

# I trasformatori

dott. ing. Lucia FROSINI



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

1

L. Frosini

## Il trasformatore

Per definizione (CEI 14-4/1), il **trasformatore di potenza** è:

“Una macchina statica con due o più avvolgimenti che, per induzione elettromagnetica, trasforma un sistema di tensione e corrente alternata in un altro sistema generalmente di differenti valori di tensione e corrente, alla stessa frequenza, allo scopo di trasmettere la potenza elettrica.”

Nel caso più semplice, il trasformatore comprende due circuiti elettrici isolati tra loro :

- 1) quello di ingresso (o primario) che riceve l'energia;
- 2) quello di uscita (o secondario) che eroga l'energia ricevuta dal primario.

A meno delle perdite (dell'ordine al massimo di qualche percento), la potenza elettrica tra ingresso e uscita si conserva e così anche la forma d'onda delle tensioni e delle correnti.

Il trasformatore è una macchina reversibile (il circuito di uscita può essere fatto funzionare come circuito di ingresso).

2

## Il trasformatore

I trasformatori permettono di produrre, trasportare e distribuire l'energia elettrica ai valori di tensione più convenienti dal punto di vista tecnico ed economico: generare l'energia elettrica alla tensione più adatta per i generatori (indicativamente 10 kV), trasmetterla alla tensione più economica per i sistemi di trasmissione (220÷380 kV), distribuirla a tensioni intermedie (150÷132 kV, 20÷15 kV) e utilizzarla alla tensione più adatta per i dispositivi utilizzatori (400 V).

Per definizione (CEI 14-4/1), l'avvolgimento ad alta tensione è l'avvolgimento che ha la tensione nominale più elevata e l'avvolgimento a bassa tensione quello che ha la tensione nominale più bassa.

Il principio di funzionamento del trasformatore è basato sulla legge dell'induzione elettromagnetica (Farady-Lenz) tra circuiti mutuamente accoppiati: ne consegue che il trasformatore non può funzionare con alimentazioni in corrente continua, ma necessita di alimentazioni variabili nel tempo.

3

## Tensione indotta da un flusso magnetico sinusoidale

Per la legge di Faraday-Lenz, se la corrente  $i$  che percorre un circuito elettrico di  $N$  spire è variabile sinusoidalmente nel tempo con frequenza  $f$ , si ha:

corrente  $i$  variabile sinusoidalmente  $\rightarrow$  flusso magnetico concatenato  $\Psi$  variabile sinusoidalmente  $\rightarrow$  f.e.m. autoindotta  $e$  variabile sinusoidalmente con la stessa  $f$  del flusso magnetico (e della corrente)

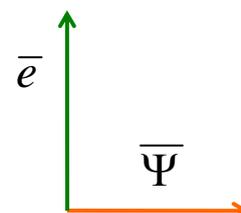
$$\Phi = \Phi_M \sin(\omega t) \quad \rightarrow \quad \Psi = N\Phi = N\Phi_M \sin(\omega t)$$

$$\rightarrow e = \frac{d\Psi}{dt} = \frac{d[N\Phi_M \sin(\omega t)]}{dt} = N\Phi_M \omega \cos(\omega t)$$

Valore massimo:  $E_M = N\Phi_M \omega$

Valore efficace:

$$E = \frac{E_M}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi f N\Phi_M}{\sqrt{2}} \cong 4,44 f N\Phi_M$$



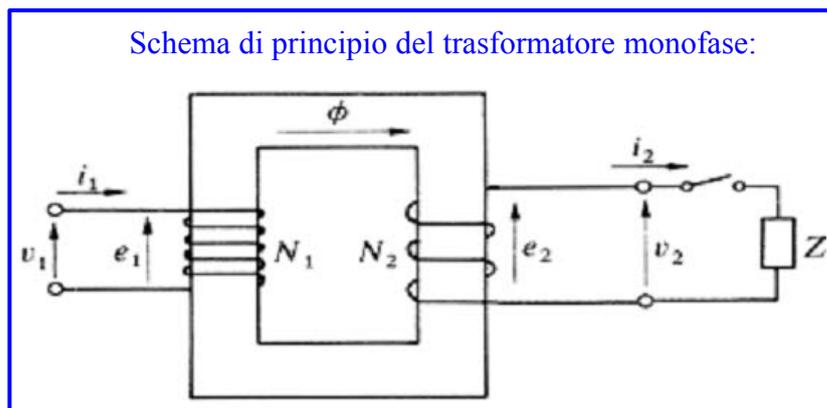
4

## Principi alla base del trasformatore monofase

Se si alimenta uno dei due avvolgimenti (primario) con una tensione alternata, nel nucleo nasce un flusso magnetico alternato la cui ampiezza dipende dalla tensione di alimentazione, dalla frequenza e dal numero di spire dell'avvolgimento  $N_1$ .

Grazie all'azione del nucleo, questo flusso si concatena quasi per intero con il secondo avvolgimento (secondario) e induce in esso una f.e.m. la cui ampiezza dipende dal numero di spire secondarie  $N_2$  e dalla frequenza.

Per comodità, si utilizza la convenzione degli utilizzatori per l'avvolgimento primario e quella dei generatori per l'avvolgimento secondario.



5

## Principi alla base del trasformatore

Trascurando il segno dovuto alla legge di Lenz, si ha:

$$e_1 = \frac{d\Psi_1}{dt} = \frac{d[N_1\Phi_M \sin(\omega t)]}{dt} = N_1\Phi_M \omega \cos(\omega t)$$

Valore efficace:  $E_1 = \frac{E_{1M}}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi f N_1 \Phi_M}{\sqrt{2}} \cong 4,44 f N_1 \Phi_M$

**RAPPORTO DI TRASFORMAZIONE**

$$e_2 = \frac{d\Psi_2}{dt} = \frac{d[N_2\Phi_M \sin(\omega t)]}{dt} = N_2\Phi_M \omega \cos(\omega t)$$

Valore efficace:  $E_2 = \frac{E_{2M}}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi f N_2 \Phi_M}{\sqrt{2}} \cong 4,44 f N_2 \Phi_M$

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

Nota: di solito per le grandezze elettriche si usano i valori efficaci, mentre per le grandezze magnetiche si usano i valori massimi.

6

## Corrente magnetizzante

Applicando la legge di Hopkinson:  $N_1 \bar{I}_1 + N_2 \bar{I}_2 = \mathfrak{R} \bar{\Phi}$

$$\rightarrow \mathfrak{R} \bar{\Phi} = N_1 \left( \bar{I}_1 + \frac{N_2 \bar{I}_2}{N_1} \right) = N_1 \bar{I}_{0\mu}$$

La convenzione che si utilizza nella teoria dei trasformatori è di associare la f.m.m. necessaria per magnetizzare il nucleo a una **corrente magnetizzante**  $I_{0\mu}$  riferita al primario:

$$\boxed{\bar{I}_{0\mu}} = \bar{I}_1 + \frac{N_2}{N_1} \bar{I}_2 = \bar{I}_1 - \left( -\frac{N_2}{N_1} \bar{I}_2 \right) = \boxed{\bar{I}_1 - \bar{I}'_2}$$

La corrente magnetizzante  $I_{0\mu}$  è assorbita anche a vuoto e non dà origine a dissipazione di potenza attiva, ma solo di potenza reattiva.

