

8. TRASFORMATORI TRIFASE

Per trasferire energia elettrica tra due reti trifase a differenti tensioni, si può ricorrere a tre trasformatori monofase opportunamente collegati tra loro.

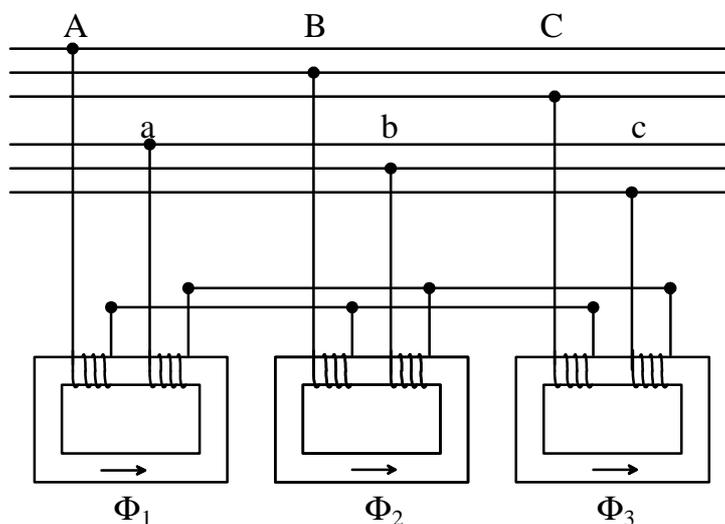


Figura 8.1. - Banco di tre trasformatori monofase.

Nella figura 8.1 è mostrata una possibile disposizione dei tre trasformatori monofase. In questo caso, gli avvolgimenti primari sono collegati a stella, così come quelli secondari. I tre circuiti di figura 8.1 sono equivalenti ad un unico trasformatore ottenuto fondendo in un'unica colonna le tre colonne prive di avvolgimenti dei trasformatori monofase (figura 8.2). La colonna centrale del circuito magnetico raffigurato in figura 8.2 è percorsa da un flusso di campo magnetico

$$\Phi' = \Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3$$

dove Φ_1 , Φ_2 e Φ_3 sono i flussi relativi a ciascun trasformatore. Se poi tali flussi costituiscono una terna simmetrica ed equilibrata, la loro somma è nulla, e la colonna centrale può venire soppressa (figura 8.3).

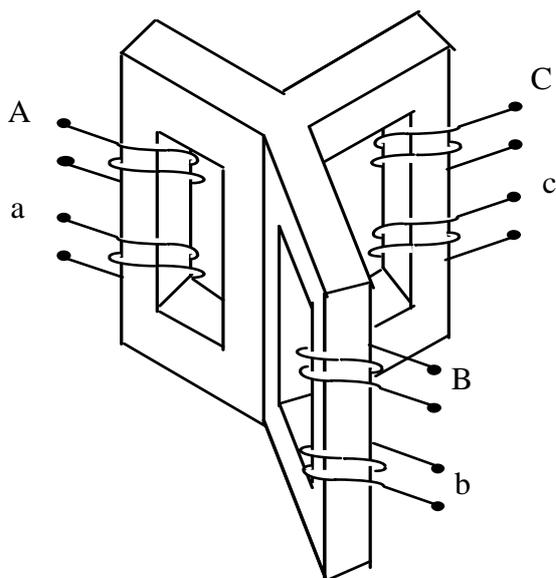


Figura 8.2. - Trasformatore trifase equivalente al banco di tre trasformatori monofase.

