



## Accessori dei trasformatori

Lucia FROSINI

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

1

L. Frosini

## Considerazioni sui trasformatori in olio o a secco

Abbiamo visto che, al di sopra di un certo livello di potenza (decine di MVA) i trasformatori sono realizzabili solo con la tecnologia immersa in olio (o altro liquido isolante).

Per potenze di qualche MVA, c'è la possibilità di scegliere tra trasformatori in olio e trasformatori a secco (sostanzialmente in resina), con vantaggi e svantaggi a seconda dell'impiego.

A parità di potenza, i trasformatori in olio presentano un'inerzia termica superiore a quella dei trasformatori in resina, per questo motivo essi sono più adatti a sopportare sovraccarichi e carichi ciclici.

Essendo il degrado termico uno dei fattori di rischio più incisivi per la vita di un trasformatore, nel caso di trasformatori in resina soggetti a sovraccarichi e carichi ciclici è necessario sovradimensionare il sistema di raffreddamento rispetto a quello utilizzato per i trasformatori in olio, ad es. con ventilatori tangenziali sotto le colonne.

2

L. Frosini

## Considerazioni sui trasformatori in olio o a secco

È quindi possibile realizzare trasformatori con un sistema di raffreddamento AN/AF, che consente di aumentare la potenza del 40% (in figura è mostrato un trasformatore in resina con ventilatori tangenziali montati alla base).

Si osserva che i ventilatori spingono verso il trasformatore tutto ciò che l'aria contiene, ossia polvere, umidità, pollini, ragnatele, ecc.

In generale, si ricorda che ambienti con forte presenza di polvere (specie se conduttiva), forte presenza di umidità, inquinanti atmosferici, parti solide di origine naturale (foglie, polline, piume, ecc.) e rischio di esposizione a spruzzi o stillicidio sono considerati critici per installazioni anche di semplici trasformatori AN.



3

L. Frosini

## Considerazioni sui trasformatori in olio o a secco

Costruttivamente i trasformatori isolati in resina, per effetto delle maggiori distanze presenti fra conduttori e nucleo, sono generalmente caratterizzati da perdite a vuoto  $P_0$  maggiori rispetto ad un trasformatore in olio di pari potenza. Ciò si traduce in maggiori perdite anche durante il funzionamento a regime ridotto (o nullo).

Al contrario, generalmente la  $P_{cc}$  di un trasformatore in resina è minore di quella di un trasformatore in olio di pari potenza (ed è opportuno che lo sia, perché lo smaltimento del calore prodotto è assicurato solo dalla superficie delle bobine).

Talvolta il raffreddamento in olio può essere imposto per realizzare un adeguato isolamento degli avvolgimenti, qualora siano in gioco tensioni elevate (l'isolamento carta-olio ha generalmente una rigidità dielettrica maggiore di quella della resina) oppure perché la macchina è destinata ad essere installata all'aperto (es. trasformatore da palo).



4

## Considerazioni sui trasformatori in olio o a secco

A parità di potenza, il trasformatore in olio è caratterizzato da un minor peso e minori dimensioni (in particolare l'altezza) rispetto al trasformatore in resina.

Lo svantaggio del trasformatore in olio è che non può essere installato all'interno, a meno di soddisfare determinate prescrizioni previste dalla normativa anti-incendio.

Al contrario, il trasformatore in resina non può essere installato all'esterno.

Nella progettazione di cabine o locali in cui siano presenti trasformatori in resina, occorre in generale prevedere un sistema di condizionamento della temperatura interna del locale.

Per quanto riguarda applicazioni in cui vi sia largo uso di convertitori elettronici di potenza (ad es. nel fotovoltaico), occorre tener conto che la presenza di armoniche di corrente contribuisce ad aumentare le perdite a carico: riguardo questo punto, potrebbero essere preferiti i trasformatori in resina (che presentano generalmente minori  $P_{cc}$  a parità di carico) o quelli in olio, che garantiscono un migliore smaltimento del calore (di solito è preferita questa opzione).

5

## Considerazioni sui trasformatori in olio

Si ricorda che i trasformatori raffreddati tramite liquido isolante possono essere immersi, invece che in olio minerale, in uno dei seguenti liquidi:

- Liquido siliconico;
- Fluido a base di esteri vegetali;
- Fluido a base di esteri sintetici.

Tutti e tre questi liquidi presentano un punto di infiammabilità molto più alto dell'olio ( $>300^{\circ}\text{C}$ ), tuttavia richiedono l'applicazione di buona parte dei provvedimenti antincendio cogenti (es. vasca raccolta, ecc.), perlomeno in Italia.

Si osserva che attualmente quasi tutti i trasformatori raffreddati tramite liquido isolante impiegano olio minerale, in quanto i vantaggi impiantistici e ambientali che possono derivare dall'utilizzo degli altri tipi di liquido non sono tali da giustificare gli aumenti di costo, tranne che in applicazioni specifiche, come in campo navale e per piattaforme off-shore.

6

## Tipi di casse dei trasformatori in olio

Le casse dei trasformatori in olio possono essere di due tipi:

- **ermetico a riempimento integrale;**
- **normale con conservatore.**

Il primo tipo può essere utilizzato per potenze al massimo fino a 5 MVA.

Questa cassa è di tipo flessibile, in lamiera ondulata, per consentire le dilatazioni dell'olio nelle comuni fasi di riscaldamento/raffreddamento (tipicamente l'olio o altro fluido possono passare da  $-20^{\circ}\text{C}$  a  $+100^{\circ}\text{C}$ ).

