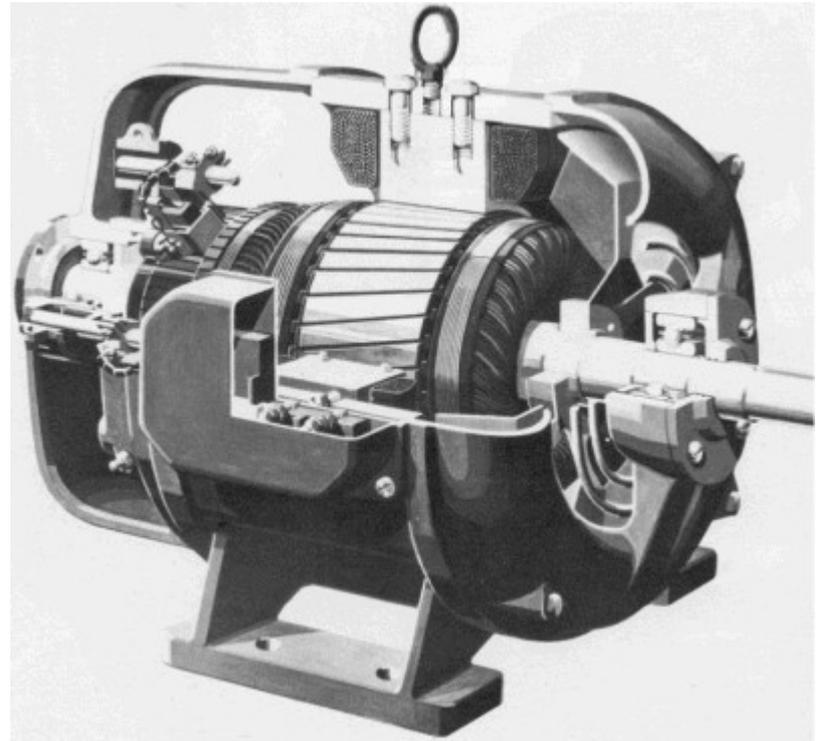
Classificazione: criteri

MACCHINE	Rotanti	Statiche
Per c.a. monofase e trif	Sincrone	Generatori (alternatori e turboalternatori)
Per c.c.		Trasformatori Regolatori ad induzione
Per c.c. e		



Classificazione: criteri

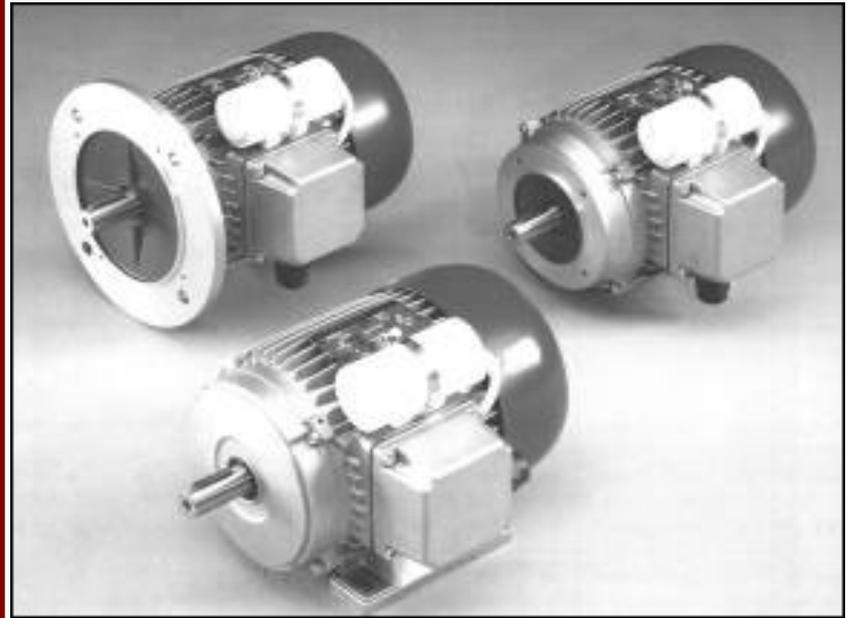
MACCHINE	Rotanti	
Per c.a. monofase e trifase	Sincrone	Generatori tu Motori Compensaf
	Asincrone	Motori Generatori Compensaf
	A commutazion	Motori Convertitor
Per c.c.	A commutazion	Motori Generatori Amplificato
Per c.c e c.a.	A commutazion	Motori Convertitrici



Trasformano in energia meccanica l'energia elettrica di corrente continua (macchine a commutazione) od alternata (macchine a commutazione o ad anelli).

Classificazione: criteri

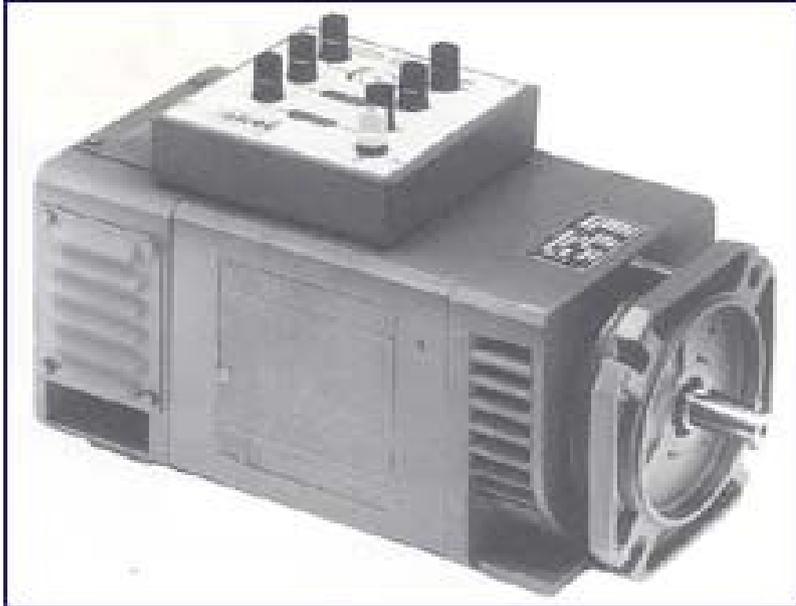
MACCHINE	Rotanti	Statiche
Per c.a. <i>monofase</i> e <i>trifase</i>	Sincrone	Generatori tu Motori Compensaf
	Asincrone	<div style="border: 2px solid red; border-radius: 50%; padding: 5px; display: inline-block;">Motori</div> Generatori Compensaf
	A commutazione	Motori mon Convertitor
Per c.c.	A commutazione	Motori Generatori Amplificato
Per c.c e c.a.	A commutazione	Motori univ Convertitrici
		<i>Inverter</i>



Motori asincroni monofase, da notare la presenza dei condensatori di avviamento (Carpanelli).

Classificazione: criteri

MACCHINE	Rotanti		Statiche
Per c.a. <i>monofase</i> e <i>trifase</i>	Sincrone	Generatori (alternatori e turboalternatori) Motori Compensatori	Trasformatori Regolatori ad induzione Variatori di fase
	Asincrone	Motori Generatori Compensatori	
	A commutazione	Motori monofase Convertitori	
Per c.c.	A commutazione	Motori Generatori Amplificatori	
Per c.c e c.a.	A commutazione	Motori universali Convertitrici	<i>Inverter</i>



Motori in corrente continua

Classificazione: criteri

MACCHINE	Rotanti	
Per c.a. <i>monofase</i> e <i>trifase</i>	Sincrone	Generatori (a turbo) Motori Compensatori
	Asincrone	Motori Generatori Compensatori
	A commutazione	Motori monofase Convertitori
Per c.c.	A commutazione	Motori Generatori Amplificatori
Per c.c e c.a.	A commutazione	Motori universali Convertitrici

Trasformano l'energia elettrica di corrente alternata (*monofase* o *polifase*, in particolare *trifase*) in energia elettrica di corrente continua e/o viceversa. Sono macchine ormai cadute in disuso (a vantaggio delle convertitrici statiche), in cui la trasformazione di energia avviene con l'impiego di un solo avvolgimento indotto facente capo a due collettori, uno *ad anelli* per la corrente alternata e l'altro *a lamelle* per la corrente continua.

Classificazione: criteri

		Statiche	
P		<p>Trasformano l'energia di corrente alternata variando, a frequenza costante, i fattori di tensione e di corrente (e.g., da energia ad elevata tensione e bassa intensità di corrente, ad energia a bassa tensione ed elevata intensità di corrente, o viceversa); in relazione alle diverse realizzazioni si hanno macchine <i>monofasi</i> o <i>polifasi</i> (in particolare <i>trifasi</i>), a <i>due</i> o <i>più avvolgimenti</i>.</p>	<p>Trasformatori</p> <p>Regolatori ad induzione</p> <p>Variatori di fase</p> <p>Cicloconvertitori</p>
Per c.c.	A commutazione	<p>Motori</p> <p>Generatori</p> <p>Amplificatori</p>	Chopper
Per c.c e c.a.	A commutazione	<p>Motori universali</p> <p>Convertitrici</p>	<p>Raddrizzatori</p> <p>Inverter</p>

Classificazione: criteri



Trasformatore di distribuzione MT/BT in olio

Statiche

Trasformatori

Regolatori ad induzione
Variatori di fase
Cicloconvertitori

Chopper

Raddrizzatori
Inverter

Classificazione: criteri

MACCHINE	Rotanti		Statiche
Per c.a. <i>monofase</i> e <i>trifase</i>	Sincrone	Generatori (alternatori e turboalternatori) Motori	Trasformatori Regolatori ad induzione Variatori di fase Cicloconvertitori
Per c.c.	<p>Trasformano l'energia elettrica di corrente alternata (<i>monofase</i> o <i>polifase</i>, in particolare <i>trifase</i>) in energia elettrica di corrente continua e/o viceversa. Trasformano anche in l'energia elettrica di corrente alternata (o continua) in energia elettrica di corrente alternata (o continua) variandone le caratteristiche.</p>		Chopper
Per c.c e c.a.			Raddrizzatori Inverter

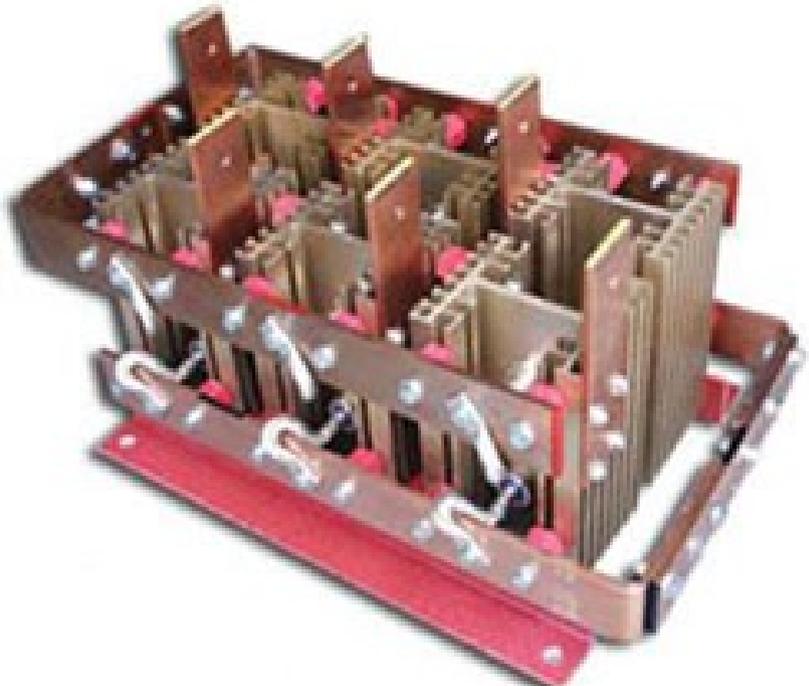
Classificazione: criteri

MACCHINE	Rotanti		Statiche
Per c.a. monofase e trifase	Sincrone	Generatori (alternatori e motori)	Trasformatori Regolatori ad induzione Variatori di fase Cicloconvertitori
Per c.c.	<p>Realizzano direttamente la conversione da tensioni e correnti alternate a tensioni e correnti alternate di caratteristiche diverse, modulando ampiezza e frequenza delle grandezze in uscita (la stessa trasformazione può anche essere ottenuta attraverso l'accoppiamento in cascata di un raddrizzatore e di un invertitore)</p>		Chopper
Per c.c e c.a.			Raddrizzatori Inverter

Classificazione: criteri

MACCHINE	Rotanti		Statiche
Per c.a. <i>monofase</i> e <i>trifase</i>	Sincrone	Generatori (alternatori e turboalternatori) Motori Compensatori	Trasformatori Regolatori ad induzione Variatori di fase <i>Cicloconvertitori</i>
	Asincrone	Motori Generatori Compensatori	
	A commutazione	Motori monofasi in serie nza	
Per c.c.	<div data-bbox="368 935 1300 1378" style="border: 2px solid red; padding: 10px;"> Modificano il valore medio della tensione unidirezionale di uscita rispetto al valore della tensione continua in ingresso </div>		<i>Chopper</i>
Per c.c e c.a.			Raddrizzatori <i>Inverter</i>

Classificazione: criteri

MACCHINE		Statiche
Per c.a. monofase e trifase	<p>Convertono tensioni e correnti alternate in tensioni e correnti continue.</p> 	<p>Trasformatori Regolatori ad induzione Variatori di fase <i>Cicloconvertitori</i></p>
Per c.c.		Chopper
Per c.c e c.a.	Raddrizzatore a ponte (6 diodi)	<p>Raddrizzatori Inverter</p>

Classificazione: criteri

MACCHINE	Rotanti		Statiche
Per c.a. <i>monofase</i> e <i>trifase</i>	Sincrone	Generatori (alternatori e turboalternatori) Motori Compensatori	Trasformatori Regolatori ad induzione Variatori di fase <i>Cicloconvertitori</i>
	Asincrone	Motori Generatori Compensatori	
	A commutazione	Motori monofasi in serie Convertitori di frequenza	
Per c.c.	A commutazione	Motori Generatori	<i>Chopper</i>
Per c.c e c.a.	Convertono tensioni e correnti continue in tensioni e correnti alternate		<i>Rettilificatori</i> <i>Inverter</i>

Classificazione: criteri

M

Pe

Pe



250 KVA IGBT Based Inverter System with 480 V, 3 Phase 60 Hz input and 3300 A, 140 VAC, 1300 Hz output.

Three cooling systems are used including forced air, heatpipe and watercooled highfrequency coaxial cable.

Application: High frequency molten metal pumping.

Per c.c e c.a.	A commutazione	Motori universali Convertitrici	Reattori Inverter
----------------	----------------	------------------------------------	-----------------------------

Cenni costruttivi: parti fondamentali delle macchine reversibili

Una macchina elettrica, dal punto di vista costruttivo, comprende le seguenti parti fondamentali:

- *struttura magnetica (o nucleo) in materiale ferromagnetico*
- *avvolgimenti*
- *isolamenti*
- *strutture meccaniche.*

Il nucleo e gli avvolgimenti costituiscono la **parte attiva**. Il nucleo e le strutture meccaniche, che normalmente non sono in tensione, vengono dette **massa**.

Nella costruzione delle macchine elettriche si impiegano materiali:

- *ferromagnetici*
- *conduttori*
- *dielettrici (o isolanti)*
- *strutturali.*

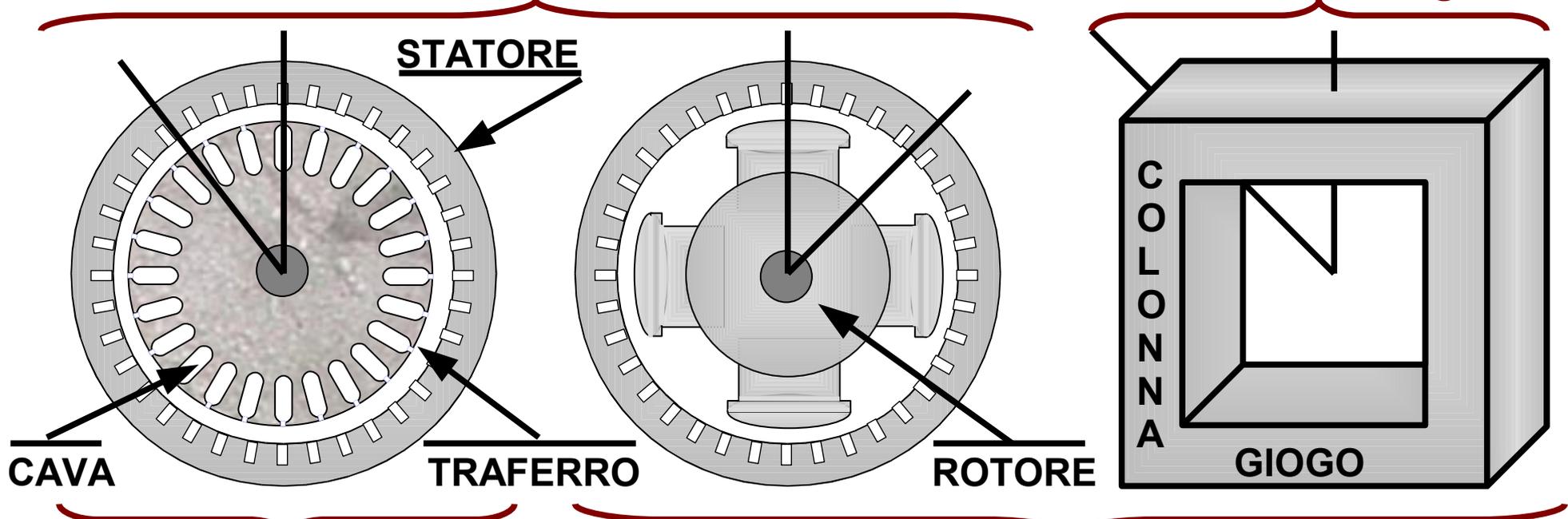
Uno stesso materiale può svolgere contemporaneamente più di una funzione (e.g., magnetica e strutturale).

Cenni costruttivi: i nuclei ferromagnetici

I **nuclei** delle macchine elettriche, *cilindri retti a sezione circolare o rettangolare*, possono essere **isotropi** o **anisotropi** secondo che risultino simmetrici, oppure no, rispetto a tutti i raggi uscenti dall'intersezione dell'asse del cilindro con un piano mediano a questo normale. Si prescinde da disuniformità, come quelle costituite dalle **cave** disposte su alcune superfici del nucleo per la sistemazione degli avvolgimenti.

Cilindri retti ... a sezione circolare

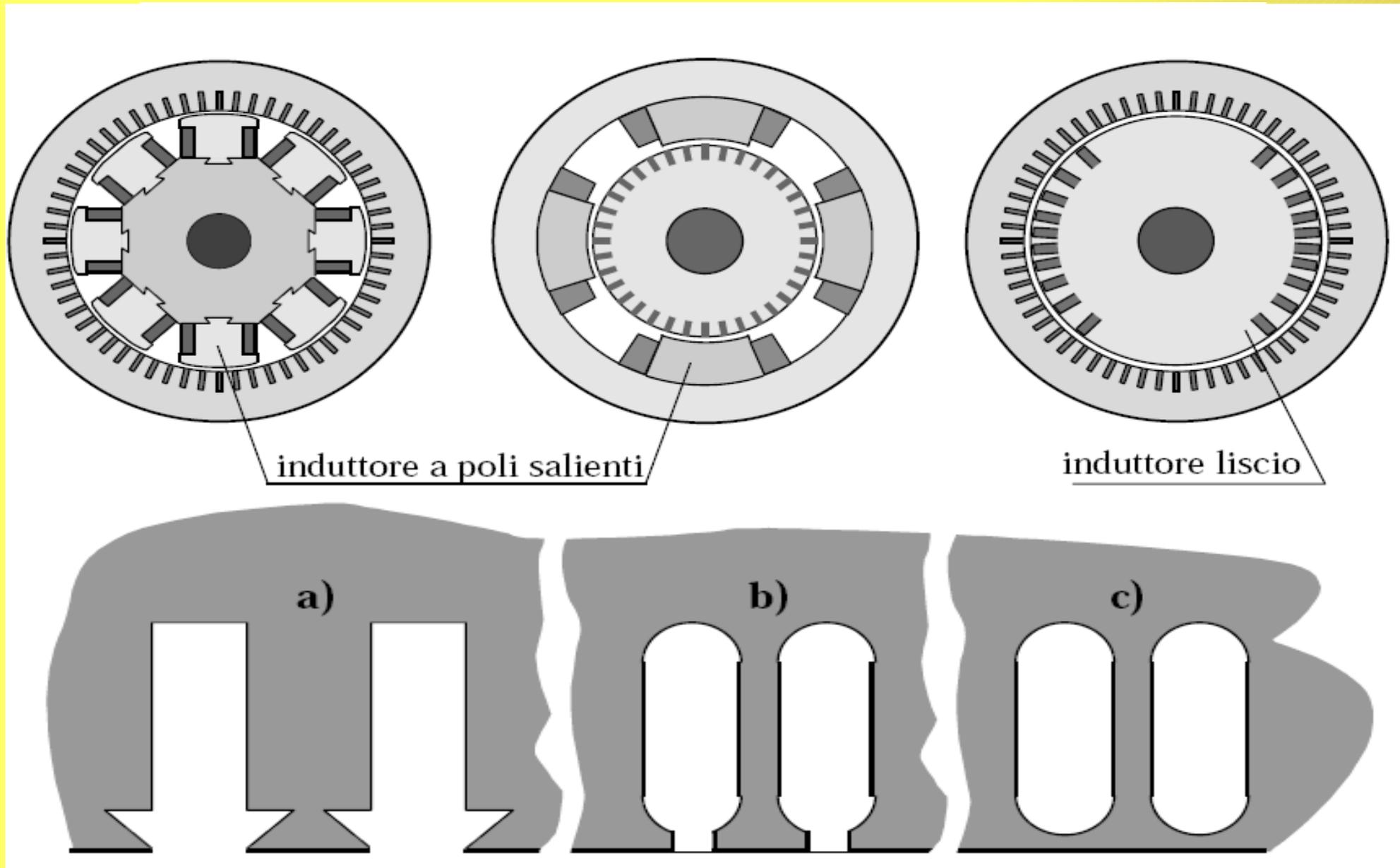
... a sezione rettangolare



Nucleo isotropo

Nuclei anisotropi

Cenni costruttivi: i nuclei ferromagnetici



Cenni costruttivi: i nuclei ferromagnetici

I **nuclei** delle macchine elettriche sono realizzati mediante **materiali magnetici** le cui caratteristiche saranno di seguito illustrate.

