

Il trasformatore consta di tre parti: il nucleo magnetico e gli avvolgimenti altri elementi destinati al collegamento meccanico ed elettrico delle varie parti, al sollevamento e al trasporto della macchina, al raffreddamento ed alla protezione in genere della macchina

Formazione dei nuclei.

Il nucleo magnetico è formato da sottili lamierini di ferro normale o legato a piccole percentuali di silicio (intorno al 4 %), denominati «lamierini magnetici». Essi hanno la proprietà di avere basse perdite per isteresi e per correnti parassite. L'aggiunta di silicio comporta sì un aumento della resistività elettrica ma anche della resistenza meccanica e della durezza e della fragilità per cui il taglio presenta talune difficoltà, fra cui la presenza di sbavature che possono collegare elettricamente i lamierini, annullando lo scopo per cui è fatta la laminazione.

Colonne - gioghi - giunti.

Nei nuclei magnetici si distinguono due parti principali: le colonne (o gambe) e i gioghi o traverse (fig. 1). Le colonne sono destinate ad accogliere gli avvolgimenti; i gioghi collegano fra loro le colonne per chiudere il circuito magnetico.

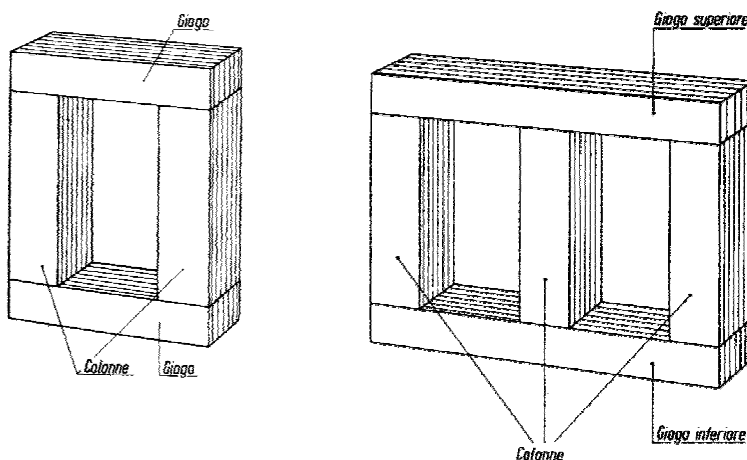


Fig. 1 - Nuclei magnetici monofase e trifase

I nuclei possono essere costruiti a giunti piallati o affacciati fig. 2 e intercalati o alternati fig 3.

Nei nuclei a giunti incastrati, i pacchi di lamierino che formano la colonna risultano alternativamente lunghi e corti e vengono ad essere incastrati fra i corrispondenti pacchi lamiere rispettivamente corti e lunghi del giogo (fig. 3). In questo modo non esiste quasi discontinuità fra il ferro della colonna e il ferro del giogo, poiché il flusso non

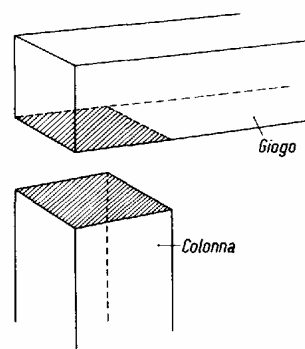


Fig. 2 - colonne a giunti piallati

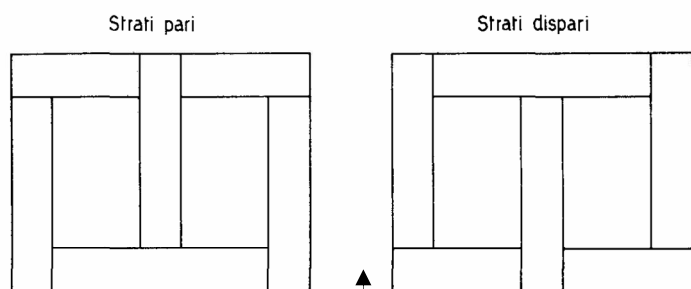


Fig. 3 - Giunti alternati

deve attraversare strati anche minimi di aria come nel caso precedente. Si ottiene così una minore riluttanza del circuito magnetico dei nuclei a giunti incastrati rispetto a quello dei nuclei a giunti affacciati e una maggiore semplicità di serraggio che diminuisce la probabilità di

vibrazioni e rumori.

Come già detto, quando si impiegano lamierini a cristalli orientati è necessario che i giunti siano realizzati a taglio inclinato poiché (avendo tale tipo di materiale la maggiore permeabilità in una sola direzione) si devono evitare percorsi trasversali delle linee di flusso, rispetto a tale direzione (fig. 5).

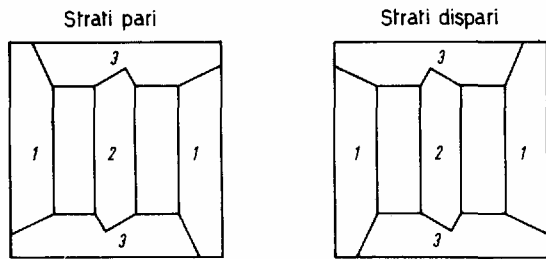
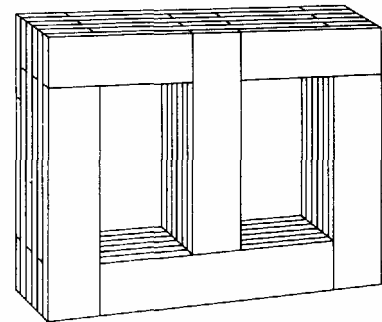


fig. 5

Fig. 4 nucleo a giunti alternati



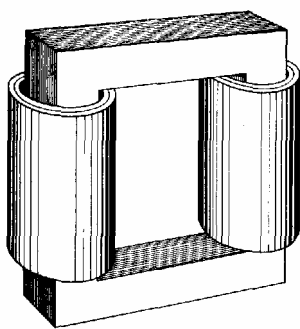
Tipi di nuclei.

Nuclei a colonne.

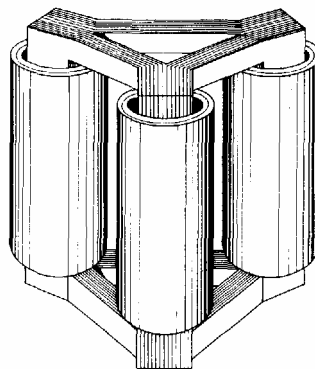
Vi sono vari tipi di nuclei a colonne, caratterizzati dalla posizione relativa delle colonne e dei giochi.

Sistema monofase: si hanno due colonne riunite superiormente e inferiormente da un giogo, in ciascuna delle quali sono infilati metà avvolgimento primario e metà avvolgimento secondario (fig. 6). In quelli trifase si hanno tre colonne riunite da due giochi.

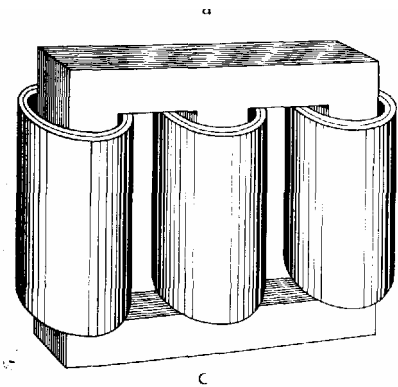
Fig.6 Trasformatori a colonna



Monofase



Trifase simmetrico



Trifase dissimetrico

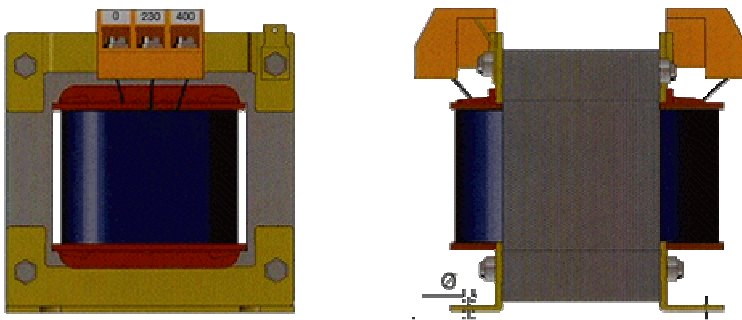
Il trasformatore trifase simmetrico non viene mai costruito per problemi di ingombro e viene sostituito da quello dissimetrico che si comporta in maniera analoga a parte il fatto di assorbire a

vuoto due correnti leggermente più grandi nelle colonne esterne perché il circuito magnetico risulta più lungo. Tale dissimmetria nelle correnti diventa trascurabile nel funzionamento a carico.

Nei nuclei a colonne si dice che il rame (avvolgimento) avvolge il ferro.

Nuclei a mantello (o corazzato).

Questo tipo ha il vantaggio rispetto a quello a colonne di ridurre le dispersioni magnetiche. Viene molto usato per trasformatori monofasi, e raramente usato per quelli trifasi.



Gli avvolgimenti sono posti sull'unica colonna centrale (figura 7). Nel piccoli trasformatori il nucleo è costituito da lamierini tranciati con un unico stampo. Le forme possono essere diverse e la figura ne riporta un tipo realizzato con un pezzo solo. In

corrispondenza di una estremità della colonna è praticato un intaglio per consentire l'introduzione dei lamierini negli avvolgimenti (fig. 8).

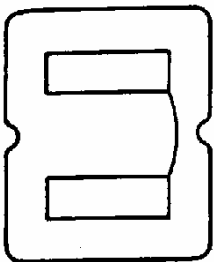
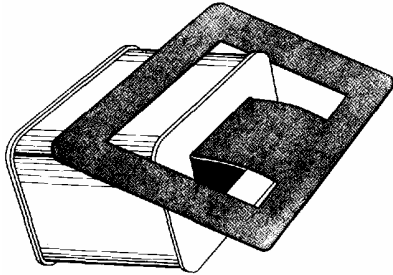
<p><i>Tipo di lamierino per nuclei corazzati o a mantello, realizzato in un solo pezzo.</i></p> 	<p><i>Montaggio del lamierino dei tipo un sol pezzo nell'avvolgimento. Il lamierino successivo dovrà essere montato in senso opposto per fare in modo che gli intagli della colonna risultino sfalsati.</i></p> 
---	--

Figura 8

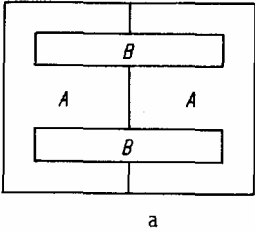
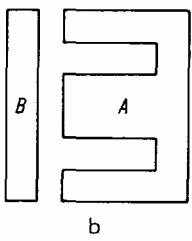
<p><i>Lamierino per nucleo corazzato, realizzato in due pezzi. La figura illustra il tipo UNEL che consente di effettuare la tranciatura senza avere sfridi (vedasi figura a).</i></p>  <p style="text-align: center;">a</p>	<p><i>Da ogni tranciatura si ricavano due lamierini e due gioghi. La disposizione del lamierino, agli effetti del montaggio è illustrata nella figura b.</i></p>  <p style="text-align: center;">b</p>
---	--

Fig. 9

Nei nuclei a mantello si dice che il ferro (nucleo magnetico) avvolge il rame (avvolgimento).

