

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

CORSO DI LAUREA TRIENNALE IN INGEGNERIA ELETTRICA

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA ELETTRICA



TRASFORMATORI DI POTENZA

RELATORE: PROF. RENATO GOBBO

LAUREANDO: WAFFO KAMDEM EMILE LEONARD

MATRICOLA N° 540869/IE

18/02/2010

ANNO ACCADEMICO 2009-2010

Indice

1. Introduzione	pag.1
2. Valutazione e classifiche	
2.1 Valutazione	pag.3
2.2 Classifiche	pag.4
3. Costruzione e accessori	
3.1 Cenni costruttivi	pag.8
3.2 Accessori	pag.20
4. Trasformatore a liquido isolante	
4.1 Teoria dell'evoluzione dei gas disciolti nell'olio dielettrico	pag.23
4.2 Analisi gas cromatografiche e normative di riferimento	pag.24
5. Efficienza, perdite e regolamento	
5.1 Efficienza	pag.30
5.2 Perdite	pag.30
5.3 Regolazione	pag.44
6. Parallelo dei trasformatori	pag.45
7. Sovracorrenti nei trasformatori	
7.1 Corto circuito in un trasformatore	pag.47
8. Forze elettrodinamiche	
8.1 Campi magnetici prodotti da correnti elettriche	pag.54
8.2 Sforzi elettrodinamici	pag.55
8.3 Sforzi elettrodinamici nei trasformatori	pag.56
9. Conclusioni	pag.59
10. Bibliografia e siti internet	pag.60

1. INTRODUZIONE

IL trasformatore è definito come una macchina elettrica statica, è utilizzato nei sistemi di energia elettrica per il trasferimento di potenza tra i circuiti attraverso l'uso d'induzione elettromagnetica, solitamente con trasformazione dei valori di tensione e corrente fra due circuiti elettricamente separati. Fondamentalmente è costituito da due o più avvolgimenti e da un nucleo di materiale magnetico che ha per compito di migliorare l'accoppiamento magnetico tra gli avvolgimenti stessi.

L'avvolgimento che riceve l'energia elettrica che deve essere trasformata è chiamato primario mentre quello che la eroga è chiamato secondario. Alimentando quindi il primario con una tensione alternata, nel nucleo si genera un flusso magnetico alternato che si concatena con il circuito secondario inducendovi un F.E.M. Agendo opportunamente sul numero di spire dell'avvolgimento primario e secondario è possibile modificare il valore del rapporto fra la tensione di alimentazione al primario e quella indotta sul secondario. Il trasformatore può essere monofase (figura 1) o trifase (figura 2), in cui si può ricorrere a tre trasformatori monofase opportunamente collegati tra loro.

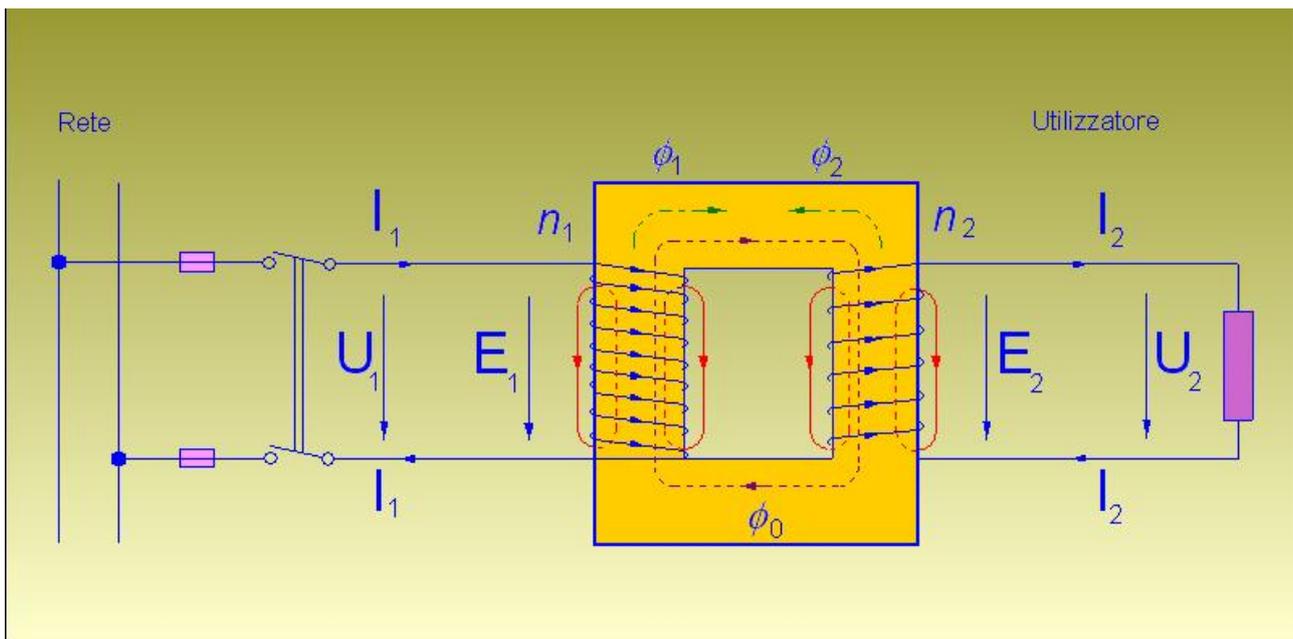


Figura 1: schematizzazioni di principio di funzionamento di un trasformatore monofase

Nella figura 2 è mostrata una possibile disposizione di tre trasformatori monofase. In questo caso, gli avvolgimenti primari sono collegati a stella, così come quelli secondari.

Il termine trasformatore di alimentazione è usato per riferirsi a quei trasformatori utilizzati tra il generatore e i circuiti di distribuzione, e sono generalmente superiori a 500 kVA. Quelli di potenza in genere sono composti da un ampio numero di trasformatori di alimentazione collegati tra loro all'interno del sistema o con sistemi vicini. La complessità dei sistemi porta a una varietà di trasmissione e distribuzione di tensione.

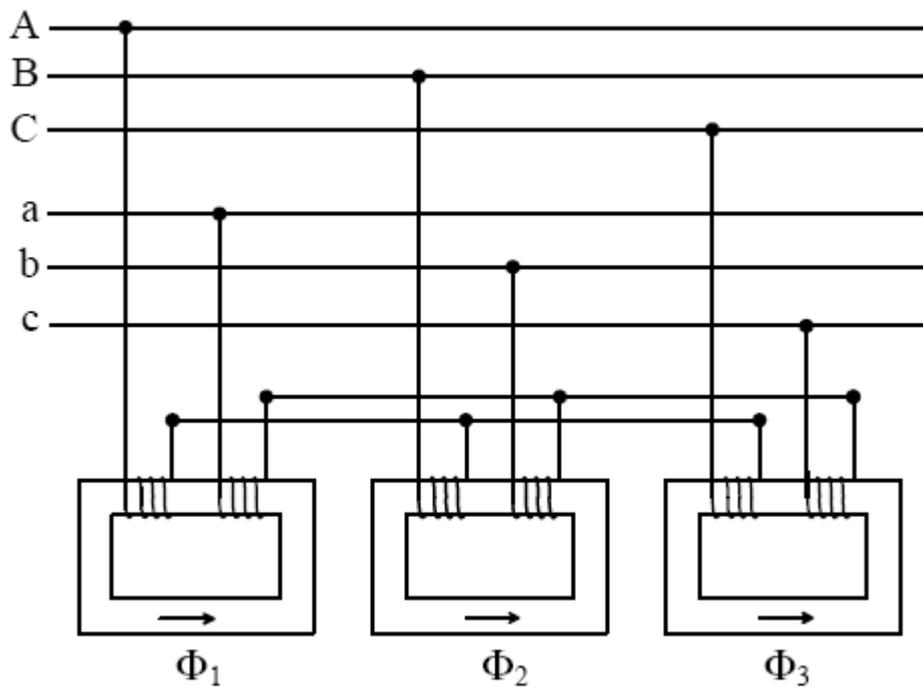


Figura 2: Banco di tre trasformatori monofase

I trasformatori di potenza sono disponibili in monofase o in trifase, possono avere il nucleo magnetico e gli avvolgimenti immersi in un liquido isolante (trasformatori in olio) oppure a secco (trasformatori in aria o inglobato di resina). Per uso esterno, i trasformatori di potenza sono di solito immersi nel liquido (figura 3).

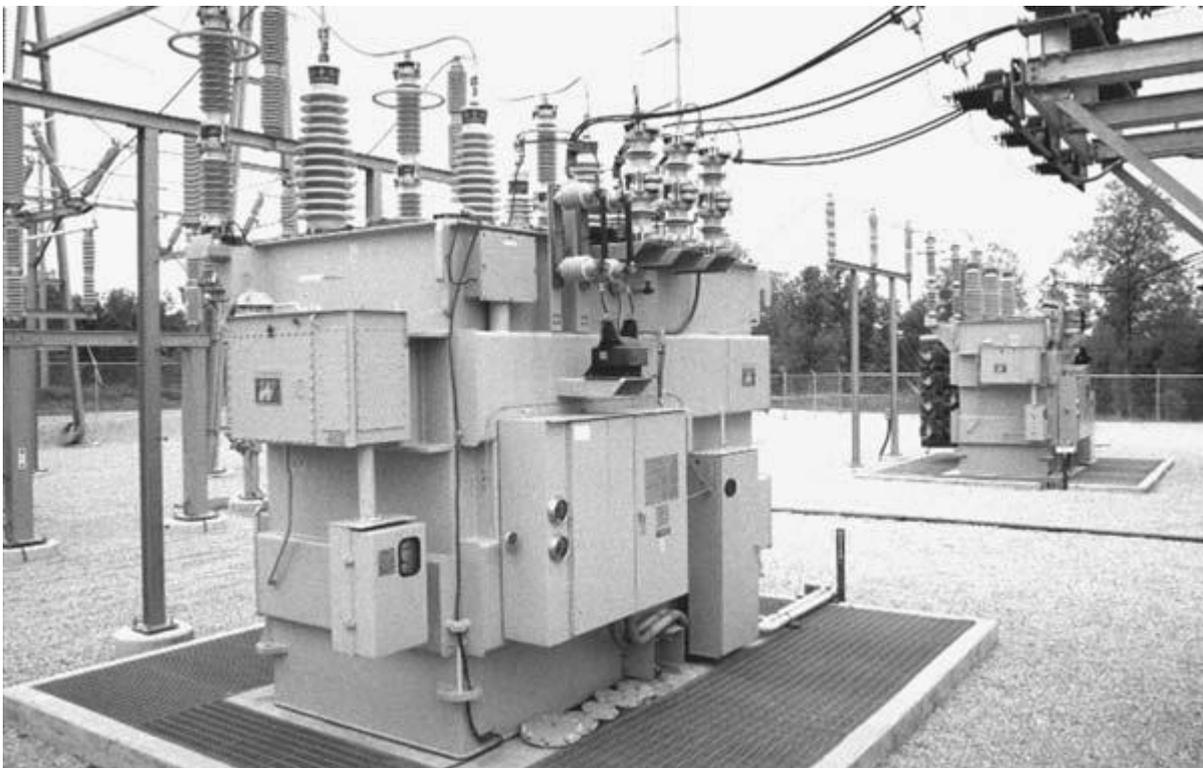


Figura 3 : Trasformatori in olio 20 MVA

2. VALUTAZIONI E CLASSIFICHE

2.1 VALUTAZIONE

Negli Stati Uniti, i trasformatori sono valutati sulla base della potenza dell'energia che sono in grado di distribuire costantemente a tensione e frequenza specifiche sotto condizioni normali di funzionamento, senza superare i limiti della temperatura interna. E' noto che l'isolamento peggiora con l'aumento della temperatura, quindi la classe di isolamento scelta per l'impiego nei trasformatori dipende da quanto ci si può aspettare che esso duri limitando la temperatura di funzionamento.

La temperatura che l'isolamento è permesso di raggiungere in condizione operativa determina essenzialmente il valore di uscita del trasformatore (valore in kVA). La standardizzazione ha condotto a temperature all'interno di un trasformatore che sono espresse in termini di superamento della temperatura ambiente, dal momento che la temperatura può variare in condizioni di funzionamento o di prova. I trasformatori sono designati a limitare tale temperatura in base al carico desiderato, incluso l'aumento della temperatura media degli avvolgimenti, l'aumento del punto più caldo degli avvolgimenti e, in caso di trasformatori riempiti di liquido, l'innalzamento della temperatura del liquido. Per ottenere la temperatura assoluta da questi valori è sufficiente aggiungere la temperatura ambiente. I limiti standard di temperatura per i trasformatori di potenza immersi nel liquido sono elencati nella (tabella 2.1.1.)

L'attesa di vita normale di un trasformatore di alimentazione è generalmente assunta circa in 30 anni di servizio. Tuttavia in determinate condizioni, può essere sovraccaricato e gestito al di là della sua prestazione, con moderata prevedibile "diminuzione di vita".

Fuori dagli Stati Uniti, la prestazione del trasformatore può avere un significato leggermente diverso. In conformità ad alcune norme, il valore in kVA può fare riferimento al potere che ha un trasformatore, dato che l'energia erogata corrisponde all'energia assorbita meno le perdite del trasformatore.

I trasformatori di alimentazione sono stati liberamente raggruppati in tre segmenti di mercato basati sugli intervalli dimensioni. Questi tre segmenti sono:

1. Trasformatori di potenza piccoli: 500 kVA - 7.500 kVA
2. Trasformatori di potenza medie: 7.500 kVA - 100 MVA
3. Trasformatori di potenza grandi: 100 MVA e oltre

Si nota che l'intervallo superiore di piccola potenza e la gamma di media potenza possono variare tra i 2.500 e 10.000 KVA in tutta l'industria. È stato osservato che la prestazione del trasformatore si basa sulla solita condizione di servizio, come prescritto dallo standard.

Le condizioni di servizio di solito possono essere identificati con quelli che specificano un trasformatore in modo che le prestazioni desiderate corrisponderanno alle condizioni reali di funzionamento. I condizioni di servizio insolite includono, ma non sono limitate da, le seguenti:

- Temperatura ambiente alta (sopra il 40 °C)
- Temperatura ambiente bassa (sotto il -20 °C)
- Altitudine superiori a 1000 m sul livello di mare
- Condizioni sismiche
- Carichi con distorsione armonica totale sopra 0,05 per unità.

Aumento della temperatura media di avvolgimento	65 °C
Punto più caldo dell'aumento temperatura	80 °C
Buon aumento di temperatura del liquido	65°C

Tabella 2.1.1 Limiti standard di temperatura per trasformatori immersi in olio

2.2 Classifiche

2.2.1 Classi d'isolamento

La classe d'isolamento di un trasformatore è determinata in base ai livelli di prova che è in grado di resistere.

All'esterno, gli isolanti del trasformatore e il dispositivo di protezione per il sovraccarico devono coordinarsi con la prestazione del trasformatore per proteggerlo da sovratensione e sbalzi transitori. Le classi di isolamento standard sono state stabilite dalle norme di organizzazioni indicando i parametri con i quali le prove devono essere eseguite.

La connessione in stella degli avvolgimenti in un trasformatore di alimentazione trifase in genere hanno il punto comune che escono dal cassone del trasformatore tramite un isolamento neutrale. A seconda dell'applicazione (per esempio nel caso di un solido messa a terra del neutro rispetto ad un neutro a terra tramite resistenza o addirittura un reattore) il neutro può avere una classe di isolamento inferiore rispetto ad altre linee. È importante notare che la classe di isolamento del neutro possa limitare i livelli di prova della linea di terminali per le prove certe, come la tensione applicata, dove l'intero circuito è portato allo stesso livello di tensione.

2.2.2 Classi di raffreddamento

Poiché nessun trasformatore è veramente "ideale", ognuno dovrà sostenere una certa quantità di perdita di energia, soprattutto quella che viene convertita in calore. I metodi di rimozione di questo calore possono dipendere dell'applicazione, la dimensione dell'unità, e la quantità di calore che deve essere dissipata. Il mezzo di isolamento all'interno di un trasformatore in olio ha molteplici scopi, il primo ad agire come un isolante, e il secondo a fornire un buon mezzo attraverso il quale si può rimuovere il calore.

Gli avvolgimenti e il nucleo sono le fonti primarie di calore, anche se strutture metalliche interne possono agire come una fonte di calore.

E' indispensabile avere adeguati condotti di raffreddamento e di passaggi in prossimità delle fonti di calore attraverso i quali il fluido di raffreddamento può fluire, in modo che il calore possa essere rimosso in maniera efficace dal trasformatore. Il calore viene trasportato dal mezzo isolante fino a quando non viene trasferito alla parete del cassone del trasformatore per l'ambiente esterno. I radiatori, di solito smontabili, forniscono un aumento della superficie disponibile per il trasferimento di calore per convezione, senza aumentare le dimensioni della cassa metallica.

I ventilatori possono essere installati per aumentare il volume dell'aria che si muove attraverso le superfici di raffreddamento, aumentando così il tasso di dissipazione del calore. I trasformatori di dimensioni

maggiori che non possano essere efficacemente raffreddati con i radiatori e i ventilatori possono contare sulle pompe d'olio che circolano attraverso il trasformatore e attraverso gli scambiatori di calore esterno o i refrigeratori, dove è utilizzata l'aria o l'acqua come mezzo di raffreddamento secondario.

Consentendo il liquido di fluire attraverso gli avvolgimenti del trasformatore per convezione naturale è identificato come "Flusso non diretto." Nei casi in cui le pompe sono utilizzate, e anche alcuni casi in cui solo i ventilatori e i radiatori vengono utilizzati, il liquido è spesso guidato attraverso alcuni o tutti gli avvolgimenti. Questo si chiama "Flusso diretto" in quanto vi è un certo grado di controllo del flusso del liquido attraverso gli avvolgimenti.

L'uso di attrezzature ausiliarie come i ventilatori e le pompe con refrigeratori sono chiamati a circolazione forzata, gli aumenti di quelle attrezzature di raffreddamento migliorano la prestazione del trasformatore senza aumentare le dimensioni fisiche dell'unità. Le valutazioni sono determinate in base alla temperatura del trasformatore che si coordina con le attrezzature di raffreddamento in funzione. Di solito, un trasformatore avrà prestazioni superiori in corrispondenza a diverse fasi di raffreddamento, siccome l'attrezzatura di raffreddamento supplementare può essere impostata per funzionare solo a maggiore capacità di carico.

2.2.3 Classificazione e identificazione dei trasformatori

I trasformatori si classificano principalmente sul numero delle fasi (monofasi o trifasi), al tipo d'impiego (di misura, per l'alimentazione del circuito, di potenza, ecc) e al tipo di raffreddamento. In particolare i trasformatori trifasi possono essere a secco o in olio, con raffreddamento naturale o artificiale.

Tipo	Raffreddamento	Limiti di potenza nominale
Immersi in liquido isolante (olio minerale o siliconico.) Parti attive immerse in liquido isolante. Il calore prodotto dalle parti attive è trasmesso all'olio e da questo ai sistemi di dispersione del calore stesso.	Naturale Favorito dai moti convettivi dell'aria riscaldata dal calore prodotto dalla macchina. - A cassa liscia Con radiatori	- Da circa 20 a 2000 KVA
A secco (in aria o in resina) Parti attive non immerse in liquido isolante. Il calore è asportato tramite circolazione dell'aria.	Artificiale - Con aria mossa da ventilatori - Ad acqua con scambiatori di calore Naturale Favorito dai moti convettivi dell'aria riscaldata dal calore prodotto dalla macchina.	- Adottato fino alle massime potenze. - Trasformatori in aria fino a circa 1000 KVA - Trasformatori in resina fino a circa 3000 KVA
I trasformatori in olio contenenti una quantità d'olio superiore ai 500 Kg devono essere provvisti di sistemi di raccolta per evitare eventuali contaminazioni ambientali (CEI 11-1)		

Tabella A.1: Classificazione dei trasformatori in base al sistema di raffreddamento.

