



# Reattanze di dispersione e forze di Lorentz nei trasformatori

Lucia FROSINI

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

1

L. Frosini

## Energia immagazzinata nel campo magnetico

Premessa:

L'energia immagazzinata per unità di volume nel campo magnetico è data da:

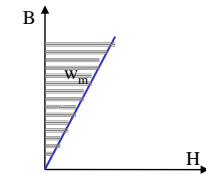
$$w_m = \frac{1}{2} B \cdot H = \frac{1}{2} \frac{B^2}{\mu} = \frac{1}{2} \mu H^2$$

Dimensionalmente:

$$[T] \cdot \left[ \frac{A}{m} \right] = \left[ \frac{Wb}{m^2} \right] \cdot \left[ \frac{A}{m} \right] = \left[ \frac{V \cdot s}{m^2} \right] \cdot \left[ \frac{A}{m} \right] = \left[ \frac{J}{m^3} \right]$$

Questa relazione vale per un materiale magnetico lineare, ossia con permeabilità costante.

Questa energia specifica si interpreta sul piano B-H del materiale come l'area indicata in figura



2

L. Frosini

## Energia immagazzinata nel campo magnetico

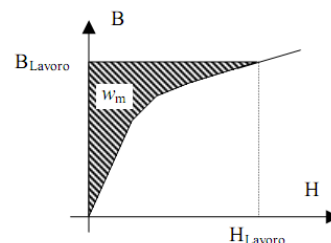
Integrando sul volume del circuito magnetico, si ottiene:

$$W_m = \int_{\text{volume}} \frac{1}{2} B \cdot H \cdot d\text{vol} = \frac{1}{2} \int_l H \cdot dl \cdot \int_S B \cdot dS$$

$$W_m = \frac{1}{2} \cdot (N \cdot I) \cdot \Phi = \frac{1}{2} \cdot \Psi \cdot I = \frac{1}{2} \cdot L \cdot I^2$$

Se il materiale non è lineare, l'energia magnetica per unità di volume risulta pari a:

$$w_m = \int_0^{B_{\text{Lavoro}}} H \cdot dB$$



3

L. Frosini

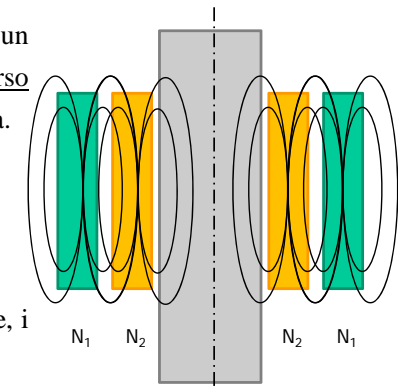
## Campo magnetico disperso

Consideriamo un avvolgimento di tipo concentrico di un trasformatore: l'andamento delle linee di flusso disperso per i due avvolgimenti è del tipo rappresentato in figura.

Tali linee attraversano:

- lo spazio tra i due avvolgimenti,
- gli avvolgimenti stessi,

trovando vie di richiusura attraverso i nuclei, il cassone, i tiranti, le piastre di serraggio, ecc.



Non è facile calcolare analiticamente l'entità del flusso disperso e prevedere la separazione del suo concatenamento tra avvolgimento interno ed esterno: le linee più interne percorrono spazi limitati costituiti in gran parte dal ferro del nucleo e dei gioghi, quelle più esterne investono sezioni più ampie, ma con permeabilità più bassa.

4

## Campo magnetico disperso

Non è necessario calcolare separatamente i due flussi concatenati: è sufficiente determinare l'induttanza di dispersione totale riferita a primario ( $L'_d$ ) o a secondario ( $L''_d$ ).

Per semplificare i conti, si ipotizza che:

- i due avvolgimenti siano della stessa altezza  $h$  e sviluppino lungo di essa una f.m.m. uniforme;
- le f.m.m. prodotte dai due avvolgimenti siano di uguale valore:  $N_1 I_1 = N_2 I_2 = NI$ , ossia si trascura la corrente magnetizzante del trasformatore;
- sia infinita la permeanza al di fuori dello spazio cilindrico occupato dai due avvolgimenti e dal canale che li separa (ossia, si considerano soltanto le linee di flusso disperso all'interno degli avvolgimenti e del canale che li separa);
- le linee di induzione  $B$  si mantengono parallele lungo gli avvolgimenti e il canale di separazione.

5

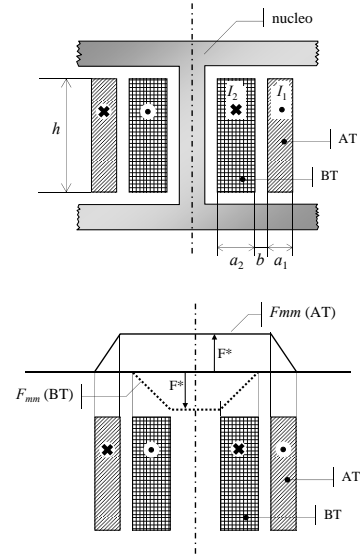
## Campo magnetico disperso

Consideriamo l'avvolgimento concentrico costituito da due avvolgimenti cilindrici coassiali, formati da  $N_1$  (AT) e  $N_2$  (BT) spire, separati da un canale di ampiezza  $b$ .

