



PRINCIPI E ASPETTI COSTRUTTIVI DEI TRASFORMATORI

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 (a meno di piccole distorsioni).

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

2

L. Frosini

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 (10÷20 kV), trasmetterla alla tensione più economica per i sistemi di trasmissione (220÷380 kV), distribuirli a tensioni intermedie (150÷132 kV, 20÷15 kV) e utilizzarla alla tensione più adatta per i dispositivi utilizzatori (ad es. 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

L. Frosini

Tensione indotta da un flusso magnetico sinusoidale

Dato un circuito elettrico di N spire percorso da corrente i variabile sinusoidalmente nel tempo con frequenza f , per la legge di Faraday-Lenz si ha:

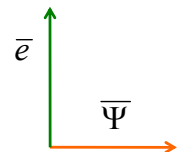
corrente i variabile sinusoidalmente \rightarrow flusso magnetico concatenato Ψ variabile sinusoidalmente \rightarrow f.e.m. autoindotta e variabile sinusoidalmente con la stessa f del flusso magnetico e della corrente

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

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

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

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



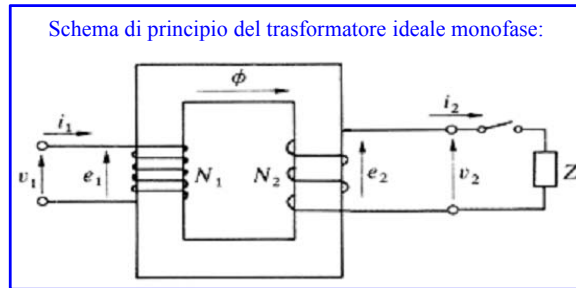
4

Principi alla base del trasformatore

Quindi, se si alimenta uno dei due avvolgimenti (primario) con una tensione alternata, nell'avvolgimento scorre una corrente i_1 e nel nucleo si genera un flusso magnetico alternato Φ , 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 interamente 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 :

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

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

RAPPORTO DI TRASFORMAZIONE

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

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

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

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: $N_1\bar{I}_1 + N_2\bar{I}_2 = \mathfrak{R}_m\bar{\Phi}$

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:

$$N_1\bar{I}_1 + N_2\bar{I}_2 = \mathfrak{R}_m\bar{\Phi} = N_1\bar{I}_{0\mu}$$

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.

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

$$\bar{I}'_2 = -\frac{N_2}{N_1}\bar{I}_2$$

È una corrente fittizia, definita come "corrente secondaria riportata a primario".

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.

7

Corrente magnetizzante

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

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

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

reattanza magnetizzante

induttanza magnetizzante

Nella realtà, la corrente a vuoto è quella assorbita dall'avvolgimento primario quando questo viene collegato alla rete elettrica di alimentazione e il secondario non è collegato a nessun carico: si parla di energizzazione del trasformatore e la corrente considerata è quella che si ha a regime, dopo un breve transitorio di inserzione, che presenta una corrente decisamente più elevata.

8

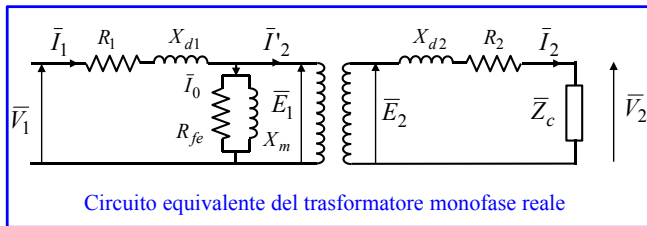
Perdite nel ferro

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 Φ 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 alla reattanza di magnetizzazione:



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

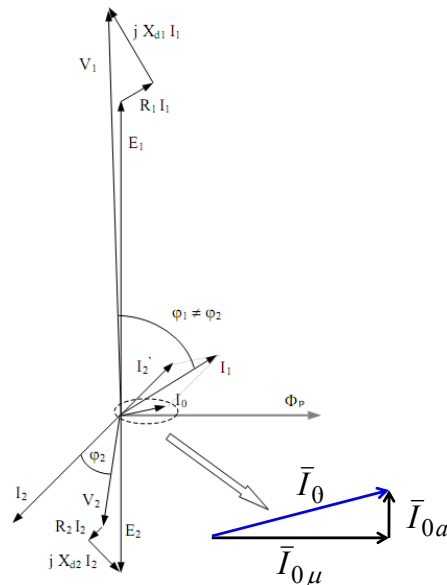
Corrente a vuoto

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} :

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

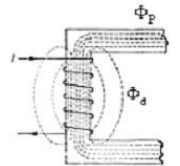
Tale corrente viene denominata **corrente a vuoto I_0** e risulta di piccola entità (a regime) rispetto alle correnti I_1 e I_2 di normale utilizzo della macchina.

