

TRASFORMATORI

Introduzione

Per trasferire potenza elettrica da un livello di tensione alternata a un altro si utilizza una macchina elettrica che prende il nome di trasformatore. Un trasformatore è costituito da un nucleo magnetico e da almeno due avvolgimenti costituiti da bobine di filo di rame smaltato. Nel suo circuito di ingresso, detto anche primario entra potenza elettrica mentre dal circuito di uscita, detto anche secondario, esce potenza elettrica con valori di tensione e corrente modificati.

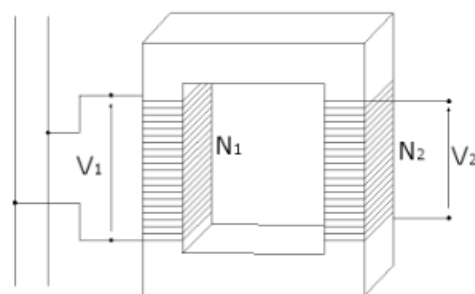


Figura 1.1: Trasformatore monofase.

Trasformatore ideale

Si definisce ideale un trasformatore caratterizzato dalle seguenti proprietà:

- Resistività elettrica del materiale conduttore impiegato per gli avvolgimenti di valore nullo, così da potersi ritenere nulle le resistenze Ohmiche degli avvolgimenti;
- Permeabilità magnetica del mezzo circostante il nucleo di valore nullo, così da potersi ritenere tutto il flusso magnetico confinato nel nucleo stesso e concatenato con entrambi gli avvolgimenti. Permeabilità del nucleo finita e costante, così da poter ritenere lineare il mezzo ferromagnetico.
- Perdite nel materiale ferromagnetico del nucleo nulle.

Nel trasformatore ideale la potenza in entrata eguaglia la potenza in uscita:

$$v_1 i_1 = v_2 i_2$$

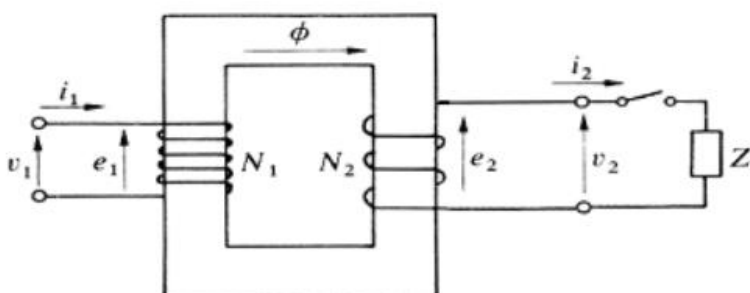
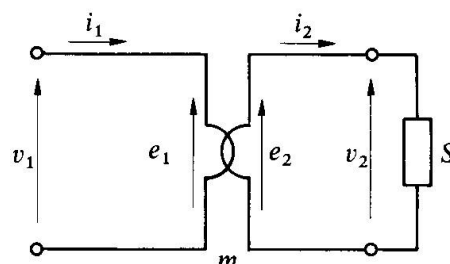


Figura 1.5: Struttura del trasformatore monofase ideale.



