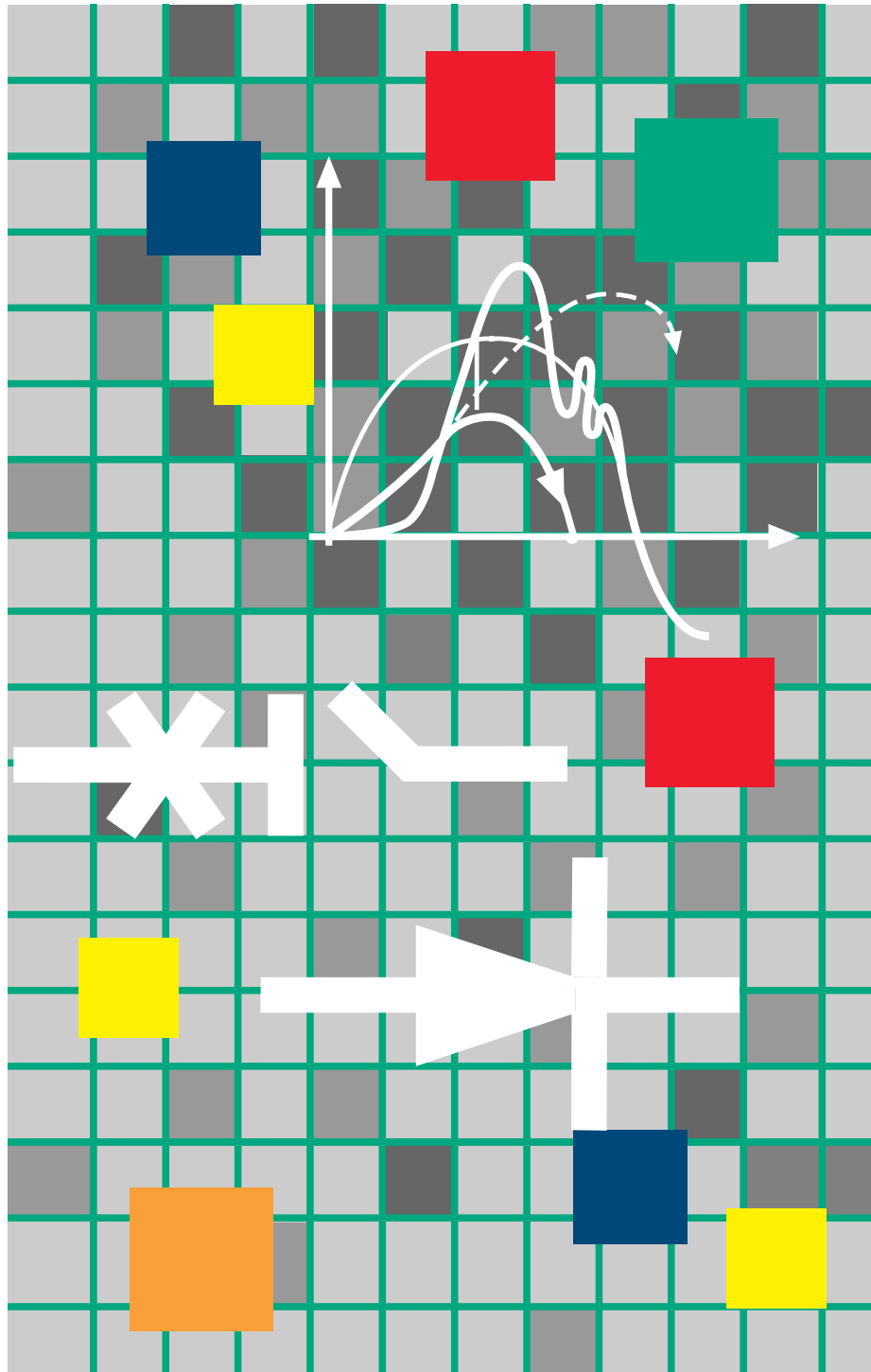


Dossier tecnico n° 3

Guida alle prove
di collaudo
trasformatori
di distribuzione
immersi in olio



GROUPE SCHNEIDER

■ Magrini Galileo ■ Merlin Gerin ■ Modicon ■ Square D ■ Telemecanique

Dossier tecnico n° 3
Redatto a cura della
Attività Trasformatori

Questo dossier tecnico ha lo scopo di portare un contributo alla conoscenza delle problematiche relative al collaudo di trasformatori di distribuzione immersi in olio. Per ogni prova viene presentato un estratto delle Norme CEI di riferimento e contemporaneamente viene illustrata nel dettaglio la metodologia di prova, per permettere una continua verifica dei criteri di prova in funzione della normativa vigente. Infine sono richiamate tutte le Norme Europee riferite ai trasformatori.

Questa pubblicazione fa parte della collana "Dossier tecnici" coordinata dai Servizi Tecnici Centrali di Schneider Electric S.p.A.
I Dossier Tecnici rappresentano un agile strumento di lavoro frutto del patrimonio di esperienze e competenze aziendali.
La collezione ha lo scopo di fornire informazioni più approfondite ed essere un valido strumento di riferimento nei campi specifici delle apparecchiature elettromeccaniche, dell'elettronica industriale, del trasporto e della distribuzione dell'energia elettrica.

Guida alle prove di collaudo trasformatori di distribuzione immersi in olio

Indice

1. Il trasformatore	3
2. Le prove	4
3. Glossario	5
4. Prove di accettazione	
Prova d'isolamento con tensione indotta	7
Prova d'isolamento con tensione applicata	7
Misura delle perdite a vuoto e della corrente a vuoto	9
Misura della resistenza degli avvolgimenti MT e BT	11
Misura della tensione di corto-circuito e delle perdite a carico	13
Misura del rapporto di trasformazione, controllo della polarità e dei collegamenti	15
5. Prove di tipo	
Prova di riscaldamento	17
Prova d'impulso	21
6. Prove speciali	
Misura del livello di rumore	23
Prova di tenuta al corto-circuito	24
Collaudo di trasformatori a 60 Hz con prove eseguite a 50 Hz	26
Bibliografia delle Norme	27

Guida alle prove di collaudo



Gamma di produzione

- trasformatori di distribuzione in olio fino a 3000 kVA e 36 kV;
- trasformatori in resina TRIHAL fino a 15 MVA e 36 kV;
- trasformatori di potenza fino a 63 MVA e 245 kV;
- trasformatori speciali.



Il trasformatore

Definizione

Il trasformatore è un apparecchio statico ad induzione elettromagnetica destinato a trasformare un sistema a corrente alternata in uno o più sistemi aventi la stessa frequenza ma d'intensità e di tensione generalmente differenti.

■ Funzionamento

"ogni avvolgimento sottoposto ad un flusso variabile, generato da una tensione variabile, crea ai suoi terminali attraverso un circuito magnetico prestabilito, una forza elettromotrice indotta proporzionale al numero di spire dell'avvolgimento". Questa forza elettromotrice determina una tensione ai terminali del

trasformatore secondo la formula di Boucherot:

$$U = 4.44 B_{max} \times N \times S \times f$$

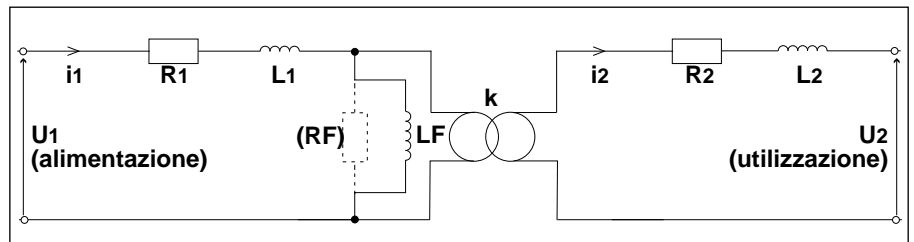
dove:

U = tensione ai terminali dell'avvolgimento primario o secondario
 B_{max} = valore massimo del campo magnetico nel nucleo
 N = numero di spire dell'avvolgimento primario o secondario

S = sezione del nucleo magnetico
 f = frequenza d'alimentazione del trasformatore espressa in Hz.

■ schema equivalente del trasformatore

Ogni circuito polifase è una combinazione di circuiti monofasi e di conseguenza si può schematizzare il trasformatore in un circuito monofase come segue:



Il circuito magnetico

Sul circuito magnetico, costituito da lamierini magnetici a cristalli orientati, sono disposti due avvolgimenti percorsi uno, dalla corrente I_1 e l'altro dalla

corrente I_2 . Il nucleo magnetico è caratterizzato dalle **perdite a vuoto** (P_0) chiamate anche perdite nel ferro; esse sono costituite dalle perdite per isteresi e per correnti di Foucault, in quanto quelle

dielettriche e per effetto Joule risultano trascurabili. La scelta della qualità dei lamierini magnetici, del sistema di taglio e di montaggio, condiziona il risultato globale del circuito magnetico.

Gli avvolgimenti

Gli avvolgimenti sono caratterizzati essenzialmente dai seguenti parametri:

■ **rapporto di trasformazione "K"** il quale corrisponde al rapporto delle tensioni primarie e secondarie:

$$K = \frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{I_2}{I_1}$$

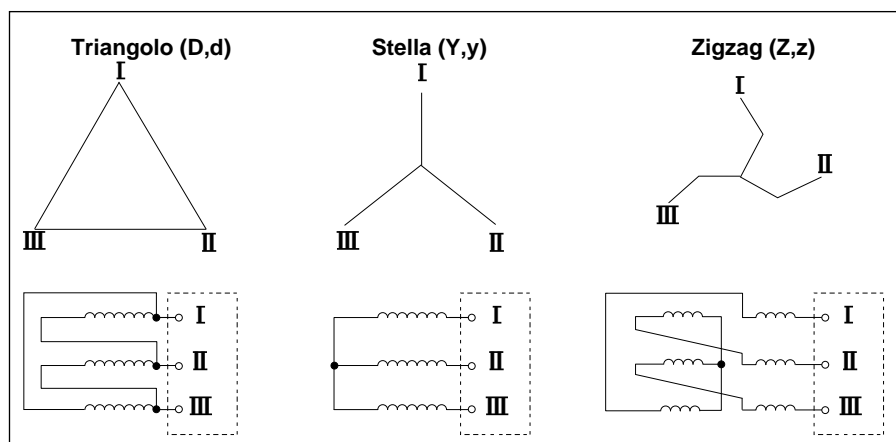
■ collegamenti

Il collegamento della più alta delle tensioni (MT) viene indicato con la lettera maiuscola, mentre quello della tensione più bassa (BT) con la lettera minuscola. Se l'avvolgimento ha il neutro esterno si hanno le sigle: YN o yn, ZN o zn.

L'indice orario permette di precisare lo sfasamento, multiplo di 30° tra l'avvolgimento MT e quello di BT. Esempio: Dyn 11 = MT a triangolo (D) e la BT a stella (y) con neutro esterno. L'indice orario indica uno sfasamento di 330° tra i terminali di MT e quelli di BT. Il senso di rotazione è antiorario.

■ perdite dovute al carico (Pcc)

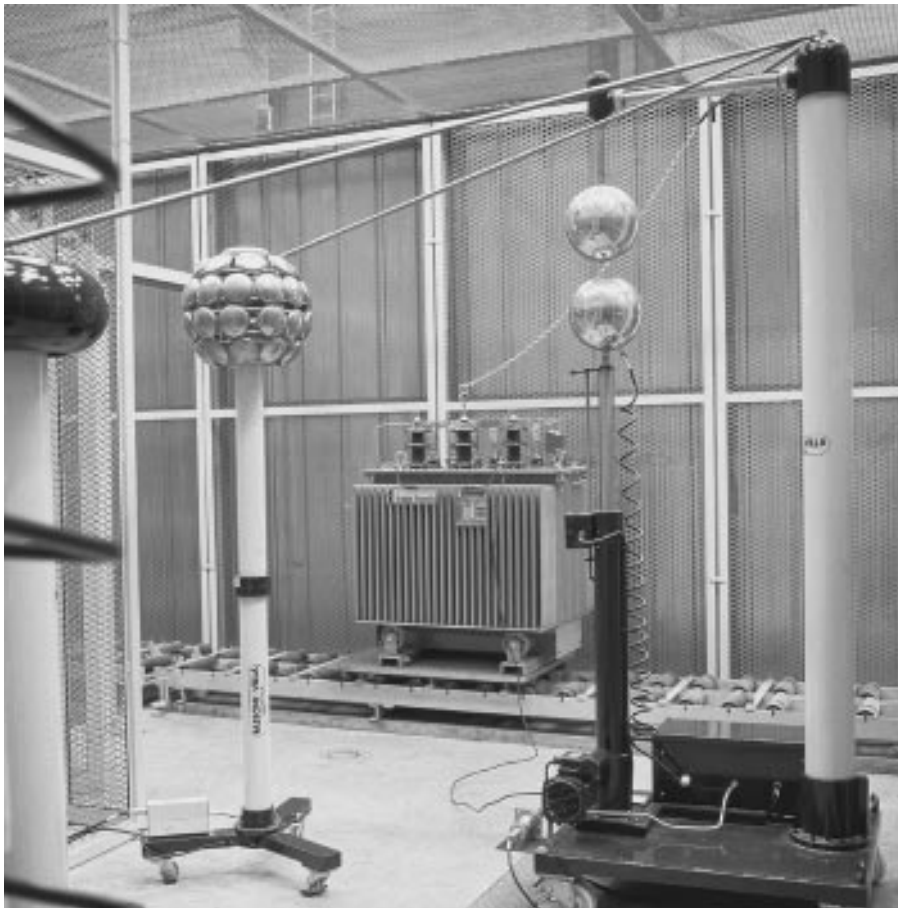
Esse sono chiamate a volte anche perdite in corto circuito o perdite nel rame (anche per trasformatori con avvolgimenti in alluminio). Le perdite dovute al carico sono composte dalle perdite per effetto Joule od ohmiche ($R I^2$) e dalle perdite addizionali dovute alle correnti di Foucault. Queste perdite si esprimono alla temperatura di riferimento normalizzata di 75°C , secondo le Norme CEI/IEC, e sono proporzionali al quadrato della corrente.