Esempio di diagramma vettoriale a carico



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: $\Psi_1 = N_1(\Phi + \Phi_{1d})$

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

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

Flussi dispersi

Il fasore della f.e.m. indotta totale a primario può essere espresso come:

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

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:

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

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

13

Osservazioni sul circuito equivalente

- La corrente a vuoto I_0 risulta generalmente di 2÷3 ordini di grandezza inferiore alle correnti a 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 ΔV_1 e secondarie ΔV_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 (N.B.: **le reattanze sono direttamente proporzionali alle permeabilità magnetiche dei relativi percorsi**).

$$\boxed{L = \frac{N^2}{\mathfrak{R}}}$$

$$\boxed{\mathfrak{R} = \frac{l}{\mu A}}$$

14

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_{1vuoto} assorbita dal trasformatore in queste condizioni è molto piccola rispetto alle normali correnti di carico ($I_{1vuoto} = I_0 \cong 0$).

15

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 Φ .
- 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:

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

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

16

Osservazioni sul circuito equivalente


■ Lo studio del funzionamento del trasformatore tramite il circuito equivalente permette di concentrare le non linearità in un solo ramo, quello costituito dalla reattanza di magnetizzazione X_m , percorso dalla corrente magnetizzante $I_{0\mu}$.


Inoltre, visto l'elevato valore assunto dal parametro X_m , il circuito equivalente consente di evidenziare le **condizioni di funzionamento del trasformatore in cui l'influenza dei fenomeni di saturazione magnetica è fondamentale (funzionamento a vuoto)** e **quelle in cui tale influenza è irrilevante (funzionamento a carico)**.

17

Nuclei magnetici dei trasformatori

Oltre a ridurre al minimo le perdite nel ferro, i criteri costruttivi dei nuclei dei trasformatori devono ridurre al minimo la corrente magnetizzante necessaria per ottenere il flusso magnetico desiderato:

$NI = \mathfrak{R}\Phi$  occorre che sia minima la riluttanza del nucleo magnetico


$\mathfrak{R} = \frac{l}{\mu S}$  occorre che sia:

- elevata la permeabilità magnetica $\mu \Rightarrow$ nuclei ferromagnetici;

- elevata la sezione S normale alle linee di flusso;

- ridotta la lunghezza l delle linee di flusso;

- ridotta al minimo la presenza di traferri (strati d'aria o di materiale isolante che interrompono, per ragioni costruttive, la continuità del nucleo ferromagnetico).

 Per ridurre al minimo la presenza di traferri, si agisce attraverso opportune tecniche di assemblaggio dei nuclei magnetici.

18

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



19

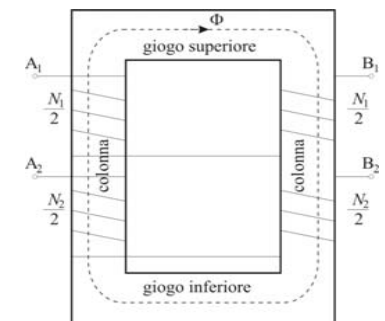
Nucleo a colonne per trasformatori monofase

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

Il flusso Φ prodotto dagli avvolgimenti percorre tutti i tratti del nucleo.

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

a colonne



N.B.: Le spire di bassa tensione e quelle di alta tensione sono avvolte le une all'interno delle altre, attorno alla colonna del nucleo magnetico, concentriche le une con le altre (e non le une sopra alle altre, come sembrerebbe dai disegni di queste pagine).

20


Nucleo a mantello per trasformatori monofase

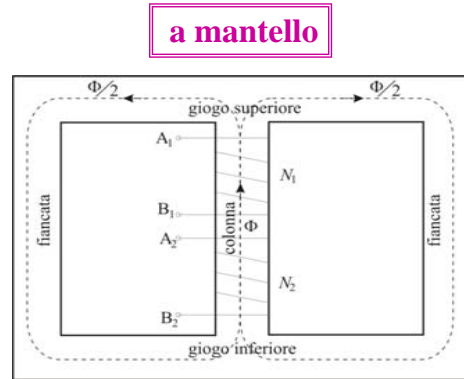
Tutte le spire sono avvolte attorno alla colonna centrale.

Il flusso Φ 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.

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

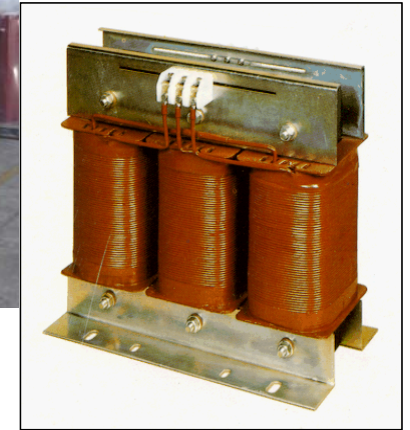


21

Nucleo a tre colonne per trasformatori trifase



Trasformatore a secco isolato in aria



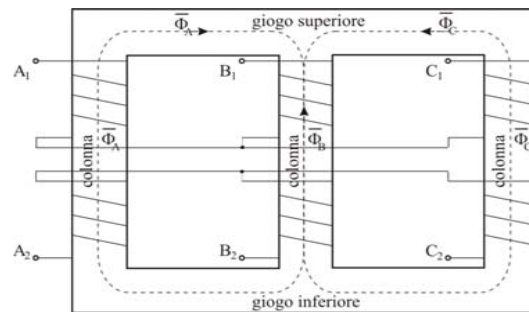
Trasformatori a secco isolati in resina 15 kV/400 V
potenze 1,6 MVA e 2 MVA

22

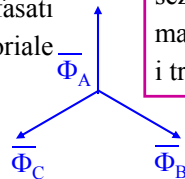
Nucleo a tre colonne per trasformatori trifase

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° (la somma vettoriale dei tre flussi è sempre nulla).