I trasformatori in olio e i trasformatori a secco muniti di involucro sono individuati mediante una sigla composta da quattro lettere (tabella A.2). La prima lettera identifica il liquido refrigerante a contatto con gli avvolgimenti, la seconda lettera, il tipo di circolazione dell'olio, la terza lettera, il mezzo refrigerante esterno, la quarta lettera, il tipo di circolazione del mezzo refrigerante esterno. I trasformatori a secco privi d'involucro sono invece identificati con due lettere, la prima identifica il mezzo refrigerante a contatto con gli avvolgimenti e la seconda il modo di circolazione del mezzo refrigerante.

Mezzo	A contatto con gli avvolgimenti		Esterno all'involucro	
	Refrigerante	Circolazione	Mezzo refrigerante	Tipo di circolazione
simbolo	O Olio minerale o liquido isolante sintetico con punto di infiammabilità minore o uguale a 300°C	N Naturale	A Aria	N Naturale
	K Liquido isolante con punto d'infiammabilità maggiore di 300°C	F Forzata	W Acqua	F Forzata
	L Liquido isolante con punto d'infiammabilità non misurabile	D Forzata e guidata		
Esempio	O	N	A	F
	Trasformatore con isolamento in olio, raffreddato internamente dall'olio per circolazione naturale ed esternamente per mezzo di aria forzata			

Simboli di identificazione del tipo di raffreddamento dei trasformatori (CEI 14/4-2)

Simboli	Descrizione
AN (AF)	Raffreddamento per circolazione naturale o forzato dell'aria
ONAF	Raffreddamento per circolazione naturale dell'olio e aria forzata
OFAN	Raffreddamento per circolazione forzata dell'olio e raffreddamento naturale dell'aria
OFAF	Raffreddamento per circolazione forzata dell'olio e aria forzata
ODAF	Raffreddamento per circolazione forzata e guidata dell'olio e raffreddamento per circolazione forzata dell'aria

Le due prime lettere indicano il mezzo di raffreddamento interno in contatto con gli avvolgimenti e il tipo di circolazione mentre le altre lettere indicano il mezzo di raffreddamento e il tipo di circolazione sull'involucro esterno.

Principali tipi di raffreddamento per i trasformatori

3 Costruzione e accessori

La costruzione di un trasformatore di potenza varia da un'industria all'altra. L'accordo di base è sostanzialmente lo stesso e ha visto pochi cambiamenti significativi negli ultimi anni.

3.1 Cenni costruttivi

Se il trasformatore è destinato a funzionare con tensioni nominali relativamente basse, non è necessario adottare alcun accorgimento per isolare le fasi del trasformatore stesso. Un trasformatore di questo tipo si dice trasformatore in aria o trasformatore a secco. Per tensioni concatenate elevate è necessario isolare le fasi del trasformatore mediante un materiale caratterizzato da una rigidità dielettrica più elevata di quella dell'aria. Si possono quindi inglobare gli avvolgimenti in un involucro di resina sintetica vedi(figura A), o porre l'intero trasformatore in un contenitore ripieno d'olio (figura B). È utilizzato olio minerale isolante, che deve essere molto fluido, esente da acidità e da tracce di umidità e in cui vapori non devono infiammarsi a temperature minori di 140 °C.

Il trasformatore in resina sintetica presenta una maggiore semplicità d'installazione e una maggiore economicità di esercizio. Il trasformatore in bagno d'olio consente invece un più efficace smaltimento del calore generato per effetto joule. In un trasformatore in bagno d'olio il raffreddamento può avvenire per circolazione naturale o forzata. Per aumentare la superficie di scambio termico con l'esterno del cassone contenente il trasformatore, questo viene dotato di fasci tubieri esterni, che possono essere raffreddati da una soffiante.

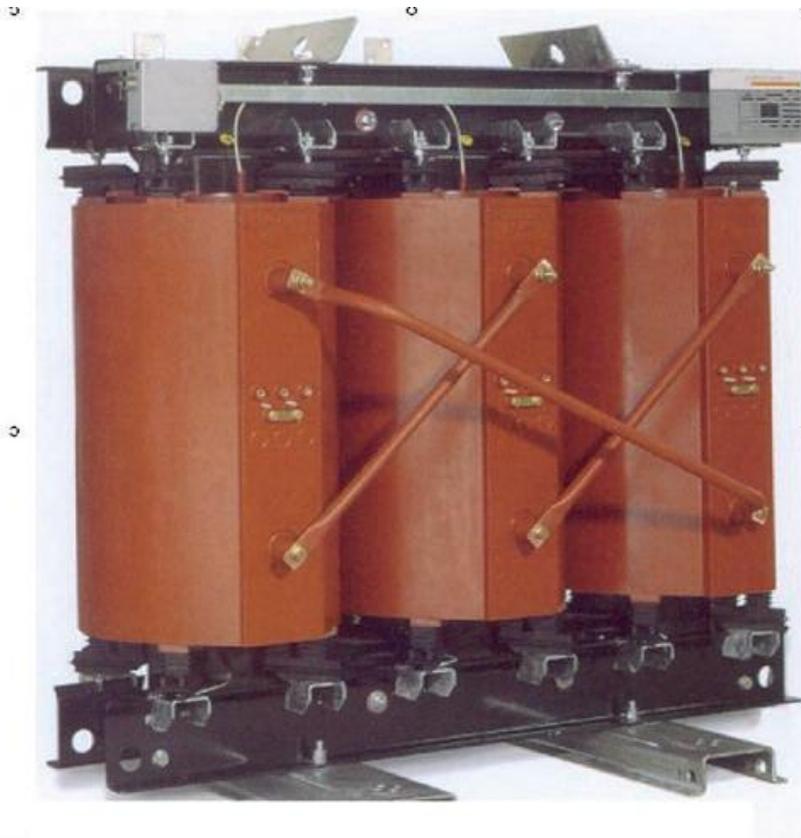


Figura A: Trasformatori a secco inglobato in resina

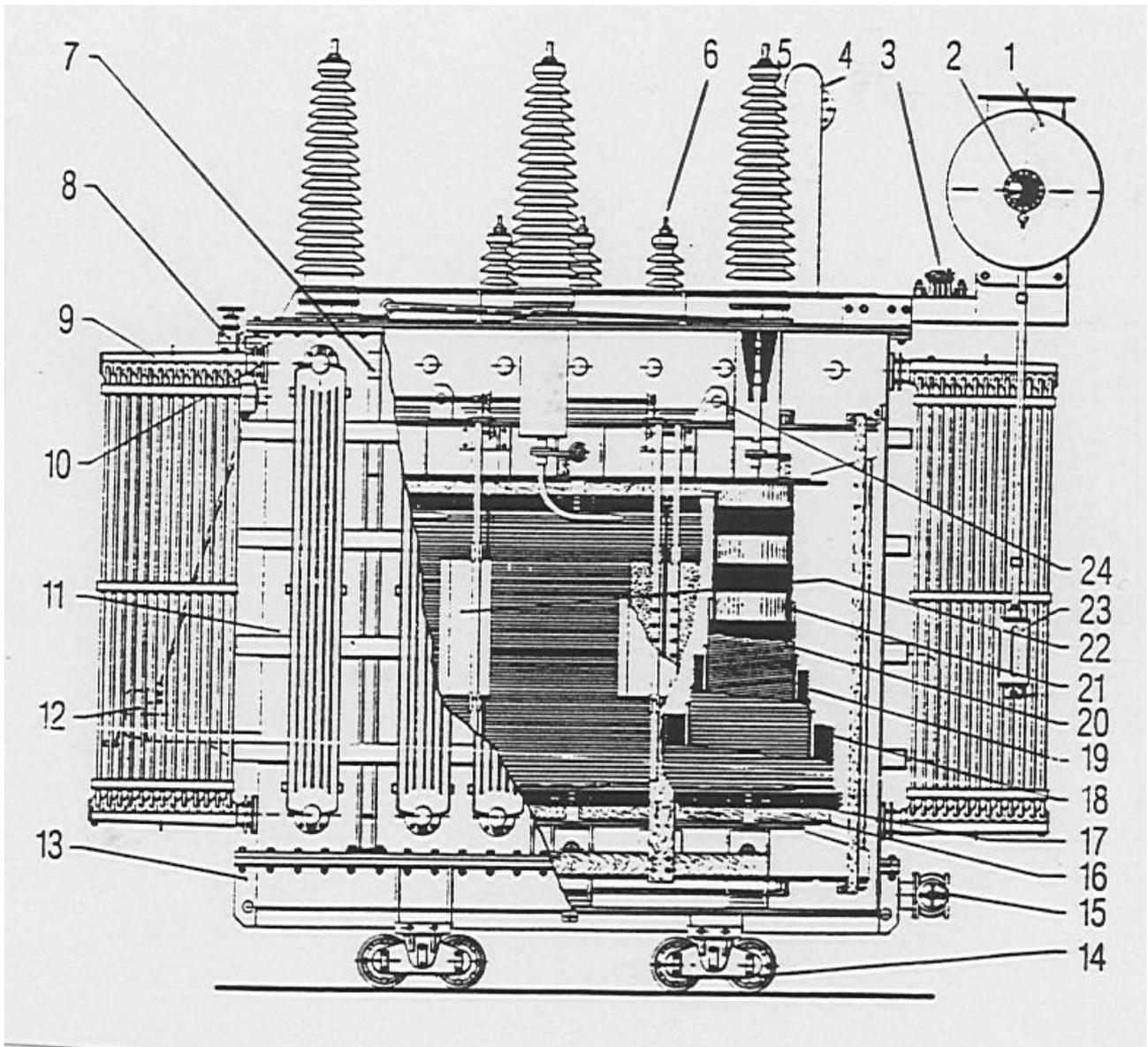


Figura B: Vista interna di un trasformatore trifase isolato in olio da 25000 KVA – 130/20 KV. Il raffreddamento è del tipo ONAN (Olio Naturale, Aria Naturale).

- | | |
|---|---|
| 1 - conservatore d'olio | 2 - indicatore magnetico livello olio |
| 3 - relè a gas (Buchholz) | 4 - tubo di sfiato |
| 5 - isolatori A.T | 6 - isolatori B.T |
| 7 - golfari di sollevamento | 8 - saracinesca per attacco muro pressa |
| 9 - radiatori di raffreddamento | 10 - valvole di intercettazione |
| 11 - cassa tenuta di vuoto | 12 - scatola comando commutatore |
| 13 - ganci per traino | 14 - carrello orientabile |
| 15 - saracinesca di scarico olio | 16 - elementi di pressaggio bobine |
| 17 - collari isolanti con distanziatori | 18 - avvolgimento primario |
| 19 - avvolgimento secondario | 20 - avvolgimento terziario compensatore |
| 21 - nucleo magnetico | |
| 22 - commutatore a vuoto per la regolazione della tensione primario | |
| 23 - essiccatore d'aria a Sali igroscopici | 24 - golfari di sollevamento porte estraibile |

3.1.1 Nucleo

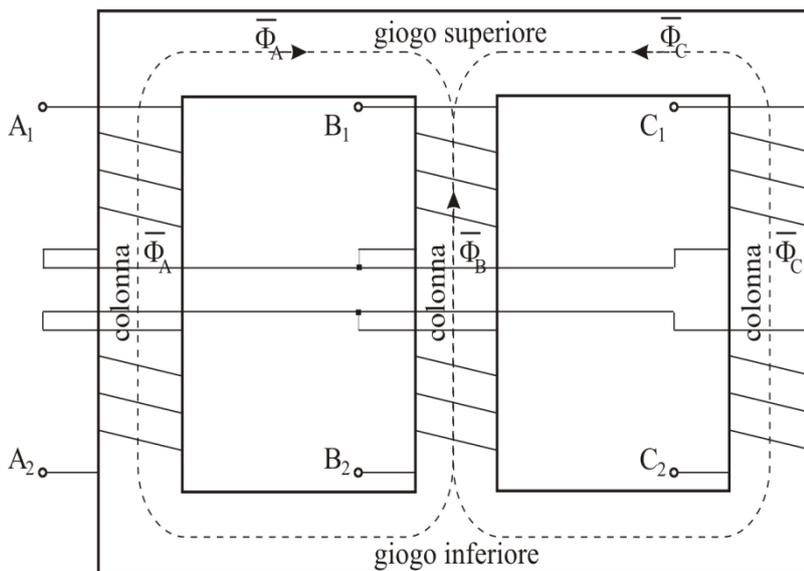
Oltre a ridurre al minimo le perdite nel ferro, i criteri costruttivi dei nuclei dei trasformatori devono ridurre al minimo la corrente magnetizzante necessaria per ottenere il flusso magnetico desiderato:

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

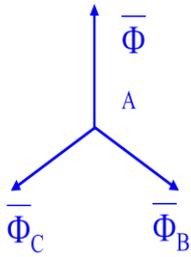
$\mathcal{R} = \frac{l}{\mu S}$ occorre che sia:

- Elevata la permeabilità magnetica $\mu \implies$ 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).

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.



I flussi magnetici prodotti da ciascuna fase sono variabili sinusoidalmente nel tempo, hanno lo stesso valore massimo e sono sfasati tra loro di 120° .



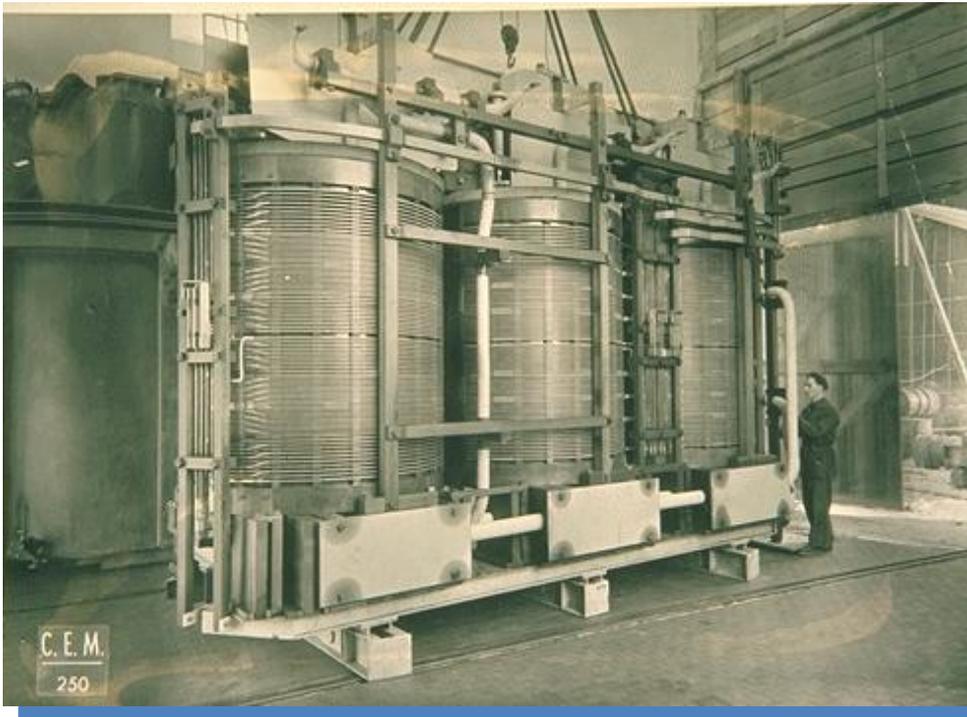
La somma vettoriale dei tre flussi è sempre nulla.

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

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.

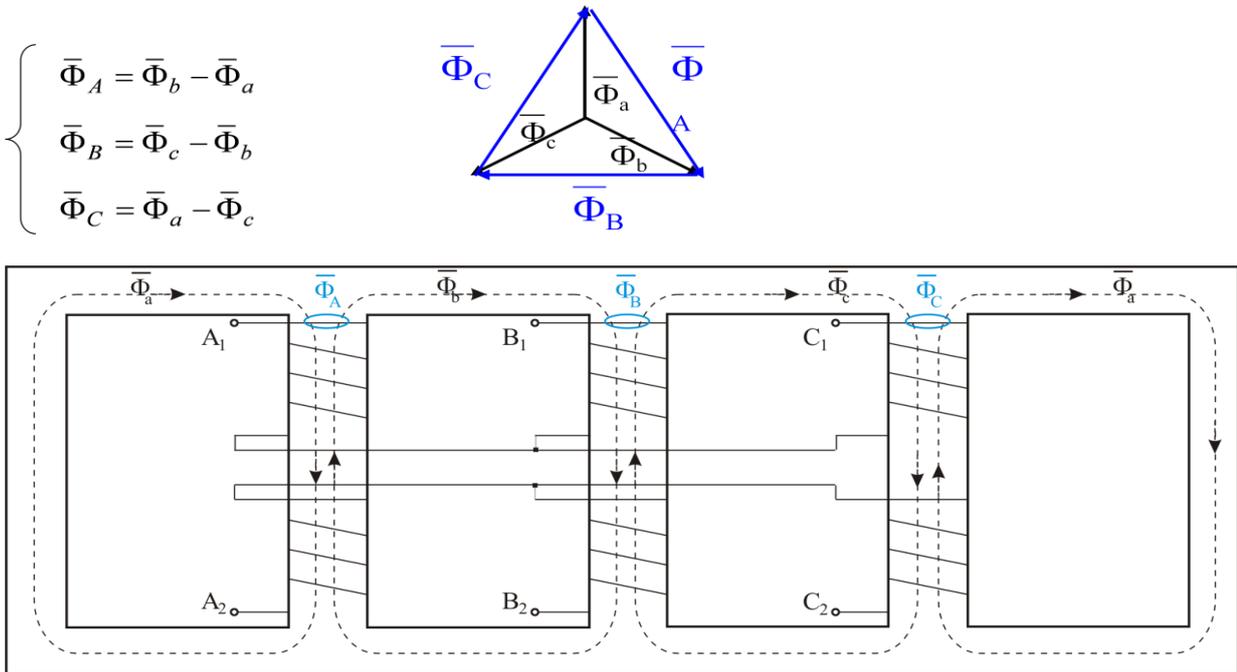
Tuttavia, questo squilibrio di correnti si manifesta solo nel funzionamento a vuoto, poiché nel funzionamento a carico le correnti magnetizzanti risultano trascurabili rispetto alle correnti primarie, e queste risultano equilibrate (o meno) a seconda che sia equilibrato (o squilibrato) il carico sulle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



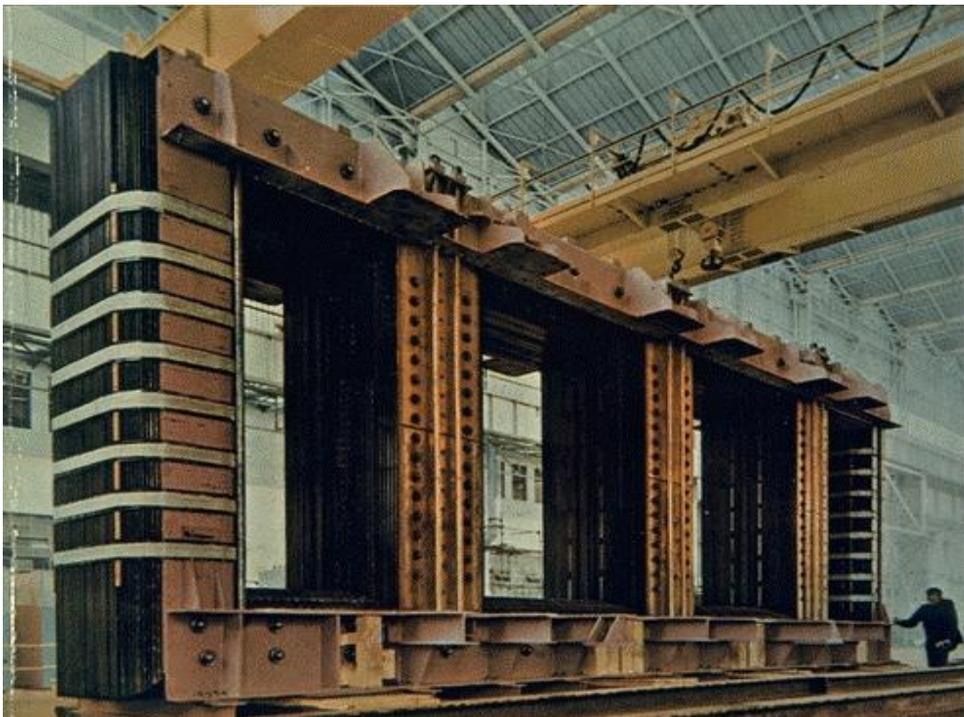
Nucleo a tre colonne per trasformatori trifase

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 ($\bar{\Phi}_a, \bar{\Phi}_b, \bar{\Phi}_c$).