Trasformatore monofase

Il trasformatore è una macchina elettrica statica. A differenza delle altre macchine non trasforma energia da una forma ad un'altra ma trasforma i parametri della potenza, I e V.

Il trasformatore è una macchina in grado di operare solo in corrente alternata, perché sfrutta i principi dell'elettromagnetismo legati ai flussi variabili.

È fondamentalmente costituito da tre Parti:

1. Circuito elettrico (primario e secondario)
2. Circuito magnetico
3. supporti meccanici

PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO DEL TRASFORMATORE IDEALE

IDEALE significa:

1. Nessuna perdita per effetto Joule nel circuito elettrico (resistenza degli avvolgimenti primario e secondario nulla);
2. Circuito primario e secondario perfettamente accoppiati (il flusso magnetico prodotto in uno dei due circuiti si concatena totalmente con l'altro circuito)
3. Nessuna perdita nel circuito magnetico, né per isteresi, né per correnti Parassite

In tali condizioni il trasformatore si può rappresentare come costituito da due circuiti puramente induttivi perfettamente accoppiati magneticamente.

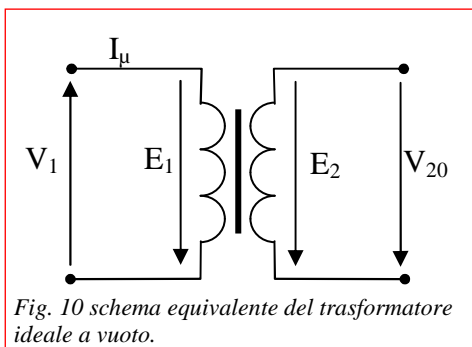


Fig. 10 schema equivalente del trasformatore ideale a vuoto.

Applicando una tensione alternata sinusoidale V_1 al primario del trasformatore composto di N_1 spire, in esso circolerà una corrente sinusoidale I_μ , chiamata corrente magnetizzante, che sarà in quadratura in ritardo rispetto alla tensione, che creerà una forza magnetomotrice sinusoidale $\mathcal{F}_\mu = N_1 \cdot I_\mu$ e, quindi, un flusso sinusoidale Φ_0 (in fase con la

corrente magnetizzante). Tale flusso, in base alle ipotesi fatte, si chiude tutto attraverso il circuito magnetico ed, essendo variabile sinusoidalmente, indurrà per via dell'induzione elettromagnetica (legge di Lenz) una forza elettromotrice sinusoidale in ciascuno dei due avvolgimenti. Tali f.e.m. sono entrambe in ritardo di 90° rispetto al flusso e tale che E_1 sia uguale ed opposta a V_1 , e valgono in valore efficace rispettivamente:

$$E_1 = 4,44 \cdot f \cdot \Phi_0 \cdot N_1 \quad (1) \quad \text{ed} \quad E_2 = 4,44 \cdot f \cdot \Phi_0 \cdot N_2 \quad (2)$$

dove Φ_0 è il flusso generato dalla corrente I_μ nell'avvolgimento primario.

Facendo il rapporto fra la (1) e la (2) si ottiene:

$$m = \frac{E_1}{E_2} = \frac{4,44 \cdot f \cdot \Phi_0 \cdot N_1}{4,44 \cdot f \cdot \Phi_0 \cdot N_2} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{V_1}{V_{20}} \quad \text{che rappresenta il rapporto di trasformazione.}$$

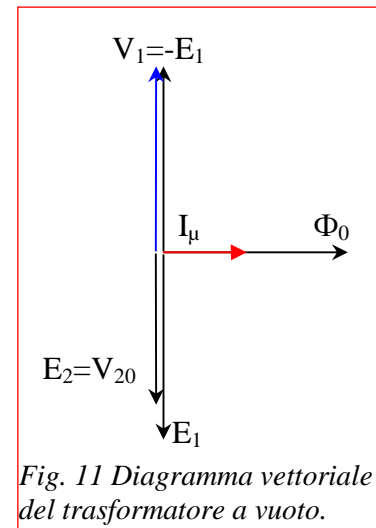
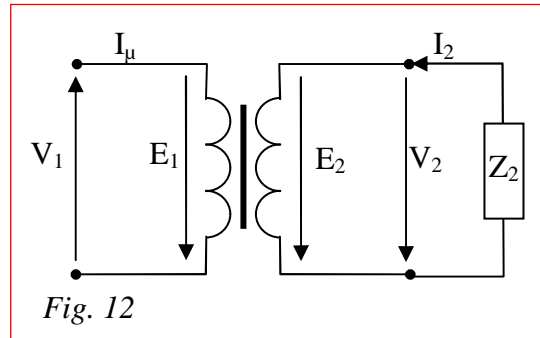


Fig. 11 Diagramma vettoriale del trasformatore a vuoto.

Funzionamento a carico del trasformatore ideale

Il trasformatore si dice a carico quando eroga corrente al secondario, ovvero quando, col primario alimentato, si collega una impedenza di valore finito ai morsetti d'uscita del secondario, fig. 12. Nel passaggio da vuoto a carico, se si mantengono costanti la tensione applicata e la frequenza, dovrà pure rimanere costante il flusso (basta guardare la sua espressione). Per questo motivo la forza magnetomotrice complessiva nel passaggio da vuoto a carico dovrà rimanere costante, in altri termini dovrà essere:



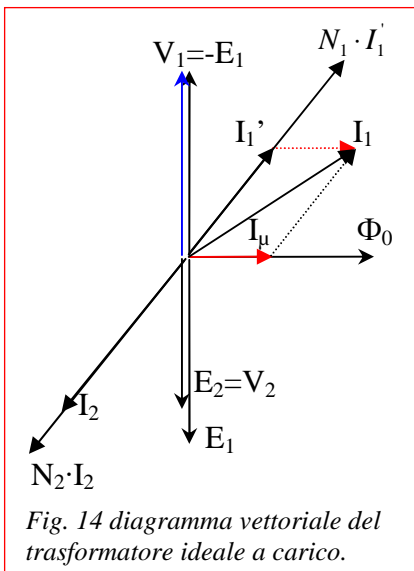
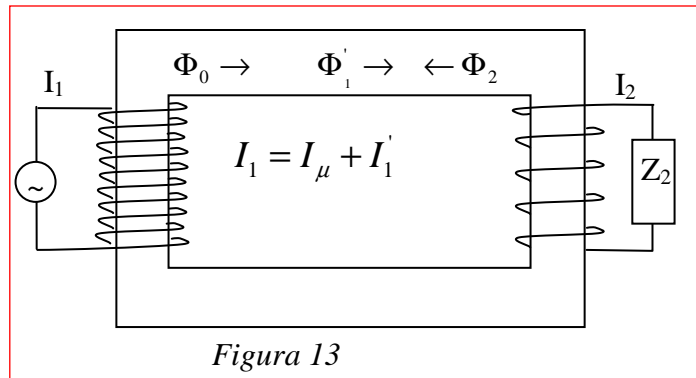
$$\Phi_0 = \Phi_0 + \Phi_1' + \Phi_2 = \Phi_0 \quad \text{di conseguenza}$$

$$\Phi_1' = -\Phi_2 \quad \text{o che è la stessa cosa}$$

$$\mathcal{F}_0 = \mathcal{F}_0' + \mathcal{F}_2 \quad \text{quindi } \mathcal{F}_0' = -\mathcal{F}_2$$

$$\text{e poiché } \mathcal{F}_0' = N_1 \cdot I_1' \quad \text{e } \mathcal{F}_2 = N_2 \cdot I_2 \quad \text{segue}$$

$$N_1 I_1' = -N_2 I_2 \quad (3)$$



Questo

significa che appena si chiude il secondario su di un carico Z_2 , a causa della V_2 esistente circolerà una corrente I_2 che creerà un flusso magnetico Φ_2 che tenderà ad annullare il flusso preesistente Φ_0 , a tal punto il circuito primario reagisce richiamando dalla linea una corrente di reazione I_1' la quale farà circolare un flusso Φ_1' che opponendosi a Φ_2 , consentirà a Φ_0 di mantenere la tensione al secondario e quindi ad erogare potenza.

Dall'espressione (3), trascurando il segno, si ricava $\frac{N_1}{N_2} = \frac{I_2}{I_1} = m$

che è sempre valida e che rappresenta il rapporto di trasformazione anche nel caso di trasformatore reale.

Resta valida l'eguaglianza $E_2 = V_2$ in quanto nell'ipotesi di trasformatore ideale non abbiamo cadute di tensione nel secondario. $E_1 = -V_1$ vale ancora per lo stesso motivo.

