



DIMENSIONAMENTO DEI TRASFORMATORI

Lucia FROSINI

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

1

L. Frosini

Dati di targa

Dati di targa				
POTENZA	6300	kVA	TIPO	OLIO
TENSIONE PRIMARIA	15 ±2×2,5%	kV	TENSIONE SECONDARIA	690 V
CORRENTE PRIMARIA	242,5	A	CORRENTE SECONDARIA	5271 A
LIVELLI DI ISOLAMENTO	FI 38 IA 95	kV	LIVELLI DI ISOLAMENTO	FI 3 IA - kV
TENSIONE DI C.C.	10	%	FREQUENZA	50 Hz
COLLEGAMENTO	Dyn11		PESO	12000 kg
			PESO OLIO	2000 Kg

I principali dati di targa di un trasformatore trifase sono:

- A_n potenza apparente
- V_{1n}, V_{2n} tensioni primaria e secondaria nominali
- I_{1n}, I_{2n} correnti primaria e secondaria nominali
- $v_{cc}\%$ tensione di cortocircuito percentuale
- f frequenza
- collegamento
- livelli di isolamento: ad impulso atmosferico (IA), a frequenza industriale (FI), ecc.

2

L. Frosini

Dati di targa: tensione nominale

La tensione nominale primaria o tensione nominale di alimentazione del trasformatore è una grandezza molto importante per il corretto impiego di questa macchina.

Se si alimentasse il trasformatore a un valore di tensione diverso da quello definito dal costruttore, si avrebbero implicazioni fisiche riguardanti non solo problemi di rigidità dielettrica degli isolamenti, ma anche lo sfruttamento magnetico del nucleo in ferro con cui l'avvolgimento si concatena.

Abbiamo visto che, durante il funzionamento a vuoto, tra la tensione di alimentazione V_{1n} ed il flusso concatenato con l'avvolgimento ($N_1\Phi$) esiste, in regime sinusoidale, la seguente relazione:

$$\text{Valore efficace nominale della tensione: } V_{1n} \cong E_1 = \frac{2\pi f N_1 \Phi_M}{\sqrt{2}} = \sqrt{2} \pi f N_1 \Phi_M$$

dove Φ_M è il valore massimo del flusso alternato sinusoidale.

3

L. Frosini

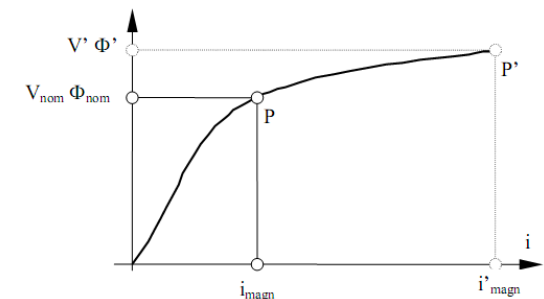
Dati di targa: tensione nominale

Quindi la tensione di alimentazione determina il flusso presente nella struttura magnetica del trasformatore.

Alimentare il primario del trasformatore con valori di tensione diversi dal valore nominale significa far funzionare il trasformatore in condizioni magnetiche diverse da quelle previste dal costruttore.

Vediamo quali sarebbero le conseguenze di una tale scelta.

Al crescere del flusso, la corrente magnetizzante cresce secondo una caratteristica di eccitazione affetta da saturazione (quindi NON LINEARE):



4

Dati di targa: tensione nominale

In un trasformatore correttamente progettato la tensione nominale è fissata in modo che il suo circuito magnetico lavori poco sopra il ginocchio della caratteristica: in tal modo si ottiene il compromesso tra il raggiungimento di elevati valori di flusso ed il contenimento della corrente magnetizzante.

Se si alimentasse il trasformatore ad una tensione più alta del valore nominale, si rischierebbe di assorbire (inutilmente) una corrente a vuoto molto elevata, con conseguente aumento delle perdite nei conduttori dell'avvolgimento e riduzione dell'efficienza del trasformatore.

Viceversa, se si alimentasse il primario ad una tensione più bassa del valore nominale, il ferro del trasformatore sarebbe sotto-sfruttato magneticamente e conseguentemente anche la macchina sarebbe male utilizzata rispetto alle sue potenzialità.

5

Dati di targa: tensione nominale

La tensione nominale di alimentazione è legata anche alla frequenza di alimentazione.

Per frequenze minori di quella nominale, al diminuire della frequenza, si dovrebbe diminuire corrispondentemente il valore della tensione, per mantenere costante il flusso.

Per frequenze maggiori di quella nominale, un aumento della frequenza a parità di flusso provocherebbe un aumento consistente delle perdite nel ferro (che sono proporzionali a f e a f^2 , oltre che approssimativamente al quadrato del flusso): è quindi consigliabile ridurre gradualmente il flusso del trasformatore al crescere della frequenza sopra il suo valore nominale, al fine di mantenere inalterate le perdite.

Nota: nei piccoli trasformatori utilizzati nell'elettronica di potenza, si ottengono tensioni (e quindi potenze) relativamente elevate grazie all'elevata frequenza di alimentazione. Le perdite sono limitate dall'impiego di materiali speciali per il nucleo (es. ferriti), che presentano un ciclo di isteresi molto stretto e una resistività più elevata di quella del ferro-silicio.

6

Dati di targa: potenza nominale

Il valore di potenza nominale attribuibile a un trasformatore è fisicamente collegato al riscaldamento che la macchina subisce a carico, come conseguenza delle perdite negli avvolgimenti e nel ferro.

Ne consegue l'utilità di definire la potenza nominale del trasformatore in termini di potenza apparente (VA) e non di potenza attiva (W).

Infatti, il trasformatore si scalda:

➤ per effetto di perdite negli avvolgimenti che dipendono dal quadrato della corrente efficace di carico;

➤ per effetto di perdite nel ferro che dipendono dal quadrato del valore efficace della tensione di alimentazione.

Nessuna rilevanza ha lo sfasamento tra tensione e corrente erogata nella determinazione delle perdite totali e nel riscaldamento della macchina.

7

Dati di targa: corrente nominale

Il valore della corrente nominale è collegato con l'effetto Joule che si manifesta in un conduttore percorso da corrente.

La corrente nominale di un avvolgimento è quel valore di corrente che, in condizioni nominali di alimentazione, produce un riscaldamento tollerabile, identificato da una temperatura massima ammissibile per l'avvolgimento (fissata dagli isolanti).

In pratica e con una certa approssimazione, vale la seguente relazione tra perdite Joule e sovratemperatura dell'avvolgimento $\Delta\theta$ rispetto all'ambiente o al mezzo in cui è immerso:

$$R_a I^2 = K_S \cdot Sup_a \cdot \Delta\theta$$

R_a = resistenza dell'avvolgimento [Ω]

I = corrente efficace che circola nell'avvolgimento [A]

K_S = coefficiente di scambio termico dell'avvolgimento [W/m^2K]

Sup_a = superficie dell'avvolgimento verso l'ambiente [m^2]

$\Delta\theta$ = differenza di temperatura tra avvolgimento e ambiente [K]

8

Dati di targa: corrente nominale

Di conseguenza, il valore nominale della corrente è valutabile tramite la seguente espressione:

$$I = \sqrt{\frac{K_S \cdot Sup_a \cdot \Delta\theta}{R_a}}$$

Quindi, la corrente nominale (o ammissibile) dell'avvolgimento:

- ☉ cresce al diminuire della resistenza R_a (aumento della sezione del conduttore);
- ☉ cresce al crescere della superficie di scambio termico Sup_a (avvolgimento suddiviso in più strati separati da canali di raffreddamento);
- ☉ cresce al migliorare del coefficiente di scambio termico K_S (raffreddamento in aria per convezione naturale, in aria per circolazione forzata, in olio, ecc.);
- ☉ cresce al crescere della temperatura limite ammissibile per l'isolante (a seconda della classe termica dell'isolante).