Per il momento trascuriamo le perdite di potenza attiva nel ferro e quindi la componente attiva della corrente a vuoto  $I_{0a}$ , che aggiungeremo dopo.

7

## Corrente magnetizzante

$\bar{I}'_2 = -\frac{N_2}{N_1} \bar{I}_2$  è una corrente fittizia, definita “corrente secondaria riportata a primario”

Quindi il flusso magnetico principale può essere scritto come:  $\Phi = \frac{N_1 I_{0\mu}}{\mathfrak{R}}$

$$\rightarrow e_1(t) = \frac{dN_1 \Phi(t)}{dt} = N_1 \frac{d\Phi(t)}{dt} = N_1 \frac{d(N_1 I_{\mu 0}(t) / \mathfrak{R}_m)}{dt} = \frac{N_1^2}{\mathfrak{R}_m} \frac{dI_{\mu 0}(t)}{dt}$$

$$\rightarrow e_1(t) = j\omega L_m I_{\mu 0}(t) = jX_m I_{\mu 0}(t)$$

**REATTANZA MAGNETIZZANTE**

8

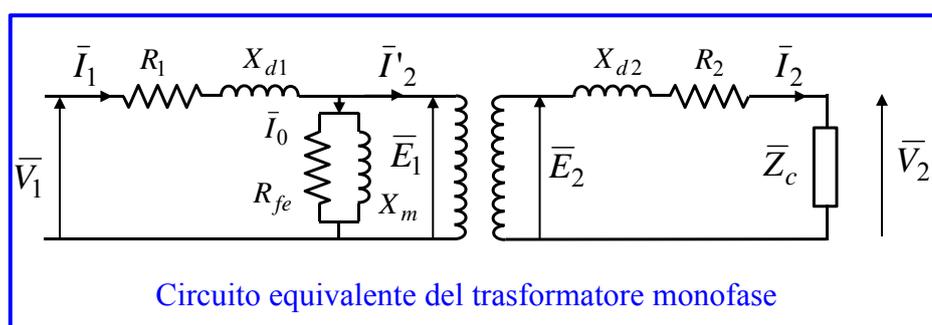
## Perdite nel ferro

A vuoto però c'è anche una dissipazione di potenza attiva, dovuta alle “perdite nel ferro”, somma delle perdite per isteresi e per correnti parassite.

Queste perdite dipendono approssimativamente dal quadrato dell'induzione magnetica  $B$ , quindi dal quadrato del flusso  $\Phi$  e di conseguenza dal quadrato della f.e.m. indotta  $E_1$ :

$$P_{ferro} \propto B^2 \propto \Phi^2 \propto E_1^2$$

Per tenere conto di queste perdite nel circuito equivalente, si introduce una resistenza fittizia  $R_{fe}$  in parallelo all'induttanza di magnetizzazione:



$$P_{ferro} = \frac{E_1^2}{R_{fe}}$$

9

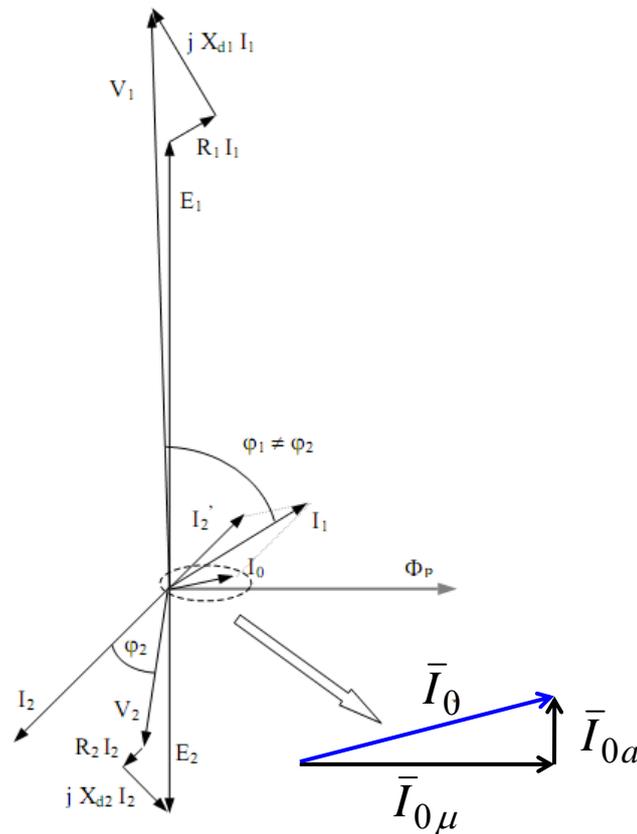
## Corrente a vuoto

Quindi, a vuoto (ossia in assenza di carico a secondario), il trasformatore assorbe a primario una corrente pari alla **somma VETTORIALE** della **corrente magnetizzante  $I_{0\mu}$**  e della **corrente rappresentativa delle perdite nel ferro  $I_{0a}$** :

$$\bar{I}_0 = \bar{I}_{0\mu} + \bar{I}_{0a} \qquad P_{ferro} = \frac{E_1^2}{R_{fe}} = R_{fe} I_{0a}^2$$

Tale corrente viene denominata **corrente a vuoto  $I_0$**  e risulta di piccola entità rispetto alle correnti  $I_1$  e  $I_2$  di normale utilizzo della macchina.

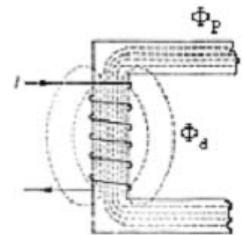
## Esempio di diagramma vettoriale a carico



11

## Flussi dispersi

Oltre al flusso principale, in un trasformatore reale, esistono dei flussi DISPERSI che evolvono principalmente in aria e si concatenano con un singolo avvolgimento (primario o secondario).



Tali flussi non sono utili alla conversione elettromagnetica dell'energia tra primario e secondario.

Però essi fanno parte del flusso concatenato con l'avvolgimento e quindi partecipano alla produzione della forza elettromotrice.

Con riferimento all'avvolgimento primario si può scrivere:  $\Psi_1 = N_1(\Phi + \Phi_{1d})$

$$v_1 = \frac{d\Psi_1}{dt} = N_1 \frac{d\Phi}{dt} + N_1 \frac{d\Phi_{1d}}{dt}$$

$$\Phi_{1d} = \frac{N_1 I_1}{\mathcal{R}_{d1}} \rightarrow \text{riluttanza del circuito magnetico in cui evolve il flusso disperso}$$

12

## Flussi dispersi

$$\rightarrow \boxed{V_1} = \frac{1}{\sqrt{2}} (j\omega N_1 \Phi + j\omega N_1 \Phi_{d1}) = E_1 + j\omega \frac{N_1^2}{\mathfrak{R}_{d1}} I_1 = \boxed{E_1 + j\omega L_{d1} I_1}$$

Nel circuito equivalente, i flussi dispersi primari vengono modellizzati tramite una reattanza di dispersione primaria  $X_{d1} = \omega L_{d1}$  percorsa dalla corrente  $I_1$ .