Circuito equivalente di un trasformatore ideale

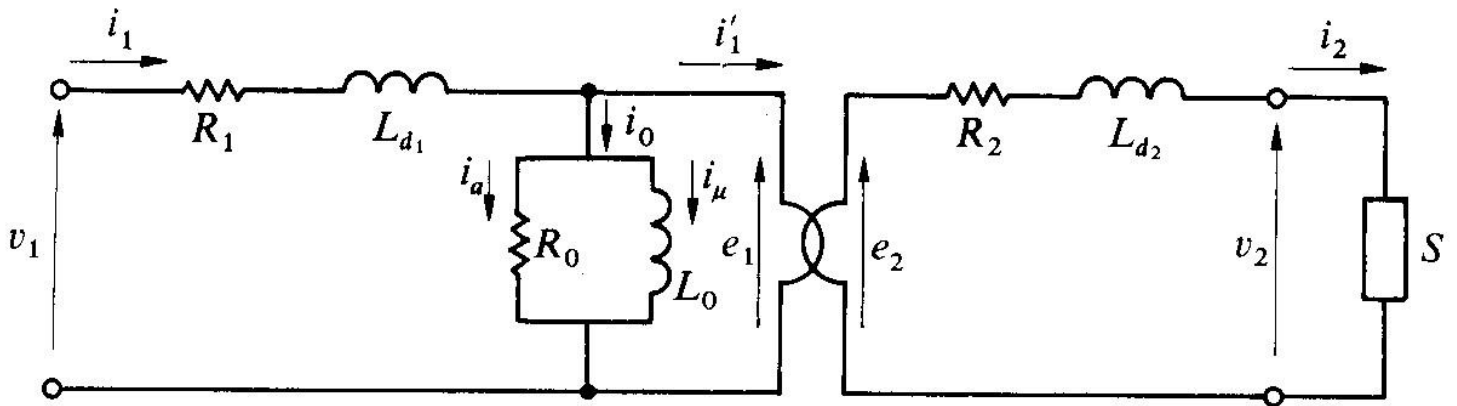
Trasformatore reale

Quest'ultima ipotesi, che consente di ottenere un trasformatore ideale, è una condizione a cui si deve tendere nel costruire un trasformatore, ma che in pratica non è realizzabile. Per questo motivo è necessario introdurre il trasformatore reale. Nello studio di tali macchine elettriche si utilizza l'artificio di aggiungere al circuito equivalente della macchina ideale alcuni componenti fittizi che simulano la presenza di quei fenomeni non considerati nella macchina ideale. Tali componenti non devono necessariamente esistere fisicamente, ma servono per realizzare un circuito equivalente che simuli un comportamento il più prossimo possibile a quello della macchina in esame.

La schematizzazione di un trasformatore si introduce nel circuito:

- Resistenza R_0 : tiene conto dei fenomeni energetici ai morsetti esterni quali isteresi magnetica e correnti parassite. Di fatto non esiste realmente ma viene inserita per effettuare un'approssimazione migliore del trasformatore. In quanto non esistente non può essere misurata ma solo stimata
- Induttanza L_0 : tiene conto dell'accumulo di energia nel ferro, coincide con l'induttanza dell'avvolgimento primario

- Induttanze L_{d1} e L_{d2} : tengono conto del flusso disperso primario e secondario
- Resistenze R_1 e R_2 : resistenze del rame che tengono conto delle perdite per effetto Joule nell'avvolgimento primario e secondario

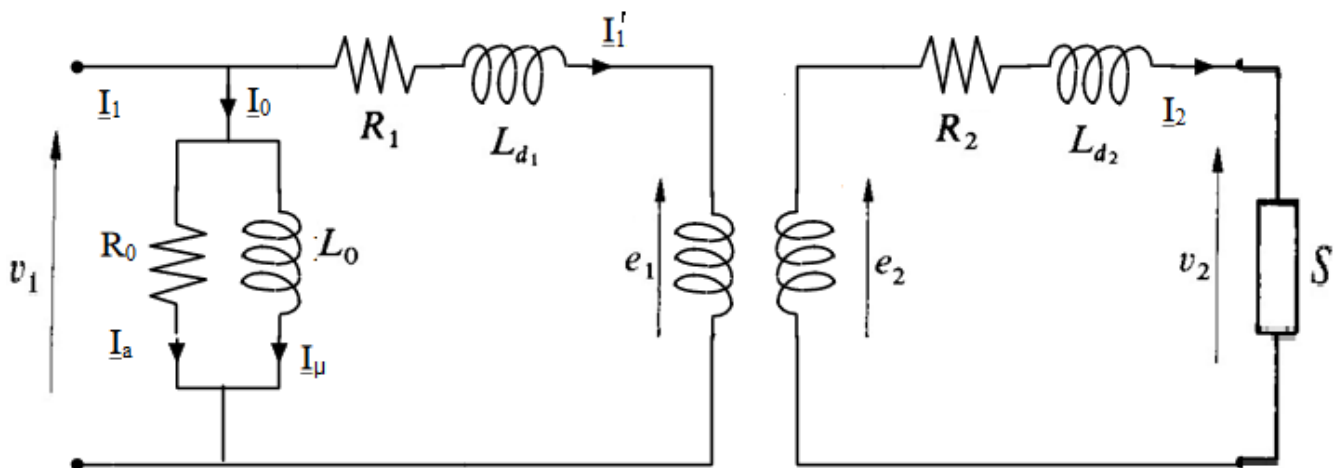


Circuito equivalente completo di un trasformatore reale

Per stimare tale modello si procede sperimentalmente, tale procedura risulta però essere troppo complessa e quindi si decide di semplificare il modello tramite alcune approssimazioni:

1. Si considera la caduta di potenziale sulla prima impedenza un valore molto piccolo. Ciò implica che l'induttanza di dispersione L_0 sia la più piccola possibile e il numero di avvolgimenti sia anch'esso piccolo. È dunque possibile spostare l'induttanza e la sua resistenza in parallelo prima di R_1 e L_{d1} .
2. Sovrastimando le perdite di ferro e sottostimando le perdite degli avvolgimenti è possibile affermare che i_0 è anch'essa molto piccola e quindi:

$$i_1' \cong i_1 - i_0 \quad \rightarrow \quad i_1 = i_1'$$

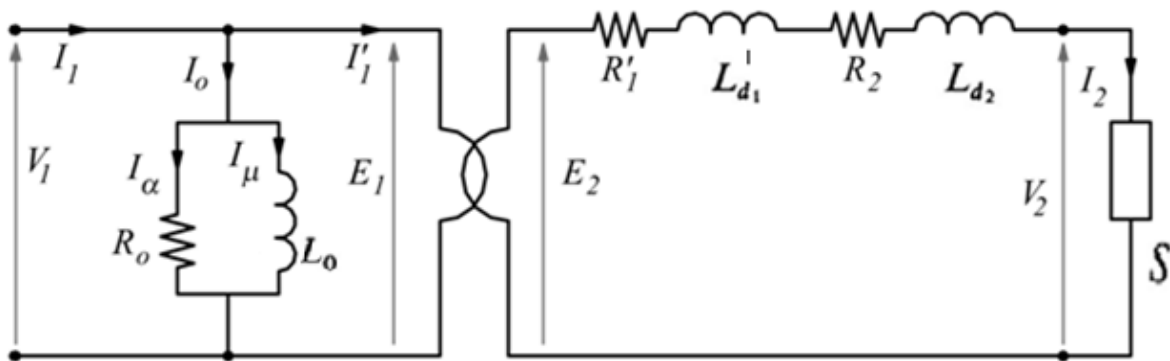


Circuito equivalente semplificato del trasformatore.

Questo secondo modello permette di effettuare un'ulteriore semplificazione, che risulta essere un'equivalenza e non una semplificazione, inglobando le due induttanze L_{d1} e L_{d2} e le due resistenze R_1 e R_2 in un'unica induttanza e in un'unica resistenza. Per ottenere ciò è necessario spostare la resistenza del rame del primario R_1 e l'induttanza L_{d1} al secondario. Per spostare

gli elementi dal primario al secondario occorre moltiplicare il parametro interessato per il valore k che indica il rapporto tra le tensioni e le correnti:

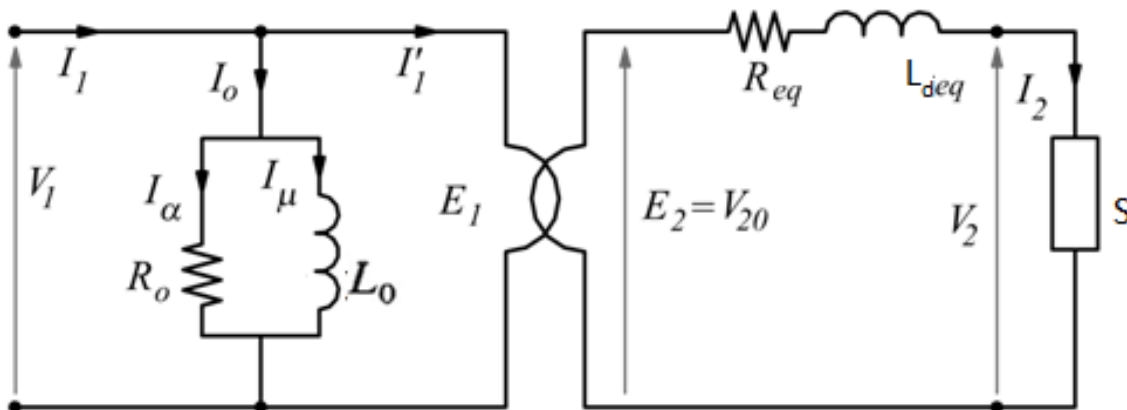
$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{i_2}{i_1} = k = \frac{N_1}{N_2}$$