L'andamento delle f.m.m. prodotte dagli avvolgimenti AT e BT è determinato dal senso di percorrenza della corrente negli avvolgimenti, così come indicato nel disegno.

Il valore massimo di tali f.m.m., uguale per entrambi gli avvolgimenti, è dato, in funzione del valore efficace della corrente che percorre gli avvolgimenti, da:

$$F^* = N_2 I_2 = N_1 I_1$$



6

## Campo magnetico disperso

A questo valore di f.m.m. corrispondono i seguenti valori massimi del campo  $H$  e dell'induzione  $B$ :

$$H_M = \frac{F^*}{h} = \frac{N_2 I_2}{h} = \frac{N_1 I_1}{h}$$

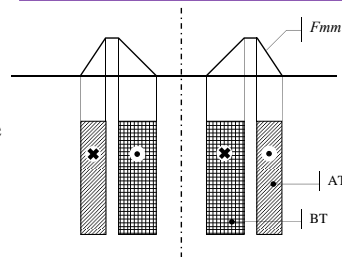
$$B_M = \mu_0 H_M = \mu_0 \frac{N_2 I_2}{h} = \mu_0 \frac{N_1 I_1}{h}$$

La forza magnetomotrice risultante dall'azione delle correnti negli avvolgimenti di AT e BT è:

$$F_{mm_T} = F_{mm}(\text{AT}) + F_{mm}(\text{BT})$$

Si ha quindi, con le approssimazioni fatte, una induzione non nulla solo in corrispondenza degli avvolgimenti e del canale che li separa. Il calcolo dell'energia magnetizzante può quindi essere limitato al canale e agli avvolgimenti.

In realtà l'induzione è non nulla anche nel nucleo (altrimenti il trasformatore non funzionerebbe), ma l'induzione nel nucleo è prodotta dalla corrente magnetizzante che qui è trascurata.



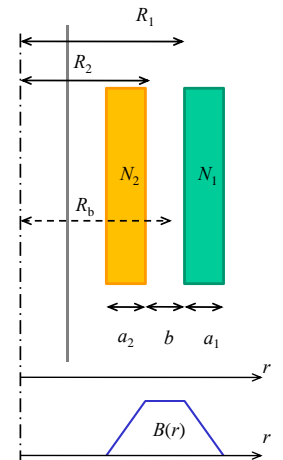
7

## Campo magnetico disperso

L'induzione  $B$  ha quindi solo componente assiale e modulo dipendente dalla posizione radiale.

Il campo si annulla in corrispondenza del bordo esterno di ciascuno dei due avvolgimenti e cresce linearmente fino al bordo interno, rimanendo costante per tutto lo spessore del canale:

$$\left\{ \begin{array}{l} B(r) = \mu_0 \frac{NI}{h} \frac{r - R_2 + a_2}{a_2} \quad \text{per } R_2 - a_2 \leq r \leq R_2 \\ B(r) = \mu_0 \frac{NI}{h} \quad \text{per } R_2 \leq r \leq R_1 \\ B(r) = \mu_0 \frac{NI}{h} \frac{R_1 + a_1 - r}{a_1} \quad \text{per } R_1 \leq r \leq R_1 + a_1 \end{array} \right.$$



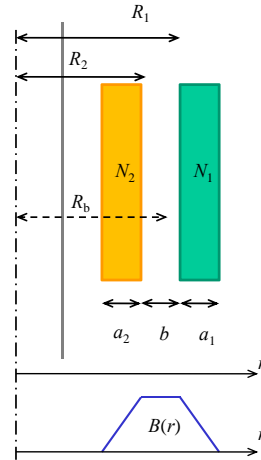
8

## Induttanza di dispersione

L'induttanza di dispersione totale riferita, per esempio, al primario ( $L'_d$ ) si può calcolare attraverso l'espressione dell'energia magnetica immagazzinata nel campo magnetico nel volume composto dai due avvolgimenti e dal canale che li separa (cilindro cavo):

$$W_m = \int_{\text{volume}} \frac{1}{2} \frac{B^2(r)}{\mu_0} \cdot d\text{vol}$$

Poiché gli spessori sono relativamente modesti rispetto ai diametri degli stessi, ci si può riferire a un diametro medio  $D_m = 2R_b$  per entrambi gli avvolgimenti.