Il riempimento integrale della cassa avviene tramite trattamento sottovuoto per evitare che si formino bolle d'aria all'interno. Il trasformatore risulta sigillato ermeticamente: in questo modo non vi è contatto fra olio e aria e questa condizione permette il mantenimento nel tempo delle caratteristiche chimico-fisiche dell'olio stesso.

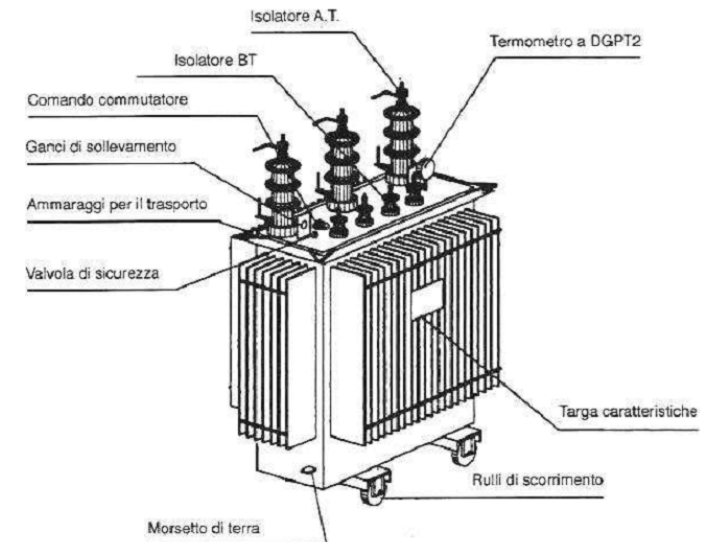
A parità di altre condizioni, il costo di un trasformatore ermetico è circa il 3% superiore rispetto a quello di un trasformatore con conservatore.

7

## Trasformatore ermetico a riempimento integrale

Principali vantaggi:

- minore manutenzione;
  - ingombro ridotto;
  - facilità di esercizio;
  - nessun rischio di contaminazione del fluido, anche in caso di ambienti molto umidi;
  - è la soluzione corretta se si vuole usare un liquido isolante a base di esteri vegetali (perché hanno scarsa resistenza alla ossidazione).
- Svantaggio: non si può eseguire il prelievo d'olio per l'analisi dei gas disciolti.



8

## Trasformatore ermetico a riempimento integrale

Un trasformatore in olio è sempre soggetto ad aumenti di pressione interna derivanti dall'espansione dell'olio stesso: la cassa di un trasformatore di questo tipo è in grado di dilatarsi e contrarsi (entro certi limiti) per limitare gli effetti degli aumenti di pressione. La sigillatura del cassone ermetico non consente che le parti attive e l'olio isolante del trasformatore entrino in contatto con l'ambiente esterno, prolungando la durata del trasformatore e riducendone la manutenzione.

Questi trasformatori sono dotati di un relè detto **DGT2** (Detector of Gas, Pressure, Temperature 2 thresholds) o **RIS** (Rilevatore Integrato di Sicurezza) che permette di segnalare guasti dovuti alla presenza di gas (prodotti da scariche in olio), a un eccesso di pressione o a un eccesso di temperatura (in questo caso con due soglie).

È inoltre presente la **valvola anti-scoppio** che garantisce l'integrità meccanica della cassa in caso di sovrappressioni interne.



9

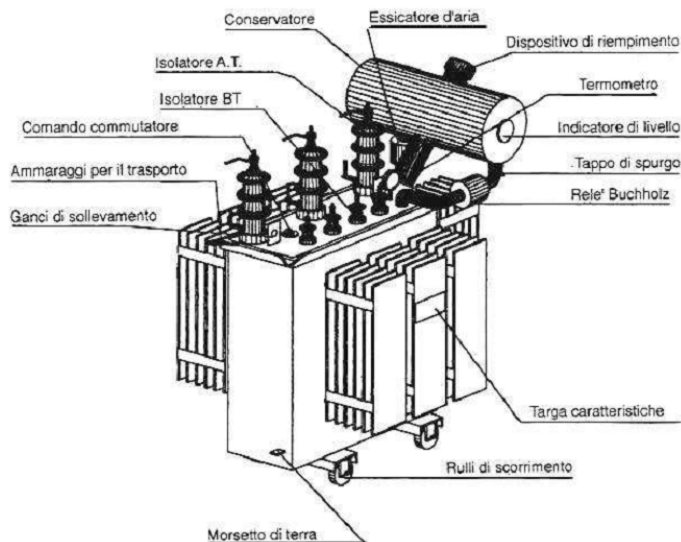
## Trasformatore con conservatore dell'olio

Per potenze superiori a 5 MVA, i trasformatori necessitano di una cassa con radiatori in lamiera stampata e laminata a freddo, che non è in grado di dilatarsi e contrarsi (è possibile scegliere questa soluzione anche per potenze inferiori). Per questo, è necessario dotare il trasformatore di un conservatore, che funge da vano di espansione per l'olio quando gli avvolgimenti si surriscaldano e che solitamente è dotato di:

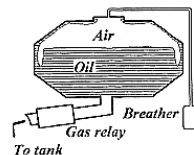
- dispositivo per il riempimento;
- indicatore di livello;
- termometro, che misura la temperatura degli strati superiori dell'olio;
- **essiccatore d'aria a sali**: ha la funzione di assorbire l'umidità dell'aria che viene necessariamente inspirata dal conservatore durante la contrazione termica del liquido isolante, in modo che esclusivamente aria deumidificata entri in contatto con l'olio;
- **relè Buchholz**, che serve a segnalare eventuali formazioni di gas dovute a scariche elettriche all'interno del trasformatore.