In generale, i **materiali magnetici** si suddividono in

Diamagnetici: materiali nei quali si ha una perfetta compensazione tra i momenti magnetici degli elettroni di ogni singolo atomo; l'applicazione di un campo magnetico esterno, anche molto intenso, induce una magnetizzazione molto piccola, ad esso proporzionale, a carattere smagnetizzante ed in genere indipendente dalla temperatura; **presentano una permeabilità magnetica relativa molto prossima anche se sempre inferiore all'unità**

$$\mu_r \leq 1$$

$$\mu = \mu_0 \left(1 + \frac{M}{H} \right) = \mu_0 (1 + \chi), \text{ e.g. } \chi = -8 \cdot 10^{-6} \text{ per il Cu}$$

Cenni costruttivi: i nuclei ferromagnetici

Paramegnetici: materiali che possiedono un momento magnetico pari alla risultante dei momenti magnetici degli elettroni di ogni singolo atomo; l'azione di un campo esterno produce un allineamento parziale dei momenti secondo il verso del campo; tale effetto magnetizzante, che decresce al crescere della temperatura secondo la legge di Curie, i.e., $\chi = C/T$, è il risultato dell'equilibrio statistico tra l'azione ordinatrice del campo e quella dell'agitazione termica; se l'interazione magnetica tra atomi adiacenti è trascurabile, non si ha magnetizzazione spontanea a livello macroscopico; questi materiali hanno un comportamento lineare ed isotropo; **presentano una permeabilità magnetica relativa molto prossima anche se sempre superiore all'unità**

$$\mu_r \geq 1$$

$$\mu = \mu_0 \left(1 + \frac{M}{H} \right) = \mu_0 (1 + \chi), \text{ e.g. } \chi = 8.3 \cdot 10^{-4} \text{ per il Mn}$$

Cenni costruttivi: i nuclei ferromagnetici

I materiali diamagnetici ed i materiali paramagnetici di fatto non modificano i campi magnetici che si manifestano nel "vuoto".

Ferromagnetici: materiali in cui gli atomi, gli ioni o le molecole possiedono un momento magnetico proprio e sono fortemente interagenti tra loro; anche a temperatura ambiente, per azione di campi magnetici esterni raggiungono facilmente la saturazione (cioè l'allineamento di tutti i dipoli magnetici); si possono avere vistosi fenomeni di magnetizzazione residua (i.e., la magnetizzazione permane in assenza di campo magnetico) e di isteresi; a partire da un valore critico T_c della temperatura (temperatura di Curie, e.g. 770 °C per il Fe) si ha un comportamento paramagnetico e quindi una suscettività magnetica, χ , che segue la Legge di Curie-Weiss: $\chi = C/(T - T_c)$.

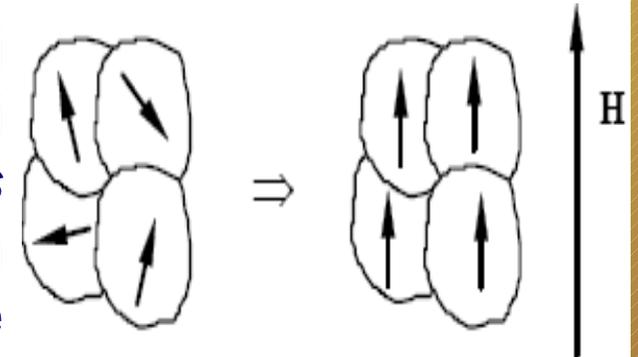
Cenni costruttivi: i nuclei ferromagnetici

Ferromagnetici: ... questi materiali, che hanno anche un buon comportamento meccanico, sono di fondamentale importanza per le applicazioni industriali poiché sono sede di intense magnetizzazioni anche in presenza di deboli campi di eccitazione; **presentano una permeabilità magnetica relativa molto maggiore all'unità.**

$$\mu_r \gg 1$$

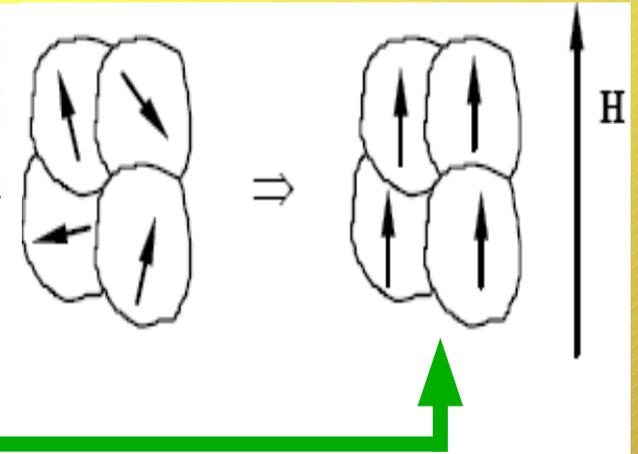
$$\mu = \mu_0 \left(1 + \frac{dM}{dH} \right) = \mu_0 (1 + \chi(H)), \text{ e.g. } \chi \approx 5 \cdot 10^3 \text{ per il Fe}$$

Dal punto di vista microscopico, i materiali ferromagnetici sono formati dall'aggregazione di innumerevoli *domini magnetici* o **domini di Weiss** delle dimensioni approssimative di $10^{-3} \div 10^{-6}$ m che sono composti da molecole o atomi che possiedono un momento magnetico proprio e sono allineati fra loro.



Cenni costruttivi: i nuclei ferromagnetici

Se il materiale è allo stato nativo i momenti magnetici dei **domini di Weiss** sono orientati casualmente, producendo quindi una magnetizzazione macroscopicamente nulla. In presenza di un campo magnetico esterno, tuttavia, i momenti magnetici tendono ad allinearsi.

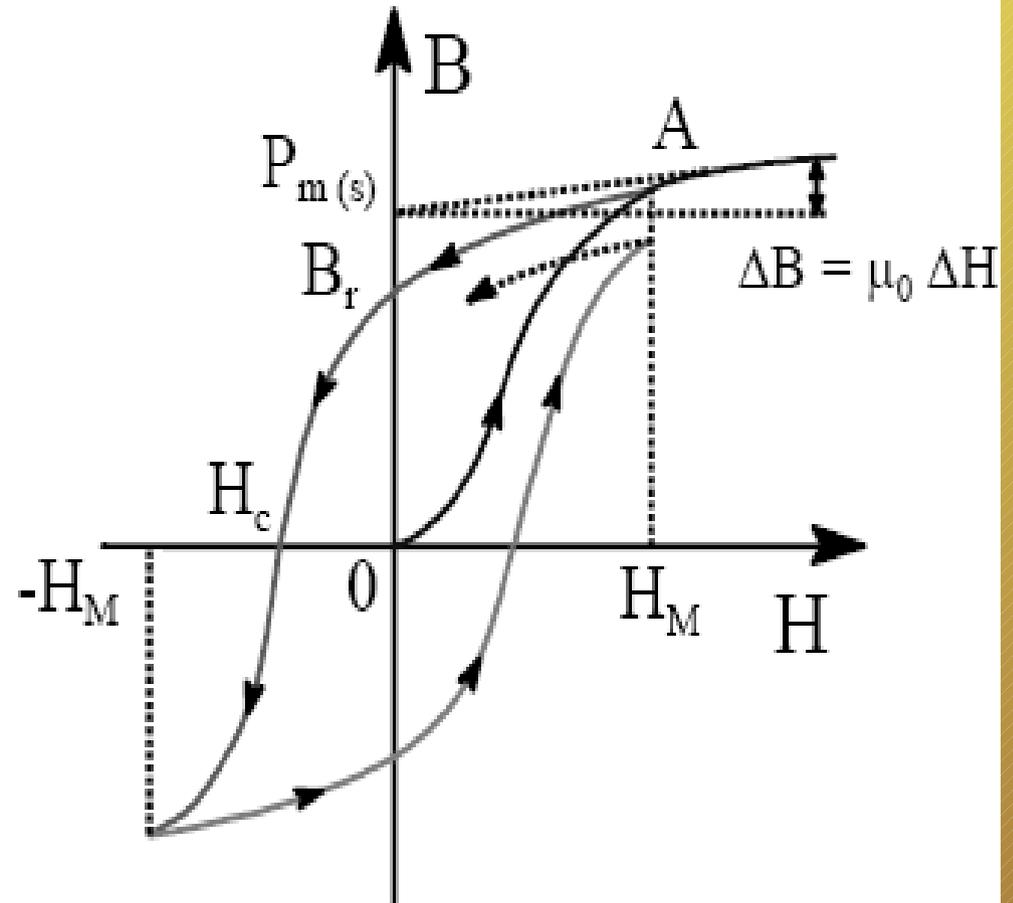


Tale allineamento permane anche se il campo magnetico esterno è rimosso, dando origine ad una magnetizzazione residua. Tale effetto magnetizzante è il risultato dell'equilibrio statistico tra l'azione ordinatrice del campo e quella dell'agitazione termica che porta alla completa smagnetizzazione quando si raggiunge la temperatura di Curie (e.g., 770 °C per il Fe). I materiali ferromagnetici sono caratterizzati mediante le **curve di magnetizzazione**, cioè mediante diagrammi che forniscono il valore in modulo e in verso dell'induzione magnetica **B** in funzione del campo magnetico **H** per i provini omogenei in esame.

Cenni costruttivi: i nuclei ferromagnetici

La curva di magnetizzazione si ottiene partendo dallo stato nativo (smagnetizzato). Si distinguono una curva di prima magnetizzazione, (tratto OA) e, a partire da A un processo ciclico che non si richiude esattamente. Se il campo magnetico viene invertito ripetutamente tra i valori $\pm H_M$, l'evoluzione si assesta su cicli simmetrici di isteresi. Al variare di H_M varia l'ampiezza dei cicli. Oltre H_M , l'incremento ΔB corrispondente ad un incremento ΔH è lo stesso che si avrebbe nel vuoto, cioè $\mu_0 \Delta H$, si raggiunge cioè la saturazione.

Curva di magnetizzazione



Ciclo di isteresi

Cenni costruttivi: i nuclei ferromagnetici

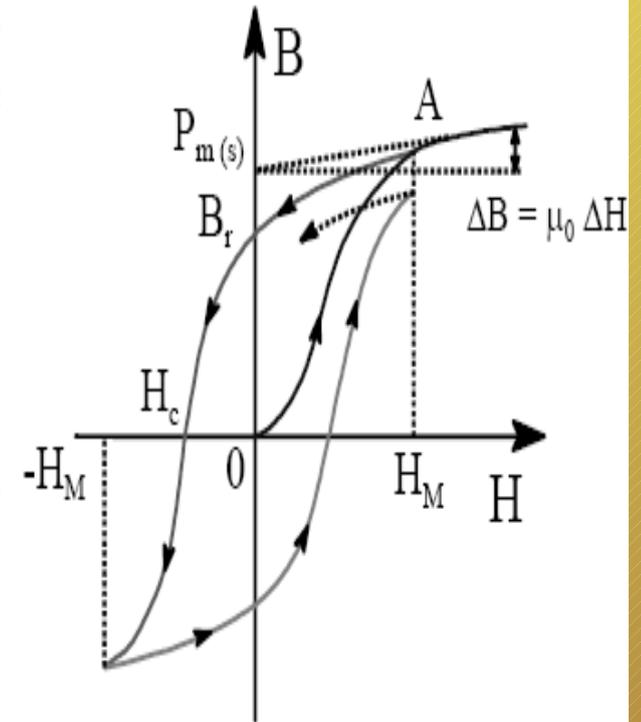
I principali parametri usualmente considerati per la caratterizzazione dei legami B-H sono:

- le permeabilità relative differenziali valutate lungo la curva di prima magnetizzazione secondo la relazione

$$\mu_{r(d)} = \frac{1}{\mu_0} \left(\frac{dB}{dH} \right)_{dH > 0}$$

in particolare quella iniziale e quella massima;

- il valore della **magnetizzazione di saturazione** $P_{m(s)}$;
- l'**induzione residua** B_r che si ha quando il campo esterno viene portato a zero;
- il **campo coercitivo** H_c che è necessario applicare in verso opposto a B_r per ridurre a zero l'induzione;
- alcuni valori di **energie specifiche** del ciclo, quali l'area W_{ist} del ciclo oppure il valore del **massimo del prodotto** $|BH|$ lungo il ciclo .



Cenni costruttivi: i nuclei ferromagnetici

Una variazione $d\mathbf{B}$ del campo di induzione provoca una variazione della densità di energia magnetica immagazzinata $\mathbf{H} \cdot d\mathbf{B}$.

Tale energia magnetica viene convertita in parte in energia conservativa ed in parte in energia dissipata (calore), secondo la relazione:

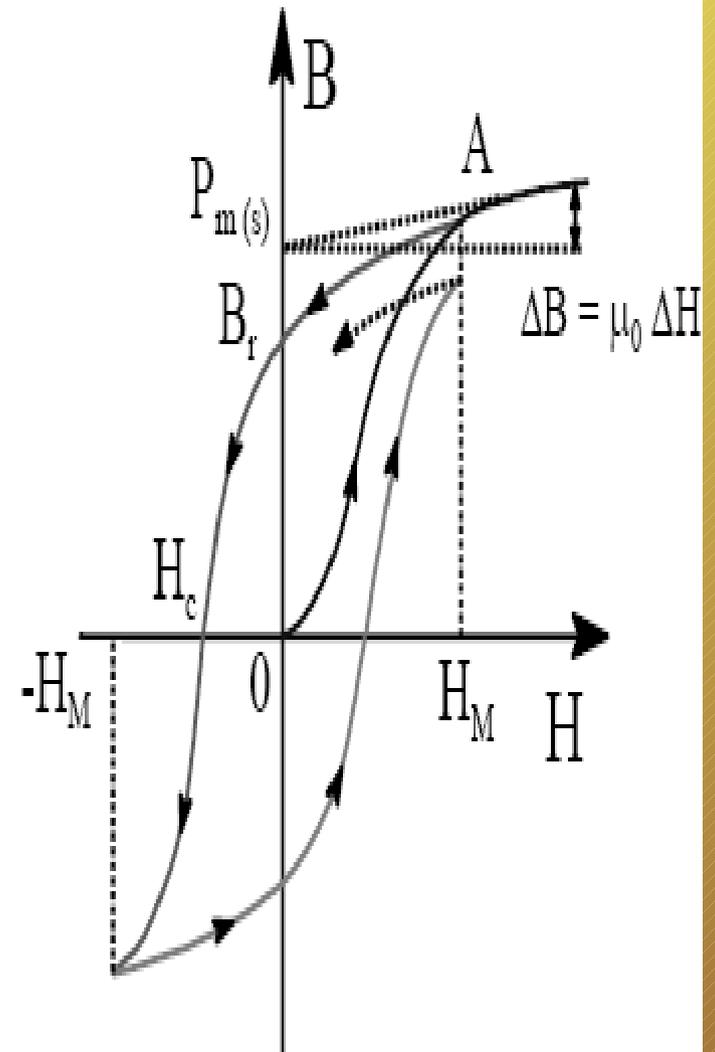
$$\int_{V_m} (\mathbf{H} \cdot d\mathbf{B}) d\tau = dE_c + \delta E_d$$

che integrata su di un ciclo di isteresi da:

$$\int_{V_m} \oint (\mathbf{H} \cdot d\mathbf{B}) d\tau = \oint dE_c + \oint \delta E_d = E_d$$

Se si considera la densità di energia dissipata (misurata in joule m^{-3} / ciclo), la precedente equazione diventa:

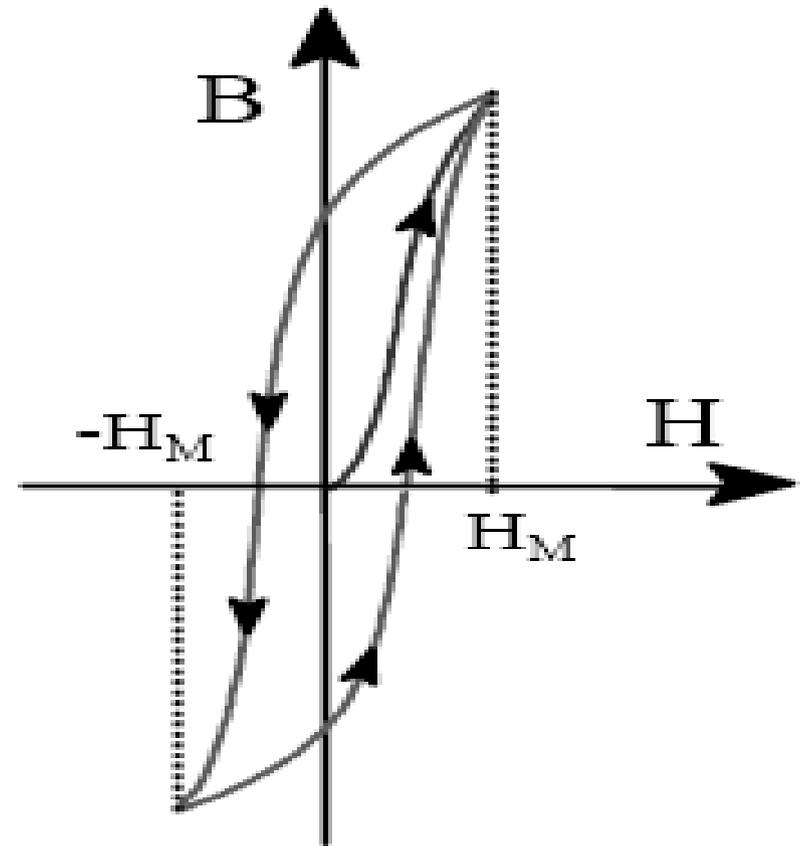
$$P_d = \oint (\mathbf{H} \cdot d\mathbf{B}) d\tau = W_{ist} \propto B_M^{1.6 \div 2}$$



Cenni costruttivi: i nuclei ferromagnetici

I materiali ferromagnetici si suddividono in due gruppi: i materiali ferromagnetici dolci e i materiali ferromagnetici duri.

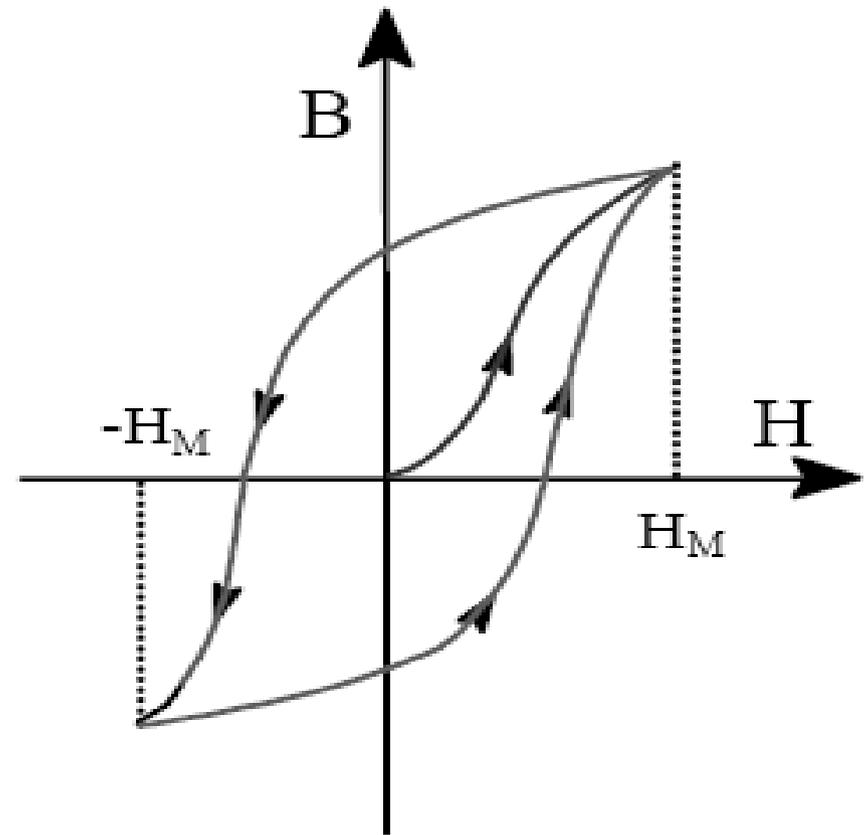
I materiali **ferromagnetici dolci** vengono impiegati quando interessa limitare al massimo le correnti necessarie per produrre e controllare i flussi di induzione (*nuclei di elettromagneti, nuclei di trasformatori, rotori e statori di macchine rotanti, i.e. nelle macchine elettriche*). Appartengono a questo gruppo di materiali magneici il ferro e le sue leghe con nickel, cobalto e silicio, gli acciai a basso tenore di carbonio e le ferriti dolci.



Cenni costruttivi: i nuclei ferromagnetici

I materiali ferromagnetici si suddividono in due gruppi: i materiali ferromagnetici dolci e i materiali ferromagnetici duri.

I materiali **ferromagnetici duri** sono caratterizzati da elevati valori della induzione residua e del campo coercitivo ($H_c > 10^4$ A/m) cui si collega l'elevato valore del prodotto $|BH|$ ottenuto nel 2° quadrante, come si osserva in figura. I materiali di questo gruppo vengono impiegati quando interessa realizzare flussi magnetici costanti nel tempo e pertanto conviene ricorrere al magnetismo permanente invece che a circuiti percorsi da corrente (*magneti permanenti*).



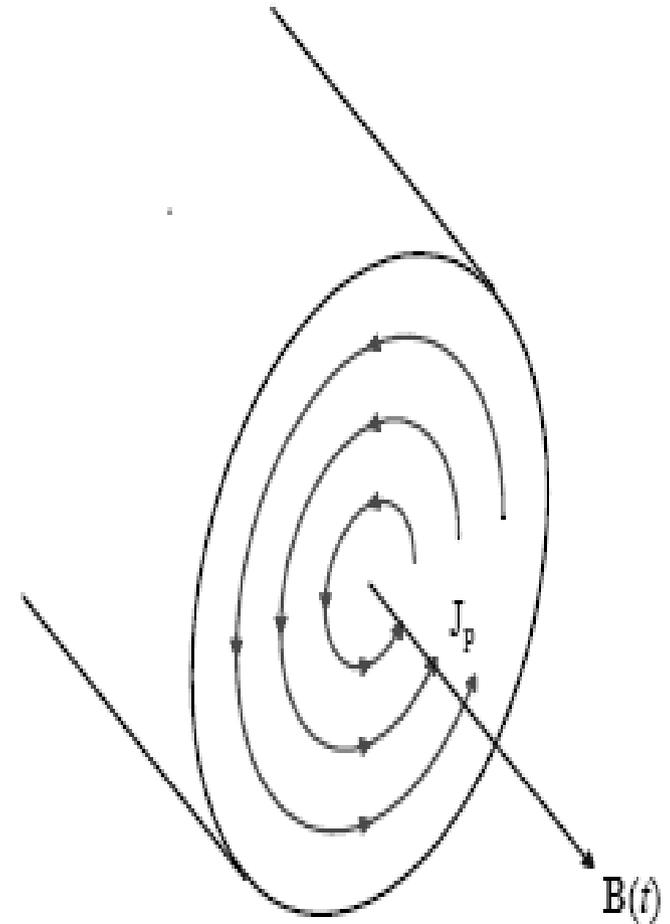
Cenni costruttivi: i nuclei ferromagnetici

I materiali ferromagnetici soggetti a flussi magnetici variabili nel tempo sono sede di **correnti parassite** dette **correnti di Foucault** (**eddy currents**). Facendo riferimento alla figura il fenomeno può essere spiegato intuitivamente come segue:

- ▶ ogni sezione del materiale perpendicolare al campo magnetico può essere immaginata come una serie di circuiti elettrici concentrici, ai quali è concatenato un flusso magnetico variabile nel tempo
- ▶ ciascuno dei circuiti elementari è quindi sede di una forza elettromotrice indotta che genera una corrente.

Tale corrente è dannosa per due motivi:

- ▶ genera un campo magnetico di reazione che si oppone al campo magnetico forzante
- ▶ è inevitabilmente associata a delle perdite per effetto Joule (i.e. $R i(t)^2$).