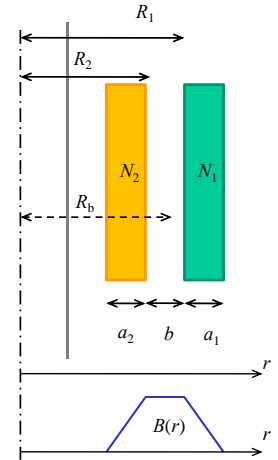
9

## Induttanza di dispersione

$$W_m = \frac{1}{2\mu_0} \pi D_m h \int_{R_2 - a_2}^{R_1 + a_1} B^2(r) dr$$

Dividiamo l'integrale in tre parti (gli spessori  $a_2$ ,  $b$ ,  $a_1$ ) e sostituiamo l'espressione di  $B(r)$  in ciascuna parte:

$$\begin{aligned} W_m &= \frac{1}{2\mu_0} \pi D_m h \int_{R_2 - a_2}^{R_2} \left( \frac{\mu_0 N I}{h} \right)^2 \left( \frac{r - R_2 + a_2}{a_2} \right)^2 dr + \\ &+ \frac{1}{2\mu_0} \pi D_m h \int_{R_2}^{R_1} \left( \frac{\mu_0 N I}{h} \right)^2 dr + \\ &+ \frac{1}{2\mu_0} \pi D_m h \int_{R_1}^{R_1 + a_1} \left( \frac{\mu_0 N I}{h} \right)^2 \left( \frac{R_1 + a_1 - r}{a_1} \right)^2 dr \end{aligned}$$



10

## Induttanza di dispersione

Portando fuori dall'integrale il fattore moltiplicativo comune e semplificando opportunamente si ha:

$$\begin{aligned} W_m &= \frac{\mu_0 (NI)^2}{2} \pi D_m \left[ \int_{R_2 - a_2}^{R_2} \left( \frac{r - R_2 + a_2}{a_2} \right)^2 dr + \int_{R_2}^{R_1} dr + \int_{R_1}^{R_1 + a_1} \left( \frac{R_1 + a_1 - r}{a_1} \right)^2 dr \right] \\ W_m &= \frac{\mu_0 (NI)^2}{2} \pi D_m \left( \frac{1}{a_2^2} \left[ \frac{(r - R_2 + a_2)^3}{3} \right]_{R_2 - a_2}^{R_2} + [r]_{R_2}^{R_1} + \frac{1}{a_1^2} \left[ \frac{(R_1 + a_1 - r)^3}{3} \right]_{R_1}^{R_1 + a_1} \right) \end{aligned}$$

$$W_m = \frac{\mu_0 (NI)^2}{2} \pi D_m \left( \frac{a_2}{3} + b + \frac{a_1}{3} \right)$$

$c$  = distanza elettromagnetica degli avvolgimenti  
 $p$  = perimetro medio degli avvolgimenti

11

## Induttanza di dispersione

Quindi, riferendo tutte le grandezze all'avvolgimento primario e ricordando che:

$$W_m = \frac{1}{2} \cdot L \cdot I^2 \quad \Rightarrow \quad W_m = \frac{1}{2} \cdot L'_d \cdot I_1^2 \quad \Rightarrow \quad L'_d = \frac{2W_m}{I_1^2}$$

$$W_m = \frac{\mu_0 (NI)^2}{2} \pi D_m \left( \frac{a_2}{3} + b + \frac{a_1}{3} \right) \quad \Rightarrow \quad L'_d = \frac{\mu_0 N_1^2}{h} \pi D_m \left( \frac{a_2}{3} + b + \frac{a_1}{3} \right)$$

$$\Rightarrow \quad L'_d = \frac{\mu_0 N_1^2}{h} p \cdot c \quad \Rightarrow \quad X'_d = 2\pi f L'_d = 2\pi f \frac{\mu_0 N_1^2}{h} p \cdot c$$

$$R_b = \frac{D_m}{2} \quad \text{distanza tra asse di simmetria della colonna e asse di simmetria del canale}$$

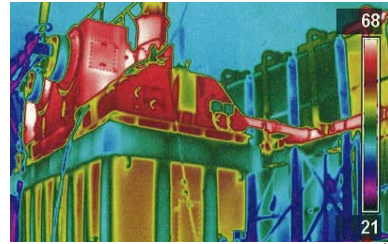
12

## Osservazioni sull'induttanza di dispersione

All'aumentare delle dimensioni, e a parità di altre condizioni, l'induttanza di dispersione di un trasformatore aumenta: per i trasformatori più grandi, occorrono precauzioni speciali per assicurare che il flusso disperso non causi pericolosi surriscaldamenti negli avvolgimenti e in parti strutturali.

Inoltre, punti caldi a contatto con l'olio tendono a deteriorarlo e un eccessivo riscaldamento dell'olio produce bolle di gas, nelle quali possono verificarsi scariche parziali.

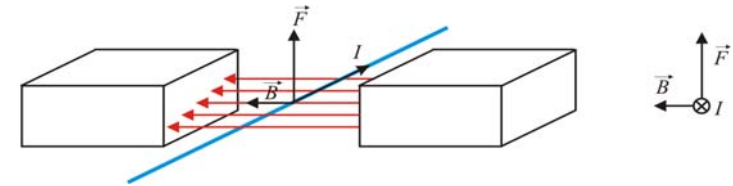
A tal fine, nei trasformatori vengono installate termocoppie o utilizzati altri sistemi di rilevamento delle temperature per evitare che questi punti caldi mettano in pericolo l'affidabilità del loro servizio.