Anche in questo caso, per sostenere un flusso non si dissipa potenza attiva, ma potenza reattiva e quindi si ha una caduta di tensione reattiva.

Infine, se si considera la resistenza ohmica dell'avvolgimento primario, la tensione primaria diventa:

$$\bar{V}_1 = \bar{E}_1 + R_1 \bar{I}_1 + j\omega L_{d1} \bar{I}_1$$

Lo stesso vale per i flussi dispersi secondari e la resistenza ohmica dell'avvolgimento secondario.

## Osservazioni sul circuito equivalente

■ La corrente  $I_0$  risulta normalmente di 2÷3 ordini di grandezza inferiore alle normali correnti di carico ( $I_2$ ,  $I_1$ ), pertanto la corrente secondaria riportata al primario  $I'_2$  e la corrente primaria  $I_1$ , in prima approssimazione, sono circa coincidenti ( $I_1 \cong I'_2$ ).

■ Le cadute di tensione primarie  $\Delta V_1$  e secondarie  $\Delta V_2$  sui parametri in serie del circuito equivalente ( $R_1$ ,  $X_{d1}$ ,  $R_2$ ,  $X_{d2}$ ) sono complessivamente pari a poche unità percentuali delle rispettive tensioni  $V_1$  e  $V_2$ .

■ Le reattanze di dispersione  $X_{d1}$ ,  $X_{d2}$  sono legate ai flussi dispersi dei due avvolgimenti, mentre la reattanza di magnetizzazione  $X_m$  è correlata al flusso principale del trasformatore. Poiché i flussi dispersi hanno un percorso prevalente in aria, mentre il flusso principale si svolge completamente in ferro, le reattanze di dispersione sono di 2-3 ordini di grandezza inferiori alla reattanza di magnetizzazione (le reattanze sono direttamente proporzionali alle permeabilità magnetiche dei relativi percorsi).

## Osservazioni sul circuito equivalente

■ Poiché i valori di resistenza  $R_1$  e di reattanza  $X_{d1}$  sono tipicamente modesti, si possono, in prima approssimazione, trascurare le relative cadute di tensione e quindi si può uguagliare la tensione di alimentazione  $V_1$  alla sola f.e.m.  $E_1$ :

$$V_1 \cong E_1 = 4,44 f N_1 \Phi_M$$

Questa relazione evidenzia che il flusso principale del trasformatore viene imposto dalla tensione di alimentazione primaria e resta praticamente costante (o poco variabile) al variare della corrente di carico  $I_2$ .

Per questo motivo si dice comunemente che il trasformatore lavora a flusso costante.

■ Nel funzionamento a vuoto, la corrente erogata al secondario è nulla e il trasformatore equivale a una reattanza di elevato valore (in prima approssimazione pari a  $X_m$ ). La corrente  $I_1$  assorbita, in queste condizioni, dal trasformatore è molto piccola rispetto alle normali correnti di carico ( $I_{1vuoto} = I_0 \cong 0$ ).

## Osservazioni sul circuito equivalente

■ **Quando il secondario del trasformatore viene chiuso su un carico**, la corrente  $I_2$  erogata dal secondario ha sul primario un effetto di reazione rappresentato dalla corrente  $I'_2$  del circuito equivalente. L'azione di questa corrente è tendenzialmente di tipo smagnetizzante: essa tende a ridurre l'entità della corrente magnetizzante  $I_{0\mu}$  ed il relativo flusso principale  $\Phi$ .

■ La potenziale riduzione del flusso principale e la conseguente riduzione della f.e.m.  $E_1$  provoca uno squilibrio tra  $V_1$  ed  $E_1$  e **un maggiore assorbimento di corrente  $I_1$  che tende a ripristinare il valore del flusso** e della f.e.m.  $E_1$ .

■ La corrente  $I_1$  primaria, che ripristina le condizioni di flusso principale, è data da:

$$\bar{I}_1 = \bar{I}_0 + \bar{I}'_2 \quad \text{con:} \quad \bar{I}_0 = \bar{I}_{0\mu} + \bar{I}_{0a} \quad \text{corrente a vuoto}$$

$$\bar{I}'_2 = -\frac{N_2}{N_1} \bar{I}_2 \quad \text{corrente secondaria riportata a primario}$$

## Nuclei magnetici dei trasformatori monofase

Osserviamo prima di tutto che, diversamente da quanto indicato negli schemi di principio, nella realtà l'avvolgimento primario e l'avvolgimento secondario sono avvolti entrambi sulla stessa colonna, per ridurre al minimo i flussi dispersi.

Per quanto riguarda i trasformatori monofase, le forme costruttive dei nuclei possono essere:

**a colonne**



**a mantello**



17

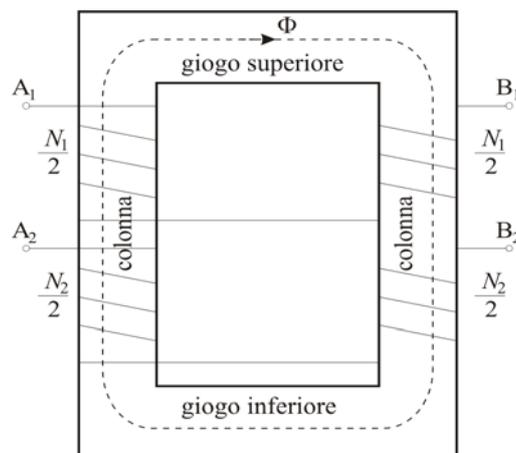
## Nucleo a colonne per trasformatori monofase

Metà delle spire di alta tensione e metà di quelle a bassa tensione sono avvolte attorno a ciascuna delle due colonne.

Il flusso  $\Phi$  prodotto dagli avvolgimenti percorre tutti i tratti del nucleo.

Se gioghi e colonne hanno tutti la stessa sezione  $S$ , anche l'induzione magnetica  $B = \Phi/S$  è uguale in tutti i tratti del nucleo.

**a colonne**



18

## Nucleo a mantello per trasformatori monofase

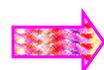
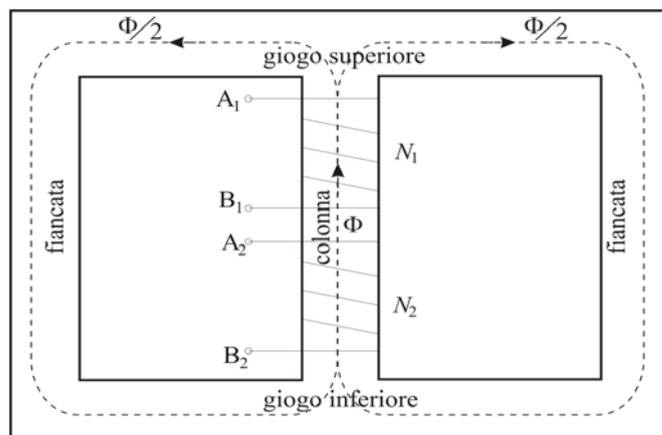
Tutte le spire sono avvolte attorno alla colonna centrale.

Il flusso  $\Phi$  prodotto dagli avvolgimenti percorre la colonna centrale.