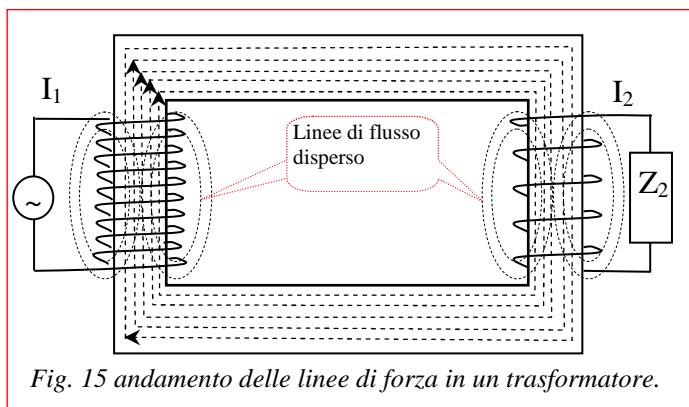
Trasformatore monofase reale

Il trasformatore ideale non esiste, è solo un modello teorico per rendere il più possibile semplice l'interpretazione del principio di funzionamento. Tutti i trasformatori sono reali e la differenza consiste nel fatto che tutte le ipotesi fatte per definire il trasformatore cadono e quindi bisogna considerarne l'effetto.

a) resistenze Ohmiche R_1 , R_2 degli avvolgimenti non sono nulle. A causa di ciò le correnti primaria e secondaria produrranno delle cadute di tensione Ohmiche e delle perdite di potenza per effetto Joule. Il valore delle resistenze Ohmiche aumenta con la temperatura, quindi per il circuito equivalente si dovrà fare riferimento ad una ben precisa temperatura chiamata temperatura

convenzionale di riferimento T [°C] che vale **75** [°C] per le classi d'isolamento A, E, B oppure **115**[°C] per le classi **F, H**. Dal momento che gli effetti prodotti dalla presenza delle resistenze dipendono dalle correnti, nel circuito equivalente che costituisce il modello del trasformatore reale, le resistenze R_1 , R_2 andranno poste in serie al circuito, in modo da essere percorse rispettivamente dalle correnti primaria e secondaria. Nella progettazione del trasformatore si fa in modo che gli avvolgimenti primario e secondario abbiano resistenze proporzionate in modo tale che determinino, a pieno carico, perdite per effetto Joule al primario ed al secondario circa uguali, ciò equivale a fissare per i due avvolgimenti la stessa densità di corrente (nei trasformatori trifasi di media e grande potenza $2,5 \div 3,5$ [A/mm²] per il rame, $1,5 \div 2$ [A/mm²] per l'alluminio, nei piccoli trasformatori monofase $1,5 + 2,4$ [A/mm²] decrescente all'aumentare della potenza per il rame).

b) presenza di **flussi di dispersione al primario ed al secondario Φ_{d1} , Φ_{d2}** , causati dal fatto che la

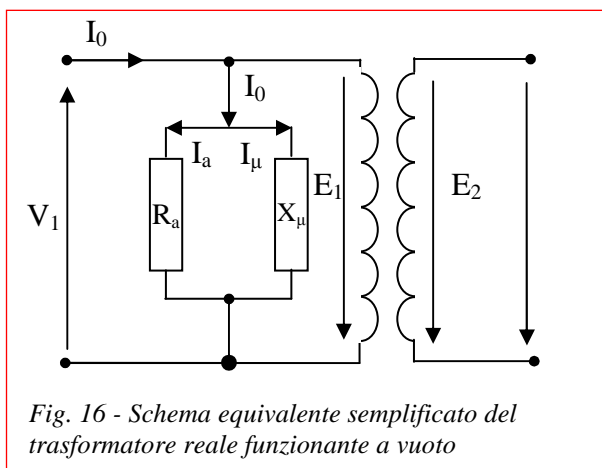


permeabilità del mezzo circostante il nucleo non è nulla e quindi qualche linea di forza si chiude su se stessa sfuggendo al circuito magnetico e quindi non contribuendo alla generazione delle forze elettromotrici E_1 ed E_2 rispettivamente al primario ed al secondario, provocando definitivamente, una caduta di tensione reattiva induttiva ed un impegno di potenza reattiva in ciascun avvolgimento. Di tali aspetti si tiene conto mediante due reattanze di dispersione, X_1 ed X_2 , che a frequenza costante si potranno

ritenere costanti perché il flusso di dispersione che le origina, sviluppandosi in gran parte in aria, percorre un circuito magnetico che è lecito ritenere a permeabilità magnetica costante. Le due reattanze andranno poste in serie nel circuito equivalente, in modo da essere percorse dalle correnti primaria e secondaria, infatti gli effetti da esse prodotti dipendono da tali correnti.

c) Le perdite per isteresi e correnti parassite non sono nulle e le rappresentiamo con una resistenza fittizia R_a collegata in parallelo come in figura 16.

Funzionamento del trasformatore monofase Reale a Vuoto.



Analizzando il funzionamento del trasformatore a vuoto si può veder che è possibile trascurare le resistenze degli avvolgimenti primario R_1 e secondario R_2 perché:

- al secondario non circola corrente e quindi non si alcuna perdita per effetto Joule né caduta di tensione.
- Al primario la corrente circolante a vuoto è molto piccola rispetto a quella a carico da 10 a 100 volte più piccola e quindi risultano trascurabili sia le perdite per effetto Joule che la caduta di tensione.

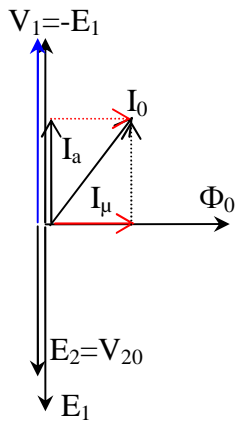


Fig.17 diagramma vettoriale del trasformatore reale a vuoto.

Per questo motivo possiamo trascurare la resistenza primaria e secondaria nello schema equivalente a vuoto e analogamente, essendo nulla la corrente al secondario e molto piccola quella al primario, si possono trascurare le reattanze di dispersione X_1 e X_2 . La potenza assorbita a vuoto da un trasformatore serve a compensare le perdite nel ferro per isteresi e correnti parassite o di Foucault.

Come si vede sia nel circuito equivalente fig. 16 che nel diagramma vettoriale di fig. 17, il trasformatore a vuoto assorbe una corrente I_0 , composta da una componente I_a attiva che attraversa la resistenza fittizia R_a e quindi in fase con la tensione e una parte reattiva I_μ , che serve a creare il flusso Φ_0 e che attraversa la reattanza X_μ . Valgono le relazioni:

$$I_0 = \sqrt{I_a^2 + I_\mu^2} \quad \text{in modulo, oppure } \vec{I}_0 = \vec{I}_a + \vec{I}_\mu \text{ vettorialmente o anche } \vec{I}_0 = I_a + jI_\mu$$

La prova a vuoto del trasformatore

La prova a vuoto del trasformatore consiste nel misurare la potenza assorbita alimentando a tensione nominale uno dei due avvolgimenti e lasciando l'altro aperto, come lo schema di fig. 18.

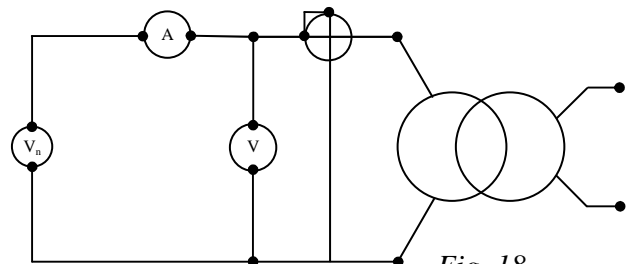


Fig. 18

La **potenza misurata** rappresenta le perdite nel ferro per isteresi e correnti parassite dalla misura della **corrente, tensione e della potenza attiva** si può risalire al **fattore di potenza a vuoto**.

$\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{V_1 I_0}$; noto questo valore si può risalire a tutti i parametri dello schema equivalente semplificato di fig. 7, dal valore della I_a , della I_μ , ai valori della R_a e della X_μ infatti:

$$I_a = I_0 \cos \varphi_0 ; \quad I_\mu = I_0 \sin \varphi_0 ; \quad R_a = \frac{V_1}{I_a} ; \quad X_\mu = \frac{V_1}{I_\mu}$$

Dalla misura della V_1 e della V_{20} , tensione primaria e tensione secondaria a vuoto si può determinare il rapporto di trasformazione $m = \frac{V_1}{V_{20}}$.

Circuito equivalente del trasformatore monofase reale a carico

Si rappresenta il Circuito equivalente del trasformatore monofase reale, tenendo presenti le perdite già elencate e rappresentandole con un simbolo opportunamente collegato. Chiaramente dobbiamo tenere conto delle resistenze degli avvolgimenti che saranno attraversate ognuna dall'intera corrente primaria (R_1) o secondaria (R_2). In serie ad esse troveremo rispettivamente, al primario la reattanza di dispersione X_1 , al secondario la reattanza di dispersione secondaria X_2 . Vedi figura 19.

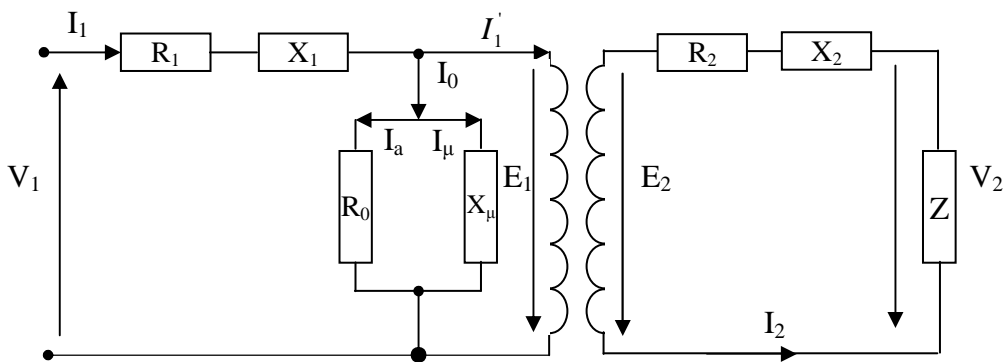


Fig. 19 Schema equivalente semplificato del Trasformatore reale a carico

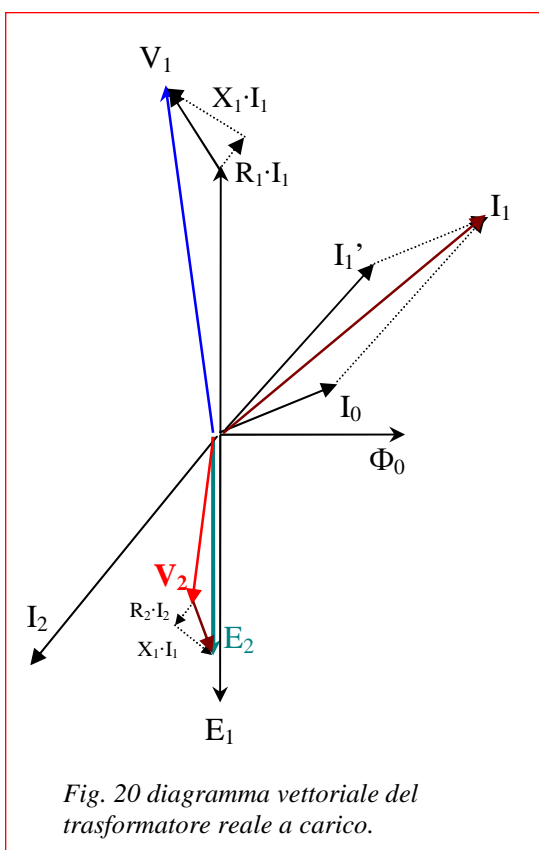


Fig. 20 diagramma vettoriale del trasformatore reale a carico.