Liquido dielettrico

Il liquido dielettrico normalmente usato è l'olio minerale. Noi garantiamo l'assenza di PCB (Policloro Bifenile) normalmente contenuto negli Askarel

come per esempio l'Apirolio). Precisiamo che la soglia minima di misura del PCB risulta essere di 2 ppm ($2\text{ppm} = 2$ parti per milione cioè 2 gr per tonnellata).



Le prove

Le prove effettuate sui trasformatori hanno lo scopo di verificare la conformità delle caratteristiche elettriche e termiche alle specifiche dell'ordine. Le Norme CEI 14-4 ediz. 1983 classificano le prove in tre tipologie:

- **prove di accettazione;**
- **prove di tipo;**
- **prove speciali.**

Questa pubblicazione ha lo scopo di rendere più facile l'approccio ai differenti tipi di prova ed alla metodologia impiegata da Nuova Magrini Galileo per provare i trasformatori di distribuzione in olio, prodotti nello stabilimento di Trento.

Impianti di prova

- 1 sala prove integrata nella linea di produzione dei trasformatori permette di effettuare tutte le prove di accettazione e la prova d'impulso;

- 1 sala prove destinata ai collaudi eseguiti in presenza del cliente. E' possibile eseguire le prove di accettazione, le prove di tipo ed alcune prove speciali.

Tutte le prove indicate nel sommario vengono eseguite presso lo stabilimento di Trento ad eccezione della prova di corto circuito che viene effettuata presso un laboratorio indipendente.

Qualora richiesto nell'ordine, dove risultano evidenziate le relative condizioni commerciali, il cliente può assistere al collaudo sia per quanto riguarda le prove di accettazione che per le prove di tipo e/o speciali.

Avvertenze di sicurezza nella zona delle prove

Le aree destinate alle prove dei trasformatori sono chiaramente delimitate e protette. Al di là delle porte d'accesso ogni materiale può risultare sotto tensione e quindi un suo contatto può costituire un pericolo di morte per elettrocuzione.

L'accesso a queste aree è severamente interdetto a tutte le persone estranee e non abilitate al Servizio Prove.

I visitatori possono varcare le porte d'accesso solamente dopo aver ottenuto il benestare dal personale addetto alle prove abilitato allo scopo, e dopo essere stati informati dei pericoli inerenti agli impianti della sala prove.

Nel prosieguo vengono evidenziati relativamente ad ogni prova:

- **nella pagina di sinistra un riassunto delle principali Norme di riferimento;**
- **nella pagina di destra il metodo usato da Nuova Magrini Galileo.**

Glossario

Riferimento	Simbolo	Unità
Caratteristiche nominali		
Potenza nominale	Sn	Voltampere [VA] o kiloVoltAmpere [kVA] o MegaVoltAmpere [MVA]
Frequenza nominale	Fn	Hertz [Hz]
Media Tensione	MT	KiloVolt [kV]
Bassa Tensione	BT	Volt o kiloVolt [V] o [kV]
Temperatura	°C	Gradi Celsius [°C]
Riscaldamento	K	Kelvin
Perdite a vuoto	Po	Watt o kiloWatt [W] o [kW]
Perdite a carico	Pcc	Watt o kiloWatt [W] o [kW]
Corrente a vuoto	Io	Ampere [A]
Corrente nominale	In	Ampere [A]
Corrente di corto circuito	Icc	Ampere [A]
Tensione di corto circuito	Ucc	Volt [V] percentuale [%]
Fattore di potenza	cos.fi	
Campo magnetico	B	Tesla (T)
Numero di spire	N	
■ Prove di accettazione		
Misura delle perdite a vuoto		
Perdite a vuoto	Po	Watt [W]
Indicazione del primo wattmetro	$\Delta W1$	Watt [W]
Indicazione del secondo wattmetro	$\Delta W2$	Watt [W]
Indicazione del terzo wattmetro	$\Delta W3$	Watt [W]
Costante	Cte	
Correzione della potenza misurata	k	Watt [W]
Approssimazione	Δ	Percentuale [%]
Misura delle perdite a carico		
Corrente nelle 3 fasi	$I_1 I_2 I_3$	Ampere [A]
Potenza misurata	Pmis.	Watt [W]
Perdite Joule	ΣRI^2	Watt [W]
Perdite addizionali	Padd.	Watt [W]
Resistenza degli avvolgimenti		
Resistenza MT, BT	R_{MT}, R_{BT}	Ohm [Ω]
■ Prove di tipo		
Prova di riscaldamento		
Perdite totali	Pt	Watt [W]
Corrente media	Im	Ampere [A]
Temperatura ambiente	t°a	Gradi Celsius [°C]
Prova d'impulso		
Scansione		microsecondi [μs]
■ Prove speciali		
Misura delle scariche parziali		
Tensione di riferimento	Um	kiloVolt [kV]
Carica apparente	q	picocoulomb [pC]
Misura del livello di rumore		
Livello di fondo		decibel [dB]
Livello A di pressione acustica	Lp (A)	decibel [A]
Livello A di potenza acustica	Lw (A)	decibel [A]

Guida alle prove di collaudo

Le Norme

Estratto dalle Norme CEI 14-4 ediz. 1983 fascicolo n° 609:

Definizioni

Isolamento uniforme di un avvolgimento di trasformatore:

è l'isolamento di un avvolgimento di cui tutte le estremità collegate a terminali hanno la stessa tensione di tenuta a frequenza industriale verso terra.

Tensione U_m :

è il valore efficace della più alta tensione concatenata per la quale è stato progettato l'isolamento di un avvolgimento del trasformatore.

Descrizione della prova

Le caratteristiche della prova a tensione indotta, dipendono essenzialmente dal tipo d'avvolgimento impiegato nel trasformatore.

La prova a tensione indotta descritta nelle Norme, precisa che deve essere applicata ai terminali di un avvolgimento del trasformatore una

tensione alternata, prossima alla forma sinusoidale.

La tensione di prova deve essere uguale al doppio della tensione nominale; tuttavia il suo valore tra i terminali di linea di ciascun avvolgimento trifase non deve superare la tensione nominale di tenuta indicata nella tabella a fianco.

La frequenza di prova deve essere superiore alla frequenza nominale al fine di evitare fenomeni di saturazione (corrente magnetizzante eccessiva). Salvo che sia altrimenti specificato, la durata della prova alla piena tensione deve essere di 60s per frequenza di prova minore o uguale al doppio della frequenza nominale.

Se la frequenza di prova supera il doppio della frequenza nominale, la durata corrispondente in secondi sarà di:

$$120 \times \frac{\text{frequenza nominale}}{\text{frequenza di prova}}$$

con un minimo di 15s.

La prova di un avvolgimento trifase deve essere preferibilmente effettuata

con tensioni trifasi simmetriche indotte nelle tre fasi dell'avvolgimento.

Se l'avvolgimento è dotato di terminale di neutro, quest'ultimo può essere connesso a terra durante la prova. La prova ha esito favorevole se non avviene alcun cedimento della tensione di prova.

Tensione massima U_m (valore efficace) [kV]	Tensione nominale di tenuta di breve durata a frequenza industriale (valore efficace) [kV]
≤ 1,1	3
3,6	10
7,2	20
12	28
17,5	38
24	50
36	70

Le Norme

Estratto dalle Norme CEI 14-4 ediz. 1983 fascicolo n° 609:

Definizioni

Tensione applicata:

è la tensione monofase che è applicata ad uno degli avvolgimenti del trasformatore reso equipotenziale, mentre gli altri sono collegati a massa.

Descrizione della prova

La prova di tensione applicata deve essere effettuata mediante una tensione alternata monofase di forma il più possibile vicina alla forma sinusoidale e ad una frequenza appropriata almeno uguale all'80% della frequenza nominale.

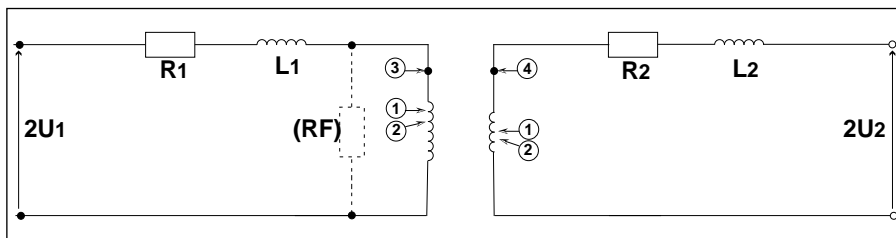
La piena tensione di prova deve essere applicata per 60s tra l'avvolgimento in prova e tutti i terminali degli altri avvolgimenti, il circuito magnetico, le parti metalliche e la cassa del trasformatore collegati insieme ed a terra. La prova ha esito favorevole se non si verifica alcun cedimento della tensione applicata.

Tensione massima U_m (valore efficace) [kV]	Tensione nominale di tenuta di breve durata a frequenza industriale (valore efficace) [kV]
≤ 1,1	3
3,6	10
7,2	20
12	28
17,5	38
24	50
36	70

Prova d'isolamento con tensione indotta

Scopo della prova

Questa prova permette di rilevare uno o più eventuali difetti d'isolamento tra le spire degli avvolgimenti (esempio: difetto tra 1 e 2,3 e 4) o tra le fasi.



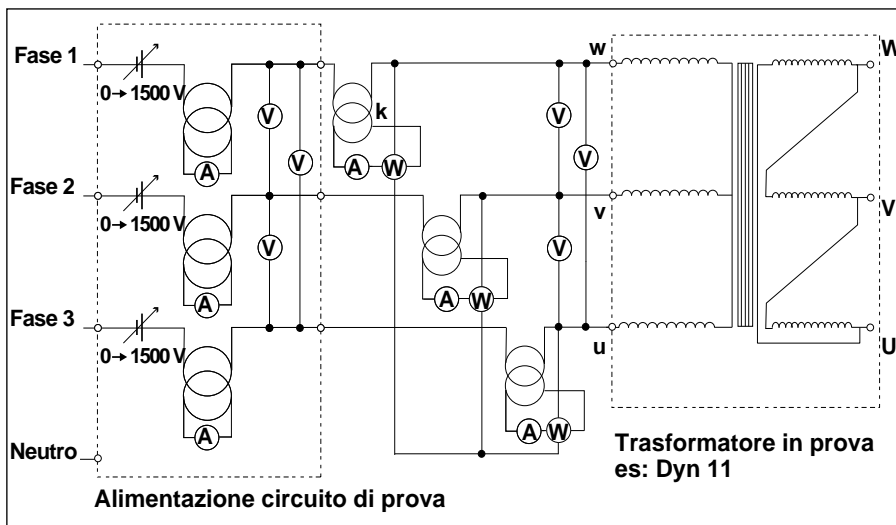
Modalità di prova

L'avvolgimento BT viene alimentato con una tensione pari a 2 volte la tensione nominale, mantenendo aperti i terminali dell'avvolgimento MT. Per evitare la saturazione del circuito magnetico del trasformatore in prova, viene usata una frequenza di alimentazione di 150 Hz.

La durata della prova risulta essere:

$$(120 \times 50) / 150 = 40s$$

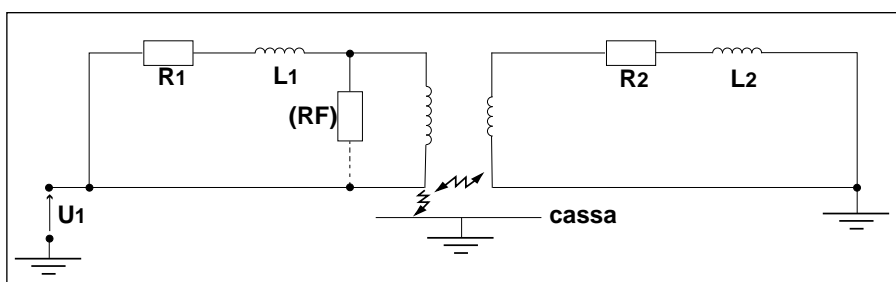
Il trasformatore supera la prova quando non si verifica alcuna caduta della tensione di alimentazione o deviazioni amperometriche.