10

## Trasformatore con conservatore dell'olio



Oltre all'essiccatore d'aria, quando è necessario garantire una separazione permanente tra olio e aria (in ambienti fortemente inquinati o umidi) è possibile inserire una apposita membrana nel conservatore (camera stagna in gomma nel conservatore):



11

## Conservatore dell'olio

Il conservatore dell'olio è un contenitore di forma cilindrica collegato al cassone del trasformatore tramite una o più tubazioni e parzialmente riempito di olio. Esso ha la funzione di polmone di dilatazione per l'olio che nel trasformatore subisce variazioni di volume a causa delle variazioni di temperatura; in questo modo la cassa del trasformatore è sempre perfettamente riempita d'olio.

Per garantire l'isolamento e il raffreddamento del trasformatore occorre che:

- gli avvolgimenti e il nucleo siano immersi in olio;
- l'olio sia nelle condizioni chimico-fisiche ottimali.

Sappiamo che la buona rigidità dielettrica dell'olio minerale (~15 kV/mm) si riduce se in esso sono presenti umidità o altri inquinanti, che possono derivare dal contatto dell'olio con l'aria esterna. Per questo motivo, la parte superiore interna del conservatore è in contatto con l'aria esterna non direttamente, ma tramite un apposito contenitore di sali igroscopici (**essiccatore d'aria a sali**).

12

## Conservatore dell'olio

Questi sali, quando hanno esaurito la loro funzione, da blu diventano rosa (o comunque cambiano colore) e vanno sostituiti o rigenerati tramite riscaldamento.

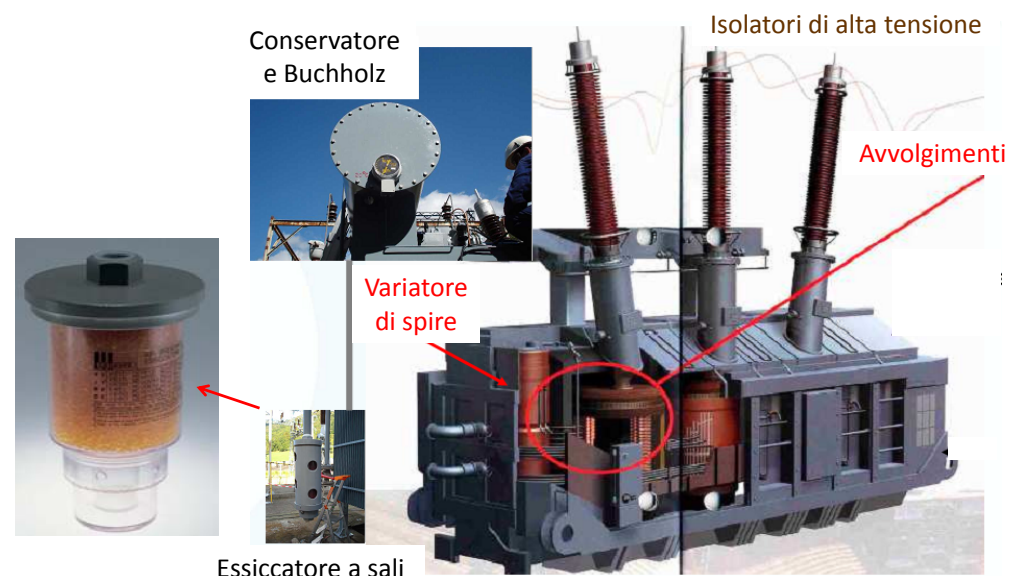
Sul conservatore è posto un indicatore di livello dell'olio correlato con la temperatura: controllare periodicamente il livello dell'olio, corretto con la sua temperatura, e lo stato dei sali igroscopici è fondamentale per il mantenimento delle condizioni ottimali di funzionamento del trasformatore.

In molti casi il conservatore è posto direttamente sopra al cassone, ma, per i trasformatori di potenza elevata, la tendenza attuale è di posizionare il conservatore in posizione sopraelevata, fuori dalla sagoma del cassone, per evitare che, in caso di rottura o perdite, l'olio vada sul trasformatore. La perpendicolare del conservatore deve comunque ricadere nel perimetro della vasca di raccolta olio.



13

## Accessori dei trasformatori



14

## Accessori dei trasformatori

Per particolari applicazioni, in alternativa all'essiccatore a sali tradizionali, da alcuni anni è possibile installare un nuovo accessorio munito di sensori e scaldiglia interna e gestito da un microprocessore.

I sensori all'interno del dispositivo sono in grado di rilevare quando i sali sono troppo umidi ed azionano la scaldiglia in modo da effettuare l'essiccazione dei sali stessi senza doverli sostituire.

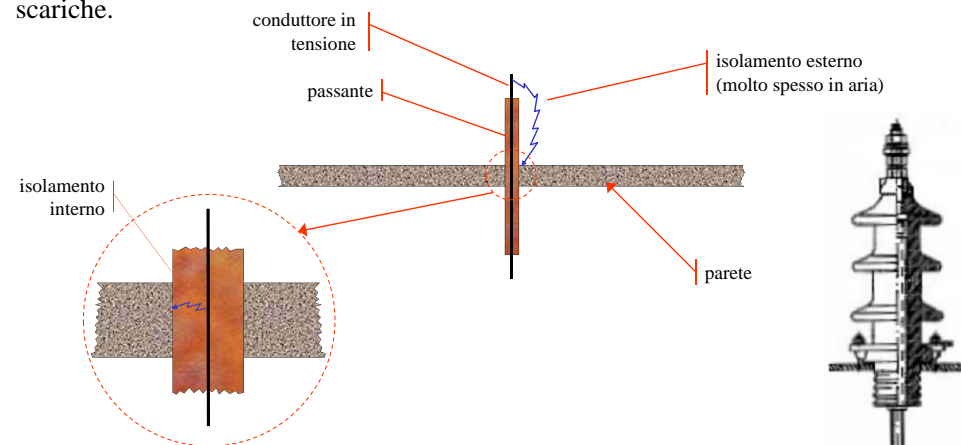
Il costo di questo dispositivo è però attualmente pari a 10÷15 volte quello dell'essiccatore tradizionale e inoltre esso per funzionare richiede un'alimentazione ausiliaria in BT.