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



23

Nucleo a tre colonne per trasformatori trifase

Nei trasformatori trifase a tre colonne i flussi nelle tre colonne devono avere uguale il valore massimo.

Tuttavia, mentre il percorso magnetico del flusso Φ_B è costituito dalla sola colonna centrale, il percorso magnetico dei flussi Φ_A e Φ_C comprende anche metà di ciascun giogo.

Pertanto, la riluttanza del nucleo magnetico percorso dal flusso Φ_B sarà inferiore a quella dei nuclei percorsi dai flussi Φ_A e Φ_C e quindi sarà inferiore la corrente magnetizzante relativa alla colonna centrale.

Tuttavia, questo squilibrio di correnti si manifesta solo nel funzionamento a vuoto, poiché nel funzionamento a carico le correnti magnetizzanti risultano trascurabili rispetto alle correnti primarie, e queste risultano equilibrate (o meno) a seconda che sia equilibrato (o squilibrato) il carico sulle tre fasi secondarie.

24

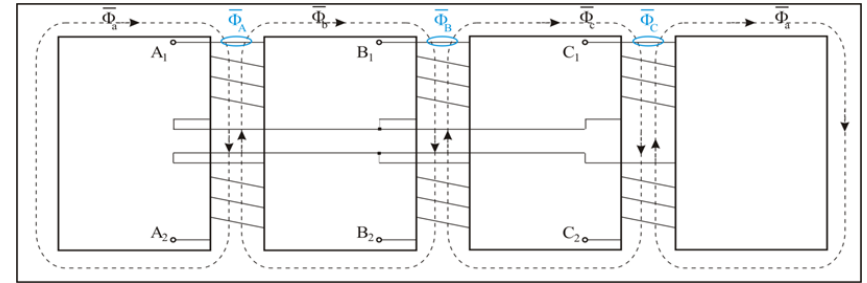
Nucleo a 5 colonne per trasformatori trifase



25

Nucleo a 5 colonne per trasformatori trifase

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



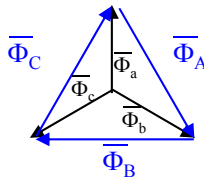
In questo modo, una parte dei flussi prodotti da ciascuna fase si richiude anche attraverso le due colonne laterali.

I flussi prodotti da ciascuna fase (Φ_A , Φ_B , Φ_C) possono essere visti come composti dai flussi che percorrono ciascun anello chiuso (Φ_a , Φ_b , Φ_c).

26

Nucleo a 5 colonne per trasformatori trifase

$$\begin{cases} \bar{\Phi}_A = \bar{\Phi}_b - \bar{\Phi}_a \\ \bar{\Phi}_B = \bar{\Phi}_c - \bar{\Phi}_b \\ \bar{\Phi}_C = \bar{\Phi}_a - \bar{\Phi}_c \end{cases}$$



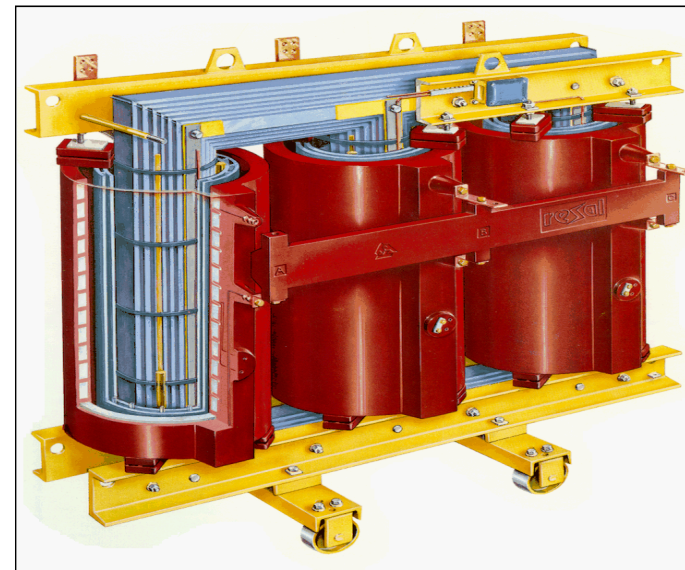
Il nucleo a 5 colonne può essere costruito in modo tale che i flussi Φ_a , Φ_b , Φ_c che percorrono gli anelli chiusi formino una stella simmetrica.

Di conseguenza, questi flussi (Φ_a , Φ_b , Φ_c) risultano pari a $1/\sqrt{3}$ volte ($\cong 0,58$) i flussi prodotti da ciascuna fase (Φ_A , Φ_B , Φ_C).

Quindi, anche le sezioni dei gioghi saranno pari al 58% della sezione delle colonne.