Prova d'isolamento con tensione applicata

Scopo della prova

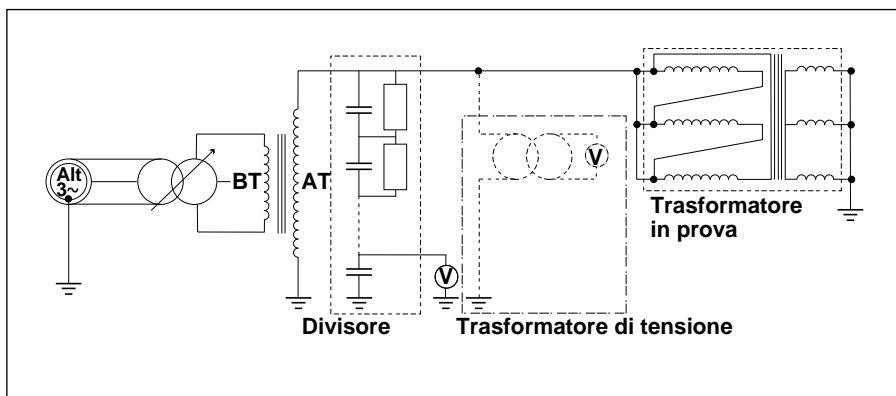
Questa prova ha lo scopo di verificare la tenuta dielettrica a frequenza industriale (50 Hz) del trasformatore (caratteristiche isolanti dell'olio e degli avvolgimenti) relativamente ad ogni avvolgimento, rispetto l'altro e la massa. Lo schema di principio del trasformatore viene modificato come segue:



Modalità di prova

La prova d'isolamento con tensione applicata viene eseguita con una tensione monofase a 50 Hz il cui valore viene stabilito dalle Norme secondo la classe d'isolamento del trasformatore. La tensione di prova viene applicata successivamente a ciascun avvolgimento per 60s con i terminali degli altri avvolgimenti e le parti metalliche collegate a massa.

La misura della tensione viene effettuata mediante un divisore ohmico-capacitivo od un trasformatore di tensione.



Guida alle prove di collaudo

Le Norme

La procedura della misura è descritta nelle Norme CEI 14-4 ediz. 1983. Tutti i valori misurati durante questa prova sono riferiti alla presa principale, con il trasformatore inizialmente alla temperatura ambiente, salvo diverse indicazioni contrattuali.

Tolleranze

Le tolleranze sono stabilite dalle Norme come risulta dalla sottostante tabella, salvo diverse precisazioni contrattuali.

Grandezze soggette a garanzie	Tolleranze
Perdite parziali (perdite a vuoto o perdite a carico)	+15% di ognuna delle perdite parziali, a condizione che la tolleranza delle perdite totali non sia superata
Corrente a vuoto	+30% della corrente a vuoto specificata
Perdite totali (Po + Pcc)	+10% dei valori dichiarati

Definizioni

■ **perdite a vuoto**: è la potenza attiva assorbita quando è applicata la tensione nominale alla frequenza nominale, ai terminali di uno degli avvolgimenti;

■ **corrente a vuoto**: è il valore efficace della corrente necessaria alla magnetizzazione del circuito magnetico.

Descrizione della prova

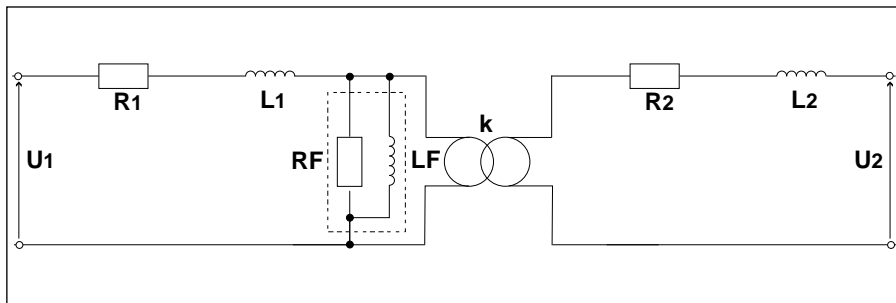
Le perdite a vuoto e la corrente a vuoto devono essere misurate su uno degli avvolgimenti, alla frequenza nominale e ad una tensione pari alla tensione nominale se la prova è effettuata sulla presa principale, o pari alla appropriata tensione di presa se la prova è effettuata su un'altra presa. L'altro o gli altri avvolgimenti devono essere lasciati aperti e gli avvolgimenti che possono essere connessi a triangolo aperto devono avere il triangolo chiuso.

Misura delle perdite a vuoto e della corrente a vuoto

Scopo della prova

Questa prova ha lo scopo di:

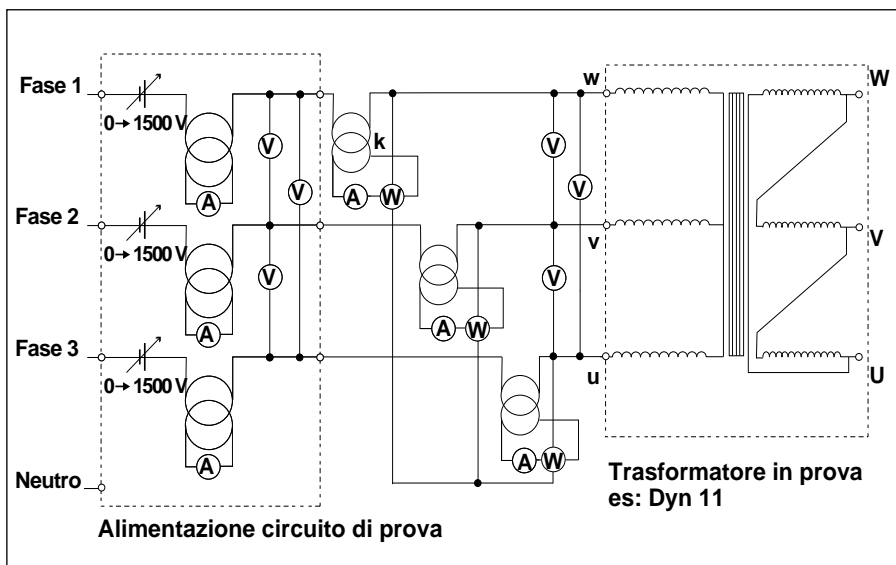
- identificare il valore delle perdite a vuoto e della corrente a vuoto del trasformatore;
- verificare che queste caratteristiche corrispondono ai valori contrattuali e/o delle Norme in vigore. In concreto la rappresentazione grafica delle perdite a vuoto è evidenziata nella parte contornata da tratteggio dello schema seguente:



Modalità di prova

Viene alimentato l'avvolgimento BT con tensione e frequenza nominale, mantenendo aperti i terminali dell'avvolgimento MT.

Le perdite a vuoto sono misurate con un multimetro che realizza un circuito di misura corrispondente all'inserzione di 3 wattmetri. Vengono misurate inoltre la corrente di ogni singola fase e la terna di tensioni concatenate.



Calcolo dei risultati

perdite a vuoto misurate =

$$[(\Delta W_1 + \Delta W_2 + \Delta W_3) \times C_{te}] - K$$

k = correzione di potenza

Questa correzione corrisponde alla potenza assorbita dagli strumenti di misura che può essere espressa nella forma (U^2/R) .

La costante C_{te} dipende dalla portata degli strumenti di misura e di eventuali riduttori di corrente.

Esempio: in un circuito di prova comprendente un trasformatore di corrente rapporto 50/5A ed un amperometro di portata 5A con una scala a 100 divisioni, la costante diviene:

$$C_{te} = (50/5) \times (5/100) = 0,5$$

Tolleranze

L'applicazione di tolleranze ridotte sulle perdite a vuoto rispetto quanto precisato dalle Norme, è negoziabile al momento della richiesta di offerta.

Guida alle prove di collaudo

Le Norme

Le indicazioni seguenti sono state ricavate dalle Norme CEI 14-4 ediz. 1983.

Definizione

Le resistenze MT e BT sono le resistenze interne al trasformatore le quali generano le perdite Joule proporzionali al quadrato della corrente.

Descrizione della prova

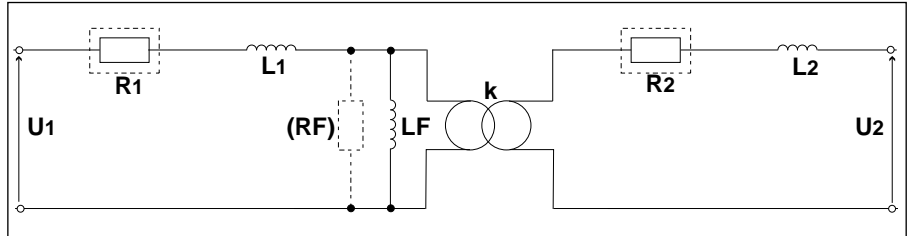
Devono venire annotati la resistenza di ogni avvolgimento, i terminali fra cui è misurata e la temperatura degli avvolgimenti. La misura deve essere effettuata in corrente continua. In tutte le misure di resistenza si deve avere cura di rendere minimi gli effetti di auto-induzione.

Per le unità in olio dopo aver lasciato il trasformatore senza eccitazione per almeno 3h, si determina la temperatura media dell'olio e si considera che la temperatura dell'avvolgimento sia la stessa della temperatura media dell'olio.

Misura della resistenza degli avvolgimenti MT e BT

Scopo della prova

Questa prova ha lo scopo di misurare la resistenza ohmica di ciascun avvolgimento del trasformatore. La rappresentazione grafica di queste resistenze è evidenziata nella parte contornata da tratteggio dello schema seguente:



Modalità di prova

Nel corso di questa prova si deve rilevare innanzi tutto la temperatura ambiente. La misura della resistenza di ogni avvolgimento viene effettuata con il metodo volt-amperometrico dove:

$$R = \left(\frac{2}{3}\right) \times r$$

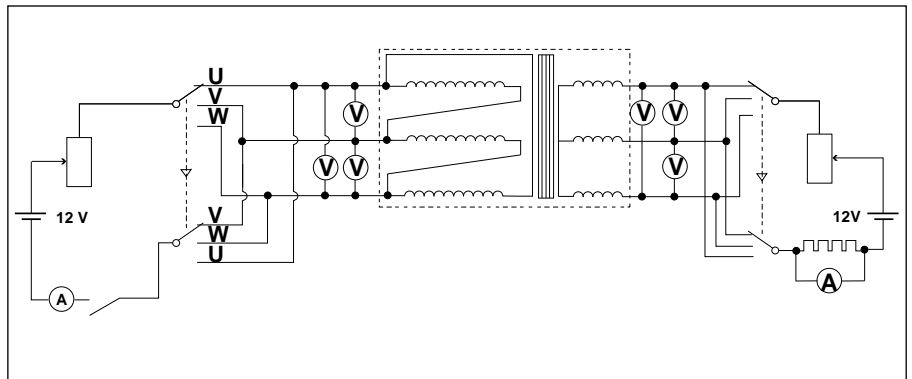
nel caso di un avvolgimento collegato a triangolo.

$$R = 2 \times r$$

nel caso di un avvolgimento collegato a stella, essendo:

R = resistenza equivalente tra le fasi

r = resistenza di fase di un avvolgimento del trasformatore.



Guida alle prove di collaudo

Le Norme

La procedura di prova è descritta nelle Norme CEI 14-4 ediz. 1983.

Definizioni

■ Tensione di corto-circuito

è la tensione, a frequenza nominale, che è necessario applicare fra i terminali di linea di un avvolgimento per farvi circolare la corrente nominale, quando i terminali dell'altro avvolgimento sono chiusi in corto-circuito.

■ Perdite dovute al carico

è la potenza attiva assorbita alla frequenza nominale ed alla temperatura di riferimento, quando la corrente nominale attraversa i terminali di linea di uno degli avvolgimenti con i terminali dell'altro chiusi in corto-circuito.

Qualora si abbia la presenza di altri avvolgimenti i loro terminali devono risultare aperti.

Queste perdite sono chiamate anche perdite in corto-circuito (perdite Joule + perdite addizionali).

Descrizione della prova

La tensione di corto-circuito (presa principale), e le perdite a carico devono essere misurate alla frequenza nominale con alimentazione praticamente sinusoidale ed una corrente compresa fra il 25 e il 100%, ma preferibilmente a non meno del 50% della corrente nominale (presa principale) o corrente di presa.

Le misure devono essere eseguite rapidamente e gli intervalli fra di esse devono essere abbastanza lunghi da garantire che il riscaldamento non produca errori significativi.

La differenza di temperatura fra la parte superiore e inferiore dell'olio deve essere piccola abbastanza da permettere di determinare la temperatura media con la precisione richiesta. I valori misurati delle perdite a carico devono essere corretti moltiplicandoli per il quadrato del rapporto fra corrente nominale (presa

principale) o corrente di presa, e corrente di prova.

Per un trasformatore con un avvolgimento a prese la cui estensione sia superiore al $\pm 5\%$, l'impedenza di corto-circuito deve essere misurata sulla presa principale e sulle due prese esterne.

Tolleranze

Le tolleranze sono stabilite dalle Norme come risulta dalla sottostante tabella, salvo diverse precisazioni contrattuali.