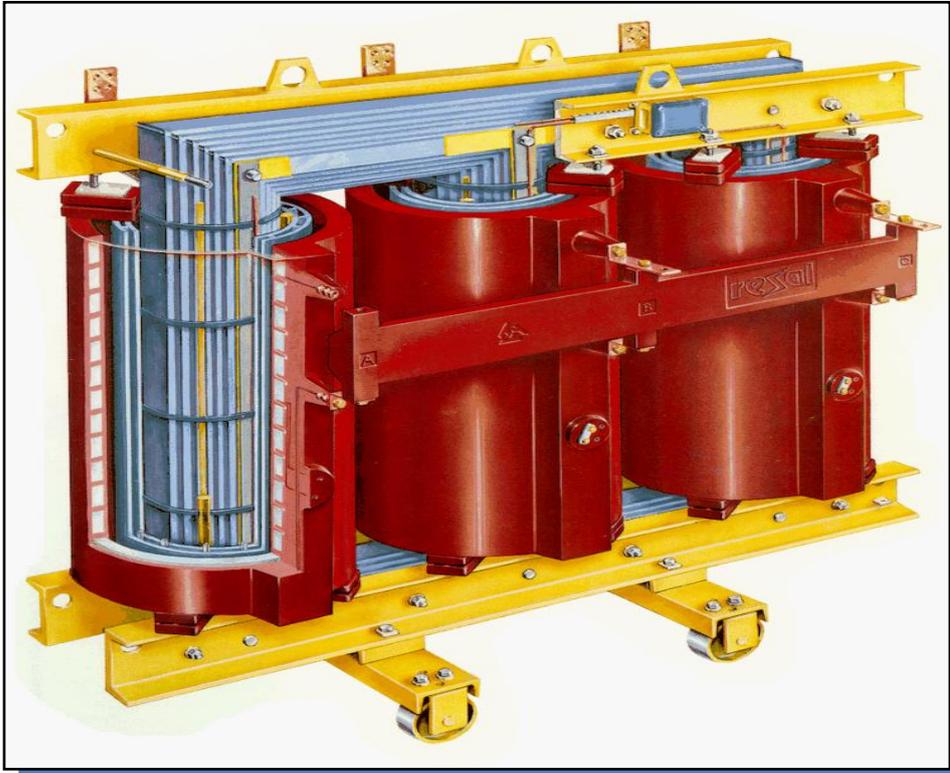
Il nucleo a 5 colonne può essere costruito in modo tale che i flussi Φ_a, Φ_b, Φ_c che percorrono gli anelli chiusi formino una stella simmetrica. In questo modo, questi flussi risultano pari a $1/\sqrt{3}$ volte ($\cong 0,58$) i flussi prodotti da ciascuna fase. Di conseguenza, anche le sezioni dei gioghi saranno pari al 58% della sezione delle colonne.



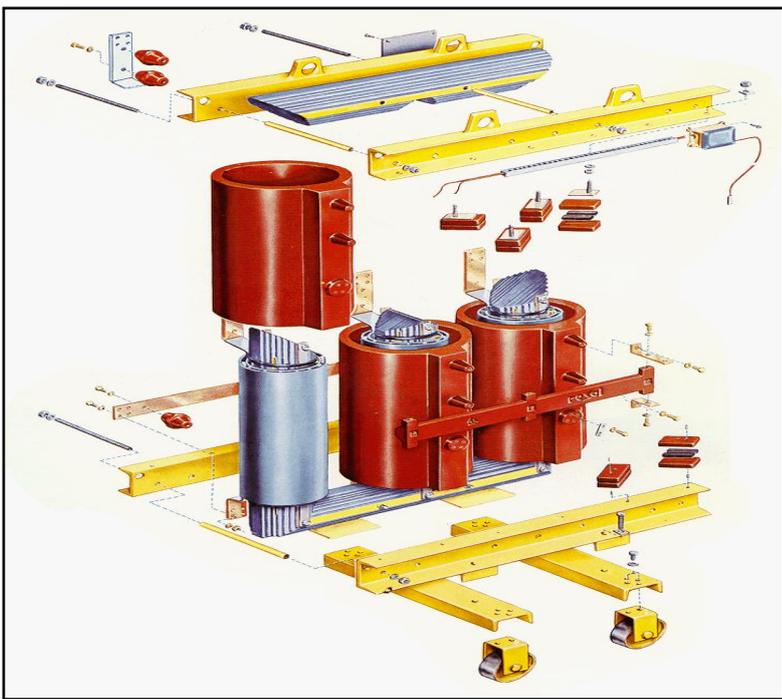
Nucleo a cinque colonne per trasformatori trifase

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).



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



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

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

- assicura una migliore resistenza agli sforzi elettrodinamici;
- rende minima la lunghezza della spira media, e quindi il consumo di materiale conduttore.

Le dimensioni dei gradini delle colonne sono normalizzate rispetto al diametro D della corrispondente sezione circolare. Per elevate dimensioni delle colonne, vengono praticati canali di raffreddamento per la circolazione del fluido refrigerante, distanziando opportunamente i pacchi di lamierini.

3.1.2 Colonne del nucleo e avvolgimenti

Gli avvolgimenti sono realizzati in rame o, più spesso, in alluminio (meno costoso e meno pesante, con una conducibilità di poco inferiore al rame).

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.



3.1.3 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).

In genere, per l'AT si usano conduttori a filo oppure quelli a piattina che consentono il riempimento ottimale dello spazio.

- L'avvolgimento di bassa tensione (BT) sarà formato da meno spire di sezione maggiore (perché percorse da corrente maggiore).

In genere, i conduttori in BT sono a piattina; talvolta presentano una struttura "a nastro" (poche spire di grande sezione).

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

- **accoppiamento magnetico** tra primario e secondario: l'accoppiamento ideale si ottiene ponendo i due avvolgimenti uno dentro l'altro (tutto il flusso magnetico si concatena con entrambi gli avvolgimenti \Rightarrow non si ha flusso magnetico disperso);
- **necessità di isolamento** tra avvolgimenti e nucleo magnetico e tra avvolgimento primario e secondario;
- **necessità di raffreddamento**: nei trasformatori di elevata potenza, occorre avere dei 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. È infatti necessario contenere la temperatura entro livelli che non compromettano la tenuta degli isolanti.

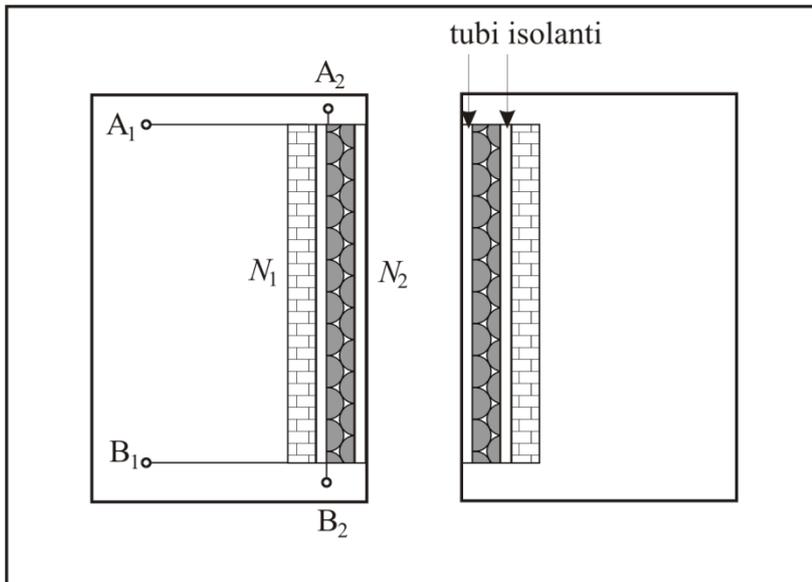
Esistono sostanzialmente tre tipi di disposizione degli avvolgimenti:

- 1) **concentrico**;
- 2) **doppio concentrico**;
- 3) **alternato**

3.1.3.1 Avvolgimento concentrico

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

L'avvolgimento BT è formato da piattina avvolta a spirale a strato continuo, quello AT da filo o piattina a bobine separate e collegate tra loro.



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

- migliore accoppiamento magnetico;
- facilità di isolamento (con tubi isolanti);
- facilità di circolazione del fluido refrigerante (con canali verticali).

Gli svantaggi sono dati da:

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

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.

3.1.3.2 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.

3.1.3.3 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.

3.2.1 Avvolgimenti in Pancake

Diversi tipi di avvolgimenti sono comunemente denominati "pancake" avvolgimenti a causa della disposizione dei conduttori in forma dei dischi. Tuttavia, il termine più spesso si riferisce a un tipo di bobina che è utilizzato quasi esclusivamente in guscio dei trasformatori. I conduttori sono avvolti attorno a un rettangolo, con la faccia più ampia del conduttore orientato orizzontalmente o verticalmente. Vedi figura 3.1.5 che illustra come queste bobine sono tipicamente ferite. Questo tipo di avvolgimento si presta alla sistemazione intercalata. Vedi figura 3.1.6.

3.1.2.2 Avvolgimenti in strato (barile)

I barili di avvolgimenti sono tra i più semplici avvolgimenti perché i conduttori isolati sono avvolti direttamente l'uno accanto all'altro intorno al cilindro e distanziali. Diversi strati possono essere avvolti in cima a un altro, con gli strati separati da isolanti solidi, condotti, o una combinazione. Diversi conduttori possono essere avvolti in parallelo, se l'entità della corrente lo esige. Le variazioni di quest'avvolgimento sono spesso utilizzate come avvolgimenti di prese, utilizzati per cambiamento di tensione a carico, (LTC) figura 3.1.9 mostra un livello di avvolgimento in corso assemblaggio che sarà utilizzato come una disciplina di avvolgimento in un trasformatore di LTC.

3.1.2.3 Avvolgimenti elicoidali

Gli avvolgimenti elicoidali sono anche denominati vite o avvolgimenti a spirale, con ogni termine che caratterizza con precisione la costruzione delle bobine. Un avvolgimento elicoidale è costituito da poche unità a più di 100 fili isolati avvolti in parallelo per tutta la lunghezza del cilindro, con distanziatori inseriti tra giri o dischi adiacenti e trasposizioni appropriate incluse per ridurre al minimo le correnti che circolano tra i filoni paralleli. Il modo di costruzione è tale che la bobina assomiglia a un cavatappi. Figura 3.1.7 mostra un avvolgimento elicoidale durante il processo di avvolto.

Gli avvolgimenti elicoidale sono utilizzati per le applicazioni delle sovracorrenti incontrate frequentemente in bassa tensione.

3.1.2.4 Avvolgimenti in disco

Un disco di avvolgimento può comportare un singolo filamento oppure diversi filamenti di conduttori isolati avvolti in una serie di dischi paralleli in orientamento orizzontale, con i dischi collegati sia dentro o fuori come un punto di incrocio. Ogni disco comprende più giri avvolti su altri giri, con gli incroci alternati tra interno ed esterno. La figura 3.1.8 mostra il tipico incrocio durante il processo di avvolgimento. La maggior parte degli avvolgimenti di tensione 25 KV e soprattutto utilizzato nel **core trasformatore forma** . Date le alte tensioni coinvolte nella prova e il funzionamento, particolare attenzione è necessaria per evitare alte sollecitazioni tra i dischi e i giri verso la fine dell'avvolgimento, quando sono sottoposti a sbalzi di tensione transitoria. Le numerose tecniche sono state sviluppate per garantire un'accettabile tensione di distribuzione lungo l'avvolgimento in queste condizioni.



Figura:3.1.5 durante il processo di avvolgimento

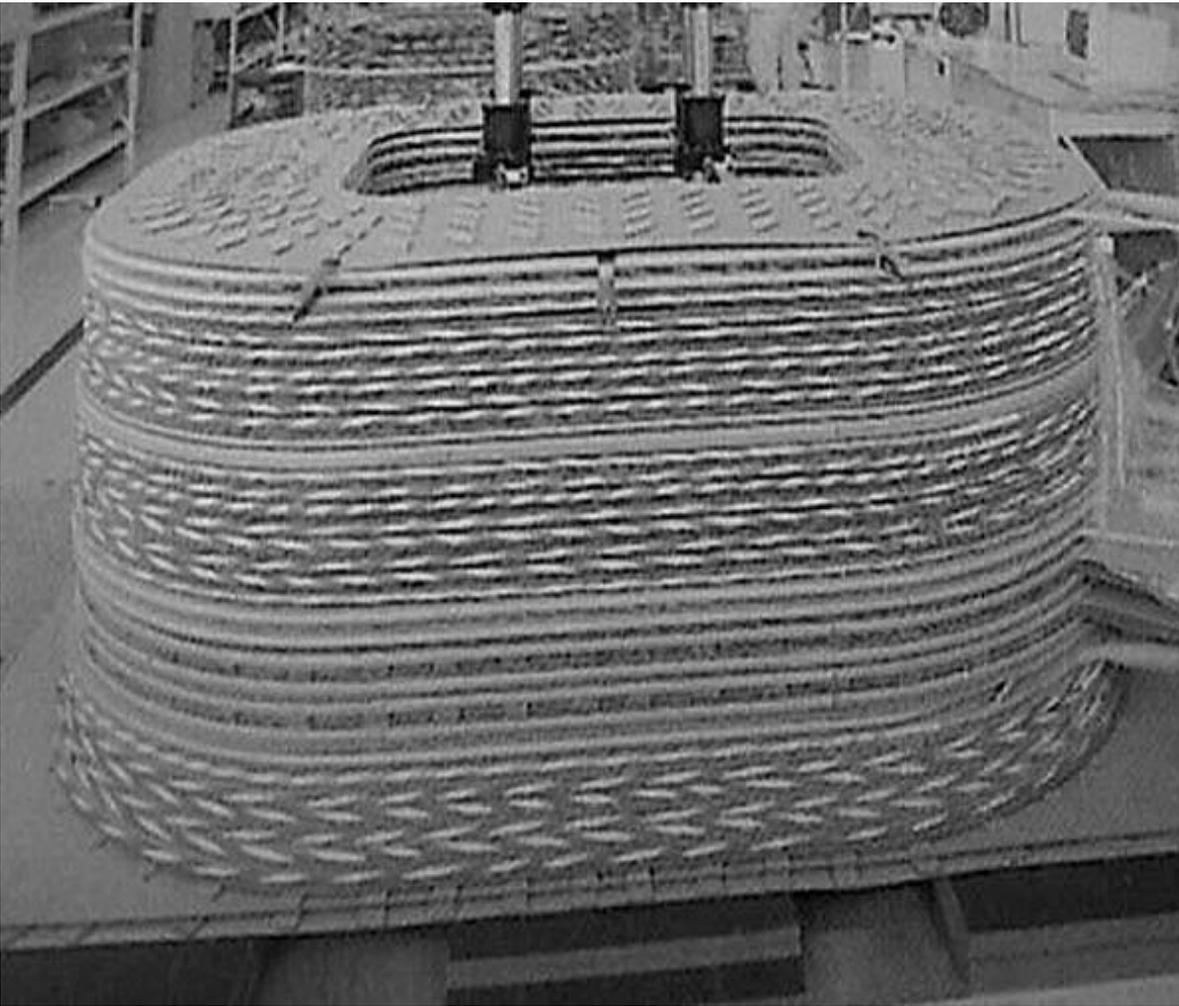


Figura: 3.1.6 avvolgimenti impilati un sopra l'altro

3.1.2.5 Rapporto spira

La possibilità di regolare il rapporto spire di un trasformatore è spesso auspicabile per compensare le variazioni di tensione che accadono a causa della regolazione del trasformatore e dei cicli di carico. Quest'operazione può essere compiuta in vari modi.

La maggiore parte dei trasformatori sono dotati di un mezzo per cambiare il numero delle spire del circuito ad alta tensione, in base al quale una parte dell'avvolgimento è estratta dal circuito. In molti trasformatori, questo è fatto utilizzando uno degli avvolgimenti principali e variando una o più sezioni in base alla tensione desiderata .

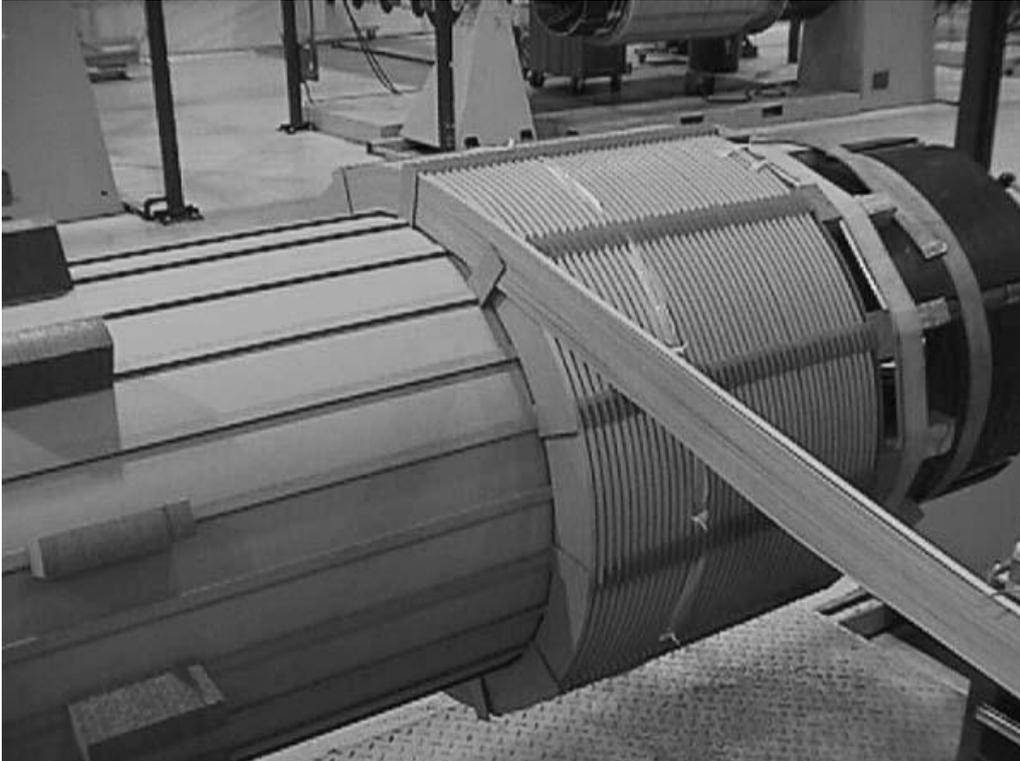


Figura 3.1.7

avvolgimento elicoidale

3.2. Accessori

Ci sono molti tipi di accessori utilizzati per monitorare e proteggere i trasformatori di potenza, alcuni sono considerati come dei caratteristici standard, e altri sono utilizzati sulla base dei requisiti vari. Alcuni degli accessori di base sono discussi qui.