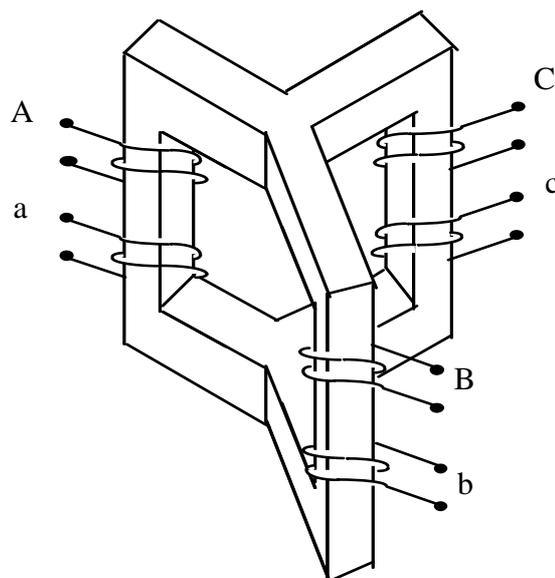


Figura 8.3. - Trasformatore trifase con nucleo simmetrico.

La configurazione illustrata nella figura 8.3 presenta delle difficoltà costruttive ed un ingombro tale che si preferisce adottare un nucleo complanare (figura 8.4). Utilizzando tale disposizione si introduce nella terna dei flussi magnetici una dissimmetria che peraltro risulta di norma trascurabile.

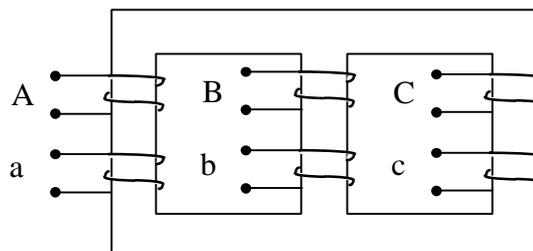


Figura 8.4. - Trasformatore trifase con nucleo complanare.

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 (figura 8.5), o porre l'intero trasformatore in un contenitore ripieno d'olio (figura 8.6). Viene utilizzato olio minerale isolante, che deve essere molto fluido, esente da acidità e da tracce di umidità ed i cui vapori non devono infiammarsi a temperature minori di 140 °C.

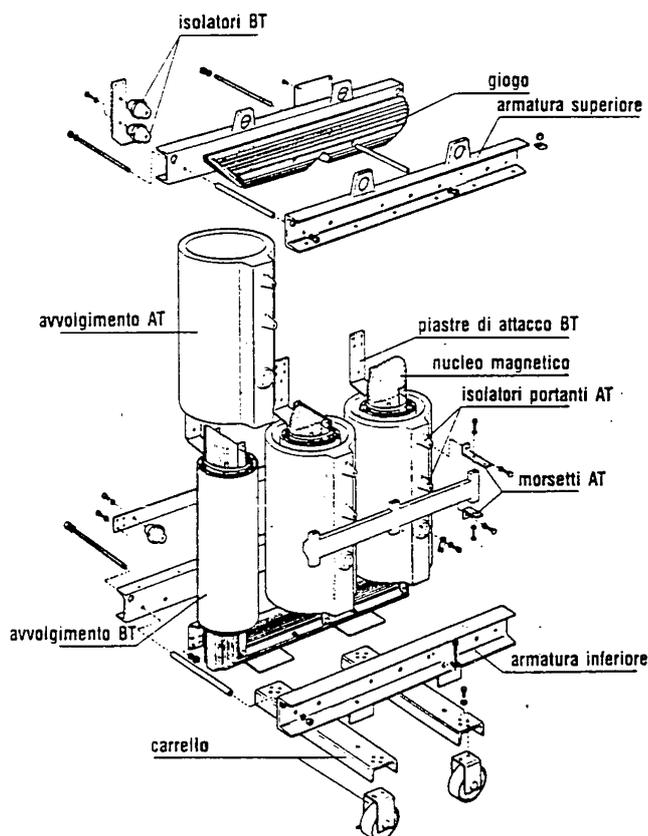


Figura 8.5. - Spaccato di un trasformatore in resina sintetica.

Il trasformatore in resina sintetica presenta una maggiore semplicità di 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 o immersi in acqua.