Grandezze soggette a garanzie	Tolleranze
Perdite parziali (perdite a vuoto o perdite a carico)	+ 15% di ognuna delle perdite parziali, a condizione che la tolleranza delle perdite totali non sia superata
Perdite totali (Po + Pcc)	+ 10% dei valori dichiarati
Tensione di corto-circuito a corrente nominale (presa principale) Se la presa principale è la presa centrale o una delle due prese centrali: - trasformatore a due avvolgimenti - trasformatore a più di due avvolgimenti	$\pm 10\%$ della tensione di corto-circuito specificata per quella presa $\pm 10\%$ della tensione di corto-circuito specificata per una determinata coppia di avvolgimenti $\pm 15\%$ della tensione di corto-circuito specificata per una seconda coppia determinata di avvolgimenti Per le altre coppie di avvolgimenti la tolleranza deve essere concordata e specificata.

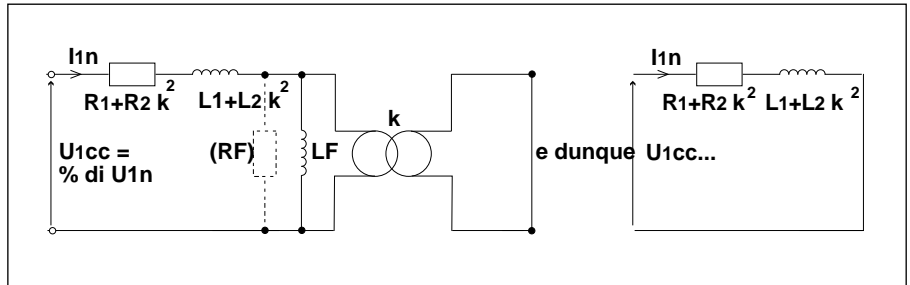
Misura della tensione di corto-circuito e delle perdite dovute al carico

Scopo della prova

Questa prova ha lo scopo di:

- misurare la tensione di corto-circuito (U_{cc});
- misurare le perdite a carico del trasformatore (P_{cc}).

Schema equivalente:



Modalità di prova

L'avvolgimento MT viene alimentato a frequenza nominale (50 Hz) con una tensione tale da far circolare una corrente di valore vicino a quello nominale, dopo aver posto in corto-circuito l'avvolgimento BT. Le perdite in corto-circuito sono misurate con un multimetro che realizza un circuito di misura corrispondente all'inserzione di 3 wattmetri. Vengono misurate inoltre la corrente di ogni singola fase e la terna di tensioni concatenate.

La tensione di corto-circuito % è data da:

$$U_{cc\%} = (U_{cc \text{ mis}} / U_{nom}) \times 100$$

Calcolo delle perdite dovute al carico

■ alla temperatura ambiente

$$P_{cc} = P_{JMT} + P_{JBT} + P_{add}$$

$$= (\sqrt{3}/2 \times R_{MT} \times I^2) + (\sqrt{3}/2 \times R_{BT} \times I^2) + P_{add}$$

dove:

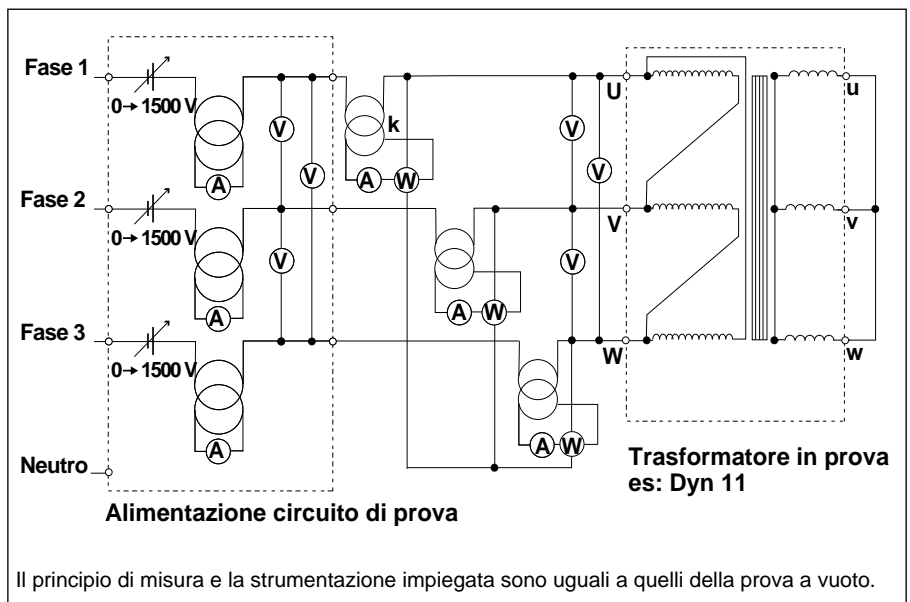
P_{JMT} , P_{JBT} = perdite Joule lato MT e BT

R_{MT} , R_{BT} = resistenze equivalenti lato MT e BT

Nel caso di un collegamento a triangolo:

$$P_{JMT} = 3 \times r \times (I / \sqrt{3})^2$$

$$= (\sqrt{3}/2) \times R_{MT} \times I^2$$



con

$$R_{MT} = (2/3) \times r$$

Nel caso di un collegamento a stella:

$$P_{JBT} = 3 \times r \times I^2$$

$$= (\sqrt{3}/2) \times R_{BT} \times I^2$$

con

$$R_{BT} = 2 \times r$$

Si ricorda che le perdite aggiuntive sono costituite essenzialmente dalle perdite per correnti di Foucault.

■ alla temperatura di riferimento (75°C per i trasformatori in olio).

Le perdite Joule variano in funzione della temperatura mentre le perdite aggiuntive sono inversamente proporzionali alla temperatura.

$$P_{cc \ 75^\circ C} = K \times P_J \ t^\circ a + (1/K) \times P_{add} \ t^\circ a$$

k = coefficiente di correzione della temperatura:

□ per il rame:

$$k = (235 + 75) / (235 + t^\circ a)$$

□ per l'alluminio:

$$k = (225 + 75) / (225 + t^\circ a)$$

Guida alle prove di collaudo

Le Norme

Valori normativi della tensione di corto-circuito in Europa, dopo l'emissione del documento di armonizzazione HD 428.S1 del 1992.

Potenza nominale (Sn) in KVA	Tensione di corto-circuito espressa in % della tensione nominale dell'avvolgimento
$50 \leq S_n \leq 630$	4
$630 < S_n \leq 2500$	6

Valori normativi della tensione di corto-circuito in conformità alla pubblicazione IEC 76-5 (1982).

Potenza nominale (Sn) in KVA	Tensione di corto-circuito espressa in % della tensione nominale dell'avvolgimento
$S_n \leq 630$	4
$630 < S_n \leq 1250$	5
$1250 < S_n \leq 3150$	6,25
$3150 < S_n \leq 6300$	7,15

Le Norme

Le indicazioni seguenti sono estratte dalle Norme CEI 14-4 ediz. 1983

Definizioni

■ Sfasamento di un avvolgimento

trifase: è lo scarto angolare tra i vettori indicanti le tensioni MT e BT dei terminali omologhi di una stessa coppia d'avvolgimenti.

E' convenzionalmente previsto che i vettori ruotino in senso antiorario.

Il vettore dell'avvolgimento MT, posto sulle 12 ore di un quadrante orario, preso di riferimento, e lo sfasamento di tutti gli altri avvolgimenti sono espressi normalmente con un indice orario;

■ **simbolo di collegamento:** è il simbolo convenzionale indicante le modalità di connessione degli avvolgimenti MT e BT ed il loro relativo sfasamento espresso con una combinazione di lettere e di indici orari.

Descrizione della prova

Il rapporto di trasformazione è misurato su ogni presa del trasformatore. Devono inoltre essere controllati sia il simbolo di collegamento dei trasformatori trifasi che la polarità in caso di unità monofasi.

Grandezze soggette a garanzia	Tolleranze
Rapporto di trasformazione a vuoto per la presa principale (Rapporto di trasformazione nominale)	Il più basso fra i due valori seguenti: a) $\pm 0,5\%$ del rapporto dichiarato, b) una percentuale del rapporto dichiarato pari a 1/10 della tensione di cortocircuito percentuale reale a corrente nominale.

Nota

Le tolleranze per altre prese devono essere oggetto di accordo fra costruttore ed acquirente

Tensione di corto-circuito U_{cc}

La tensione di corto-circuito possiede una componente reattiva U_x ed una componente ohmica U_r la quale, contrariamente a U_x, dipende dalla temperatura.

In valori ridotti rispetto alle grandezze nominali, si può scrivere:

$$(U_{cc} \%)^2 = (U_x \%)^2 + (U_r \%)^2$$

dove:

$$U_r \% = (P_{cc} \times 100) / S_n$$

$$U_{cc} \% = (U_{cc} \times 100) / U_n$$

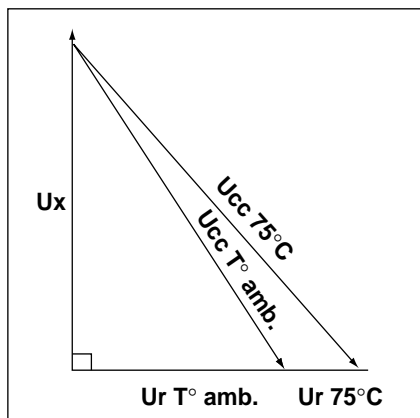
Esempio: con una temperatura ambiente di 20°C ed alla temperatura di riferimento di 75°C, si può scrivere:

$$(U_{cc} 75^\circ C\%)^2 = (U_x \%)^2 + (U_r 75^\circ C\%)^2$$

$$(U_{cc} 75^\circ C\%)^2 - (U_r 75^\circ C\%)^2 = (U_x \%)^2$$

$$(U_{cc} 75^\circ C\%)^2 - (U_r 75^\circ C\%)^2 =$$

$$(U_{cc} 20^\circ C\%)^2 - (U_r 20^\circ C\%)^2$$



la formula della U_{cc} a 75°C in % risulta quindi essere:

$$U_{cc} 75^\circ C\% =$$

$$100 \times \sqrt{\left(\frac{U_{cc} 20^\circ}{U_n}\right)^2 - \left(\frac{P_{cc} 20^\circ}{S_n}\right)^2 + \left(\frac{P_{cc} 75^\circ}{S_n}\right)^2}$$

dove

U_n = tensione nominale

Impedenza di corto-circuito

Essa può essere ricavata dalle misure precedenti con la formula seguente:

$$Z = (U_{cc} \times U_n) / 100 \text{ In}$$

dove

Z = impedenza di corto-circuito di fase espressa in ohm.

Misura del rapporto di trasformazione e controllo della polarità e dei collegamenti

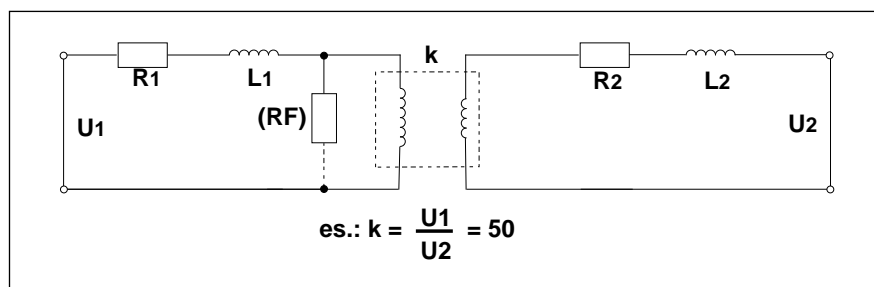
Scopo della prova

Questa prova ha lo scopo di:

- verificare la conformità del collegamento del trasformatore;
- verificare la conformità del rapporto

di trasformazione K su ogni presa rispetto ai valori garantiti.

La parte del trasformatore interessata da questa prova è quella contornata da tratteggio.



Modalità di prova

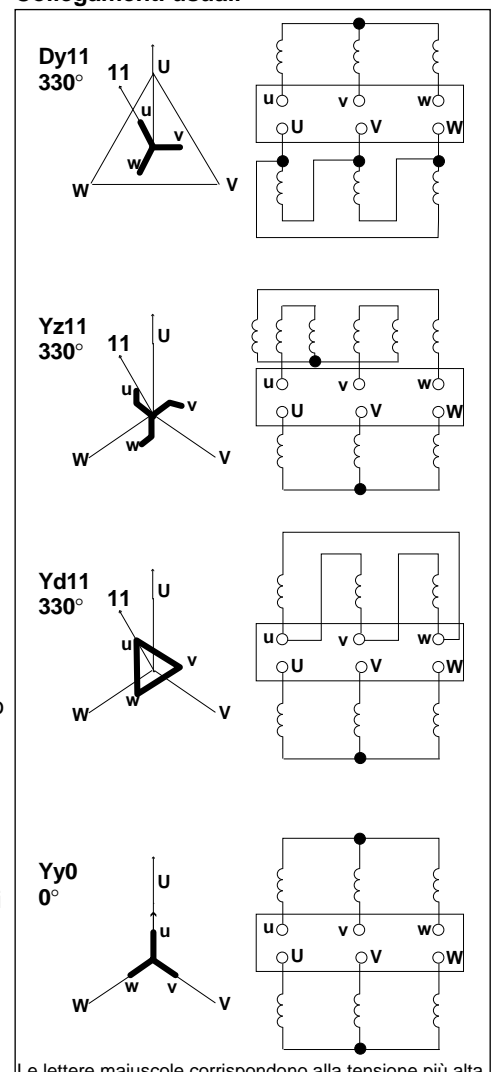
La misura del rapporto di trasformazione ed il controllo del gruppo di collegamento vengono eseguiti su ogni presa dell'avvolgimento per mezzo di un rapportimetro (ponte di Vettiner) alimentando il trasformatore con 220 V, lato MT.