9

Dati di targa: corrente nominale

Si osserva che la formula utilizzata per definire approssimativamente le perdite per effetto Joule vale in generale per valutare le perdite trasferite come calore nell'unità di tempo per il fenomeno della convezione:

$$P = K_S \cdot Sup_a \cdot \Delta\theta$$

Ordine di grandezza di K_S (parete di contatto verticale liscia e convezione naturale)

Aria	5 W/m ² K
Olio	100 W/m ² K
Acqua	500 W/m ² K

Fattori che influenzano il coefficiente di convezione K_S :

- ◆ forma della parete (piatta o curva);
- ◆ densità, viscosità, calore specifico, conducibilità termica del fluido (caratteristiche fisiche che dipendono dalla temperatura);
- ◆ velocità del fluido.

10

Dati di targa: tensione di cortocircuito

La **tensione di cortocircuito** V_{cc} di un trasformatore, riferita a uno dei suoi avvolgimenti, è la tensione che occorre applicare a tale avvolgimento, essendo l'altro avvolgimento chiuso in cortocircuito, affinché la rispettiva corrente nominale circoli in entrambi gli avvolgimenti.

La **tensione di cortocircuito percentuale** $v_{cc}\%$ è il rapporto, espresso in percentuale, tra la tensione di cortocircuito e la tensione nominale dell'avvolgimento di riferimento:

$$v_{cc}\% = \frac{V_{cc1}}{V_{1n}} \cdot 100 = \frac{V_{cc2}}{V_{2n}} \cdot 100$$

Nella prova di cortocircuito si determina l'impedenza di cortocircuito di un avvolgimento (ad es. il secondario):

$$Z_{cc2} = \sqrt{R_{cc2}^2 + X_{cc2}^2}$$

e di conseguenza la sua tensione di cortocircuito:

$$V_{cc2} = Z_{cc2} \cdot I_{2n}$$

11

Considerazioni sul dimensionamento

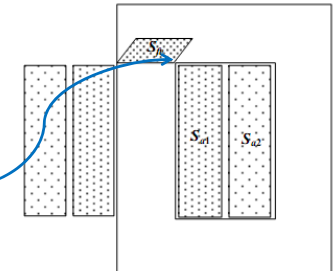
È possibile stabilire una relazione tra la potenza nominale e le dimensioni di principali di un trasformatore.

Per semplicità, consideriamo un trasformatore monofase con potenza apparente nominale A_n e tensioni nominali primaria e secondaria V_{1n} e V_{2n} :

$$V_{1n} \cong E_1 = \sqrt{2}\pi f N_1 \Phi_M = \sqrt{2}\pi f N_1 B_M S_{fe}$$

$$V_{2n} \cong E_2 = \sqrt{2}\pi f N_2 \Phi_M = \sqrt{2}\pi f N_2 B_M S_{fe}$$

sezione netta di ferro del nucleo del trasformatore



12

Dimensionamento del nucleo

Per ottenere un determinato valore di V_{1n} e V_{2n} , la scelta del valore massimo dell'induzione nominale B_M è frutto di un compromesso:

- un valore troppo piccolo comporterebbe grandi sezioni di ferro e/o elevati numeri di spire dell'avvolgimento (quindi maggiori dimensioni e maggiori costi);
 - alti valori d'induzione possono portare a saturazione del ferro, con conseguente eccessivo aumento della corrente magnetizzante e delle perdite. Tipicamente i valori di induzione usati nella costruzione dei trasformatori si attestano tra **1,2 T ÷ 1,9 T**, in relazione alla taglia del trasformatore e alla qualità del materiale magnetico: ad es. per un trasformatore da 1600 kVA si usa indicativamente 1,7 T se in olio e 1,6 T se in aria.
- Si osserva anche che, al crescere della frequenza di alimentazione (e a parità di altre condizioni), l'avvolgimento tende a rimpicciolire (ossia, diminuiscono i numeri di spire N_1 e N_2 o la sezione S_{fe}). Questo fatto è tipico non solo del trasformatore, ma di tutte le macchine elettriche in corrente alternata.

13

Dimensionamento degli avvolgimenti

La sezione dei conduttori deve essere adeguata alle correnti nominali.

Il problema della scelta della sezione del conduttore in funzione della corrente che esso dovrà sopportare è collegato ai problemi di:

- riscaldamento dell'avvolgimento,
- temperatura massima di funzionamento dell'isolamento,
- modalità di asportazione del calore prodotto per effetto Joule.

Un parametro mediamente significativo delle condizioni termiche è la **densità di corrente efficace J** .

Ipotizzando di usare la stessa densità di corrente J per i conduttori dei due avvolgimenti, si possono scrivere le seguenti relazioni:

$$\textcircled{S_{c1}} = \frac{I_{1n}}{J} \quad \textcircled{S_{c2}} = \frac{I_{2n}}{J} \quad \text{sezioni dei conduttori primari e secondari}$$

14

Dimensionamento degli avvolgimenti

Data la potenza nominale apparente del trasformatore (monofase):

$$A_n = V_{1n} I_{1n} = V_{2n} I_{2n} \quad (\text{valida a meno delle perdite})$$

e le espressioni delle correnti: $I_{1n} = J \cdot S_{c1}$ $I_{2n} = J \cdot S_{c2}$

$$\begin{aligned} \rightarrow \left\{ \begin{aligned} A_n &= V_{1n} I_{1n} = \sqrt{2} \pi f N_1 B_M S_{fe} \cdot J \cdot S_{c1} \\ A_n &= V_{2n} I_{2n} = \sqrt{2} \pi f N_2 B_M S_{fe} \cdot J \cdot S_{c2} \end{aligned} \right. \rightarrow \begin{aligned} &\boxed{N_1 S_{c1} = N_2 S_{c2}} \\ &\downarrow \\ &\boxed{S_{a1} = S_{a2}} \end{aligned} \end{aligned}$$

Le sezioni nette degli avvolgimenti primari e secondari (S_{a1} e S_{a2}) devono essere circa uguali.

15

Dimensionamento degli avvolgimenti

Osservazione: S_{a1} , S_{a2} , S_{fe} sono tutte sezioni nette di materiale.

Nella realtà, gli ingombri devono essere maggiorati in base al fattore di stipamento del materiale: ferro e rame/alluminio (dovuto allo spessore dell'isolante, ecc.). Per ora ipotizzeremo che lo stipamento sia perfetto e che ingombri netti e lordi coincidano.

Indicando con S_a la sezione dell'avvolgimento primario o secondario:

$$A_n = \sqrt{2} \pi f \textcircled{B_M} \textcircled{J} S_{fe} \cdot S_a \quad B_M \text{ e } J: \text{indici di sfruttamento dei materiali}$$

Questa espressione può essere assunta come base per il dimensionamento del trasformatore: fissati gli indici di sfruttamento dei materiali (B_M e J), la potenza nominale A_n diventa una funzione delle principali dimensioni geometriche del trasformatore (S_{fe} e S_a).

16

Dimensionamento degli avvolgimenti

Nota:

Quando il trasformatore è dotato di più avvolgimenti secondari di potenza diversa, la sezione di rame (o alluminio) di ciascun avvolgimento e il corrispondente ingombro sarà proporzionale alla rispettiva potenza.

Il trasformatore non avrà una potenza nominale unica, ma tante potenze nominali diverse quanti sono gli avvolgimenti.

La potenza di dimensionamento in questo caso sarà definita come:

$$A_n = \sqrt{2\pi f} \cdot B_M \cdot J \cdot S_{fe} \cdot \left(\frac{S_{a1} + S_{a2} + \dots + S_{aN}}{N} \right)$$

17

Dimensionamento degli avvolgimenti

In generale, il dimensionamento geometrico non ha un'unica soluzione.