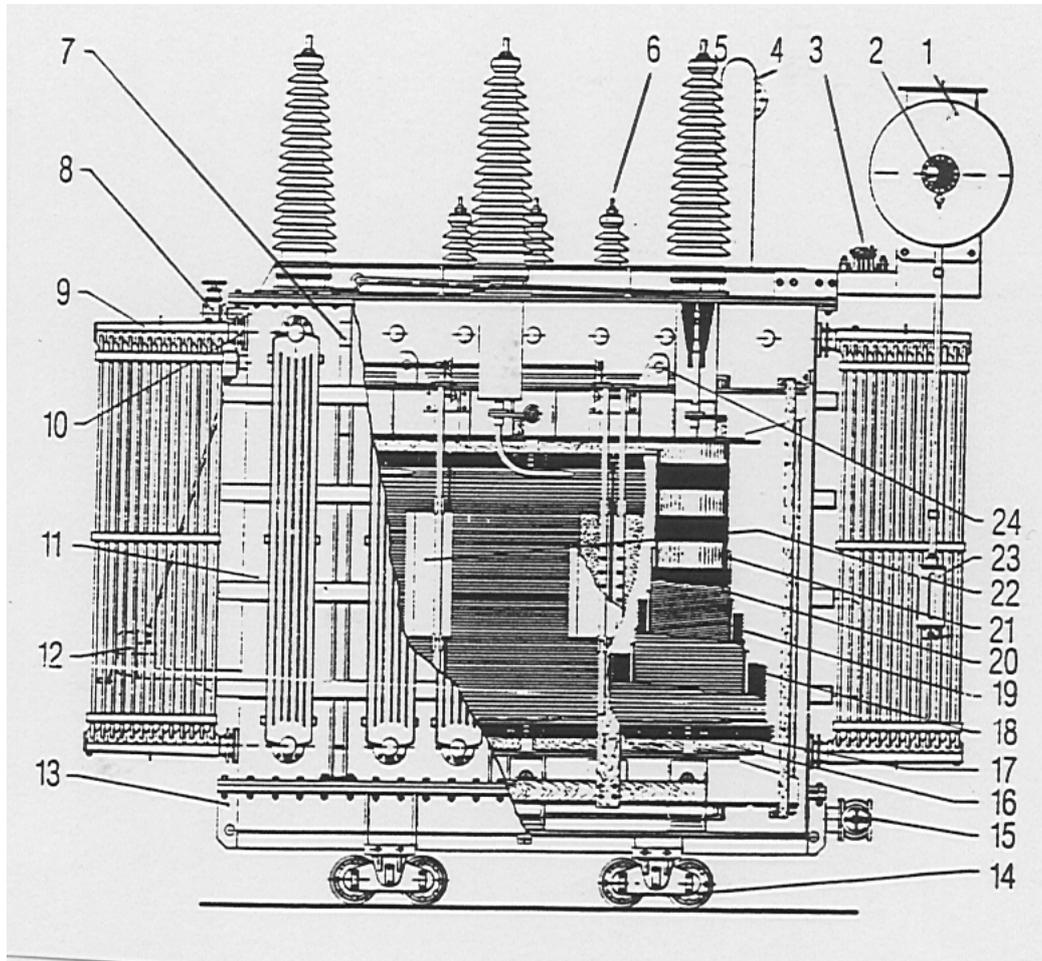


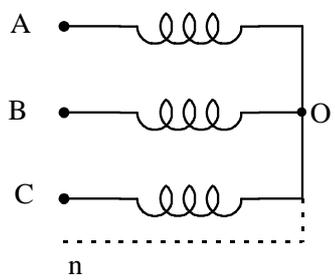
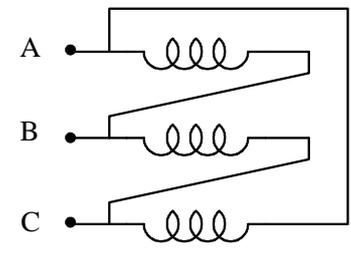
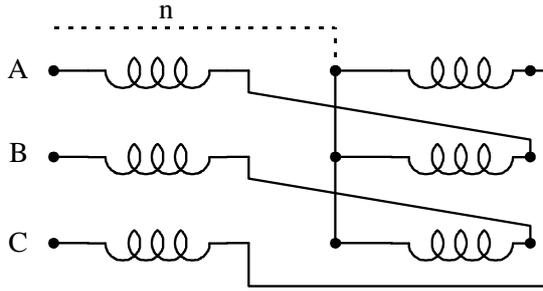
Figura 8.6