Il diagramma vettoriale di figura 20, mette in evidenza come le resistenze R_1, R_2 e le reattanze X_1, X_2 , provochino cadute di tensione al primario e al secondario rispettivamente in fase e in quadratura in anticipo con le correnti I_1, I_2 .

Alla chiusura del circuito secondario del trasformatore su un carico rappresentato da una impedenza Z , a causa della tensione V_2 , verrà a circolare una corrente I_2 , sfasata di un certo angolo φ_2 determinato dal carico. Questa corrente I_2 circolando nell'avvolgimento secondario oltre a dar luogo a una f.m.m. che farà circolare un flusso Φ_2 , che si opporrà al flusso Φ_0 e richiamerà la corrente di reazione primaria I_1' , che prelevando energia dalla rete è in grado di trasferirla al carico mediante il flusso Φ_1 , da essa generato in opposizione a Φ_2 , provocherà una c.d.t.

$\overline{\Delta V_2} = R_2 \cdot I_2 + jX_2 \cdot I_2$. Al primario la corrente I_1' di

reazione si somma I_0 dando la I_1 la quale circolando nel circuito primario provoca una c.d.t.

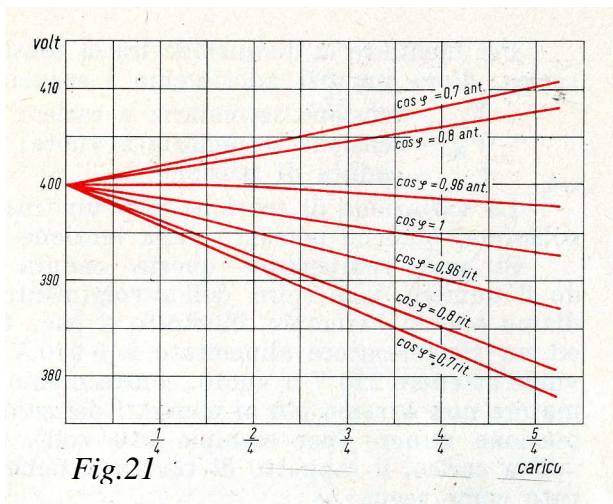
$$\overline{\Delta V_1} = R_1 \cdot I_1 + jX_1 \cdot I_1$$

Tutto ciò fa sì che la tensione secondaria a carico V_2 , per tutti i carichi ohmico-induttivi, risulta minore della tensione secondaria a vuoto V_{20} . Questa variazione di tensione viene chiamata **variazione di tensione da vuoto a carico** e indicata con v che si può esprimere anche in percentuale

$$v\% = \frac{V_{20} - V_2}{V_{20}} \cdot 100. \text{ La variazione di tensione di un trasformatore dipende dall'entità del carico}$$

secondario (è pressoché proporzionale alla corrente secondaria erogata) e dallo sfasamento fra tensione e corrente di carico, ossia dal fattore di potenza del carico.

Portando in un diagramma (fig. 21) in ascisse le correnti secondarie (oppure le percentuali di carico) e in ordinate le corrispondenti tensioni ai morsetti del secondario (ottenute sottraendo dalla



e in ordinate le corrispondenti tensioni ai morsetti del secondario (ottenute sottraendo dalla tensione secondaria a vuoto le variazioni di tensione) si hanno delle curve (una per ogni fattore di potenza del carico) che mostrano come varia la tensione al variare del carico: esse vengono denominate «caratteristiche esterne».

La verifica delle variazioni di tensione di un trasformatore già costruito si potrebbe anche fare per via diretta, cioè misurando la tensione ai morsetti secondari quando il circuito secondario

è aperto (trasformatore a vuoto) e quando esso è chiuso sul carico, tenendo entrambi i casi costante la tensione di alimentazione del primario e la frequenza. Questo procedimento implica gravi difficoltà pratiche e inesattezze per cui viene impiegato solo eccezionalmente per trasformatori di piccolissima potenza. In linea generale si usano sempre metodi indiretti, valendosi dei risultati della cosiddetta prova di corto circuito.

Il diagramma di Kapp.

Per poter determinare rapidamente e per via grafica le variazioni tensione in relazione ai vari fattori di potenza si ricorre al diagramma di Kapp.

La costruzione si basa sul triangolo fondamentale ABC (triangolo di cortocircuito) del trasformatore disegnato per la corrente erogata I_2 per la quale si vuole determinare la c.d.t. industriale. In questo triangolo, il cateto orizzontale **AB** è proporzionale alla caduta sulla resistenza equivalente secondaria $Re'' \cdot I_2$, il cateto verticale **BC** è proporzionale alla caduta sulla reattanza equivalente secondaria $Xe'' \cdot I_2$, l'ipotenusa **AC** è proporzionale alla caduta sull'impedenza equivalente secondaria $Ze'' \cdot I_2$, l'angolo sul vertice **A** è l'angolo di cortocircuito ϕ_{cc} .

A tal fine si fa centro successivamente nei due vertici A e C degli angoli non retti del triangolo di

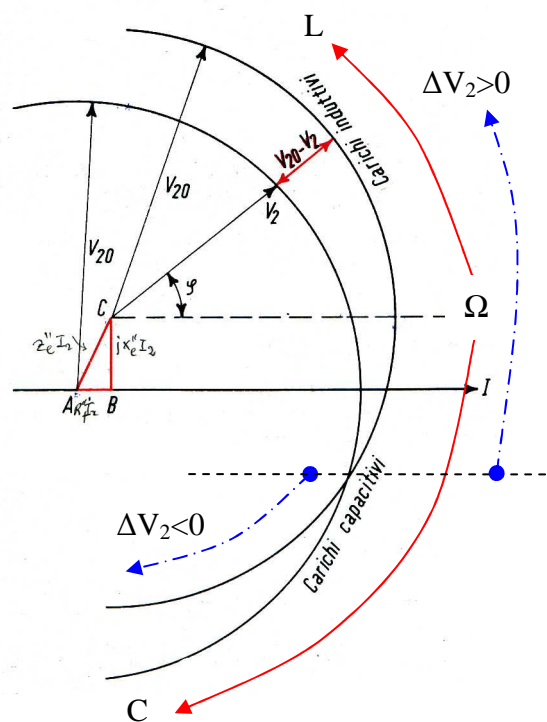


Fig. 22. costruzione del diagramma di Kapp

Kapp (fig. 22) e di raggio uguale alla tensione a vuoto, si tracciano due cerchi.

Per avere la variazione della tensione a carico a un determinato $\cos\varphi$ si traccia una semiretta facente, con la direzione delle correnti, l'angolo φ (in senso antiorario se si tratta di ritardo, in senso orario se si tratta di anticipo). Il segmento intercettato su questa semiretta dai due cerchi dà la variazione di tensione cercata $\Delta V_2 = V_{20} - V_2$.

In pratica però si preferisce ricorrere a formule approssimate, dedotte con qualche semplificazione dal diagramma di Kapp, poiché costruzione del diagramma stesso, nel caso dei trasformatori, presenta notevoli difficoltà grafiche dato che la variazione di tensione, come abbiamo detto, è sempre una piccola percentuale della tensione a vuoto.

Le Norme CEI prescrivono la seguente formula:

$$v = v_r \cos \varphi + v_x \sin \varphi + \frac{(v_x \cos \varphi - v_r \sin \varphi)^2}{200} \quad \text{dove } v_r \text{ e } v_x \text{ sono le cadute percentuali rispettivamente}$$

ohmica e induttiva date da:

$$v_r = \frac{V_{cc} \cdot \cos \varphi_{cc}}{V_1} \cdot 100 \quad \text{e} \quad v_x = \frac{V_{cc} \cdot \sin \varphi_{cc}}{V_1} \cdot 100$$

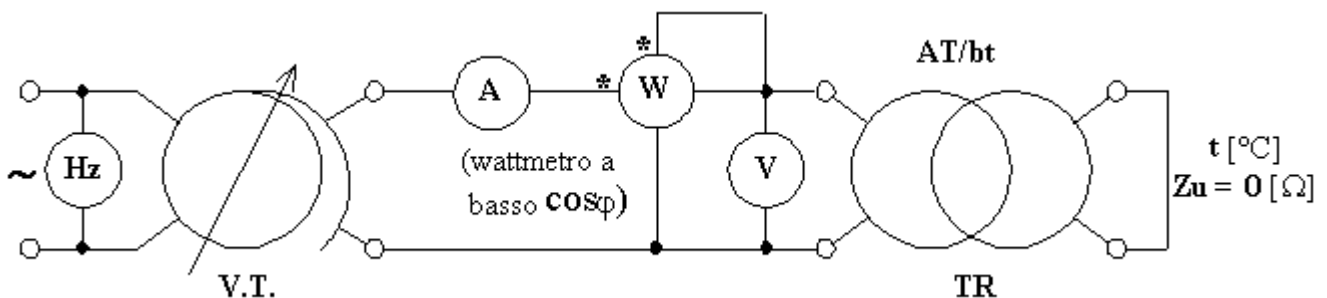
Essendo:

- V_{cc} — tensione di alimentazione del trasformatore in corto circuito;
- V_1 — tensione nominale di alimentazione;
- φ_{cc} — angolo fra tensione e corrente in corto circuito.

La prova di corto circuito.

La prova di corto circuito consiste nel chiudere in corto circuito, ossia con collegamenti di resistenza trascurabile e sezione opportuna, i morsetti di uno dei due avvolgimenti ed alimentare l'altro con una tensione opportunamente ridotta (pochi percento della tensione nominale dell'avvolgimento alimentato) in modo che negli avvolgimenti circolino le correnti nominali. In queste condizioni si misurano la tensione applicata e la potenza assorbita.

Poiché la tensione applicata è, come abbiamo detto, piccola rispetto alla tensione nominale, le perdite nel ferro sono pressoché nulle cosicché tutta la potenza assorbita è dovuta alle perdite per effetto Joule negli avvolgimenti primario e secondario, nonché alle cosiddette perdite addizionali. Perciò dividendo questa potenza per la corrente si ottiene la caduta totale di tensione per effetto della resistenza equivalente degli avvolgimenti. Inoltre, poiché il carico esterno è nullo, la tensione primaria applicata deve vincere soltanto l'impedenza propria del trasformatore, ossia è uguale alla risultante delle cadute ohmiche e delle cadute induttive.