A parità di sfruttamento dei materiali (B_M e J) e di potenza nominale richiesta (A_n), si possono avere soluzioni con sezioni di ferro maggiori e corrispondenti sezioni di rame minori, o viceversa (deve essere mantenuto costante il loro prodotto). Questo grado di libertà può essere sfruttato per fornire al trasformatore caratteristiche particolari.

Infatti, le perdite per effetto Joule relative a una colonna (e a entrambi gli avvolgimenti) possono essere espresse come:

$$P_{Joule} = \rho \cdot J^2 \cdot (N_1 \pi D_1 S_{c1} + N_2 \pi D_2 S_{c2}) = \rho \cdot J^2 \cdot (\pi D_1 S_{a1} + \pi D_2 S_{a2}) \cong \rho \cdot J^2 \cdot \pi D_m \cdot 2S_a$$

$D_1, D_2, D_m =$ diametri medi avvolgimenti
(ipotesi: stesso materiale per primario e secondario)

E le perdite nel ferro:

$$P_{fe} = (k_{ist} f \cdot B_M^n + k_{cp} f^2 \cdot B_M^2) \cdot \gamma_{fe} \cdot S_{fe} \cdot h_{fe} \cong (k_{ist} f + k_{cp} f^2) \cdot B_M^2 \cdot \gamma_{fe} \cdot S_{fe} \cdot h_{fe}$$

$\gamma_{fe} =$ peso specifico ferro [kg/m^3]
(andrebbe aggiunta la perdita nei gioghi e nell'eventuale colonna di richiusura)

18

Dimensionamento degli avvolgimenti

Rapportando le perdite alla potenza nominale: $A_n = \sqrt{2\pi f} \cdot B_M \cdot J \cdot S_{fe} \cdot S_a$

$$\rightarrow \frac{P_{Joule}}{A_n} = \frac{\rho \cdot J^2 \cdot \pi D_m \cdot 2S_a}{\sqrt{2\pi f} \cdot B_M \cdot J \cdot S_{fe} \cdot S_a} = \frac{\sqrt{2} \rho \cdot J \cdot \pi D_m}{f \cdot B_M \cdot S_{fe}}$$

$$\rightarrow \frac{P_{fe}}{A_n} = \frac{(k_{ist} f + k_{cp} f^2) \cdot B_M^2 \cdot \gamma_{fe} \cdot S_{fe} \cdot h_{fe}}{\sqrt{2\pi f} \cdot B_M \cdot J \cdot S_{fe} \cdot S_a} = \frac{(k_{ist} f + k_{cp} f^2) \cdot B_M \cdot \gamma_{fe} \cdot h_{fe}}{\sqrt{2\pi f} \cdot J \cdot S_a}$$

Solitamente, per ridurre le perdite nel ferro P_{fe} , si riduce la B_M e corrispondentemente si aumenta S_{fe} (di conseguenza aumenta D_m).

In questo modo aumentano però le perdite negli avvolgimenti P_{Joule} .

Si osserva che, a parità di altre condizioni, le perdite sono proporzionali ai volumi dei materiali attivi.

19

Dimensionamento del trasformatore

Supponiamo di voler progettare un trasformatore prendendo come modello un esemplare esistente e variando secondo un rapporto fisso λ tutte le dimensioni lineari.

Supponiamo di mantenere inalterati i valori di induzione B_M e di densità di corrente J usati nell'esemplare preso a modello.

Un parametro che potremo decidere di variare è il numero di spire di ciascun avvolgimento.

Potenza nominale:

La potenza nominale dipende dal prodotto di due aree (S_{fe} e S_a); tale prodotto varia con la 4^a potenza della dimensione lineare del trasformatore:

$$A'_n = \lambda^4 \cdot A_n$$

20

Dimensionamento del trasformatore

Tensione nominale:

La tensione nominale di ciascun avvolgimento varia in funzione della sezione del nucleo e del numero di spire:

$$V_n \cong \sqrt{2} \pi f N B_M S_{fe} \quad \rightarrow \quad V'_n = \lambda^2 \frac{N'}{N} V_n$$

Se non si altera il numero di spire ($N'=N$), la tensione nominale cresce quadraticamente col rapporto di similitudine:

$$V'_n = \lambda^2 \cdot V_n$$

Se invece si vuole mantenere invariato il valore di tensione nominale, è sufficiente modificare il numero di spire degli avvolgimenti:

$$V'_n = V_n \quad \rightarrow \quad N' = \frac{N}{\lambda^2}$$

21

Dimensionamento del trasformatore

Corrente nominale:

La corrente nominale di ciascun avvolgimento è data da:

$$I_n = J \cdot S_c = J \cdot \frac{S_a}{N}$$

Quindi, la corrente nominale aumenta in modo direttamente proporzionale alla sezione dell'avvolgimento e inversamente al numero di spire:

$$I'_n = \frac{\lambda^2}{N'/N} I_n$$

22

Dimensionamento del trasformatore

Corrente magnetizzante:

Approssimativamente, la corrente magnetizzante è data da:

$$I_{0\mu} = \frac{\mathfrak{R}_m \Phi_M}{N} = \frac{1}{N} \cdot \frac{l_{fe}}{\mu_{fe} S_{fe}} \cdot B_M \cdot S_{fe} = \frac{1}{N} \cdot \frac{l_{fe} \cdot B_M}{\mu_{fe}}$$

dove l_{fe} è la lunghezza della linea media percorsa dal flusso nel nucleo.

Quindi, la corrente magnetizzante aumenta in modo direttamente proporzionale alla lunghezza del nucleo e inversamente al numero di spire:

$$I'_{0\mu} = \frac{\lambda}{N'/N} I_{0\mu}$$

→ La corrente magnetizzante cresce meno rapidamente della corrente nominale dell'avvolgimento al crescere delle dimensioni del trasformatore.

23

Dimensionamento del trasformatore

Il valore della corrente magnetizzante riferito percentualmente alla corrente nominale varia secondo la seguente espressione:

$$i'_{0\mu} \% = \frac{1}{\lambda} i_{0\mu} \%$$

→ Trasformatori di grossa potenza hanno una corrente magnetizzante percentuale tendenzialmente più piccola rispetto ai trasformatori di piccola potenza (questo accade anche perché l'influenza dei traferri nei piccoli trasformatori è percentualmente più elevata rispetto a quelli di grandi dimensioni).

24

Dimensionamento del trasformatore

Pesi, perdite e rendimento:

Il peso dei materiali attivi del trasformatore (e quindi il peso complessivo del trasformatore) varia proporzionalmente ai rispettivi volumi e quindi con la 3^a potenza della dimensione lineare.

Di conseguenza, poiché le perdite nei materiali attivi, a parità di indici di sfruttamento, dipendono dal peso (o volume) degli stessi, anche le perdite complessive variano con la 3^a potenza della dimensione lineare.

Poiché invece la potenza nominale del trasformatore varia con la 4^a potenza della dimensione lineare, si ha che:

I trasformatori hanno rapporti potenza/peso e rendimenti tanto più elevati quanto maggiore è la loro potenza nominale: un unico grande trasformatore pesa meno, consuma meno energia e costa meno di un gruppo di trasformatori più piccoli di potenza complessiva equivalente.

