

**TRANSFORMATEUR MONO-PHASE
TRANSFORMATEUR TRIPHASE**

TRANSFORMATEUR MONO-PHASE

MOD.x190

TRANSFORMATEUR TRIPHASE

MOD.x195

MANUEL OPERATIF



**COMPANY
WITH QUALITY SYSTEM
CERTIFIED BY DNV
=ISO 9001/2000=**

italtec srl - Technical Training Systems

Via privata Liguria 3

20090 FIZZONASCO - MILANO - ITALY

Tel +39 02 90 721 606 Fax +39 02 90 720 227

e-mail italtec@italtec.it <http://www.italtec.it>

COPYRIGHT NOTICE Ó

Tout droits réservés. Aucune partie de cette publication ne peut être reproduite, photocopiée ou archivée dans des systèmes d'écriture ou transmise sous toute forme et par tout moyen électronique, mécanique ou enregistré par d'autre moyen, sans notre préalable autorisation écrite.

FRx190MN

Rev.01 < > -05-2007

Made in Italie

**TRANSFORMATEUR MONO-PHASE
TRANSFORMATEUR TRIPHASE**

1) TRANSFORMATEUR MONOPHASE

Données de la plaque:

Puissance: 1kVA.	Primaire: 220V (110+110)	Secondaire : 110V (55+55)
------------------	--------------------------	---------------------------

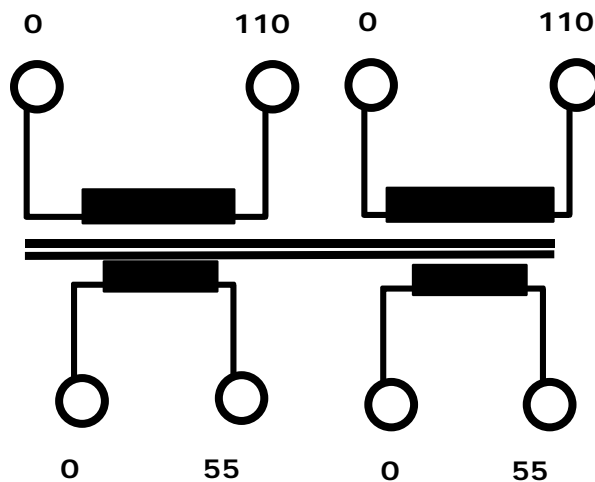


Schéma des connexions:

2) TRANSFORMATEUR TRIPHASE

Données de la plaque:

Puissance: 1kVA;	Primaire: 380 (3x2x190)	Secondaire:220V (3x2x110);
------------------	--------------------------	-----------------------------

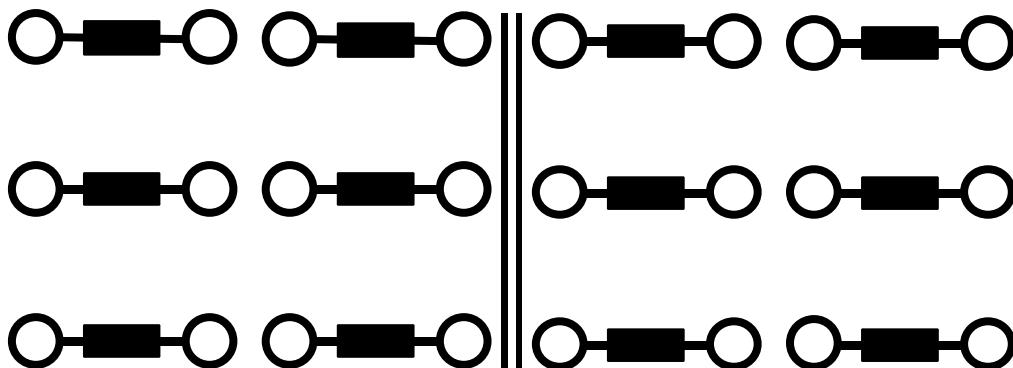
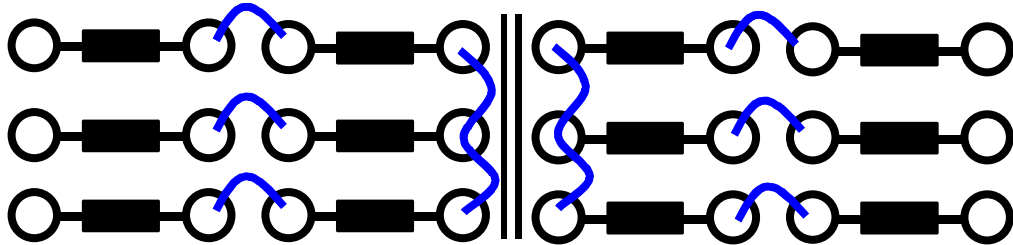