13

## Forze di Lorentz

Osserviamo il fenomeno che si verifica quando un conduttore percorso da corrente  $I$  è immerso in un campo magnetico  $B$ :



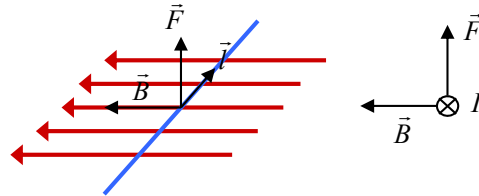
Sul conduttore si sviluppa una forza elettrodinamica  $F$  (forza di Lorentz) data dal prodotto vettoriale tra il vettore che rappresenta un conduttore di lunghezza  $l$  in direzione e verso del flusso di corrente  $I$  e il vettore che rappresenta le linee del campo magnetico  $B$ :

$$\vec{F}_{Lorentz} = I(\vec{l} \wedge \vec{B})$$

14

## Forza di Lorentz

La direzione della forza di Lorentz, come risultante del prodotto vettoriale, è perpendicolare sia al campo magnetico  $B$  sia alla corrente  $I$ .



Il verso della forza di Lorentz è dato dalla regola della mano destra, come risultante di un prodotto vettoriale: il primo vettore è rappresentato dal pollice, il secondo vettore dall'indice, la risultante dal 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:

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

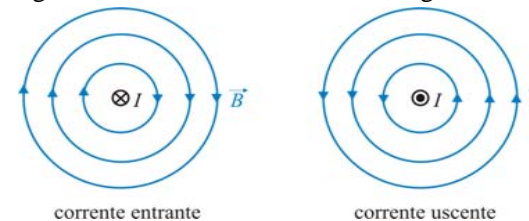
15

## Forza di Lorentz

Un conduttore rettilineo percorso da corrente  $I$ , immerso in un mezzo omogeneo lineare, crea intorno 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. L'intensità dell'induzione magnetica prodotta dalla corrente  $I$  è data da:

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

Di conseguenza, 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.



$\mu$  = permeabilità magnetica del mezzo  
 $d$  = distanza dal conduttore

16

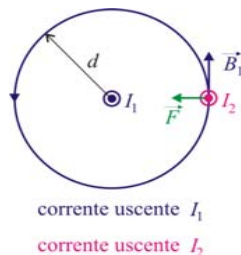
## Forza di Lorentz

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 destra (prodotto vettoriale):

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



17

## Forza di Lorentz

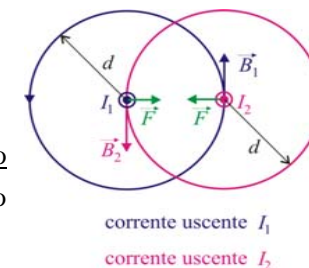
Analogamente, il conduttore di lunghezza  $l$  percorso da corrente  $I_1$  è immerso in un campo magnetico  $B_2$  prodotto dalla corrente  $I_2$ :

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

Di conseguenza, il conduttore percorso da corrente  $I_1$  è sottoposto a una forza elettrodinamica  $F$  nel verso determinato dalla regola della mano destra (prodotto vettoriale):

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

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



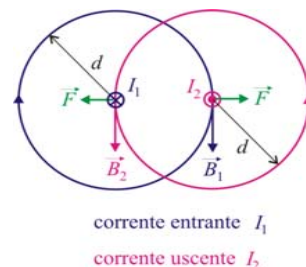
18

## Forza di Lorentz

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

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

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



Riassumendo: tra due conduttori percorsi da corrente si instaurano delle forze dovute al campo magnetico creato da un conduttore e agente sull'altro:

- forze di attrazione, se i conduttori sono percorsi da correnti concordi;
- forze di repulsione, se i conduttori sono percorsi da correnti discordi.

19

## Forze di Lorentz

Quindi, due conduttori di lunghezza  $l$ , percorsi da corrente  $i$  e posti a una distanza reciproca  $d$  all'interno di un mezzo di permeabilità magnetica  $\mu$  sono soggetti a una forza proporzionale al quadrato della corrente  $i$ :

$$F_{Lorentz} = i \cdot l \cdot \left( \frac{\mu i}{2\pi d} \right) = \frac{\mu l}{2\pi d} i^2$$

Queste forze si manifestano in tutte le macchine elettriche e sono alla base della generazione della coppia elettromeccanica delle macchine rotanti, ma anche delle vibrazioni che si verificano tra avvolgimenti (tra avvolgimenti primario e secondario dei trasformatori, sulle testate di motori e generatori, ecc.). L'ampiezza di queste forze è relativamente contenuta durante il funzionamento normale delle macchine, mentre può risultare molto elevata e addirittura distruttiva nel caso di corto circuito. In regime p.a.s., la pulsazione di questa forza è pari al doppio della frequenza della corrente che la genera, ossia 100 Hz nel caso di alimentazione a frequenza industriale (50 Hz).