27

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:

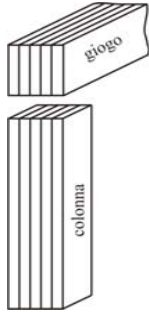
- ✚ lamierini ordinari (materiale isotropo);
- ✚ lamierini a cristalli orientati (materiale anisotropo).

28

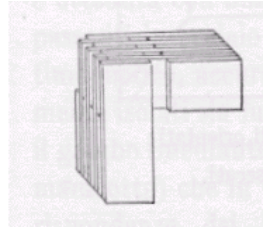
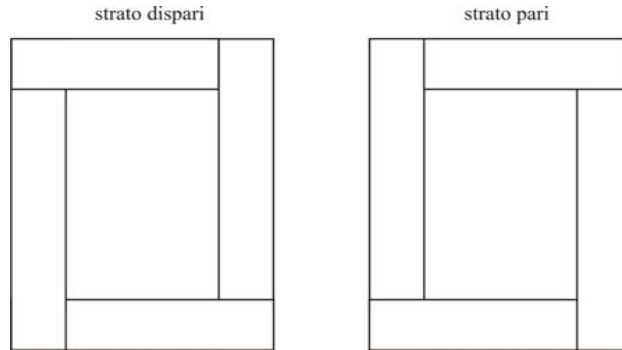
Giunti del nucleo (materiale isotropo)

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

giunti affacciati



giunti intercalati



29

Giunti del nucleo (materiale isotropo)

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: traferro equivalente di circa 0,1 mm per ciascun giunto.

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: traferro equivalente di circa 0,03 mm per ciascun giunto.



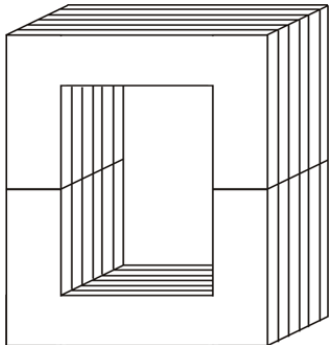
i **giunti intercalati** riducono la corrente magnetizzante del trasformatore e il ronzo causato dalle forze elettromagnetiche sui lamierini.

30

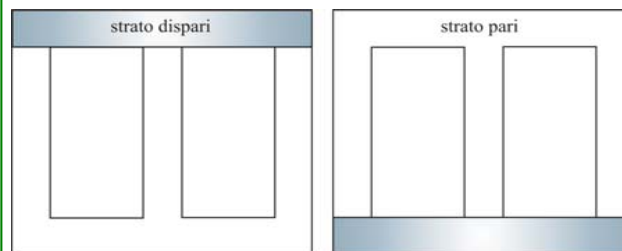
Giunti del nucleo (materiale isotropo)

Per piccoli trasformatori monofase, si possono ottenere:

nuclei a **colonne** a **giunti affacciati** con lamierini a "C"



nuclei a **mantello** a **giunti intercalati** con lamierini a "E" e a "I"

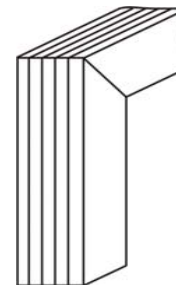


31

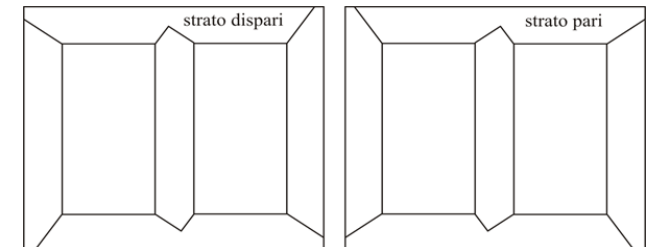
Giunti del nucleo (materiale anisotropo)

Nel caso in cui si utilizzino lamierini a cristalli orientati (materiale anisotropo), sono da evitare i gioghi a 90°, perché aumenterebbero le perdite nel ferro, perciò si possono avere:

giunti affacciati con angoli di 45°

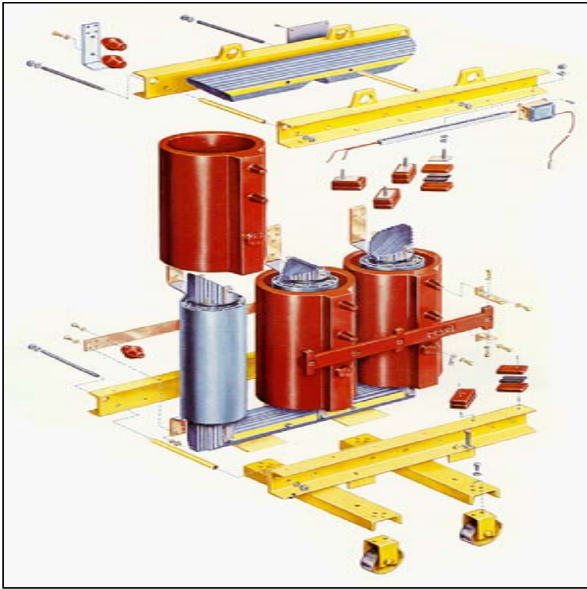


giunti intercalati con angoli di 35° e 55° o con angoli di 45° con il metodo step-lap



32

Colonne del nucleo



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

Coefficiente di utilizzazione:

$$k_u = \frac{S_{colonna}}{S_{cerchio}}$$

33

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:

- assicura una migliore resistenza agli sforzi elettrodinamici;
- riduce i costi di costruzione;
- semplifica i problemi di isolamento.

