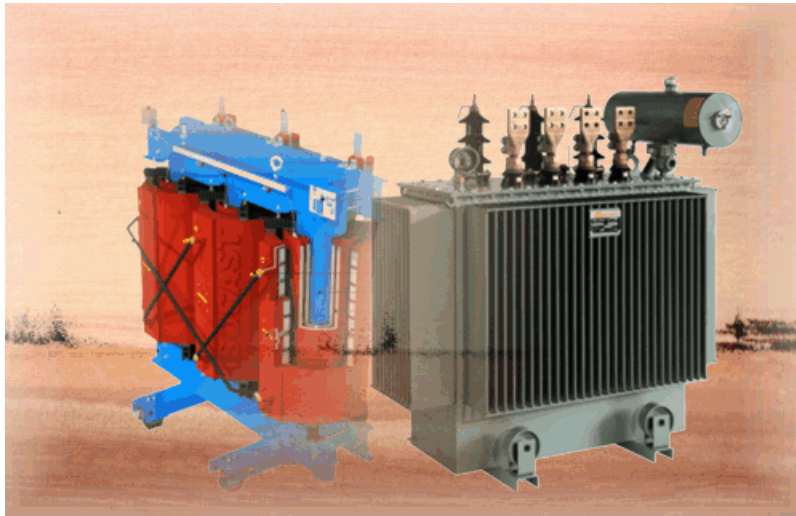


Zeno Martini (admin)

TRASFORMATORI DI DISTRIBUZIONE MT/BT - PRIMA PARTE

1 August 2009

Trasformatori a secco ed in olio



I trasformatori per distribuzione MT/BT sono di due tipi: in olio ed a secco.

I **trasformatori in olio** (Norme CEI 14-4) sono all'interno di un cassone metallico che contiene l'olio minerale, il quale svolge una duplice funzione:

- di isolamento, tra gli avvolgimenti e verso massa;
- di smaltimento del calore prodotto nel rame per effetto Joule e nel ferro per isteresi e correnti parassite.

Sono spesso dotati del **conservatore d'olio**, un recipiente cilindrico sopraelevato con capacità di circa un decimo di quella del cassone, per consentire l'espansione del liquido al crescere della temperatura. Un filtro con cristalli di **silica-gel** consente la comunicazione del conservatore con l'aria esterna, impedendo che l'umidità possa compromettere la rigidità dielettrica dell'olio. E' però necessaria una periodica sostituzione del filtro.

Una soluzione alternativa, è quella di sigillare il cassone, inserendo, nella parte superiore, un cuscino d'aria secca o di azoto che consente le dilatazioni del liquido senza sollecitare il cassone.

I **trasformatori a secco** (Norme **CEI 14-8 e 14-4**) possono essere in aria, oppure avere gli avvolgimenti inglobati in resina. Non richiedono in pratica manutenzione, e sono senz'altro da preferire negli ambienti in cui è elevato il rischio di incendio.

I trasformatori in olio raggiungono potenze più elevate, ma sono più ingombranti, e richiedono costi di installazione e di manutenzione maggiori.

I **trasformatori in resina** si stanno sempre più affermando, per la loro affidabilità e per la riduzione dell'impatto ambientale. Si costruiscono fino a tensioni di 36 kV per potenze di 30 MVA.

I **trasformatori in aria** sono più sensibili alle condizioni ambientali (umidità, sporcizia, inquinamento da sostanze chimiche), quindi più delicati di quelli in resina. In genere la tensione è limitata a 20 kV.

Spesso gli avvolgimenti in media tensione dei trasformatori in resina sono realizzati con nastri in alluminio, che hanno un coefficiente di dilatazione termica simile a quello della resina in cui sono inglobati. Gli avvolgimenti in bassa tensione sono realizzati in fogli di alluminio alti come la bobina.

I trasformatori in olio raggiungono in pochi minuti la temperatura di regime per la veloce circolazione dell'olio; quelli a secco impiegano un tempo molto maggiore, circa un'ora e mezza, quindi possono sopportare un sovraccarico maggiore. Con opportuni ventilatori assiali i costruttori assicurano anche un sovraccarico pari ad una volta e mezza la potenza nominale, anche in modo permanente.

La densità di corrente degli avvolgimenti in olio è maggiore di quella ammissibile nei trasformatori a secco. Le distanze tra avvolgimenti e nucleo sono inferiori nei trasformatori in olio per l'elevata rigidità dielettrica dell'olio.