La misura del rapporto di trasformazione si basa sulla comparazione, in ogni fase, della tensione MT in fase con quella BT. Infatti il rapportimetro mette in opposizione le tensioni fra loro in fase per compararne i moduli.

Tale operazione avviene a mezzo di un gruppo di decadi di resistenze e la comparazione è realizzata quando la corrente del galvanometro è nulla. Per ottenere il rapporto di trasformazione designato, nel caso di collegamenti Yd o Dy, bisogna moltiplicare o dividere il valore letto rispettivamente per $\sqrt{3}$ a secondo che le tensioni misurate siano semplici o composte.

Per i collegamenti Yy o Dd il valore letto identifica il rapporto di trasformazione designato.

Collegamenti usuali



Le lettere maiuscole corrispondono alla tensione più alta.

Guida alle prove di collaudo

Le Norme

Questa prova è descritta nella parte II delle Norme CEI 14-4 ediz. 1983.

Scopo della prova

Determinare le sovratemperature dell'olio e degli avvolgimenti MT e BT di un trasformatore.

Descrizione della prova

Un trasformatore viene identificato in base al tipo di raffreddamento impiegato (ONAN, ONAF, ODWF...). La specifica tecnica di riferimento e la targa delle caratteristiche devono evidenziare il valore della potenza, espressa normalmente in kVA o MVA, per la quale il trasformatore rispetta i limiti di sovratemperatura. Le Norme definiscono i valori di sovratemperatura, specifici per un determinato tipo di trasformatore, i quali sono oggetto di garanzia e di prova alle condizioni precisate dalle Norme.

Per i trasformatori in olio esse sono:

■ sovratemperatura dell'olio nella parte alta del trasformatore (60°K);

■ sovratemperatura media degli avvolgimenti:

□ per trasformatori ON o OF (65°K),
□ per trasformatori OD (70°K),

Si applicano i limiti suddetti salvo il caso che nelle specifiche contrattuali non siano indicate "condizioni speciali di servizio". Il caso tipico è rappresentato da un trasformatore con un avvolgimento avente delle prese di regolazione eccedenti il $\pm 5\%$, dove la prova di riscaldamento è da eseguire sulla presa corrispondente alla corrente più elevata.

I limiti di sovratemperatura si applicano su questa presa con la potenza, tensione e corrente di riferimento.

Se il luogo di installazione non corrisponde alle condizioni normali di servizio (altezza < 1000M, $-25^{\circ}\text{C} < T^{\circ}$ ambiente < 40°C, tensione d'alimentazione sinusoidale e simmetrica, ambiente a debole livello d'inquinamento) si devono apportare delle modifiche ai limiti delle sovratemperature del trasformatore.

Il trasformatore deve essere sottoposto alla prova completo dei suoi dispositivi di protezione. Devono essere realizzati tre tipi di misure di temperatura:

■ misura della temperatura dell'aria di raffreddamento da effettuare ad intervalli regolari durante la prova, con almeno tre termometri situati

in differenti punti attorno al trasformatore a circa metà altezza della superficie di raffreddamento e ad una distanza compresa tra 1 e 2 m;

■ misura delle temperature dell'olio effettuate anch'esse ad intervalli regolari durante la prova e rilevate per mezzo di un termometro introdotto in un pozzetto riempito d'olio situato sul coperchio, e nella parte inferiore per mezzo di sensori termici;

■ misura della sovratemperatura degli avvolgimenti effettuata con il metodo della variazione di resistenza.

Il valore della temperatura ambiente risulta dalla media dei valori misurati dai 3 termometri, mentre la temperatura media dell'olio è considerata convenzionalmente come la media tra la temperatura dell'olio nella parte superiore e quella della parte inferiore.

Per ragioni pratiche il metodo normalmente impiegato per la determinazione delle sovratemperature di un trasformatore in olio è il metodo di corto-circuito. Durante questa prova il trasformatore non risulta sottoposto simultaneamente alla tensione e corrente nominali, ma alle perdite totali ottenute sommando le perdite dovute al carico, alla temperatura di riferimento, con le perdite a vuoto.

Prova di riscaldamento

Scopo della prova

Questa prova ha lo scopo di:

- determinare la sovratemperatura dell'olio (Δt olio);
- determinare la sovratemperatura degli avvolgimenti MT e BT;
- verificare la potenza nominale del trasformatore.

Modalità di prova

Si possono distinguere, in ordine cronologico, quattro grandi fasi:

- rilievo delle misure di riferimento,
- inizio della prova di riscaldamento,
- controllo della stabilizzazione delle perdite con cui il trasformatore è stato caricato e rilievo della sovratemperatura dell'olio,
- regime nominale.

Almeno 24 ore prima di eseguire le misure di riferimento, il trasformatore viene piazzato in un locale adeguato per ottenere una omogeneità della temperatura dei suoi avvolgimenti e dell'olio.

a) rilievo delle misure di riferimento

Queste misure permettono di rilevare i valori delle resistenze MT e BT e della temperatura dell'olio a freddo cioè quando il trasformatore non è alimentato e si trova a temperatura ambiente. La misura di queste resistenze a freddo è determinante per il calcolo della sovratemperatura degli avvolgimenti:

- misura della resistenza MT e BT a freddo;

Vengono utilizzati i valori rilevati con la precedente misura (vedere pag. 11).

- misura della temperatura del trasformatore;

Sul coperchio del trasformatore si trova un pozzetto termometrico adatto allo scopo; la temperatura misurata corrisponde alla temperatura massima dell'olio che verrà impiegata, con un

coefficiente di correzione, funzione dell'altezza del trasformatore, per ricavare la temperatura media dell'olio.

b) inizio della prova di riscaldamento

L'avvolgimento MT del trasformatore è collegato all'alimentazione trifase della sala prove, mentre l'avvolgimento BT è chiuso in corto-circuito.

Il trasformatore viene alimentato con le perdite totali (perdite a vuoto più perdite a carico) almeno per tutta una notte.

c) controllo della stabilizzazione e misura della sovratemperatura dell'olio

Vengono rilevati:

- la corrente di assorbimento del trasformatore su ogni fase e la potenza relativa; questa potenza corrisponde alle perdite totali con una tolleranza del $\pm 20\%$.
- la temperatura (T°) dell'olio e dell'aria ambiente.

La sovratemperatura max. dell'olio viene definita da:

$$\Delta T^\circ \text{ olio} = T^\circ \text{ olio} - T^\circ \text{ ambiente}$$

In pratica la temperatura ambiente viene ottenuta come media dell'indicazione di 3 termometri situati tra 1 e 2 m di distanza, ad un'altezza pari a metà dell'altezza della cassa ed immersi in idonei pozzetti per evitare gli effetti intempestivi di eventuali correnti d'aria.

Quando si ottiene la stabilizzazione con un valore di perdite (P) differente da quello delle perdite totali (Pt) viene applicata la seguente formula di correzione:

$$\Delta T^\circ \text{ olio} = T^\circ \text{ olio mis.} \times (Pt/P)^x$$

dove

$\Delta T^\circ \text{ olio}$ = sovratemperatura dell'olio alle perdite totali,

$\Delta T^\circ \text{ olio mis.}$ = sovratemperatura dell'olio alla potenza misurata,

$x = 0,8$ o $1,0$ in funzione del sistema di raffreddamento del trasformatore.

d) regime nominale

Per eseguire questa misura si riporta la corrente di alimentazione del trasformatore al valore nominale (I_n) mantenendola costante almeno per un'ora. Al termine si rilevano i seguenti valori:

- la corrente di ogni fase e la rispettiva potenza;
- la temperatura dell'olio e dell'aria ambiente;
- le resistenze a caldo MT e BT dopo l'interruzione dell'alimentazione tenendo conto di eseguire dei rilievi delle resistenze ad intervalli di tempo (1).

Si determinano quindi le sovraturetemperature degli avvolgimenti MT e BT con la seguente formula:

$$\Delta T_{avv} =$$

$$[(R_c/R_o) \times (K + t_o)] - K - t_a + 0,8 (\Delta T_{OPT} - \Delta T_{ORN})$$

dove:

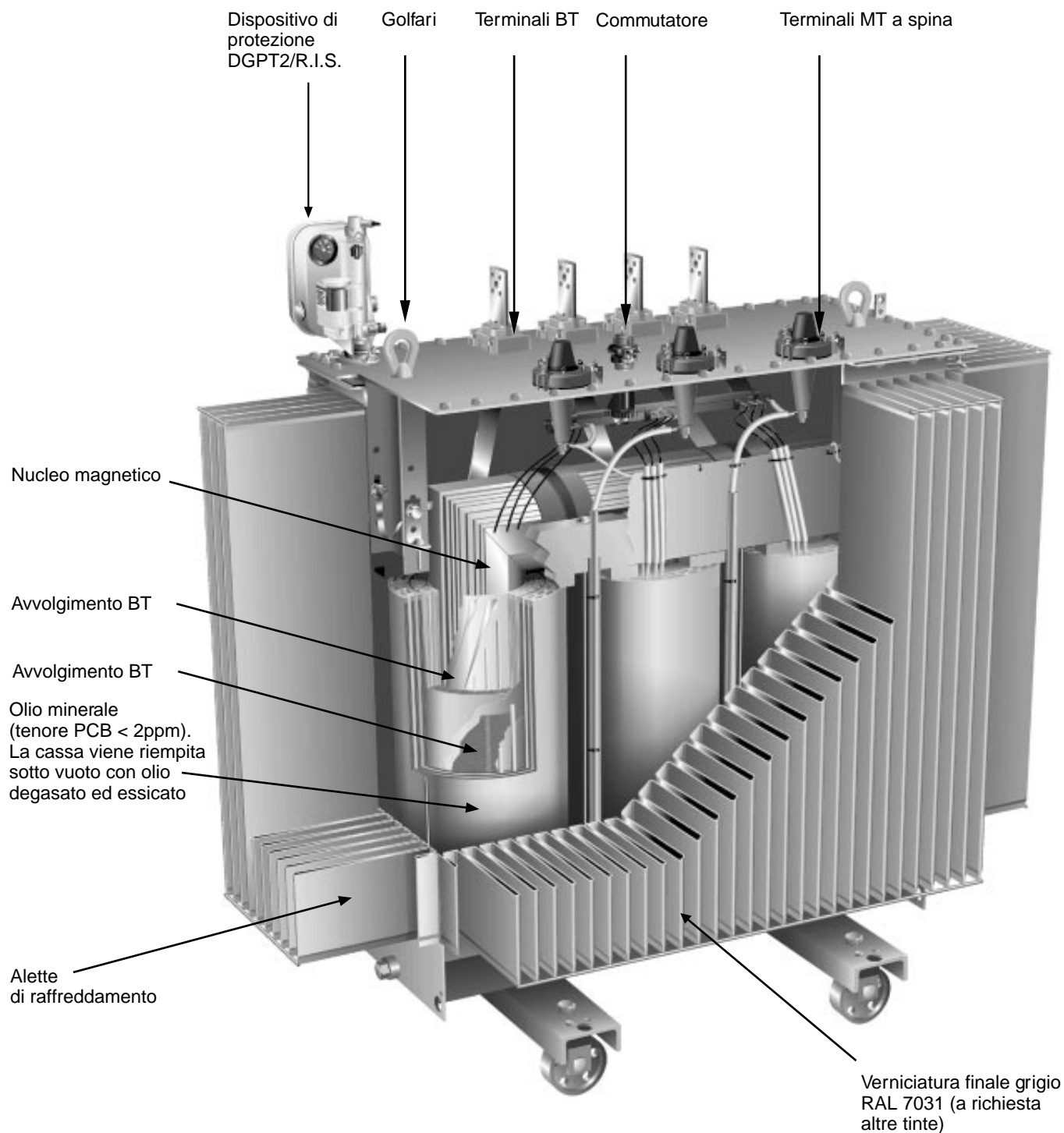
R_c = resistenza a caldo a tempo zero
 R_o = resistenza a freddo
 t_o = temperatura di riferimento a freddo
 K = coefficiente di temperatura
 t_a = temperatura ambiente media alla fine del regime nominale

ΔT_{OPT} = sovratemperatura dell'olio, con le perdite totali, misurate al pozzetto.

ΔT_{ORN} = sovratemperatura dell'olio a regime nominale misurata al pozzetto.

(1) ogni 30s per un tempo di circa 10 min. Queste misure di resistenze ad intervalli di tempo regolari permettono di stabilire la curva di raffreddamento. Per estrapolazione si può così determinare il valore della resistenza a $t = 0$.