Per eseguire la prova di corto circuito in un trasformatore occorre la disponibilità di un generatore variabile di tensione con cui alimentare la macchina in prova. Alimentare il circuito di misura partendo dal valore zero fino al valore V_{cc} , che rappresenta il valore di tensione di alimentazione necessaria a far circolare la corrente nominale nel trasformatore corto - circuitato. Gli strumenti necessari sono, se il trasformatore è monofase un wattmetro, un amperometro e un voltmetro di portate adeguate. Se il trasformatore è trifase si possono collegare due wattmetri in inserzione Aron. Il valore della potenza misurata esprime le perdite per effetto Joule negli avvolgimenti.

Rendimento di un trasformatore monofase

Si distingue il rendimento effettivo:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}$$

nel quale sia la potenza assorbita P_1 [W] che la potenza erogata P_2 [W] sono direttamente misurate, dal rendimento convenzionale:

$$\eta_c = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + p_p} = \frac{P_1 - p_p}{P_1} \quad \text{nel quale una delle due potenze si ricava dall'altra tenendo conto}$$

delle perdite p_p [W] (calcolate con riferimento allo schema semplificato).

$$\text{e si possono anche scrivere } \eta_c = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + p_0 + p_{j1} + p_{j2}} = \frac{V_2 \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_2}{V_2 \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_2 + p_0 + R_1 I_1^2 + R_2 I_2^2}.$$

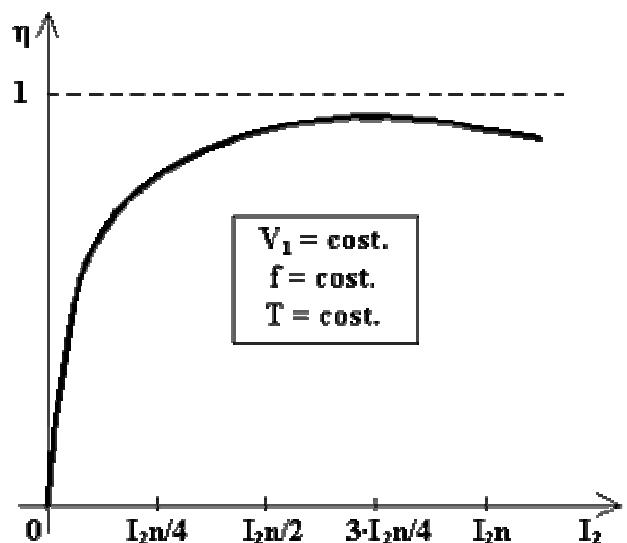
essendo p_{j1} e p_{j2} le perdite per effetto Joule e p_0 le perdite nel ferro (potenza assorbita nella prova a vuoto, riportata sulla targa) se il trasformatore è alimentato a tensione e frequenza nominali.

$$\text{Si può scrivere anche } \eta_c = \frac{\alpha \cdot S_{2n} \cdot \cos \varphi_2}{\alpha \cdot S_{2n} \cdot \cos \varphi_2 + p_0 + \alpha^2 \cdot p_{cc}} \quad \text{essendo il fattore di carico } \alpha = \frac{I_2}{I_{2n}} \text{ e } p_{cc}$$

perdite per effetto Joule Nominali (dalla prova di corto circuito o dai dati di targa)

Il trasformatore viene dimensionato per dare il massimo rendimento intorno ai $3/4$ del pieno carico. Si dimostra che il rendimento è tanto più grande quanto più è grande il f.d.p. del carico ($\cos \varphi$). Il massimo rendimento del trasformatore generalmente si ha quando le perdite nel ferro eguagliano quelle nel rame.

Qualitativamente, l'andamento del rendimento in funzione della corrente erogata è quello sopra raffigurato. Nei trasformatori ben costruiti e



funzionanti a pieno carico il rendimento è sempre molto elevato, anche pari al **99,5%** per le macchine di elevata potenza.

Rapporto di trasformazione

Si definisce rapporto di trasformazione nominale di un trasformatore trifase:

$$K_0 = \frac{V_{1n}}{V_{20n}}$$

dove le tensioni sono quelle concatenate. Si deve notare che tale rapporto non sempre coincide col rapporto di spire $m = N_1 / N_2$ perché è funzione del collegamento a stella o triangolo ecc. degli avvolgimenti primari e secondari. Esempio:

- per un trasformatore collegato a stella primario e secondario il rapporto di trasformazione vale:

$$K_0 = \frac{V_{AB}}{V_{ab}} = \frac{\sqrt{3} \cdot E_A}{\sqrt{3} \cdot E_a} = \frac{E_A}{E_a} = \frac{N_1}{N_2} = m$$

- per un trasformatore collegato con il primario a triangolo e secondario a stella il rapporto di trasformazione vale:

$$K_0 = \frac{V_{AB}}{V_{ab}} = \frac{E_A}{\sqrt{3} \cdot E_a} = \frac{N_1}{\sqrt{3} \cdot N_2} = \frac{m}{\sqrt{3}}$$

Spostamento angolare nei Trasformatori.

Si denota col nome di *spostamento angolare* l'angolo, misurato quale ritardo della bassa tensione rispetto all'alta tensione, che determina la reciproca posizione angolare fra la terna delle tensioni concatenate (o stellate) dal lato **AT** e la terna delle tensioni concatenate (o stellate) dal lato **bt**. Tale spostamento angolare è funzione del tipo di collegamento dell'avvolgimento **AT** e dell'avvolgimento **bt**.

Lo spostamento angolare è determinante per il collegamento in parallelo dei trasformatori trifasi, infatti due trasformatori trifasi possono essere collegati in parallelo solo se hanno lo stesso spostamento angolare. Questo perché nel caso di diversi spostamenti angolari si avrebbe la circolazione di una elevatissima (non sopportabile) corrente nella maglia formata dai secondari dovuta al fatto che, nella maglia stessa, le f.e.m. a vuoto non si troverebbero tra di loro in opposizione.

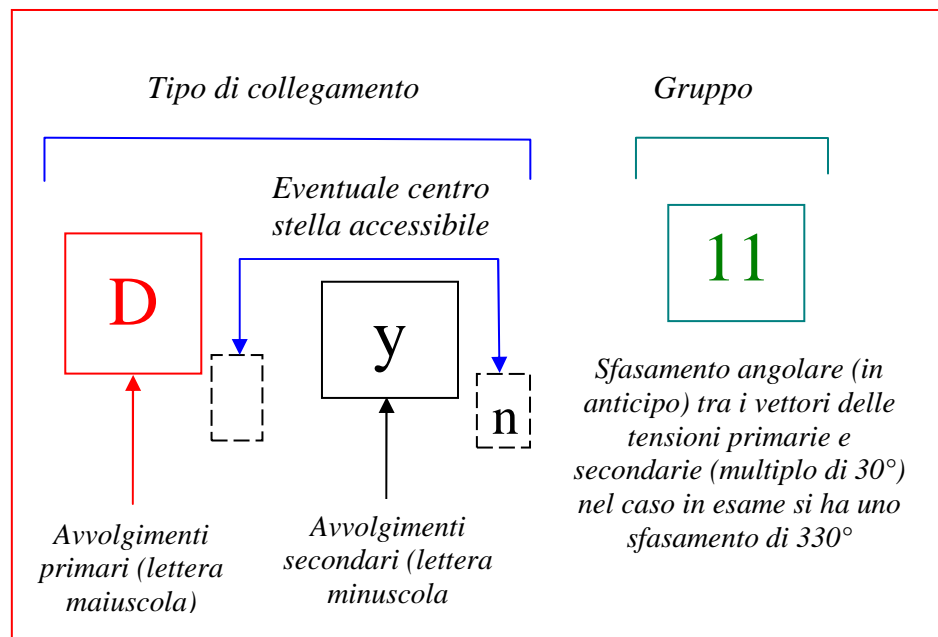
Si denota col nome di *gruppo* il numero ottenuto dividendo lo spostamento angolare per **30°**.

Di tutti i gruppi ottenibili solo quattro sono raccomandati dalle norme CEI **0, 5, 6, 11**. (Un gruppo per ogni famiglia)

La famiglia costituisce l'insieme dei gruppi riconducibili ad un unico gruppo mediante scambio dei morsetti.

Si possono rappresentare i gruppi con le lancette di un orologio, associando alla lancetta dei minuti ferma sulle ore 12 l'alta tensione e con la lancetta delle ore posizionata nelle ore corrispondenti ai gruppi la bassa tensione.

I manuali per periti elettrotecnici riportano delle tabelle che mostrano per i vari collegamenti possibili quale è il gruppo di appartenenza. Il trasformatore viene classificato mediante una sigla composta dalla successione di un carattere maiuscolo (**Y** per la stella, **D** per il triangolo) che denota il tipo di collegamento dal lato **AT**, un carattere minuscolo (**y** per la stella, **d** per il triangolo, **z** per lo zig-zag) che denota il tipo di collegamento dal lato **bt** e un numero che denota il gruppo di appartenenza. Se il secondario è a stella (o a zig-zag) e vi è il collegamento del centro al neutro si aggiunge alla sigla il carattere **n**.



Esempio Yy0 indica primario e secondario a stella gruppo 0.

Connessioni dei trasformatori trifase

CODICE	CONNESSIONE	SIMBOLI		CONNESSIONI	
		avvolgimento primario	avvolgimento secondario	avvolgimento primario	avvolgimento secondario
0	Dd0				
	<u>Yy0</u>				
	Dz0				
5	Dy5				
	<u>Yd5</u>				

	<u>Yz5</u>				
6	<u>Dd6</u>				
	<u>Yy6</u>				
	<u>Dz6</u>				
	<u>Dy11</u>				
11	<u>Yd11</u>				
	<u>Yz11</u>				

sono sottolineate e in corsivo le connessioni più comuni nel nostro paese, anche se tutte possono essere utilizzate, a seconda della configurazione dell'impianto e delle necessità tecniche.

Parallelo dei trasformatori

Due trasformatori si dicono funzionanti in parallelo quando sono alimentati da una stessa linea ed erogano potenza su uno stesso carico. L'impiego di due trasformatori collegati in parallelo permette di trasformare una potenza maggiore di quella possibile con un trasformatore singolo, inoltre garantisce una più sicura continuità di servizio.

Noi facciamo riferimento al caso di trasformatori trifasi, quanto verrà detto è comunque valido anche per i trasformatori monofasi. Possiamo rappresentare due trasformatori funzionanti in parallelo mediante uno schema semplificato unifilare.