3.2.1. Indicatore di livello liquido

L'indicatore del livello di liquido è una caratteristica tipica del cassone dei trasformatori riempiti di liquido, poiché il mezzo liquido è un fattore critico per il raffreddamento e l'isolamento. Questo indicatore ha in genere un misuratore rotondo sul lato della cisterna, con un braccio galleggiante che si muove come un puntatore lineare quando il livello del liquido cambia.

3.2.2. Dispositivi di decompressione

I dispositivi di decompressione sono montati sulla cassa dei trasformatori per alleviare l'eccesso di pressioni interne che potrebbero formarsi in condizione di funzionamento. Questi dispositivi sono destinati a evitare danni al cassone.

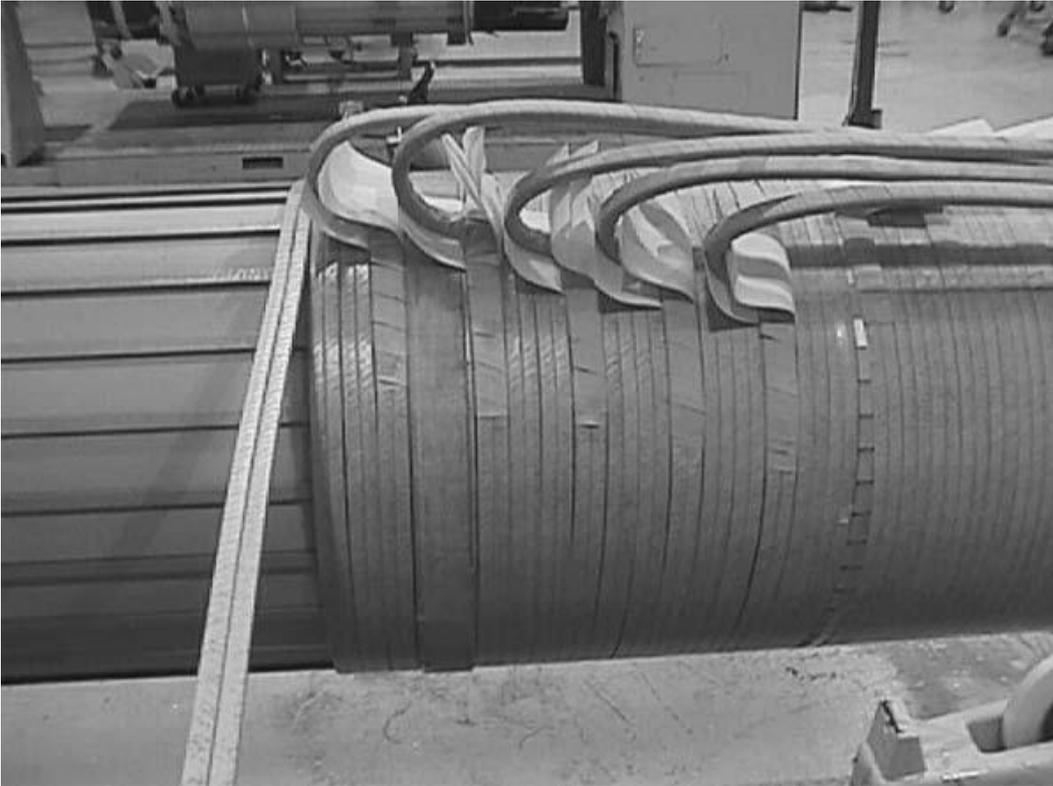


Figura 3.1.9 avvolgimento in strato (strato singoli con due fili avvolti in parallelo)

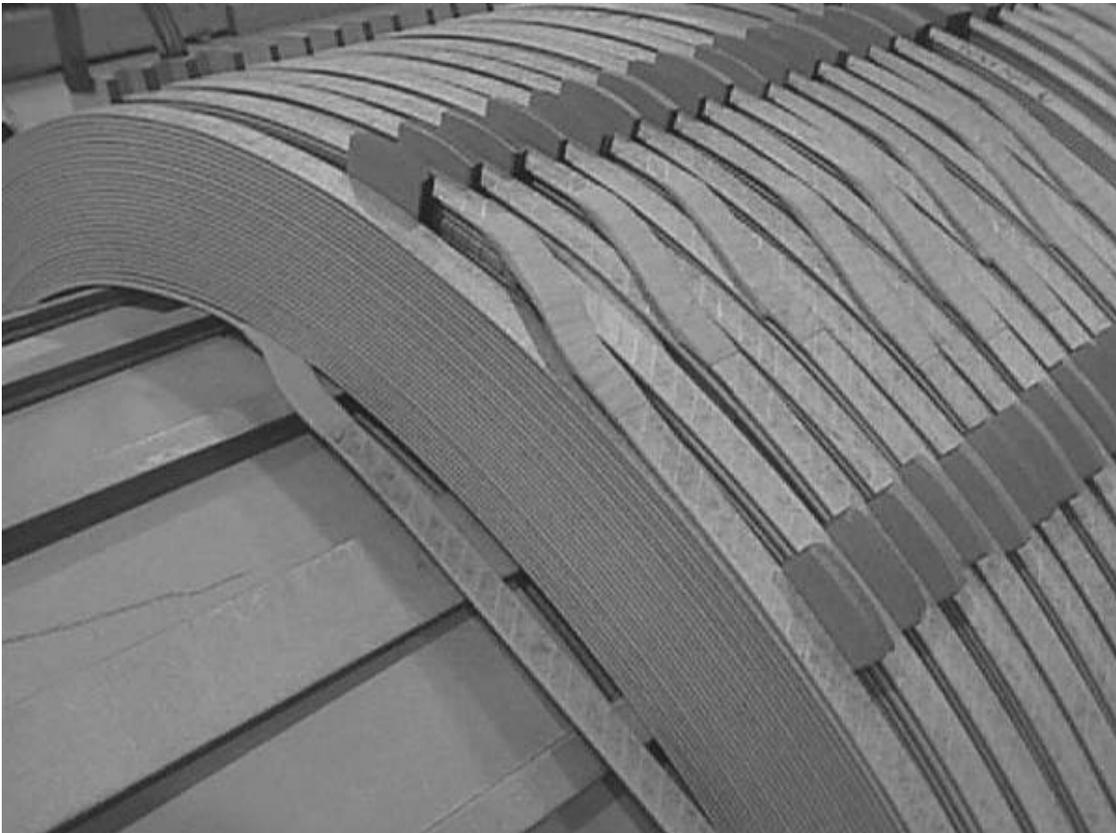


Figura 3.1.8 avvolgimento in disco, durante in processo

3.2.3 Indicatore della temperatura del liquido

Permette di misurare la temperatura del liquido interno, in un punto vicino alla cima del liquido utilizzando una sonda inserita in un pozzo e montato attraverso il lato della cassa del trasformatore.

3.2.4 Indicatore della temperatura dell'avvolgimento

Un metodo di simulazione della temperatura dell'avvolgimento è utilizzato per stimare il suo punto più caldo. È necessaria un'approssimazione a causa delle difficoltà di misurare direttamente la sua temperatura. Il metodo applicato per trasformatori di potenza comporta un trasformatore di corrente, che si trova a subire una corrente proporzionale al carico. Il trasformatore di corrente alimenta un circuito che in sostanza aggiunge calore per la buona lettura della temperatura del liquido.

3.2.5 Relè di pressione improvviso

Un improvviso relè di pressione è programmato per indicare un rapido aumento della pressione interna che si può verificare quando c'è un guasto. Questi relè possono essere montati sulla parte superiore o laterale del trasformatore.

4. Trasformatori a liquidi isolanti

Il tipo di trasformatore più diffuso è sicuramente quello immerso in liquido isolante anche perché permette di ottenere tensioni e potenze più elevate. Il liquido isolante più utilizzato è l'olio minerale che costituisce da circa un secolo, un elemento indispensabile per l'isolamento e il raffreddamento di alcune macchine elettriche, quali i trasformatori di potenza e misura.

L'olio minerale è tuttavia largamente impegnato nelle citate macchine elettriche perché offre il migliore compromesso fra costi e prestazioni e presenta un'ottima compatibilità con gli altri materiali impiegati nella costruzione dei trasformatori.

Negli ultimi anni, lo sviluppo dei fluidi isolanti ha necessariamente dovuto confrontarsi con vincoli legislativi sempre più stringenti, di carattere sia sanitario sia ambientale; oggi, è sempre più sentito l'esigenza di introdurre studi e ricerche sistematiche che indichino la non pericolosità delle sostanze in uso, di possibile impiego e dei loro prodotti di decomposizione. Altro punto è quello concernente l'individuazione di metodologie in grado di fornire informazioni sullo stato degli elementi elettrici in servizio, agli inizi degli anni settanta si venne sviluppando l'idea di usare l'olio come un mezzo per valutare le condizioni delle macchine attraverso l'esame dei gas disciolti in esso.

4.1 Teoria dell'evoluzione dei gas disciolti nell'olio dielettrico

La valutazione dei risultati delle analisi dei gas disciolti nell'olio isolanti è considerato uno dei mezzi diagnostici più efficaci per valutare lo stato dei trasformatori in esercizio, individuare precocemente le anomalie e programmare eventuali interventi di riparazione. Le più aggiornate tecniche analitiche e metodologie diagnostiche, focalizzate sulle prevenzioni predittiva e di protezione ambientale sul parco trasformatori in esercizio con liquidi isolanti minerali e sintetici.

Le principali cause di formazione di gas all'interno di un trasformatore sono connesse ad anomalie tecniche ed elettriche.

I gas sono prodotti:

- Per decomposizione termica dell'olio e degli isolanti associati (punti caldi)
- Dalle temperature connesse ad un arco elettrico o da bombardamento ionico (senza temperature elevate associate) prodotto da scariche a bassa energia (scariche parziali o effetto corona)

Questi gas, in misura diversa tra loro è variabile con la temperatura, sono abbastanza solubili in olio e di conseguenza sono facilmente determinabili tramite analisi del gas estratto dall'olio.

Va anche rilevato che tutti i trasformatori generano una certa quantità di gas, anche in assenza di anomalie, alle normali temperature di servizio.

La temperatura esercita una grande influenza sulla scomposizione delle molecole d'idrocarburi che compongono l'olio minerale.

Tali scomposizioni portano alla produzione di ioni e radicali che attraverso reazioni chimiche complesse si ricombinano in molecole gassose.

4.2 Analisi gas cromatografiche e normative di riferimento

Sulla base Dei modi di produzione dei gas sopra descritte e con riferimento a rilievi di tipo sperimentale, si è pervenuti alla definizione di criteri per consentire di associare lo specifico contenuto di gas allo stato del trasformatore (servizio regolare, presenza di una o più anomalie) o alla causa che ha determinato l'eventuale fuori servizio per guasto.

CASISTICA DI' GUASTO PER TRASFORMATORI DI' POTENZA (*)
La responsabilità del danno è attribuita a: <ul style="list-style-type: none">- Prodotto (40% per carenze di progetto e costruzione)- Esercizio (39% per degrado funzionale)- Influssi esterni (21% per scariche atmosferiche, ecc.)
Le parti danneggiate sono: <ul style="list-style-type: none">- Avvolgimenti (50%)- Sistemi di regolazione (29%)- Nucleo e avvolgimenti (21%) di cui<ul style="list-style-type: none">-Nucleo (2%)-Casse (2%)

Partendo dal presupposto che ogni tipo di difetto interno è caratterizzabile da uno specifico quadro gas e che la sua gravità può essere correlata al tasso di produzione degli stessi, sono state sviluppate metodologie per consentire di fare una diagnosi sullo stato di un trasformatore sulle quantità di gas prodotti.

In linea di principio, facendo riferimento a una schematizzazione semplice, i principali tipi di guasto e gli associati prodotti gassosi possono essere classificati come riportato nella tabella 1

Tipo di guasto	Scariche in vacuoli gassosi	Scariche ad elevata energia (parziali od archi)	Sovra riscaldamenti
Gas espressivi	Idrogeno (H2)	Acetilene (C2H2)	Etilene (C2H4)
	Metano (CH4)	Idrogeno (H2)	Etano (C2H6)
	Etano (C2H6)	Etilene (C2H4)	Metano (CH4)
		Altri	Idrogeno (H2)
		Ossidi di carbonio (C2O e CO2) per decomposizione della cellulosa.	

Tabella 1: Suddivisione delle principali categorie di guasto a seconda dei loro gas significativi

La schematizzazione semplice, riportata nella tabella, utile per una interpretazione di massima, è stata recepita dalla normativa definendo dei criteri interpretativi basati sul valore del rapporto fra diversi gas, la Tabella 2 permettono di stabilire con maggiore attendibilità la natura del guasto.

Caso	Guasto caratteristico	Acetilene/etilene C2H2/C2H4	Metano/Idrogeno CH4/H2	Etilene/etano C2H4/C2H6
PD	Scariche parziali	Non significativo	<0.1	<0.2
D1	Scariche a bassa energia	>1	0.1 - 0.5	>1
D2	Scariche ad alta energia	0.6 – 2.5	0.1 - 1	>2
T1	Guasto termico T<300°C	Non significativo ⁽¹⁾	>1 ma non significativo ⁽¹⁾	<1
T2	Guasto termico 300°C<t<700°C	<0.1	>1	1 - 4
T3	Guasto termico t>700°C	<0.2 ⁽²⁾	>1	>4

Tabella 2: tabella interpretativa dei gas disciolti in olio secondo la nuova versione della IEC 60599

(1) Non significativo qualunque sia il valore.

(2) Un valore crescente di C2H2 può indicare che la temperatura del punto caldo è superiore a 1000°C.

L'impiego di rapporto fra gas per individuare un possibile tipo di guasto è tuttavia un processo al quanto empirico, basato sull'esperienza acquisita nel correlare le analisi gas cromatografiche delle macchine con il reale problema o guasto accertato sperimentalmente una volta che sulla macchina sono stati eseguiti i necessari rilievi di tipo elettrico e che successivamente è stata aperta ed ispezionata.

Le teorie diagnostiche basate sui principi di decomposizione dell'olio e dei materiali isolanti. Descritte precedentemente, possono essere giustificate mediante l'impiego di una matrice di rapporti gassosi indici di possibili cause di guasto.

Nella nuova edizione della Guida IEC 60599, i rapporti vengono ipotizzati variabili in un campo fra 0,1 e 4 secondo la Tabella 2 .

La norma CEI EN 60599 , fornisce un'indicazione su come rappresentare graficamente detti rapporti fra gas, sia in maniera bidimensionale che tridimensionale,definendo per ognuna delle rappresentazioni le zone relative ad ognuna dei tipi di guasto (PD,D1,D2,T1,T2,T3).

La nuova edizione del documento ICE riporta anche uno schema semplificato di interpretazione dei gas disciolti in olio di cui in Tabella 3 ,se ne fornisce un estratto dalla pubblicazione originale.

caso	C2H2/C2H4	CH4/H2	C2H4/C2H6
PD	-	<0.2	-
D	>0.2	-	-
T	<0.2	-	-

Tabella 3: schema semplificato di interpretazione(secondo la nuova versione della IEC 60599)

La Norma CEI EN 60599 introduce il concetto di "valore tipico" da altri definito "normale" o di "norma" (valori tuttora oggetto di discussione e riconsiderazione), tale valore per ciascun gas rappresenta:

il valore di concentrazione al di sotto del quale, in base all'esperienza di esercizio è ragionevole escludere la presenza di anomalie significative (tali da portare all'esclusione dal servizio) all'interno della macchina.

Tali valori sono superati da una percentuale relativamente bassa della popolazione dei trasformatori(ad esempio 10%). In tale caso si parla di valori tipici al 90%.

I valori "Tipici"sono riferimenti da utilizzare per valutare in modo comparativo il contenuto di gas e non debbono essere utilizzati per stabilire la gravità di anomalie all'interno della macchina né tantomeno per stabilire correlazioni con la probabilità di guasto.

Essi sono utilizzati essenzialmente per decidere se intraprendere attività per una sorveglianza più frequente dello sviluppo di gas o per un approfondimento delle cause.

Per ciascun tipo di componente elettrico, la CEI EN 60599 riportata i valori tipici di concentrazione dei gas (tabella4)

Tipo di unità	Idrogeno H2 [ppm]	Ossido di carbonio CO [ppm]	Anidride carbonica CO2 [ppm]	Metano CH4 [ppm]	Etano C2H6 [ppm]	Etilene C2H4 [ppm]	Acetilene C2H2 [ppm]
Trasformatori senza commutatore sotto carico	60-150	540-900	5100-13000	40-110	50-90	60-280	3-50
Trasformatori con commutatore sotto carico	75-150	400-850	5300-12000	35-130	50-70	110-250	80-270
Trasformatori da forno(*)	200	800	6000	150	150	200	(*)
Trasformatori per distribuzione	100	200	5000	50	50	50	5

Tabella 4: Esempio di valori tipici di concentrazione al 90% osservati su una rete tipica

Nota 1: I valori elencati in questa tabella sono stati ottenuti da reti singolari.

Valori ottenuti su altre reti possono risultare diversi.

Nota 2: "con commutatore sotto carico" significa che una certa comunicazione di olio e/o gas è possibile fra il contenitore dell'interruttore di commutazione e la cassa principale o fra i rispettivi conservatori d'olio.

Questi gas possono contaminare l'olio nella cassa principale ed influenzare i normali valori rilevabili in questi tipi di macchine.

"senza commutatore sotto carico" significa che il trasformatore non è provvisto di questo componente o se lo è non esiste possibilità di comunicazione o di fuga dell'olio e/o del gas verso la cassa principale.

Nota 3: Alcuni paesi hanno dichiarato valori tipici di C2H2<0.5 ppm e di C2H4<10 ppm.

(*) questi valori sono influenzati dal progetto e dal montaggio del commutatore sotto carico. Per questa ragione non è possibile proporre valori statistici significativi per l'acetilene.

Per ciascun tipo di componente elettrico ,la CEI EN 60599 riporta in particolare per i trasformatori di potenza, i valori tipici di crescita dei gas in millilitri al giorno(ml/giorno) secondo quanto riportato nella seguente tabella5

Idrogeno(H ₂)	<5
Metano(CH ₄)	<2
Etano(C ₂ H ₆)	<2
Etilene(C ₂ H ₄)	<2
Acetilene(C ₂ H ₂)	<0.1
Ossido di carbonio (CO)	<50
Anidride carbonica(CO ₂)	<200

-
Tabella 5 valori tipici dei tassi di crescita dei gas per trasformatori di potenza, espressi in ml/giorno

NOTA - I valori elencati in questa tabella sono stati ottenuti da reti singolari.

- Valori ottenuti su altre reti possono risultare diversi.

- Valori per altri tipi di trasformatori, ad esempio trasformatori sigillati, possono anch'essi differire.