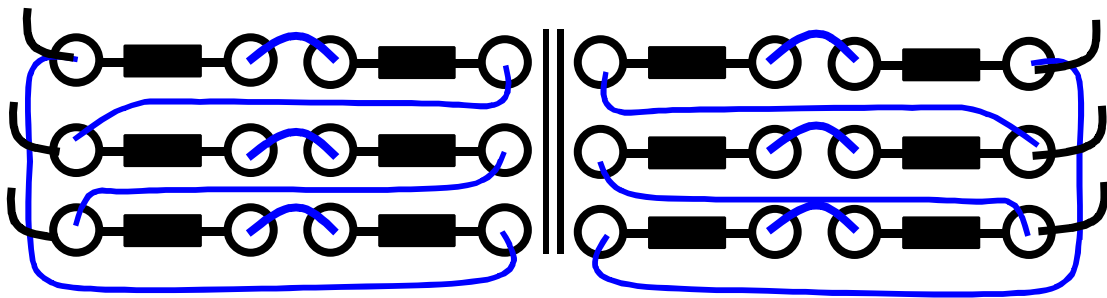
Schéma des enroulements

**TRANSFORMATEUR MONO-PHASE
TRANSFORMATEUR TRIPHASE**

Transformateur triphasé - Connections étoile-étoile



Transformateur triphasé - Connections triangle-triangle



TRANSFORMATEUR MONO-PHASE TRANSFORMATEUR TRIPHASE

COURS N 1 - ESSAI D'UN TRANSFORMATEUR TRIPHASE A VIDE

L'essai à vide d'un transformateur permet de relever des paramètres indispensables pour l'étude de la machine; ces derniers sont les circuits équivalents et le rendement. Etudions le circuit équivalent au transformateur; ceci en considérant la charge il peut représenter **vers la ligne; est en l'alimentent avec une tension nominale les bornes secondaires ouvertes** (voir fig.1).

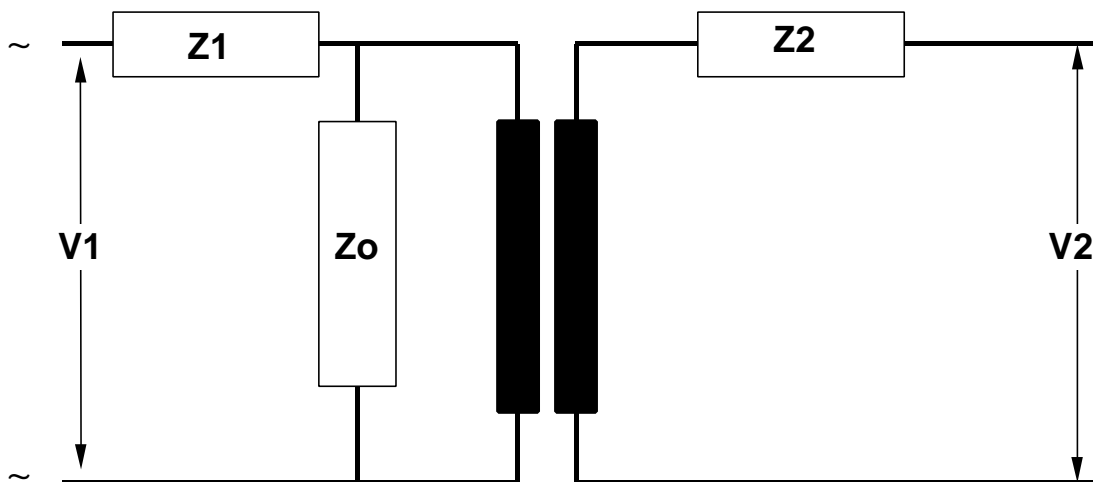


fig.1 a) circuit équivalent d'un transformateur monophasé
b) schéma équivalent de l'impédance Z_0

Le circuit est sous la forme de deux impédances en série ($Z_0 + Z_1$); L'impédance Z_1 , qui est relatif au bobinage primaire est négligeable par rapport à la valeur de l'impédance Z_0 . Pour les transformateurs normaux le rapport entre les deux impédances est environ de 1/500.

Par conséquent, on peut déduire que seulement Z_0 existe et pourtant après l'essai à vide on doit déterminer les paramètres en dérivation, c'est à dire les éléments équivalents au noyau de fer.

On peut parvenir à la même conclusion avec des considérations énergétiques, c'est-à-dire que la puissance absorbée à vide par le transformateur est essentiellement la puissance perdue dans le fer du nucleus; **ceci est provoqué par le phénomène d'hystérésis et des courants parasites.**