Dunque si avrà che:

$$R_{eq} = R_2 + R'_1$$

$$L_{deq} = L_{d2} + L'_{d1}$$



Il modello finale che si è ottenuto risulta essere un' approssimazione del trasformatore così corretta da essere stata normata e dunque può essere utilizzata per ricavare tutti i parametri necessari a descrivere il trasformatore. Per poterli ricavare è possibile applicare misure dirette ma si preferisce una serie di prove eseguite a diverse condizioni. Di solito le prove effettuate sono quelle a vuoto e a corto circuito. È importante che dopo queste prove il trasformatore sia ancora utilizzabile e funzionante e dunque è fondamentale trovare una modalità per effettuare le prove senza rompere lo strumento.

Dati di targa

Il costruttore fornisce dei dati noti come dati di targa che rappresentano i parametri funzionali, o nominali, della macchina cioè i valori che servono a definire le prestazioni della macchina agli effetti delle garanzie e del collaudo. Per il trasformatore i più importanti dati di targa sono:

- f_n : frequenza nominale
- V_{1n} : Tensione nominale primaria
- V_{20n} : Tensione nominale secondaria riferite al funzionamento a vuoto
- k : Rapporto nominale di trasformazione
- I_{1n} : Corrente nominale primaria

- I_{2n} : Corrente nominale secondaria
- A_n : Potenza apparente nominale
- $P_{0\%}$: Perdite a vuoto espresse in percento della potenza nominale
- $I_{0\%}$: Corrente assorbita a vuoto in percento della corrente nominale
- $\cos \varphi_0$: Fattore di potenza a vuoto quanto il trasformatore è alimentato a tensione e frequenza nominale
- $P_{cc\%}$: Perdite in corto circuito espresse in percento della potenza nominale
- $V_{cc\%}$: Tensione applicata in cortocircuito in percento della tensione nominale
- $\cos \varphi_{cc}$: Fattore di potenza in cortocircuito quando il trasformatore ha i morsetti d'uscita cortocircuitati e ha gli avvolgimenti percorsi dalle correnti nominali

$$k = \frac{V_{1n}}{V_{20n}}$$

$$A_n = V_{1n}I_{1n} = V_{20n}I_{2n}$$

$$I_{0\%} = \frac{I_0}{I_{1n}} * 100 \quad \rightarrow \quad I_0 = \frac{I_{0\%}}{100} * I_{1n}$$

$$P_{0\%} = \frac{P_0}{A_n} * 100 \quad \rightarrow \quad P_0 = \frac{P_{0\%}}{100} * A_n$$

$$V_{cc\%} = \frac{V_{cc}}{V_{20n}} * 100 \quad \rightarrow \quad V_{cc} = \frac{V_{cc\%}}{100} * V_{20n}$$

$$P_{cc\%} = \frac{P_{cc}}{A_n} * 100 \quad \rightarrow \quad P_{cc} = \frac{P_{cc\%}}{100} * A_n$$

Spesso vengono anche forniti i dati del carico:

- P : potenza assorbita dal carico
- V : tensione del carico
- $\cos \varphi$: fattore di potenza del carico
- I_{2car} : corrente che attraversa il carico

$$I_{2car} = \frac{P}{V \cos \varphi}$$

Prove a vuoto e di cortocircuito

Analizziamo ora le due prove che permettono di determinare i parametri di un trasformatore:

- Prova a vuoto = tale prova si effettua lasciando aperti i morsetti del secondario e alimentando il primario alla tensione nominale V_{1n} . In tale prova non è quindi presente il carico e dunque non passa corrente nel secondario, $I_{2n} = 0$. Non si considerano quindi R_{eq} e L_{deq} . In R_0 e L_0 non passa I_0 perché sono in parallelo e quindi i due rami sono attraversati da valori differenti di corrente. Per questo motivo $P_0 \neq R_0 I_0^2$ e dunque si preferisce lavorare con V_{1n} che invece è costante nel parallelo. La prova a vuoto serve per ricavare i valori di L_0 e R_0 . Generalmente in questa prova vengono forniti $I_{0\%}$, $P_{0\%}$, A_n e V_{1n} :

$$I_{1n} = \frac{A_n}{V_{1n}}$$

$$I_0 = \frac{I_{0\%}}{100} * I_{1n}$$

$$P_0 = \frac{P_{0\%}}{100} * A_n$$

$$A_n = V_{1n} I_{1n}$$

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{V_{1n} I_0} = \frac{P_{0\%}}{I_{0\%}}$$

$$\varphi_0 = \cos^{-1} \left(\frac{P_0}{V_{1n} I_0} \right)$$

$$Q_0 = P_0 \tan \varphi_0 = \frac{V_{1n}^2}{L_0} \rightarrow L_0 = \frac{V_{1n}^2}{Q_0}$$

$$P_0 = \frac{V_{1n}^2}{R_0} \rightarrow R_0 = \frac{V_{1n}^2}{P_0}$$

- Prova a corto circuito = si realizza cortocircuitando il secondario e alimentando il primario con tensione ridotta V_{cc} tale da far circolare nel secondario la corrente nominale I_{2n} . Occorre fornire al primario una tensione ridotta altrimenti si porterebbe la macchina a rottura a causa di un surriscaldamento. La prova a corto circuito serve per ricavare i valori di L_{deq} e R_{eq} . Generalmente in questa prova vengono forniti $V_{cc\%}$, $P_{cc\%}$, V_{20n} , A_n :

$$I_{2n} = \frac{A_n}{V_{20n}}$$

$$V_{cc} = \frac{V_{cc\%}}{100} * V_{20n}$$

$$P_{cc} = \frac{P_{cc\%}}{100} * A_n$$

$$\cos \varphi_{cc} = \frac{P_{cc}}{V_{cc} I_{2n}} = \frac{P_{cc\%}}{V_{cc\%}}$$

$$\varphi_{cc} = \cos^{-1} \left(\frac{P_{cc}}{V_{cc} I_{2n}} \right)$$

$$Q_{cc} = P_{cc} \tan \varphi_{cc} = L_{deq} I_{2n}^2 \rightarrow L_{deq} = \frac{Q_{cc}}{I_{2n}^2}$$

$$P_{cc} = R_{eq} I_{2n}^2 \rightarrow R_{eq} = \frac{P_{cc}}{I_{2n}^2}$$

Calcolo delle condizioni di alimentazioni primarie

Per risolvere un problema sul trasformatore occorre calcolare le condizioni di alimentazioni primarie in termini di corrente, tensione e fattore di potenza. Si sfrutta dunque il corollario di Boucherot e si calcola:

- Potenza attiva totale del secondario che sarà data dalla somma tra la potenza assorbita dal carico e la potenza che attraversa la resistenza R_{eq} :

$$P_{totII} = P + R_{eq} I_{2car}^2$$

- Potenza reattiva totale del secondario che sarà data dalla somma tra la potenza assorbita dal carico, calcolabile a partire dalla potenza attiva, e la potenza che attraversa la resistenza L_{deq} :

$$Q_{totII} = P_{totII} \tan(\cos^{-1} \cos \varphi) + L_{deq} I_{2car}^2$$

- Potenza apparente totale

$$A_{totII} = \sqrt{P_{totII}^2 + Q_{totII}^2}$$

- Si ricava poi la tensione E_2 che insiste sulla bobina del secondario come:

$$E_2 = \frac{A_{totII}}{I_{2car}}$$

- Si calcola E_1 , conoscendo il rapporto nominale di trasformazione

$$k = \frac{V_{1n}}{V_{20n}}$$

$$E_1 = kE_2$$

- Si calcola la potenza attiva dissipata in R_0 al primario, ricordandosi che $V_1 \cong E_1$:

$$P_{0diss} = \frac{V_1}{R_0} = \frac{E_1}{R_0}$$

- Si calcola la potenza reattiva dissipata in L_0 al primario, ricordandosi che $V_1 \cong E_1$:

$$Q_{0diss} = \frac{V_1}{L_0} = \frac{E_1}{L_0}$$

- Si ricavano le potenze attive, reattive e apparenti totali generate nel trasformatore:

$$P_{totgen} = P_{totII} + P_{0diss}$$

$$Q_{totgen} = Q_{totII} + Q_{0diss}$$

$$A_{totgen} = \sqrt{P_{totgen}^2 + Q_{totgen}^2}$$

- Si calcolano dunque i valori delle condizioni di alimentazioni primarie in termini di corrente, tensione e fattore di potenza

$$V = E_1$$

$$\cos \varphi = \cos \tan^{-1} \left(\frac{Q_{totgen}}{P_{totgen}} \right)$$

$$I = \frac{P_{totgen}}{\cos \varphi V} = \frac{A_{totgen}}{V}$$

Calcolo delle condizioni di alimentazioni secondarie

Per risolvere un problema sul trasformatore potrebbe occorre calcolare le condizioni di alimentazioni secondarie in termini di corrente, tensione e fattore di potenza. Si sfrutta dunque il corollario di Boucherot e si calcola:

- Potenza attiva totale nel primario sottraendo dalla potenza attiva totale del carico la potenza attiva dissipata da R_0 :

$$P_{prim} = P_{car} - P_0$$

- Potenza reattiva totale nel primario sottraendo dalla potenza reattiva totale del carico la potenza reattiva dissipata da X_0 :

$$Q_{prim} = Q_{car} - Q_0$$

- Potenza apparente totale nel primario:

$$A_{prim} = \sqrt{P_{prim}^2 + Q_{prim}^2}$$

- Si calcola E_2 che si scopre essere esattamente uguale alla tensione nominale al secondario riferita al funzionamento a vuoto perché:

$$E_2 = \frac{E_1}{k} = V_{1n} \cdot \frac{V_{1n}}{V_{20n}} = V_{1n} \frac{V_{20n}}{V_{1n}} = V_{20n}$$

$$E_1 = V_{1n}$$

$$k = \frac{V_{1n}}{V_{20n}}$$

- Si calcola ora la corrente che passa nel secondario come rapporto tra la potenza apparente totale e la tensione E_2 :

$$I_2 = \frac{A_{prim}}{E_2} = \frac{A_{prim}}{V_{20n}}$$

- Si calcola la potenza attiva dissipata in R_{eq} :

$$P_{2diss} = R_{eq} I_2^2$$

- Si calcola la potenza reattiva dissipata in L_{deq} :

$$Q_{2diss} = L_{deq} I_2^2$$

- Si calcola la potenza attiva finale del carico:

$$P_Z = P_{prim} - P_{2diss}$$

- Si calcola la potenza reattiva finale del carico

$$Q_Z = Q_{prim} - Q_{2diss}$$

- Si calcola la potenza apparente finale del carico:

$$A_Z = \sqrt{P_Z^2 + Q_Z^2}$$

- Si calcolano dunque i valori delle condizioni di alimentazioni secondarie in termini di corrente, tensione e fattore di potenza