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

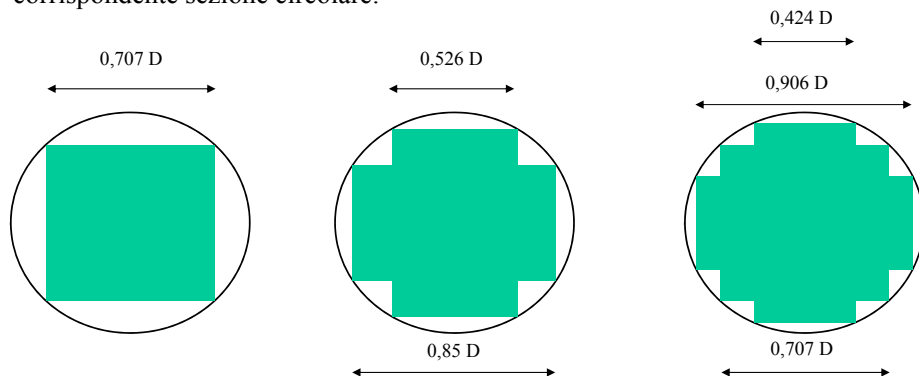
- sezione a croce per trasformatori di media potenza;
- sezione a gradini per trasformatori di elevata potenza.

34

Colonne del nucleo

Il problema consiste nel massimizzare la sezione della colonna, una volta fissato il numero di gradini e il diametro del cerchio circoscritto.

Le dimensioni dei gradini delle colonne sono normalizzate rispetto al diametro D della corrispondente sezione circolare.

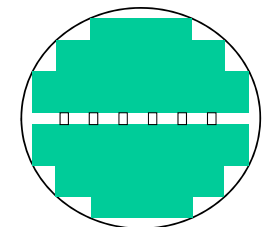


35

Colonne del nucleo

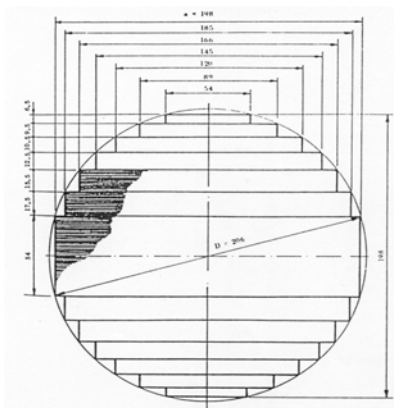
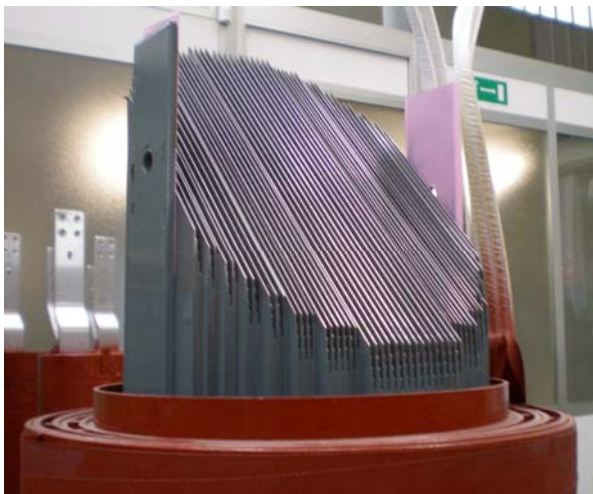
Per elevate dimensioni delle colonne e dei gioghi, la costruzione del nucleo deve prevedere la presenza di canali di raffreddamento per la circolazione del fluido refrigerante, distanziando opportunamente i pacchi di lamierini.

Questo provvedimento deve essere adottato quando la potenza del trasformatore supera certi valori (diverse centinaia di kVA per i trasformatori in aria, diverse migliaia di kVA per quelli in olio).



36

Colonne del nucleo

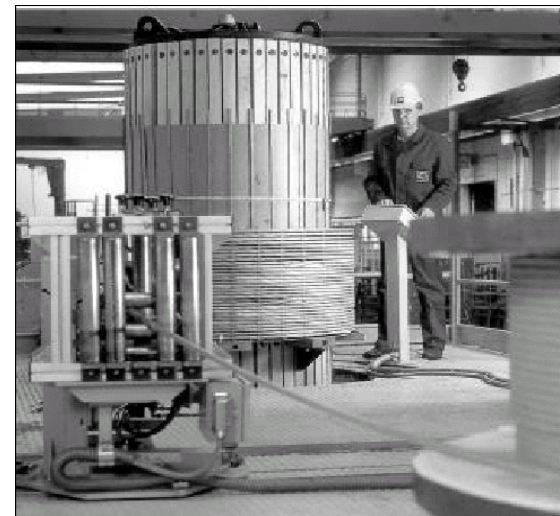


37

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.