Guida alle prove di collaudo



Come è già stato indicato, lo scopo della prova è doppio:

- stabilire la sovratemperatura dell'olio, in regime stabilito, con lo smaltimento delle perdite totali;
- stabilire la sovratemperatura media degli avvolgimenti alla corrente nominale In.

La prova è quindi realizzata in due fasi:

- **alimentazione con le perdite totali:** il trasformatore è sottoposto ad una tensione tale che la potenza attiva misurata sia uguale alle perdite totali del trasformatore con una corrente che evidentemente risulterà superiore a In.

Vengono rilevate la temperatura dell'olio e dell'aria ambiente e la prova viene proseguita fino a quando non siano realizzate le condizioni previste da uno dei due metodi stabiliti dalle Norme per la durata della prova di riscaldamento.

- **alimentazione a corrente nominale:** dopo aver raggiunto il regime stabilito, la prova viene continuata con una corrente uguale a quella nominale

che deve essere mantenuta almeno per un'ora.

Durante questo intervallo si continua a rilevare i valori delle temperature dell'olio e dell'aria ambiente. Alla fine della prova viene eseguita la misura delle resistenze degli avvolgimenti dopo un rapido scollegamento dell'alimentazione e del corto-circuito dell'altro avvolgimento.

Premesso che in precedenza è stata eseguita una misura di riferimento delle resistenze degli avvolgimenti ad una determinata temperatura ambiente (R_1, θ_1), la temperatura di un avvolgimento (θ_2) alla fine della prova viene ricavata dal valore misurato della sua resistenza (R_2) a quella temperatura e dal valore misurato della sua resistenza (R_1) alla temperatura (θ_1) mediante la formula:

$$\theta_2 = \frac{R_2}{R_1}(\theta_1 + x) - x$$

dove

- x = 235°C per il rame
- 225°C per l'alluminio

Correzioni

Se i valori specificati delle perdite o della corrente non possono essere ottenuti durante la prova, è necessario correggere i risultati di prova come segue:

- alla sovratemperatura dell'olio ottenuta durante la prova si applica il seguente fattore di correzione: (perdite totali/perdite effettive nel corso della prova)^x

dove:

- x = 0,8 per circolazione naturale dell'aria

1,0 per circolazione forzata dell'aria

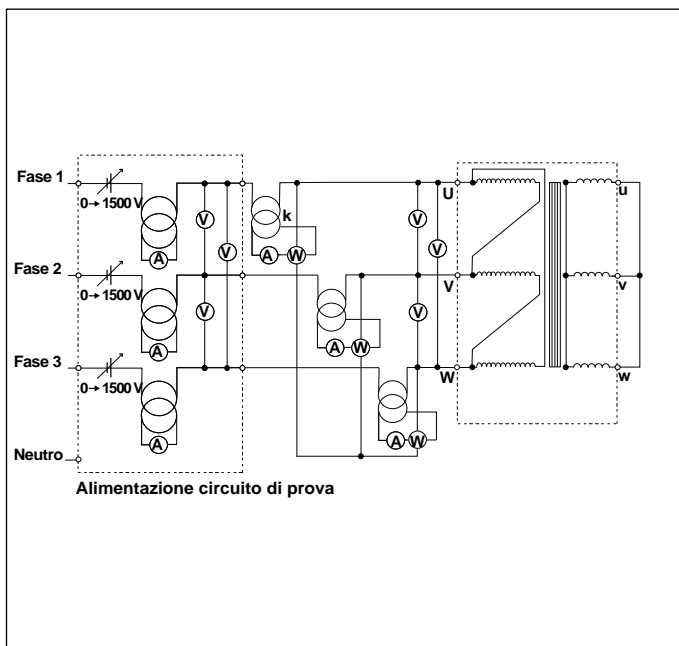
- alla sovratemperatura degli avvolgimenti rispetto alla temperatura dell'olio si applica il seguente fattore di correzione:

(corrente nominale/corrente di prova)^y

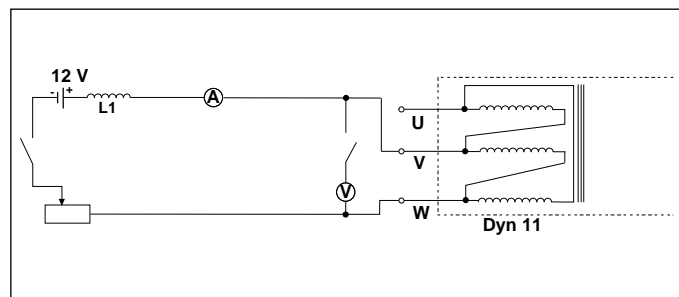
- y = 1,6 per circolazione naturale e forzata ma non guidata dell'olio
- 2,0 per circolazione forzata e guidata dell'olio

Schemi di prova

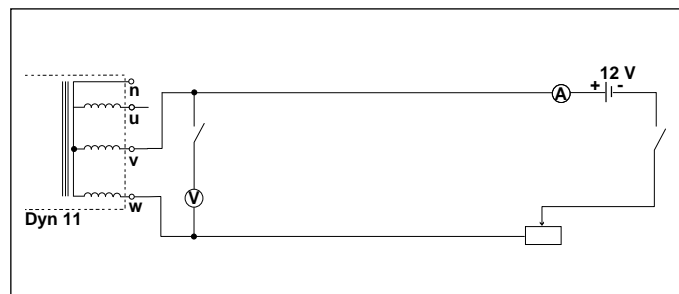
■ alimentazione alternata;



■ alimentazione continua lato MT;



■ alimentazione continua lato BT;



Guida alle prove di collaudo

Le Norme

Le modalità di prova e le relative tolleranze sono indicate nella parte III delle Norme CEI 14-4 ediz. 1983.

Descrizione della prova ad impulso con onda piena

Generalità

Per i trasformatori immersi in olio la tensione di prova è normalmente di polarità negativa, poiché si riduce così il rischio di scariche esterne accidentali nel circuito di prova.

L'impulso applicato per la prova è un impulso atmosferico ad onda piena normalizzato avente:

- fronte (tempo di salita) = $1,2 \mu\text{s} \pm 30\%$;
- coda (tempo all'emivalore) = $50 \mu\text{s} \pm 20\%$

Nondimeno si possono presentare casi nei quali la forma normalizzata d'impulso non può essere ragionevolmente ottenuta, a causa della bassa induttanza degli avvolgimenti o di un'elevata capacità verso massa. In questi casi possono essere adottate, previo accordo fra le parti, più ampie tolleranze.

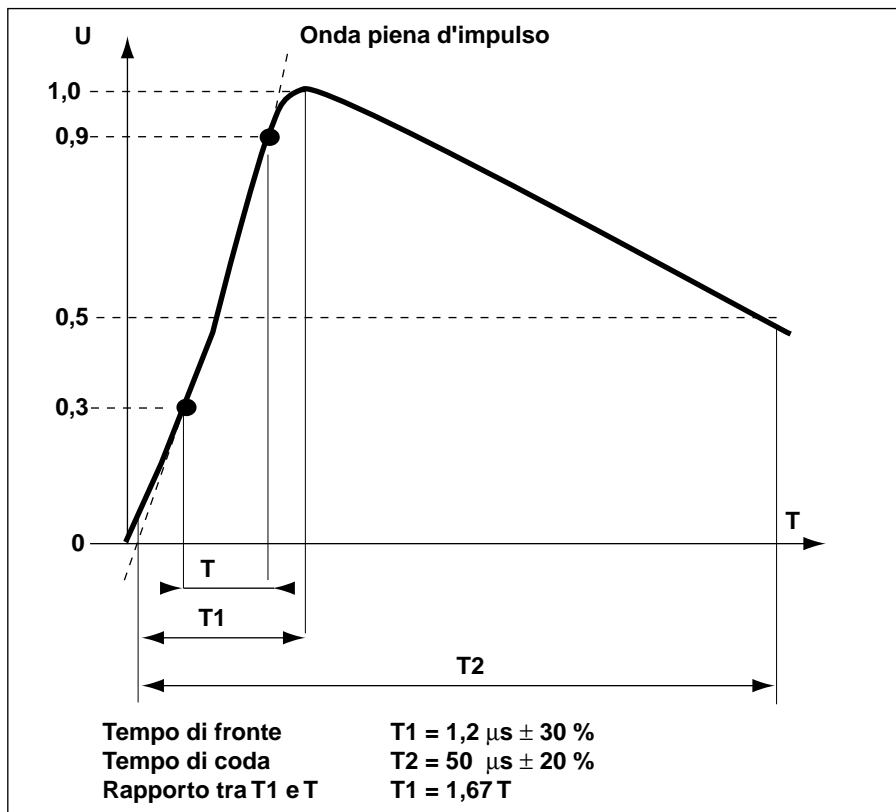
Sequenza di prova

La sequenza di prova consiste in un impulso con tensione compresa tra il

50% ed il 75% della piena tensione di prova e tre successivi impulsi alla piena tensione.

Questa sequenza si applica successivamente a ciascuno dei terminali di linea dell'avvolgimento in prova.

Nel caso di trasformatori trifasi, gli altri terminali di linea dell'avvolgimento vengono connessi a terra direttamente od attraverso una piccola impedenza, come ad esempio uno shunt per la misura della corrente. Se l'avvolgimento ha un terminale di neutro, questo viene connesso a terra direttamente od attraverso una piccola impedenza. La cassa deve essere connessa a terra.



Registrazioni nel corso delle prove

Le registrazioni oscillografiche effettuate durante le prove devono mostrare chiaramente la forma della tensione ad impulso applicata (durata del fronte, durata dell'emivalore). La registrazione deve comprendere almeno un canale di misura supplementare. Normalmente la migliore sensibilità per l'identificazione dei guasti si ottiene con la registrazione della corrente verso terra dell'avvolgimento in prova.

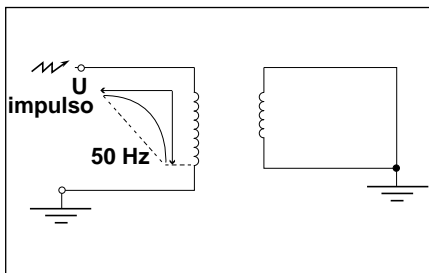
Criteri per la valutazione della prova

L'assenza di differenze significative nelle forme registrate delle correnti e delle tensioni a tensione ridotta rispetto quelle a valore nominale di prova, costituisce dimostrazione che l'isolamento ha sopportato con successo la prova. Se nascono dubbi sull'interpretazione di eventuali differenze tra gli oscillogrammi, si devono applicare tre ulteriori impulsi a piena tensione oppure si deve ripetere l'intera prova al terminale in discussione.

Prova d'impulso

Scopo della prova

Lo scopo di questa prova è di verificare la tenuta alla tensione d'impulso di ogni avvolgimento verso massa, in rapporto agli altri avvolgimenti e lungo lo stesso avvolgimento sottoposto a prova. Si può schematizzare questa prova come segue:



Nota

in alta frequenza la tensione d'impulso si ripartisce in modo esponenziale lungo l'avvolgimento in prova, mentre in bassa frequenza (es. 50,60 Hz) essa si ripartisce uniformemente lungo il medesimo.

Modalità di prova

L'onda d'impulso è applicata ad ogni terminale dell'avvolgimento MT essendo gli altri collegati a massa attraverso uno shunt così come, sia l'avvolgimento BT che la cassa, sono stabilmente a massa.

La prova consiste nell'applicare delle onde d'impulso di polarità negativa (al fine di ridurre i rischi di scarica esterna casuale nel circuito di prova) caratterizzate dalla forma normalizzata 1,2/50 μ s.

All'inizio della prova, il trasformatore

viene sottoposto ad una tensione d'impulso del 50% del valore nominale di prova.

Ogni fase subisce rispettivamente un'onda ridotta e tre onde piene al valore nominale della tensione di prova.

La calibratura della tensione d'impulso da applicare, viene effettuata per mezzo di uno spinterometro.

Durante ogni onda di prova, mediante un oscilloscopio catodico, vengono registrate simultaneamente, con velocità di scansione diverse, le seguenti due grandezze elettriche:

- tensione applicata;
- la corrente primaria risultante dalla propagazione dell'onda d'impulso lungo l'avvolgimento.

Per ragioni pratiche, mediante degli opportuni attenuatori vengono registrati, ad ampiezza costante, gli oscillogrammi della corrente a tensione piena di prova e di quella a tensione ridotta. Si facilita così il confronto degli oscillogrammi ottenuti.

Il certificato della prova d'impulso comprende la stampa degli oscillogrammi registrati nel corso della prova.

Il confronto fra i vari oscillogrammi permette di concludere se il trasformatore ha superato positivamente questa prova. In caso di guasto esso può essere evidenziato nell'oscillogramma dall'aumento dell'ampiezza della corrente e/o da una deformazione dell'onda tensione causata da:

- cedimento dell'isolamento verso massa;
- oppure:
- corto-circuito tra spire.

Descrizione della prova ad impulso con onda tronca

La prova ad impulso con onda tronca è una prova speciale per i terminali di linea di un avvolgimento. Quando è previsto di effettuare questa prova, essa viene combinata con quella ad onda piena in un'unica sequenza.