*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 | 14 - Carrello orientabile |
| 2 - Indicatore magnetico livello olio | 15 - Saracinesca di scarico olio |
| 3 - Relè a gas (Buchholz) | 16 - Elementi di pressaggio bobine |
| 4 - Tubo di sfiato | 17 - Collari isolanti con distanziatori |
| 5 - Isolatori A.T. | 18 - Avvolgimento primario |
| 6 - Isolatori B.T. | 19 - Avvolgimento secondario |
| 7 - Golfari di sollevamento | 20 - Avvolgimento terziario compensatore |
| 8 - Saracinesca per attacco muro pressa | 21 - Nucleo magnetico |
| 9 - Radiatori di raffreddamento | 22 - Commutatore a vuoto per la regolazione della tensione primaria |
| 10 - Valvole di intercettazione | 23 - Essiccatore d'aria a sali igroscopici |
| 11 - Cassa tenuta di vuoto | 24 - Golfari di sollevamento parte estraibile |
| 12 - Scatola comando commutatore | |
| 13 - Ganci per traino | |

COLLEGAMENTI DELLE FASI

Il collegamento delle fasi (primarie o secondarie) in un trasformatore trifase può essere realizzato secondo i tre seguenti schemi:

	
<p>collegamento a stella: gli avvolgimenti hanno un morsetto in comune O (centro stella). Si rendono così disponibili due valori di tensione: La tensione concatenata, tra due morsetti (ad es. A-B), e la tensione di fase tra uno dei morsetti ed il centro stella (ad es. A-O);</p>	<p>collegamento a triangolo: la fine di un avvolgimento è connesso con l'inizio del successivo. Il collegamento a triangolo rende disponibile un solo valore di tensione, quello della tensione concatenata;</p>
	
<p>collegamento a zig-zag: è usato tipicamente per il collegamento delle fasi del secondario. Gli avvolgimenti di ogni fase vengono divisi in due parti e collegate come mostrato in figura. Utilizzando tale collegamento si rendono disponibili due valori di tensione. I vantaggi del collegamento a zig-zag (sempre a stella) con filo neutro sono rappresentati sia dal fatto che eventuali squilibri del carico non si risentono sul circuito primario sia dall'assenza di armoniche nelle f.e.m. di fase, e ciò perché ogni tensione di fase è ottenuta come somma di due tensioni a 120° che agiscono in discordanza.</p>	

RAPPORTI DI TRASFORMAZIONE

Il rapporto di trasformazione di un trasformatore trifase (K) viene definito come il rapporto tra il valore efficace delle tensioni concatenate corrispondenti alle coppie di morsetti omologhi primari e secondari, relativo al funzionamento a vuoto del trasformatore (trascurando quindi le cadute di tensione interne del trasformatore):

$$K = \frac{V_{AB}}{V_{ab}}$$

Il rapporto di trasformazione, che nei trasformatori monofase è pari al rapporto n_1/n_2 , dipende, nel caso di un trasformatore trifase, dal collegamento tra fasi primarie e secondarie. Ad esempio, il collegamento triangolo - stella è caratterizzato da un rapporto di trasformazione inferiore di una fattore $\sqrt{3}$ del collegamento stella - stella.