38

Colonne del nucleo e avvolgimenti

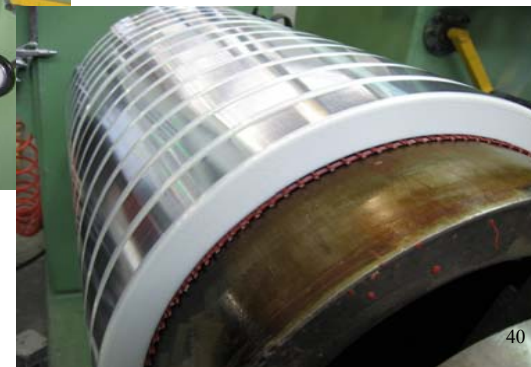


39

Avvolgimenti



Avvolgimento realizzato a dischi (o a bobine separate) a 15 kV in foglio di alluminio isolato da un doppio strato di poliestere



40

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).

41

Avvolgimenti

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

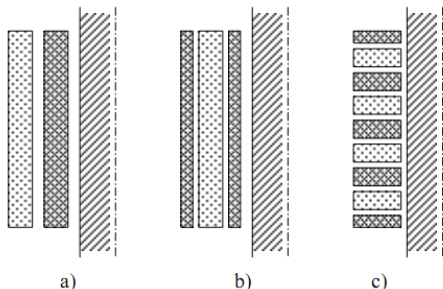
- **accoppiamento magnetico** tra primario e secondario: la posizione reciproca degli avvolgimenti deve determinare il massimo concatenamento fra di essi \Rightarrow limitare il più possibile il flusso magnetico disperso. Per questo motivo, i due avvolgimenti BT e AT di una stessa fase vengono sempre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

42

Avvolgimenti

Esistono sostanzialmente tre tipi di disposizione degli avvolgimenti:

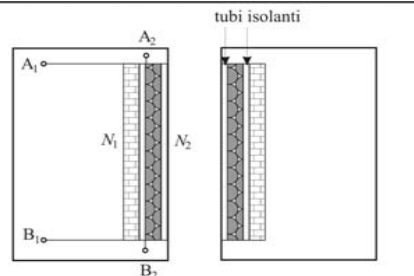
- concentrico (più diffuso);
- doppio concentrico;
- alternato.



43

AVVOLGIMENTI CONCENTRICI:

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



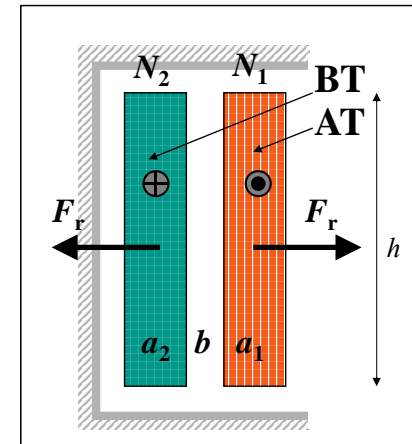
Avvolgimento concentrico

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 svantaggi sono dati da:

- maggiore reattanza di dispersione;
- maggiori sforzi elettrodinamici: le forze sugli avvolgimenti sono di dilatazione radiale dell'avvolgimento AT verso l'esterno e di compressione dell'avvolgimento BT sul nucleo.



➤ Sono necessari buoni ancoraggi per gli avvolgimenti.

44

Avvolgimento concentrico

Si può dimostrare (e lo vedremo in una lezione successiva) e che la reattanza di dispersione per un avvolgimento concentrico vale:

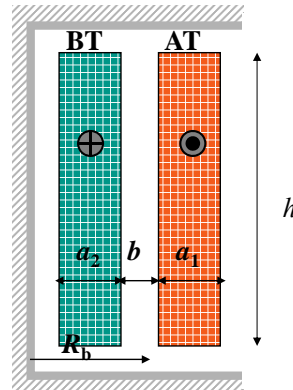
$$X_d = 2\pi f \mu_0 N^2 \frac{p \cdot c}{h} = \omega \mu_0 N^2 \frac{2\pi R_b}{h} \left(b + \frac{a_1 + a_2}{3} \right)$$

p è il perimetro medio dell'avvolgimento:

$$p = 2\pi R_b$$

c è la distanza elettromagnetica dell'avvolgimento:

$$c = b + \frac{a_1 + a_2}{3}$$

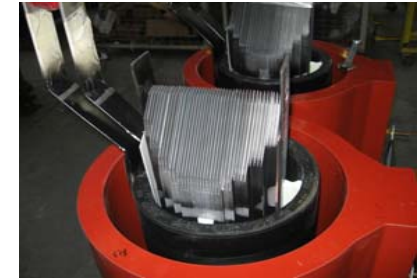


45

Avvolgimento concentrico

L'avvolgimento AT a dischi (o a bobine separate) è utilizzato per avere una tensione tra bobine dello stesso avvolgimento inferiore a qualche kV (da non confondere con l'avvolgimento alternato).