20

## Forze di Lorentz nei trasformatori

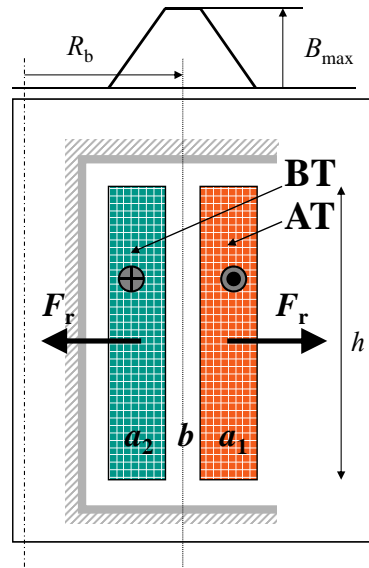
Nel caso di avvolgimento concentrico, si hanno forze radiali di repulsione tra i conduttori BT e AT:

- forze di compressione dell'avvolgimento BT sul nucleo;
- forze 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:

$$B_{\max} = \frac{\mu_0 N_1 I_1}{h} = \frac{\mu_0 N_2 I_2}{h} = \frac{\mu_0 NI}{h}$$

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



21

## Forze di Lorentz nei trasformatori

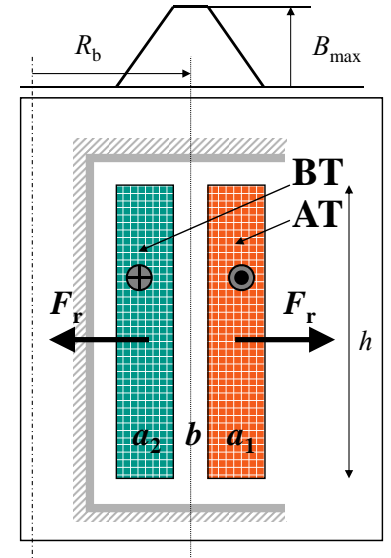
In corrispondenza di ciascun avvolgimento l'induzione magnetica cresce linearmente dal valore nullo al valore massimo  $B_{\max}$ . Ipotizzando:

- ✓ valore medio dell'induzione = metà del valore massimo;
- ✓ lunghezza media della spira =  $2\pi R_b$ ;

➔ la forza elettrodinamica media a cui è sottoposto ciascun avvolgimento è data da:

$$F_r = \frac{B_{\max}}{2} \cdot NI \cdot 2\pi R_b$$

$$F_r = \frac{\mu_0 NI}{2h} \cdot NI \cdot 2\pi R_b = \frac{\mu_0 \pi R_b}{h} \cdot (NI)^2$$



22

## Forze di Lorentz nei trasformatori

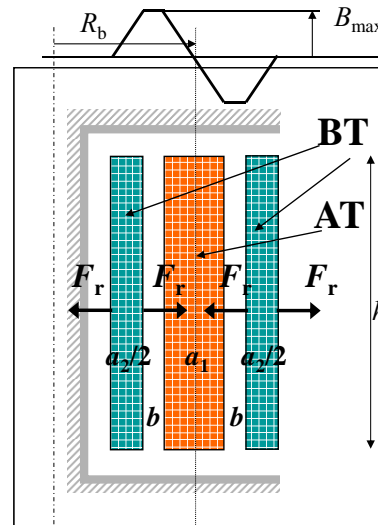
Nell'avvolgimento doppio concentrico, l'avvolgimento BT è diviso in due metà, una disposta vicino al nucleo e l'altra all'esterno.

Il valore massimo dell'induzione che si raggiunge nei canali di separazione è pari alla metà rispetto al caso concentrico semplice:

$$B_{\max} = \frac{\mu_0 N_1 I_1}{2h} = \frac{\mu_0 N_2 I_2}{2h} = \frac{\mu_0 NI}{2h}$$

La forza elettrodinamica media risulta un quarto rispetto al caso concentrico semplice (il numero di spire soggette alla forza è la metà di quelle totali):

$$F_r = \frac{\mu_0 NI}{4h} \cdot \frac{N}{2} I \cdot 2\pi R_b = \frac{\mu_0 \pi R_b}{4h} \cdot (NI)^2$$



23

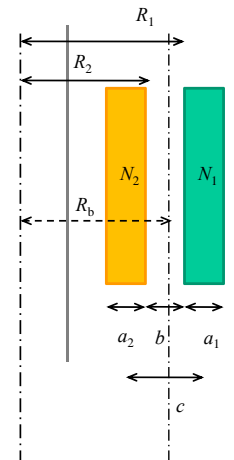
## Forze radiali

La distanza elettromagnetica degli avvolgimenti  $c$  è presa simmetricamente rispetto all'asse del canale:

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

Per determinare le forze di trazione che sollecitano gli avvolgimenti, si può utilizzare il principio dei lavori virtuali.

Supponiamo che l'unico effetto delle forze di Lorentz sia che l'avvolgimento esterno si deformi, provocando un incremento  $dc$  della distanza elettromagnetica  $c$ .



