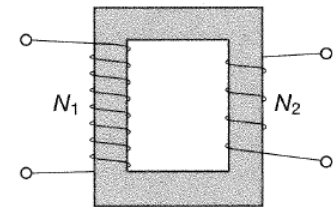


Trasformatori

Nella figura sono rappresentate due bobine di N_1 e N_2 spire, avvolte sullo stesso nucleo magnetico. Le due bobine sono *mutuamente accoppiate*, in quanto la circolazione di corrente in una delle due produce un flusso magnetico nel nucleo, che va a interessare, in tutto o in parte, anche l'altra bobina. Questo è quanto avviene, per esempio, nei trasformatori elettrici. La bobina 1, attraversata da corrente, genera un flusso che in parte si concatena con la bobina 2 e la bobina 2, attraversata da corrente, genera un flusso che in parte si concatena con la bobina 1.



Bobine mutuamente accoppiate, avvolte sullo stesso nucleo magnetico.

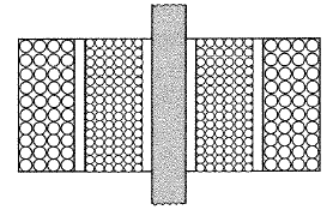
Non tutto il flusso generato dalla bobina 1 si concatenerà con la bobina 2 e non tutto il flusso generato dalla bobina 2 si concatenerà con la bobina 1

Una valutazione sull'accoppiamento delle due bobine è dato dal coefficiente di mutua induzione

$$M = k\sqrt{L_1L_2}$$

Con $k_{min} = 0$ e $k_{max} = 1$

I trasformatori sfruttano questo accoppiamento. Esistono diverse forme e tipi di trasformatori e il valore di k può cambiare.



Bobine montate coassialmente attorno al nucleo magnetico.

Come in ogni macchina elettrica in un trasformatore c'è un circuito induttore e un circuito indotto e un circuito magnetico

circuito induttore, avente lo scopo di creare il campo magnetico mediante la circolazione di corrente nei conduttori elettrici che lo costituiscono;

circuito indotto sul quale agisce il campo magnetico e che risente delle variazioni di quest'ultimo, diventando sede di tensioni e correnti indotte; in realtà, anche le correnti indotte contribuiscono, durante il funzionamento della macchina, a determinare il campo magnetico complessivo e l'insieme delle azioni esercitate da tale avvolgimento prende il nome di reazione d'indotto.

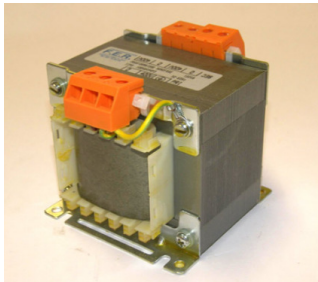
Nei trasformatori il circuito magnetico è unico ed è detto nucleo magnetico; i due circuiti elettrici, detti avvolgimenti in quanto composti da più spire avvolte sul nucleo, sono interessati dal flusso magnetico presente nel nucleo stesso.

Il trasformatore è una macchina elettrica statica in grado di trasferire potenza tra due sistemi funzionanti con tensioni diverse sfruttando il principio della mutua induzione tra circuiti elettricamente separati ma magneticamente accoppiati.

Struttura Trasformatori

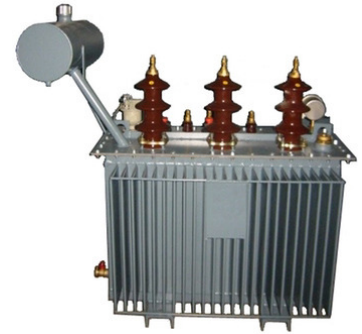
La struttura di un trasformatore dipende:

- dalla Potenza elettrica e quindi dalle dimensioni
- dal numero delle fasi
- le tensioni degli avvolgimenti
- il sistema di raffreddamento utilizzato



trasformatore in aria monofase di piccola potenza

trasformatore trifase isolato in olio
250kVA - 15000-400V



La struttura generale di un trasformatore, anche se differisce notevolmente a seconda dei tipi, comprende, in ogni caso, le seguenti parti:

- un nucleo di materiale ferromagnetico, all'interno del quale si sviluppa prevalentemente il campo magnetico necessario al funzionamento della macchina;
- due gruppi di avvolgimenti elettrici, denominati *primario* e *secondario* oppure avvolgimento di *bassa tensione* e di *alta tensione*; nei trasformatori monofase il primario e il secondario sono costituiti entrambi da un solo avvolgimento, mentre in quelli trifase vi è un primario e un secondario per ognuna delle tre fasi;
- dei sistemi d'isolamento degli avvolgimenti, tra loro e verso massa, dai quali dipende la classe d'isolamento della macchina;
- una parte strutturale, metallica o in materiale plastico per le piccole potenze, che serve ad assemblare le varie parti, sostenere il peso del trasformatore, racchiuderne le parti attive e le cui caratteristiche dipendono essenzialmente dalle dimensioni e dal peso della macchina.