15

## Isolatori passanti (*bushing or insulator*)

Gli isolatori passanti sono apparecchiature che permettono a un conduttore in tensione di attraversare una parete, generalmente a potenziale di terra, per mettere in comunicazione due ambienti, spesso diversi (es. aria-olio), senza che avvengano scariche.



16



## Isolatori passanti

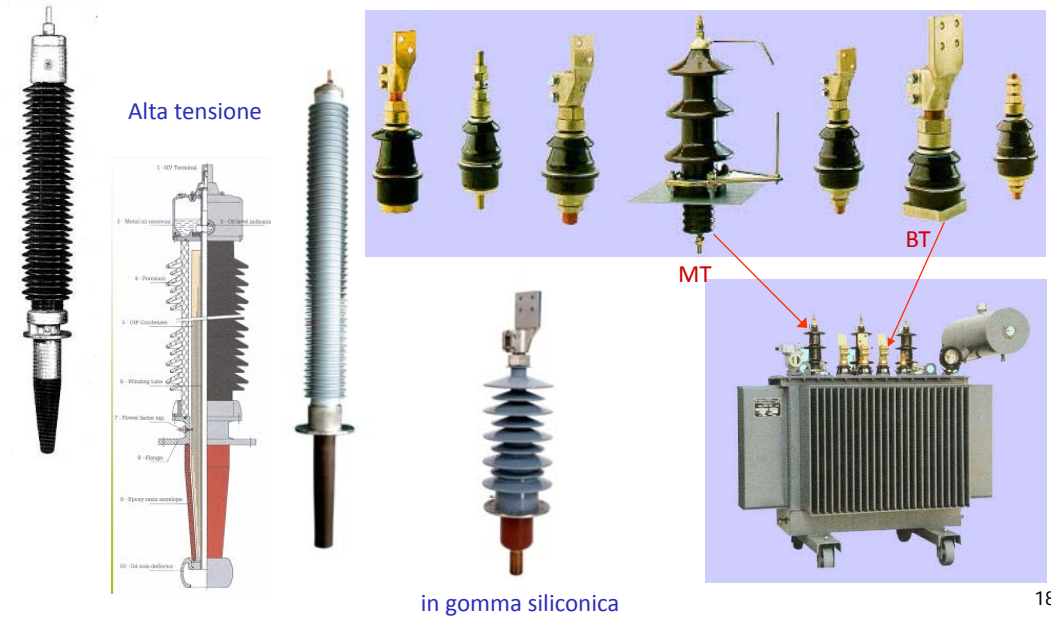
Nei trasformatori, la funzione degli isolatori passanti è quella di consentire la fuoriuscita dal cassone dei conduttori degli avvolgimenti senza contatto con il cassone, garantendo nel contempo la sua tenuta idraulica per contenere l'olio minerale isolante.

Essi sono posti normalmente sulla parte superiore del trasformatore e sono di diverse tipologie a seconda delle tensioni e delle correnti in gioco e del tipo di conduttore esterno a cui devono essere collegati. Se il conduttore esterno è in aria, la tensione è fino a 45 kV e la corrente fino a 10 kA, l'isolatore passante è generalmente costituito da un manicotto in porcellana convenientemente sagomato. In questo caso si parla di **isolatore olio-aria** e la parte in olio (dentro il cassone) è più corta di quella in aria, perché la rigidità dielettrica dell'olio è superiore a quella dell'aria.

Si noti che negli ultimi anni gli isolatori in porcellana sono sempre più spesso sostituiti da quelli polimerici, che sono più leggeri e meno fragili (quindi più semplici e meno costosi da trasportare ed installare); tra i vantaggi della porcellana vi è la capacità di resistere a roditori, termiti, ecc. e di essere un materiale naturale e riciclabile.

17

## Esempi di isolatori passanti olio-aria

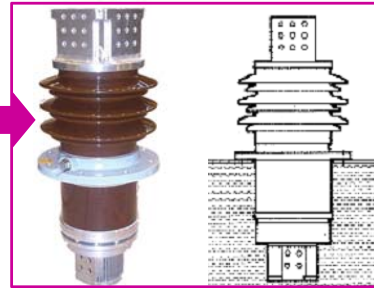
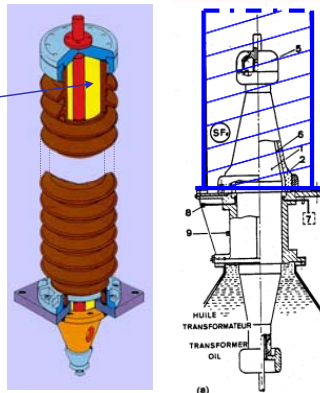


18

## Isolatori per elevate correnti o elevate tensioni

Per **correnti elevate** (fino a 30 kA), si utilizzano isolatori **olio-aria** con un conduttore centrale di elevato diametro, in cui la corrente scorre maggiormente vicino alla superficie (per l'effetto pelle): in questo modo è facilitata la conduzione e lo smaltimento del calore.