I gioghi e le fiancate sono percorsi da un flusso pari a  $\Phi/2$ .

Per avere lo stesso valore di induzione magnetica  $B=\Phi/S$  in tutti i tratti del nucleo, la sezione dei gioghi e delle fiancate deve essere la metà di quella della colonna centrale.

**a mantello**



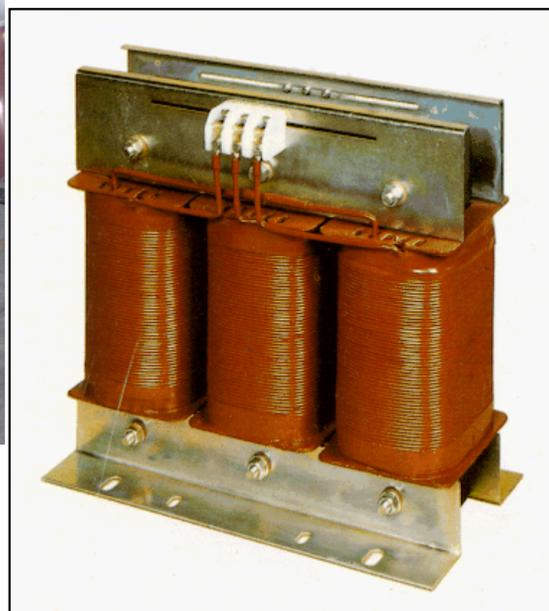
si riduce l'altezza dei gioghi e quindi l'altezza dell'intero trasformatore.

## Nucleo a tre colonne per trasformatori trifase



Trasformatori a secco isolati in resina 15 kV/400 V  
potenze 1,6 MVA e 2 MVA

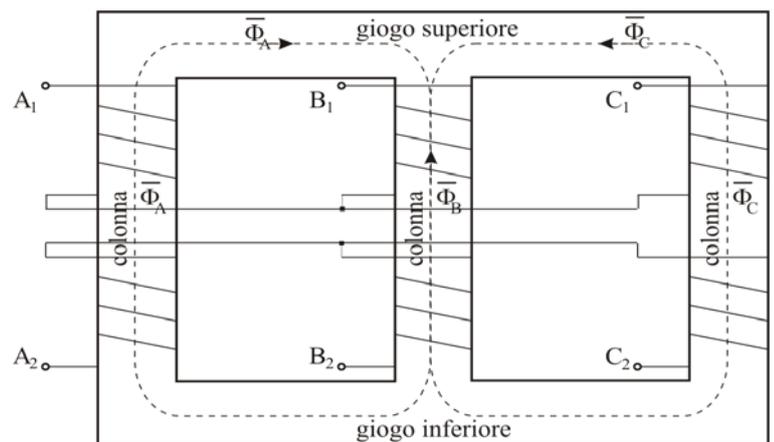
Trasformatore a secco isolato in aria



## Nucleo a tre colonne per trasformatori trifase

Il nucleo magnetico più comune per i trasformatori trifase è a tre colonne: su ogni colonna vengono montati l'avvolgimento di bassa tensione e quello di alta tensione di una fase.

Se le tensioni di alimentazione costituiscono una terna simmetrica, anche i flussi magnetici nelle colonne prodotti da ciascuna fase formano una terna simmetrica: sono variabili sinusoidalmente nel tempo, hanno lo stesso valore massimo e sono sfasati tra loro di  $120^\circ$  (la somma vettoriale dei tre flussi è sempre nulla).



Se colonne e gioghi hanno tutti la stessa sezione, l'induzione magnetica  $B = \Phi/S$  sarà costante in tutti i tratti del nucleo.

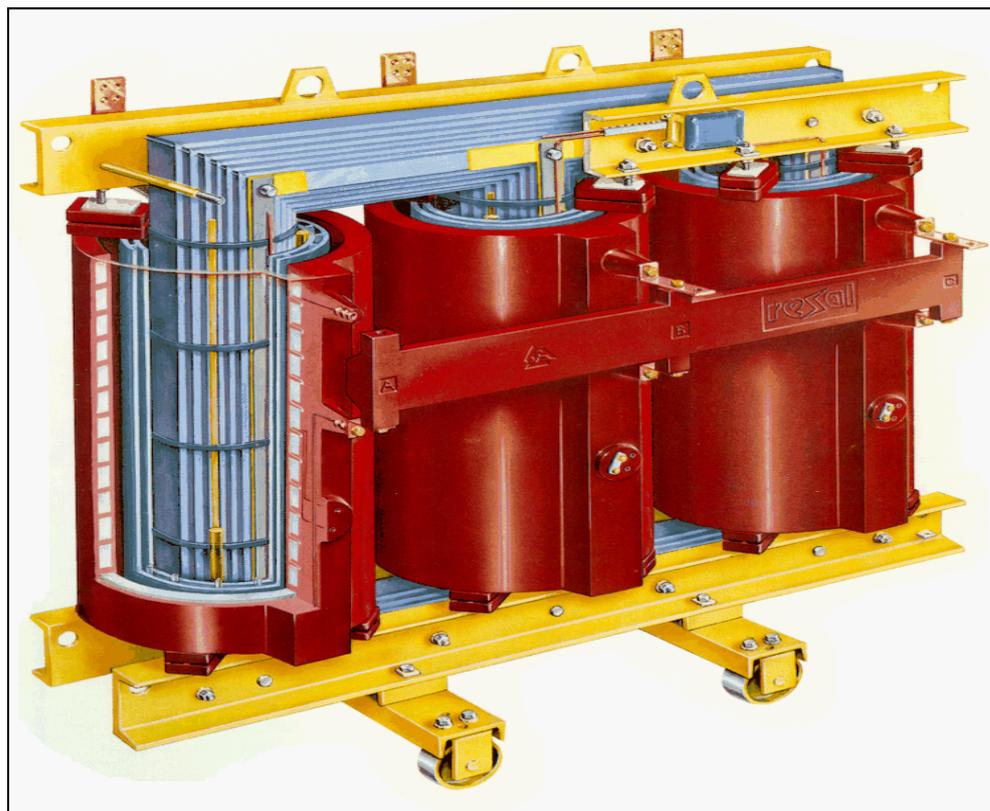
## Nucleo a 5 colonne per trasformatori trifase



Per trasformatori trifase di potenza molto elevata si può utilizzare il nucleo a 5 colonne (analogo al nucleo a mantello per il monofase), al fine di ridurre l'altezza dei gioghi e quindi l'altezza dell'intero trasformatore.



## Nuclei magnetici dei trasformatori



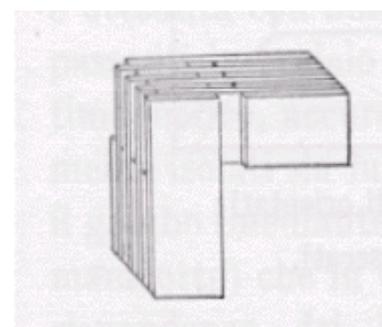
I nuclei magnetici dei trasformatori sono ottenuti sovrapponendo vari strati di lamierini.