Cenni costruttivi: i nuclei ferromagnetici

Queste perdite possono essere con buona approssimazione stimate come segue. Si consideri un lamierino di materiale ferromagnetico avente spessore δ , immerso in un campo magnetico uniforme diretto come l'asse z e variabile nel tempo con legge sinusoidale:

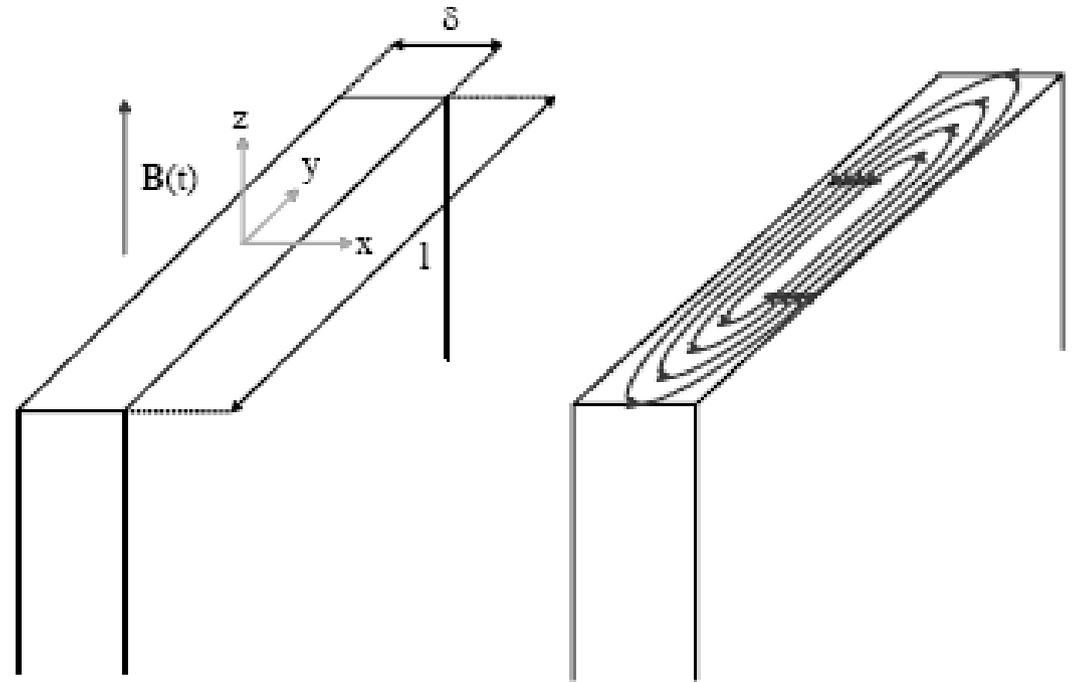
$$\vec{B}(t) = \vec{k} B_M \sin(\omega t)$$

Dalla legge

$$\nabla \times \vec{E}(t) = -\frac{\partial \vec{B}(t)}{\partial t}$$

si ottiene

$$\left(\frac{\partial E_y}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial y} \right) = \omega B_M \sin(\omega t)$$



supponendo ora $l \gg \delta$ e trascurando gli effetti di bordo possiamo scrivere

$$\frac{\partial E_x}{\partial y} = 0 \quad \text{da cui} \quad E_y = \omega B_M x \sin(\omega t) + c \quad \text{con la costante } c \text{ nulla}$$

Cenni costruttivi: i nuclei ferromagnetici

Per le condizioni di simmetria la costante c è identicamente nulla, e quindi

$$E_y = \omega B_M x \sin(\omega t)$$

da cui segue

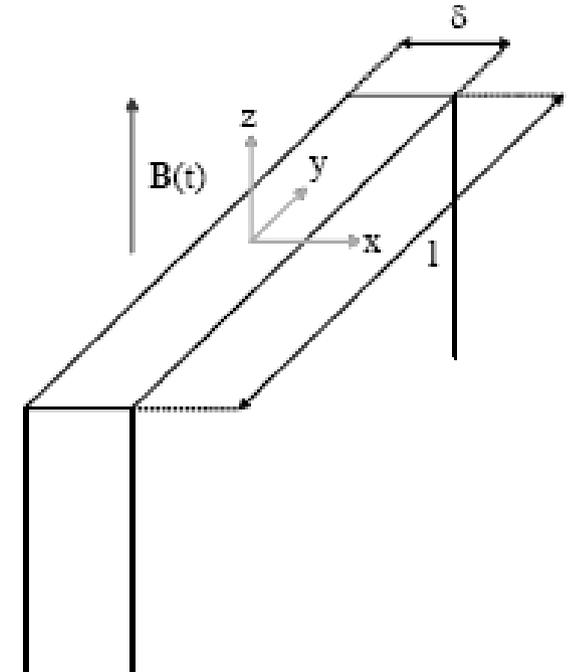
$$J_y = \sigma E_y = \sigma \omega B_M x \sin(\omega t)$$

alla densità di corrente J_y corrisponde la potenza dissipata p_J data da

$$p_J(x, t) = \sigma E_y^2 = \sigma (\omega B_M x \sin(\omega t))^2$$

che mediata sullo spessore δ e sul periodo $T=2\pi/\omega$ fornisce la densità di potenza media dissipata per correnti parassite

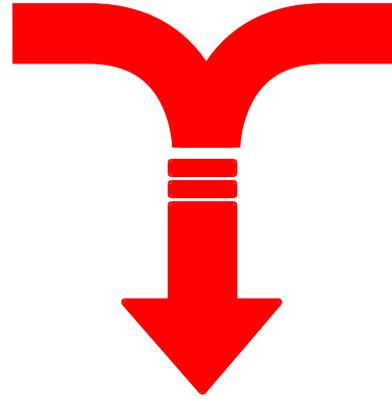
$$P_{cp} = \frac{1}{T \delta} \int_0^T \int_{-\frac{\delta}{2}}^{\frac{\delta}{2}} p_J(x, t) dx dt = \sigma \frac{\omega^2 B_M^2 \delta^2}{24} \quad [W m^{-3}]$$



Cenni costruttivi: i nuclei ferromagnetici

Pertanto nei materiali ferromagnetici e quindi nei nuclei ferromagnetici delle macchine elettriche si hanno perdite di potenza attiva (dette **perdite nel ferro**) dovute a:

ISTERESI MAGNETICA



CORRENTI PARASSITE

PERDITE NEL FERRO

Entrambi i fenomeni sono legati alla **variabilità nel tempo del campo magnetico** (nel caso di campo magnetico costante, i.e. a frequenza $f = 0$ Hz, tali perdite sono infatti nulle).

Cenni costruttivi: i nuclei ferromagnetici

Introducendo la formula di Steinmetz che fornisce una stima della densità di energia dissipata per isteresi nel nucleo di materiale ferromagnetico

$$W_{ist} = k_{ist} B_M^{1.6 \div 2} \quad [J m^{-3} / ciclo]$$

Introducendo la frequenza f si ottiene un'espressione per la densità di potenza dissipata per unità di tempo

$$P_{ist} = W_{ist} f = k_{ist} B_M^{1.6 \div 2} f \quad [W m^{-3}]$$

La densità di potenza dissipata nel materiale ferromagnetico soggetto ad un campo d'induzione sinusoidale è quindi dato dalla somma delle potenze dissipate per isteresi e per correnti parassite:

$$P_f = P_{ist} + P_{cp} = k_{ist} f B_M^{1.6 \div 2} + k_{cp} \delta^2 f^2 B_M^2 \quad [W m^{-3}]$$

Cenni costruttivi: i nuclei ferromagnetici

E' possibile riferire le perdite all'unità di peso:

$$p_f = k_{ist}' f B_M^{1.6 \div 2} + k_{cp}' \delta^2 f^2 B_M^2 \quad [W \text{ kg}^{-1}]$$

con $k_{ist}' = \frac{k_{ist}}{\rho}$ $k_{cp}' = \frac{k_{cp}}{\rho}$ $\rho = \text{densità del materiale}$

Commercialmente le lamiere in materiale ferromagnetico sono caratterizzate dalla

cifra di perdita

definita come la potenza dissipata per kg di materiale con $B_M = 1 \text{ T}$ e $f = 50 \text{ Hz}$

Cenni costruttivi: i nuclei ferromagnetici

Lo studio della risposta dei materiali magnetici impiegati nelle macchine elettriche è, nella sua formulazione generale, un problema di assai difficile soluzione, che deve essere affrontato mediante le equazioni di Maxwell. Tuttavia, se la lunghezza d'onda, λ , caratteristica della radiazione elettromagnetica d'interesse è significativamente maggiore della massima dimensione geometrica, L , della macchina elettrica in esame, si può ritenere che i campi siano lentamente variabili e che quindi la propagazione della radiazione all'interno della macchina avvenga senza ritardi. Ciò equivale ad assumere trascurabile il campo magnetico generato dalle correnti di spostamento rispetto a quello generato dalle correnti di conduzione. Questa approssimazione, che conduce alla **formulazione magneto-quasistatica** delle equazioni di Maxwell, è accettabile quando, ad esempio, $\lambda \geq 100 L$.

$$\nabla \times \vec{H} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad \nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad \oint_{\Gamma} \vec{H} \cdot d\vec{l} = i_c \quad \int_S \vec{B} \cdot \vec{n} dS = 0$$

Cenni costruttivi: i nuclei ferromagnetici

Sebbene la formulazione **magneto-quasistatica** del problema porta ad un drastica semplificazione delle equazioni di Maxwell, il modello è ancora di difficile applicazione nei problemi di pratico interesse ingegneristico, essendo comunque funzione delle tre coordinate spaziali e del tempo (attraverso la corrente di conduzione). Per agevolare l'analisi di questa classe di problemi elettromagnetici è usuale introdurre un **modello di tipo circuitale a parametri concentrati**. L'analisi tridimensionale nel dominio del tempo viene pertanto ricondotta all'analisi di un **circuito magnetico equivalente**, che fornisce una soluzione accettabile nella quasi totalità dei casi di pratico interesse.

Un circuito magnetico è una struttura composta per la maggior parte da materiale ad elevata permeabilità magnetica che confina il flusso del vettore induzione magnetica al suo interno nello stesso modo in cui i materiali ad elevata conducibilità elettrica confinano al proprio interno la densità di corrente nei circuiti elettrici.

Cenni costruttivi: i nuclei ferromagnetici

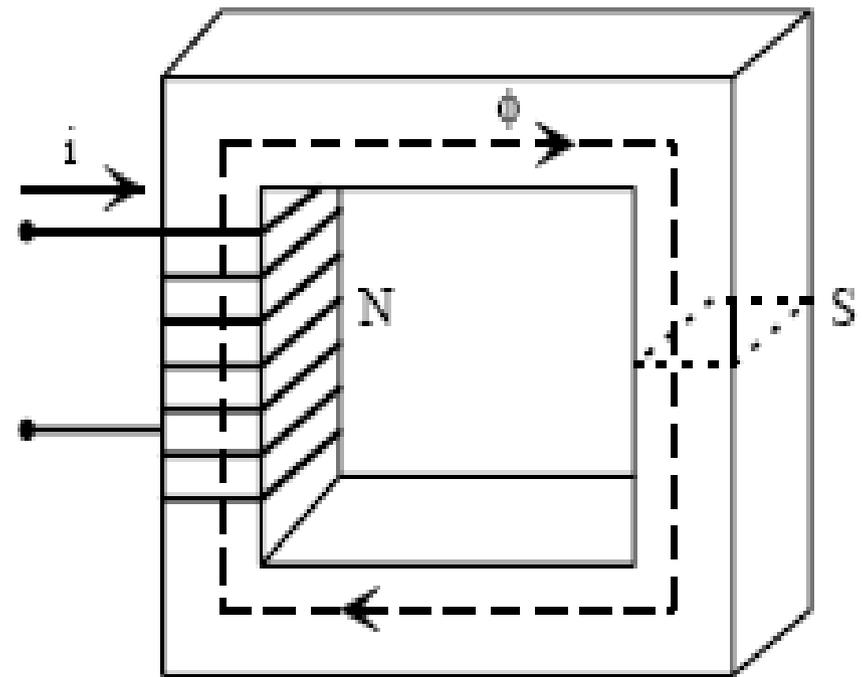
Il flusso magnetico Φ attraverso una superficie S è definito da:

$$\phi = \int \vec{B} \cdot \vec{n} dS$$

Per la solenoidalità di B e per l'ipotesi di completo confinamento, il flusso ϕ sarà costante attraverso una qualsiasi sezione del materiale. Poiché la sezione è costante (escludendo i vertici) sarà lecito assumere che B sia uniforme sulla sezione. Questo porta ad una semplice relazione tra flusso magnetico ϕ e modulo dell'induzione magnetica B :

$$\phi = B S$$

Nucleo di materiale ferromagnetico



Cenni costruttivi: i nuclei ferromagnetici

Si definisce ora la **forza magnetomotrice** (f.m.m.), \mathcal{F} , relativa ad una qualsiasi linea chiusa C concatenata con le N spire di eccitazione che passi all'interno del materiale magnetico come la corrente totale che si concatena con tale linea:

$$\mathcal{F} = N i(t)$$

per la legge di Ampere

$$\oint_{\Gamma} \vec{H} \cdot d\vec{l} = N i(t) = \mathcal{F}$$

si ottiene

$$\mathcal{F} = N i(t) = \oint_{\Gamma} \vec{H} \cdot d\vec{l} = \oint_{\Gamma} \frac{\vec{B}}{\mu_0 \mu_r} \cdot d\vec{l} = \oint_{\Gamma} (BS) \frac{dl}{\mu S} = \left(\oint_{\Gamma} \frac{1}{\mu S} dl \right) \phi = \mathcal{R} \phi$$

l'equazione ottenuta è detta **Legge di Hopkinson** e rappresenta l'analogo della legge di Ohm ($V = RI$) per i circuiti magnetici.

Cenni costruttivi: i nuclei ferromagnetici

La grandezza \mathcal{R} è detta riluttanza del circuito magnetico ed è definita come

$$\mathcal{R} = \oint_{\Gamma} \frac{1}{\mu S} dl$$

Nel caso in cui la sezione S sia uniforme e la permeabilità μ costante, la riluttanza si può scrivere come

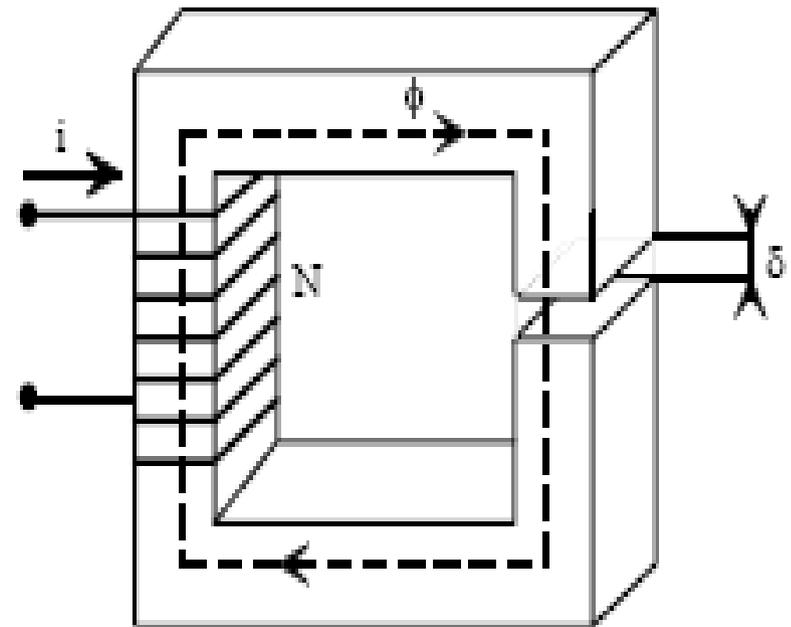
$$\mathcal{R} = \frac{l}{\mu S}$$

Si consideri ora un circuito magnetico con traferro

$$\begin{aligned} \mathcal{R} &= \oint_{\Gamma} \frac{1}{\mu S} dl = \oint_f \frac{1}{\mu S} dl + \oint_t \frac{1}{\mu S} dl = \\ &= \frac{l_f}{\mu_0 \mu_r S} + \frac{\delta}{\mu_0 S_0} = \mathcal{R}_f + \mathcal{R}_0 \end{aligned}$$

$$\mathcal{F} = (\mathcal{R}_f + \mathcal{R}_0) \phi$$

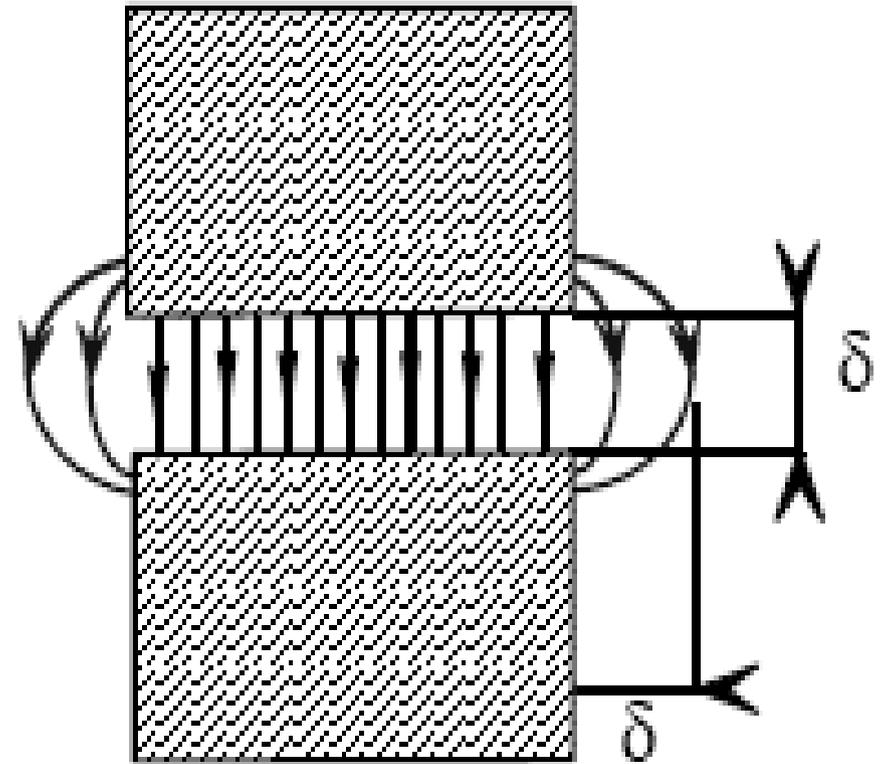
$$\phi = \frac{\mathcal{F}}{\mathcal{R}_f + \mathcal{R}_0}$$



Cenni costruttivi: i nuclei ferromagnetici

Qualora si voglia tenere conto dell'effetto di bordo, è possibile introdurre una sezione trasversale fittizia del traferro S_0 , aumentata rispetto alla sezione effettiva S . Un semplice modo per ottenere S_0 è aggiungere ad S un orlo di spessore pari al traferro, δ . Come si può notare dalla figura, oltre questa distanza le linee di campo sono molto deformate.

Il campo di induzione nel traferro non è certamente uniforme, tuttavia si farà riferimento al valore medio B_0 del campo in aria come se il campo di induzione fosse uniforme sulla sezione S_0 .



Cenni costruttivi: i nuclei ferromagnetici

Per ogni nodo del circuito elettrico si ha (LKC)

$$\sum_l i_l = 0$$

Per ciascun nodo del circuito magnetico si ha

$$\sum_l \phi_l = 0$$

Per ogni maglia del circuito elettrico si ha (LKT)

$$\sum_l u_l = 0$$

od anche

$$\sum_l e_l = \sum_l R_l i_l$$

Per ciascuna maglia del circuito magnetico si ha

$$\sum_l \mathcal{F}_l = \sum_l \mathcal{R}_l \phi_l$$

In generale, si può quindi concludere che per i circuiti magnetici valgono leggi analoghe a quelle stabilite per i circuiti elettrici (e.g., le leggi di Kirchhoff), purché sia possibile individuare senza ambiguità nodi, lati e maglie.

Cenni costruttivi: i nuclei ferromagnetici

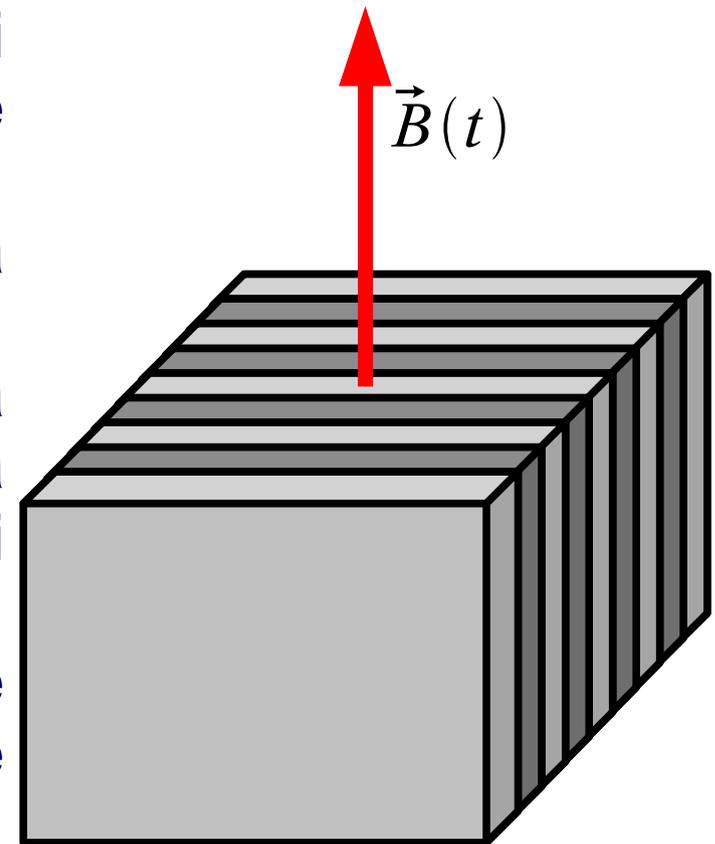
Riepilogando, l'ampio impiego di materiali ferromagnetici è quindi giustificato dal fatto che questi materiali, quando sono lontani dalla saturazione, presentano permeabilità molto più elevata di quella dell'aria o di altri mezzi (*olio, idrogeno, esafluoruro di zolfo*) in cui possono essere immerse le parti attive (i.e., *i conduttori*). Salvo particolari applicazioni, in cui si adottano magneti permanenti (*realizzati con materiali magnetici duri*), i materiali impiegati sono **dolci**, sia dal punto di vista magnetico che da quello meccanico. Le curve di magnetizzazione, i cicli di isteresi, la cifra di perdita, la resistività elettrica, forniscono i dati per giudicare le loro qualità. Allo scopo di ridurre la dissipazione di energia dovuta alle correnti parassite (non utili ai fini della trasformazione) si ricorre alla **struttura lamellare** per tutte le parti del nucleo sottoposte a magnetizzazione variabile ed all'impiego di **leghe ferro-silicio**.

$$P_{cp} = \sigma \frac{\pi^2 f^2 B_M^2 \delta^2}{8\rho} [W kg^{-1}]$$

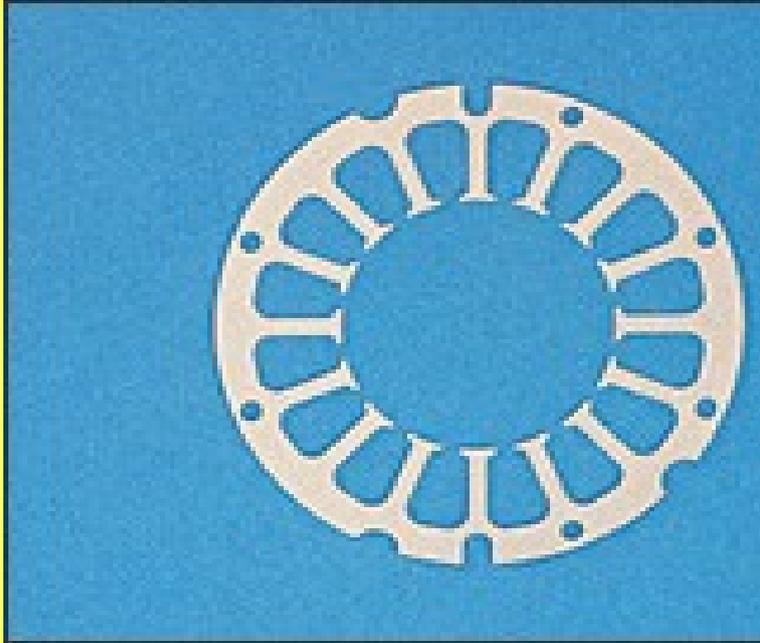
Cenni costruttivi: i nuclei ferromagnetici

Il materiale ferromagnetico viene pertanto suddiviso con superfici di separazione parallele alle linee magnetiche; i lamierini di piccolo spessore (anche 0,28 mm) debbono essere reciprocamente isolati (e.g. con carlite, vernici isolanti ecc.). Risultano laminate:

- ▶ la struttura magnetica dei trasformatori e delle macchine asincrone (statore e rotore);
- ▶ la parte statorica della struttura magnetica delle macchine sincrone; normalmente, la parte rotorica della struttura magnetica delle macchine a corrente continua (in macchine speciali si lamina anche la corona statorica);
- ▶ i poli delle macchine sincrone anisotrope e delle macchine a corrente continua.