Raffreddamento

I trasformatori, durante il loro funzionamento, danno luogo a perdite di potenza che si trasformano in calore, producendo un innalzamento della temperatura della macchina. In sede di progetto e di costruzione si devono prevedere dei sistemi di raffreddamento in grado di asportare il calore prodotto, evitando che la temperatura superi il valore ammissibile, legato alla classe di isolamento della macchina.

Riguardo al tipo di fluido refrigerante adottato, i trasformatori si dividono in due categorie:

macchine a secco, in cui il fluido refrigerante è aria; appartengono a questa categoria, per esempio, i trasformatori inglobati in resina

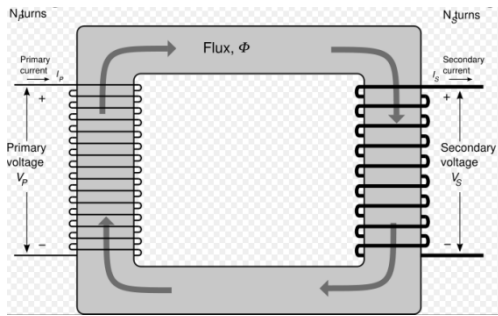
macchine in olio, in cui le parti attive (nucleo e avvolgimenti) sono immersi in olio minerale, contenuto in un cassone e avente la duplice funzione di isolante e di fluido refrigerante; in questo caso vi è la circolazione dell'olio all'interno del cassone e di un altro fluido refrigerante (di solito aria o acqua) all'esterno.

Lettere per indicazione dei modi di raffreddamento

prima lettera		seconda lettera		terza lettera		quarta lettera	
O	Olio	N	Naturale	O	Olio	N	Naturale
L	Liquido isolante non infiammabile	F	Forzata	L	Liquido isolante non infiammabile	F	Forzata
G	Gas	D	Forzata e guidata	G	Gas	D	Forzata e guidata
W	Acqua			W	Acqua		
A	Aria			A	Aria		

Per esempio, la sigla AN indica il raffreddamento di un trasformatore a secco, ottenuto solo con la circolazione naturale dell'aria, mentre con la sigla ONAF sono contraddistinti i trasformatori con circolazione naturale dell'olio e forzata dell'aria esterna, mediante ventole applicate al cassone.

Trasformatore Ideale



Si considerino due avvolgimenti elettrici di N_1 ed N_2 spire (*primario* e *secondario*) avvolti su un nucleo ferromagnetico, la disposizione degli avvolgimenti è solo schematica e non costruttiva, dato che in realtà le bobine sono spesso avvolte una sull'altra.

Si suppongono valide le seguenti ipotesi semplificative:

- *gli avvolgimenti sono ideali*, con resistenza elettrica nulla; ciò significa che nelle spire percorse da corrente non vi è alcuna caduta di tensione né perdita di potenza;
- *il concatenamento del flusso è ideale*, ossia non vi è flusso disperso in quanto tutte le linee di flusso si concatenano con tutte le spire del primario e con tutte quelle del secondario;
- *il nucleo magnetico è ideale* e, pertanto, sono nulle le perdite nel ferro dovute a isteresi e correnti parassite ed è nulla la riluttanza magnetica

Applicando al primario del trasformatore una tensione sinusoidale di valore efficace V_P nascerà nel nucleo, *senza che vi sia la circolazione di alcuna corrente magnetizzante*, un flusso magnetico, anch'esso sinusoidale, supposto con fase nulla e quindi rappresentabile con un vettore posto sull'asse reale positivo del piano di Gauss. Per le leggi dell'induzione otterremo una tensione anch'essa sinusoidale sul secondario di valore efficace V_S

$$\frac{V_P}{V_S} = \frac{N_P}{N_S}$$

le tensioni indotte in un trasformatore sono direttamente proporzionali al numero di spire degli avvolgimenti e, quindi, il lato AT dovrà avere un maggior numero di spire del lato BT.

È importante sottolineare che ognuno dei due lati può essere il primario o il secondario della macchina, in relazione al suo funzionamento; più precisamente si ha che:

- quando il trasformatore funziona da elevatore di tensione il primario corrisponde al lato BT e il secondario a quello AT; è questo il caso dei trasformatori nelle centrali di produzione che elevano la tensione dal valore del generatore (per esempio 15 kV) a quello delle linee di trasmissione (per esempio 220 kV);
- quando il trasformatore funziona da riduttore di tensione il primario corrisponde al lato AT e il secondario a quello BT; questo succede, per esempio, per i trasformatori degli alimentatori di circuiti elettronici, che abbassano il valore della tensione da quello di rete (230 V) a quello tipico di alimentazione delle apparecchiature a valle (per esempio 12 V).

le potenze apparenti del primario e del secondario sono idealmente uguali (nel funzionamento del trasformatore con carico sul secondario)

$$S_P = S_S \qquad V_P I_P = V_S I_S \qquad \frac{V_P}{V_S} = \frac{N_P}{N_S} = \frac{I_S}{I_P}$$

le correnti circolanti nei due lati del trasformatore sono inversamente proporzionali al numero di spire e quindi il lato AT, avente un maggior numero di spire, sarà interessato dalla corrente minore e viceversa.