La loro disposizione è diversa a seconda che si utilizzino:

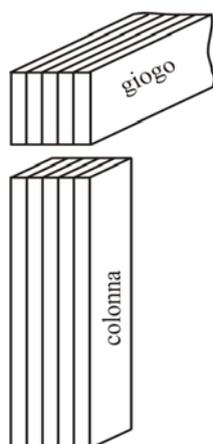
- + lamierini ordinari (materiale isotropo);
- + lamierini a cristalli orientati (materiale anisotropo).

## Giunti del nucleo (materiale isotropo)

Nel caso in cui si utilizzino lamierini ordinari (materiale isotropo), si possono avere:

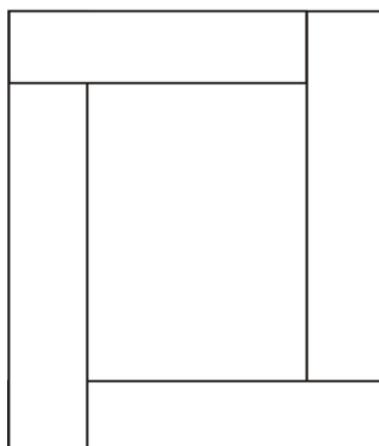


**giunti affacciati**

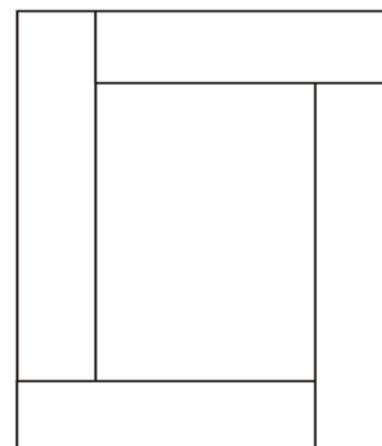


**giunti intercalati**

strato dispari



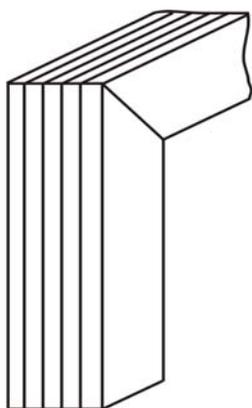
strato pari



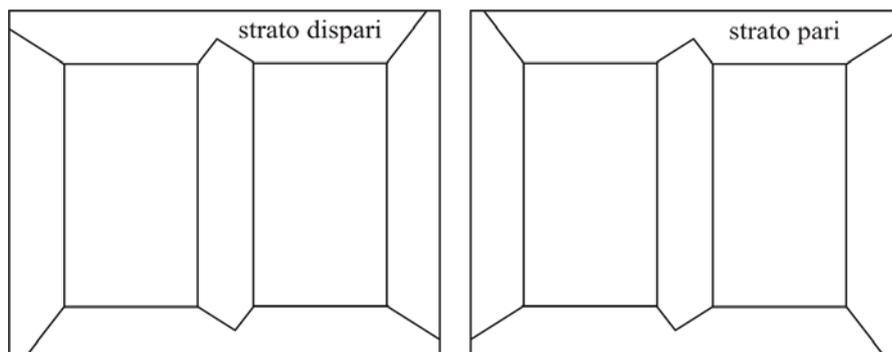
## Giunti del nucleo (materiale anisotropo)

Nel caso in cui si utilizzino lamierini a cristalli orientati (materiale anisotropo), non si possono avere gioghi a  $90^\circ$ , perciò si possono avere:

**giunti affacciati**  
con angoli di  $45^\circ$



**giunti intercalati** con angoli di  $35^\circ$  e  $55^\circ$  o con angoli di  $45^\circ$  con il metodo step-lap



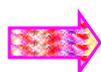
## Giunti del nucleo

I **giunti affacciati** si ottengono serrando tra loro due pacchi di lamierini distinti separati da uno strato isolante:

- facilità di montaggio;
- serraggio più difficoltoso (necessitano di tiranti e legature);
- maggiore riluttanza.

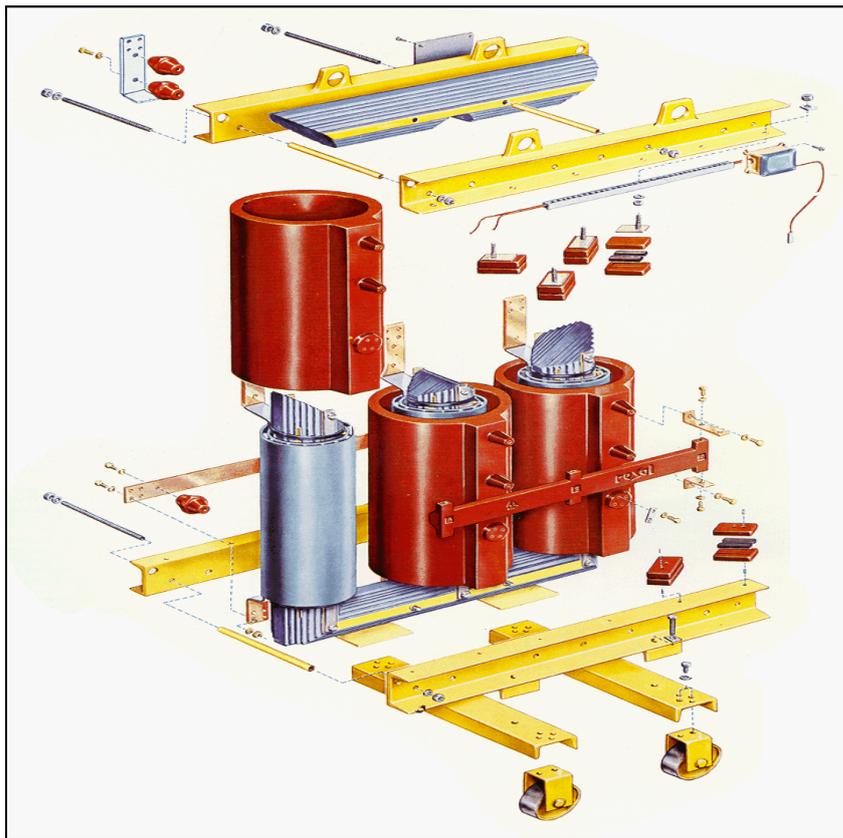
I **giunti intercalati** si ottengono alternando vari strati di lamierini:

- difficoltà e tempi maggiori nel montaggio;
- buona compattezza (attrito tra i lamierini): struttura meccanicamente robusta;
- minore riluttanza.



i **giunti intercalati** riducono la corrente magnetizzante del trasformatore e il ronzio causato dalle forze elettromagnetiche sui lamierini.

## Colonne del nucleo



Poiché anche le colonne sono ottenute tramite sovrapposizione di lamierini, si cerca di approssimare una circonferenza attraverso una struttura a gradini.

27

## Colonne del nucleo

Per trasformatori di piccola potenza (fino a qualche kVA), la forma delle colonne è quadrata o rettangolare: i conduttori vengono avvolti attorno alle colonne, con l'interposizione di uno strato isolante, e le bobine hanno la stessa forma delle colonne del nucleo. In questo modo, a parità di area, la lunghezza di ogni spira è la minima possibile e quindi risulta minima la resistenza ohmica dell'avvolgimento.