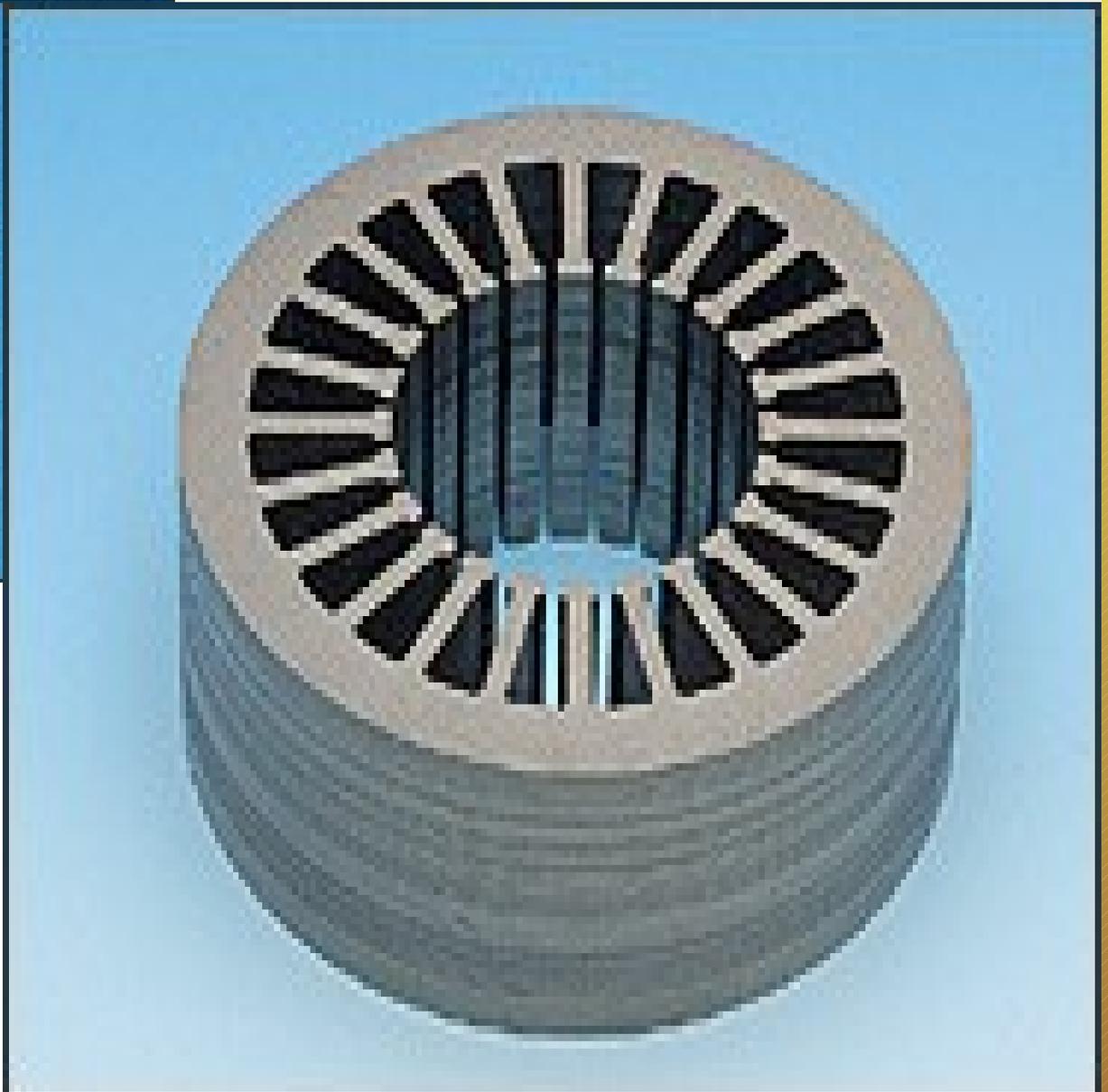


Cenni costruttivi: i nuclei ferromagnetici

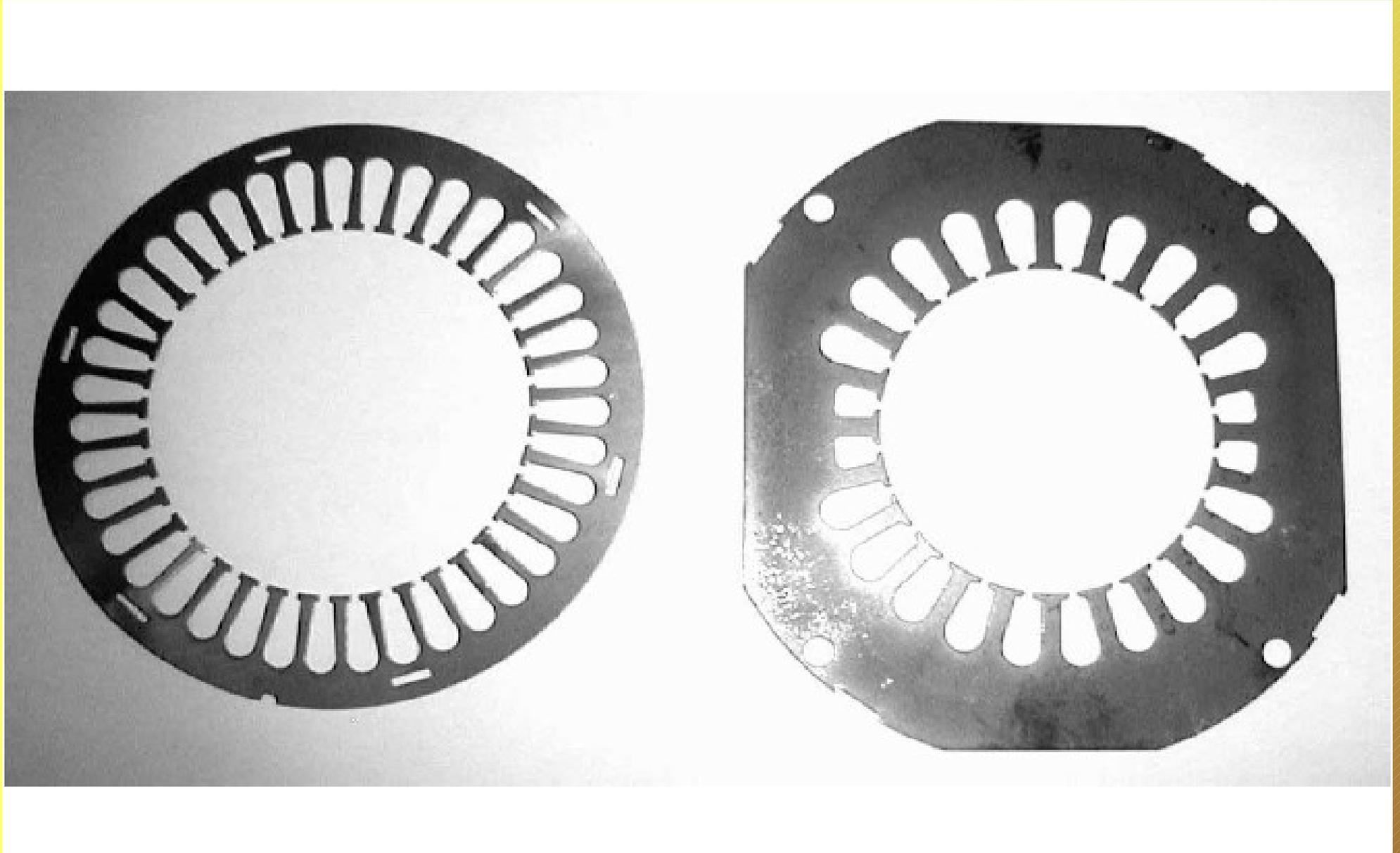


Lamierino ferromagnetico

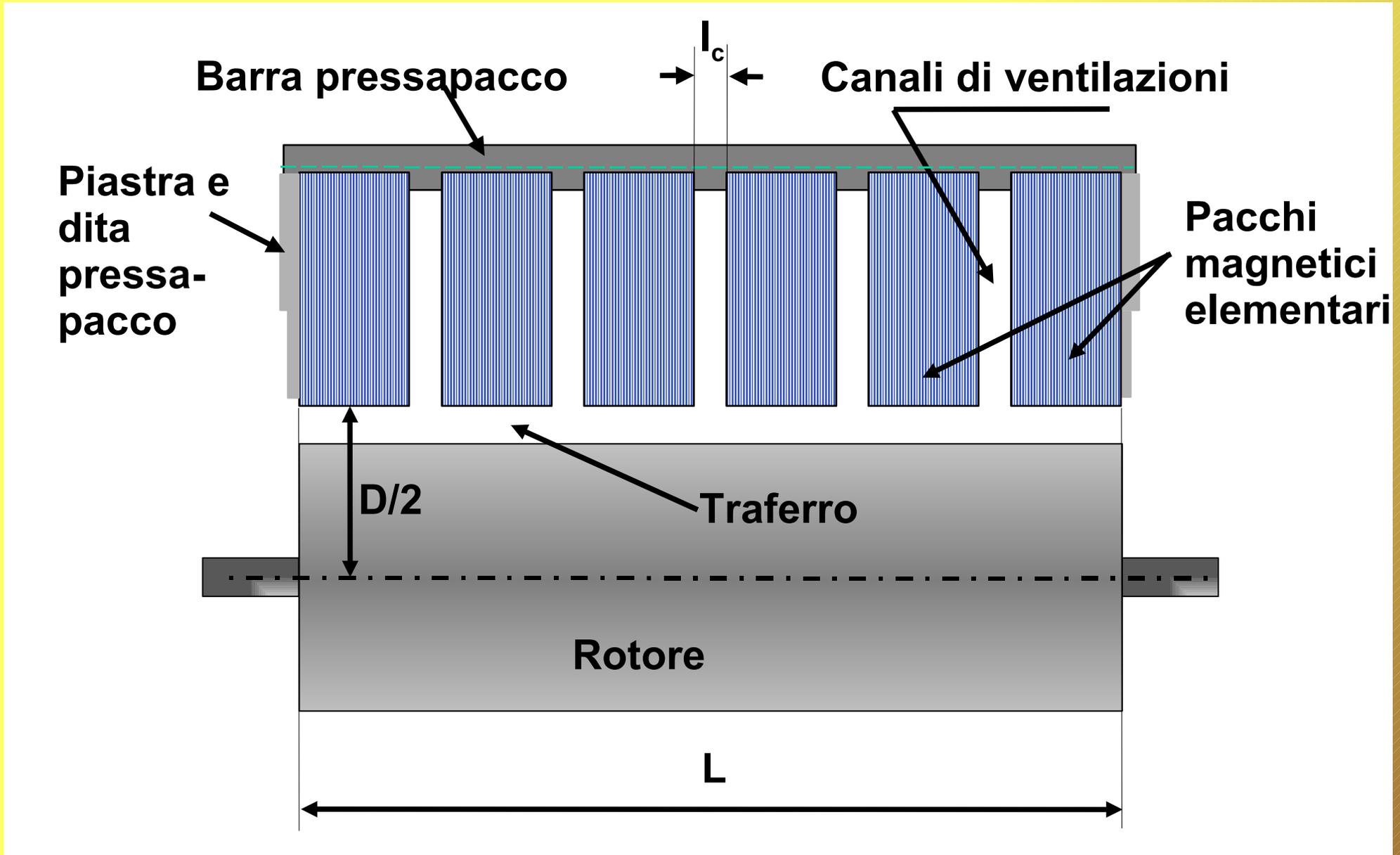
Pacco statorico laminato (ottenuto mediante giustapposizione di lamierini ferromagnetici)



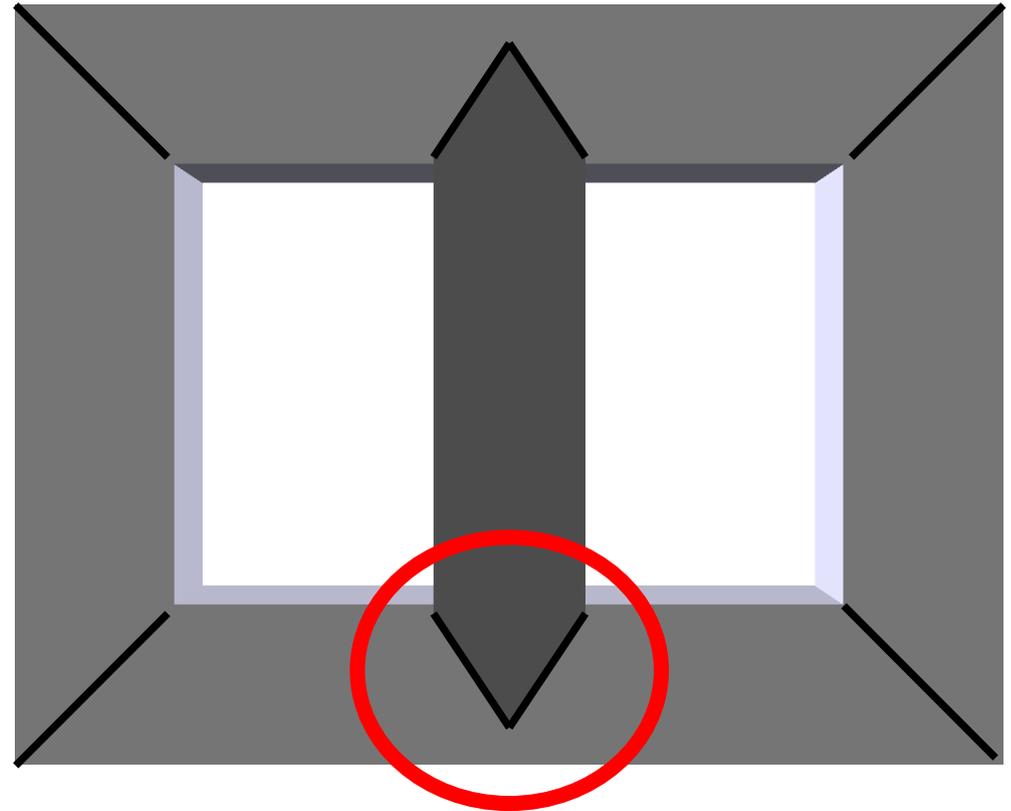
Cenni costruttivi: i nuclei ferromagnetici



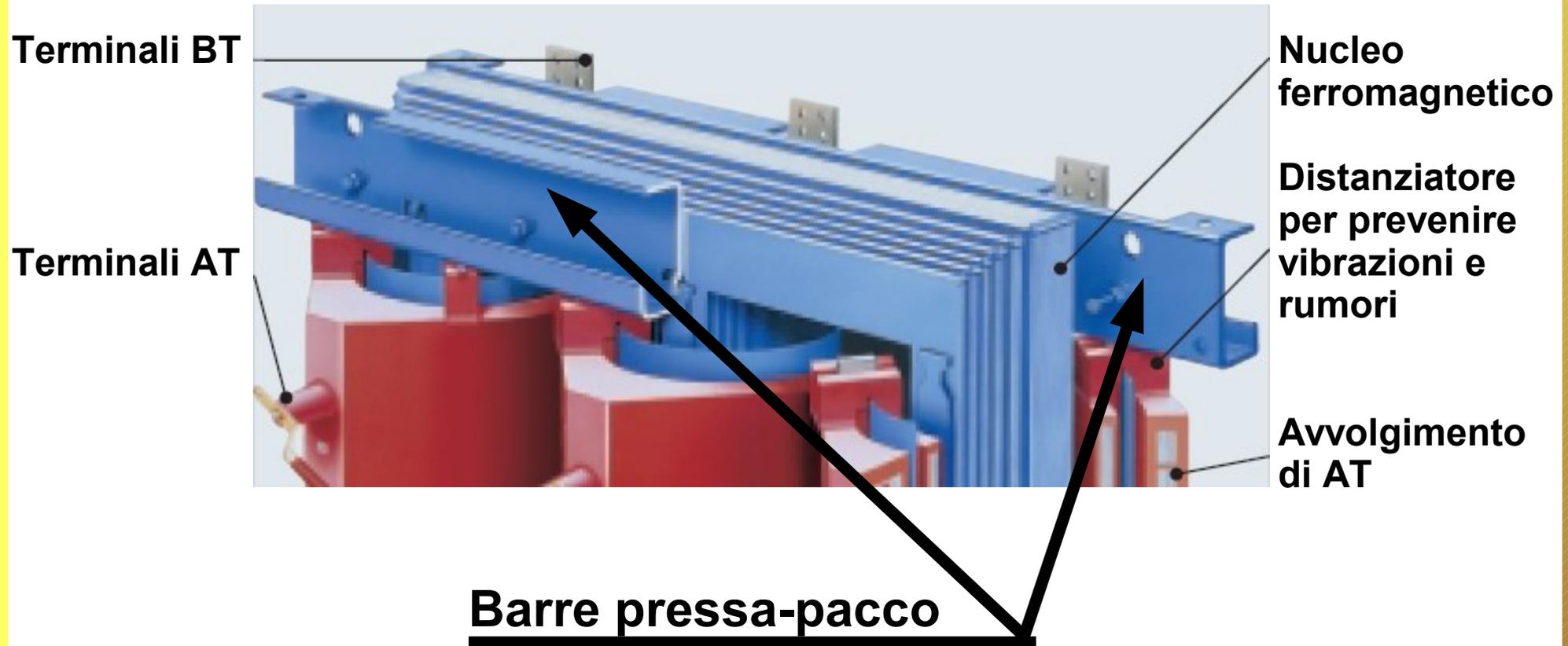
Cenni costruttivi: le strutture meccaniche



Cenni costruttivi: i nuclei ferromagnetici



Cenni costruttivi: i nuclei ferromagnetici



Cenni costruttivi: i nuclei ferromagnetici

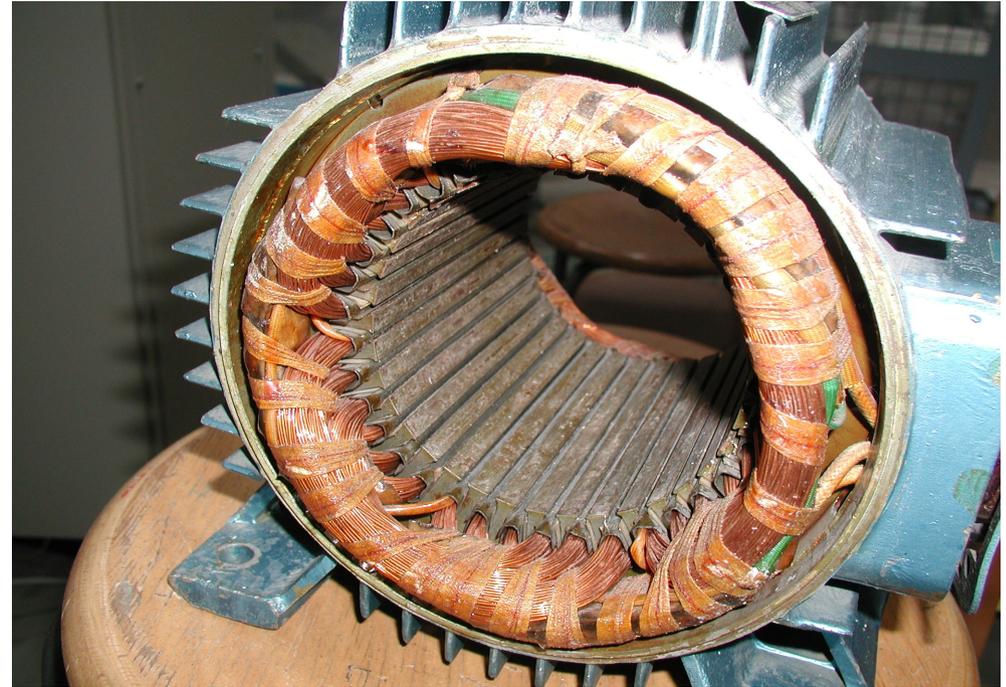
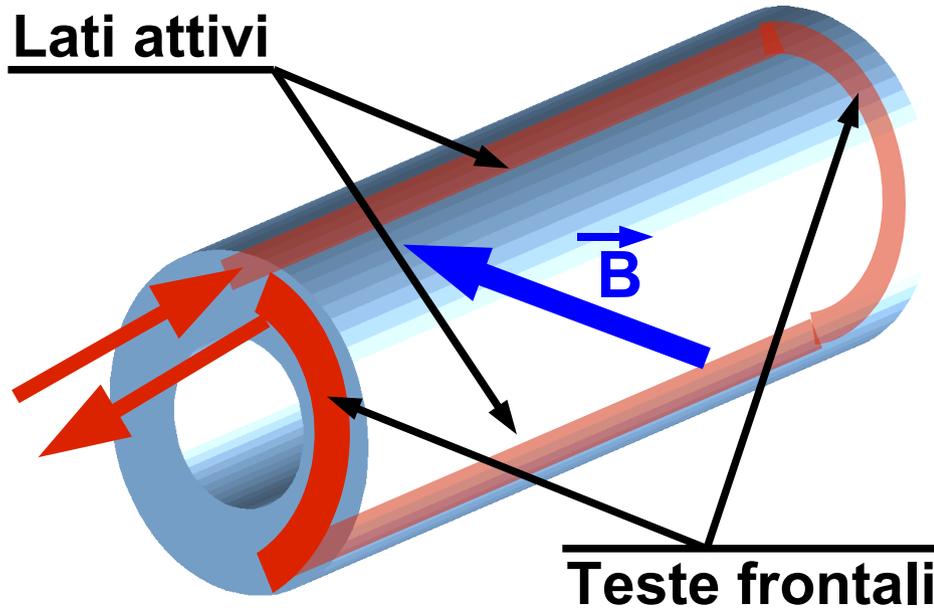
Secondo il contenuto di silicio, i lamierini per le macchine elettriche vengono classificati in **normali** (fino al 2% di Si), **semilegati** (2,5% di Si), **legati** (3%-4% di Si, solo per i trasformatori). L'aumento di silicio tuttavia rende il materiale fragile e non adatto a lavorazioni meccaniche complesse.