25

Dimensionamento del trasformatore

Rapporti di similitudine:

- ☉ la potenza nominale varia con la 4^a potenza della dimensione lineare: $A'_n = \lambda^4 \cdot A_n$
- ☉ il peso complessivo varia con la 3^a potenza della dimensione lineare: $P_{eso}' = \lambda^3 \cdot P_{eso}$

Trasformatori a secco 20 kV/400 V												
Potenza [kVA]	Rapporto tra due potenze successive	Radice quarta del rapporto (λ)	λ^3	Peso [kg] da catalogo	Rapporto tra due pesi successivi	Peso [kg] calcolato dal precedente $\cdot \lambda^3$	P_0 [W]	Rapporto tra due P_0 successive	P_0 [%]	P_{cc} [W]	Rapporto tra due P_{cc} successive	P_{cc} [%]
1000	-	-	-	3200	-	-	2300	-	0,2%	9600	-	1,0%
1250	1,250	1,057	1,182	3800	1,188	3783	2700	1,174	0,2%	11500	1,198	0,9%
1600	1,280	1,064	1,203	4500	1,184	4573	3100	1,148	0,2%	14000	1,217	0,9%
2000	1,250	1,057	1,182	5100	1,133	5320	3800	1,226	0,2%	17000	1,214	0,9%
2500	1,250	1,057	1,182	5900	1,157	6029	5000	1,316	0,2%	20000	1,176	0,8%

Potenza [kVA]	Rapporto tra due potenze successive	$P_0 + P_{cc}$ [W]	Rapporto tra due $P_0 + P_{cc}$ successive	rendimento a carico nominale con $\cos\phi = 1$	lunghezza [mm]	larghezza [mm]	altezza [mm]	volume [m ³]	Rapporto tra due volumi successivi
1000	-	11900	-	98,81%	1920	900	1900	3,283	-
1250	1,250	14200	1,193	98,86%	1980	950	2000	3,762	1,146
1600	1,280	17100	1,204	98,93%	2050	1000	2150	4,408	1,172
2000	1,250	20800	1,216	98,96%	2100	1050	2350	5,182	1,176
2500	1,250	25000	1,202	99,00%	2150	1150	2450	6,058	1,169

26

Dimensionamento del trasformatore

Temperature:

Le sovratemperature raggiunte da un trasformatore nel funzionamento a carico, a causa delle perdite, dipendono dalla capacità dello stesso di smaltire il calore prodotto verso l'ambiente esterno. Utilizziamo di nuovo la relazione semplificata per descrivere il fenomeno di trasmissione del calore:

$$\Delta\theta = \frac{Perdite_{totali}}{K_S \cdot S_t}$$

dove:

$\Delta\theta$ è la sovratemperatura media tra il trasformatore e l'ambiente,

K_S è il coefficiente di scambio termico,

S_t è la superficie attraverso cui viene trasmesso il calore.

27

Dimensionamento del trasformatore

Poiché le perdite del trasformatore crescono con la 3^a potenza della dimensione lineare, mentre le superfici naturali di scambio termico crescono con il quadrato della dimensione lineare, risulta:

$$\Delta\theta' = \lambda \cdot \Delta\theta$$

Più grande è il trasformatore, maggiori difficoltà si incontrano a raffreddarlo.

Per questo motivo, mentre piccoli trasformatori non hanno particolari dispositivi, se non la convezione naturale dell'aria circostante, per provvedere al loro raffreddamento, i grandi trasformatori hanno sistemi sofisticati di raffreddamento basati sia sull'aumento delle superfici di scambio (canali di ventilazione, superfici radianti alettate, etc.), sia sul miglioramento del coefficiente di scambio (raffreddamento in olio a circolazione naturale, a circolazione forzata, etc.).

28

Variatione dei parametri del circuito equivalente

Vediamo come si modificano i parametri del circuito equivalente con la dimensione lineare del trasformatore.

La resistenza che rappresenta le perdite nel ferro:

$$R_{fe} = \frac{V_n^2}{P_{fe}} \quad \Rightarrow \quad R'_{fe} = \left(\frac{N'}{N}\right)^2 \frac{\lambda^4}{\lambda^3} R_{fe} = \left(\frac{N'}{N}\right)^2 \lambda R_{fe}$$

(le perdite di potenza sono proporzionali al volume) $\Rightarrow V'_n = \lambda^2 \frac{N'}{N} V_n$

La reattanza di magnetizzazione:

$$X_m = \omega L_m = \omega \frac{N^2}{\mathfrak{R}_m} = \omega N^2 \cdot \frac{\mu_{fe} S_{fe}}{l_{fe}} \quad \Rightarrow \quad X'_m = \left(\frac{N'}{N}\right)^2 \lambda X_m$$

29

Variatione dei parametri del circuito equivalente

La resistenza degli avvolgimenti:

$$R_a = N \cdot \rho \frac{l_{spira}}{S_c} = N \cdot \rho \frac{l_{spira}}{S_a/N} = N^2 \cdot \rho \frac{l_{spira}}{S_a} \quad \Rightarrow \quad R'_a = \left(\frac{N'}{N}\right)^2 \frac{R_a}{\lambda}$$

La reattanza di dispersione:

$$X_d = \omega \frac{N^2}{\mathfrak{R}_d} = \omega N^2 \cdot \frac{\mu S}{l} \quad \Rightarrow \quad X'_d = \left(\frac{N'}{N}\right)^2 \lambda X_d$$

Nella formula della reattanza di dispersione non sono state indicizzate la permeabilità, la lunghezza e la sezione, perché relative al percorso del flusso disperso, che risulta di difficile determinazione (anche se si svolge prevalentemente in aria).

30

Variatione dei parametri del circuito equivalente

Sulla base di queste relazioni:

$$R'_a = \left(\frac{N'}{N}\right)^2 \frac{R_a}{\lambda} \quad X'_d = \left(\frac{N'}{N}\right)^2 \lambda X_d$$

Si può osservare che, al crescere delle dimensioni del trasformatore, la resistenza di cortocircuito diminuisce mentre la reattanza di corto circuito aumenta.

Pertanto l'impedenza di cortocircuito di un grande trasformatore assume un carattere prevalentemente reattivo e la tensione di corto circuito risulta:

$$V_{cc} \approx X_{cc} I_n$$

Quindi, per un grande trasformatore con impedenza di cortocircuito prevalentemente reattiva, considerate le relazioni ottenute per X'_d e I'_n , si ottiene per V'_{cc} :

$$I'_n = \frac{\lambda^2}{N'/N} I_n \quad \Rightarrow \quad V'_{cc} = \frac{N'}{N} \lambda^3 V_{cc}$$

31

Variatione dei parametri del circuito equivalente

Il valore percentuale della tensione di corto circuito risulta: $v_{cc} \% = 100 \cdot \frac{V_{cc}}{V_n}$

Quindi, sulla base delle due relazioni: $V'_{cc} = \frac{N'}{N} \lambda^3 V_{cc}$ $V'_n = \lambda^2 \frac{N'}{N} V_n$

Si ottiene: $v'_{cc} \% = \lambda \cdot v_{cc} \%$

Al crescere delle dimensioni e della potenza del trasformatore il valore della tensione percentuale di corto circuito, sia pure lentamente, aumenta.

Nei trasformatori di grossa taglia esso può risultare eccessivo: occorre in questo caso ricorrere ad artifici costruttivi che consentano di ridurre le reattanze di dispersione, come ad es. l'avvolgimento doppio concentrico.

Ordine di grandezza per la $v_{cc} \%$ di trasformatori di potenza da pochi MVA a centinaia di MVA: dal 5÷6% al 10÷14%.

32

Variatione dei parametri del circuito equivalente

Si osserva che la $v_{cc}\%$ fornisce un'indicazione della caduta di tensione del trasformatore a carico (perché $V''_{cc} = Z''_{cc} \cdot I_{2n}$).