Per trasformatori di potenza più elevata, gli avvolgimenti sono di forma circolare per:

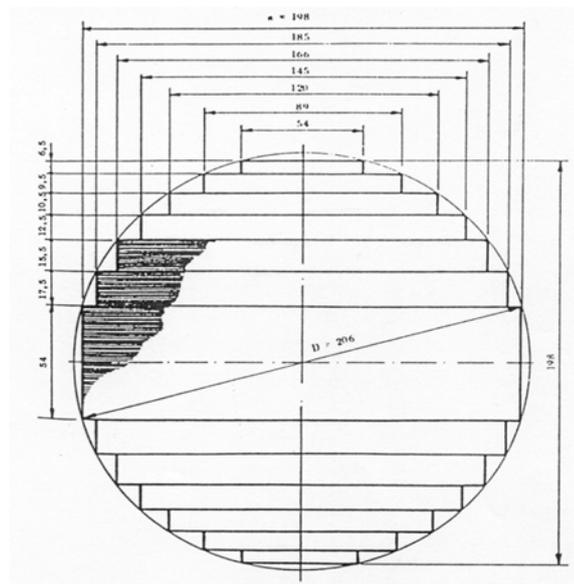
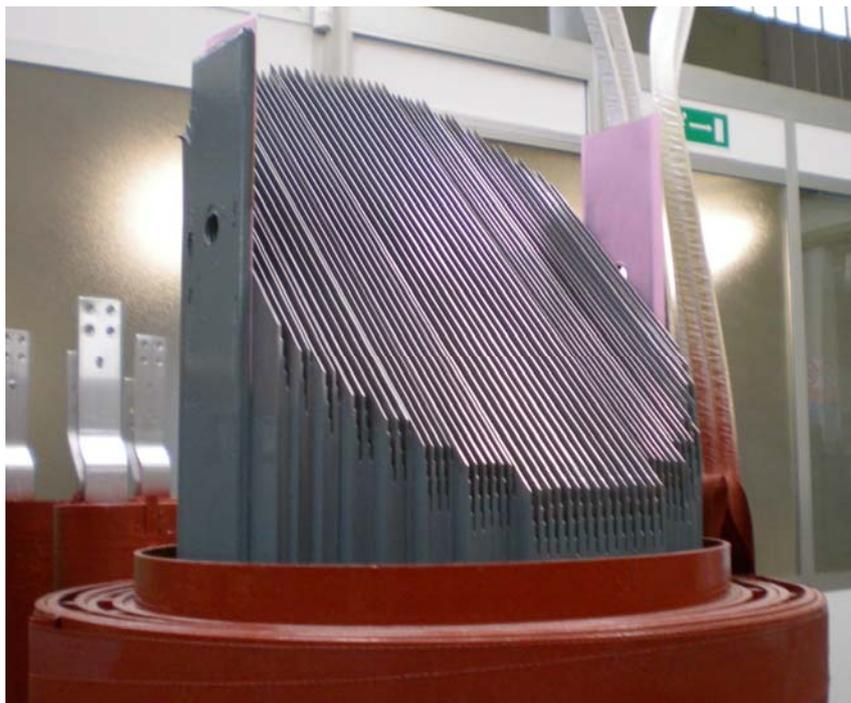
- assicurare una migliore resistenza agli sforzi elettrodinamici;
- ridurre i costi di costruzione;
- semplificare i problemi di isolamento.

Perciò, si cerca di ottenere una sezione che approssima quella circolare anche per le sezioni delle colonne dei nuclei, tramite:

- sezione a croce per trasformatori di media potenza;
- sezione a gradini per trasformatori di elevata potenza.

28

## Colonne del nucleo



29

## Colonne del nucleo e avvolgimenti

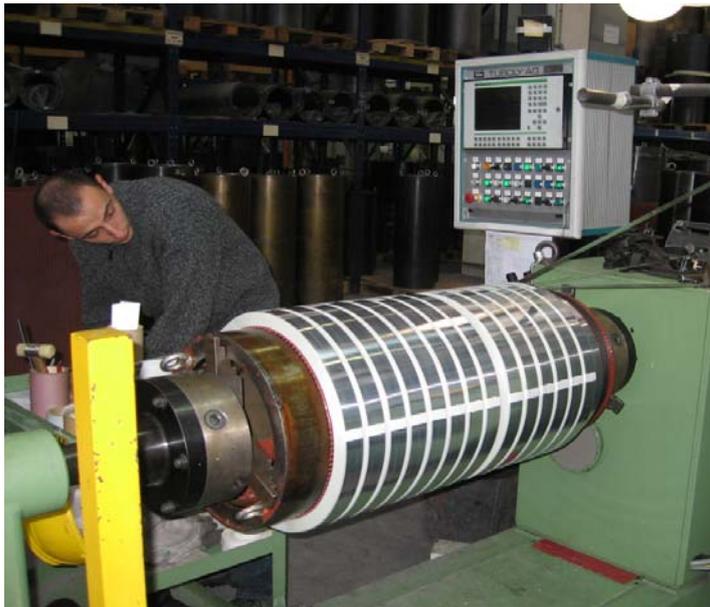
Gli avvolgimenti sono realizzati in rame o in alluminio.

L'avvolgimento viene realizzato con l'ausilio di speciali macchine bobinatrici che avvolgono il conduttore su un apposito supporto a forma di cilindro cavo, che verrà poi infilato su una colonna del trasformatore.



30

## Colonne del nucleo e avvolgimenti



31

## Avvolgimenti

Trascurando le perdite di potenza e le cadute di tensione dovute al carico:

$$V_1 I_1 = V_2 I_2$$

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2}$$



- ✚ L'avvolgimento di alta tensione (AT) sarà formato da più spire di sezione minore (perché percorse da corrente minore): conduttori a filo o a piattina.
- ✚ L'avvolgimento di bassa tensione (BT) sarà formato da meno spire di sezione maggiore (perché percorse da corrente maggiore): conduttori a piattina o con struttura "a nastro" (poche spire di grande sezione).

32

## Avvolgimenti

La disposizione degli avvolgimenti BT e AT attorno alle colonne del nucleo è determinata da vari fattori:

■ **accoppiamento magnetico** tra primario e secondario: la posizione reciproca degli avvolgimenti deve determinare il massimo concatenamento fra di essi  $\Rightarrow$  limitare il più possibile il flusso magnetico disperso. Per questo motivo, i due avvolgimenti BT e AT di una stessa fase vengono sempre disposti su una stessa colonna.

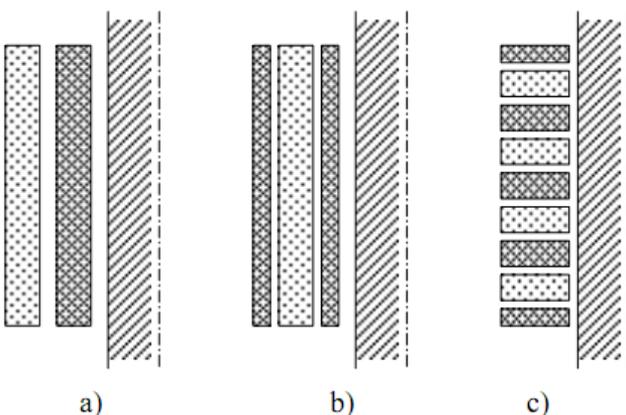
■ **necessità di isolamento** tra avvolgimenti e nucleo magnetico e tra avvolgimento primario e secondario;

■ **necessità di raffreddamento**: nei trasformatori di elevata potenza, occorrono canali di raffreddamento verticali, paralleli alla colonna, per consentire la circolazione del fluido refrigerante per smaltire il calore prodotto dalle perdite nel nucleo e nei conduttori, in modo da contenere la temperatura entro livelli che non compromettano la tenuta degli isolanti.