Un tipo particolare di avvolgimento concentrico è quello **inglobato in resina**, impiegato nel campo delle medie potenze (fino a 10 MVA circa): 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.



46

Avvolgimento inglobato in resina

Il trasformatore in resina è un particolare tipo di trasformatore a secco, ossia una macchina che non ha le parti attive immerse in un liquido isolante.

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.

L'avvolgimento in AT è a bobine separate: in questo modo sono ridotti al minimo i gradienti di tensione interni, con scarsa possibilità di innesco di scariche parziali.

La particolarità costruttiva di avere la AT in più nastri di alluminio e la BT in un foglio di alluminio diminuisce gli sforzi assiali in un eventuale cortocircuito.

47

Avvolgimento inglobato in resina

L'avvolgimento in BT è realizzato con un unico nastro di alluminio di altezza identica all'avvolgimento in AT: il numero di spire equivale al numero di "giri" di lamina attorno alla colonna (ogni spira, che occupa tutta l'altezza dell'avvolgimento, è un "giro" attorno alla colonna).

Nell'avvolgimento in AT il numero di spire totali viene equamente suddiviso nei vari dischi (es. 1000 spire totali, 10 dischi, ogni disco avrà 100 spire): il primo disco avrà un inizio, che equivale all'inizio dell'intero avvolgimento, e una fine, che viene collegata con saldatura al principio del secondo disco e così via (quindi i dischi sono tutti in serie tra loro).

LV windings (LV = Low Voltage)

HV windings (HV = High Voltage)



48

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

Avvolgimento doppio concentrico

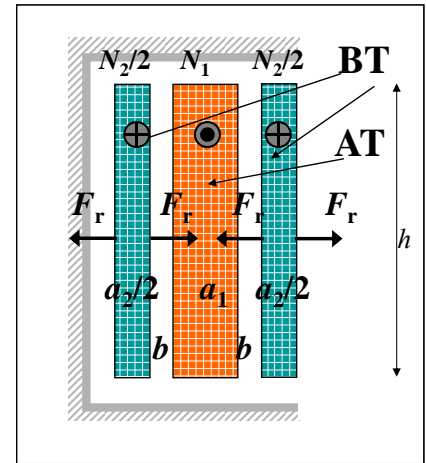
Nell'avvolgimento doppio concentrico, l'avvolgimento BT è diviso in due metà, una disposta vicino al nucleo e l'altra all'esterno.

Sono necessari due strati di isolante tra gli avvolgimenti, al posto di uno solo del caso concentrico semplice.

Il raffreddamento è realizzato tramite canali verticali.

Le reattanze di dispersione sono circa un quarto di quelle con avvolgimento concentrico semplice.

Anche gli sforzi elettrodinamici sono circa un quarto di quelli con avvolgimento concentrico semplice.

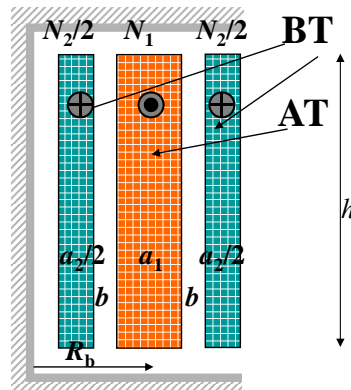


Sono comunque necessari buoni ancoraggi per gli avvolgimenti.

Avvolgimento doppio concentrico

Si può dimostrare che la reattanza di dispersione per un avvolgimento doppio concentrico vale (ma non lo dimostreremo in questo corso):

$$X_d = \omega\mu_0 \frac{N^2}{2} \frac{2\pi R_b}{h} \left(b + \frac{a_1 + a_2}{6} \right)$$



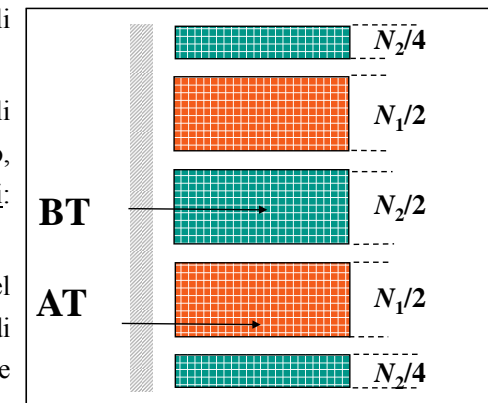
Avvolgimento alternato (a dischi)

Nell'avvolgimento alternato, gli avvolgimenti BT e AT sono suddivisi in un certo numero di bobine, disposte attorno alle colonne, isolate tra loro e verso il nucleo.

Come isolamento, è il più sfavorito, perché necessita di più strati di isolante tra gli avvolgimenti.

Il raffreddamento è più difficoltoso, i canali devono avere sezioni maggiori. In compenso, gli sforzi elettrodinamici sono molto attenuati: sono quindi richiesti ancoraggi meno onerosi.

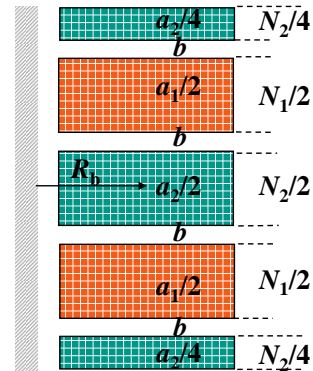
L'avvolgimento alternato è conveniente nel caso di trasformatori ad elevate intensità di corrente (es. trasformatore corazzato, che vedremo più avanti).