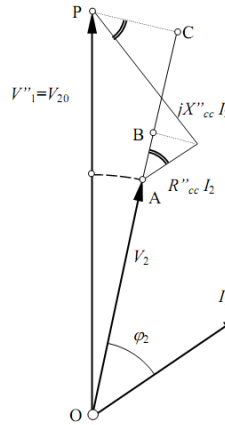
Questa caduta è data dalla differenza algebrica tra il modulo della tensione ai morsetti secondari a vuoto V_{20} e il modulo della tensione ai morsetti secondari quando il trasformatore eroga una corrente di carico V_2 :

$$\Delta V = V_{20} - V_2$$

Questa variazione di tensione ai morsetti secondari del trasformatore dipende da:

- $v_{cc}\%$
- corrente di carico I_2
- fattore di potenza del carico $\cos\varphi_2$

È quindi desiderabile, nella maggior parte dei casi, che la $v_{cc}\%$ sia sufficientemente bassa.



33

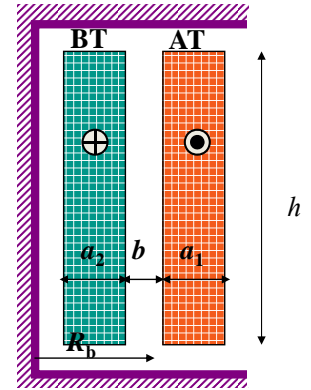
Variatione dei parametri del circuito equivalente

Se si mantiene un avvolgimento di tipo concentrico, ricordando l'espressione della sua reattanza di dispersione:

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

si osserva che essa è proporzionale al rapporto tra perimetro medio ($2\pi R_b$) e altezza (h) dell'avvolgimento:

quindi X_d (e di conseguenza V_{cc}) è relativamente bassa o alta a seconda che il nucleo sia, rispettivamente, "snello" o "tozzo".



Nota: una maggiore reattanza di dispersione significa maggiore flusso disperso e quindi, in generale (se non si prendono opportuni provvedimenti costruttivi), maggiore perdite addizionali dovute ai flussi magnetici che si concatenano con le diverse parti metalliche del trasformatore.

34

Variatione dei parametri del circuito equivalente

Queste valutazioni di scala forniscono informazioni sullo sviluppo naturale della crescita di dimensioni del trasformatore, qualora venissero mantenuti inalterati gli sfruttamenti dei materiali e le proporzioni geometriche della macchina.

Naturalmente non tutte queste variazioni di scala possono essere accettate in fase di progetto, pertanto potranno rendersi necessari provvedimenti per riportare lo sviluppo del dimensionamento alle particolari esigenze di impiego.

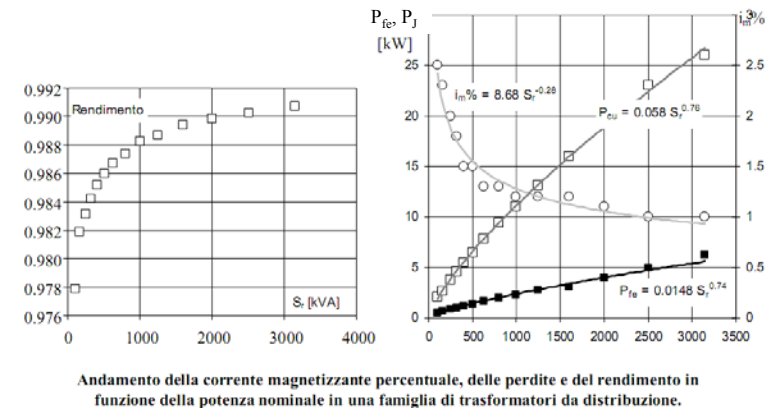
In generale:

$$\left\{ \begin{array}{l} A'_n = \lambda^4 A_n \\ P'_{fe} = \lambda^3 P_{fe} \\ P'_J = \lambda^3 P_J \\ i'_{0\mu}\% = \frac{1}{\lambda} i_{0\mu}\% \end{array} \right. \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} P_{fe} = K_{fe} A_n^{0.75} \\ P_J = K_J A_n^{0.75} \\ i_{0\mu}\% = K_{0\mu} A_n^{-0.25} \end{array} \right.$$

35

Variatione dei parametri del circuito equivalente

I seguenti diagrammi illustrano gli andamenti delle perdite nel ferro, delle perdite negli avvolgimenti e del rendimento in funzione della potenza nominale del trasformatore, a parziale conferma delle deduzioni precedenti.



36

Dimensionamento del trasformatore

Differenze tra trasformatori in olio a perdite normali e ridotte (dati del 2004):

Trasformatori in olio ONAN 20 kV/400 V Dyn11 $V_{ct}\% = 6\%$																	
Potenza	Perdite					Livello Rumore	Materiale Avv.		Pesi			Dimensioni			Volume	Prezzo	
	P_0	P_{cc}	$r = P_{cc}/P_0$	η	$\cos\phi = 1$		$\cos\phi = 0,8$	dB	AT	BT	Olio	Totale	Netto	Lungh			Largh
kVA	W	W								kg	kg	kg	mm	mm	mm	m^3	€
PERDITE RIDOTTE																	
1000	1330	9000	6,8	98,98%	98,73%	58	Cu	Cu	470	2720	2250	1690	1010	1715	2,93	8.035	
1250	1600	11000	6,9	99,00%	98,76%	59	Cu	Cu	500	2980	2480	1680	1010	1730	2,94	9.560	
1600	2090	13000	6,2	99,07%	98,83%	60	Cu	Cu	640	3790	3150	1680	1010	1890	3,21	11.365	
2000	2400	16000	6,7	99,09%	98,86%	62	Cu	Cu	720	4480	3760	1840	1270	1940	4,53	13.545	
PERDITE STANDARD																	
1000	1800	13900	7,7	98,45%	98,08%	75	Cu	Al	450	2400	1950	1760	1150	1625	3,29	6.850	
1250	2300	15900	6,9	98,56%	98,21%	77	Cu	Al	530	2830	2300	1820	1170	1695	3,61	8.050	
1600	2700	20400	7,6	98,58%	98,23%	78	Cu	Al	660	3640	2980	1900	1200	1835	4,18	9.560	
2000	3300	26000	7,9	98,56%	98,20%	81	Cu	Al	840	4350	3510	2000	1280	2015	5,16	11.420	

Materiale	Peso specifico [kg/dm ³]
Rame	8,9
Ferro	7,8
Alluminio	2,6

	Densità di corrente J [A/mm ²] in funzione del materiale e del tipo di raffreddamento				
	AN	AF	ONAN	ONAF	ODAF
Rame	1,2÷2	2÷2,5	2,5÷4	3,5÷4,5	4÷5
Alluminio	0,8÷1,3	1,3÷1,7	1,7÷2,7	2,3÷3	2,7÷3,3

Osservazione sui pesi: il peso specifico del rame è molto maggiore dell'alluminio!

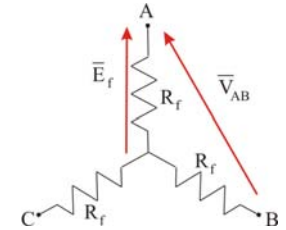
Collegamenti del trasformatore trifase

La struttura trifase degli avvolgimenti primari e secondari del trasformatore consente diversi modi di connessione degli stessi alla rete elettrica e al carico (o al generatore).

Le due forme di connessione usate più frequentemente sono quelle denominate rispettivamente **stella** (simbolo Y per l'avvolgimento in alta tensione e y per l'avvolgimento in bassa tensione) e **triangolo** (simbolo D o d).

Se il collegamento è a **stella**:

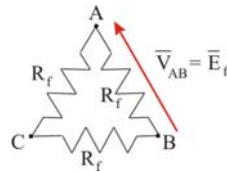
- ✓ le tensioni concatenate sono uguali a $\sqrt{3}$ volte le tensioni di fase (tensioni ai capi di ciascuna bobina),
- ✓ le correnti di linea sono uguali alle correnti di fase,
- ✓ la resistenza misurata ai capi di due morsetti è uguale alla serie di due resistenze di fase.