CLASSIFICAZIONE DEI TRASFORMATORI TRIFASE

Seguendo le Norme CEI, la classificazione dei trasformatori trifase segue i seguenti criteri:

- il collegamento a stella viene indicato con Y al primario e con y al secondario;
- il collegamento a triangolo viene indicato con D al primario e con d al secondario;
- viene indicato lo sfasamento tra tensioni primarie e secondarie del trasformatore; cioè la differenza di fase (fase della grandezza primaria - fase della grandezza secondaria) tra due tensioni principali di fase corrispondenti, quando il primario è alimentato da una terna diretta e simmetrica di tensioni concatenate. Lo sfasamento tra tensioni primarie e secondarie può essere anche definito come l'angolo di cui bisogna ruotare in senso orario una tensione concatenata primaria per sovrapporla alla corrispondente tensione concatenata secondaria; le due definizioni risultano equivalenti. Nel calcolo dello sfasamento vengono trascurati gli effetti dissipativi; in tal modo lo sfasamento risulta essere sempre un multiplo di 30° . Dividendo l'angolo di sfasamento per 30° si associa a tale grandezza un numero da 0 a 11 che individua il gruppo di appartenenza del trasformatore.

Nella tabella 8.1 sono riportati alcuni dati caratteristici per i trasformatori trifase impiegati nelle cabine di distribuzione.

Tabella 8.1 Dati caratteristici di trasformatori per cabine di distribuzione MT/BT

Potenza (kVA)	25	50	100	250	400	630
Tensioni a vuoto (kV)	15/0.4	15/0.4	15/0.4	15/0.4	15/0.4	15/0.4
Tensioni di c.c. (%)	4	4	4	4	4	4
Corrente a vuoto (%)	3.3	2.9	2.5	2.1	1.9	1.8
Perdite:						
nel rame e addizionali (W)	700	1100	1750	3250	4600	6500
nel ferro (W)	115	190	320	650	930	1300
Rendimento (%) (a pieno carico e $\cos \varphi = 1$)	96.84	97.48	97.97	98.46	98.63	98.78

9. PARALLELO DI 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 9.1). 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 $a_a - b_a - b_b - a_b$ della figura 9.1).

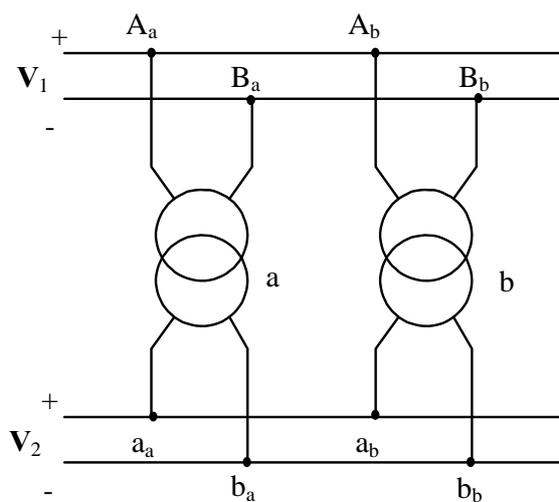


Figura 9.1. - Parallelo di due trasformatori

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 due 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 cortocircuito.** 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 tra 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 o assorbe una potenza inferiore a quella nominale, risultando così sottosfruttato, oppure assorbe una potenza superiore a quella nominale, condizione quest'ultima assolutamente da evitare in quanto porta al guasto del trasformatore stesso.

La prima parte della figura 9.2 riporta il circuito equivalente riferito al secondario del parallelo di due trasformatori monofase (se si deve considerare il parallelo di due trasformatori trifase, lo stesso circuito si riferisce, nel caso di carico equilibrato, ad ogni fase del parallelo). Supponendo che i due trasformatori abbiano lo stesso rapporto di trasformazione a vuoto, come richiesto dal corretto funzionamento a vuoto del parallelo (vedi condizione 1), le due tensioni $\underline{E}_{2,a}$ ed $\underline{E}_{2,b}$ risultano uguali tra loro e quindi è possibile semplificare il circuito come mostrato nella seconda parte della stessa figura.