L'ordine seguito per l'applicazione dei diversi impulsi è:

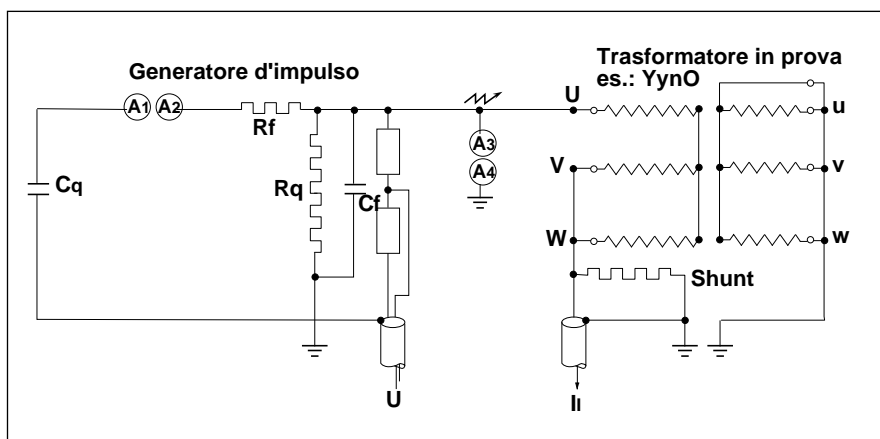
- un impulso ad onda piena con tensione ridotta;
- un impulso ad onda piena al 100%;
- uno o più impulsi ad onda tronca a tensione ridotta;
- due impulsi ad onda tronca al 100%;
- due impulsi ad onda piena al 100%.

Il valore di cresta dell'onda tronca deve essere lo stesso dell'onda piena.

Così come i canali di misura e le registrazioni oscillografiche sono gli stessi di quelli prescritti per le prove ad onda piena. Solitamente viene mantenuta la stessa predisposizione del generatore d'impulsi, aggiungendo soltanto il dispositivo di troncatura. L'onda normalizzata dell'impulso atmosferico deve avere una durata fino alla troncatura compresa tra 2 e 6 μ s.

Come per la prova ad impulso con onda piena, il rilievo dei guasti durante la prova ad impulso con onda tronca è basato sulla comparazione degli oscillogrammi registrati con onda tronca a tensione 100% ed a tensione ridotta.

Circuito di prova



Valori delle tensioni d'impulso

Tensione di riferimento [kV]	3,6	7,2	12	17,5	24	36
Tensione di tenuta a frequenza industriale (60 s) [kV]	10	20	28	38	50	70
Tensione d'impulso [kV]	40	60	75	95	125	170

Guida alle prove di collaudo

Le Norme

La procedura da seguire per la prova è descritta nelle Norme CEI 14-9.

Definizioni

■ **livello di pressione acustica, L_p :** è il valore espresso in decibels (dB) uguale a 20 volte il logaritmo decimale del rapporto tra la pressione acustica data e la pressione acustica di riferimento, la quale è di 20μ Pascals.

■ **livello di potenza acustica, L_w :** è il valore espresso in dB uguale a 10 volte il logaritmo decimale del rapporto tra la potenza acustica data e la potenza acustica di riferimento, la quale è di 1 picowatt.

■ **rumore di fondo:** è il livello ponderato A della pressione acustica quando il trasformatore non è energizzato.

Apparecchi di misura

Le misure devono essere fatte utilizzando un fonometro di classe 1. Inoltre il livello del rumore di fondo deve essere misurato immediatamente prima e dopo aver effettuato la misura del

trasformatore. Se la differenza tra L_p del rumore di fondo ed il livello risultante contemporaneamente dal rumore di fondo e quello del trasformatore è ≥ 10 dB, è possibile effettuare una sola misura del rumore di fondo senza che sia necessaria alcuna correzione del livello di rumore misurato dal fonometro.

Se la differenza è compresa tra 3 e 10 dB è necessario applicare le correzioni come risulta dalla tabella sottostante.

Pertanto se la differenza è inferiore a 3 dB la prova non è accettabile a meno che il livello risultante del rumore di fondo e del rumore del trasformatore non sia inferiore al valore garantito.

In un caso simile si prenderà per questa differenza un valore inferiore ed il livello totale diminuito di 3 dB potrà essere considerato come il limite superiore del livello di pressione acustica in questa posizione. Tutto ciò deve figurare nel certificato di collaudo.

Correzioni per il rumore di fondo

Secondo i livelli di pressione acustica sopraindicati e registrati in ciascuna delle posizioni di misura, questi possono essere corretti dell'influenza del rumore di fondo, in conformità alla tabella seguente:

Differenza tra L_p misurato con l'apparecchio in servizio e L_p del solo rumore di fondo in dB	Valore della correzione da sottrarre a L_p misurato con l'apparecchio in servizio per ottenere l' L_p dovuto all'apparecchio in dB
3	3
4÷5	2
6÷8	1
9÷10	0,5

Misura del livello di rumore

Scopo della prova

Questa prova ha lo scopo di verificare il livello del rumore prodotto dal trasformatore rispetto quello stabilito dalle Norme e/o dalle condizioni contrattuali.

Modalità di prova

Il rumore è provocato essenzialmente dal fenomeno della magnetostrizione che si sviluppa nei lamierini del circuito magnetico.

Dopo aver misurato il livello del rumore di fondo, si alimenta il trasformatore a vuoto con tensione e frequenza nominali e con il commutatore posizionato nella presa nominale. Si rileva quindi il livello di pressione acustica in diversi punti lungo il perimetro del trasformatore. Il livello di rumore può essere espresso in due modi:

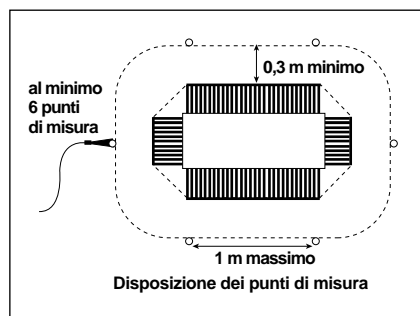
■ in livello ponderato A di **pressione acustica**, **Lp (A)**, misurata per mezzo di un fonometro ad una distanza

definita dal trasformatore.

Il valore ottenuto è la media quadratica dei seguenti valori misurati:

- a 1/3 ed a 2/3 dell'altezza della cassa quand'essa supera 2,5 m; a 1/2 della cassa per altezze inferiori,
- ad una distanza minima di 30 cm attorno il perimetro del trasformatore.

L'intervallo dei punti di misura è al massimo di 1 m ed al minimo di un valore tale che la prova comporti almeno 6 punti di misura.



■ in livello ponderato A di **potenza acustica** dell'apparecchio, **Lw (A)**, calcolata sulla base della pressione acustica per mezzo della formula seguente:

$$Lw (A) = Lp (A) + 10 \log S - X$$

Lw (A) = livello ponderato A della potenza acustica in dB

Lp (A) = pressione acustica in dB (A)

X = coefficiente di correzione in funzione del livello di fondo

S = superficie equivalente in m², definita dalla formula

$$S = 1,25 \times H \times P$$

dove

H = altezza del trasformatore in metri

P = lunghezza del contorno delle misure alla distanza di 30 cm, in metri

1,25 = coefficiente empirico avente lo scopo di considerare l'energia sonora irraggiata dalla parte superiore del trasformatore o dei suoi radiatori.

La potenza acustica tiene conto della geometria del trasformatore e permette di esprimere un livello di rumore indipendente dalla distanza di misura dal trasformatore; essa permette quindi di eseguire delle comparazioni tra apparecchi diversi.

Prova di tenuta al corto-circuito

Le Norme e la metodologia di prova

Come già precedentemente precisato questa prova viene realizzata in laboratori esterni indipendenti a causa della notevole potenza richiesta. Essa è regolamentata dalla Parte V^a delle Norme CEI 14-4 le quali precisano che i trasformatori devono essere calcolati e costruiti per resistere senza danni agli effetti termici e meccanici di corti-circuiti esterni.

Generalità

Il trasformatore deve avere precedentemente superato tutte le prove di accettazione. Per l'esecuzione della prova di corto-circuito non è richiesto il montaggio di eventuali accessori. Se gli avvolgimenti sono muniti di prese, devono essere misurate la reattanza X ed eventualmente la resistenza R su tutte le prese sulle quali è prevista l'esecuzione della prova di corto-circuito. All'inizio della prova la temperatura media degli avvolgimenti deve essere compresa tra 0°C e 40°C.

■ **corrente di corto-circuito**
la corrente di corto-circuito è caratterizzata da:

X/R	1	1,5	2	3	4	5	6	8	10	≥ 14
$k \times \sqrt{2}$	1,51	1,64	1,76	1,95	2,09	2,19	2,27	2,38	2,46	2,55

Valori del fattore $K \times \sqrt{2}$

□ un valore **asimmetrico** di cresta uguale a $K \times \sqrt{2} \times I_{cc \text{ simm.}}$, dove $K \times \sqrt{2}$ è un fattore che dipende dal rapporto delle reattanze e resistenze X/R (vedere tabella sottostante). Questa corrente della durata inferiore ad un periodo, è la fonte degli sforzi elettrodinamici che si sviluppano nel trasformatore.

□ un **valore simmetrico** di corrente di corto-circuito che provoca principalmente l'effetto termico nel trasformatore. Questa corrente è funzione tra l'altro della tensione di corto-circuito.
(Esempio: $I_{cc \text{ simm.}}$ per $U_{cc} 4\% = 25 \times I_n$).

La corrente di corto-circuito simmetrica deve essere calcolata per trasformatori di potenza nominale ≥ 3150 kVA, tenendo conto dell'impedenza di corto-circuito e dell'impedenza della rete, così come per potenze ≤ 3150 kVA se l'impedenza della rete è superiore al 5% dell'impedenza di corto-circuito (altrimenti l'impedenza della rete è trascurabile).

La tolleranza ammessa tra i valori specificati ed i valori misurati è del $\pm 10\%$ per la corrente simmetrica di corto-circuito e del $\pm 5\%$ per il valore di cresta della corrente.

■ potenza apparente

Nelle specifiche tecniche della richiesta d'offerta, l'acquirente deve precisare la potenza apparente di corto-circuito della rete di alimentazione del trasformatore per permettere al costruttore di calcolare il valore della $I_{cc \text{ simm.}}$ da prendere in conto nel calcolo e nelle prove. Se il valore della potenza di corto-circuito non viene specificato, vengono utilizzati i valori qui di seguito riportati:

Tensione nominale di riferimento [kV]	Potenza apparente di corto-circuito in MVA
7,2 - 12 - 17,5 - 24	500
36	1000

■ commutatore di regolazione

Questo dispositivo deve essere in grado di sopportare, come gli avvolgimenti, i valori della corrente di corto-circuito;

■ isolatori di neutro

L'isolatore di neutro degli avvolgimenti a zig-zag od a stella deve essere dimensionato per la massima corrente che lo può attraversare;

■ temperatura

La temperatura massima degli avvolgimenti dopo la prova **non deve essere superiore a 250°C per gli avvolgimenti in rame e 200°C per quelli in alluminio.**

Scopo della prova

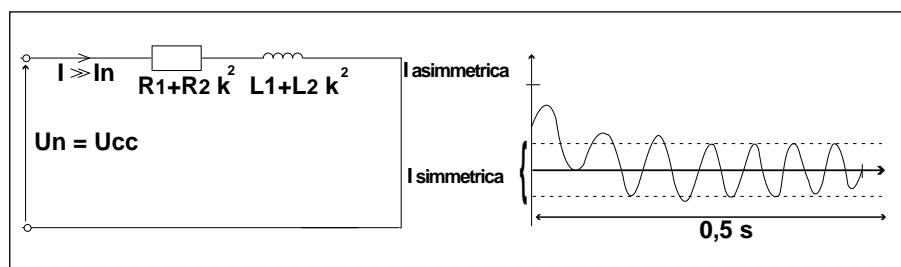
Scopo di questa prova è di verificare la tenuta del trasformatore alle correnti di corto-circuito definite dalle Norme. Lo schema di prova è identico a quello realizzato per la misura delle perdite a carico, ma in questo caso il trasformatore è sottoposto ad una tensione uguale alla nominale e quindi ad una corrente di corto-circuito elevata.

Esempio: per un trasformatore caratterizzato da una $U_{cc} = 4,0\%$ (dalla misura delle perdite a carico) la corrente di corto-circuito può raggiungere in modulo:

$I_{\text{simmetrica}} = 25 I_n$
con momento d'inserzione $U = 0$
 $I_{\text{asimmetrica}} = K \times \sqrt{2} \times 25 I_n$
Il trasformatore risulta quindi sottoposto a:

■ degli sforzi elettrodinamici considerevoli poichè la Forza = costante $\times I^2$;

■ un riscaldamento che può risultare eccessivo.



Modalità di prova

Per ottenere la corrente di corto-circuito uno degli avvolgimenti è alimentato con una tensione che non può essere superiore a 1,15 volte la sua tensione nominale, mentre l'altro avvolgimento viene posto in corto-circuito. Inoltre l'istante d'inserzione del valore di cresta iniziale della corrente nell'avvolgimento viene regolato con un sincronizzatore.