Collegamenti del trasformatore trifase

Se il collegamento è a **triangolo**:

- ✓ le tensioni concatenate sono uguali alle tensioni di fase,
- ✓ le correnti di linea sono uguali a $\sqrt{3}$ volte le correnti di fase,
- ✓ la resistenza misurata ai capi di due morsetti è uguale al parallelo tra una resistenza di fase con una serie di due resistenze di fase.



Quando il collegamento primario è dello stesso tipo di quello secondario (gruppi omonimi, ossia collegamenti Yy, yY, Dd, dD), il rapporto di trasformazione corrisponde al rapporto tra il numero di spire della bobina primaria (N_1) e quello della bobina secondaria (N_2):

$$\frac{V_{1n}}{V_{2n}} = \frac{N_1}{N_2}$$

Rapporti di trasformazione

Quando il collegamento primario è diverso da quello secondario (gruppi eteronimi, ossia collegamenti Yd, yD, Dy, dY), il rapporto di trasformazione non corrisponde al rapporto tra il numero di spire della bobina primaria e quello della bobina secondaria.

Per i trasformatori del tipo Yd o yD, il rapporto di trasformazione vale:

$$\frac{V_{1n}}{V_{2n}} = \frac{\sqrt{3}V_{1n\ fase}}{V_{2n\ fase}} = \sqrt{3} \frac{N_1}{N_2} \quad \text{Yd} \quad \text{yD}$$

Per i trasformatori del tipo Dy o dY, il rapporto di trasformazione vale:

$$\frac{V_{1n}}{V_{2n}} = \frac{V_{1n\ fase}}{\sqrt{3}V_{2n\ fase}} = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{N_1}{N_2} \quad \text{Dy} \quad \text{dY}$$

Collegamenti del trasformatore trifase

A livello costruttivo, la connessione a stella è preferibile rispetto alla connessione a triangolo negli avvolgimenti in alta tensione.

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

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

Per quanto concerne, invece, il peso di materiale conduttore impiegato, non ci sono differenze tra i due tipi di connessione. Infatti, a parità di tensione concatenata:

- nella connessione a stella si ha un avvolgimento che necessita di meno spire (in ragione di $\sqrt{3}$) rispetto al triangolo,
- nel triangolo la sezione del conduttore è inferiore (sempre nella stessa ragione di $\sqrt{3}$) per il fatto che la corrente di fase nel triangolo è inferiore alla corrente di linea.

41

Collegamenti del trasformatore trifase

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

Per comprendere l'utilità della connessione a triangolo, occorre fare una considerazione riguardo le armoniche che possono essere presenti nelle correnti magnetizzanti.

Poiché la relazione tra flusso e corrente magnetizzante non è lineare, ma soggetta a saturazione, nella pratica si possono avere le seguenti due situazioni:

1. Tensioni alternate sinusoidali, con conseguenti f.e.m. sinusoidali e **flusso sinusoidale**, ma **correnti magnetizzanti contenenti la terza armonica**;
2. **Correnti magnetizzanti sinusoidali**, ma **flusso contenente la terza armonica**, f.e.m. contenenti la terza armonica e tensioni concatenate che dipendono dal collegamento.

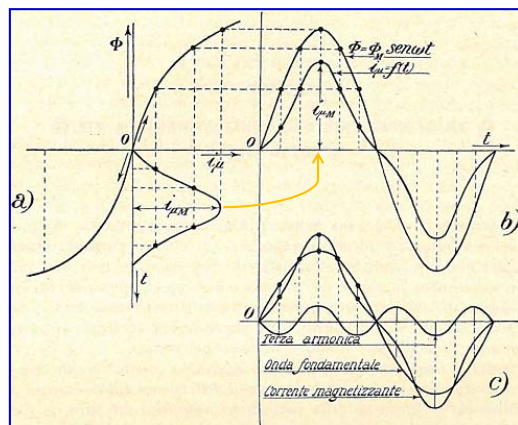
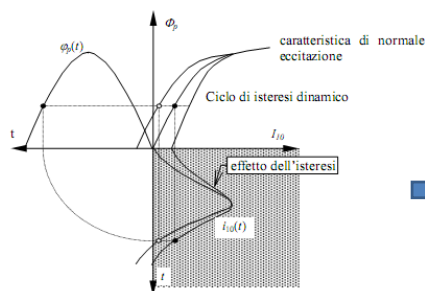
42

Collegamenti del trasformatore trifase

Prima situazione:

F.e.m. e flusso sinusoidali, correnti magnetizzanti contenenti la 3° armonica:

Nota: un andamento più realistico della corrente magnetizzante si ottiene basandosi sul ciclo di isteresi dinamico anziché sulla caratteristica di normale magnetizzazione:



➡ Il contenuto armonico della corrente non cambia (le armoniche sono sempre quelle di ordine dispari), ma l'effetto dell'isteresi dinamica è di sfasare in anticipo la corrente rispetto al flusso e di alterare l'ampiezza delle armoniche di corrente.

43

Collegamenti del trasformatore trifase

Seconda situazione:

Correnti magnetizzanti sinusoidali, f.e.m. e flusso contenenti la terza armonica.

Se il collegamento è a stella, sebbene le 3 tensioni di fase risultino deformate, quelle concatenate rimangono sinusoidali, essendo date ciascuna dalla differenza tra due tensioni di fase. Se invece il collegamento è a triangolo, le f.e.m. di terza armonica agiscono in serie determinando una corrente che si richiude nel triangolo: questa corrente, per la legge di Lenz, ha l'effetto di smorzare la terza armonica dei flussi e di smorzare di conseguenza il grado di deformazione delle tensioni di fase.

Se le tensioni di fase (e quindi il flusso) sono deformate, la connessione a triangolo viene preferita perché consente di smorzare questa deformazione nelle f.e.m. indotte.

➡ Per questo motivo, **i trasformatori elevatori sui gruppi di generazione sono generalmente di gruppo dY**. Un altro motivo è dato dal fatto che in uscita al generatore le correnti sono molto elevate (e le tensioni relativamente basse < 20 kV): con il triangolo le correnti di fase si riducono di $\sqrt{3}$.

44

Collegamenti del trasformatore trifase

In generale, se il trasformatore è alimentato a tensione sinusoidale, a causa della non linearità del nucleo ferromagnetico, affinché possa essere sinusoidale la f.e.m. indotta, la corrente magnetizzante assorbita da ogni fase deve essere non sinusoidale e quindi deformata, cioè composta da una fondamentale e da una armonica del terzo ordine (sono presenti anche armoniche di ordine superiore, ma essendo la loro intensità molto piccola si possono trascurare).

Primario a stella con neutro, secondario a stella $Y_n y$

Ciascuna delle tre correnti magnetizzanti assorbite nelle tre fasi si compone di una fondamentale a 50 Hz e un'armonica di terzo ordine a 150 Hz.

Applicando il primo principio di Kirchhoff al centro stella O, si ottiene che le tre componenti fondamentali a 50 Hz, essendo sfasate di 120° tra di loro, danno come risultante zero. Di conseguenza, attraverso il neutro non circolerà alcuna componente fondamentale di corrente magnetizzante.

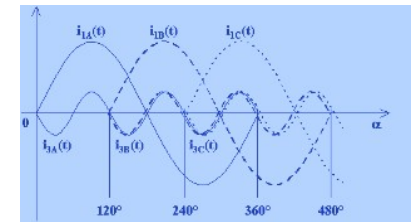
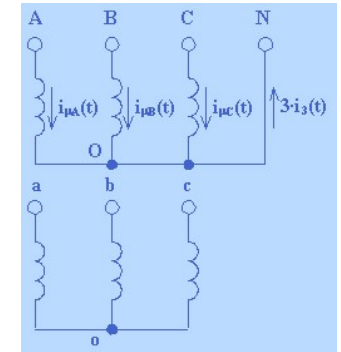
45

Primario a stella con neutro, secondario a stella $Y_n y$

Invece, le componenti armoniche di terzo ordine a 150 Hz delle correnti magnetizzanti, essendo tra di loro in fase, danno una risultante pari a $3i_3(t)$.