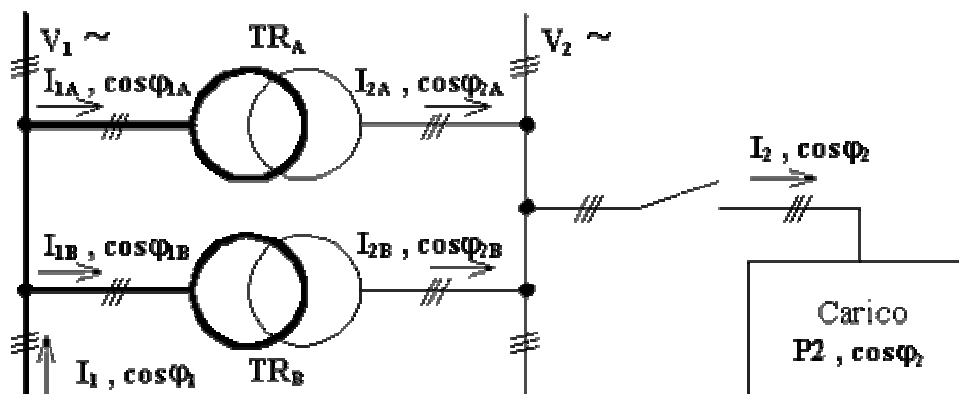


Fig.27. Schema unifilare semplificato del collegamento in parallelo di due trasformatori.

Requisiti per il parallelo

Due trasformatori per essere collegati in parallelo devono avere

- *stesse tensioni primarie e secondarie* quindi i due trasformatori devono avere **uguale rapporto nominale di trasformazione**; Se questo non accade, ovvero se $V_{20A} \neq V_{20B}$, allora si avrà una corrente di circolazione a vuoto I_{C0} nella maglia formata dai secondari dei due trasformatori e la tensione a vuoto dannosa per i trasformatori.
- *stessa frequenza di funzionamento*
- *stesso gruppo o devono essere riconducibili allo stesso gruppo*;
- *stessa caduta di tensione da vuoto a carico (cioè stessa tensione di corto circuito in valore e fase)*
- *stessa potenza o, se di potenza diversa devono avere i triangoli di Kapp simili e con i lati inversamente proporzionali alle potenze.*

Ricerca di morsetti corrispondenti.

Per connettere fra loro correttamente i morsetti occorre procedere nel seguente modo:

Trasformatori monofasi.

Si collegano direttamente alle linee i due primari e uno dei secondari; fra l'altro secondario e la linea secondaria a vuoto si interpone una lampada di tensione opportuna (doppia di quella nominale) o un voltmetro di prova (fig. 28). Se la lampada rimane spenta, i collegamenti sono esatti e si può fare il parallelo: in caso contrario si scambiano fra loro i due morsetti primari o i due morsetti secondari del trasformatore da collegare finché la lampada non si spegne.

Fra i morsetti corrispondenti non ci deve essere alcuna differenza di potenziale..

Trasformatori trifasi.

Vi sono vari metodi. Uno è il seguente: i primari dei due trasformatori vengono entrambi collegati alla linea. I secondari vengono invece collegati fra loro attraverso delle lampade (fig. 29):

se le lampade rimangono spente, i morsetti secondari sono corrispondenti e si possono collegare direttamente agli stessi conduttori della linea secondaria. In caso contrario occorre scambiare per tentativi le varie coppie di morsetti fino a che si giunga ad ottenere la suddetta condizione di lampade spente.

In ogni caso le lampade o gruppi di lampade in serie debbono essere adatte per tensione doppia di quella nominale del secondario dei trasformatori. È sempre bene procedere, prima e dopo la prova, alla verifica della integrità delle lampade e del circuito di prova per non essere tratti in inganno nel caso che una lampada sia guasta.

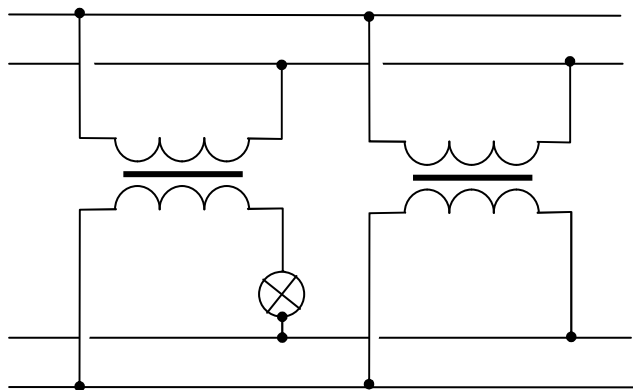


Fig. 28 Ricerca di morsetti corrispondenti nel trasformatore monofase.

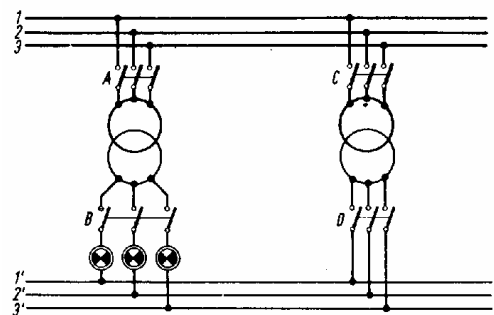


Fig. 29 - Inserimento delle lampade per il controllo della corrispondenza dei morsetti prima di effettuare il parallelo di trasformatori trifasi.

I morsetti dei due lati (di alta e bassa tensione) si identificano mediante lettere maiuscole dal lato di alta tensione e minuscole dal lato di bassa tensione, usando la stessa lettera per i morsetti dei due lati corrispondenti (ovvero che assumono contemporaneamente il potenziale positivo o negativo).

Dati di targa e dati dei costruttori

Il trasformatore, come tutte le macchine, è caratterizzato da una **targa** che riporta i valori nominali di funzionamento. Si tratta dei valori che servono a definire le prestazioni della macchina agli effetti delle garanzie e del collaudo. I valori nominali sono quei valori che le grandezze elettriche possono assumere garantendo il corretto funzionamento della macchina.

Per il trasformatore, i più importanti dati di targa sono:

- a) la frequenza nominale f_n [Hz];
- b) le tensioni nominali primaria V_{1n} [V] e secondaria V_{20n} [V] (concatenate per la macchina trifase), in valore efficace e riferite al funzionamento a vuoto;
- c) il rapporto nominale di trasformazione $K_0 = \frac{V_{1n}}{V_{20n}}$
- d) le correnti nominali primaria I_{1n} [A] e secondaria I_{2n} [A], in valore efficace e riferite ai terminali di collegamento del trasformatore alle linee;
- e) la potenza nominale definita come $S_n = V_{1n} \cdot I_{1n} = V_{20n} \cdot I_{2n}$ [VA] per il trasformatore monofase, $S_n = \sqrt{3} \cdot V_{1n} \cdot I_{1n} = \sqrt{3} \cdot V_{20n} \cdot I_{2n}$ [VA] per il trasformatore trifase;
- f) le perdite a vuoto $P_0\%$ espresse in percento della potenza nominale, la corrente assorbita a vuoto $I_0\%$ in percento della corrente nominale,
- g) il f.d.p. a vuoto $\cos\phi_0$ quando il trasformatore è alimentato a tensione e frequenza nominali;
- h) le perdite in cortocircuito $P_{cc}\%$ espresse in percento della potenza nominale,
 - a) la tensione di cortocircuito $V_{cc}\%$ in percento della tensione nominale, il f.d.p. in cortocircuito $\cos\phi_{cc}$ quando il trasformatore con i morsetti d'uscita cortocircuitati, ha gli avvolgimenti percorsi dalle correnti nominali e la temperatura è quella convenzionale di riferimento;
 - i) il gruppo d'appartenenza, solo per i trasformatori trifase;
 - j) la classe d'isolamento, che definisce la temperatura convenzionale di riferimento ;
 - k) il tipo di servizio (continuo, di durata limitata, intermittente).

IL RAFFREDDAMENTO DEI TRASFORMATORI

Agli effetti del raffreddamento i trasformatori si suddividono in due grandi categorie: trasformatori a secco (o in aria) e trasformatori in olio (o in genere in un liquido isolante), ultimamente si costruisce il trasformatore in resina che riesce a sostituire i due tipi di trasformatori precedenti in molte applicazioni industriali.

Trasformatori a secco.

Possono essere a raffreddamento naturale in aria o a ventilazione forzata. Nei trasformatori a ventilazione naturale in aria (figura 30) nessun dispositivo è previsto per attivare la ventilazione. Lo smaltimento del calore prodotto dalla macchina dipende unicamente dall'entità della superficie degli avvolgimenti e del nucleo esposta all'aria e quindi dalla facilità con la quale l'aria può lambire queste parti attive e asportare calore per convezione.

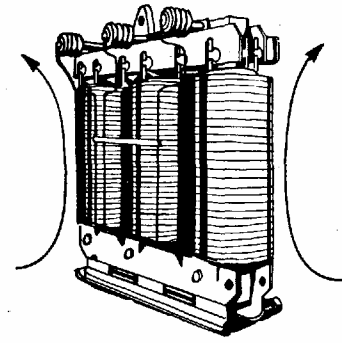
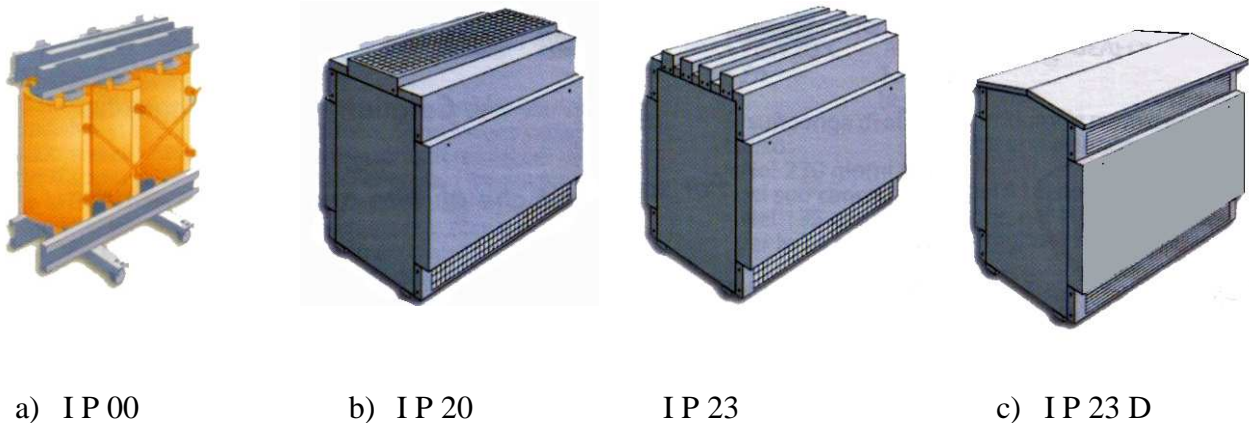