Sono anche uguali le potenze attive e reattive e gli sfasamenti di primario e secondario.

L'impedenza di un circuito viene trasformata con il quadrato del rapporto delle spire. Per esempio, se un'impedenza Z_S fosse collegata ai terminali dell'avvolgimento secondario, essa apparirebbe al circuito primaria di avere un'impedenza di $Z_S = \left(\frac{N_P}{N_S}\right)^2$.

Questa relazione è reciproca, cosicché l'impedenza Z_P del circuito primario apparirebbe al secondario come $Z_P = \left(\frac{N_S}{N_P}\right)^2$

Trasformatore Reale

Un trasformatore ideale non avrebbe nessuna perdita di energia e sarebbe efficiente al 100%. Nei trasformatori reali l'energia viene dissipata negli avvolgimenti, nuclei e strutture circostanti. I trasformatori più grossi sono generalmente i più efficienti: quelli progettati per la distribuzione dell'energia elettrica normalmente hanno un'efficienza di conversione del 98%.

Un piccolo trasformatore, in generale offre un'efficienza dell'85%, con perdite notevoli addirittura quando non alimenta nessun carico. Sebbene le perdite di energia individuali siano piccole, le perdite complessive da parte dell'elevato numero di carichi sono consistenti.

Le perdite dei trasformatori sono divise in perdite negli avvolgimenti, denominate *perdite nel rame*, e perdite nel circuito magnetico, denominate *perdite nel ferro*.

Le perdite variano con la corrente di carico: possono venire espresse con perdite *a vuoto* e *sotto carico*. La resistenza degli avvolgimenti domina le perdite *sotto carico* (*perdite del rame*), le perdite per isteresi e correnti di Eddy (*perdite del ferro*) contribuiscono per oltre il 99% alle perdite *a vuoto*.

Le perdite nel trasformatore derivano da:

resistenza dell'avvolgimento (effetto Joule)

La corrente che scorre negli avvolgimenti è causa del riscaldamento resistivo dei conduttori. Alle frequenze elevate, l'effetto pelle e l'effetto di prossimità creano resistenze addizionali degli avvolgimenti e perdite.

perdite per isteresi magnetica

Ogni volta che il campo è invertito, una piccola quantità di energia è perduta a causa dell'isteresi del nucleo. Per un dato materiale del nucleo, la perdita è proporzionale alla frequenza ed è una funzione del picco della densità di flusso al quale è sottoposto.

perdite per correnti parassite

I materiali ferromagnetici sono pure buoni conduttori, e un nucleo solido fatto di un tale materiale costituisce pure una singola spira cortocircuitata per tutta la sua lunghezza. Correnti parassite circolano all'interno del nucleo in un piano normale al flusso e sono responsabili del riscaldamento resistivo del materiale del nucleo. La perdita per correnti parassite è una funzione determinata dal quadrato della frequenza dell'alimentazione e dalla radice quadrata dello spessore del materiale.

magneto-strizione

Il flusso magnetico in un materiale ferromagnetico, quale quello dei nuclei, lo fa fisicamente contrarre ed espandere leggermente con ogni ciclo del campo magnetico, un effetto noto come **magneto-strizione**. Ciò produce il rumore sordo e vibrante comunemente associato ai trasformatori e a sua volta è causa di perdite per riscaldamento per attrito nei nuclei soggetti.

perdite meccaniche

Oltre alla magneto-strizione, il campo magnetico variabile produce delle forze elettromagnetiche fluttuanti tra gli avvolgimenti primario e secondario. Queste stimolano delle vibrazioni negli oggetti metallici attigui, che si aggiungono al rumore ronzante, e che consumano una piccola quantità di energia.

perdite di dispersione

L'induttanza di dispersione è di per se stessa poco dissipativa, poiché l'energia fornita ai suoi campi magnetici viene restituita all'alimentatore con ciascun mezzo ciclo successivo. Tuttavia, qualunque flusso disperso che intercetta dei materiali conduttori nelle vicinanze come le strutture di supporto dei trasformatori darà origine a correnti parassite e verrà convertito in calore. Ci sono pure delle perdite per radiazione causate da campi magnetici oscillanti, ma queste sono estremamente piccole.

Il rendimento massimo (potenza ottenuta/potenza data) raggiunge valori del 99% nei trasformatori trifase di alta potenza