## Avvolgimenti

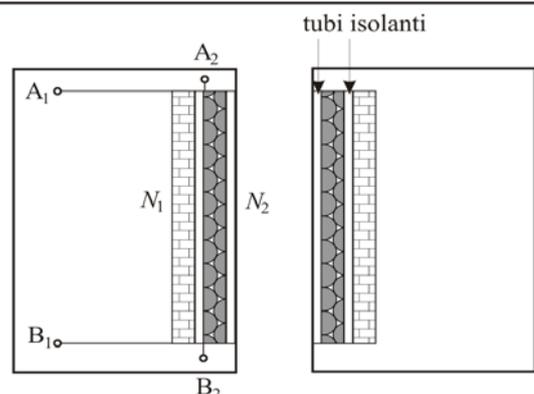
Esistono sostanzialmente tre tipi di disposizione degli avvolgimenti:

- concentrico (più diffuso);
- doppio concentrico;
- alternato.



### AVVOLGIMENTO CONCENTRICO:

ciascun avvolgimento occupa tutta la lunghezza della colonna; l'avvolgimento BT è vicino al nucleo, quello AT è esterno.



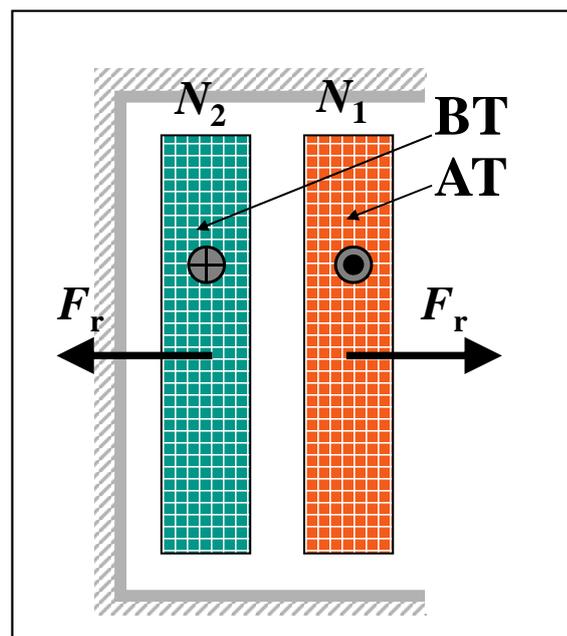
## Avvolgimento concentrico

L'avvolgimento concentrico è il più diffuso perché presenta i seguenti vantaggi:

- facilità di isolamento (con tubi isolanti);
- facilità di circolazione del fluido refrigerante (con canali verticali);
- semplicità di costruzione.

Gli sforzi elettrodinamici, dovuti alle forze di Lorentz, sono:

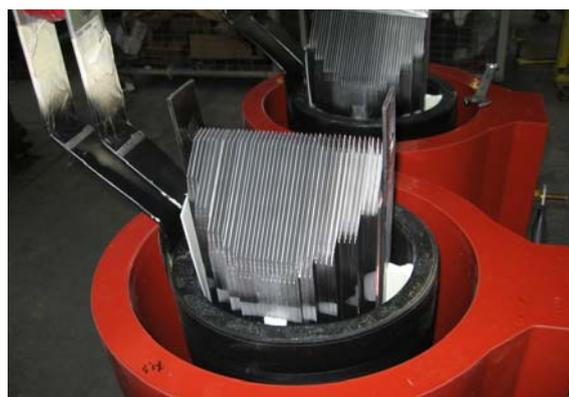
- ◆ di compressione dell'avvolgimento BT sul nucleo;
- ◆ di dilatazione radiale dell'avvolgimento AT verso l'esterno.



35

## Trasformatori in resina

Un tipo particolare di avvolgimento concentrico è quello **inglobato in resina**, impiegato nel campo delle medie potenze (fino a 10 MVA): gli avvolgimenti sono costituiti da due cilindri in cui i conduttori sono inglobati in una miscela a base di resina epossidica, avente buone caratteristiche isolanti e di resistenza al fuoco, che funge sia da isolamento sia da rivestimento esterno.



I vantaggi che offre il trasformatore in resina rispetto a quello in olio sono la manutenzione praticamente nulla e il minor impatto ambientale, in quanto sono ridotti al minimo i rischi di incendio e di inquinamento. L'avvolgimento è normalmente realizzato in nastro di alluminio perché il suo coefficiente di dilatazione termica è molto simile a quello della resina, per cui, al variare della temperatura della macchina, le tensioni meccaniche che si generano sono molto limitate.

36

## Trasformatori in olio minerale

I conduttori usati nella costruzione degli avvolgimenti dei trasformatori raffreddati in olio sono generalmente in rame e isolati con carta. Una volta immerso in olio minerale, il trasformatore si presenta all'interno di un cassone (questo è un trasformatore da 20 MVA, 132/15 kV, peso totale 43 t, peso olio 13 t).



conservatore dell'olio

raffreddamento ONAN

radiatori

37

## Raffreddamento dei trasformatori

Il raffreddamento dei trasformatori è necessario per asportare il calore prodotto a causa delle perdite di potenza, al fine di evitare che la temperatura della macchina superi il valore ammissibile legato alla classe di isolamento.

Riguardo il **tipo di fluido refrigerante utilizzato per raffreddare direttamente gli avvolgimenti e il nucleo (parti attive)**, la CEI 14-4/2 distingue i trasformatori in:

- **a secco**, in cui fluido refrigerante è l'aria (es. trasformatori inglobati in resina);
- **immersi in liquido isolante**, le cui parti attive (nucleo e avvolgimenti) sono immerse in liquido isolante (es. olio minerale), contenuto in un cassone e avente la duplice funzione di isolante e fluido refrigerante. In questo caso, vi è la circolazione del liquido isolante all'interno del cassone e di un altro fluido refrigerante (aria o acqua) all'esterno.

Per applicazioni speciali, esistono anche trasformatori a secco con un altro fluido refrigerante all'esterno (settore navale) e trasformatori isolati in SF<sub>6</sub>.