Della norma CEI EN 60599 nella tabella A.1 sono indicati i guasti tipici nei trasformatori di potenza:

Tipo	Guasto	esempio
PD	Scariche parziali	Scariche nelle cavità gassose derivanti da un'impregnazione incompleta, dall'elevata umidità della carta, dalla supersaturazione dell'olio o della cavitazione e che comportano la formazione di paraffina solida.
D1	Scariche di debole energia	Scintillamento o archi tra cattive connessioni di potenziali diversi o flottanti, provenienti da anelli di schermatura, toroidi, dischi o conduttori adiacenti di avvolgimenti, brasatura rotta o anelli dechiusi nel nucleo . Scariche tra le parti di serraggio, i passanti e la cassa, l'alta tensione e la terra all'interno degli avvolgimenti, sulle pareti della cassa. Tracciature nei blocchi di legno, nella colla delle travi isolanti, nei distanziatori degli avvolgimenti. Cedimento nell'olio corrente di interruzione del selettore
D2	Scariche di alta energia	Scariche superficiali, tracce o archi di alta energia locale o con corrente sostenuta. Cortocircuiti tra bassa tensione e la terra, i connettori, gli avvolgimenti, i passanti e la cassa, le sbarre di rame e la cassa, gli avvolgimenti ed il nucleo, nel condotto dell'olio, nella torretta. Anelli chiusi tra due conduttori adiacenti attorno al flusso magnetico principale, i bulloni isolati del nucleo, gli anelli metallici che sostengono le colonne del nucleo.
T1	Guasto termico $t < 300^{\circ}\text{C}$	Sovraccarico del trasformatore in situazioni di emergenza. Elemento bloccante che limita il flusso di olio negli avvolgimenti. Flusso disperso nelle travi di smorzamento dei gioghi.
T2	Guasto termico $300^{\circ}\text{C} < t < 700^{\circ}\text{C}$	Contatti difettosi tra le connessioni imbullonate (tra le sbarre di alluminio) , i contatti scorrevoli, i contatti all'interno dell'interruttore selettore (formazione di carbone pirolitico), le connessioni tra il cavo e i conduttori estraibili dei passanti. Correnti di circolazione tra i serraggi dei gioghi ed i bulloni, i serraggi ed i lamierini , nella messa a terra , saldature e serraggi difettosi nelle schermature metalliche. Isolamento danneggiato tra i conduttori adiacenti paralleli negli avvolgimenti
T3	Guasto termico $t > 700^{\circ}\text{C}$	Forti correnti di circolazione nella cassa e nel nucleo. Correnti minori nella parete della cassa create da un campo magnetico elevato non compensato. Cavallotti nei lamierini di acciaio del nucleo.

Tabella A.1 Guasti tipici nei trasformatori di potenza.

5. Efficienza, perdite e regolamento

5.1 Efficienza

I trasformatori di potenza sono molto efficienti, tipicamente 99.5% o superiore, vale a dire che le perdite di potere reale sono generalmente meno dello 0.5% del valore nominale in KVA a pieno carico . l'efficienza deriva della potenza nominale e delle perdite sostenute nel trasformatore. La

Efficienza = [potenza in KVA / (potenza in KVA + le perdite totale)]* 100%

Generalmente diminuisce leggermente con l'aumento di carico . le perdite totali sono la somma di tutte le perdite nei trasformatori (perdite nel ferro e perdite nel rame).

5.2 Perdite

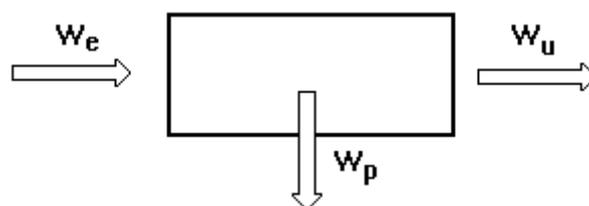
- Le perdite nel ferro sono essenzialmente la potenza necessaria per mantenere il nucleo eccitato. Queste sono comunemente denominate "per isteresi e correnti parassite", ed esistono ogni volta che l'unità è alimentata. Loro dipendono in primo luogo della tensione e frequenza, in condizioni operative variano solo leggermente con il sistema .

- Le perdite di carico denominate anche perdite nel rame, sono provocate da correnti di carico che passano attraverso il trasformatore. Le due componenti delle perdite di carico sono le perdite joule e le perdite parassite. Le perdite joule sono perdite basate sulla misurazione DC (corrente continua) la resistenza, la cui maggior parte è dovuta ai conduttori degli avvolgimenti e la corrente in un determinato carico. Le perdite parassite è un termine dato per l'accumulo di ulteriori perdite registrate dal trasformatore, che include le perdite dell'avvolgimento e le perdite dovute agli effetti del flusso di dispersione che entrano nell'interno strutture metalliche.

Le perdite ausiliare si riferiscono alla potenza necessaria per eseguire dispositivi ausiliari di raffreddamento, come ventilatori e pompe, e in genere non sono inclusi nelle perdite totali come sopra definito.

5.2.1 Perdita di energia

Un transito di energia (per esempio trasformatore elettrico) si ha sempre che l'energia uscente(W_u) è minore dell'energia entrante(W_e). La differenza fra quelle due energie rappresenta l'energia perduta (W_p)



$$W_p = W_e - W_u$$

Facendo riferimento all'unità di tempo, in luogo delle energie si possono considerare le potenze, per cui si ha:

$$P_p = P_e - P_u$$

Il rendimento del complesso risulta definito da:

$$\eta = \frac{P_u}{P_e} = \frac{P_u}{P_u + P_p} = \frac{P_e - P_p}{P_e}$$

L'energia perduta, trasformandosi in energia termica, determina una sopraelevazione di temperatura del complesso rispetto alla temperatura ambiente. A regime la temperatura Θ_{reg} raggiunta dal complesso dovrà, per ragioni di sicurezza riguardanti i materiali isolanti, essere inferiore o al limite uguale alla temperatura massima Θ_{max} che tali materiali possono sopportare.

Occorre cioè che risulti:

$$\Theta_{reg} \leq \Theta_{max}$$

Lo studio del problema termico può essere suddiviso in tre parti

- Generazione del calore
- Trasmissione del calore
- Asportazione del calore

5.2.1.1 Generazione del calore

In una macchina elettrica si genera calore a seguito delle perdite che si manifestano in essa durante il suo funzionamento. In cui le principali sono:

Perdite nel ferro

Nei nuclei magnetici delle macchine elettriche si hanno perdite di potenza attiva dovute a:

1) Isteresi magnetica

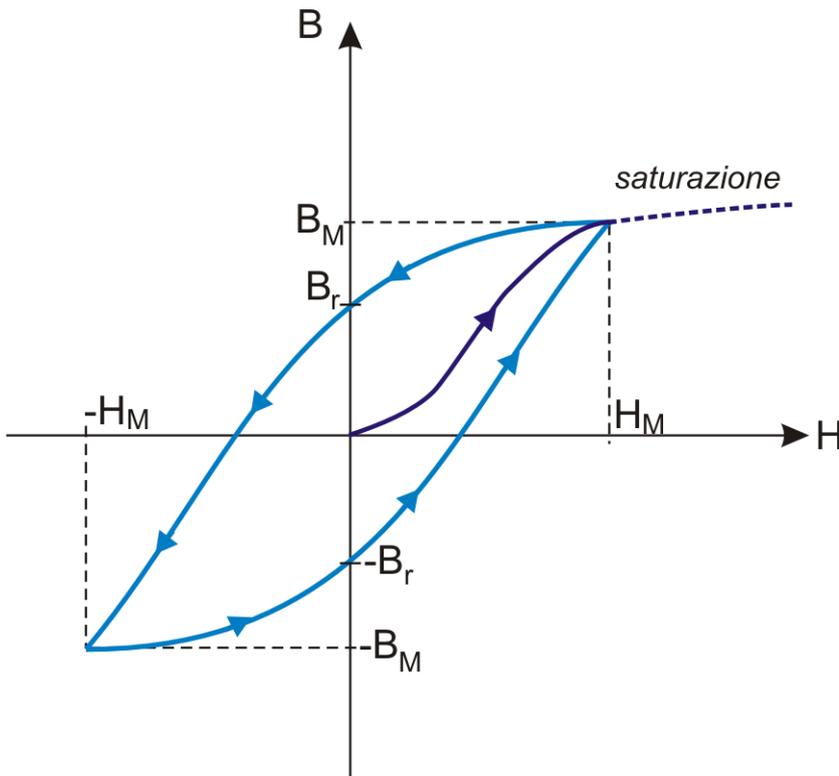
2) Correnti parassite

Entrambi i fenomeni sono legati alla variabilità nel tempo del flusso magnetico. Sono dette perdite nel ferro, in quanto i nuclei magnetici sono costituiti da leghe di ferro. Nel caso di flusso magnetico costante, tali perdite sono nulle.

Perdite dovuto ad isteresi

Il fenomeno dell'**isteresi magnetica** si manifesta quando un nucleo di materiale ferromagnetico è sottoposto a magnetizzazione ciclica alternativa. Ciò si verifica, ad esempio, quando un nucleo di materiale ferromagnetico è sede di un flusso magnetico Φ variabile alternativamente nel tempo, in quanto prodotto da una corrente i variabile alternativamente nel tempo. A causa del fenomeno dell'**isteresi magnetica**, l'energia fornita al nucleo durante la fase di magnetizzazione non viene interamente restituita durante

quella di smagnetizzazione, ma, ad ogni ciclo, rimane immagazzinata nel nucleo magnetico una quantità di energia proporzionale all'area del ciclo stesso.



La **potenza persa per isteresi** (= energia persa per unità di tempo) è proporzionale al numero di cicli d'isteresi descritti in un secondo.

Le **perdite per isteresi** dipendono da:

- **tipo di materiale**, in base a cui varia la forma e la dimensione del ciclo;
- **valore dell'induzione massima B_M** , all'aumentare del quale il ciclo diventa più ampio;
- **frequenza della corrente magnetizzante f** , il cui aumento determina un maggior numero di cicli descritti nell'unità di tempo.

Formula di Steinmetz:

$$P_{ist} = k_{ist} \cdot f \cdot B_M^n$$

permette di calcolare la perdita specifica per unità di volume [W/m^3] o per unità di massa [W/kg], a seconda di come viene espressa la costante k_{ist} , che dipende dal **tipo di materiale**.

Il coefficiente n è detto **esponente di Steinmetz** e assume i seguenti valori:

- $n = 1,6$ per $B_M < 1 \text{ T}$
- $n = 2$ per $B_M \geq 1 \text{ T}$

Utilizzando il ferro-silicio, è possibile ridurre l'area del ciclo di isteresi e, di conseguenza, le perdite per isteresi.

Perdite per correnti parassite

Le correnti indotte parassite nascono nei corpi conduttori quando:

- 1) il corpo conduttore è investito da flusso magnetico variabile nel tempo;
- 2) il corpo conduttore si muove in campi magnetici costanti.

Ciò accade come conseguenza della legge di Faraday relativa al fenomeno dell'induzione magnetica.

Quando un circuito elettrico si concatena con un flusso magnetico variabile nel tempo, nel circuito elettrico nasce una f.e.m. indotta:

$$e = \frac{d\Psi}{dt}$$

$\Psi = N\Phi$ è il flusso concatenato con N spire

$\Phi = BA$ è il flusso magnetico che varia:

- Quando varia B, ossia quando varia la corrente magnetizzante
- Quando varia A, ossia quando la spira muove o si deforma.

Se la f.e.m. indotta agisce in un circuito chiuso di resistenza R , nel circuito si ha circolazione di una corrente indotta parassita pari a e/R .

Consideriamo il 1° caso: un nucleo in ferro massiccio, sede di un flusso magnetico Φ variabile nel tempo, in quanto prodotto da una corrente magnetizzante i variabile nel tempo (ad es., alternata sinusoidale).

In un piccolo tronco di nucleo di altezza h e spessore δ sono presenti tanti percorsi chiusi (spire). Poiché il flusso concatenato con queste spire varia nel tempo, esse diverranno sede di f.e.m. indotte e quindi di correnti indotte parassite i_p .

Nel tronco di nucleo considerato si hanno tante correnti indotte parassite circolanti in modo vorticoso. Queste correnti determinano una dissipazione di energia elettrica in calore nel materiale. Più alta è la

resistività del materiale ρ , più piccola risulterà l'intensità delle correnti parassite e quindi minore sarà la dissipazione di energia elettrica in calore.

La formula:

$$P_{cp} = \frac{k'_{cp} \cdot \delta^2 \cdot f^2 \cdot B_M^2}{\rho} = k_{cp} \cdot f^2 \cdot B_M^2$$

δ = spessore nucleo

permette di calcolare la perdita specifica per unità di volume [W/m^3] o per unità di massa [W/kg], a seconda di come viene espressa la costante k'_{cp} , che dipende dal tipo di materiale.

Per diminuire gli effetti delle correnti parassite occorre aumentare la resistenza dei possibili percorsi che le correnti indotte trovano all'interno nel conduttore investito da flusso magnetico variabile nel tempo:

- suddividendo il nucleo massiccio in tante lamiere sottili, parallele alle linee di flusso (e quindi diminuendo lo spessore δ);

- aumentando la resistività dei materiali impiegati (ad es., utilizzando ferro silicio anziché ferro dolce: la resistività del ferro silicio è 4 volte maggiore di quella del ferro dolce).

Proprio al fine di limitare le perdite per correnti parassite, i nuclei dei trasformatori sono generalmente laminati con spessori $\delta = 0,35 \div 0,5$ mm.

I lamierini sono isolati tra loro:

- con vernici termoindurenti;
- facendo ossidare il ferro sulle superfici del lamierino;
- con carta (metodo non più usato).

I lamierini possono essere:

- in **ferro-silicio** ordinari (nelle macchine rotanti e nei trasformatori di piccola potenza);
- in **ferro-silicio** speciali a **cristalli orientati** (in quasi tutti i trasformatori).

N.B.: E' sempre presente anche una piccola percentuale di carbonio ($0,06 \div 0,1\%$).

Lamierini in ferro silicio

L'impiego del **silicio** ha due vantaggi:

- riduce l'ampiezza del ciclo di isteresi del materiale;
- aumenta la resistività elettrica ρ del materiale.

Quindi, l'impiego del **silicio** fa diminuire sia le perdite per isteresi, sia le perdite per correnti parassite.

Lo svantaggio è che il silicio rende il materiale molto fragile. Pertanto, la percentuale di silicio è limitata a un massimo del 5% per i trasformatori

Le perdite nei materiali magnetici dovute a isteresi e a correnti parassite possono essere stimate attraverso le formule semi-empiriche già citate.

Tuttavia, nella pratica, generalmente non sono noti i valori delle costanti k_{ist} e k_{cp} .

I produttori di materiali magnetici forniscono però un particolare valore di perdita specifica, determinato sperimentalmente, detto **cifra di perdita**.

La **cifra di perdita** [W/kg] è definita come la perdita specifica, per isteresi e per correnti parassite, che si ha quando un materiale è investito da un campo magnetico alternato sinusoidale a frequenza $f = 50$ Hz con induzione massima fissata B_M .

Generalmente si fa riferimento a $B_M = 1$ T oppure $B_M = 1,5$ T.

Se è nota la cifra di perdita P_0 per $B_0 = 1$ T, allora la perdita specifica P_{fs} per $B_M = 1,2$ T è data da:

$$P_{fs} = P_0 \left(\frac{B_M}{B_0} \right)^2 = P_0 \left(\frac{1,2}{1} \right)^2$$

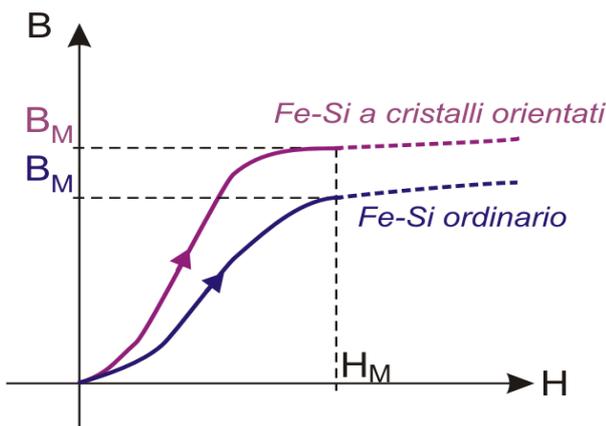
I **lamierini a cristalli orientati** sono ottenuti da lamiere di alcuni millimetri di ferro silicio al 3% laminate a caldo. Queste lamiere vengono successivamente laminate a freddo e sottoposte, tra una laminazione e l'altra, ad opportuni trattamenti termici, fino a ottenere lamiere di spessore $\delta = 0,35$ mm.

Con questo procedimento, i domini magnetici (cristalli) del materiale si "organizzano" in modo da presentare proprietà magnetiche decisamente migliori, se soggetti a flussi nella direzione della cristallizzazione.

La cifra di perdita è $0,4 \div 0,5$ W/kg (con $B_{\max} = 1$ T), quando le linee di flusso sono nella direzione della laminazione.

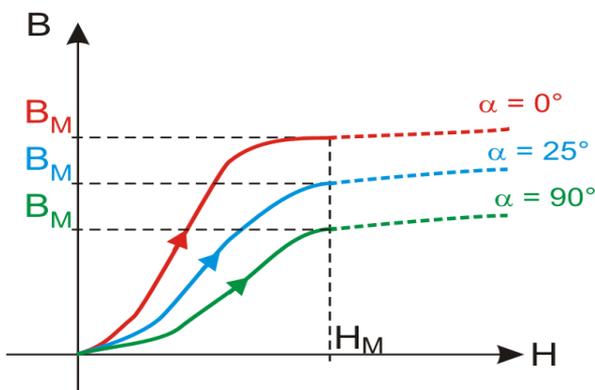
Nella direzione ortogonale al senso di laminazione, le perdite specifiche sono circa 3 volte superiori ($1,5 \div 2$ W/kg), ma comunque paragonabili a quelle dei lamierini ordinari in ferro silicio al 2-2,5%.

Nei lamierini a cristalli orientati, rispetto a quelli ordinari, è più elevata la permeabilità magnetica e aumenta anche il valore massimo di induzione magnetica B che si può ottenere (valore corrispondente al "ginocchio" della curva di magnetizzazione B - H , prima di arrivare alla saturazione), sempre nel caso in cui la direzione della magnetizzazione sia quella della laminazione.



All'aumentare dell'angolo di scostamento α tra la direzione in cui il materiale è magnetizzato durante il funzionamento e quella della laminazione, i valori dell'induzione B corrispondenti ai diversi valori di H diminuiscono.

Di conseguenza, il ciclo di isteresi si allarga e le perdite specifiche del materiale aumentano.



Perdite nel rame(per effetto joule)

Possono essere espresse con una relazione del tipo:

$$P_{cu} = 2,4 \cdot \delta^2 \cdot G_{cu}$$

dove:

- P_{cu} = perdite nel rame (W)
- δ = densità di corrente (A/mm²)
- G_{cu} = peso del rame (Kg)

Esse dipendono generalmente dal carico.