24

## Forze radiali

Il lavoro svolto dalla forza esterna  $F_{est}$  per incrementare la coordinata  $c$  della quantità  $dc$  deve corrispondere ad una variazione  $dW_m$  dell'energia del campo magnetico (per la conservazione dell'energia):

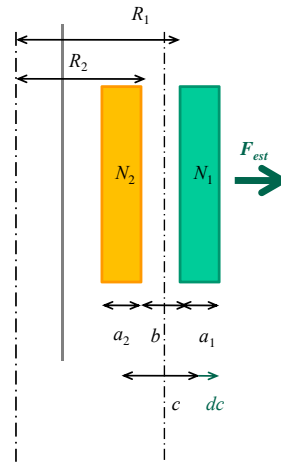
$$F_{est} dc = dW_m \quad F_{est} = \frac{dW_m}{dc}$$

$$W_m = \frac{1}{2} \cdot L'_d \cdot I_1^2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{X'_d}{\omega} \cdot I_1^2$$

$$X'_d = 2\pi f \frac{\mu_0 N_1^2}{h} p \cdot c$$

Supponiamo che tutte le altre variabili rimangano costanti e vari solo  $c$ :

$$\Rightarrow X'_d(c) = K \cdot c$$



25

## Forze radiali

$$F_{est} = \frac{dW_m}{dc} = \frac{d}{dc} \left( \frac{1}{2} \cdot \frac{X'_d(c)}{\omega} \cdot I_1^2 \right) = \frac{d}{dc} \left( \frac{1}{2} \cdot \frac{K \cdot c}{\omega} \cdot I_1^2 \right)$$

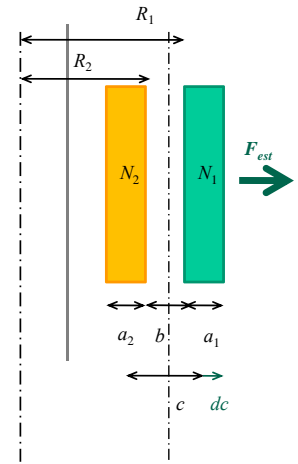
$$\Rightarrow F_{est} = \frac{1}{2} \cdot \frac{K}{\omega} \cdot I_1^2$$

La costante  $K$  può essere calcolata a partire dalla reattanza nominale di dispersione  $X'_{cc}$ , determinata in assenza di deformazioni (durante la prova di cortocircuito):

$$K = \frac{X'_{cc}}{c}$$

$$\Rightarrow F_{est} = \frac{1}{2} \cdot \frac{X'_{cc}}{\omega \cdot c} \cdot I_1^2$$

Questa espressione vale in generale.



26

## Forze radiali

In corto circuito, la corrente di picco può essere pari a 2,5 volte il valore efficace della corrente di corto circuito a regime (come dimostrato in una successiva lezione):

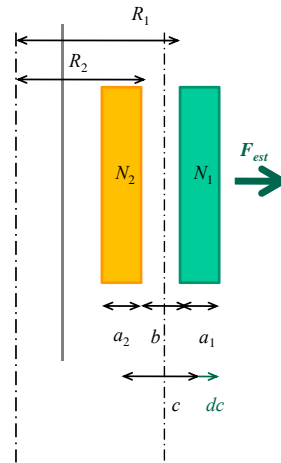
$$I_p \cong 2,5 I_{cc} = 2,5 \frac{V_{1n}}{X'_d}$$

Quindi in corto circuito la forza massima che si può sviluppare è pari a:

$$F_{est\max} = \frac{1}{2} \cdot \frac{X'_{cc}}{\omega \cdot c} \cdot I_p^2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{X'_{cc}}{\omega \cdot c} \cdot \left( 2,5 \frac{V_{1n}}{X'_{cc}} \right)^2$$

$$\Rightarrow F_{est\max} = \frac{2,5^2}{2} \cdot \frac{V_{1n}^2}{\omega \cdot c \cdot X'_{cc}} \cong \pi \cdot \frac{V_{1n}^2}{2\pi f \cdot c \cdot X'_{cc}}$$

$$\Rightarrow F_{est\max} \cong \frac{V_{1n}^2}{2f \cdot c \cdot X'_{cc}}$$



27

## Forze radiali

Poiché:  $X'_{cc} \cong Z'_{cc}$

$$\Rightarrow F_{est\max} \cong \frac{V_{1n}^2}{2f \cdot c \cdot Z'_{cc}}$$

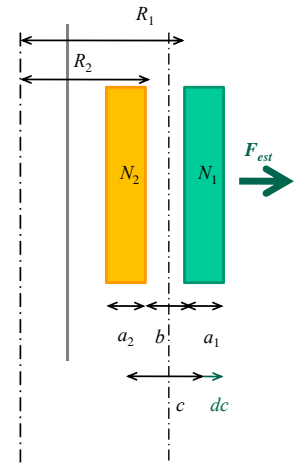
Inoltre:  $Z'_{cc} = \frac{V'_{cc}}{I_{1n}}$

$$\Rightarrow F_{est\max} \cong \frac{V_{1n}^2}{2f \cdot c \cdot V'_{cc} / I_{1n}}$$

$$\Rightarrow F_{est\max} \cong \frac{V_{1n} I_{1n}}{2f \cdot c \cdot V'_{cc} / V_{1n}} = \frac{V_{1n} I_{1n}}{2f \cdot c \cdot v_{cc} \%}$$

$$\Rightarrow F_{est\max} \cong \frac{A_n}{2f \cdot c \cdot v_{cc} \%}$$

A parità di altre condizioni, le forze elettromagnetiche aumentano all'aumentare della potenza nominale del trasformatore.