Per **tensioni molto elevate** si impiegano isolatori **olio-olio**, **olio-SF6** o **a condensatore**.



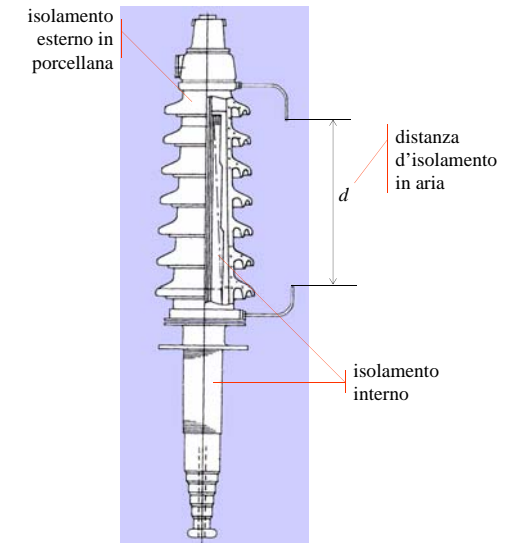
Olio-SF6 o olio-olio

19

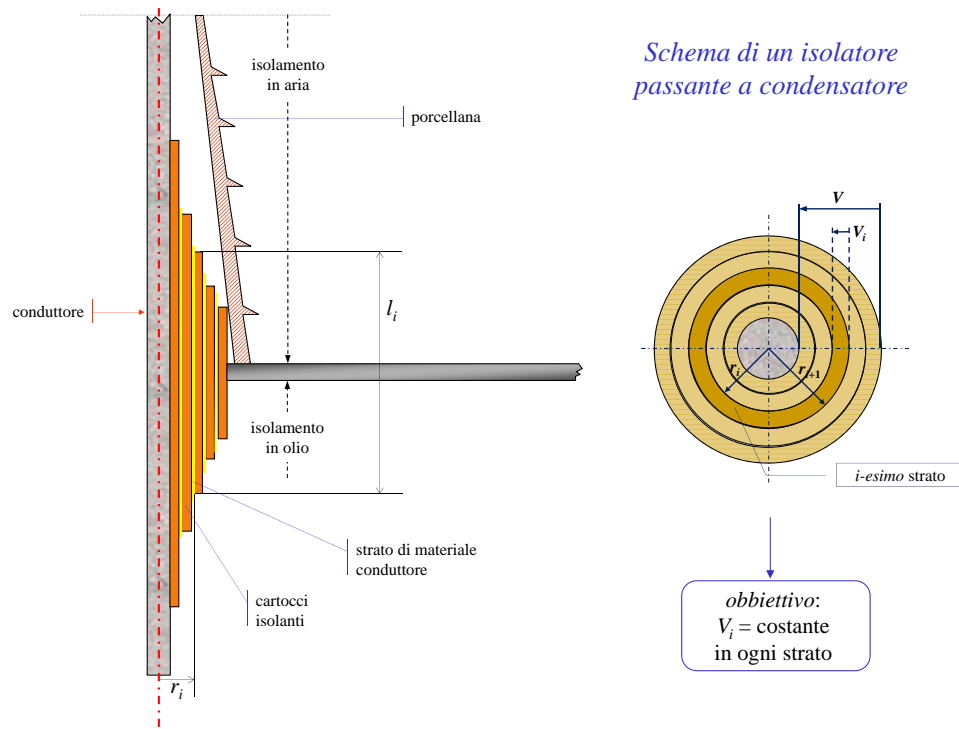
## Isolatori passanti a condensatore

In un **isolatore passante a condensatore** il conduttore centrale è avvolto con strati di carta isolante alternati con strati di materiale conduttore: in questo modo la tensione tra il conduttore interno e l'esterno dell'isolatore si ripartisce in maniera uniforme nei diversi strati.

Questi isolatori sono adatti per tensioni da 25 a 52 kV o superiori.



20



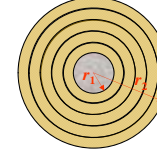
21

(dalle dispense del prof. Degli Esposti)

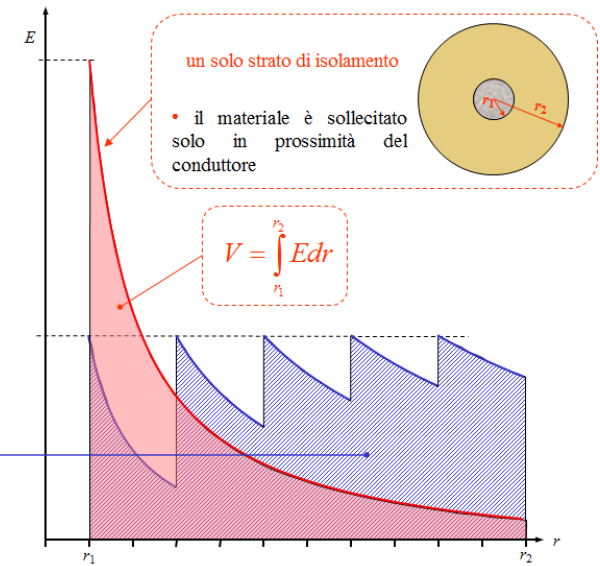
## Isolatori passanti a condensatore

Senza dimostrazioni, i vantaggi che si ottengono da un isolatore passante a condensatore rispetto a quello a un solo strato di isolamento sono:

isolamento formato da  $N$  strati



- il materiale è sollecitato in maniera più uniforme
- la sollecitazione massima (campo elettrico  $E$ ) è minore
- a parità di dimensioni è possibile applicare una tensione maggiore



22

L. Frosini

## Relè Buchholz



1° soglia: debole sviluppo di gas  
 2° soglia: forte sviluppo di gas

23

L. Frosini

## Relè Buchholz

Il relè Buchholz, presente in tutti i trasformatori con conservatore dell'olio, è costituito da un recipiente posto, tramite due flange, sulla tubazione di collegamento tra il cassone del trasformatore e il conservatore dell'olio.