I lamierini ferro-silicio se opportunamente trattati (*termicamente e laminazioni a freddo*) presentano direzioni di magnetizzazione preferenziali, i.e. **di facile magnetizzazione**. Questi lamierini, detti **a cristalli orientari**, hanno proprietà, permeabilità e cifra di perdita, dipendenti dall'angolo tra i versi di magnetizzazione e di laminazione; si ha la condizione ottima quanto questo angolo è nullo.

Le vibrazioni dei nuclei, e la conseguente rumorosità, sono attribuibili ad un cattivo assemblaggio dei pacchi di lamierini ed al fenomeno di magnetostriazione, i.e. a piccole modifiche nelle dimensioni fisiche (aumento della lunghezza e contrazione laterale) di un materiale ferromagnetico, quanto viene magnetizzato.

Cenni costruttivi: gli avvolgimenti

In una macchina elettrica gli **avvolgimenti statorici e rotorici** sono realizzati mediante opportune interconnessioni di **bobine induttive**. Sotto l'aspetto funzionale si suddividono in avvolgimenti **induttori** ed **indotti**, fatta esclusione per i trasformatori e le macchine asincrone (che si possono considerare trasformatori generalizzati) in cui gli avvolgimenti sono detti **primari** (quelli collegati alle rete di alimentazione che fornisce potenza), **secondari**, **terziari** ecc..

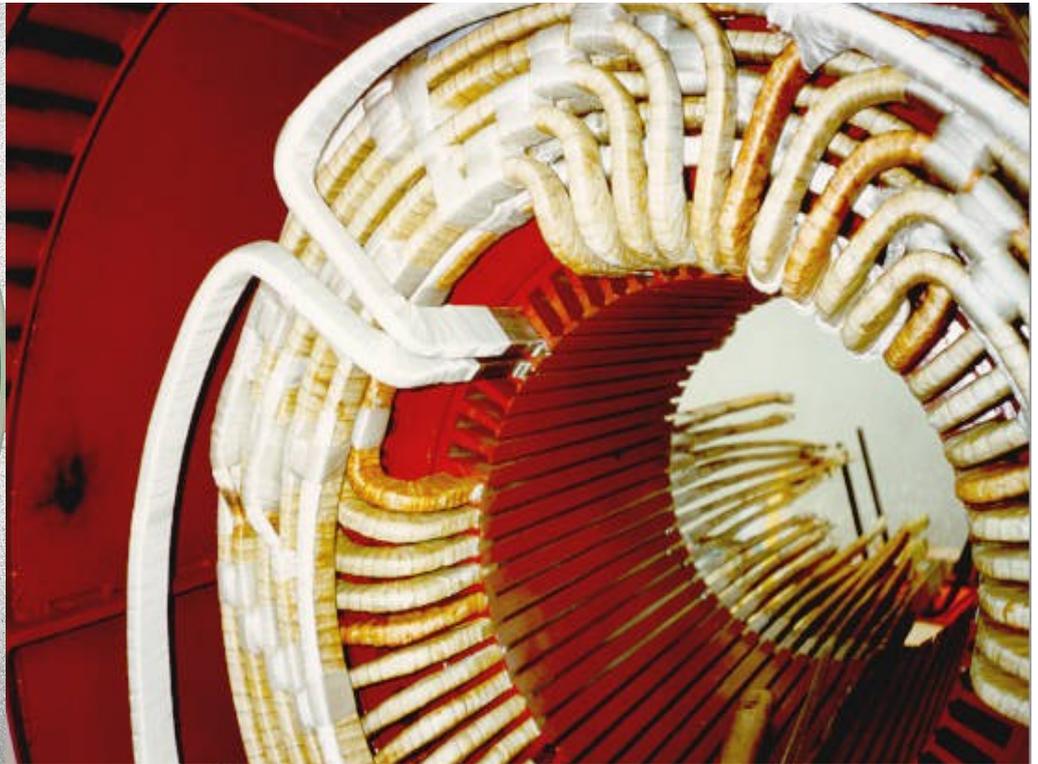
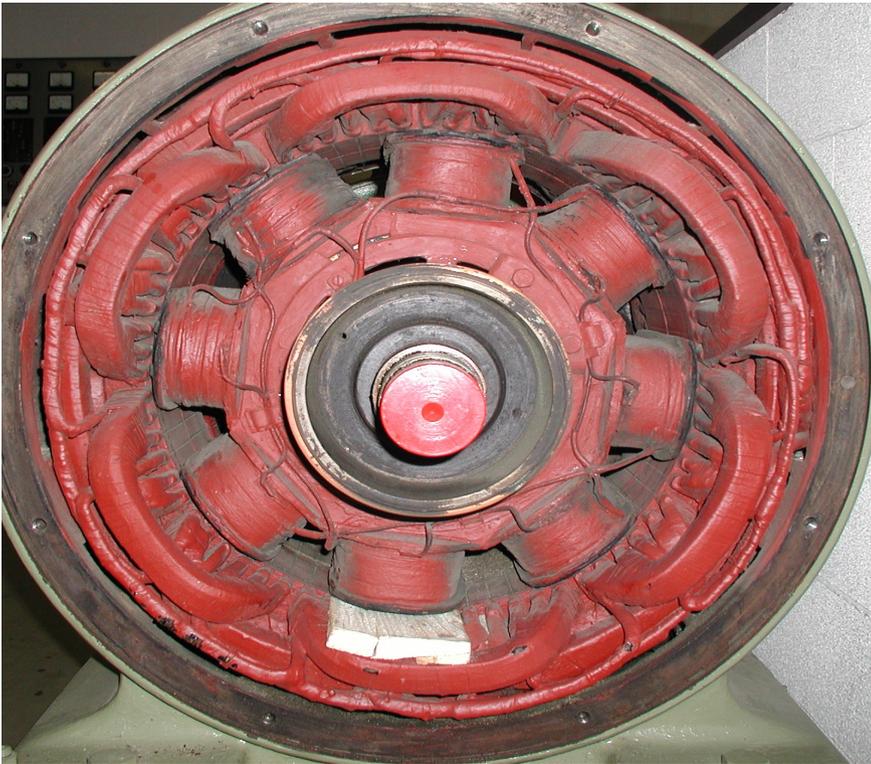


Cenni costruttivi: gli avvolgimenti

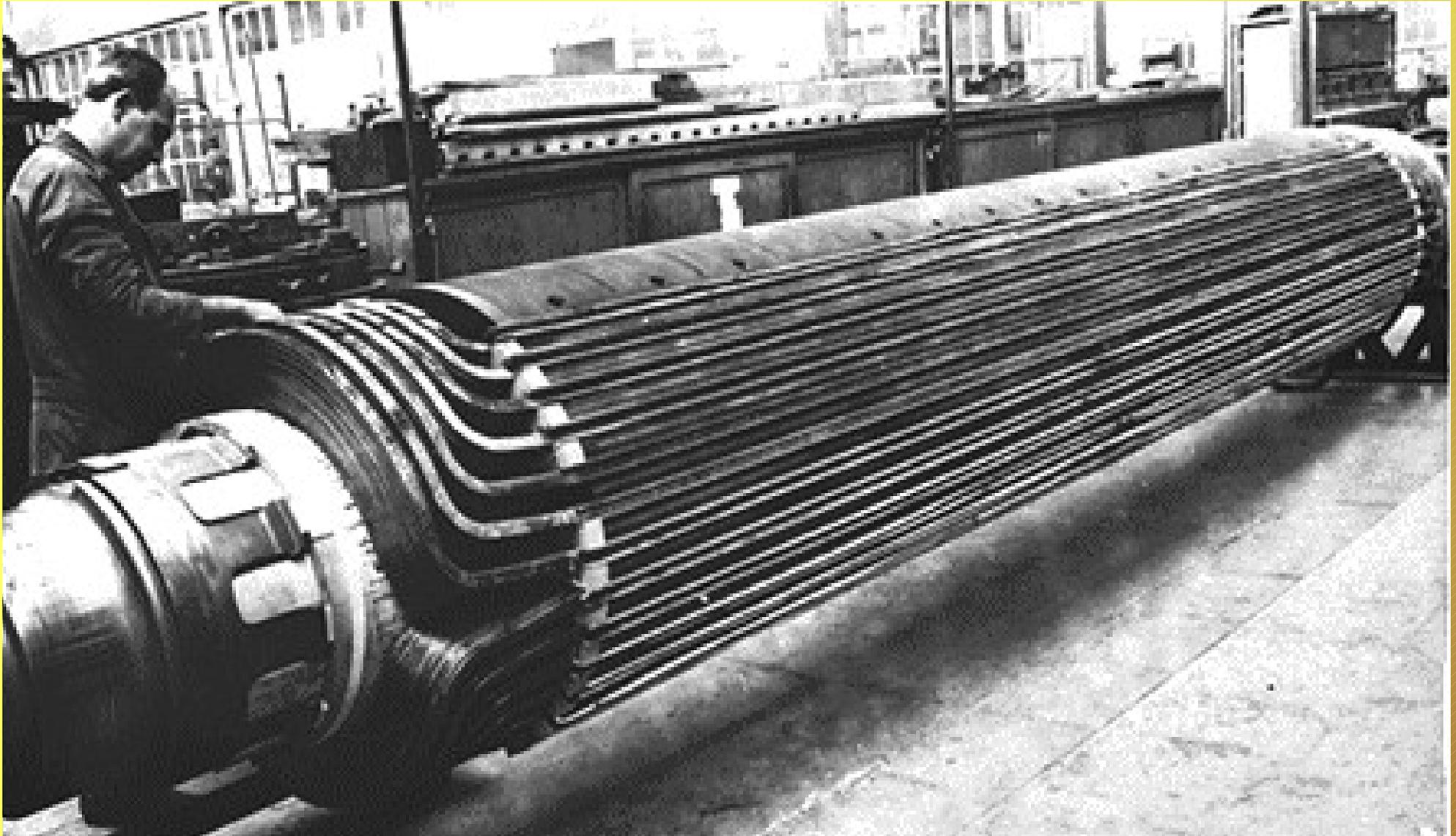
Dal punto di vista costruttivo, gli avvolgimenti possono essere suddivisi in **concentrati**, e.g. su poli salienti (statorici o rotorici), e **distribuiti**, in cave o scanalature delle strutture magnetiche dentate o delle espansioni polari.

Concentrato su poli salienti rotorici

Distribuito sulle cave statoriche



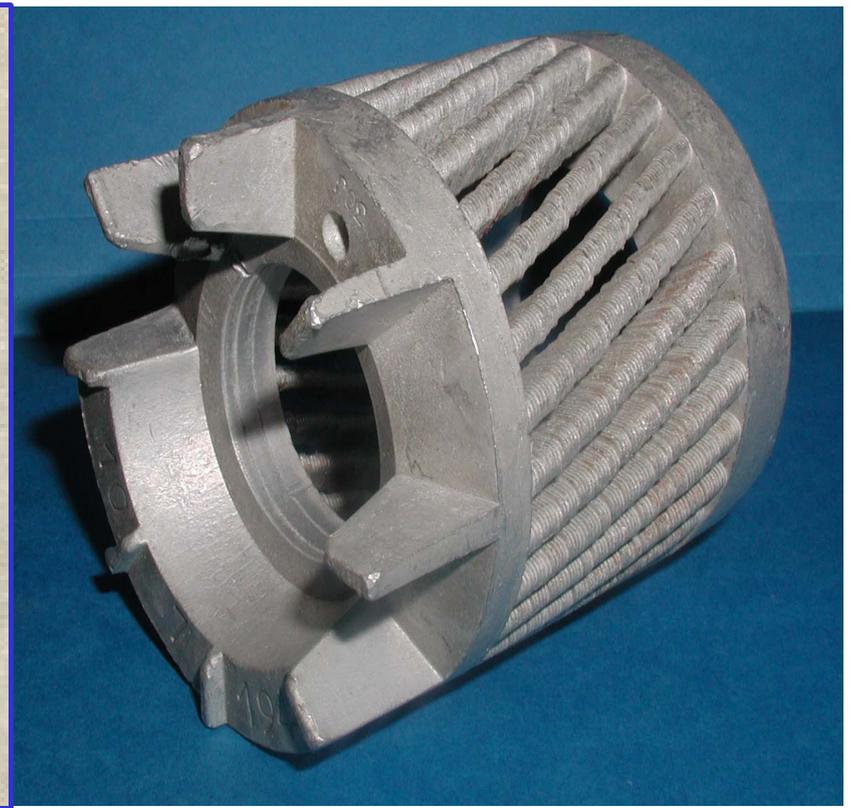
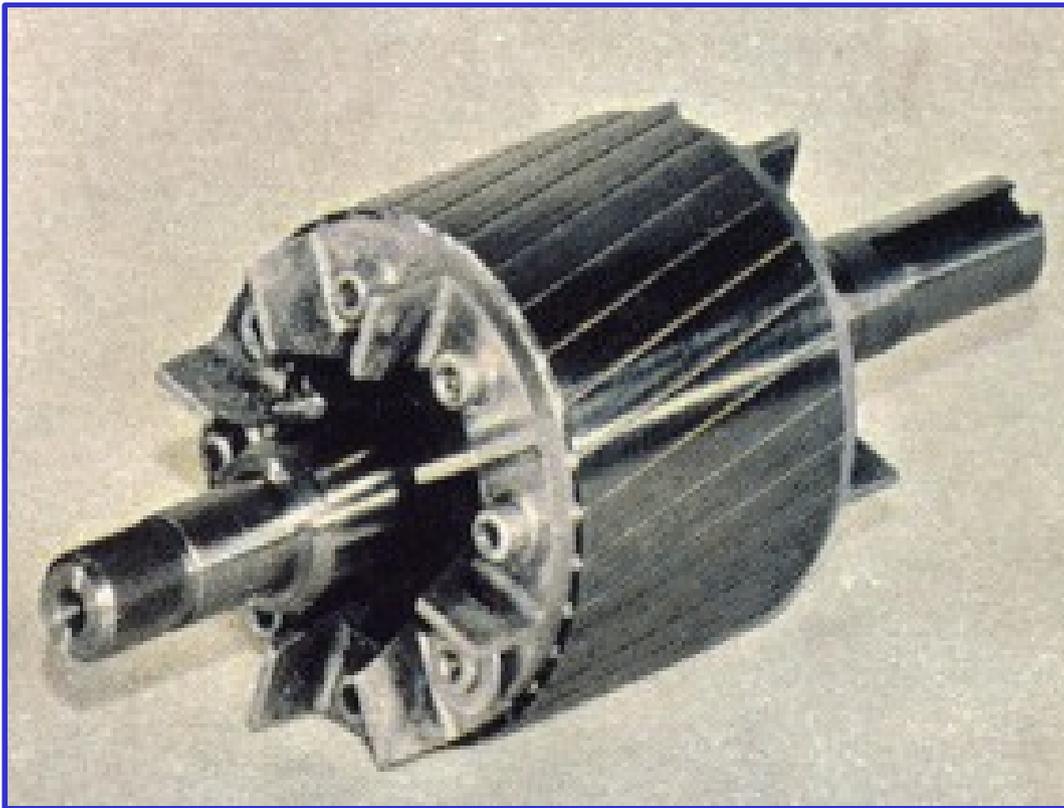
Cenni costruttivi: gli avvolgimenti



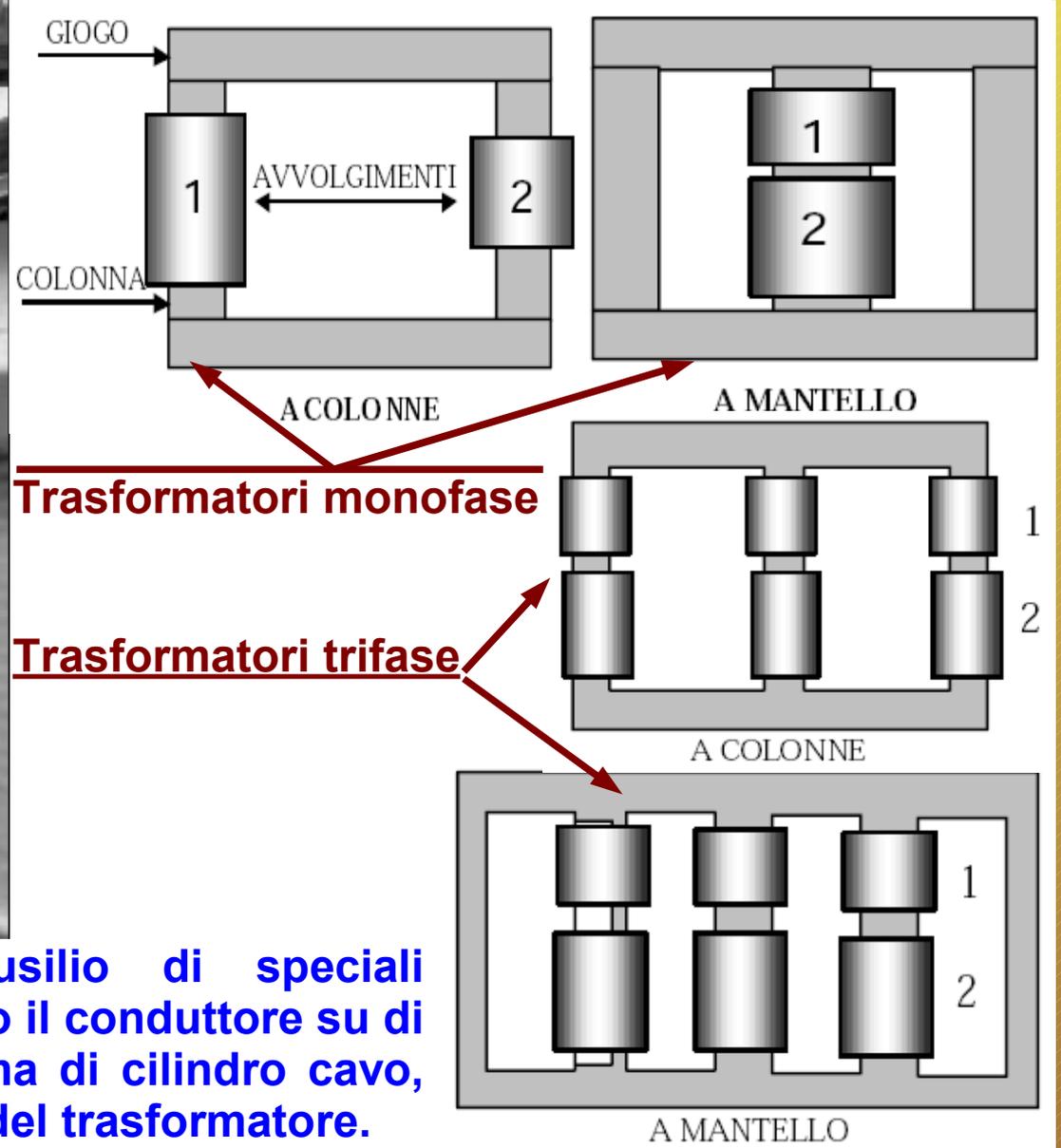
Distribuito sulle cave di un rotore liscio di un turbo-alternatore di grande potenza

Cenni costruttivi: gli avvolgimenti

Un tipo particolare di avvolgimento distribuito è l'avvolgimento cosiddetto a **gabbia**, in cui i bipoli induttivi componenti sono costituiti da semplici conduttori rettilinei, paralleli od inclinati di un piccolo angolo rispetto all'asse rotorico, con i principi e le fini chiuse in corto circuito su anelli frontali. .



Cenni costruttivi: gli avvolgimenti

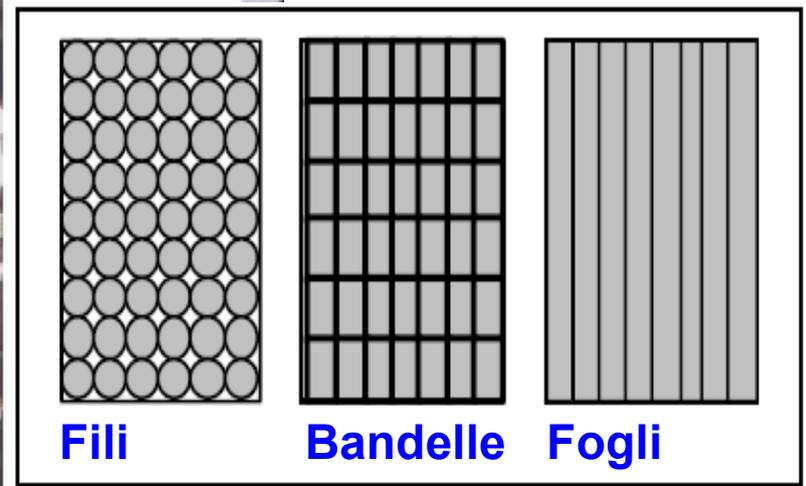


Avvolgimento realizzato con l'ausilio di speciali macchine (bobinatrici) che avvolgono il conduttore su di un idoneo supporto di legno a forma di cilindro cavo, che verrà, poi, infilato sulle colonne del trasformatore.

Cenni costruttivi: gli avvolgimenti



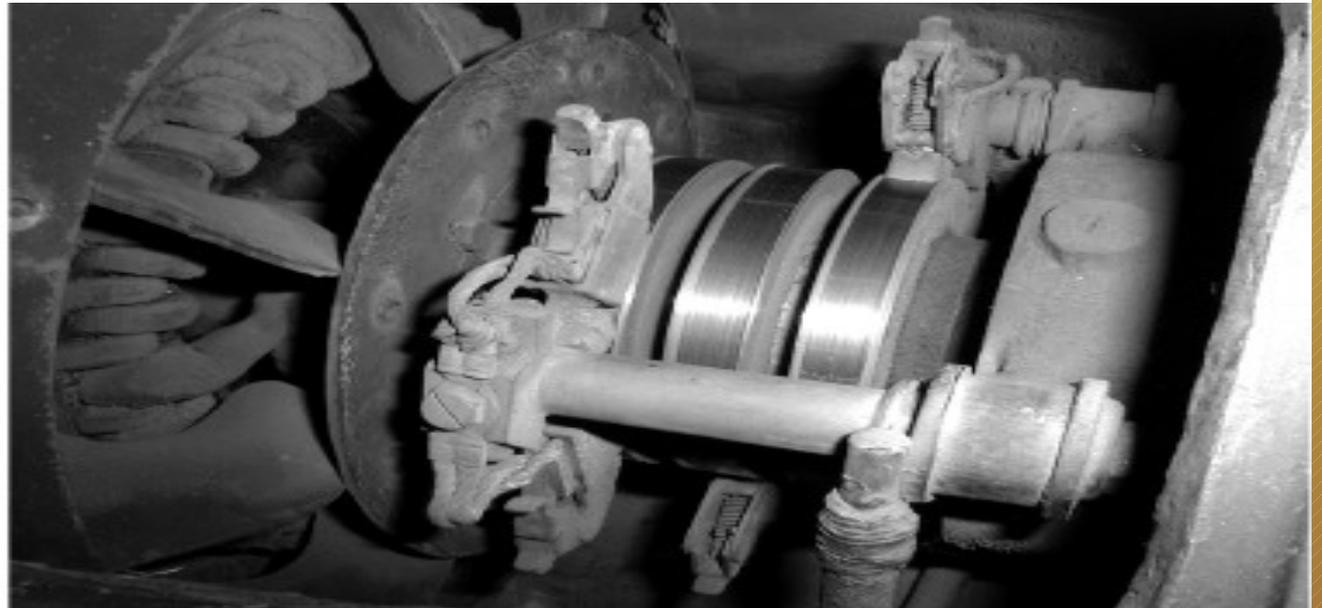
Realizzazione dell'avvolgimento di BT mediante un foglio di rame avvolto.