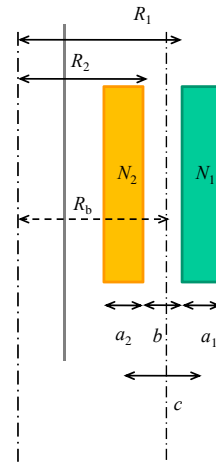


28

## Forze radiali

In realtà anche la tensione di corto circuito percentuale aumenta all'aumentare della potenza e delle dimensioni della macchina.

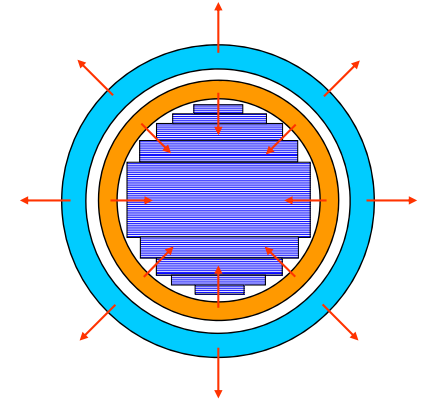
Analogamente a quanto visto per le forze di trazione agenti sull'avvolgimento esterno (a tensione maggiore), è possibile sviluppare un calcolo delle forze di compressione che agiscono sull'avvolgimento interno (a tensione minore), che risultano avere la stessa espressione e quindi la stessa dipendenza dalla potenza apparente del trasformatore e dalla tensione di corto circuito.



29

## Effetto delle forze radiali in caso di cortocircuito

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



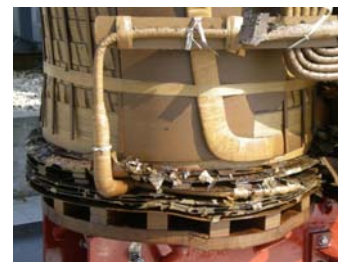
30

## Effetto delle forze radiali in caso di cortocircuito



31

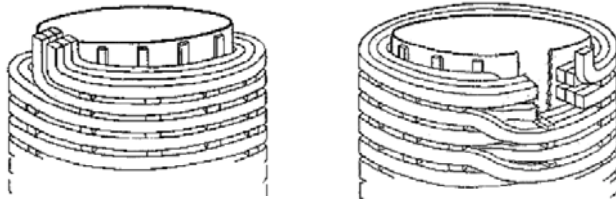
## Effetto delle forze radiali in caso di cortocircuito



32



## Dettagli sugli avvolgimenti dei trasformatori



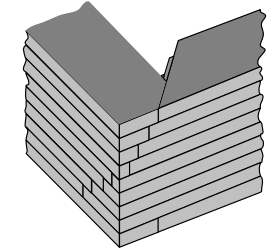
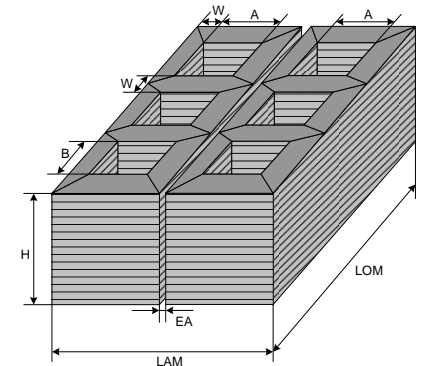
33

## Altri tipi di trasformatore

Oltre ai trasformatori a colonne, esistono anche i **trasformatori con nucleo corazzato (shell type)**: la struttura del nucleo trifase può essere vista come l'unione di tre nuclei monofasi a mantello.

La caratteristica costruttiva prevede che il nucleo magnetico sia montato attorno all'avvolgimento elettrico.

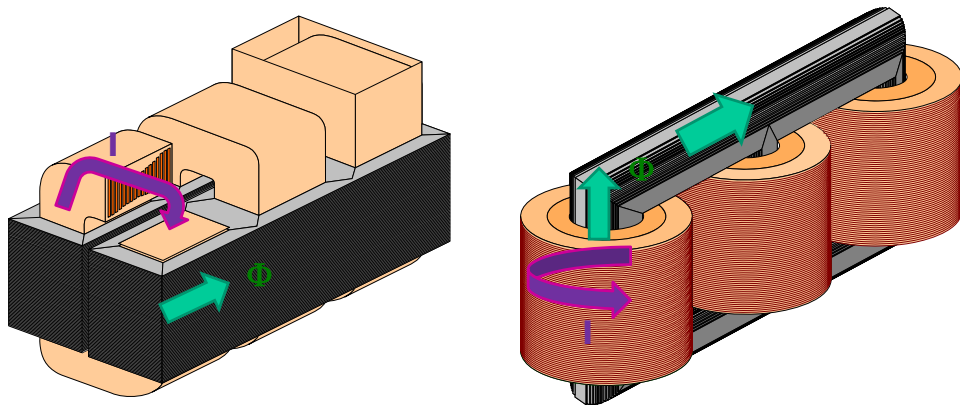
Lo spessore di ciascun lamierino è  $0,27 \div 0,30$  mm e complessivamente si arriva a pacchi di altezza di 1÷3 metri. Anche in questa tecnologia, gli strati sono montati secondo il metodo step-lap, in modo che l'attrito tra i diversi strati produca una buona solidità meccanica.