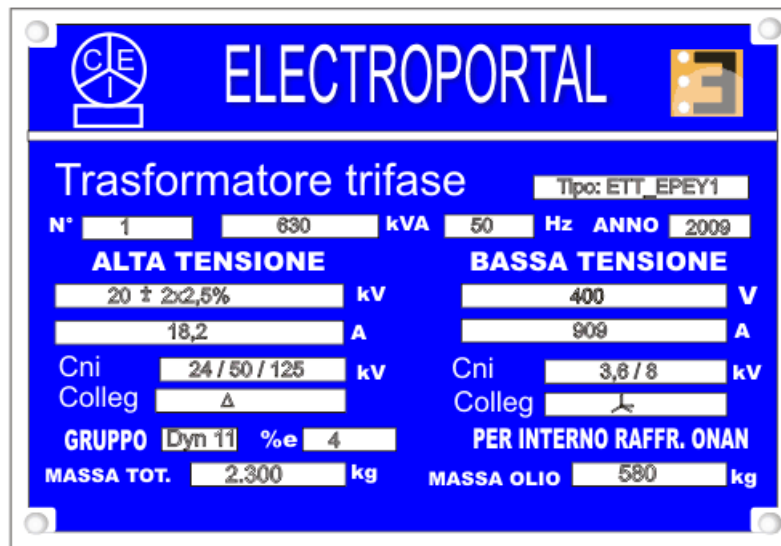
Anche la sezione del nucleo dei trasformatori in olio è inferiore. Le conseguenze di tali particolarità costruttive si ripercuotono sulle perdite nel ferro e nei conduttori: i trasformatori in olio hanno, in condizioni di funzionamento nominale perdite inferiori a vuoto ma perdite a carico superiori.

L'installazione dei trasformatori in olio è più critica perché sono richiesti provvedimenti atti ad evitare lo spargimento di olio e la propagazione di un incendio. Ogni trasformatore con più di 500 kg di olio deve avere un adeguato pozzetto di raccolta e, per trasformatori di potenza superiore ai 1000 kVA è richiesta la segregazione con pareti di separazione di adeguato REI.

Anche la manutenzione, nonché lo smaltimento a fine attività sono più critici per i trasformatori in olio.

I trasformatori sono classificati in base al tipo di raffreddamento. Per i trasformatori in olio i fluidi refrigeranti sono due: l'olio interno a contatto con gli avvolgimenti ed il fluido esterno all'involucro. La circolazione dei fluidi può essere naturale o forzata. Per i trasformatori in resina il refrigerante è solo il fluido esterno. Per la simbologia usata si veda [questa risposta](#)

La targa



targa di un trasformatore in olio

Il costruttore fissa alla macchina una targa metallica con le principali grandezze nominali:

- potenza (kVA);
- tensione primaria (kV);
- tensione secondaria (V);
- corrente primaria;
- corrente secondaria;
- tensione di cortocircuito (%);
- Collegamenti degli avvolgimenti e gruppo di appartenenza;
- tipo di raffreddamento;
- massa totale e di olio (kg)

La targa di esempio riporta, nel riquadro **cni**, le tensioni massime per i componenti (apparecchiature) del sistema, rispettivamente 24 e 3,6 kV. Accanto a queste è indicato il livello d'isolamento: per il primario la tenuta alla tensione di prova a

frequenza industriale, 50kV, ed ad impulso atmosferico, 125 kV e per il secondario la sola tenuta alla tensione di prova a frequenza industriale, 8 kV.

Le caratteristiche degli isolatori passanti sono elencate in EN50180

Tensioni nominali e rapporto di trasformazione

La tensione nominale primaria deve corrispondere alla tensione della rete in media tensione, cui il trasformatore sarà collegato.

La tensione nominale secondaria è quella che si ha a vuoto, quando il primario è alimentato alla tensione nominale.

La tensione in media tensione, può variare rispetto al valore nominale. E' allora in genere previsto un commutatore che consente di escludere od inserire parte dell'avvolgimento primario, per abbassare od innalzare il rapporto di trasformazione che, ricordiamo, è legato al rapporto spire, al fine di ottenere a vuoto la tensione nominale secondaria. Nel caso della targa di figura, il commutatore ha 5 posizioni che consentono di adattarsi ad una tensione primaria compresa tra 21 e 19 kV con gradini di 500 V.