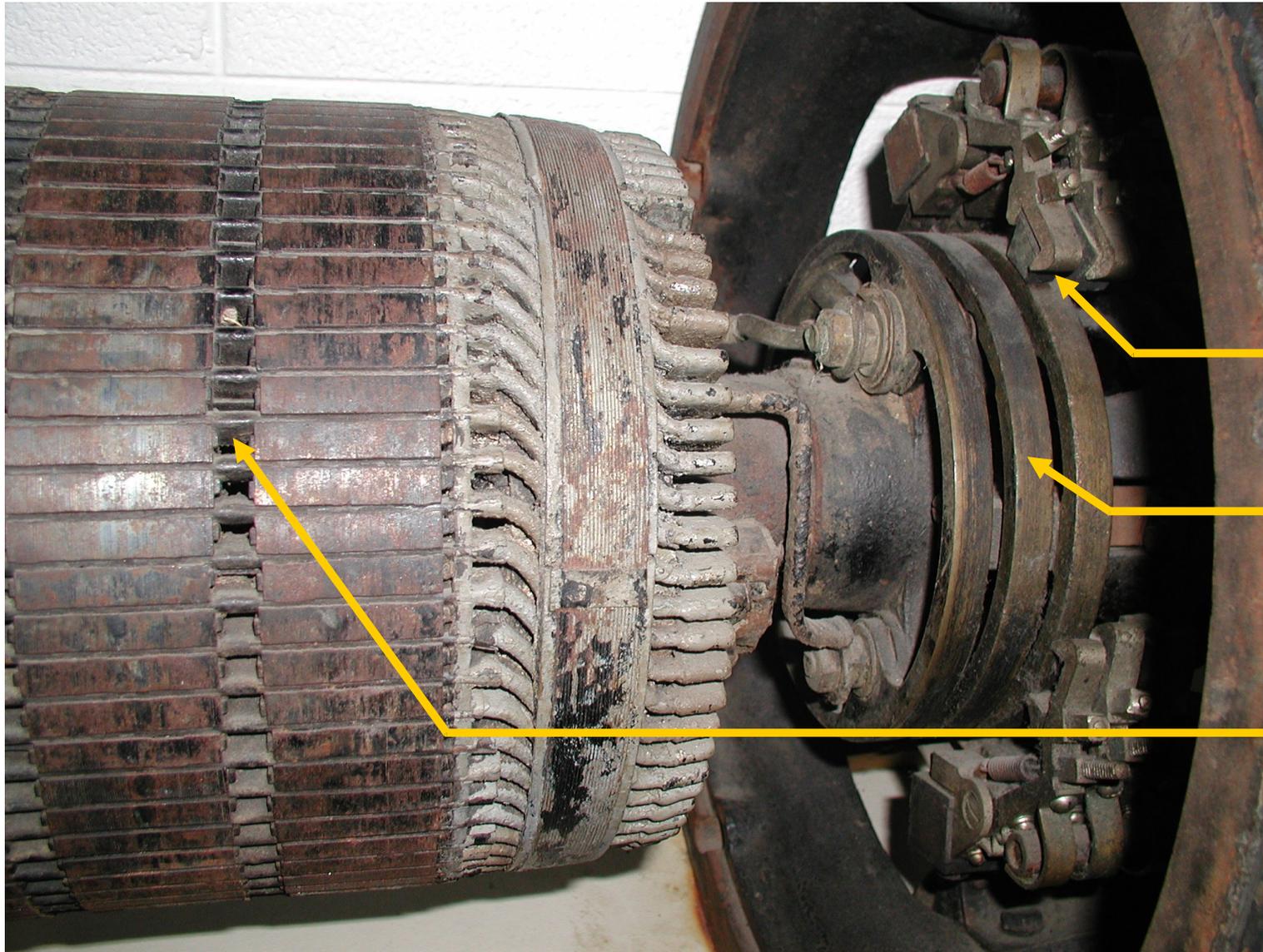
Realizzazione dell'avvolgimento di AT mediante bandelle di rame.

Cenni costruttivi: collettori ad anelli

Un avvolgimento distribuito può essere **aperto** o **chiuso**. L'avvolgimento aperto ha una o più porte accessibili dall'esterno. Se l'avvolgimento è in rotazione (avvolgimento rotorico), i suoi estremi fanno capo ad **anelli collettori** di acciaio forgiato o bronzo, su cui poggiano le **spazzole** di grafite o di altro idoneo materiale.



Cenni costruttivi: collettori ad anelli



Spazzole

Anelli

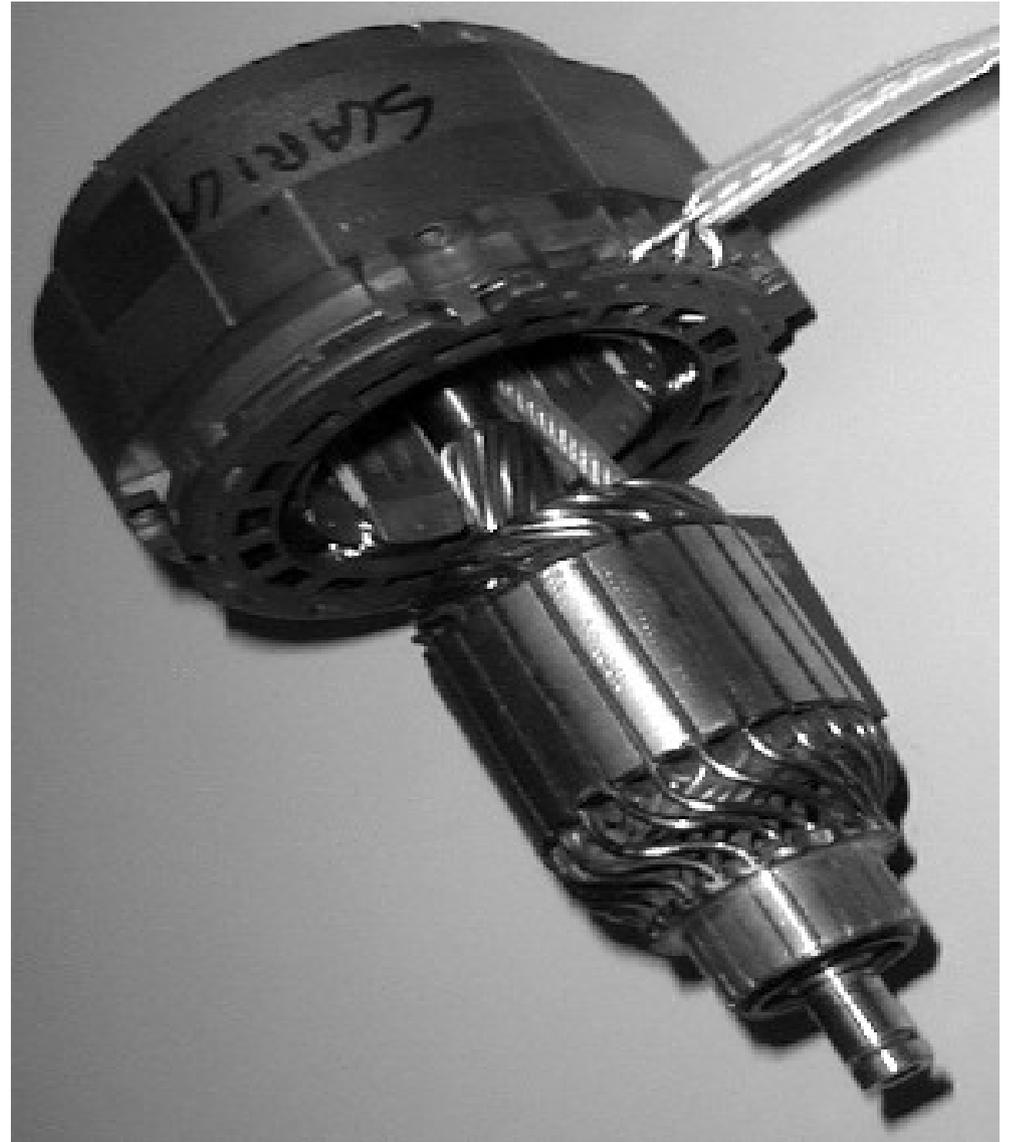
Canali di
raffreddamento

(1911)

Cenni costruttivi: collettori a lamelle

Un avvolgimento chiuso ha generalmente un solo circuito, in cui principio e fine sono riuniti; è dotato di **collettore a lamelle** (o **commutatore**) ed il collegamento con l'esterno viene reso possibile da spazzole che poggiano sul commutatore.

L'avvolgimento presenta tante porte, e precisamente $n/2$, se n è il numero di lamelle del commutatore. Il numero di porte contemporaneamente attive, cioè collegate con l'esterno, dipende dal numero di coppie di spazzole e dalla larghezza periferica di queste.



Cenni costruttivi: le spazzole

Porta spazzole con molla a spirale (mantiene costante la pressione della spazzola sul collettore)



Cenni costruttivi: gli isolamenti

I materiali isolanti (o dielettrici) hanno la funzione di mantenere separati elettricamente conduttori in tensione.

Hanno resistività di circa 25 ordini di grandezza superiori rispetto ai conduttori.

La loro caratteristica fondamentale è la rigidità dielettrica (i.e., *il valore limite del campo elettrico in corrispondenza del quale si produce una scarica disruptiva nel dielettrico*), che dipende dalla temperatura, pressione ed umidità, dalla forma e durata del campo elettrico applicato ecc.

Da un punto di vista chimico devono presentare una buona stabilità in funzione della temperatura e della tensione a cui sono sottoposti.

Gli isolamenti possono essere allo stato:

- ▶ ***gassoso***
- ▶ ***liquido***
- ▶ ***solido***

Cenni costruttivi: gli isolamenti

Isolanti gassosi

La rigidità dielettrica dei gas dipende significativamente dalla pressione. Gli isolanti gassosi possono anche essere impiegati come fluidi refrigeranti. L'aria è un tipico isolante gassoso ($E_c = 4 \text{ kV mm}^{-1}$ a temperatura ambiente e pressione atmosferica) largamente utilizzato nelle applicazioni elettriche. Nei generatori di grande potenza viene anche impiegato l'idrogeno in pressione mantenuto in circuiti chiusi (per evitare la formazione di miscele esplosive).

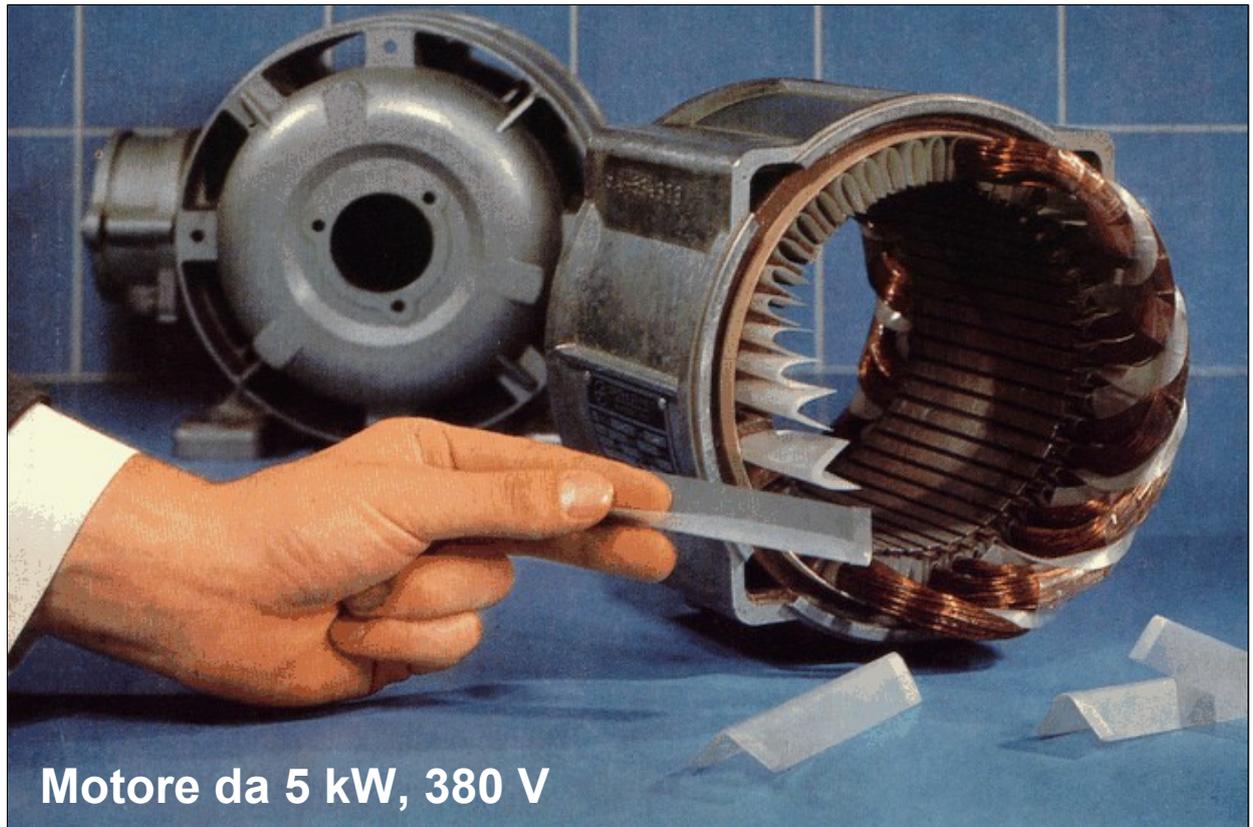
Isolanti liquidi

I liquidi isolanti possono essere sia naturali (e.g., olii minerali ottenuti dalla distillazione del petrolio, $E_c = 20 \text{ kV mm}^{-1}$) che sintetici (e.g., di tipo siliconico, non infiammabili ma molto costosi). Gli olii minerali sono sensibili all'umidità ed alla temperatura (aumentano di volume, circa dell'8% a $100 \text{ }^\circ\text{C}$, e sono anche infiammabili intorno ai $140 \text{ }^\circ\text{C}$). Come gli isolanti gassosi sono impiegati anche come fluidi refrigeranti.

Cenni costruttivi: gli isolamenti

Isolanti solidi

Gli isolanti solidi possono essere di origine organica (a base di carbonio, idrogeno ed ossigeno) ed inorganica (e.g., resine poliestere, Mylar, $E_c = 200 \text{ kV mm}^{-1}$). La vita degli isolanti organici è fortemente dipendente dalla temperatura (diventano fragili e si fessurano facilmente a seguito di vibrazioni e/o urti). In genere, gli isolanti solidi devono essere facilmente lavorabili e presentare buone caratteristiche meccaniche (ad essi è sovente affidata anche una funzione strutturale).



Motore da 5 kW, 380 V

Cenni costruttivi: le strutture meccaniche

LV terminals

Normal arrangement:
Top, rear
Special version: Bottom,
available on request at
extra charge

HV terminals

Variable arrangements,
for optimal station design.
HV tapping links on low-
voltage side for adjust-
ment to system condi-
tions, reconnectable in
de-energized state

Cross-flow fans

Permitting a 50% in-
crease in the rated power

Temperature monitoring

By PTC thermistor detec-
tors in the LV winding

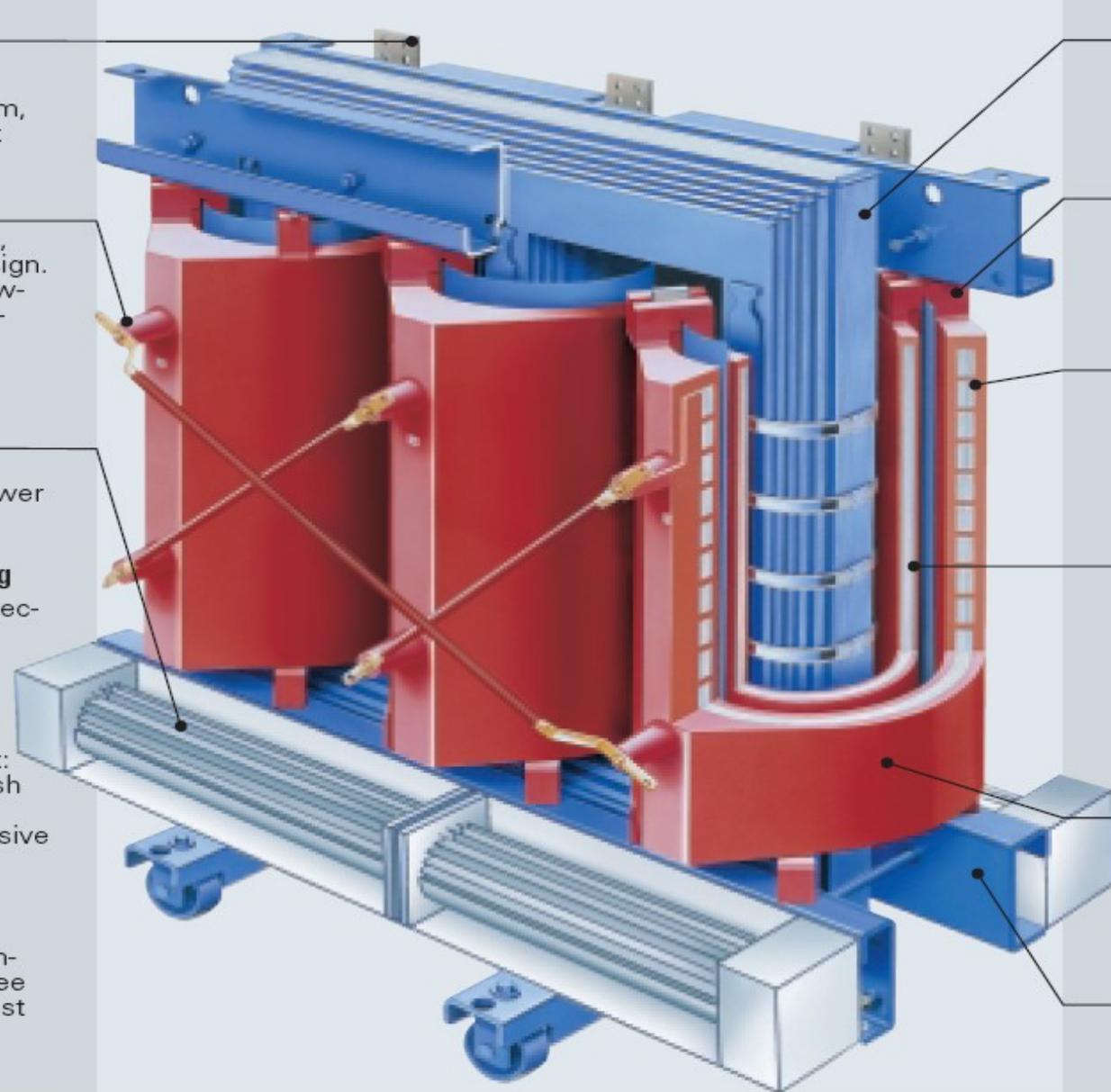
Paint finish on steel parts

Multiple coating,
RAL 5009. On request:
Two-component varnish
or hot-dip galvanizing
(for particularly aggressive
environments)

Ambient class E2

Climatic category C2
(If the transformer is in-
stalled outdoors, degree
of protection IP 23 must
be assured)

Fire class F1



Three-leg core

Made of grain-oriented,
low-loss electrolamina-
tions insulated on
both sides

Resilient spacers

To insulate core and
windings from mechani-
cal vibrations, result-
ing in low noise emis-
sions

HV winding

Consisting of vacuum-
potted single foil-type
aluminum coils.
See enlarged detail
in Fig. 50

LV winding

Made of aluminum strip.
Turns firmly glued
together by means of
insulating sheet wrap-
per material

Insulation:

Mixture of epoxy resin and quartz powder

Makes the transformer
maintenance-free, mois-
ture-proof, tropicalized,
flame-resistant and self-
extinguishing