Questa corrente a 150 Hz si chiuderà attraverso il neutro.

La possibilità di circolazione per la componente di terza armonica della corrente magnetizzante permette alla corrente magnetizzante stessa di deformarsi: in questo modo il flusso, e quindi la f.e.m. indotta, possono essere sinusoidali (ed è questa la condizione ricercata).



46

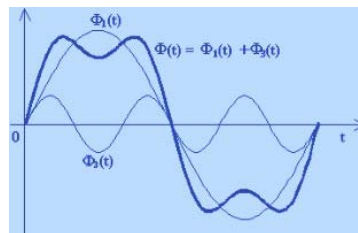
Primario a stella, secondario a stella $Y y$

Se il primario del trasformatore è privo del neutro, la somma delle correnti nel centro stella O deve dare una risultante nulla:

- le componenti fondamentali soddisfano già a questa condizione;
- le componenti di terza armonica, essendo in fase tra di loro, per soddisfare al primo principio di Kirchhoff nel nodo O, devono essere identicamente nulle.

Ne consegue che la corrente magnetizzante deve essere sinusoidale, non potendo avere componenti armoniche che la deformino.

Dovrà quindi essere deformato il flusso e le f.e.m. indotte in ciascuna fase. Inoltre, saranno deformate le tensioni di fase al secondario, mentre le tensioni concatenate, essendo date dalla differenza vettoriale tra due tensioni di fase, risulteranno sinusoidali (le componenti di terza armonica sono in fase tra di loro e quindi si elidono).



47

Primario a stella, secondario a triangolo $Y d$

Per il primario, vale il ragionamento del caso precedente: la corrente magnetizzante risulta sinusoidale per cui saranno deformati i flussi e così le f.e.m. indotte.

Al secondario, le f.e.m. indotte si trovano tra di loro in serie nella maglia chiusa del triangolo:

- le componenti fondamentali a 50 Hz, essendo sfasate tra loro di 120° , danno luogo ad una risultante nulla;
- le componenti armoniche a 150 Hz, essendo tra di loro in fase, impongono la circolazione di una corrente a 150 Hz. Tale corrente di terza armonica tenderà, per la legge di Lenz, ad opporsi alla causa che l'ha generata, perciò tenderà a limitare la terza armonica nei flussi.

Ne segue che, con il collegamento del secondario a triangolo, diminuisce sensibilmente la deformazione delle f.e.m. indotte.

48

Primario a stella Y: effetto sui flussi

In generale, per i collegamenti con primario a stella senza neutro, il flusso risulta deformato, ossia costituito da una componente fondamentale e da una componente di terza armonica: se il nucleo del trasformatore è a 3 colonne, applicando il primo principio di Kirchhoff ai flussi in uno dei nodi del circuito magnetico, deve risultare nulla la sommatoria dei flussi.

Solamente le componenti fondamentali dei flussi (sfasate di 120° tra di loro) soddisfano tale relazione, mentre le componenti di terza armonica (tra di loro in fase) non possono dare risultante nulla.

Questo fatto impone ai flussi di terza armonica di chiudersi (nel caso a 3 colonne):

- per i trasformatori a secco, attraverso l'aria;
- per i trasformatori in olio, attraverso il cassone contenitore, presentando questo una permeabilità magnetica maggiore di quella dell'aria: di conseguenza, le perdite nel addizionali saranno più rilevanti, tenendo conto che il flusso ha frequenza 150 Hz.

49

Primario a stella Y: effetto sui flussi

Per ridurre queste perdite addizionali, nelle macchine di grossa taglia si inseriscono dei lamierini al silicio attaccati all'interno del cassone, i quali fanno da schermo, costringendo il flusso a richiudersi attraverso di essi. In questo modo, la riluttanza incontrata dal flusso è inferiore e quindi sono minori anche le perdite addizionali.

Nei trasformatori a 5 colonne, i flussi di terza armonica si richiudono nelle colonne laterali (per questo sono detti a flusso "libero", contrariamente a quelli a 3 colonne detti a flusso "forzato").

Per evitare il fenomeno del flusso distorto nel caso di primario a stella, nei trasformatori di grandi dimensioni ed elevata potenza, talvolta si inserisce un piccolo circuito "terziario" collegato a triangolo.

50

Primario a triangolo, secondario a stella Dy_n

Il collegamento Dy_n è consigliato per l'alimentazione di circuiti a 4 fili con carichi squilibrati, dovuti alla presenza ad es. di carichi monofasi (come nella maggior parte dei sistemi elettrici in bassa tensione): se le correnti di carico sono squilibrate, lo saranno anche quelle a primario.

Con primario a triangolo, siccome le correnti possono circolare liberamente nella maglia formata dal triangolo, queste potranno essere deformate, mentre saranno sinusoidali sia il flusso che le f.e.m. indotte al primario ed al secondario.

Le correnti di linea a primario, essendo date dalla differenza vettoriale di due correnti di fase, risultano sinusoidali, in quanto le componenti di terza armonica, essendo tra di loro in fase, si elidono.



La connessione del primario a triangolo per un trasformatore abbassatore viene preferita, rispetto alla connessione a stella, quando il trasformatore lavora in condizioni squilibrate a secondario.

51

Effetti delle diverse connessioni

collegamento	V_1 (concatenata)	Φ	$I_{\text{magnetizzante}}$	f.e.m. secondario	conseguenze
$Y_n y$	sinusoidale	sinusoidale	deformata	sinusoidale	V_2 sinusoidale
$Y y$	sinusoidale	deformato	sinusoidale	deformata	V_2 sinusoidale
$Y d$	sinusoidale	deformato	sinusoidale	poco deformata	V_2 poco deformata
$D y_n$	sinusoidale	sinusoidale	può essere squilibrata	sinusoidale	V_2 sinusoidale I_1 sinusoidale
$d Y$	poco deformata	può essere deformato	sinusoidale	poco deformata	V_2 sinusoidale I_2 sinusoidale

dovuto al generatore (il flusso contiene armoniche)

dovuta al carico (in questo caso si ha lo spostamento del potenziale del centro stella, che è parzialmente risolto tramite la messa a terra del neutro)

52

Effetti delle diverse connessioni

Quindi, in generale, la scelta di collegamento a stella o a triangolo del primario e del secondario di un trasformatore deve tener conto delle seguenti esigenze:

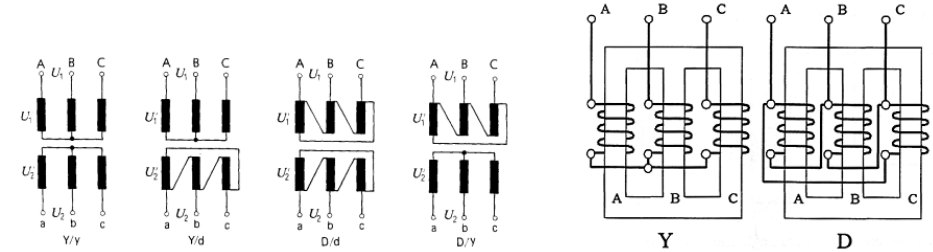
- 1) Entità delle tensioni e quindi esigenze di isolamento: la stella è privilegiata per le alte tensioni;
- 2) Necessità del quarto filo (neutro): è necessario il collegamento a stella.
- 3) Correnti magnetizzanti contenenti la 3° armonica o squilibrate: il triangolo consente alle armoniche di corrente di circolare, mantenendo flussi e f.e.m. sinusoidali; in alternativa, Y_n consente alla 3° armonica di corrente di chiudersi attraverso il neutro.
- 4) Flussi contenenti la 3° armonica: il triangolo consente di ottenere f.e.m. poco deformate.