Il rapporto tra la tensione primaria nominale e la secondaria a vuoto è, per definizione, il rapporto di trasformazione nominale.

$$K_T = \frac{U_{1,r}}{U_{20}}$$

Il rapporto di trasformazione effettivo dipenderà dalla posizione del commutatore che, nella posizione centrale, corrisponderà al rapporto nominale. Nel caso della targa di figura il rapporto nominale vale 50 e quello reale può essere 52,5; 51,25; 50; 48,75; 47,5.

Tensione di cortocircuito

La tensione di cortocircuito, generalmente espressa in percentuale della tensione nominale, è il valore della tensione da applicare al primario affinché nel secondario, chiuso in cortocircuito, circoli la corrente nominale. O viceversa: da applicare al secondario affinché nel primario chiuso in corto circuiti la corrente nominale. Quindi:

$$u_{cc}\% = 100 \cdot \frac{U_{cc}}{U_r}$$

Nella targa di figura è indicata nel riquadro **e%**.

La corrente nominale di un trasformatore trifase è data da

$$I_r = \frac{S_r}{\sqrt{3} \cdot U_r}$$

dove S_r è la potenza nominale del trasformatore espressa in voltampere (VA) ed U_r la tensione nominale.

Nota la tensione di cortocircuito, si può calcolare la corrente di cortocircuito a piena tensione con

$$I_{cc} = \frac{100}{u_{cc}\%} \cdot I_r$$

E' evidente allora che, minore è la $u_{cc}\%$, maggiore è la I_{cc} .

Fino alla potenza di $S_r = 630 \text{ kVA}$ generalmente è $u_{cc}\% = 4\%$;

per $630 \leq S_r < 2500 \text{ kVA}$, si ha $u_{cc} = 6\%$;

per trasformatori di maggiore potenza, $u_{cc} = 8\%$.

Una I_{cc} minore limita i danni di un corto e consente di utilizzare apparecchiature elettriche con minore potere di interruzione, quindi meno costose.

La scelta è comunque sempre una decisione del progettista dell'impianto, il quale deve conciliare due esigenze opposte: la corrente di cortocircuito massima deve essere la più piccola possibile per l'impatto sui costi che essa ha, ma la corrente di cortocircuito minima deve essere la più alta possibile per limitare le cadute di tensione e la deformazione della tensione prodotta da apparecchiature che generano armoniche di corrente.

I gruppi dei trasformatori

A seconda dei collegamenti delle fasi primarie e secondarie, che possono essere a stella (**Y**), a triangolo (**D**) ed a zig-zag (**Z**) le tensioni secondarie risultano sfasate di un angolo multiplo di 30° in ritardo rispetto alle primarie; il multiplo definisce il gruppo di appartenenza del trasformatore. Ad esempio per il gruppo 5 le tensioni secondarie sono sfasate di 150° rispetto alle primarie.

I collegamenti a stella ed a triangolo si possono effettuare sia con tre trasformatori monofasi indipendenti, sia in trasformatori trifase propriamente detti, a nucleo unico, corazzato o a tre colonne complanari (quest'ultimo è il più comune).

Il collegamento a zig-zag, è effettuato invece solo nei trasformatori a nucleo unico. Ogni avvolgimento è in tal caso costituito da due semiavvolgimenti posti su colonne

diverse e collegati in serie in modo da dar luogo nelle colonne a flussi opposti. La tensione è perciò la differenza delle tensione dei due semiavvolgimenti.

[Qui](#) c'è una tabella sui collegamenti.

Nei riferimenti un link con una lezione dettagliata.

Il gruppo adatto per distribuzione

La principale caratteristica che devono possedere i trasformatori di distribuzione MT/BT è di poter comportarsi bene, oltre che con i carichi trifase equilibrati, anche carichi monofase tra fase e neutro, che sono carichi fortemente squilibrati.

Secondo la terminologia relativa alle componenti di sequenza, si dice che il trasformatore deve avere una bassa impedenza ha un'elevata impedenza alla sequenza omopolare, in quanto i carichi fortemente squilibrati assorbono una elevata corrente di sequenza zero (omopolare)

Possiedono tale caratteristica i trasformatori di distribuzione MT/BT che hanno il primario a triangolo ed il secondario a stella con neutro: quindi **DYn** che sono pertanto quelli largamente più usati.

La corrente secondaria, derivata tra fase e neutro, richiama, nel corrispondente avvolgimento primario, una corrente che può richiudersi attraverso i conduttori di linea, cui ogni avvolgimento è direttamente collegato, senza interessare gli avvolgimenti delle altre due fasi. Ogni colonna del trasformatore si comporta perciò come un trasformatore monofase indipendente.