$$I_Z = I_2$$

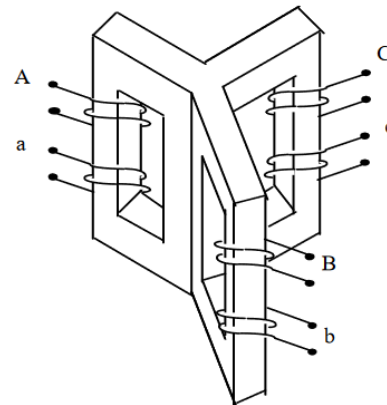
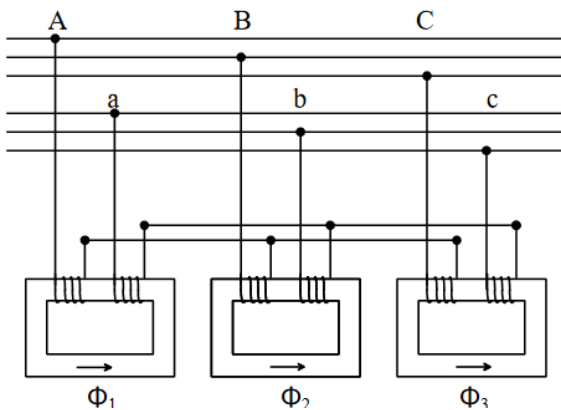
$$V_Z = \frac{A_Z}{I_2}$$

$$\cos \varphi_Z = \frac{P_Z}{V_Z I_Z}$$

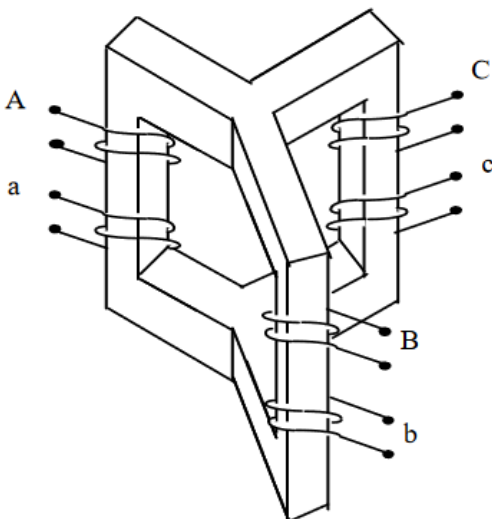
Trasformatore trifase

Generalmente l'energia elettrica viene prodotta e distribuita utilizzando il sistema trifase, che offre numerosi vantaggi sia dal punto di vista funzionale sia da quello economico. Uno degli elementi che rende vantaggioso tale sistema è il trasformatore trifase, utilizzando per variare i livelli di tensione nelle reti di distribuzione. Esso è caratterizzato da un miglior rapporto potenza/peso e da un miglior rendimento rispetto al trasformatore monofase.

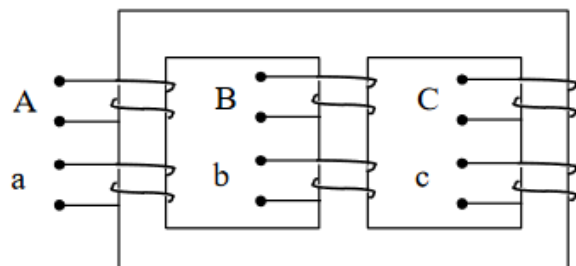
Per trasferire energia elettrica tra due reti trifase a differenti tensioni, si può ricorrere a tre trasformatori monofase opportunamente collegati tra loro. I tre circuiti monofasi collegati tra loro sono equivalenti ad un unico trasformatore ottenuto fondendo in un'unica colonna le tre colonne prive di avvolgimenti dei trasformatori monofase. La colonna centrale del circuito magnetico raffigurato è percorsa da un flusso di campo magnetico nullo se la terna è simmetrica ed equilibrata, La colonna centrale può quindi venire soppressa. Tale configurazione presenta però delle difficoltà costruttive ed un ingombro tale che si preferisce adottare un nucleo complanare. Utilizzando tale disposizione si introduce nella terna dei flussi magnetici una dissimmetria che peraltro risulta di norma trascurabile.



Trasformatore trifase equivalente al banco di tre trasformatori monofase



Trasformatore trifase con nucleo simmetrico



Trasformatore trifase con nucleo complanare

I trasformatori trifase possono essere connessi in 4 diversi modi ottenuti dalla combinazione delle due configurazioni principali stella e triangolo:

1. Configurazione stella – stella
2. Configurazione triangolo – triangolo
3. Configurazione stella-triangolo
4. Configurazione triangolo -stella