Infine, la stella consente di avere tensioni concatenate sempre sinusoidali (date dalla differenza tra due f.e.m.), mentre il triangolo consente di avere correnti di linea sempre sinusoidali (date dalla differenza tra due correnti di fase).

Collegamenti del trasformatore trifase

I trasformatori di distribuzione abbassatori di elevata potenza (decine-centinaia di MVA) hanno generalmente il lato ad alta tensione (centinaia di kV) connesso a stella e quello a bassa tensione (decine di kV) a triangolo (Yd), ma possono anche essere Yy.

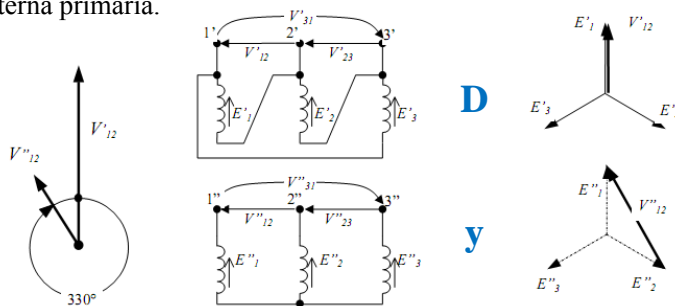
I trasformatori di distribuzione che devono alimentare anche carichi monofasi (pochi MVA o anche meno), trasformando decine di kV in centinaia di Volt, presentano invece una configurazione opposta (Dy_n), in modo che il neutro sia disponibile nel lato bassa tensione.



Gruppo angolare

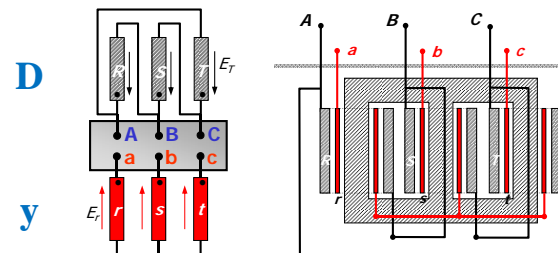
Le diverse possibilità di connessione degli avvolgimenti di un trasformatore trifase possono dare origine ad uno sfasamento tra la terna delle tensioni concatenate primarie e la terna delle corrispondenti tensioni concatenate secondarie.

Consideriamo un trasformatore con collegamento Dy: mentre le terne delle tensioni di fase primarie E' e secondarie E'' sono, per costruzione, in fase tra loro (perché ogni fase è avvolta sulla stessa colonna), la terna delle tensioni concatenate secondarie, a causa delle diverse connessioni, è ruotata di un angolo pari a 330° in verso orario rispetto alla terna primaria.



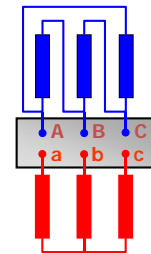
Gruppo angolare

In altre parole, con collegamento Dy, la terna di tensioni concatenate secondarie ritarda di 330° elettrici rispetto alla corrispondente terna primaria.



Denominazione dei morsetti (visti dal lato AT, da sinistra a destra):

- Alta Tensione: A B C
- Bassa Tensione: a b c

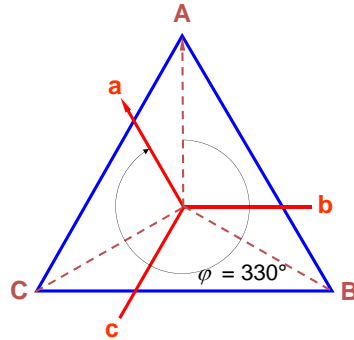


Gruppo angolare

Si definisce gruppo angolare di un trasformatore trifase la sigla letterale che identifica il tipo di connessione degli avvolgimenti primari e secondari e l'indice numerico che identifica il multiplo di 30° di cui la terna delle tensioni secondarie ritarda (cioè è ruotata in verso orario) rispetto alla terna corrispondente delle tensioni primarie.

Nell'esempio precedente, il trasformatore è indentificato con la sigla Dy11 ($330^\circ/30^\circ = 11$).

1ª lettera	2ª lettera	3ª lettera
Collegamento fasi AT	Collegamento fasi BT	$\varphi / 30^\circ$



57

Gruppo angolare

Cambiando il tipo di collegamento e la numerazione dei morsetti corrispondenti primari e secondari, è possibile realizzare dodici diversi valori dell'angolo di rotazione della terna di tensioni secondarie, rispetto alla terna primaria.

I dodici valori dell'angolo di rotazione sono multipli di 30° e possono essere disegnati come le ore sul quadrante di un orologio.

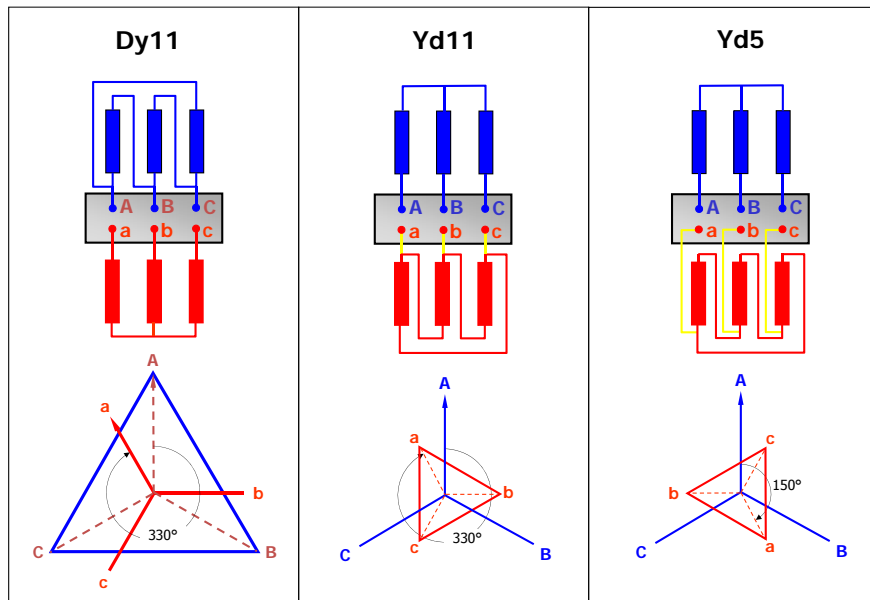
Si definiscono i gruppi omonimi i gruppi caratterizzati dalla stessa lettera per primario e secondario (ad esempio Yy, Dd).

Viceversa, i gruppi eteronimi sono caratterizzati da lettere diverse per primario e secondario (ad esempio Yd, Dy).

I gruppi omonimi danno origine esclusivamente a indici pari, mentre i gruppi eteronimi danno origine esclusivamente ad indici dispari.

58

Esempi di gruppi angolari



59

Gruppo angolare

Dal punto di vista delle applicazioni, i gruppi più rilevanti sono rappresentati dai gruppi 0 ed 11. Le norme CEI considerano gruppi normali i seguenti:

Gruppo normale	Sfasamento	Possibili collegamenti
0	0°	Dd - Yy - Dz
5	150°	Dy - Yd - Yz
6	180°	Dd - Yy - Dz
11	330°	Dy - Yd - Yz

Gruppo normale	Gruppi riconducibili per permutazione ciclica dei nomi dei morsetti
0	4, 8
5	1, 9
6	2, 10
11	3, 7

Gli altri gruppi possono essere ricondotti ai gruppi normali effettuando una permutazione ciclica dei nomi dei morsetti.

Questa operazione non richiede nessuna modifica dei collegamenti interni del trasformatore.

La modifica del gruppo normale di un trasformatore richiede invece il "cambio fisico" delle sue connessioni interne.

60