Avvolgimento alternato

Si può dimostrare che la reattanza di dispersione per un avvolgimento alternato vale (ma non lo dimostreremo in questo corso):

$$X_d = \omega\mu_0 \frac{N^2}{4} \frac{2\pi R_b}{h} \left(b + \frac{a_1 + a_2}{6} \right)$$



53

Raffreddamento dei trasformatori

Il raffreddamento dei trasformatori è necessario per asportare il calore prodotto a causa delle perdite di potenza (negli avvolgimenti e nel ferro), al fine di evitare che la temperatura della macchina superi il valore ammissibile legato alla classe termica 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 (usati ad es. nel settore navale) e trasformatori isolati in SF6.

54

Sigle previste dalle Norme CEI per il raffreddamento dei trasformatori

| 1ª lettera | 2ª lettera | 3ª lettera | 4ª 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 ≤ 300 °C | O |
| Liquido isolante con punto di infiammabilità > 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 |

55

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).



56

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 con fasci tubieri esterni (radiatori) per il passaggio dell'olio (potenze fino a decine di MVA);

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

@ **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);

57

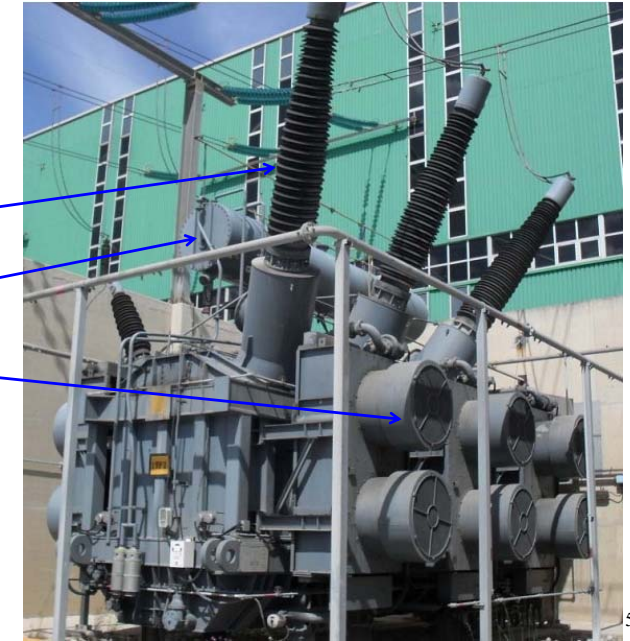
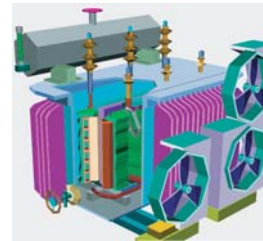
Raffreddamento dei trasformatori

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

Isolatore passante

Conservatore dell'olio

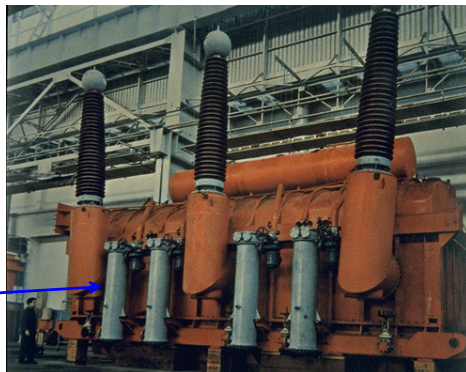
Aerotermini



58

Raffreddamento dei trasformatori

@ **OFWF (Oil Forced Water Forced) e ODWF**: è il metodo di raffreddamento più energetico, utilizzato generalmente (ma non solo) per trasformatori di elevata potenza. Sono presenti scambiatori di calore olio-acqua e la circolazione dei due fluidi è attivata mediante pompe.



scambiatori di calore



59

Raffreddamento OFWF dei trasformatori

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

Questo tipo di trasformatore non presenta elementi per la dissipazione, quali i radiatori, quindi offre il vantaggio di una struttura compatta, riducendo non solo le dimensioni di ingombro, ma anche i pesi.

Il cassone è dotato di uno (o più) scambiatori di calore olio-acqua, a piastra oppure a fascio tubiero.

Lo scambiatore, collegato ad un circuito idraulico per il ricircolo dell'acqua di raffreddamento, garantisce che l'olio contenuto all'interno della cassa sia mantenuto ad una temperatura ideale per il corretto funzionamento della macchina. Lo scambiatore è dotato anche di una pompa che permette la circolazione dell'olio in maniera forzata.

60

Raffreddamento dei trasformatori

Questo tipo di trasformatore è utilizzato in ambienti dove risulta non economico e non pratico lo smaltimento del calore all'interno del locale in forme convenzionali, ad esempio all'interno di edifici dove sono installati altri macchinari ed il calore prodotto è molto elevato.

<http://www.gbeonline.com>

scambiatore
di calore