In un trasformatore **Yyn** invece, la corrente primaria della fase carica deve necessariamente richiudersi attraverso gli avvolgimenti primari delle altre due fasi. Le correnti in tali avvolgimenti agiscono come correnti magnetizzanti, non essendo equilibrate da una corrente secondaria corrispondente. Ciò comporta uno squilibrio nei flussi di colonna e di conseguenza nelle tensioni di fase.

Tra l'altro, l'elevata impedenza alla sequenza omopolare del trasformatore con collegamento Yyn, riduce sensibilmente la corrente di guasto monofase, rendendo difficoltoso soddisfare la relazione di sicurezza per i sistemi TN che prevede che la corrente sia tale da far intervenire nel tempo stabilito per la sicurezza (0,4 s con tensione verso terra di 230 V) le protezioni di massima corrente.

Per le ragioni dette i trasformatori **Yyn** non si devono usare nelle nuove installazioni.

Il gruppo **Yyn** si ha invece in Cabina Primaria, nella trasformazione AT/MT, in quanto consente di ridurre le sollecitazioni sull'isolamento e semplificare la regolazione di tensione.

Anche il trasformatore **Yzn** ha un bassa impedenza rispetto alla sequenza omopolare e risulta adatto ad alimentare carichi squilibrati. E' però di lavorazione più complessa, quindi più costoso. Si usa solo in applicazioni particolari, quando ad esempio, oltre che ad alimentare carichi squilibrati è necessario ridurre gli effetti della terza armonica, e suoi multipli, nelle tensioni di fase. Con il primario a stella infatti mancano le terze armoniche nelle correnti magnetizzanti, per cui compaiono nei flussi, quindi nelle tensioni di fase. Ma la tensione di fase di un zig-zag è la differenza di due tensioni prodotte da flussi affetti da terza armonica e, nella differenza, le terze armoniche si elidono, essendo in fase.

La corrente di inserzione

Il fatto che il trasformatore per sfruttare il materiale lavora oltre il ginocchio della curva di magnetizzazione dei materiali, e che l'inserzione di un circuito induttivo determina un valore massimo del flusso magnetico che può raggiungere il doppio di quello a regime, come spiegato nei link seguenti

[Perché è elevata-1](#)

[Perché è elevata-2](#)

determina elevate correnti di inserzione, molto maggiori della corrente nominale, di cui occorre tener conto nella taratura delle protezioni, al fine di evitare interventi intempestivi. Nel link che segue sono indicati i valori di cui tenere conto

[Valori e tempi della corrente di inserzione](#)

Il rifasamento

Il trasformatore assorbe la corrente che deve creare il flusso magnetico. E' detta corrente magnetizzante cui corrisponde una potenza reattiva che deve essere compensata. Lo si fa, in genere, con una batteria di condensatori permanentemente collegati ai terminali di bassa tensione. La potenza della batteria è ricavabile dalla corrente a vuoto del trasformatore, fornita con il foglio di collaudo dello stesso, come percentuale rispetto della corrente nominale: $i_o\% = 100 \cdot \frac{I_0}{I_r}$ con la formula

$$Q_{0a} \cong \frac{i_o\%}{100} \cdot S_r$$

La formula precedente è approssimata per eccesso, poiché presuppone che la corrente a vuoto sia solo magnetizzante, quindi in perfetta quadratura con la tensione. In pratica ciò è vero se il fattore di potenza a vuoto è, come in genere è, molto basso per cui è possibile trascurare la componente della corrente in fase con la tensione e che dà luogo alle perdite nel ferro.

Le correnti a vuoto sono vanno dal 3% all'1% al crescere della potenza nominale del trasformatore nei trasformatori con perdite normali. Nei trasformatori a basse perdite invece va dal 2% al 0,5%.

Nel funzionamento a carico, si aggiunge alla precedente potenza reattiva, detta a vuoto, quella relativa alla reattanza di dispersione. Si tratta di una potenza reattiva che varia con il quadrato dell corrente di carico, ed è, praticamente, proporzionale alla tensione di cortocircuito, quindi determinabile con

$$Q_c \cong S_r \cdot \frac{u_{cc}\%}{100} \cdot \left(\frac{I}{I_r}\right)^2$$

Nota sulle formule

$$Q_0 = \sqrt{3}U_r I_0 \sin \varphi_0$$

$$\sin \varphi_0 \cong 1$$

$$Q_{0a} \cong \sqrt{3}U_r I_0 = \sqrt{3}U_r i_0\% \frac{I_r}{100} = S_r \frac{i_0\%}{100}$$