Espressione delle perdite nel rame

Le perdite per effetto Joule in un conduttore di resistenza R percorso da una corrente I valgono:

$$P_{cu} = R \cdot I^2$$

Ricordando che:

$$R = \frac{\rho \cdot l}{S} \quad \text{e} \quad I = \delta \cdot S$$

e sostituendo, si ottiene:

$$P_{cu} = \frac{\rho \cdot l}{S} \cdot \delta^2 \cdot S^2 = \rho \cdot \delta^2 \cdot S \cdot l$$

Il prodotto $S \cdot l$ rappresenta il volume (Vol) del conduttore, per cui si ha anche:

$$P_{cu} = \rho \cdot \delta^2 \cdot Vol$$

Moltiplicando e dividendo il secondo membro per il peso specifico γ , e ricordando che $Vol \cdot \gamma = G_{cu}$ (peso del rame), si ha:

$$P_{cu} = \rho \cdot \delta^2 \cdot Vol \cdot \frac{\gamma}{\gamma} = \frac{\rho}{\gamma} \cdot \delta^2 \cdot G_{cu}$$

Nella espressione precedente, per ottenere le perdite in [W], le varie grandezze a secondo membro devono essere espresse nelle seguenti unità di misura:

$$r [\Omega\text{m}], g \left[\frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \right], d \left[\frac{\text{A}}{\text{m}^2} \right], G_{\text{cu}} [\text{Kg}]$$

Siccome normalmente la densità di corrente d si esprime, per comodità, in $\left[\frac{\text{A}}{\text{mm}^2} \right]$ si deve operare la conversione in $\left[\frac{\text{A}}{\text{m}^2} \right]$:

$$d \left[\frac{\text{A}}{\text{mm}^2} \right] = d \left[\frac{\text{A}}{10^{-6} \text{m}^2} \right] = \delta \cdot 10^6 \left[\frac{\text{A}}{\text{m}^2} \right]$$

Inoltre la resistenza del rame va riportata a 75°C (temperatura convenzionale di riferimento delle perdite

$$\begin{aligned} P_{75} &= P_{20} \cdot \frac{234,5 + 75}{234,5 + 20} = P_{20} \cdot 1,216 = 0,0178 \cdot 1,216 = 0,021 \left[\frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}} \right] = \\ &= 0,0216 \left[\frac{\Omega \cdot 10^{-6} \text{m}^2}{\text{m}} \right] = 0,0216 \cdot 10^{-6} [\Omega \cdot \text{m}] \end{aligned}$$

Ricordando, infine, che il peso specifico del rame vale:

$$g = 8900 \left[\frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \right]$$

si ha:

$$P_{\text{cu}} = \frac{0,0216 \cdot 10^{-6}}{8900} \cdot (\delta \cdot 10^6)^2 \cdot G_{\text{cu}}$$

da cui:

$$P_{\text{cu}} \cong 2,4 \cdot \delta^2 \cdot G_{\text{cu}}$$

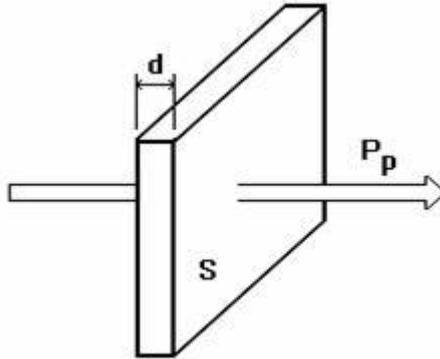
5.2.1.2. Trasmissione del calore

La trasmissione del calore nelle macchine elettriche avviene secondo le tre tipiche forme:

- trasmissione per conduzione
- trasmissione per convezione
- trasmissione per irraggiamento

5.2.1.2.1 Trasmissione per conduzione

Tale forma di trasmissione del calore è tipica dei corpi solidi (sebbene essa avvenga anche in seno ai liquidi e ai gas). Essa avviene senza alcun movimento di materia, ed è il caso tipico della trasmissione del calore fra due superfici di un corpo solido.



$$P_p = \frac{\lambda \cdot S}{d} \cdot \Delta\theta$$

- P_p = potenza trasformata in calore che si trasmette da una superficie all'altra in un secondo (W)
- S = superficie attraverso la quale avviene la trasmissione (m^2)
- d = distanza fra le due superfici (m)
- λ = conduttività termica del corpo ($W/m \text{ } ^\circ C$)
- $\Delta\theta$ = differenza di temperatura fra le due superfici ($^\circ C$)

Nelle macchine elettriche tale tipo di trasmissione del calore si ha all'interno dei materiali attivi (avvolgimenti e nuclei magnetici).

5.2.1.2.2 Trasmissione per convezione

È caratteristica dei corpi liquidi e gassosi. Essa avviene con movimento di materia all'esterno delle sorgenti termiche: in tal caso il calore si propaga perché le parti del fluido caldo si spostano verso zone di fluido freddo mescolandosi e sostituendosi ad esso. La trasmissione del calore per convezione è esprimibile con la seguente legge:

$$P_p = K_c \cdot S_c \cdot \Delta\theta$$

- P_p = potenza trasformata in calore trasmessa al fluido dal corpo caldo in un secondo (W)
- S_c = superficie attraverso la quale il calore si trasmette al fluido (m^2), superficie utile per la convezione
- K_c = Coefficiente di trasmissione del calore per convezione ($W/m^2 \text{ } ^\circ C$)
- $\Delta\theta$ = sovratemperatura del corpo rispetto al fluido ($^\circ C$)

Nelle macchine elettriche tale tipo di trasmissione del calore si ha tra le superfici esterne degli avvolgimenti e dei nuclei e il fluido a contatto con tali parti (aria o olio per i trasformatori).

5.2.1.2.3 Trasmissione irraggiamento

Avviene in generale dalle pareti dei corpi solidi all'aria circostante senza movimento di materia (può avvenire anche nel vuoto). È una forma di trasmissione del calore sotto forma di onde elettromagnetiche le quali, colpendo un corpo, trasformano la propria energia in calore. La trasmissione del calore per irraggiamento viene espressa con la legge di Stefan-Boltzmann:

$$P_p = K_i \cdot \left[\left(\frac{\theta_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{\theta_2}{100} \right)^4 \right] \cdot S_i$$

- P_p = potenza trasformata in calore irradiata all'ambiente dal corpo caldo in un secondo (W)
- S_i = superficie attraverso la quale il calore si trasmette all'ambiente (m^2), superficie utile per l'irraggiamento
- θ_1 = temperatura assoluta (K) del corpo radiante
- θ_2 = temperatura assoluta (K) dell'ambiente
- K_i = coefficiente di trasmissione del calore per irraggiamento ($W/m^2 K^4$)

Nelle macchine elettriche tale tipo di trasmissione del calore è quella che avviene fra le superfici esterne della macchina (per esempio, cassone dell'olio nei trasformatori in olio) e l'aria circostante. Poiché nel caso delle macchine elettriche risulta relativamente limitato il salto termico fra macchina e ambiente, si può adottare per la trasmissione del calore per irraggiamento una espressione simile a quella vista per la convezione:

$$P_p = K'_i \cdot S_i \cdot \Delta\theta$$

Con ciò la trasmissione del calore per irraggiamento può esprimersi anch'essa, così come quella per convezione, con una espressione lineare (proporzionalità fra quantità di calore trasmessa e sovratemperatura), per cui si può adottare un'unica espressione che tenga conto globalmente delle due forme di trasmissione del calore:

$$P_p = K \cdot S \cdot \Delta\theta$$

- P_p = potenza trasformata in calore e trasmessa all'ambiente per convezione e irraggiamento in un secondo (W)
- S = superficie attraverso la quale il calore si trasmette all'ambiente per convezione e irraggiamento (m^2)
- K = coefficiente globale di trasmissione del calore per convezione e irraggiamento ($W/m^2 \text{ } ^\circ\text{C}$)
- $\Delta\theta$ = sovratemperatura della macchina sull'ambiente ($^\circ\text{C}$)

5.2.3 Le curve di riscaldamento e raffreddamento

5.2.3.1 Curva di riscaldamento

Le perdite, in una macchina elettrica, si trasformano in calore facendo aumentare la sua sovratemperatura rispetto alla temperatura ambiente. La temperatura cresce fino a che tutto il calore prodotto dalle perdite viene ceduto all'ambiente. A quel punto la macchina raggiunge la condizione di regime e la sovratemperatura si stabilizza al valore $\Delta\theta_{\max}$, esprimibile con la relazione:

$$\Delta\theta_{\max} = \frac{P_p}{K \cdot S}$$

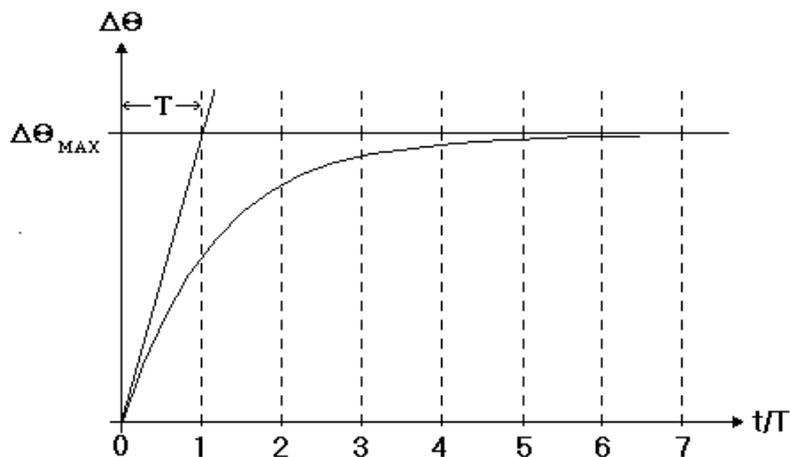
L'andamento nel tempo della sovratemperatura può essere espresso, per un corpo omogeneo, con una relazione del tipo:

$$\Delta\theta = \Delta\theta_{\max} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right)$$

dove "T" è la "costante di tempo termica" del corpo che vale:

$$T = \frac{c \cdot M}{K \cdot S}$$

- T = costante di tempo termica (s)
- M = massa del corpo (Kg)
- c = calore specifico del corpo (J/Kg °C)
- K = coefficiente globale di trasmissione del calore (W/m² °C)
- S = superficie disperdente del calore (m²)



Come si nota dal grafico, la condizione di regime (raggiungibile teoricamente dopo un tempo infinito) viene raggiunta, in pratica, dopo un tempo pari a circa 5 volte la costante di tempo.

Costante di tempo termica

La costante di tempo termica può essere ricavata dalla curva di riscaldamento (o di raffreddamento) operando nel seguente modo:

- si traccia la tangente alla curva di riscaldamento all'origine;
- si determina il punto d'intersezione fra tale retta e la retta parallela all'asse delle ascisse di equazione $\Delta\theta = \Delta\theta_{\max}$ (asintoto orizzontale della curva di riscaldamento);
- l'ascissa di tale punto d'intersezione rappresenta la costante di tempo termica T.

Analiticamente la costante di tempo T può essere calcolata nel seguente modo:

- Si fa la derivata prima rispetto al tempo della curva di riscaldamento:

$$\frac{d(\Delta\theta)}{dt} = \frac{1}{T} \cdot \Delta\theta_{\max} \cdot e^{-\frac{t}{T}}$$

- Il valore di tale derivata nel punto $t = 0$ rappresenta il coefficiente angolare della tangente alla curva in quel punto:

$$\left(\frac{d(\Delta\theta)}{dt}\right)_{t=0} = \frac{\Delta\theta_{\max}}{T}$$

- La retta tangente alla curva di riscaldamento nell'origine ha pertanto l'equazione:

$$\Delta\theta = \frac{\Delta\theta_{\max}}{T} \cdot t$$

- La retta parallela all'asse delle ascisse passante per il punto di ordinata $\Delta\theta$ è:

$$\Delta\theta = \Delta\theta_{\max}$$

- Il punto d'intersezione fra le due rette si ottiene risolvendo il seguente sistema:

$$\begin{cases} \Delta\theta = \frac{\Delta\theta_{\max}}{T} \cdot t \\ \Delta\theta = \Delta\theta_{\max} \end{cases}$$

da cui si ottiene:

$$\frac{\Delta\theta_{\max}}{T} \cdot t = \Delta\theta_{\max}$$

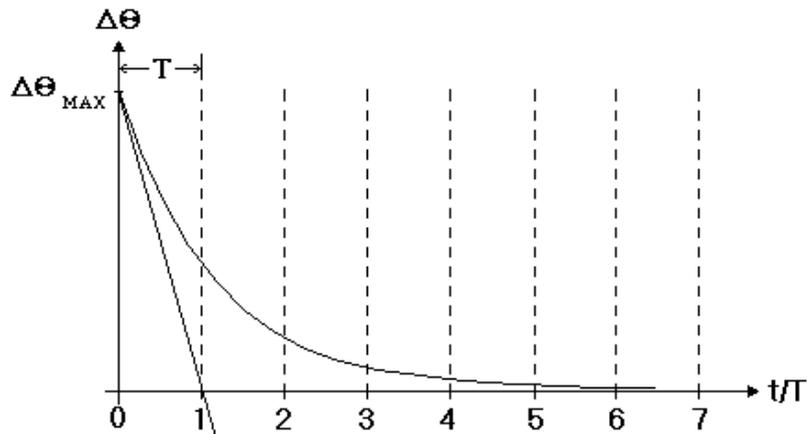
e quindi:

$$t = T$$

5.2.3.2 Curva di raffreddamento

Quando si annullano le perdite, perché la macchina cessa di funzionare, la sua sovratemperatura diminuisce gradualmente fino a raggiungere la temperatura ambiente. L'andamento nel tempo della sovratemperatura è rappresentato dalla "curva di raffreddamento", che, per un corpo omogeneo ha una espressione del tipo:

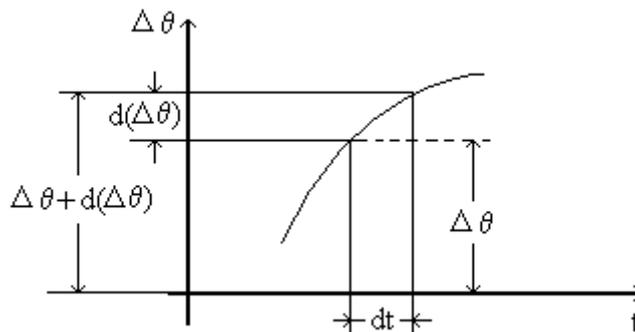
$$\Delta\theta = \Delta\theta_{\max} \cdot e^{-\frac{t}{T}}$$



Anche in questo caso il tempo di raffreddamento è, in pratica, pari a circa 5 volte la costante di tempo.

5.2.3.2 Equazioni delle curve di riscaldamento e raffreddamento

Si consideri un intervallo di tempo dt durante il quale la sovratemperatura aumenta della quantità $d(\Delta\theta)$, passando dal valore $\Delta\theta$ al valore $\Delta\theta + d(\Delta\theta)$:



Durante tale intervallo di tempo si ha il seguente bilancio termico:

- Calore prodotto per effetto delle perdite:

$$dW_p = P_p \cdot dt$$

- Calore immagazzinato nella macchina elettrica:

$$dW_i = M \cdot c \cdot d(\Delta\theta)$$

- Calore ceduto all'ambiente:

$$dW_c = K \cdot S \cdot \Delta\theta \cdot dt$$

Il calore prodotto è uguale alla somma del calore immagazzinato e di quello ceduto:

$$dW_p = dW_i + dW_c$$

vale a dire (sostituendo le espressioni precedenti):

$$P_p \cdot dt = M \cdot c \cdot d(\Delta\theta) + K \cdot S \cdot \Delta\theta \cdot dt$$

dividendo ambo i membri per dt, si ha:

$$P_p = M \cdot c \frac{d(\Delta\theta)}{dt} + K \cdot S \cdot \Delta\theta$$

Risolvendo l'equazione differenziale si ottiene:

$$\Delta\theta = \frac{P_p}{K \cdot S} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\frac{M \cdot c}{K \cdot S}}} \right)$$

Ponendo poi:

$$\frac{P_p}{K \cdot S} = \Delta\theta_{\max} \quad (\text{sovratemperatura a regime})$$

$$\frac{M \cdot c}{K \cdot S} = T \quad (\text{costante di tempo termica})$$

si ha infine

$$\Delta\theta = \Delta\theta_{\max} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right)$$

che rappresenta appunto l'equazione della curva di riscaldamento.

In maniera analoga si può ricavare l'equazione della curva di raffreddamento. L'unica variazione è che, in questo caso, il calore prodotto è zero ($dW_p = 0$). Pertanto si ha:

$$0 = dW_i + dW_c$$

cioè:

$$M \cdot c \cdot d(\Delta\theta) + K \cdot S \cdot \Delta\theta \cdot dt = 0$$

e quindi:

$$M \cdot c \cdot \frac{d(\Delta\theta)}{dt} + K \cdot S \cdot \Delta\theta = 0$$

Risolvendo:

$$\Delta\theta = \frac{P_p}{K \cdot S} \cdot e^{-\frac{t}{\frac{Mc}{KS}}}$$

E infine:

$$\Delta\theta = \Delta\theta_{\max} \cdot e^{-\frac{t}{T}}$$

5.3 Regolazione

La regolazione è definita come la variazione della tensione di uscita che si verifica quando la tensione a pieno carico sul trasformatore è ridotta rispetto alla tensione a vuoto, mentre la tensione d'ingresso è mantenuta costante. Essa è tipicamente espressa in percentuale, o per unità della tensione nominale di uscita a carico nominale. La formula generale della regolazione è:

$$\% \text{ regolazione} = [(V_{NL} - V_{FL})/V_{FL}] \times 100$$

Dove:

V_{NL} = tensione a vuoto .

V_{FL} = tensione a pieno carico.

6. Parallelo dei trasformatori

Quando si verifica la necessità di trasferire grosse potenze da un circuito all'altro, può risultare conveniente ricorrere al parallelo fra due o più trasformatori (figura 6.1).

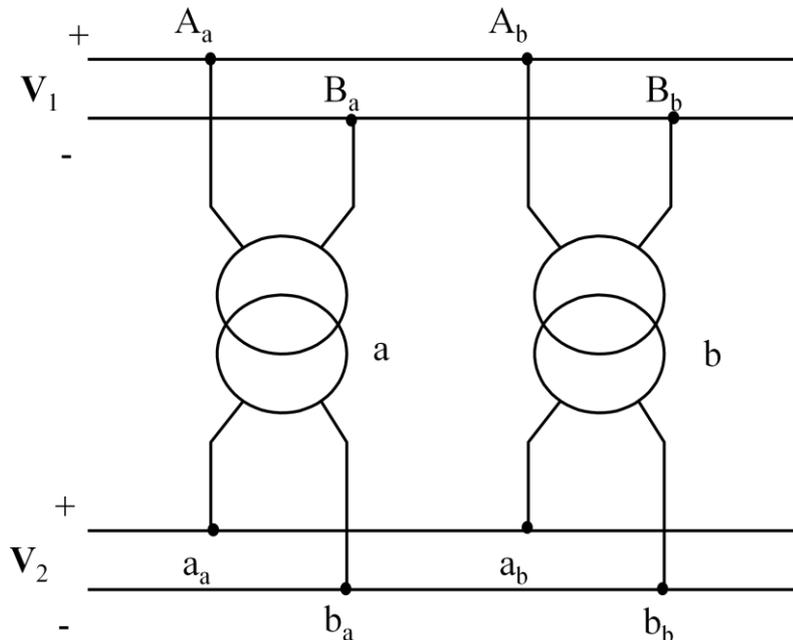


Figura 6.1: Parallelo di due trasformatori

Affinché il parallelo tra due trasformatori funzioni correttamente, devono essere verificate le seguenti condizioni:

1. I trasformatori devono avere le stesse tensioni nominali sia primaria che secondaria (la stessa tensione nominale primaria e lo stesso rapporto di trasformazione a vuoto). Se così non fosse, si avrebbe infatti, nel funzionamento a vuoto, una circolazione di corrente nella maglia costituita dagli avvolgimenti secondari dei trasformatori collegati in parallelo (maglia $a_a - b_a - b_b - a_b - a_a$ della figura 6.1)
2. Nel caso di trasformatori trifase, questi devono avere lo stesso gruppo di appartenenza. Se i due trasformatori trifase, pur verificando la condizione di cui al punto 1, avessero diversi gruppi di appartenenza, sarebbe comunque presente, nel funzionamento a vuoto, una circolazione di corrente nei secondari dei trasformatori, dovuta alla differenza di fase delle f.e.m. indotte nei avvolgimenti secondari in parallelo.
3. I due trasformatori in parallelo devono avere la stessa tensione di corto circuito e lo stesso fattore di potenza di corto circuito. Questa condizione è richiesta affinché si abbia un corretto funzionamento del parallelo in presenza di un carico che richiede che:
 - a) Le correnti secondarie siano in fase fra di loro,
 - b) La potenza erogata si ripartisca tra i due trasformatori in maniera direttamente proporzionale alle rispettive potenze apparenti nominali.