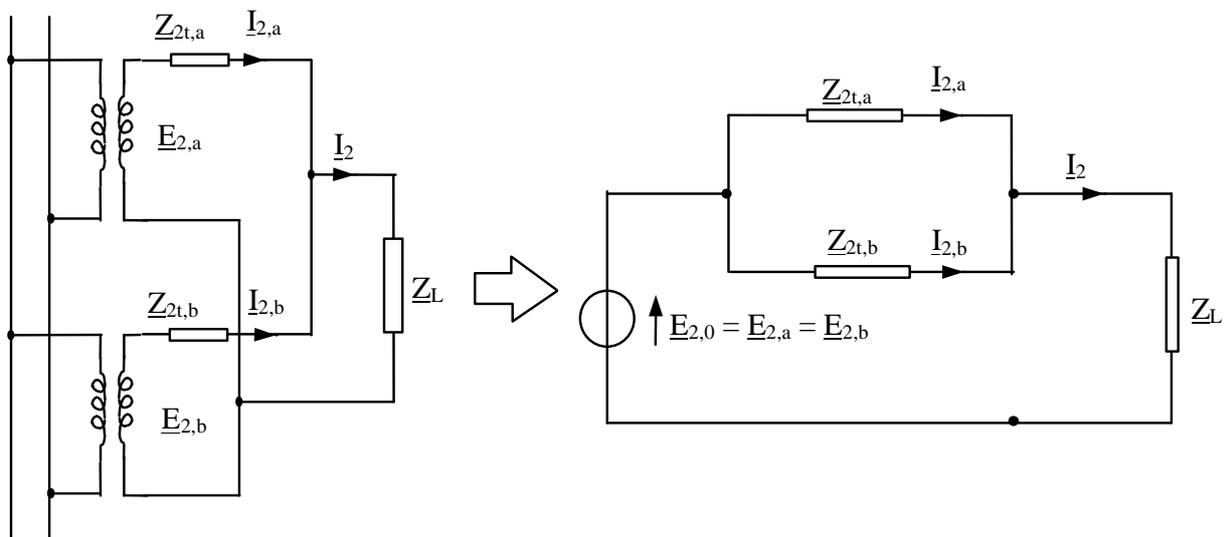


Figura 9.2. - Circuito equivalente riferito al secondario del parallelo di due trasformatori

Dall'analisi di tale circuito risulta evidente che, affinché le due correnti $\underline{I}_{2,a}$ ed $\underline{I}_{2,b}$ siano in fase tra di loro è necessario e sufficiente che il rapporto tra la reattanza e la resistenza delle due impedenze totali riferite al secondario $\underline{Z}_{2t,a}$ e $\underline{Z}_{2t,b}$ sia lo stesso. Dato che tale rapporto individua univocamente il fattore di potenza del trasformatore nelle prova in corto circuito ne segue che, affinché le

due correnti siano in fase tra di loro è necessario che i due trasformatori abbiano lo stesso fattore di potenza di cortocircuito. Risulta inoltre:

$$\frac{I_{2,a}}{I_{2,b}} = \frac{Z_{2t,b}}{Z_{2t,a}} \quad (9.1)$$

Inoltre, dall'analisi della prova in cortocircuito, indicando con K il rapporto di trasformazione a vuoto di entrambi i trasformatori, si ottiene:

$$\begin{cases} V_{1c,a} = K Z_{2t,a} I_{2n,a} \\ V_{1c,b} = K Z_{2t,b} I_{2n,b} \end{cases} \Rightarrow \frac{Z_{2t,a}}{Z_{2t,b}} = \frac{V_{1c,a} I_{2n,b}}{V_{1c,b} I_{2n,a}} \quad (9.2)$$

Dalle (9.1) e (9.2) infine

$$\frac{I_{2,a}}{I_{2,b}} = \frac{V_{1c,b}}{V_{1c,a}} \frac{I_{2n,a}}{I_{2n,b}} \quad (9.3)$$

Dalle (9.3) si deduce quindi che affinché le correnti si ripartiscano proporzionalmente alle rispettive correnti nominali è necessario e sufficiente che i due trasformatori abbiano la stessa tensione di cortocircuito.