La sua funzione è segnalare l'eventuale sviluppo di gas nell'olio del trasformatore, dovuto a surriscaldamenti per sovraccarico o per scariche elettriche all'interno dell'olio del cassone.

Questo recipiente è, in condizioni normali, sempre pieno di olio e contiene al suo interno due galleggianti azionanti ognuno un contatto elettrico.

Se all'interno del trasformatore si sviluppa del gas, questo si porta nella parte più alta del cassone e da qui nel tubo di collegamento al conservatore, dove viene catturato dal relè Buchholz, che, riempiendosi di gas nella parte alta, fa intervenire i galleggianti: il primo darà un allarme e il secondo uno scatto.

24

## Relè Buchholz

I due galleggianti sono posizionati in modo da intervenire sia per piccole quantità di gas che si sviluppano lentamente nel tempo (sovraccarico), sia per violenti e rapidi spostamenti di gas e di olio dovuti a scariche elettriche nell'olio per guasti interni.

**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.

25

## Relè Buchholz

**Guasto grave:** Un anomalo flusso d'olio tra il cassone e 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**.



26

## Analisi dei gas disciolti (*dissolved gas analysis*)

Tramite l'analisi dei gas disciolti (DGA), procedura ben consolidata da decenni e normalmente attuata con cadenza annuale, è possibile determinare il tipo e la quantità dei gas generati dalla degradazione sia dell'olio che della cellulosa, perché l'olio è a stretto contatto con la carta e ne assorbe quindi ogni prodotto.

I GAS CHIAVE E LE ANOMALIE RILEVABILI		
H <sub>2</sub> IDROGENO	SOVRARISCALDAMENTO	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> ETILENE
CH <sub>4</sub> METANO	SCARICHE AD ELEVATA ENERGIA	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> ETANO
CO MONOSSIDO DI CARBONIO	SCARICHE PARZIALI	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> ACETILENE
CO <sub>2</sub> BISSIDO DI CARBONIO	DEGRADAZIONE DELLA GELLULOSA	
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> + C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> PROPANO + PROPYLENE		

EFFETTO CORONA SCARICHE PARZIALI		
	GAS PREDOMINANTE	ALTRI GAS
OLIO	H <sub>2</sub>	
GELLULOSA	H <sub>2</sub> - CO - CO <sub>2</sub>	
SOVRARISCALDAMENTO		
	GAS PREDOMINANTE	ALTRI GAS
OLIO		
BASSA TEMPERATURA	CH <sub>4</sub> - C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	
ALTA TEMPERATURA	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> - H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub> - C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>
GELLULOSA		
	GAS PREDOMINANTE	ALTRI GAS
BASSA TEMPERATURA	CO <sub>2</sub>	CO
ALTA TEMPERATURA	CO	CO <sub>2</sub>
ARCO ELETTRICO - SCARICHE DI ALTA DENSITA' DI ENERGIA		
	GAS PREDOMINANTE	ALTRI GAS
	H <sub>2</sub> - C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub> - C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> - C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>

Questo è un vantaggio per i trasformatori in olio, perché è un metodo relativamente semplice e poco costoso, che permette di eseguire una diagnostica delle condizioni del trasformatore stesso.

27

## Strumenti per la regolazione della tensione

Spesso i trasformatori di elevata potenza hanno incorporati strumenti che permettono di modificare (entro un certo range) il loro rapporto di trasformazione per gradini fissi (es. 1,5% o 2,5% della tensione nominale), aggiungendo o rimuovendo alcune spire.

Questi strumenti sono detti in generale commutatori di prese e in particolare:

■ **Commutatore fuori tensione** ("off-circuit tap-changer"): per variare il rapporto di trasformazione sul lato alta tensione a trasformatore fuori tensione.



28



## Commutatore fuori tensione

I trasformatori di distribuzione MT/BT sono normalmente equipaggiati con un commutatore fuori tensione a 5 posizioni (ad es.  $\pm 2 \times 2,5\%$ ) sul lato di alta tensione, con il comando manuale posizionato sul coperchio.

Se necessario, il comando della commutazione può essere rimandato a lato cassa invece che sul coperchio, con attivazione manuale o motorizzata.

Quando si cambia posizione, il trasformatore deve essere fuori tensione.

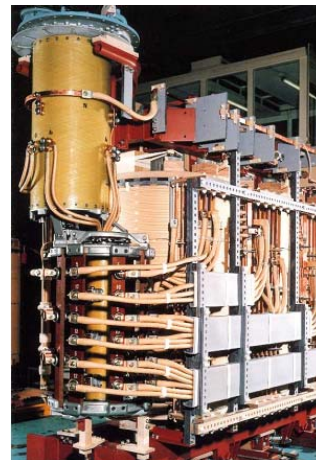
La posizione del commutatore che corrisponde al rapporto  $N_1/N_2$  più alto fornisce la tensione più bassa sul lato di bassa tensione ( $V_2$ ), mentre la posizione del commutatore che corrisponde al rapporto  $N_1/N_2$  più basso produce la tensione più alta sul lato di bassa tensione (perché il rapporto spire è pari al rapporto tra le tensioni e  $V_1$  rimane costante).