Se le due correnti secondarie non sono in fase tra di loro, a parità di corrente erogata al carico si hanno maggiori perdite nel parallelo, a causa del valore più elevato delle correnti secondarie, rispetto al caso in cui tali correnti risultano in fase.

Se la potenza non si ripartisce tra i due trasformatori in misura direttamente proporzionale alle rispettive potenze nominali, quando il carico è tale da assorbire da uno dei due trasformatori la sua potenza nominale, inevitabilmente il secondo trasformatore assorbe una potenza inferiore a quella nominale, risultando così sotto sfruttato, oppure assorbe una potenza superiore a quella nominale, condizione quest'ultima assolutamente da evitare in quanto porta al guasto del trasformatore stesso.

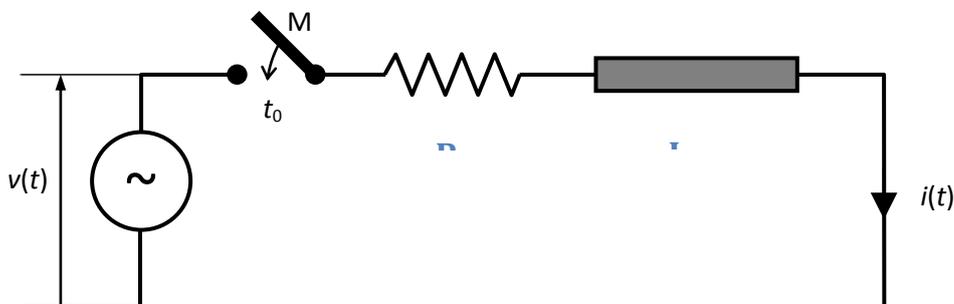
7.Sovracorrenti nei trasformatori

L'origine e le conseguenze delle sovracorrenti che possono sollecitare l'avvolgimento di un trasformatore durante un corto circuito ai morsetti del secondario.

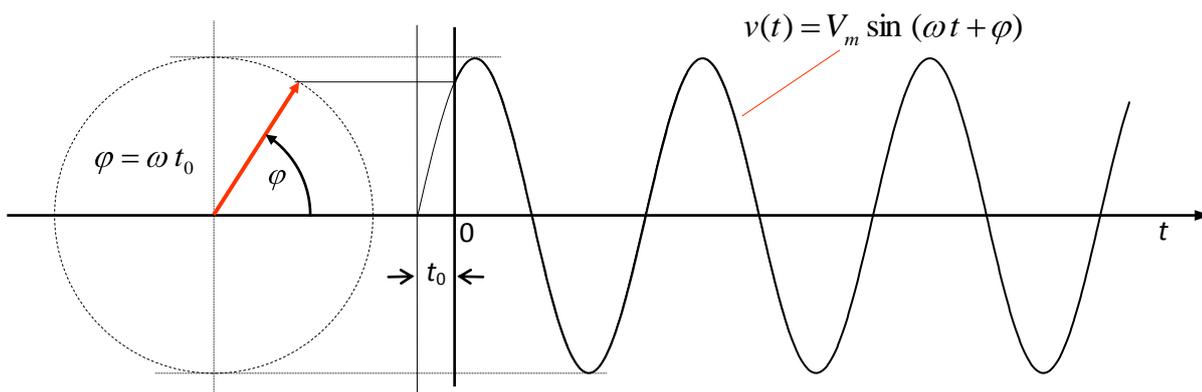
7.1 - Corto circuito in un trasformatore

7.1.1 - Transitorio di corto circuito

Consideriamo il circuito equivalente di una fase di un trasformatore; riportando tutto al secondario e trascurando le correnti a vuoto si ottiene il circuito seguente:



La tensione $v(t)$ è sinusoidale, $v(t) = \sin \omega t$, mentre la chiusura dell'interruttore M all'istante t_0 definisce l'inizio del transitorio che vogliamo determinare; ponendo $t = 0$ all'istante t_0 , la tensione $v(t)$ è data da $v(t) = V_m \sin(\omega t + \varphi)$, con $\varphi = \omega t_0$:



La corrente $i(t)$ che percorre l'avvolgimento del trasformatore durante il transitorio è definita dalla seguente equazione

$$7.1.1 \quad L \frac{di}{dt} + Ri = V_m \sin(\omega t + \varphi)$$

L'omogenea associata a questa equazione differenziale è data da $L \frac{di}{dt} + Ri = 0$, ed ha come soluzione

$$i_0(t) = C e^{-t/\tau} \quad \text{dove la costante di tempo è } \tau = \frac{R}{L}$$

L'integrale generale è quindi dato da $i(t) = i_0(t) + i_p$ dove i_p è un integrale particolare della 7.1.1). Per determinare questo integrale particolare poniamo

$$i_p = A \cos(\omega t + \varphi) + B \sin(\omega t + \varphi)$$

dove A e B sono delle costanti. Derivando si ottiene

$$i'_p = -A\omega \sin(\omega t + \varphi) + B\omega \cos(\omega t + \varphi)$$

per cui dall'equazione 7.1.1, che può essere scritta

$$L \frac{di_p}{dt} + Ri_p = V_m \sin(\omega t + \varphi)$$

si ha:

$$L \cdot (-A\omega \sin(\omega t + \varphi) + B\omega \cos(\omega t + \varphi)) + R(A \cos(\omega t + \varphi) + B \sin(\omega t + \varphi)) = V_m \sin(\omega t + \varphi)$$

$$(BR - AL\omega) \sin(\omega t + \varphi) + (BL\omega + RA) \cos(\omega t + \varphi) = V_m \sin(\omega t + \varphi)$$

eguagliando i coefficienti dei termini simili si ottengono le due equazioni

$$\begin{cases} BL\omega + RA = 0 \\ BR - AL\omega = V_m \end{cases}$$

che permettono di determinare i due coefficienti incogniti:

$$A = -\frac{BL\omega}{R}; \quad BR + \frac{BL\omega}{R}L\omega = V_m; \quad BR + B \frac{L^2\omega^2}{R} = V_m; \quad B(R^2 + \omega^2 L^2) = RV_m \rightarrow \boxed{B = \frac{RV_m}{R^2 + \omega^2 L^2}}$$

$$A = -\frac{BL\omega}{R} = -\frac{L\omega}{R} \frac{RV_m}{R^2 + \omega^2 L^2} \rightarrow \boxed{A = -\frac{\omega LV_m}{R^2 + \omega^2 L^2}}$$

L'integrale particolare che soddisfa l'equazione 7.1.1 risulta quindi

$$i_p = -\frac{\omega L V_m}{R^2 + \omega^2 L^2} \cos(\omega t + \varphi) + \frac{R V_m}{R^2 + \omega^2 L^2} \sin(\omega t + \varphi)$$

$$i_p = V_m \left[-\frac{\omega L}{R^2 + \omega^2 L^2} \cos(\omega t + \varphi) + \frac{R}{R^2 + \omega^2 L^2} \sin(\omega t + \varphi) \right]$$

$$i_p = V_m \left[p \cos(\omega t + \varphi) + q \sin(\omega t + \varphi) \right]$$

dove è

$$p = \frac{-\omega L}{R^2 + \omega^2 L^2} \quad ; \quad q = \frac{R}{R^2 + \omega^2 L^2}$$

Poiché fra le funzioni circolari esiste la relazione

$$p \cos \alpha + q \sin \alpha = r \sin(\alpha + \beta), \quad \text{con } r = \sqrt{p^2 + q^2} \quad ; \quad \beta = \arctan \frac{p}{q}$$

possiamo scrivere

$$p^2 + q^2 = \frac{\omega^2 L^2 + R^2}{(R^2 + \omega^2 L^2)^2} = \frac{1}{R^2 + \omega^2 L^2} \quad ; \quad r = \sqrt{p^2 + q^2} = \frac{1}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}}$$

$$\beta = \arctan \frac{-\omega L}{R} = -\arctan \frac{\omega L}{R} \quad \rightarrow \quad -\beta = \arctan \frac{\omega L}{R}$$

L'integrale particolare cercato assume quindi la forma

$$i_p = \frac{V_m}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}} \sin(\omega t + \varphi - \beta)$$

Gli elementi R ed $X = \omega L$ sono i componenti dell'impedenza di corto circuito: $Z_{cc} = R + j\omega L$; quindi

si ha $\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2} = Z_{cc}$ (modulo dell'impedenza di cto.cto.). In definitiva possiamo scrivere

$$i_p = \frac{V_m}{Z_{cc}} \sin(\omega t + \varphi - \beta)$$

L'integrale generale dell'equazione 7.1.1, dato da $i(t) = i_0(t) + i_p$, risulta

$$i(t) = C e^{-\frac{R}{L}t} + \frac{V_m}{Z_{cc}} \sin(\omega t + \varphi - \beta)$$

A questo punto dobbiamo soltanto determinare la costante di integrazione C basandoci sulle condizioni iniziali

$$t = 0 \rightarrow i(0) = 0$$

Si ha:

$$C + \frac{V_m}{Z_{cc}} \sin(\varphi - \beta) = 0 \quad ; \quad C = -\frac{V_m}{Z_{cc}} \sin(\varphi - \beta)$$

La soluzione generale dell'equazione 7.1.1 è quindi

$$i(t) = \left[-\frac{V_m}{Z_{cc}} \sin(\varphi - \beta) \right] e^{-\frac{R}{L}t} + \frac{V_m}{Z_{cc}} \sin(\omega t + \varphi - \beta)$$

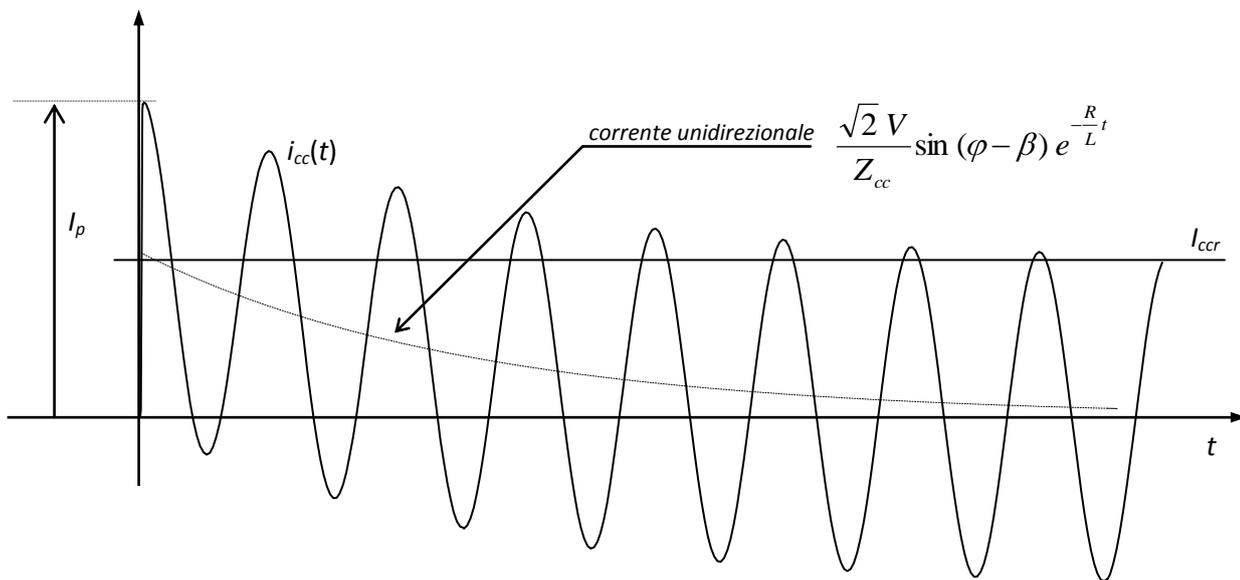
7.1.2

$$i_{cc}(t) = \frac{\sqrt{2} V}{Z_{cc}} \left[\sin(\omega t + \varphi - \beta) - \sin(\varphi - \beta) e^{-\frac{R}{L}t} \right] \quad ; \quad \tan \beta = \frac{\omega L}{R}$$

L'andamento della i_{cc} nel tempo (a partire dall'istante $t = 0$ in cui si chiude l'interruttore M) è indicato nel grafico seguente, in cui si è posto:

I_p : valore massimo della corrente di corto circuito

I_{ccr} : valore di cresta della corrente di corto circuito a regime; $I_{ccr} = \sqrt{2} I_{cc}$



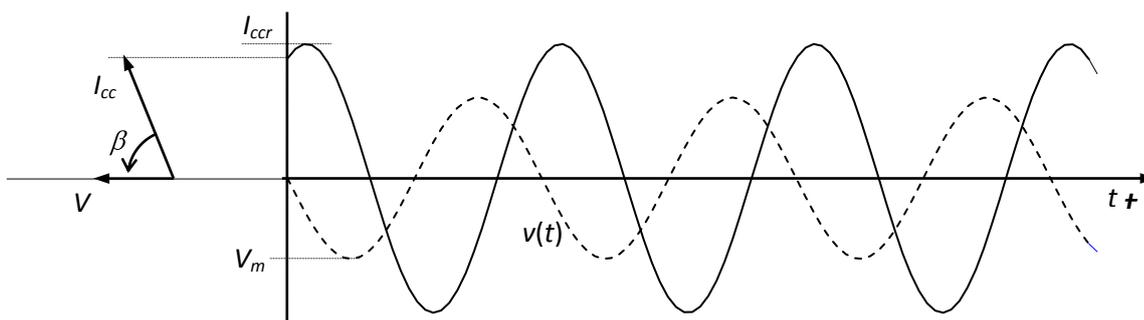
7.1.2 - Corrente di corto circuito a regime

Dalla 7.1.2 si ha, per $t \rightarrow \infty$, la corrente di regime

$$7.2.1 \quad i_{ccr}(t) = \frac{V_m}{Z_{cc}} \sin(\omega t + \varphi - \beta)$$

il cui andamento nel tempo è riportato nel grafico seguente dove è riportata anche la tensione

$$v(t) = \sqrt{2} V \sin(\omega t + \varphi) :$$



La corrente di corto a regime è sfasata in ritardo rispetto alla tensione dell'angolo $\beta = \arctan \frac{\omega L}{R}$, ed ha

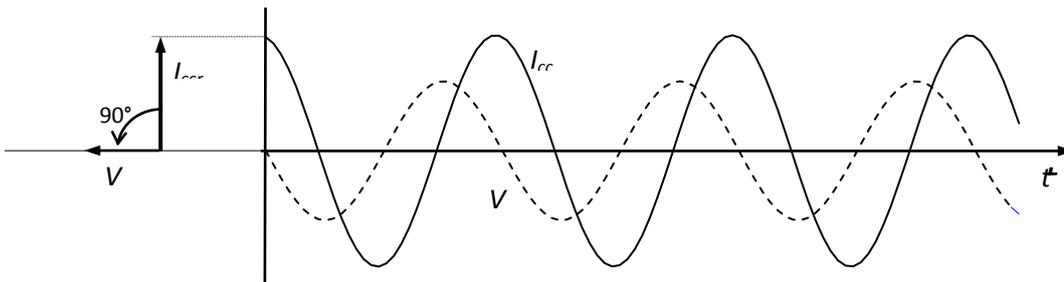
(com'è ovvio) un valore efficace $I_{cc} = \frac{V}{Z_{cc}}$ ed un valore di cresta $I_{ccr} = \frac{\sqrt{2} V}{Z_{cc}}$. Se la resistenza degli

avvolgimenti R è trascurabile nei confronti della reattanza $X_{cc} = \omega L$, $R \ll X_{cc}$, si

degli avvolgimenti R è trascurabile nei confronti della reattanza $X_{cc} = \omega L$, $R \ll X_{cc}$, si ha $\beta \approx \pi/2$ e quindi la corrente di corto a regime, sfasata di 90° in ritardo rispetto alla tensione, è data da

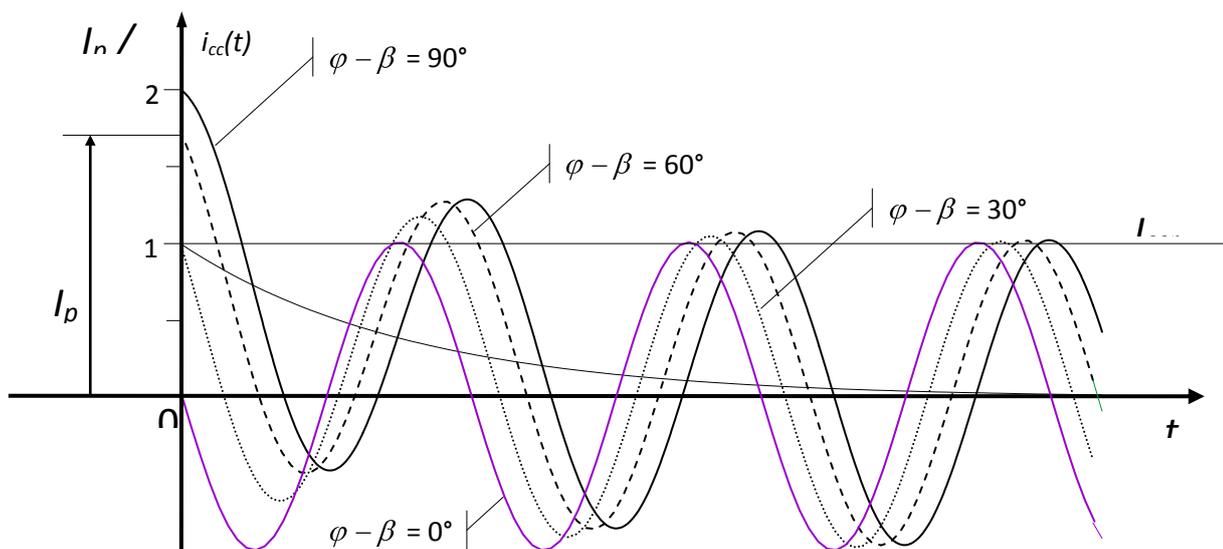
$$7.2.2 \quad i_{cc}(t) = \frac{\sqrt{2} V}{Z_{cc}} \cos(\omega t + \varphi)$$

e si ha la situazione illustrata nel grafico seguente:

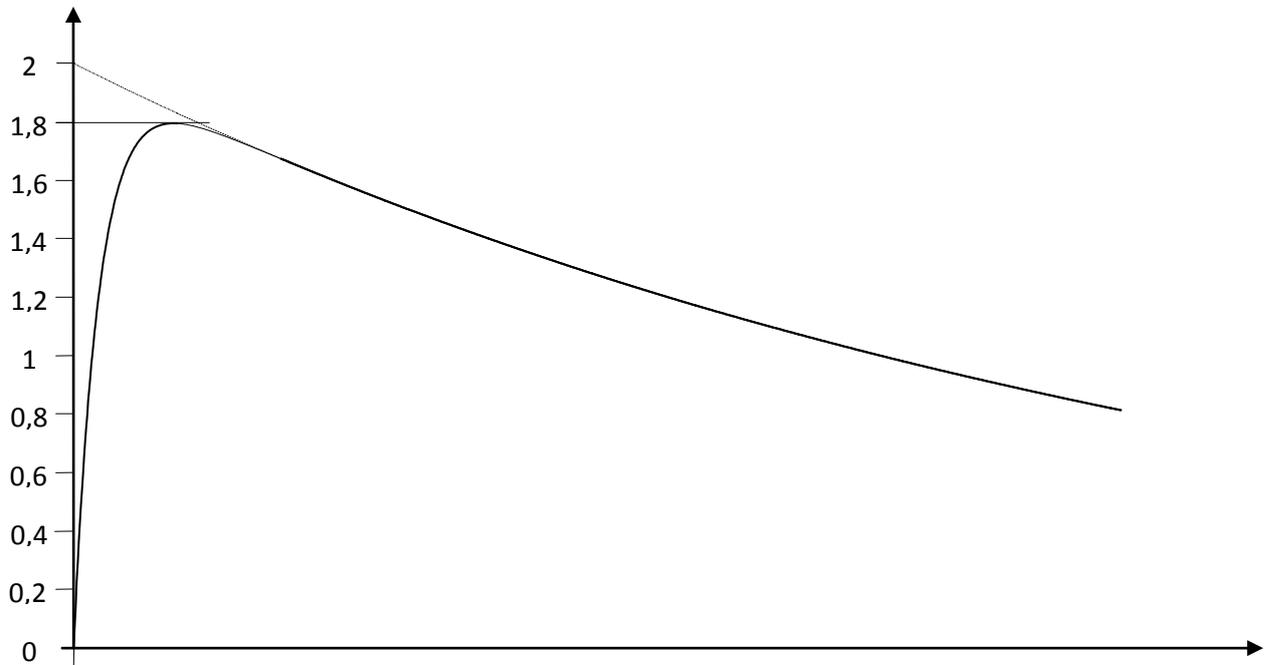


7.1.3 - Valore di picco della corrente ci corto circuito

Il valore di picco I_p della corrente di corto circuito dipende dall'angolo $\varphi = \omega t_0$, e quindi dall'istante t_0 in cui ha inizio il corto circuito. Nel grafico seguente è riportato l'andamento della corrente di corto per diversi valori dell'angolo $\varphi - \beta$ ($\beta = \arctan \frac{-\omega L}{R}$ dipende dagli elementi circuitali e dalla pulsazione che possiamo ritenere costante dal momento che il sistema funziona a 50 Hz)



Nelle ordinate del grafico precedente è anche riportato il rapporto fra valore di picco I_p della corrente e valore di cresta della corrente di corto a regime I_{ccr} . Il più alto valore di tale rapporto si ha per $\varphi - \beta = 90^\circ$, cioè per $\varphi = \beta + \pi/2$, dove si ha $I_p/I_{ccr} = 2$. In realtà la parte iniziale del transitorio è descritta da un circuito equivalente più complesso di quello utilizzato, che tenga conto anche delle capacità degli avvolgimenti ecc.; il transitorio che ne deriva è del tipo di quello indicato nel grafico seguente, in cui il valore di picco della corrente di corto è inferiore a $I_p = 2I_{ccr}$.



Per i calcoli di progettazione di solito si assume $I_p/I_{ccr} = 1,8$, cioè 7.3.1

$$I_p = 1,8 I_{ccr} = 1,8 \cdot \sqrt{2} I_{cc} = 2,54558 \cdot I_{cc} \approx 2,55 I_{cc}$$

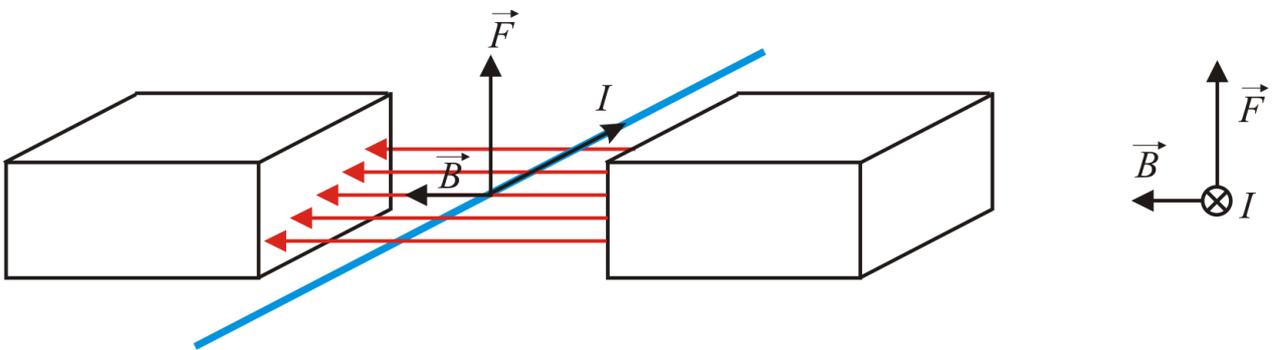
dove $I_{cc} = \frac{V}{X_{cc}}$ è il valore efficace della corrente di corto a regime. Per quanto riguarda la durata delle sovracorrenti, si assume di solito che esse non superino il tempo $t_{max}=1s$, in quanto si conta su un efficace e tempestivo intervento delle protezioni.

8. Forze elettrodinamiche

Per capire a quali sforzi elettrodinamici sono sottoposti gli avvolgimenti dei trasformatori, partiamo dal fenomeno che si verifica quando un conduttore percorso da corrente I è immerso in un campo magnetico B :

Sul conduttore si sviluppa una forza elettrodinamica F che agisce in direzione perpendicolare sia al campo magnetico B sia alla corrente I .

Il verso della forza F è determinato dalla **regola della mano sinistra**: è quello del pollice della mano sinistra disposta lungo il conduttore nel verso della corrente I , con le linee del campo B entranti nel palmo della mano.



Un'altra regola per determinare il verso della forza F con la **mano sinistra** è:

- verso di F = verso del pollice,
- verso di B = verso dell'indice,
- verso di I = verso del medio.

Il modulo della forza F è dato da: $F = B \cdot I \cdot L$

dove L è la lunghezza della parte di conduttore interessata dal campo magnetico B .

Dimensionalmente:

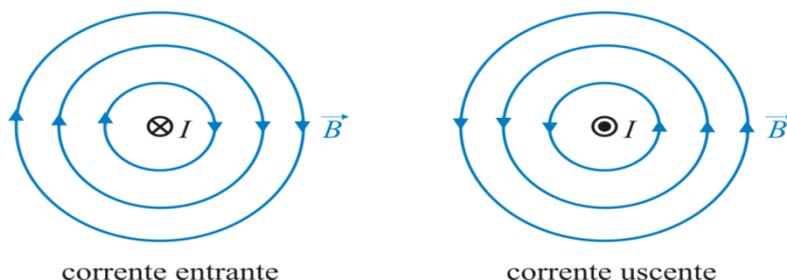
$$N = T \cdot A \cdot m = \left[\frac{Wb}{m^2} \right] A \cdot m = \left[\frac{V \cdot s}{m^2} \right] [A] [m] = \left[\frac{V \cdot A \cdot s}{m} \right]$$

8.1 Campi magnetici prodotti da correnti elettriche

Un altro fenomeno ben noto è quello di un conduttore rettilineo percorso da corrente continua e immerso in un mezzo omogeneo lineare di estensione infinita:

- la corrente che scorre nel conduttore crea attorno a sé un campo di induzione magnetica, le cui linee sono di forma circolare, centrate rispetto al conduttore e giacenti in piani ortogonali al conduttore stesso.

- il verso del campo di induzione magnetica è dato dalla **regola della mano destra**: considerando il pollice nel verso in cui scorre la corrente, il verso del campo di induzione magnetica è dato dal verso di chiusura della mano.



corrente entrante

corrente uscente

L'intensità del campo di induzione magnetica prodotta dalla corrente I è data da:

$$B = \frac{\mu I}{2\pi d}$$

dove:

μ = permeabilità magnetica del mezzo, d = distanza dal conduttore

In conseguenza a questi due fenomeni, si ha che, tra due conduttori percorsi da corrente si instaurano delle forze, di attrazione o di repulsione a seconda dei versi delle correnti, dovute al campo magnetico creato da un conduttore e agente sull'altro.

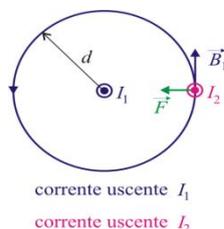
8.2 Sforzi elettrodinamici

1° CASO: il conduttore di lunghezza l percorso da corrente I_2 è immerso in un campo magnetico B_1 prodotto dalla corrente I_1 :

$$B_1 = \frac{\mu I_1}{2\pi d}$$

Di conseguenza, il conduttore percorso da corrente I_2 è sottoposto a una forza elettrodinamica F nel verso determinato dalla regola della mano sinistra:

$$F = B_1 \cdot I_2 \cdot l = \frac{\mu I_1 I_2 l}{2\pi d}$$



corrente uscente I_1

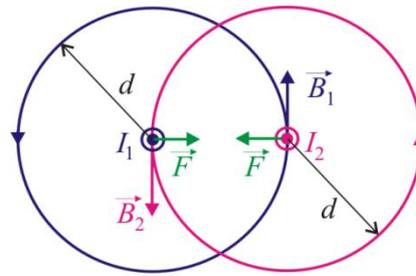
corrente uscente I_2

Analogamente, il conduttore di lunghezza l percorso da corrente I_1 è immerso in un campo magnetico B_2 prodotto dalla corrente I_2 :

$$B_2 = \frac{\mu I_2}{2\pi d}$$

Di conseguenza, il conduttore percorso da corrente I_1 è sottoposto a una forza elettrodinamica F nel verso determinato dalla regola della mano sinistra:

$$F = B_2 \cdot I_1 \cdot l = \frac{\mu I_2 I_1 l}{2\pi d}$$

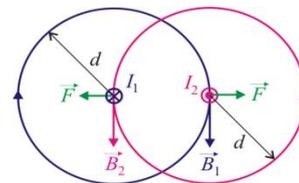


corrente uscente I_1
 corrente uscente I_2

Questa forza F è di attrazione se i conduttori sono percorsi da correnti concordi (entrambe uscenti o entrambe entranti).

2° CASO: se i conduttori sono percorsi da correnti discordi, si ha:

$$F = \frac{\mu I_1 I_2 l}{2\pi d}$$

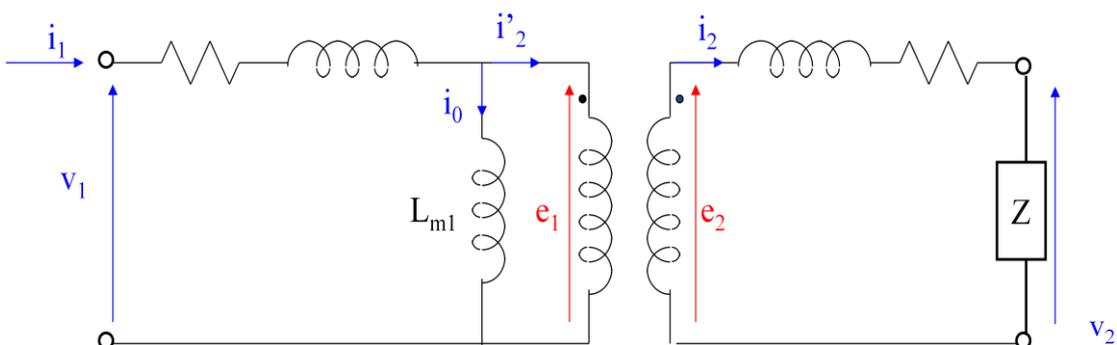


corrente entrante I_1
 corrente uscente I_2

Questa forza F è di repulsione se i conduttori sono percorsi da correnti discordi (una uscente e una entrante).

8.3 Sforzi elettrodinamici nei trasformatori

Cosa succede nei trasformatori?



In ciascuna fase del trasformatore, la corrente entra da un avvolgimento (primario) e esce dall'altro avvolgimento (secondario): quindi le correnti che circolano negli avvolgimenti BT e AT sono discordi tra loro.

8.3.1 Avvolgimento concentrico

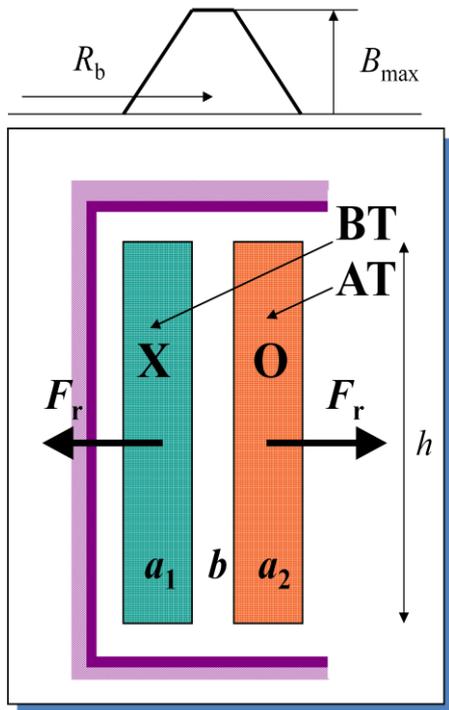
Per esempio, nel caso di avvolgimento concentrico, si hanno forze radiali di repulsione tra i conduttori BT e AT:

⇒ le forze sono di compressione dell'avvolgimento BT sul nucleo e di dilatazione radiale dell'avvolgimento AT verso l'esterno.

Il valore massimo dell'induzione che si raggiunge nel canale di separazione tra i due avvolgimenti è:

$$B_{\max} = \frac{\mu_0 N_1 \sqrt{2} I_1}{h} = \frac{\mu_0 N_2 \sqrt{2} I_2}{h} = \frac{\mu_0 N \sqrt{2} I}{h}$$

dove I_1 , I_2 e I sono i valori efficaci delle correnti



In corrispondenza di ciascun avvolgimento l'induzione magnetica cresce linearmente dal valore nullo al valore massimo B_{\max} .

Se si considera il valore medio pari alla metà del valore massimo e la lunghezza media della spira pari a $2R_b$, la forza elettrodinamica media a cui è sottoposto ciascun avvolgimento è data da:

$$F = \frac{B_{\max}}{2} \cdot N \sqrt{2} I \cdot 2\pi R_b$$

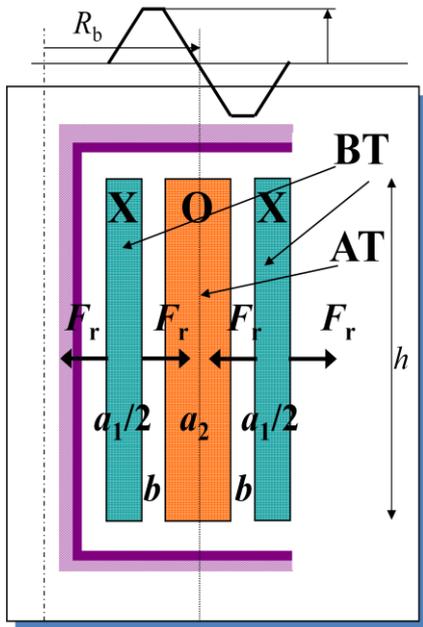
$$F = \frac{\mu_0 N \sqrt{2} I}{2h} \cdot N \sqrt{2} I \cdot 2\pi R_b = \frac{\mu_0 \pi R_b}{h} \cdot N \sqrt{2} I^2$$

Osservazioni:

- La forza elettrodinamica dipende dal quadrato della corrente.

- La corrente è periodica alternata sinusoidale con frequenza $f = 50$ Hz.
- Di conseguenza, la forza elettrodinamica avrà una componente periodica alternata sinusoidale con frequenza doppia di quella della corrente, cioè 100 Hz.

8.3.2 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.

In questo caso, il valore massimo dell'induzione è pari alla metà rispetto al caso concentrico semplice:

$$B_{\max} = \frac{\mu_0 N_1 \sqrt{2} I_1}{2h} = \frac{\mu_0 N_2 \sqrt{2} I_2}{2h} = \frac{\mu_0 N \sqrt{2} I}{2h}$$

Mentre la forza elettrodinamica risulta un quarto rispetto al caso concentrico semplice:

$$F = \frac{\mu_0 \pi R_b}{4h} \cdot N \sqrt{2} I^2$$

9. Conclusioni

I metodi di diagnosi basati sull'analisi dei gas disciolti in olio, coadiuvate anche dai risultati di altre prove, generalmente permettono di individuare l'origine dell'anomalia di un trasformatore, consentono di sorvegliarne nel tempo l'evoluzione e di pianificare le azioni correttive.

I processi presentati nella presente relazione e gli elementi di diagnostica sono, a tutt'oggi, in fase evolutiva, soprattutto, come detto, sull'individuazione dei Valori Tipici, della velocità Critica di Crescita, le possibili imposizioni derivanti dalla definizione dei Valori tipici.

Un'altra lacuna della Norma scaturisce dal fatto che, a differenza delle esperienze maturate sui trasformatori di potenza, diventa difficile, a oggi e probabilmente anche nel futuro, sia in ambito nazionale che internazionale, maturare un'esperienza simile anche per gli isolatori passanti, i trasformatori di misura, gli isolatori passanti, i cavi in olio e gli interruttori, considerati nella stessa Norma; ciò, ad esempio, a causa dei limitati volumi d'olio disponibili. In ogni caso, in particolare per i trasformatori di potenza, sembra opportuno rivolgere un'attenzione sempre maggiore alla realizzazione di un sistema diagnostico programmatico del tipo suggerito, sull'importanza fondamentale di finire una strategia di manutenzione innovativa, la **manutenzione predittiva**, per acquisire tutte le informazioni possibili sullo stato di salute delle macchine e dei processi, al fine di:

- individuare sul nascere i difetti;
- seguirne la loro evoluzione nel tempo;
- programmare, con congruo anticipo e con una certa flessibilità, le necessarie azioni correttive da farsi, previa la valutazione della vita residua delle macchine.

Ciò allo scopo di ottimizzare l'uso delle risorse per garantire:

- continuità di servizio dei processi produttivi, non gravati da eccessive e costose riserve/scorte;
- riduzione delle perdite di produzione e dei rischi, anche ambientali, connessi al disservizio improvviso di un'apparecchiatura inserita in un ciclo produttivo; aumento della vita residua delle macchine;
- riduzione degli interventi non necessari;
- miglioramento dei fattori ambientali (consumo di energia, diminuzione rischi conseguenti al disservizio, ecc.);
- riduzione dei costi di manutenzione rispetto al metodo della manutenzione periodica.

10. Bibliografia e siti internet

(*) Hand buchder Sschandendenverhunting Allinz Versicherungs – AG Berlin (1979)

1. CEI EN 60599 Seconda Edizione 2000-01 *Guida all'interpretazione dell'analisi dei gas disciolti e liberi*
2. IEC 422 Second Edition 1999-03 *Supervision and Maintenance guide for mineral insulating oils in electrical equipment.*
3. IEEE Std C57.104.1991 *Guide for the interpretation of gases generated in oil-immersed transformers*
4. IEC TC 10/14 *Revision of annex A1 of 60599 issued in 1999*
5. IEEE Std C57.125.1991 *Guide for failure investigation, documenttation and analysis for power transformers and shunt reactors.*
- 6 . A.C. FRANKLIN, D.P. FRANKLIN, 12th Edition *The JPS Transformer Book*
7. S.D.MYERS, J.J.KELLY, R.H.PARRISH – Tranformer Maintenance Institute S.D. MYERS AKRON OHIO *A Guide to Transformer Maintenance*