Fig. 30

I trasformatori a secco non si prestano per installazione all'aperto, anche prevedendo eventuali protezioni contro le intemperie. Trasformatori a raffreddamento naturale in aria si costruiscono fino alle potenze di poche centinaia di kilovoltampere. Con questi limiti di potenza, sono usati nelle cabine di trasformazione poste nei sotterranei delle case di abitazione, essendo meno pericolosi, in caso di incendio, dei trasformatori in olio, oggi praticamente sostituiti da quelli in resina più silenziosi e con meno perdite a fronte di un costo iniziale più elevato. Il trasformatore in resina, un tipo particolare di trasformatore a secco nel quale gli avvolgimenti, prima del montaggio sul nucleo, vengono impregnati e rivestiti sotto vuoto con una miscela di resine epossidiche e polvere di quarzo si usa soprattutto per l'impiego nei luoghi con rischio di incendio. Ne risulta impedito l'assorbimento di umidità dell'ambiente, migliorato il comportamento dielettrico ed essi vengono praticamente resi incombustibili.



a) IP 00

b) IP 20

IP 23

c) IP 23 D

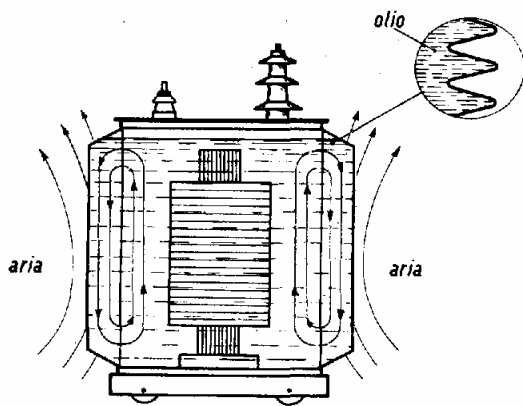
Fig. 31- tipi di involucri per Trasformatori in resina. L'involucro di tipo *d* si può usare fuori delle cabine

Con la ventilazione forzata, realizzata mediante un apposito ventilatore, si può migliorare il raffreddamento: i trasformatori a secco a ventilazione forzata sono però poco usati.

Trasformatori in olio.

Il compito dell'olio è il raffreddamento e l'isolamento. Le parti attive (nucleo e avvolgimenti) vengono immerse in un liquido isolante, generalmente olio minerale di particolari caratteristiche.

La maggior efficacia di questo sistema di raffreddamento è dovuta al più elevato calore specifico dell'olio rispetto a quello dell'aria ed all'aumento della superficie trasmettente il calore (costituita dall'intero cassone) in confronto di quella delle sole parti attive del trasformatore. Per la differenza di temperatura che gli strati di olio a contatto con le parti attive del trasformatore assumono rispetto la superficie esterna del cassone, si stabilisce una circolazione dell'olio che opera l'asportazione del calore (fig. 32)



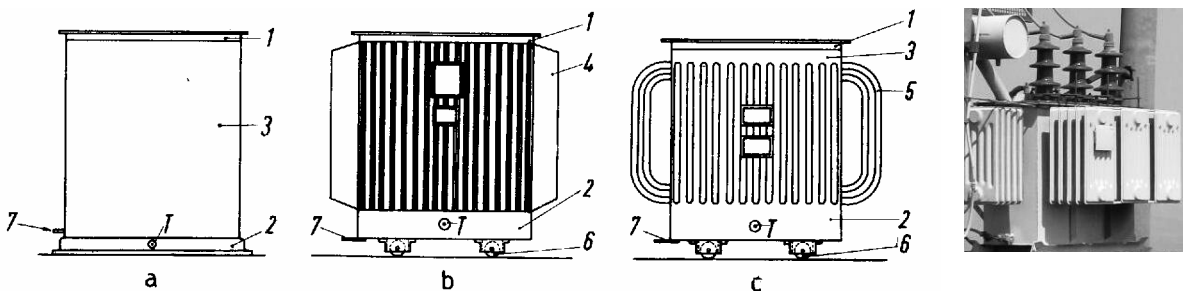
Raffreddamento delle parti attive di un trasformatore tramite l'immersione in un bagno d'olio. Il calore viene trasmesso dall'olio alle pareti esterne del contenitore (cassone) e da queste all'ambiente circostante dal moto ascensionale dell'aria (come nel caso della figura 32).

fig.32

In taluni casi l'adozione del raffreddamento in olio è imposta non tanto da esigenze di raffreddamento, quanto per realizzare un adeguato isolamento degli avvolgimenti qualora siano in giuoco tensioni elevate, oppure allorché la macchina sia destinata ad essere installata all'aperto (per esempio un trasformatore da palo).

9-3. Cassoni dei trasformatori in olio.

I cassoni dei trasformatori in olio sono costruiti in lamiera di acciaio comune. I cassoni possono essere lisci, a pareti ondulate, a tubi o con radiatori (fig. 33). In linea di massima i cassoni lisci si usano per le piccole potenze; quelli a tubi od a pareti ondulate per le medie potenze; quelli con radiatori per le grandi potenze.



I cassoni sono chiusi superiormente da un coperchio in robusta lamiera di acciaio (di qualità Fe 00) nel quale sono praticati fori per gli isolatori passanti delle uscite. Per garantire una ottima tenuta d'olio, fra cassone e coperchio si inserisce una guarnizione di sugherite o gomma sintetica resistente all'olio. Lo stesso dicasi per il fissaggio degli isolatori al coperchio.

I cassoni sono inoltre muniti di vari accessori, quali, ad esempio:

l'indicatore del livello d'olio, le valvole per lo sfogo dell'aria, i rubinetti per l'immissione e la saracinesca di scarico (ampiamente dimensionata per permettere il rapido svuotamento in caso di emergenza), i pozzetti per introdurre nel cassone eventuali termometri di controllo, i dispositivi di attacco per il filtro pressa, la leva di comando di eventuale commutatore di prese, i rulli di scorrimento, i golfari per il sollevamento della parte estraibile ed altri eventuali golfari per il trasformatore completo (fig. 34).

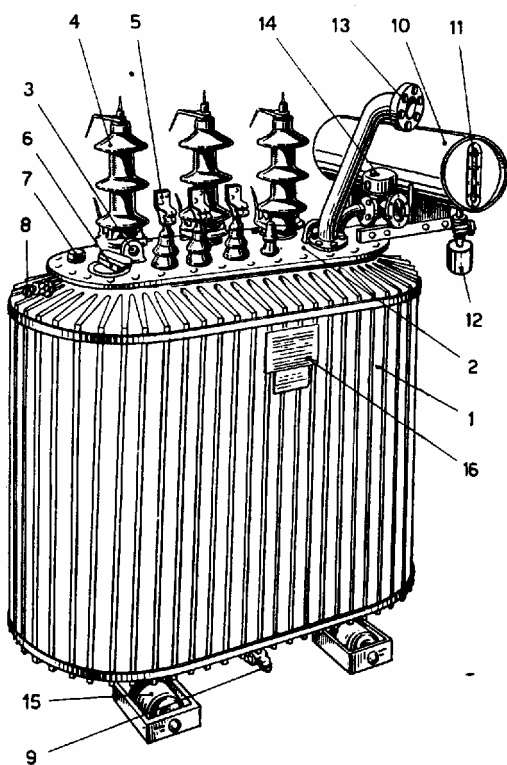


Fig. 34 - Disposizione delle parti costituenti un trasformatore in olio in cassa ondulata (valide anche per i trasformatori con cassa a tubi, salvo la diversa forma della cassa stessa).

- 1- Cassone ad alette
- 2 - coperchio dei cassone
- 3 - golfare di sollevamento
- 4 - Isolatori di alta tensione
- 5 - Isolatori di bassa tensione
- 6 - Variatore di rapporto di trasformazione
- 7 - Pozzetto per termometro
- 8 - Attacco per filtro pressa
- 9 - scarico olio
- 10 - Conservatore
- 11 - sensore di livello
- 12 - Essiccatore a gel di silice
- 13 - Valvola di sfogo
- 14 - Relè a sviluppo di gas (Buchholz)
- 15 - Rulli di scorrimento
- 16 - Targhe dei dati caratteristici della macchina e dei nome del fabbricante.

I trasformatori di media e di grande potenza sono muniti del «conservatore d'olio, detto pure recipiente di espansione. Si tratta di un recipiente posto sopra il coperchio del trasformatore e collegato, attraverso un tubo, all'interno del cassone. Il suo scopo è di consentire la dilatazione e la contrazione dell'olio conseguenti alle variazioni di temperatura dell'olio stesso. In tal modo il cassone è riempito completamente d'olio evitando ampie superfici d'olio a contatto con l'aria, con relativi pericoli di ossidazione come nei trasformatori senza conservatore.

I trasformatori muniti di conservatore d'olio vengono spesso muniti di un particolare tipo di relè, denominato relè ad espansione di gas », od anche relè Buchholz.

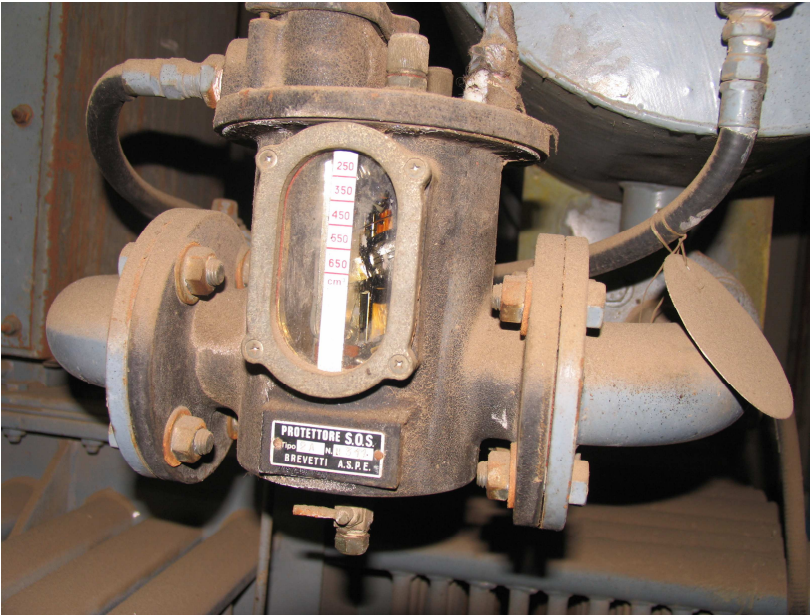


fig. 35. Relè Buchholz

Il Relè di Buchholz è una protezione per trasformatori isolati in olio che interviene quando all'interno del trasformatore si ha uno sviluppo anomalo di gas che solitamente è indice di un guasto grave.