$$Q_{cc} = 3X_{cc}I_r^2$$

$$Q_{cc} = 3Z_{cc} \sin \varphi_{cc} I_r^2$$

$$\sin \varphi_{cc} \cong 1$$

$$Q_{cc} \cong 3Z_{cc}I_r^2 = \sqrt{3} \frac{U_{cc}}{I_r} I_r^2 = \sqrt{3}U_r I_r \frac{u_{cc}\%}{100} = S_r \frac{u_{cc}\%}{100}$$

$$Q_c = 3X_{cc}I^2 = Q_{cc} \left(\frac{I}{I_r}\right)^2 \cong S_r \frac{u_{cc}\%}{100} \left(\frac{I}{I_r}\right)^2$$

Il parallelo fra trasformatori

La si deve considerare un' [opzione da evitare](#) per quanto possibile, perché la potenza di cortocircuito sulle sbarre del parallelo è in pratica la somma delle potenze di cortocircuito dei singoli trasformatori ed un guasto sulle sbarre provoca una messa fuori servizio completa. Più funzionale e più economico il servizio separato, con congiuntore di sbarra sul lato BT per il trasferimento dei carichi. (Per maggiori dettagli vedere il link segnalato).

Nel caso comunque si effettui un parallelo occorre che i trasformatori abbiano:

- identico rapporto di trasformazione e tensione primaria;
- appartengano allo stesso gruppo;
- abbiano la stessa tensione di cortocircuito;
- abbiano lo stesso fattore di potenza di cortocircuito.

Un foglio di calcolo

Nella tabella che segue ci sono i dati dei trasformatori di potenza standard, relativi alle correnti nominali, alle correnti di cortocircuito, alla potenza della batteria di rifasamento a vuoto ed a carico.

Tensioni nominali									
U1,r	20	kV	Correte a vuoto: i0%				1,80%	Percentuale di carico	
U20	400	V	Tensioni di cortocircuito				4,0%		
			Perdite nel rame				2,0%	50%	
			Perdite nel Ferro				0,5%		
Sr kVA	Ir,2 A	Ir,1 A	Icc,2 kA	Icc,1 A	Q0a kvar	Qc kvar	QT kvar	Zcc,1 (ohm)	Zcc,2 (milliohm)
50	72	1,4	1,8	36	0,9	1,0	1,9	320,8	128,3
100	144	2,9	3,6	73	1,8	2,0	3,8	159,3	64,2
160	231	4,6	5,8	115	2,88	3,2	6,1	100,4	40,0
200	289	5,8	7,2	145	3,6	4,0	7,6	79,6	32,0
250	361	7,2	9,0	180	4,5	5,0	9,5	64,2	25,6
315	455	9,1	11,4	228	5,67	6,3	12,0	50,8	20,3
400	577	11,5	14,4	288	7,2	8,0	15,2	40,2	16,0
500	722	14,4	18,1	360	9	10,0	19,0	32,1	12,8
630	909	18,2	22,7	455	11,34	12,6	23,9	25,4	10,2
800	1.155	23,1	28,9	578	14,4	16,0	30,4	20,0	8,0
1.000	1.443	28,9	36,1	723	18	20,0	38,0	16,0	6,4
1.250	1.804	36,1	45,1	903	22,5	25,0	47,5	12,8	5,1
1.600	2.309	46,2	57,7	1.155	28,8	32,0	60,8	10,0	4,0
2.000	2.887	57,7	72,2	1.443	36	40,0	76,0	8,0	3,2
2.500	3.608	72,2	90,2	1.805	45	50,0	95,0	6,4	2,6

Dati Trasformatori MT/BT

E' possibile [scaricare da qui il foglio elettronico](#) che consente di modificare i valori di

- tensioni nominale,
- tensioni % di corto circuito,
- corrente a vuoto %;
- perdite nel rame %;
- perdite nel ferro %;
- grado di carico %

e calcola

- le correnti nominali le correnti di cortocircuito;
- le potenze di rifasamento;
- i parametri del circuito equivalente

Riferimenti

Rif. Bibliografico: Supplemento al n. 5/2003 di TuttoNormel



Il Supplemento di TuttoNormel

Trasformatori di Potenza MT/BT



Caratteristiche dei trasformatori di potenza

Collegamenti e gruppi

Estratto da "<http://www.electroyou.it/mediawiki/index.php?title=UsersPages:Admin:trasformatori1>"