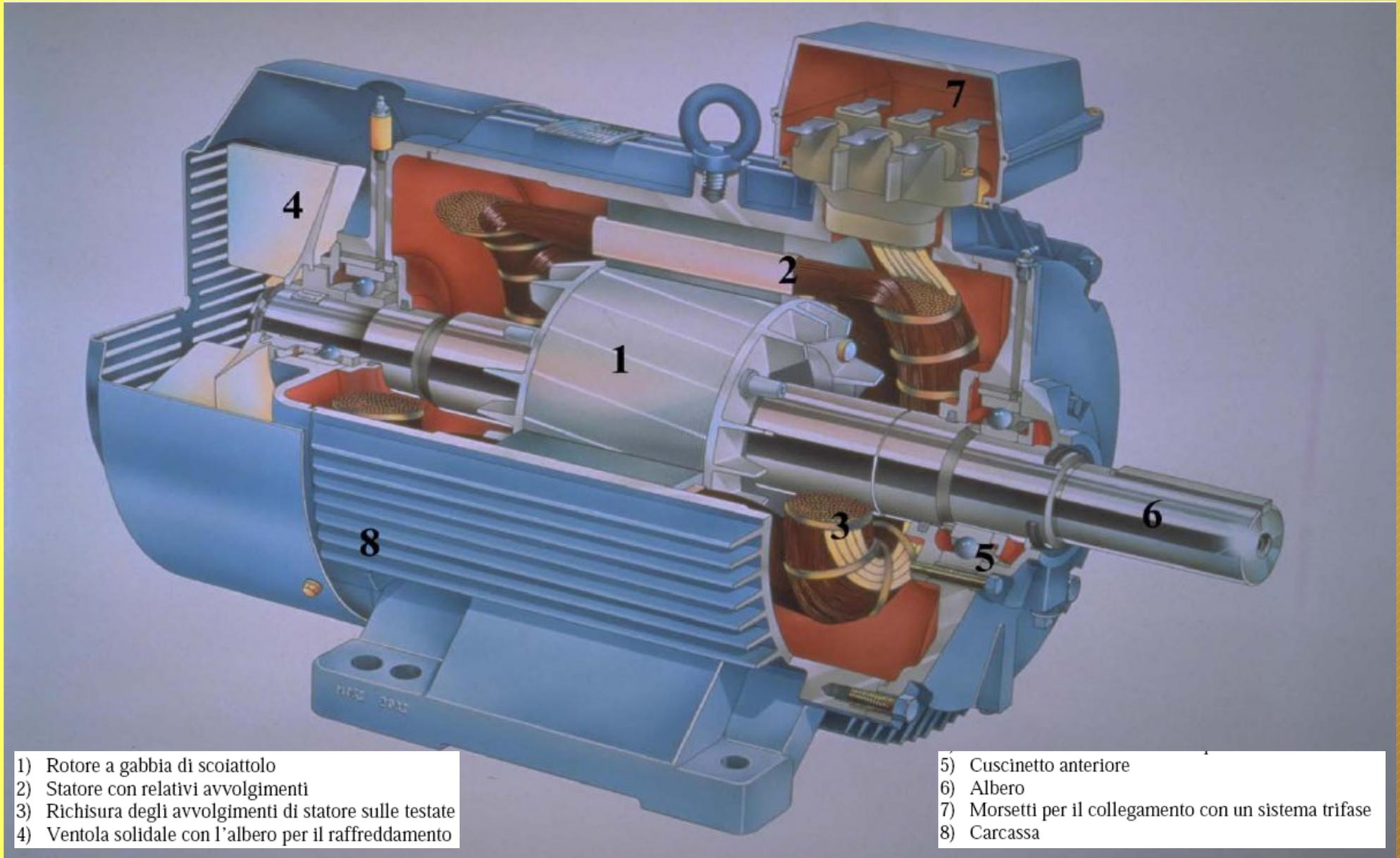
Clamping frame and truck

Rollers can be swung
around for lengthways or
sideways travel

Cenni costruttivi: le strutture meccaniche



Cenni costruttivi: le strutture meccaniche



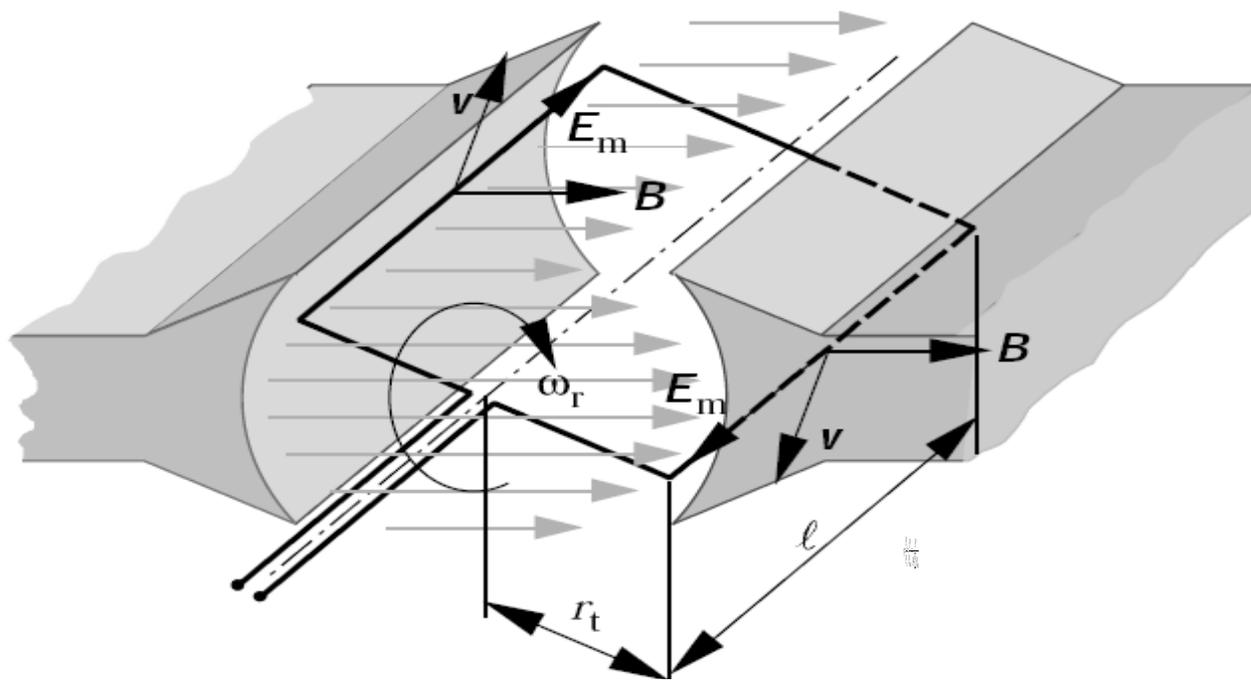
Cenni costruttivi: le strutture meccaniche

Per la realizzazione delle carcasse e delle altre parti strutturali sono impiegati le leghe di ferro e di carbonio (dal 2,5% al 4,5%), ossia le ghise, che si suddividono in tre categorie:

- ▶ **ghisa grigia**, *impiegata per la costruzione di carcasse, supporti e basamenti delle macchine rotanti di media e grande potenza, sono piuttosto fragili*
- ▶ **ghisa bianca**, *dura e fragile, è di difficile lavorazione e viene impiegata per la fabbricazione dell'acciaio*
- ▶ **ghisa malleabile**, *ha caratteristiche intermedie alle precedenti e viene utilizzata principalmente per la costruzione di elementi di forma complessa e di piccolo spessore.*

Per usi particolari, dove sono richieste caratteristiche superiori, vengono impiegati acciai speciali.

Principio di funzionamento macchine rotanti: spira in rot. in un c.m. stazionario



$$\vec{E}_m = l \vec{v} \wedge \vec{B}$$

$$e_s(t) = 2l \omega_r r_t B \cos(\omega_r t)$$

$$E_{sM} = 2l \omega_r r_t B = 2\pi f (l 2 r_t B) = 2\pi f \Phi$$

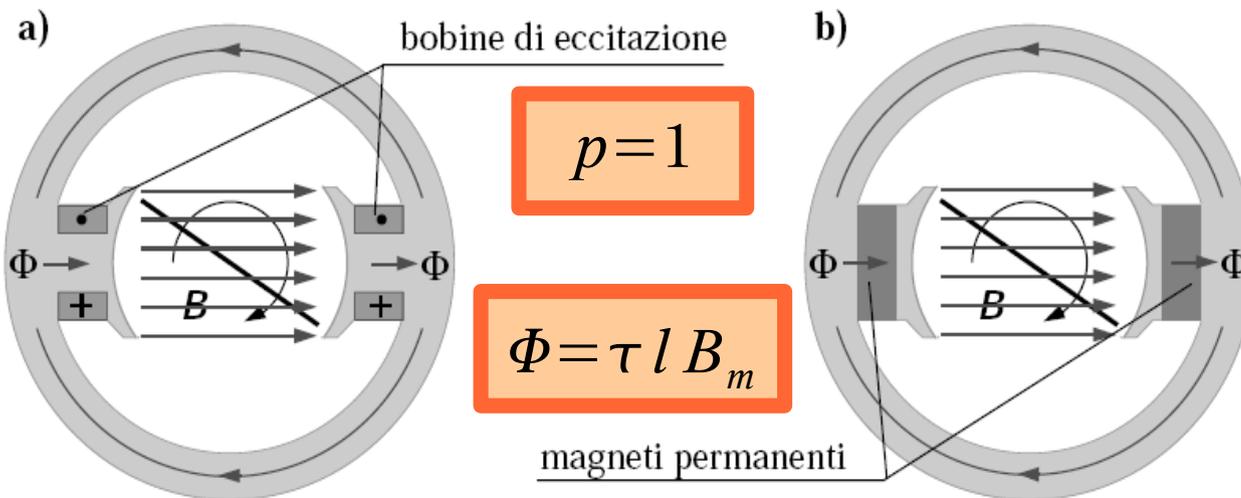
$$E_{sm} = \frac{2}{\pi} E_{sM} = 4 \Phi f$$

$$E_s = k_f E_{sm} = 4 k_f \Phi f$$

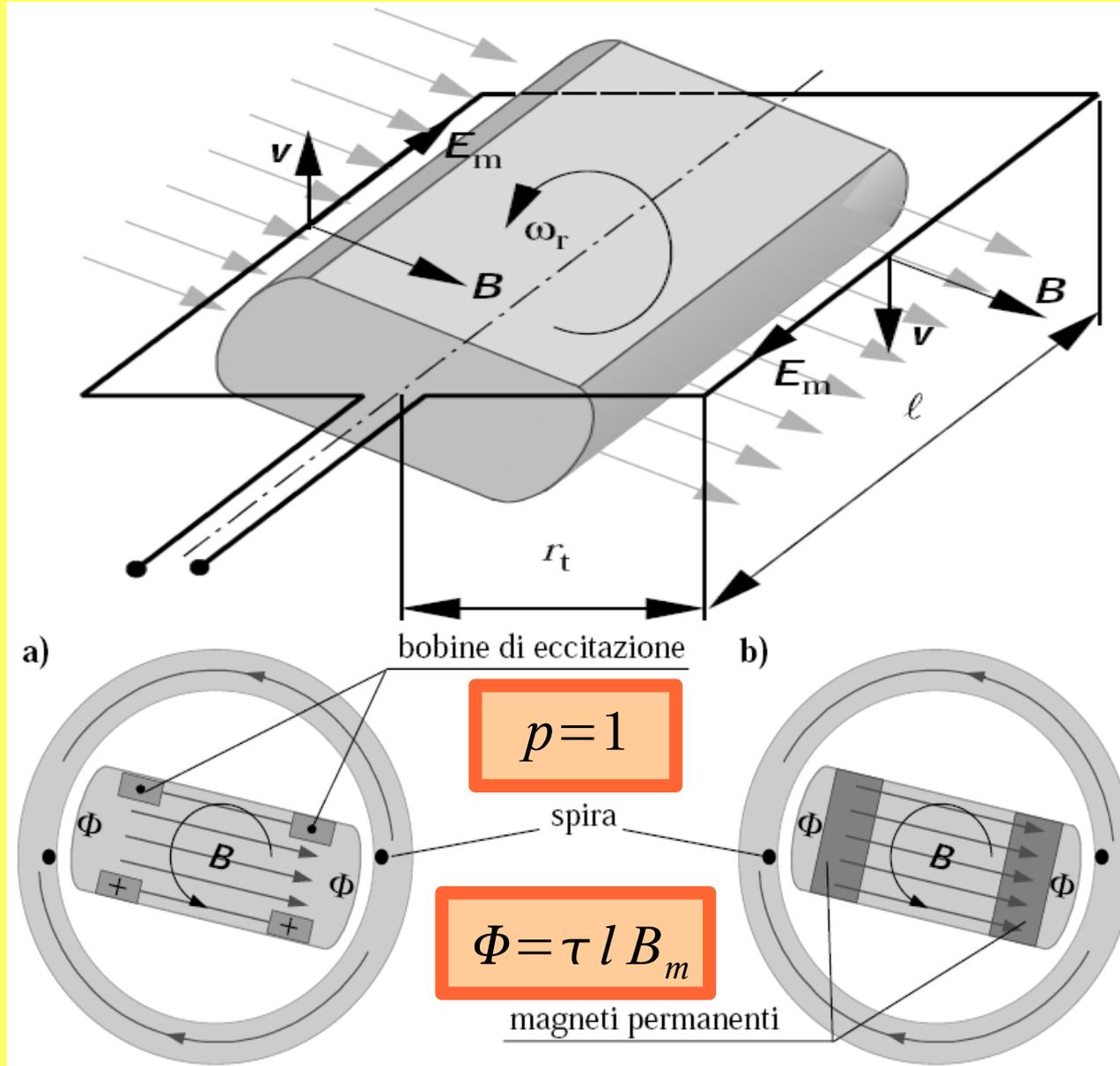
$$E_{cm} = \frac{E_{sm}}{2} = 2 \Phi f$$

$$E_c = k_f E_{cm} = 2 k_f \Phi f$$

$$k_f = \frac{A}{A_m} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} \simeq 1,11$$



Principio di funzionamento macchine rotanti: spira immersa in un c.m. variabile



$$\vec{E}_m = l \vec{v} \wedge \vec{B}$$

$$e_s(t) = 2l \omega_r r_t B \cos(\omega_r t)$$

$$E_{sM} = 2l \omega_r r_t B = 2\pi f (l 2 r_t B) = 2\pi f \Phi$$

$$E_{sm} = \frac{2}{\pi} E_{sM} = 4 \Phi f$$

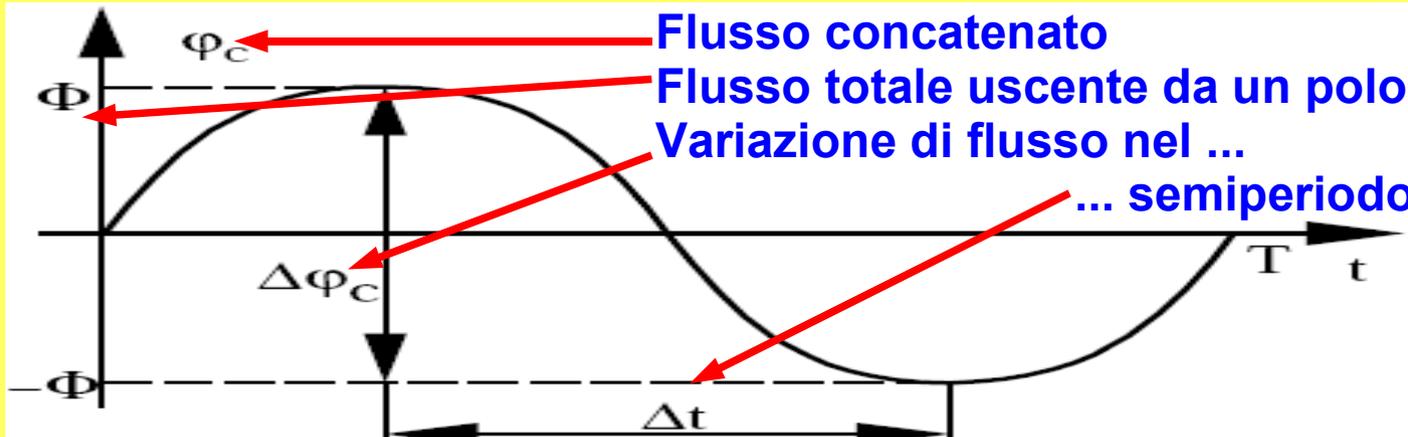
$$E_s = k_f E_{sm} = 4 k_f \Phi f$$

$$E_{cm} = \frac{E_{sm}}{2} = 2 \Phi f$$

$$E_c = k_f E_{cm} = 2 k_f \Phi f$$

$$k_f = \frac{A}{A_m} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} \simeq 1,11$$

Principio di funzionamento: flusso concatenato e conversione energetica



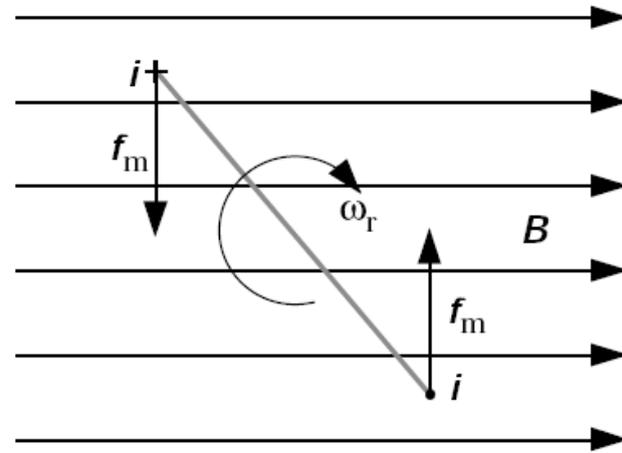
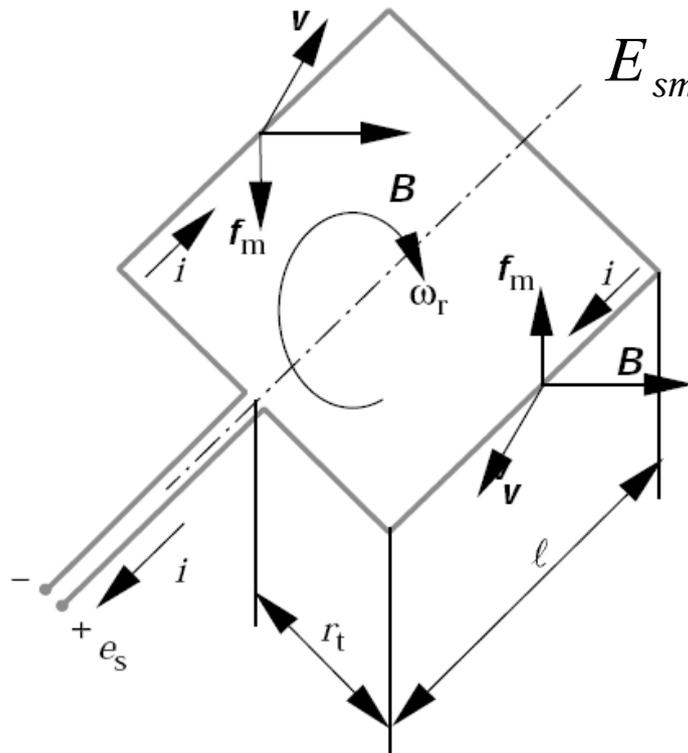
$$p_g = e_s i = 2l v B i$$

$$\vec{F}_m = l \vec{i} \wedge \vec{B}$$

$$C = 2r_t F_m = 2r_t l i B$$

$$p_m = C \omega_r = 2r_t l i B \omega_r = 2l v B i$$

$$E_{sm} = \frac{\Delta \phi_c}{\Delta t} = \frac{2\Phi}{T/2} = \frac{4\Phi}{T} = 4\Phi f$$



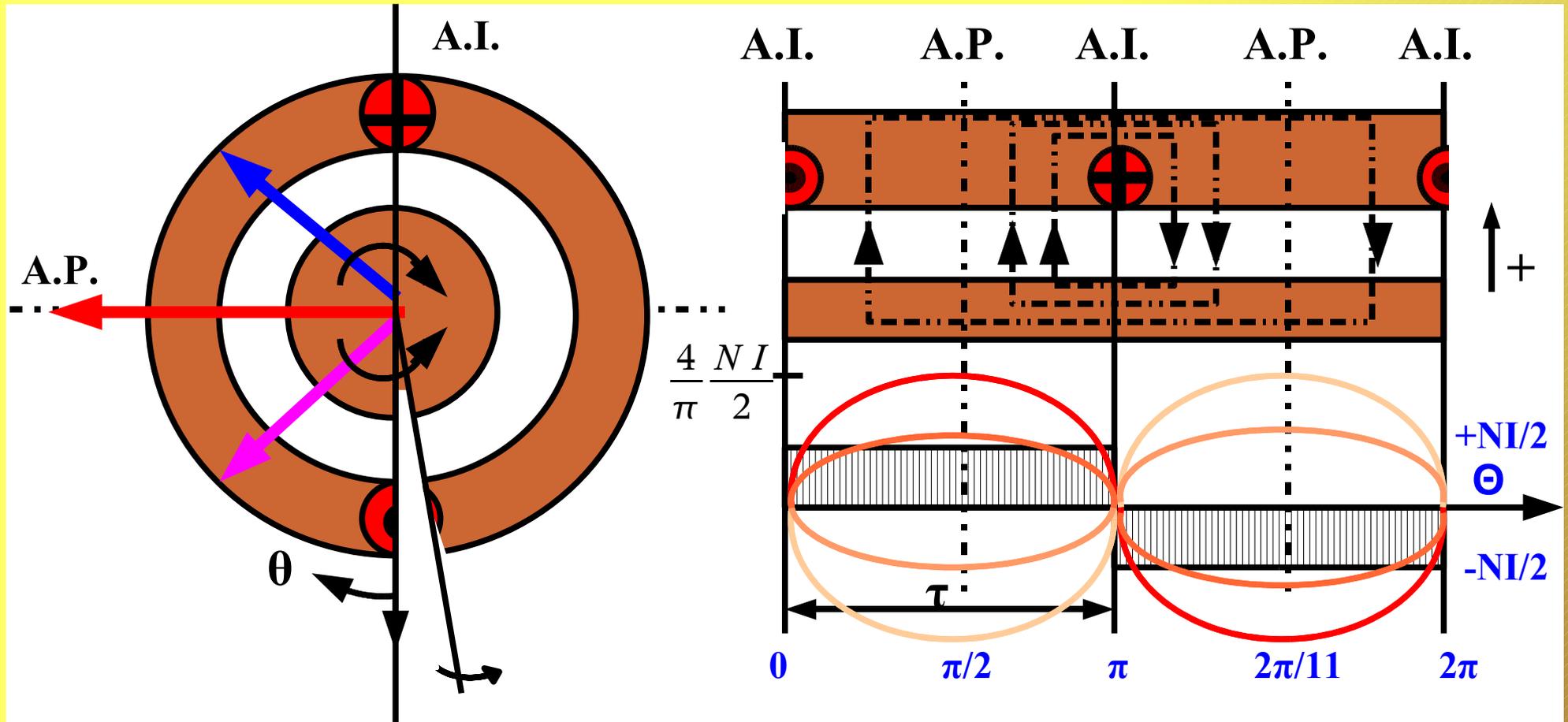
$$p_g = p_m$$

$p_m = p_g > 0$ generatore

$p_m = p_g < 0$ motore

$p_m = p_g = 0$ a vuoto

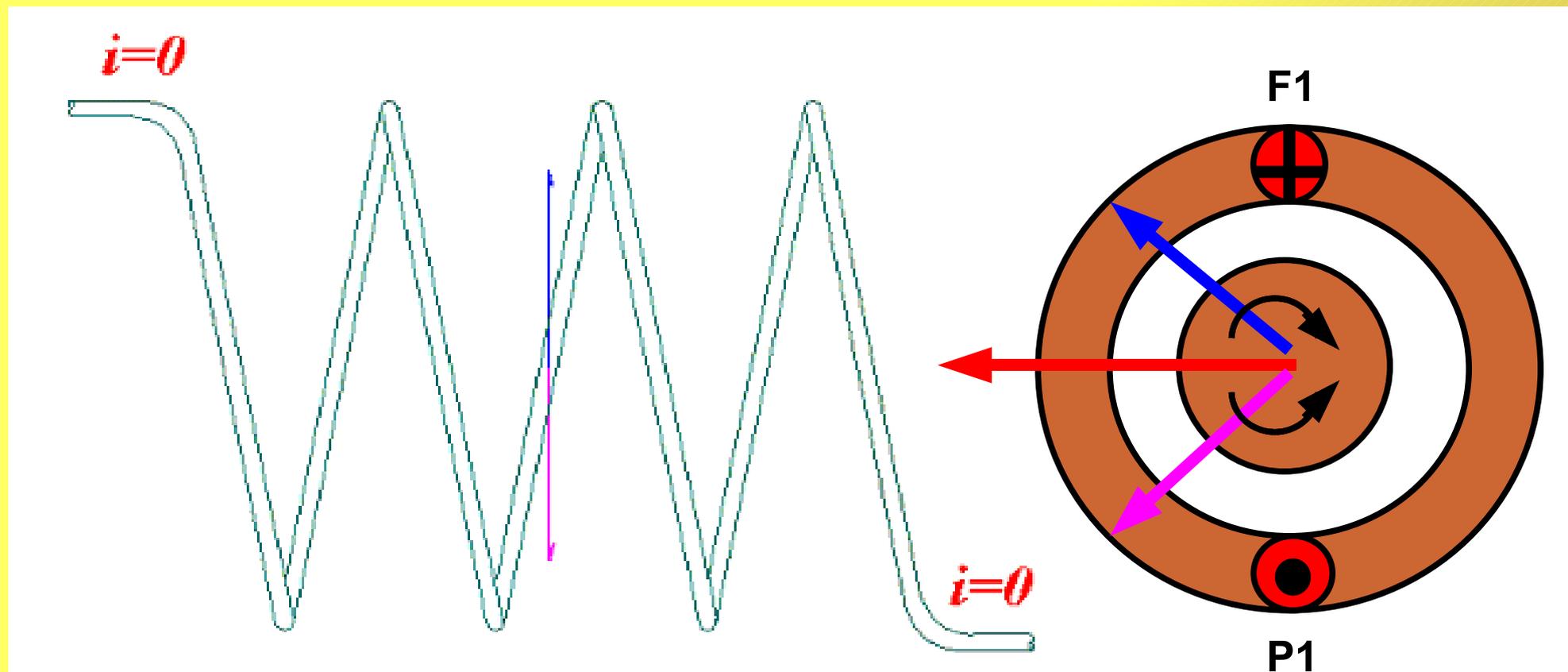
Campo magnetico rotante: avvolgimento monofase (campo pulsante)