38

## Sigle previste dalle Norme CEI per il raffreddamento dei trasformatori

1 <sup>a</sup> lettera	2 <sup>a</sup> lettera	3 <sup>a</sup> lettera	4 <sup>a</sup> lettera
Mezzo refrigerante a contatto con gli avvolgimenti		Mezzo refrigerante a contatto con il sistema esterno di raffreddamento	
Natura del mezzo	Tipo di circolazione	Natura del mezzo	Tipo di circolazione

Mezzo refrigerante	Simbolo
Olio minerale o liquido isolante con punto di infiammabilità $\leq 300$ °C	O
Liquido isolante con punto di infiammabilità $>$ di 300 °C	K
Liquido isolante con punto di infiammabilità non misurabile	L
Acqua	W
Aria	A

Tipo di circolazione	Simbolo
Naturale	N
Forzata	F
Forzata e guidata	D

## Raffreddamento dei trasformatori

A seconda del tipo di circolazione dei fluidi refrigeranti, si possono avere vari modi di raffreddamento, identificati con le opportune sigle. Alcuni esempi sono:

⊗ **AN (Air Natural)**: trasformatori a secco (in aria o in resina) con circolazione naturale dell'aria, attraverso moti convettivi naturali (potenze fino a qualche MVA);

⊗ **AF (Air Forced)**: la circolazione dell'aria avviene tramite ventole, che aumentano l'efficacia del raffreddamento (in caso di guasto al sistema di raffreddamento, si ha però un rapido surriscaldamento della macchina);

⊗ **AFWF**: trasformatori in aria o in resina raffreddati con una combinazione di aria forzata e acqua forzata (potenze fino a 15 MVA, in aria, e 25 MVA, in resina).



## Raffreddamento dei trasformatori

☉ **ONAN (Oil Natural Air Natural)**, la circolazione dell'olio all'interno del cassone e dell'aria all'esterno avvengono per moti convettivi naturali dei due fluidi. Occorre che la superficie di scambio termico (superficie del cassone) sia piuttosto estesa: si ottiene costruendo il cassone di forma ondulata o con fasci tubieri esterni per il passaggio dell'olio (potenze fino a decine di MVA);

☉ **ONAF (Oil Natural Air Forced)**: la circolazione dell'aria è attivata tramite ventole.

☉ **OFAF (Oil Forced Air Forced) e ODAF**: la circolazione dell'olio all'interno del cassone avviene tramite pompe, quella dell'aria all'esterno tramite ventole. All'esterno del cassone sono presenti dei veri e propri scambiatori di calore olio-aria (per trasformatori di elevata potenza, centinaia di MVA);

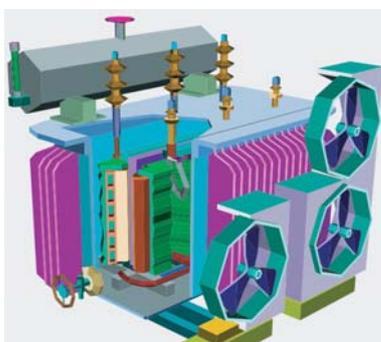
## Raffreddamento dei trasformatori

Trasformatore OFAF, 370 MVA, 20/380 kV, utilizzato in una centrale termoelettrica

Isolatore passante

Conservatore dell'olio

Aerotermi



## Raffreddamento dei trasformatori

☉ **OFWF (Oil Forced Water Forced) e ODWF**: è il metodo di raffreddamento più energico, utilizzato per trasformatori di elevatissima potenza. Sono presenti scambiatori olio-acqua e la circolazione dei due fluidi è attivata mediante pompe.

La pressione dell'olio deve essere più elevata di quella dell'acqua, per fare in modo che, in caso di guasto, sia l'olio a uscire e non l'acqua a entrare (basta una piccola percentuale di acqua per comprometterne la tenuta isolante).

Scambiatori di calore



43

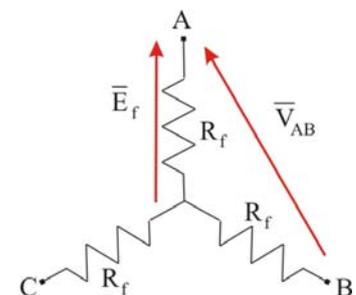
## Collegamenti del trasformatore trifase

La struttura trifase degli avvolgimenti primari e secondari del trasformatore consente diversi modi di connessione degli stessi alla rete di alimentazione e al carico.

Le due forme di connessione usate più frequentemente sono quelle denominate rispettivamente stella (simbolo Y per il primario e y per il secondario) e triangolo (simbolo D o d).

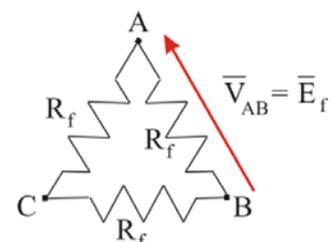
Se il collegamento è a stella:

- ✓ le tensioni concatenate sono uguali a  $\sqrt{3}$  volte le tensioni di fase (tensioni ai capi di ciascuna bobina),
- ✓ le correnti di linea sono uguali alle correnti di fase.



Se il collegamento è a triangolo:

- ✓ le tensioni concatenate sono uguali alle tensioni di fase,
- ✓ le correnti di linea sono uguali a  $\sqrt{3}$  volte le correnti di fase.



44

## Collegamenti del trasformatore trifase

A livello costruttivo, la connessione a stella è preferibile rispetto alla connessione a triangolo negli avvolgimenti a tensione molto elevata (centinaia di kV).

Infatti, nel collegamento a stella, a parità di tensione concatenata, la tensione sulla bobina è  $\sqrt{3}$  volte inferiore rispetto a quella su una bobina a triangolo.

Questo consente di ridurre l'isolamento e di sfruttare meglio lo spazio a disposizione per l'avvolgimento.

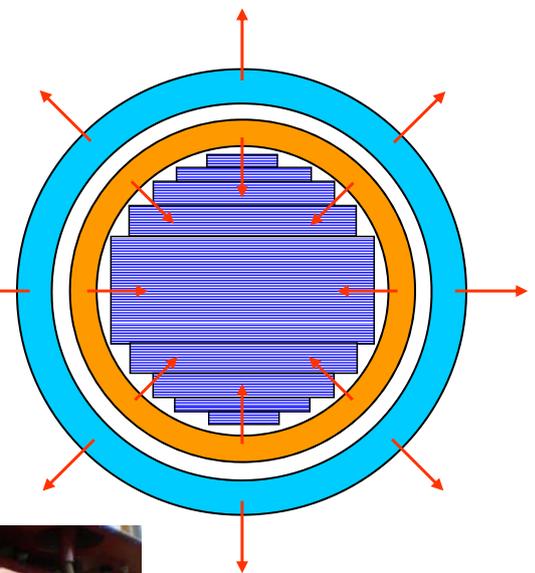
La connessione a stella è inoltre necessaria quando il circuito collegato a quell'avvolgimento è a 4 fili (3 fasi + neutro): in questo caso, il collegamento deve essere a stella con neutro accessibile ( $y_n$ ).

Per questo motivo, i trasformatori di distribuzione media/bassa tensione (MT/BT, ad es. 15 kV/400 V), che devono alimentare anche carichi monofase, presentano la configurazione  $Dy_n$  (triangolo sul lato MT, stella sul lato BT), in modo che il neutro sia disponibile sul lato bassa tensione.

45

## Forze radiali

Le forze di Lorentz sono proporzionali al quadrato della corrente: nel caso di corto circuito, la corrente può arrivare anche a 20 volte quella nominale e di conseguenza gli sforzi elettrodinamici possono arrivare anche a 400 volte quelli nominali, con effetti deformanti (e distruttivi) sugli avvolgimenti.



46