Il relè di Buchholz viene installato su un tratto quasi orizzontale della tubazione che collega il cassone del trasformatore con il conservatore dell'olio.

Il relè si compone di una camera, posta al di sopra dell'asse della tubazione, ed in collegamento con la stessa. Al suo interno sono posti solitamente due galleggianti, uno all'interno della camera e l'altro sull'asse della tubazione, che fanno intervenire le relative segnalazioni elettriche, oppure un unico galleggiante che comanda due contatti a seconda della posizione.

Può comprendere anche una valvola a cassetto o Palmola come rilevatore di flusso, in quanto essa ostruisce parzialmente la luce del condotto ed un eventuale flusso elevato d'olio la costringe a muoversi azionando immediatamente il distacco dal trasformatore dalla rete. Normalmente la camera è piena d'olio ma, se all'interno del trasformatore dovessero formarsi dei gas, ad esempio per microscariche tra gli avvolgimenti (corto circuito fra spire dell'avvolgimento), questi tenderanno a salire ed a fluire verso il conservatore. Arrivati all'interno del Buchholz andranno ad accumularsi nella camera facendo abbassare il livello dell'olio contenuto ed azionando uno o più galleggianti che azionano dei contatti elettrici. Questi contatti possono chiudere un circuito esterno di allarme (acustico o luminoso) e o comandare direttamente i dispositivi di apertura dell'interruttore principale che inserisce la macchina sulla linea di alimentazione.

Guasto lieve

Il lento accumulo di gas nella camera, rilevato dall'intervento del galleggiante superiore, può essere indice di un problema degenerativo del trasformatore; in questo caso la segnalazione fornita dal dispositivo costituisce un allarme che non provoca l'immediata interruzione del servizio del trasformatore. I gas intrappolati all'interno del dispositivo possono essere prelevati, attraverso un'apposita valvola, per effettuare analisi chimiche con lo scopo di identificare le cause del problema.

Guasto grave

Un anomalo flusso d'olio tra il cassone ed il conservatore oppure un eccessivo accumulo di gas all'interno della camera del dispositivo possono essere dovuti ad un guasto grave ad elevata energia come, ad esempio, una scarica elettrica.

Queste situazioni, rilevate dal galleggiante inferiore oppure dal sensore di flusso provocano un segnale di guasto ed il conseguente distacco immediato del trasformatore dal servizio.

Minimo livello olio

Il galleggiante inferiore stacca il trasformatore dal servizio anche se l'olio defluisce completamente dal conservatore verso il cassone. Questa situazione può verificarsi in caso di perdite d'olio, in caso di raggiungimento di temperature estremamente basse (non previste in fase di progettazione del trasformatore) o da una somma di queste due.

Fig. 36 Esempio di relè Buchholtz

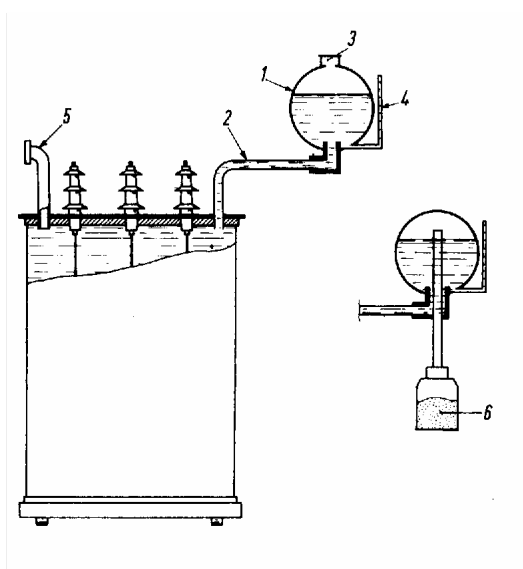
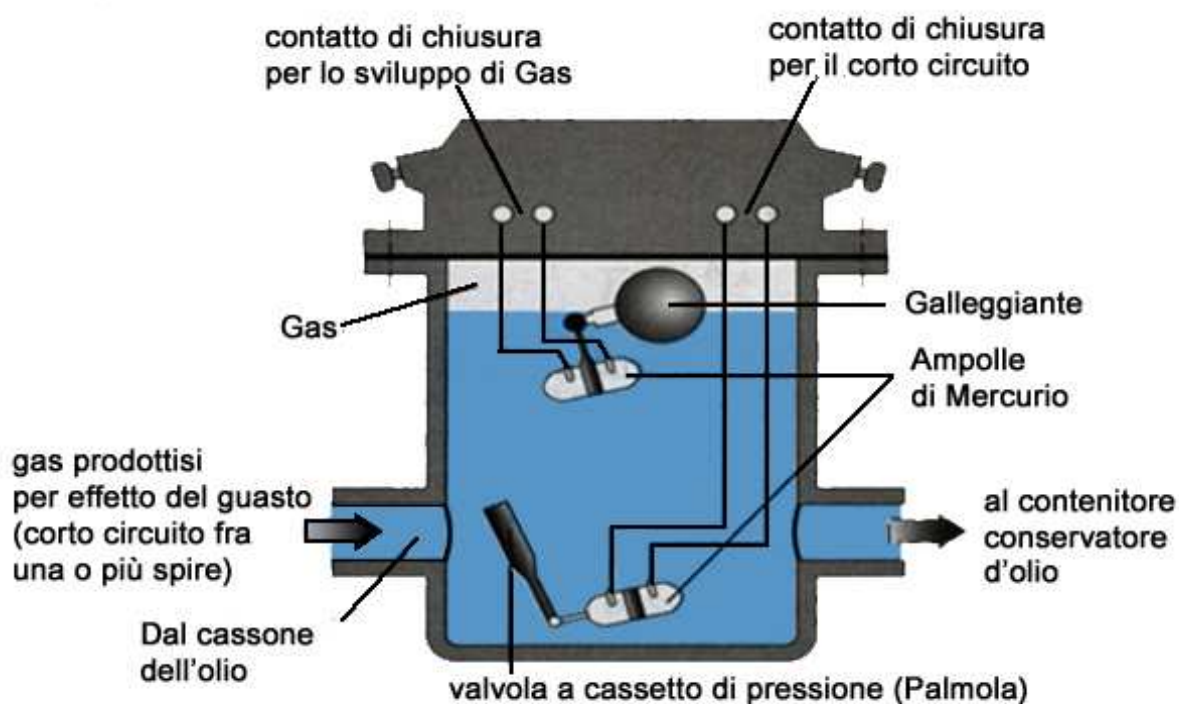
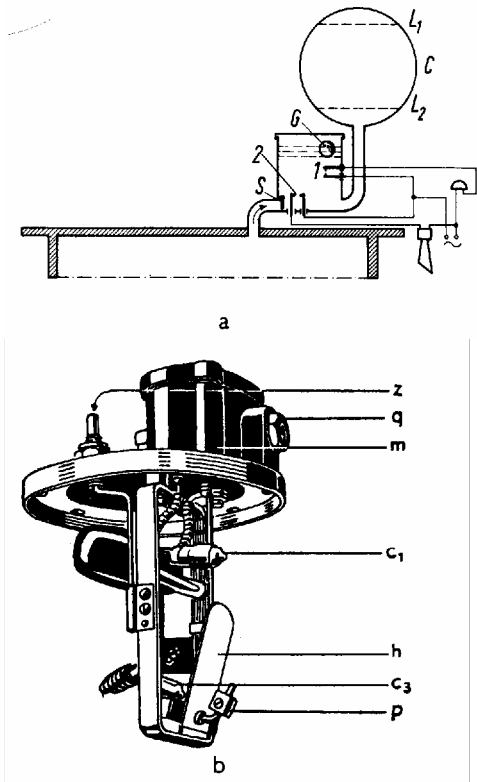


Fig. 37 - Particolare del conservatore d'olio.

- 1 - Recipiente di espansione
- 2 - Tubo di collegamento fra il coperchio del trasformatore ed il recipiente di espansione
- 3 - Sfiatatoio
- 4 - Indicatore di livello d'olio
- 5 - Valvola di sfogo (costituita da un tubo che termina con una larga flangia chiusa normalmente con un diaframma facilmente frangibile)
- 6 - Variante con essiccatore d'aria (recipiente contenente 'gel di silice che ha la proprietà di assorbire l'umidità dell'aria aspirata nei conservatore).



- C - Conservatore
- L₁- L₂ - Livello massimo e minimo dell'olio nel conservatore
- G - Galleggiante
- 1 - Contatti azionati dal galleggiante G nel caso che il livello dell'olio scenda oltre li limite di sicurezza
- 2 - Contatti azionati dalla ventola o palmola S in caso di sviluppo violento di gas.
- z - Pulsante controllo meccanico dei circuiti
- q - Pressacavo
- m - Muffola stagna contenente i morsetti
- p - Contrappeso spostabile per la regolazione della velocità di spostamento dell'olio alla quale agganciare il relè
- c₁ - Contatto unipolare a mercurio per il segnale del 1° allarme
- c₂ - Contatto unipolare a mercurio per il segnale di 2° allarme
- p - Palmola (che viene azionata dallo sviluppo violento del gas in caso di guasto grave degli avvolgimenti).

Fig. 38 - Schema di principio di relè Buchholz (a) e realizzazione pratica con contatti a bulbo di mercurio e in esecuzione ad un galleggiante e due contatti (b).

Sigle che riassumono alcuni modi di raffreddamento dei trasformatori.

Mezzo refrigerante in contatto con gli avvolgimenti		Mezzo refrigerante esterno all'involucro (Cassone) ¹	
O	N	A	N
↑	↑	↑	↑
Natura del mezzo refrigerante	Tipo di circolazione	Natura del mezzo refrigerante	Tipo di circolazione
O Olio	N Naturale	A Aria	F Forzata
A Aria	D Forzata e guidata il flusso di refrigerazione viene in parte incanalato in modo da passare attraverso gli avvolgimenti	G Gas	
W Acqua			
A Aria			

¹Solo per i trasformatori in liquido isolante