$$i(t) = I \cos(\omega t)$$

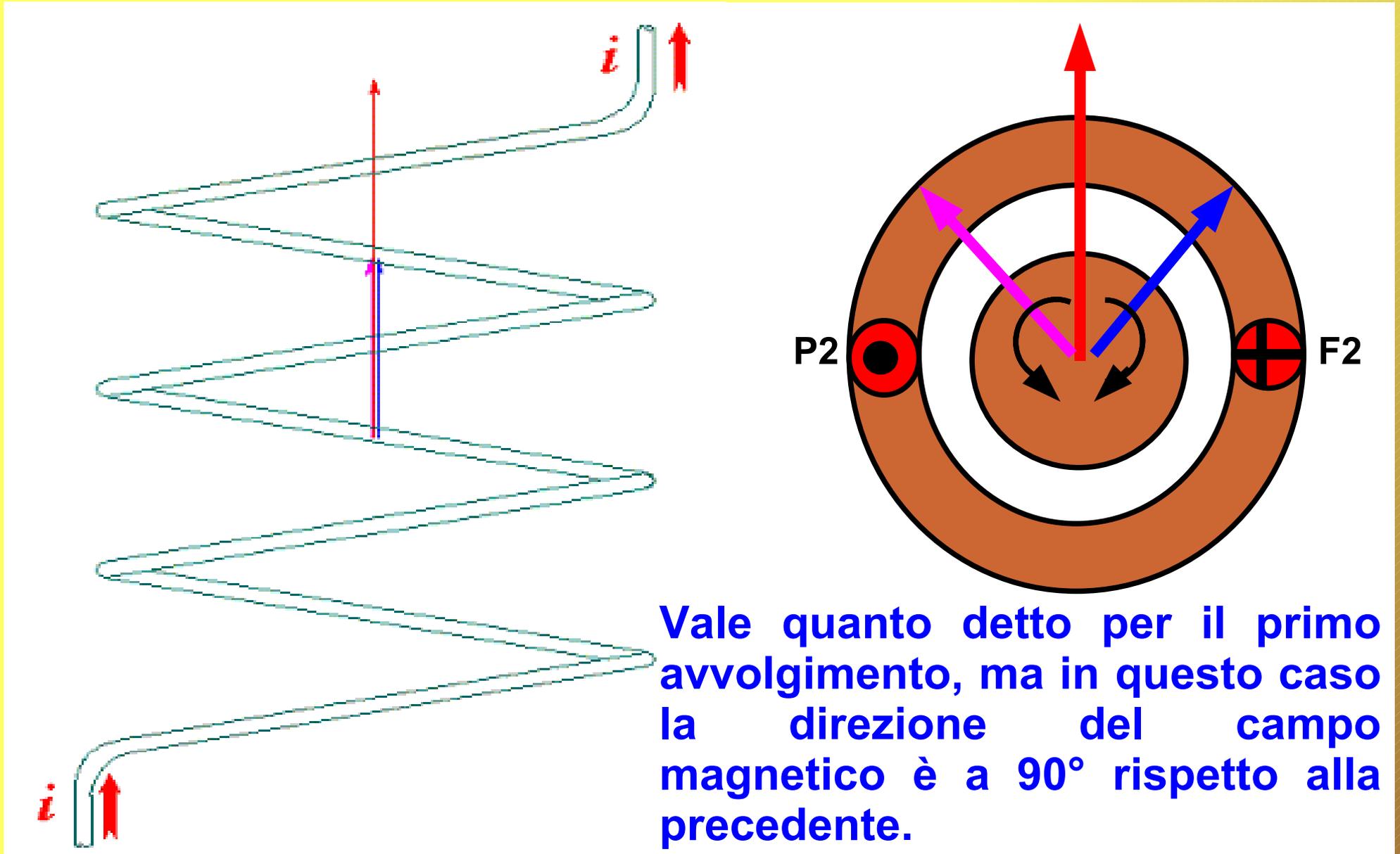
$$\mathcal{F}(\theta, t) = \frac{4NI}{\pi} \frac{1}{2} \sin(\theta) \cos(\omega t) = \frac{4NI}{\pi} \frac{1}{4} \sin(\theta + \omega t) + \frac{4NI}{\pi} \frac{1}{4} \sin(\theta - \omega t)$$

Campo magnetico rotante: avvolgimento monofase (campo pulsante)



Una f.m.m. sinusoidale, di pulsazione ω e ampiezza \mathfrak{I} , si può decomporre nella somma di due campi magnetici, uno rotante in senso orario e l'altro in senso antiorario, entrambi di ampiezza $\mathfrak{I}/2$ e con la stessa velocità ω .

Campo magnetico rotante: avvolgimento monofase a 90° rispetto al precedente



Vale quanto detto per il primo avvolgimento, ma in questo caso la direzione del campo magnetico è a 90° rispetto alla precedente.

Campo magnetico rotante: avvolgimento bifase (campo rotante)

$$i_1(t) = I \cos(\omega t) \quad \rightarrow \quad \mathcal{F}_1(\theta, t) = \frac{4}{\pi} \frac{N I}{2} \sin(\theta) \cos(\omega t)$$

$$i_2(t) = I \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) \quad \rightarrow \quad \mathcal{F}_2(\theta, t) = \frac{4}{\pi} \frac{N I}{2} \sin\left(\theta + \frac{\pi}{2}\right) \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right)$$

$$\mathcal{F}(\theta, t) = \mathcal{F}_1(\theta, t) + \mathcal{F}_2(\theta, t) =$$

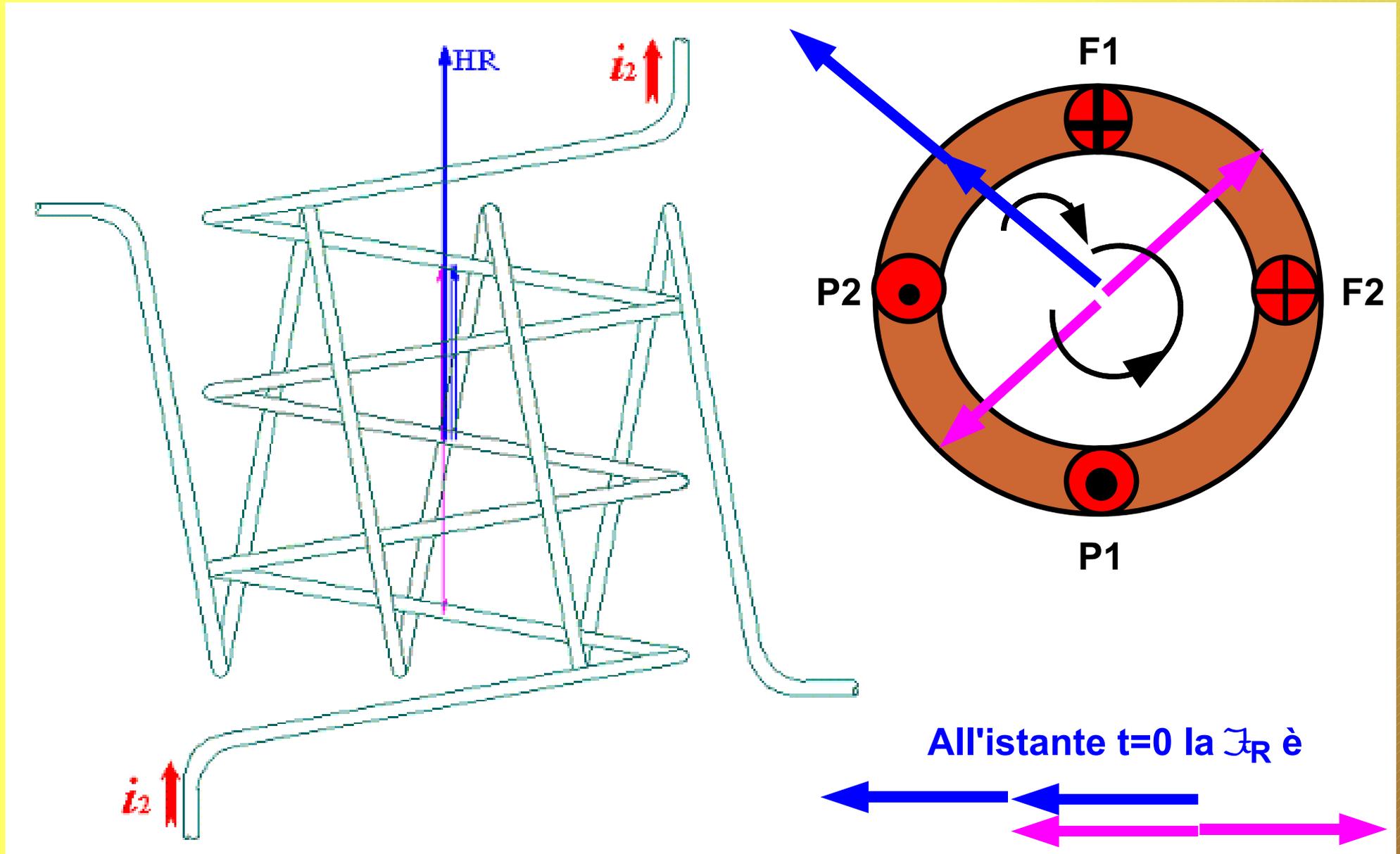
$$= \frac{4}{\pi} \frac{N I}{2} \sin(\theta) \cos(\omega t) + \frac{4}{\pi} \frac{N I}{2} \sin\left(\theta + \frac{\pi}{2}\right) \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) =$$

$$= \frac{4}{\pi} \frac{N I}{4} \sin(\theta + \omega t) + \frac{4}{\pi} \frac{N I}{4} \sin(\theta - \omega t) +$$

$$+ \frac{4}{\pi} \frac{N I}{4} \sin\left(\theta + \frac{\pi}{2} + \omega t + \frac{\pi}{2}\right) + \frac{4}{\pi} \frac{N I}{4} \sin\left(\theta + \frac{\pi}{2} - \omega t - \frac{\pi}{2}\right) =$$

$$= \frac{4}{\pi} \frac{N I}{4} \sin(\theta + \omega t) + \frac{4}{\pi} \frac{N I}{4} \sin(\theta + \omega t + \pi) + \frac{4}{\pi} \frac{N I}{2} \sin(\theta - \omega t)$$

Campo magnetico rotante: avvolgimento bifase (campo rotante)



Campo magnetico rotante: avvolgimento bifase (campo rotante)

Sovrapponendo le due bobine, si sovrappongono anche gli effetti e si ottiene, all'interno dei due solenoidi, un campo magnetico risultante \mathcal{F}_R .

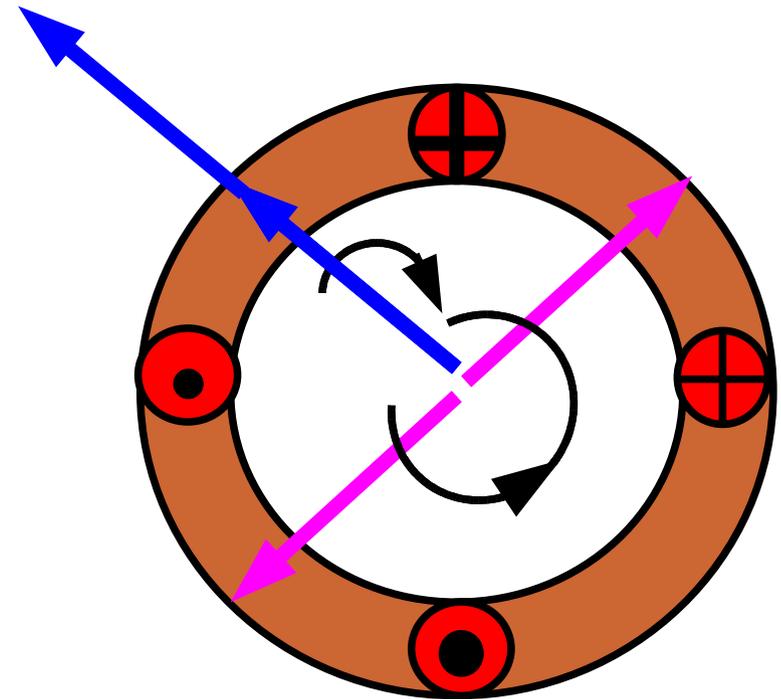
Si osservi come in questo caso, con i versi stabiliti delle correnti e con i principi e le fini degli avvolgimenti di figura:

- ▶ le componenti rotanti sinistrorse (di color magenta) si annullano;
- ▶ le componenti rotanti destrorse (di color blu) si sommano e danno una risultante di ampiezza costante

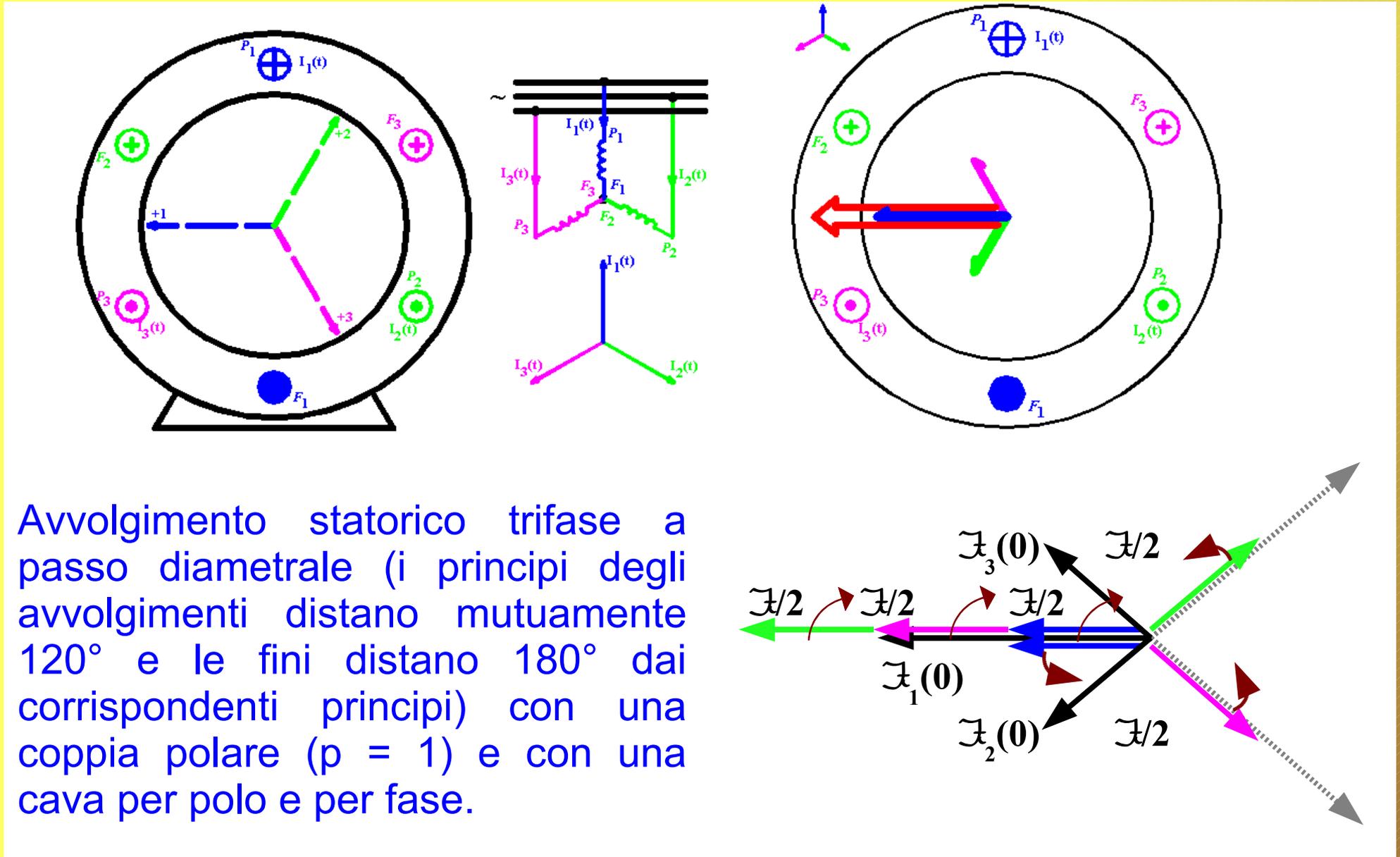
$$\mathcal{F}_R = 2 \mathcal{F}/2 = \mathcal{F}$$

rotante in senso orario alla velocità ω anch'essa costante.

Si è ottenuto un **campo magnetico rotante**.



Campo magnetico rotante: avvolgimento trifase



Avvolgimento statorico trifase a passo diametrico (i principi degli avvolgimenti distano mutuamente 120° e le fini distano 180° dai corrispondenti principi) con una coppia polare ($p = 1$) e con una cava per polo e per fase.

Campo magnetico rotante: avvolgimento trifase

$$i_1(t) = I \cos(\omega t) \quad \rightarrow \quad \mathcal{F}_1(\theta, t) = \frac{4}{\pi} \frac{N I}{2} \sin(\theta) \cos(\omega t)$$

$$i_2(t) = I \cos\left(\omega t + \frac{2}{3}\pi\right) \quad \rightarrow \quad \mathcal{F}_2(\theta, t) = \frac{4}{\pi} \frac{N I}{2} \sin\left(\theta + \frac{2}{3}\pi\right) \cos\left(\omega t + \frac{2}{3}\pi\right)$$

$$i_3(t) = I \cos\left(\omega t + \frac{4}{3}\pi\right) \quad \rightarrow \quad \mathcal{F}_3(\theta, t) = \frac{4}{\pi} \frac{N I}{2} \sin\left(\theta + \frac{4}{3}\pi\right) \cos\left(\omega t + \frac{4}{3}\pi\right)$$

$$\mathcal{F}(\theta, t) = \mathcal{F}_1(\theta, t) + \mathcal{F}_2(\theta, t) + \mathcal{F}_3(\theta, t) =$$

= ...

= ...

= ...

$$= \frac{4}{\pi} \frac{N I}{4} \sin(\theta + \omega t) + \frac{4}{\pi} \frac{N I}{4} \sin\left(\theta + \omega t + \frac{2}{3}\pi\right) +$$

$$+ \frac{4}{\pi} \frac{N I}{4} \sin\left(\theta + \omega t + \frac{4}{3}\pi\right) + \frac{4}{\pi} \frac{3 N I}{4} \sin(\theta - \omega t)$$

Campo magnetico rotante: avvolgimento trifase

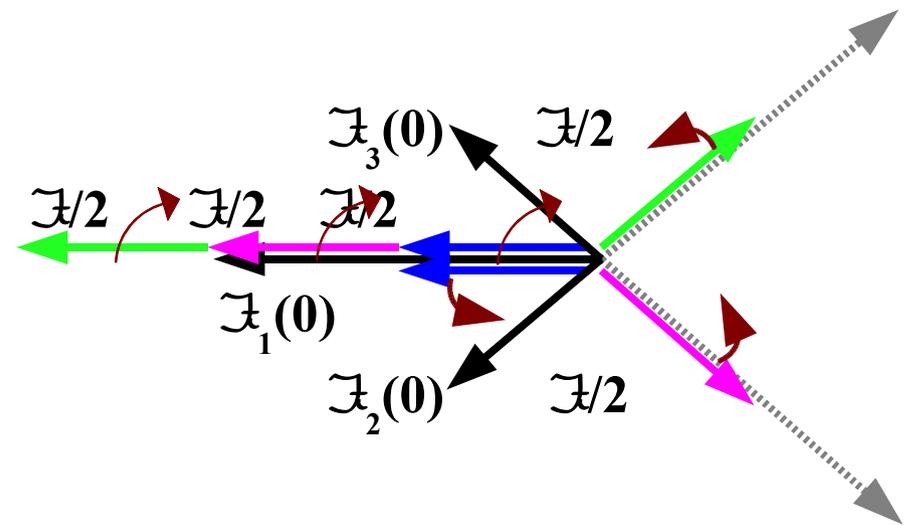
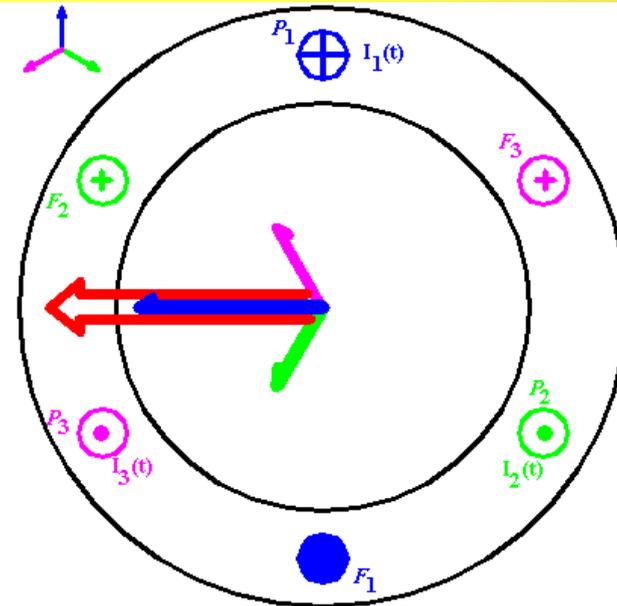
Sovrapponendo gli effetti (i.e., i campi magnetici prodotti dai singoli avvolgimenti, vettori di colore nero) si ottiene un campo magnetico risultante \mathfrak{F}_R che, con i versi stabiliti delle correnti e con i principi e le fini degli avvolgimenti di figura:

- le componenti rotanti sinistrorse si annullano;
- le componenti rotanti destrorse si sommano e danno una risultante di ampiezza costante

$$\mathfrak{F}_R = 3 \mathfrak{F} / 2$$

rotante in senso orario alla velocità ω anch'essa costante.

Si è ottenuto un **campo magnetico rotante**.



Potenze perdite e rendimento nelle macchine rotanti