34

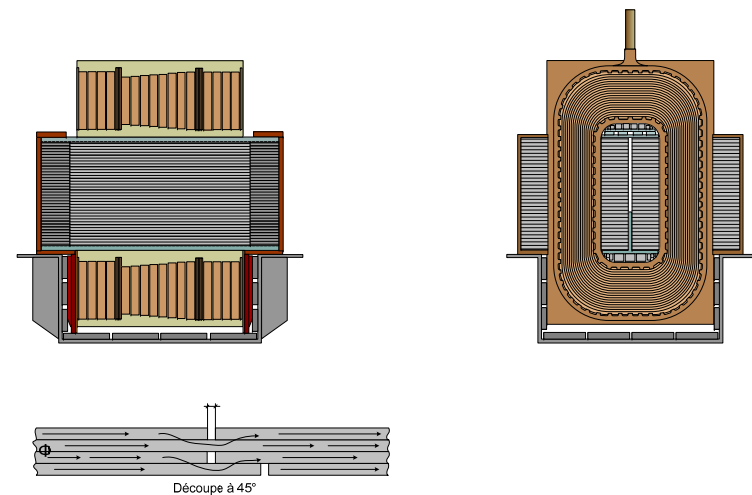
## Trasformatore con nucleo corazzato

Rispetto alla tecnologia a colonne, cambia la disposizione dei lamierini e degli avvolgimenti: nel trasformatore corazzato è il nucleo che circonda l'avvolgimento, mentre nel trasformatore a colonne è l'avvolgimento che circonda il nucleo.



35

## Trasformatore con nucleo corazzato



36

## Trasformatore con nucleo corazzato

Gli avvolgimenti sono formati da bobine piane e rettangolari, con gli angoli arrotondati.

Le bobine sono quindi connesse tra loro, intercalando l'isolamento necessario (questo è un caso di avvolgimento alternato).



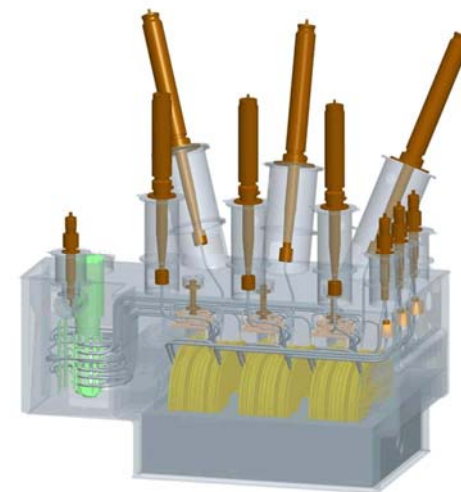
37

## Trasformatore con nucleo corazzato

L'isolamento tra le bobine permette di ottenere canali di circolazione dell'olio, che può circolare in maniera forzata e guidata sulle due facce di ciascuna bobina, aumentando l'efficacia del raffreddamento.

Per ciascuna fase, tutte le connessioni tra bobine, le uscite di queste verso gli isolatori e le prese verso i commutatori del numero di spire sono disposte nella parte alta del trasformatore.

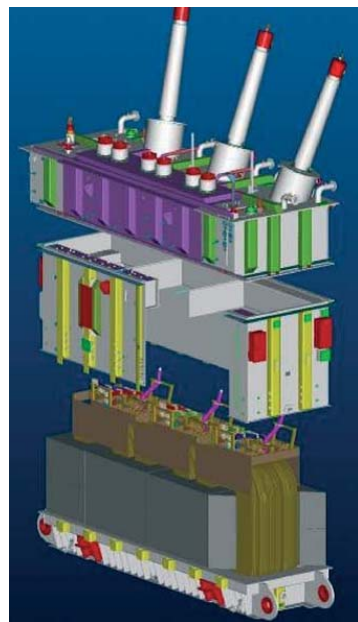
Gli avvolgimenti sono trattati con processi sottovuoto e in temperatura, in modo da impregnare in olio l'isolamento in carta e ridurre al minimo il contenuto di umidità, per una maggiore efficacia del sistema isolante.



38

## Trasformatore con nucleo corazzato

La costruzione corazzata dà una maggiore robustezza: gli sforzi elettrodinamici agenti tra le spire si trasmettono direttamente contro il nucleo magnetico e la carcassa.



39

## Trasformatore con nucleo corazzato

Con la tecnologia corazzata, si ottengono potenze maggiori a parità di dimensioni o, viceversa, dimensioni ridotte a parità di potenza.

Questo tipo di trasformatore può arrivare a: potenza 1300 MVA, tensione primaria 765 kV, trifase o monofase.

Questa tecnologia è utilizzata anche per trasformatori di potenze inferiori, per i quali sia necessario ridurre le dimensioni (es. trasformatori sui treni ad alta velocità, che richiedono design compatto e capacità di resistere ad elevate temperature e shock meccanici).



Questo è un trasformatore corazzato trifase elevatore da 1100 MVA installato in una centrale nucleare negli USA (fonte ABB).

40