Naturalmente, il numero di spire totali sul lato di alta tensione ( $N_1$ ) sarà superiore al numero di spire utilizzate nel funzionamento a rapporto spire nominali.

29

## Commutatore sotto carico

■ **Commutatore (o variatore) sotto carico** (C.S.C. o V.S.C.), in inglese “on-load tap-changer”: per variare il rapporto di trasformazione sul lato alta tensione con trasformatore in servizio.



30

## Commutatore sotto carico

Lo scopo principale del commutatore sotto carico è quello di variare il numero di spire del primario ( $N_1$ ) al fine di mantenere costante la tensione al secondario  $V_2$  al variare della corrente erogata dal trasformatore.

Se infatti abbiamo un carico ohmico-induttivo, la  $V_2$  si abbassa rispetto alla  $V_{20}$  (o  $V_{2n}$ ). Bisognerebbe aumentare  $V_1$  per far sì che aumenti anche  $V_2$ , ma poiché  $V_1$  è fissata dalla rete di alimentazione, si interviene diminuendo  $N_1$ :

$$\uparrow \left( \frac{V_{1n}}{N_1 \downarrow} \right) = \left( \frac{V_2 \uparrow}{N_2} \right) \uparrow$$

Al contrario, se si avesse un carico ohmico-capacitivo, la  $V_2$  si alzerebbe rispetto alla  $V_{20}$  (o  $V_{2n}$ ) e quindi occorrerebbe aumentare  $N_1$ , in modo che il rapporto  $V_{1n}/N_1$  diminuisca e, in conseguenza, diminuisca anche la  $V_2$ :

$$\downarrow \left( \frac{V_{1n}}{N_1 \uparrow} \right) = \left( \frac{V_2 \downarrow}{N_2} \right) \downarrow$$

31

## Commutatore sotto carico

Col commutatore sotto carico si compensano anche le variazioni dovute alle cadute di tensione interne negli avvolgimenti.

I commutatori sotto carico possono essere realizzati con sistemi diversi, ma tutti agiscono variando il numero di spire dell'avvolgimento di alta tensione, dove la corrente da commutare è minore. Il problema consiste nel non interrompere il carico e non cortocircuitare parte dell'avvolgimento: per ovviare a tali inconvenienti, all'atto della commutazione viene interposta una resistenza di smorzamento, che limita la corrente circolante nel tratto di avvolgimento interessato.

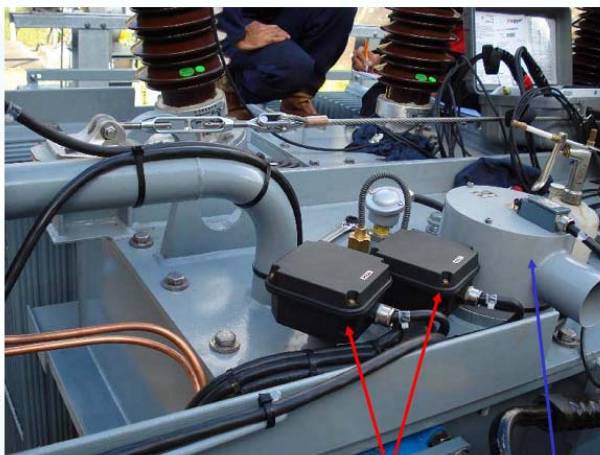
Il commutatore sotto carico è attivato da un'unità motore: un regolatore di tensione automatico (A.V.R., *Automatic Voltage Regulator*) viene impiegato per registrare le variazioni di tensione ed attivare il comando motore.

Quando due trasformatori sono connessi in parallelo, i loro commutatori devono agire in concomitanza (uno deve essere connesso come master e l'altro come slave).

32



## Altri accessori



Sonde di temperatura Valvola anti-scoppio



Indicatore di temperatura

33

## Sonde di temperatura

La tecnica più semplice consiste nel distribuire un determinato numero di sensori in punti strategici per la determinazione delle temperature del fluido isolante, mediante sensori esterni alla macchina e sensori posti all'interno sul pacco magnetico ed eventualmente sugli avvolgimenti, il cui posizionamento è determinato in fase di progettazione della macchina.

Noti i valori delle temperature, misurati nei diversi punti, viene attivato il sistema di monitoraggio per il confronto con le diverse soglie di intervento.



N.B.: questi sensori sono utilizzati anche per il rilevamento delle temperature degli avvolgimenti e del nucleo dei trasformatori a secco.



34

## Livello olio conservatore

La misura della quantità dell'olio contenuta nel conservatore viene effettuata tramite un apposito misuratore di livello con indicatore visivo posto all'esterno del conservatore.

Valori di livello troppo bassi sono indicativi delle perdite di olio dal cassone del trasformatore e diventano pericolosi quando il livello scende sotto al valore di sicurezza indicato dal costruttore.

Poiché la densità dell'olio varia da freddo a caldo, la lettura visiva del livello va corretta con la temperatura per ottenere una misura valida (d'inverno il livello dell'olio scende a causa della temperatura esterna, ma questa diminuzione non è rappresentativa di un guasto).

Questa correzione è fatta con l'aiuto di curve fornite dal costruttore che tengono conto anche del diametro interno del conservatore.