Sia i valori di queste correnti che quelli della tensione applicata ai terminali di linea devono essere registrati mediante un oscilloscopio.

Per i trasformatori trifasi **il numero totale delle prove deve essere di 9, tre per ogni fase, con una durata di 0,5 secondi**. È ammessa una tolleranza del $\pm 10\%$.

Salvo indicazioni contrarie nelle specifiche tecniche contrattuali, le prove su ciascuna fase, per i trasformatori con prese di regolazione, vengono eseguite su posizioni differenti del commutatore di regolazione e più precisamente:

- 3 prove sulla posizione corrispondente al rapporto di trasformazione il più elevato, su una delle colonne esterne;

- 3 prove sulla presa principale sulla colonna centrale;

- 3 prove sulla posizione corrispondente al rapporto di trasformazione il più basso, sull'altra colonna esterna.

Dopo ogni prova vengono misurati i valori di impedenza e comparati a quelli di origine.

Rilievo dei guasti e conseguenze di prova

Dopo la prova, il trasformatore viene opportunamente ispezionato.

I risultati delle misure delle reattanze di corto-circuito così come gli oscillogrammi registrati nelle differenti condizioni di prova, vengono esaminati per ricercare degli indizi di eventuali anomalie.

Il trasformatore è poi nuovamente sottoposto alle prove di accettazione ivi comprese le prove dielettriche che saranno eseguite al 75% del loro valore iniziale. Successivamente il trasformatore viene aperto per un attento esame visivo volto a scoprire eventuali difetti apparenti.

Il trasformatore ha superato positivamente la prova di corto-circuito se:

- le prove di accettazione sono state ripetute favorevolmente;

- le misure durante le prove di corto-circuito e l'ispezione visiva dopo l'apertura del trasformatore non rilevano alcun difetto;

- la reattanza di corto-circuito misurata dopo le prove non differenzia, rispetto quella misurata inizialmente:

- **di più del 2% per i trasformatori con avvolgimenti concentrici**. Tuttavia quando il conduttore dell'avvolgimento è in banda, a seguito di accordo tra costruttore e cliente, può essere adottato un limite più elevato ma non superiore al 4% per trasformatori aventi una Ucc uguale o superiore al 3%;

- **di più del 7,5% per trasformatori con avvolgimenti concentrici non circolari (oblunghi)** aventi una Ucc uguale o superiore al 3%. Il valore del 7,5% può essere ridotto per accordo particolare tra costruttore ed acquirente, senza però scendere al disotto del 4%.

Collaudo di trasformatori a 60 Hz con prove eseguite a 50 Hz

Essendo i nostri impianti di prova alimentati a 50 Hz, qualora si debba eseguire il collaudo di trasformatori a 60 Hz, è necessario adottare i seguenti accorgimenti:

Misura della tensione di corto-circuito e delle perdite dovute al carico:

■ La tensione di corto-circuito percentuale ($U_{cc}\%$) ha due componenti: attiva e reattiva.

□ tensione attiva:

$$U_r\% (60\text{Hz a } 75^\circ\text{C}) = 100 \cdot \frac{P_{cc}}{S_n}$$

□ tensione reattiva:

$$U_x \text{ 60Hz} =$$

$$\frac{60}{50} \sqrt{U_{cc}^2(\text{ambiente, 50Hz}) - U_r^2(\text{ambiente})}$$

e

$$U_{cc}\% (60\text{Hz } 75^\circ\text{C}) =$$

$$\sqrt{U_r^2(60\text{Hz, } 75^\circ\text{C}) + U_x^2(60\text{Hz})}$$

P_{cc} = perdite dovute al carico a 75°C ed a 60Hz

S_n = potenza nominale

■ Le perdite per effetto Joule sono indipendenti dalla frequenza, mentre le perdite addizionali P_s , che sono principalmente delle perdite per correnti di Foucault, variano in modo inversamente proporzionale alla resistività ed in quello direttamente proporzionale al quadrato della frequenza.

Per cui le perdite addizionali P_{add2} alla temperatura θ_2 e frequenza f_b , e le perdite P_{add1} alla temperatura θ_1 e frequenza f_a stanno nel rapporto:

$$\frac{P_{add2}}{P_{add1}} = \frac{x + \theta_1}{x + \theta_2} \cdot \frac{f_b^2}{f_a^2}$$

dove

$x = 235$ per il rame

225 per l'alluminio

Misura delle perdite a vuoto

Le perdite a vuoto sono essenzialmente dovute alle perdite nel circuito magnetico e sono causate dall'isteresi magnetica e dalle correnti di Foucault.

A induzione costante le perdite per isteresi variano proporzionalmente alla frequenza mentre quelle per correnti di Foucault variano con il quadrato della stessa.

Per restare ad induzione costante si deve applicare a 50 Hz una tensione

$$U = U_n \times \left(\frac{50}{60}\right)$$

Le perdite a vuoto a 60 Hz (P_{V60}) si calcolano dalle perdite P_{V50} misurate a 50 Hz con la formula seguente:

$$P_{V60} = 1,32 \times P_{V50}$$

Prove dielettriche

■ La prova a tensione indotta deve durare:

$$t = 120 \times \frac{f_n}{f_p}$$

con un minimo di 15s per $f_p \geq 2f_n$ con $f_p \geq 120$ Hz, dove

f_n = frequenza nominale

f_p = frequenza di prova

■ La prova a tensione applicata deve essere realizzata ad una frequenza che deve essere almeno uguale all'80% di quella nominale.

Di conseguenza per $f_n = 60$ Hz, la frequenza f_p di prova deve essere:

$$f_p \geq 0,80 \times 60 \text{ e cioè } \geq 48 \text{ Hz}$$

Dunque la prova a 50 Hz è valida senza maggiorazione del tempo di prova.

Prova di riscaldamento

In considerazione del fatto che noi utilizziamo il metodo del carico simulato chiamato anche di corto-circuito, si alimenta il trasformatore con una corrente che genera le perdite totali (P_t) uguali alla somma delle perdite a vuoto e di quelle dovute al carico.

Dopo la stabilizzazione, si deve ridurre la tensione di alimentazione per ottenere negli avvolgimenti la I_n , tutto a frequenza nominale.

Come durante le altre prove, noi siamo a 50 Hz in luogo di 60 Hz, per cui le perdite a carico da sommare a quelle a vuoto, si ottengono con la seguente formula:

$$P_{CC60} = P_j \frac{x + \theta_2}{x + \theta_1} + P_{add50} \cdot \frac{x + \theta_1}{x + \theta_2} \cdot \frac{60^2}{50^2}$$

Dopo la stabilizzazione per ottenere a 50 Hz le stesse perdite che a I_n e 60 Hz dovremo alimentare il trasformatore con una corrente:

$$I = \sqrt{\frac{P_{60}}{P_{50}}} \cdot I_n$$

Misura del livello rumore

Poichè la potenza sonora è proporzionale al quadrato della frequenza, l'aumento del livello di rumore è dell'ordine di

$$10 \log (60/50)^2 = 1,6 \text{ dB}$$

È dunque possibile valutare il livello di rumore di un trasformatore a 60 Hz mediante una prova a 50 Hz alla stessa induzione, a condizione di accettare una certa approssimazione che si aggiunge agli inevitabili altri errori di misura.

Bibliografia e corrispondenza delle Norme

IEC	Publicazioni internazionali (International Electrical Commission)	IEC 76-1	IEC 76-2	IEC 76-3	IEC 76-1	IEC 76-5	IEC 296	IEC 354	IEC 270	IEC 551	
HD	Documento europeo d'armonizzazione (Comitato Europeo di Normalizzazione Elettrica)	HD 398-1	HD 398-2	HD 398-3	HD 398-4	HD 398-5				HD 399 S2	HD 428 S1
	Trasformatori di potenza: Generalità	■									
	Trasformatori di potenza: Riscaldamento		■								
	Trasformatori di potenza: Livelli d'isolamento e prove			■							
	Trasformatori di potenza: Prese e connessioni				■						
	Trasformatori di potenza: Tenuta al corto-circuito					■					
	Specifica degli olii minerali isolanti nuovi						■				
	Guida di carico per trasformatori immersi in olio							■			
	Misure delle scariche parziali								■		
	Determinazione del livello di rumore									■	
Italia											
CEI 14-4	Trasformatori di potenza	■	■	■	■	■					
CEI 10-1	Oli minerali isolanti per trasformatori						■				
CEI 14-13	Trasformatori di distribuzione 50/2500 kVA										■
CEI 14-14	Trasformatori di distribuzione 50/2500 kVA										■
CEI 14-9	Determinazione del livello di rumore									■	
Francia											
NFC 52-100	Transformateurs de puissance	■	■	■	■	■					
NFC 52-112-1	Transformateurs triphasés immergés dans l'huile, de 50 à 2500 kVA, de tension la plus élevée ne dépassant pas 24 kV dépassant 24 kV										■
NFC 52-112-3	Transformateurs triphasés immergés dans l'huile, de 50 à 2500 kVA, de tension la plus élevée ne dépassant pas 24 kV dépassant 36 kV										■
NFC 52-112-4	Détermination de la caractéristique de puissance d'un transformateur avec des courants de charge non sinusoïdaux										■
NFC 52-101	Huiles minérales isolantes neuves pour transformateurs						■				
Germania											
DIN 42 500	Drehstrom - OI - Verteilungstransformatoren, 50 Hz, 50 bis 2500 kVA										■
VDE 0532 Teil 1	Allgemeines	■									
VDE 0532 Teil 2	Übertemperaturen		■								
VDE 0532 Teil 3	Isolationspegel und Spannungsprüfungen			■							
VDE 0532 Teil 4	Ansapfungen und Schaltungen				■						
VDE 0532 Teil 5	Kurzschlußfestigkeit					■					
VDE 0532 Teil 7	Bestimmung der Geräuschpegel									■	
	Belastbarkeit von Öltransformatoren							■			
VDE 0370	Neue Isolierole für Transformatoren										
Belgio											
NBN C 52-223	Transformateurs triphasés de distribution	■	■	■	■	■					
NBN - HD 428,1 S	Transformateurs triphasés immergés dans l'huile, de 50 à 2500 kVA, de tension la plus élevée ne dépassant pas 24 kV dépassant 24 kV										■
	Guide de charge pour transformateurs immergés dans l'huile						■				
NBN C 27 101	Spécification des huiles minérales isolantes neuves						■				
NBN C 52 001	Mesure des niveaux de bruit des transformateurs									■	
Inghilterra											
BS 171	Power transformers	■	■	■	■	■					
BS 148	Unused mineral insulating oils for transformers										
BS 7735-94								■			

Bibliografia e corrispondenza delle Norme

IEC	Publicazioni internazionali (International Electrical Commission)	IEC 76-1	IEC 76-2	IEC 76-3	IEC 76-1	IEC 76-5	IEC 296	IEC 354	IEC 270	IEC 551	
HD	Documento europeo d'armonizzazione (Comitato Europeo di Normalizzazione Elettrica)	HD 398-1	HD 398-2	HD 398-3	HD 398-4	HD 398-5				HD 399 S2	HD 428 S1
Spagna											
UNE 20-101	Trasformadores de potencia	■	■	■	■	■					
UNE 20-110	Guida de carga para transformadores sumergidos en aceite							■			
UNE 21-315	Medida de los niveles de ruido de los transformadores									■	
UNE 21-320/5	Prescripciones para aceites minerales aislantes nuevos						■				
UNE 20-138	Transformadores trifásicos para distribución en baja tensión de 25 a 2500 kVA, 50Hz										■
UNE 5201											
UNE 5204 D											
Danimarca											
DEFU	Technical regulations for distribution transformers	■	■	■	■	■		■		■	
Svezia											
SS 427 01 01	Power transformers (sauf divergence aux clauses 2 de IEC 76-1 et 5 de IEC 76-3)	■	■	■	■	■					
SS IEC 551	Measurement of transformers sound levels									■	
SS 427 01 06	Oil immersed power transformers - Loading capacity							■			
SS 427 02 01	Distribution transformers										
Olanda											
NEN 2761	Energietransformatoren. Algemeen	■									
NEN 2762	Energietransformatoren. Temperatuurverhoging		■								
NEN 2763	Energietransformatoren. Isolatie-niveaus en dielektrische proeven (in voorbereiding)			■							
NEN 2764	Energietransformatoren. Aftakkingen en schakeling				■						
NEN 2765	Energietransformatoren. Kortsluitskelingen					■					
NEN 3184	Energietransformatoren.	■									
NEN 3541	Kortsluitsterke van energietransformatoren met vermogens tot en met 1600 kVA (vervallen).										
Norvegia											
NEN 05.71	Norske normen for krafttransformatorer: power transformers	■	■	■	■	■					
Austria											
OVE-M 20, TEIL 1	Allgemeines	■									
OVE-M 20, TEIL 2	Übertemperaturen		■								
OVE-M 20, TEIL 3	Isolationspegel und Spannungsprüfungen			■							
OVE-M 20, TEIL 4	Anzapfungen und Schaltungen				■						
OVE-M 20, TEIL 5	Kurzschlussfestigkeit					■					
Portogallo											
Non esistono normative particolari											
Finlandia											
Non esistono normative particolari											