35

## Valvola anti-scoppio

Il verificarsi di un corto circuito o di un guasto verso massa in un trasformatore ad olio è sempre accompagnato dalla produzione di vapori d'olio e di gas prodotti dalla carbonizzazione dell'isolamento degli avvolgimenti.

Questi gas, se sviluppati in grande quantità, possono provocare delle sovrappressioni interne al cassone del trasformatore tali da danneggiarne l'intera struttura.

Per evitare ciò, si provvede a collegare sul coperchio del trasformatore una tubazione di grosso diametro nel cui interno è disposta, tra due flange, una membrana costituita da vetro o lamierino sottile che, in presenza di una sovrappressione, si rompe, scaricando l'olio.



36

## Collegamento a zig zag

Oltre ai collegamenti a stella e a triangolo, gli avvolgimenti di un trasformatore possono essere costruiti in modo da realizzare il cosiddetto **collegamento a zig-zag**.

Questo collegamento è ottenuto dividendo in due parti ciascuna fase dell'avvolgimento (generalmente il secondario) e collegando tra loro in serie discorde due mezzi avvolgimenti posti su colonne contigue (la 1° con la 2°, la 2° con la 3°, la 3° con la 1°). Facendo riferimento al secondario, si avranno due avvolgimenti secondari distinti sulla 1° colonna, due sulla 2° e due sulla 3°.

Si potranno così realizzare collegamenti le cui tensioni di fase sono date dalle somme vettoriali delle due f.e.m. corrispondenti ai singoli mezzi avvolgimenti di ogni colonna.

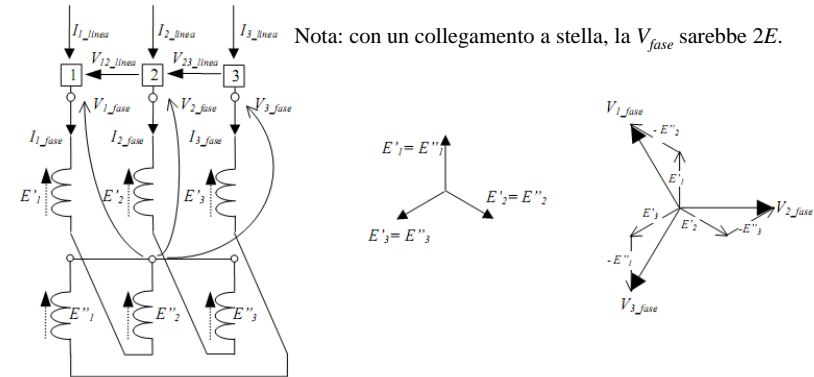
Il collegamento a zig-zag è utilizzato (anche se non frequentemente) per ottenere un secondario a 4 fili che reagisca bene ai carichi squilibrati e che elimini la terza armonica dalle tensioni di fase (ad es. per l'alimentazione di convertitori di potenza).

37

## Collegamento a zig zag

Ciascuna fase risulta costituita da due semi-bobine disposte su colonne diverse e collegate in senso opposto. Detta  $E$  la f.e.m. indotta in una semibobina (valore efficace), la tensione di fase può essere ricostruita secondo il seguente diagramma: C

$$V_{fase} = \frac{\sqrt{3}}{2} E + \frac{\sqrt{3}}{2} E = \sqrt{3} E \quad (\text{valore efficace})$$

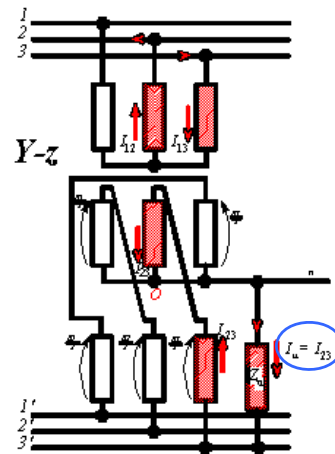


38

## Collegamento a zig zag

Nel caso di carico squilibrato (ad es. per la presenza di un carico monofase come in figura), la corrente di carico  $I_{23}$  dà luogo alle f.m.m. sulla seconda e terza colonna controbilanciate sul primario dalle f.m.m.  $N_1 I_{12}$  e  $N_1 I_{13}$ , in cui le correnti di reazione  $I_{12}$  e  $I_{13}$  sono identiche. Il bilanciamento delle f.m.m. sulle singole colonne garantisce la regolarità di funzionamento con carichi squilibrati (lo squilibrio c'è, ma è ridotto rispetto a un'analogha condizione di carico con collegamento secondario a stella).

Il trasformatore zig zag è utilizzato anche per eliminare gli effetti della componente di corrente magnetizzante DC che può essere introdotta dagli angoli di innesco dei dispositivi elettronici nei convertitori di potenza, grazie al verso opposto di questa componente circolante nelle semi-bobine avvolte sulla stessa colonna.



39

## Collegamento a zig zag

I vantaggi offerti dal collegamento a zig-zag sono quindi:

- ottenere un circuito secondario a 4 fili i cui squilibri di carico si fanno risentire poco sul circuito primario;
- le tensioni di fase sono sempre prive di armoniche dispari, anche quando i flussi sono distorti, perché esse risultano dalla somma vettoriale di due tensioni a 120° agenti in discordanza;
- di conseguenza, sul filo di neutro non circoleranno armoniche dispari di corrente.

Gli svantaggi del collegamento zig-zag sono:

- il trasformatore, a parità di dimensioni, eroga una potenza minore, perché la sua effettiva tensione di fase è  $\sqrt{3}/2 = 0,87$  volte la tensione di fase che avrebbe lo stesso trasformatore con gli avvolgimenti collegati a stella;
- la costruzione è più complicata.

40