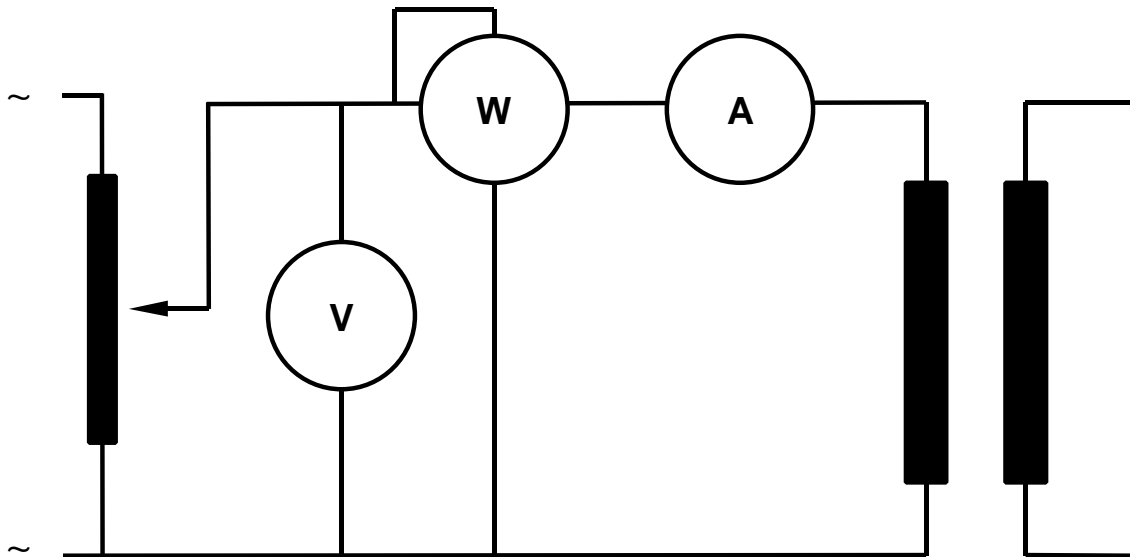
On peut négliger les pertes dans le cuivre du primaire car elles sont calculées considérant l'élévation au 2 de la valeur du courant.

En effet pour un courant à vide d'une valeur de 5% du courant nominal, les pertes ont une valeur de 0.25% des pertes de charge, par conséquent elles sont insignifiantes.

TRANSFORMATEUR MONO-PHASE TRANSFORMATEUR TRIPHASE

Cela est aussi valable pour la puissance réactive dispersée, par rapport à la puissance magnétique

Pour l'essai à vide on insère dans le circuit un variateur afin de faire varier la tension (voir Fig.2). Essai d'un transformateur monophasé à vide



Dans le circuit sont insérés:

- un fréquencemètre;
- un voltmètre pour courant alternatif d'une portée supérieure à la valeur nominale;
- un ampèremètre pour courant alternatif d'une portée de 5 à 10% du courant nominal (la plus haute valeur pour les petits transformateurs)
- un wattmètre avec une portée en rapport avec les précédentes.

Le circuit absorbe un courant dont le déphasage par rapport à la tension est important, ceci à cause de la composante magnétique; par conséquent il faut utiliser un wattmètre dont le facteur de puissance est bas.

Le circuit possède une impédance élevée, il faut brancher les voltmètres en amont des ampèremètres, ceci pour diminuer les erreurs d'autoconsommation des instruments et les rendre insignifiantes.

En général l'essai à vide s'effectue sur le côté basse tension, à condition que celle-ci ait une valeur, pour laquelle on peut employer des instruments de portée appropriée.

En alimentant le transformateur avec une tension et une fréquence nominale, on peut lire les valeurs suivantes: V_n qui est la tension nominale f qui est la fréquence nominale i_0 qui est le courant à vide P_0 qui est la puissance à vide

TRANSFORMATEUR MONO-PHASE TRANSFORMATEUR TRIPHASE

ANALYSE DES RESULTATS

Comme nous avons déjà, vu nous pouvons considérer que la puissance absorbée à vide coïncide avec les pertes dans le fer et donc nous pouvons écrire, $P_o = P_f$: pf.
Et en pourcentage $P_f \% = 100 \text{ metre } p_f / s_n$ avec S_n la puissance nominale de la machine.

On peut aussi évaluer le courant à vide, en calculant sa valeur en pourcentage:

$$I_o \text{ io}\% = 100 \text{ metre } i_o / I_n - I_n$$

Ces valeurs en pourcentage nous permettrons d'avoir déjà une idée de la qualité du transformateur.

A l'occurrence on peut déjà déduire d'autres données intéressantes:

- le facteur de puissance à vide $\cos \varphi_0 = P_o / V I_o$
- la puissance magnétisante $Q_u = P_o \tan \varphi_0$ - le courant magnétique $I_u = I_o \sin \varphi_0$
- le courant actif $I_a = I_o \cos \varphi_0$ et les paramètres d'admittance équivalente parallèle

. $I_o Y_o = G_o = Y_o \cos \varphi_0$ $B_o = Y_o \sin \varphi_0$ V_n Ou les paramètres de l'impédance équivalente parallèle: $V_n Z_o Z_o = : R_o = ; X_o = - I_o \cos \varphi_0 \sin \varphi_0$

COURBE À VIDE

On doit effectuer les épreuves de la machine à vide en variant la tension de zéro jusqu'à une valeur plus haute que la tension nominale, ceci pour bien mettre en évidence le fonctionnement de la machine, au moyen des courbes obtenues.

Les courbes, tracées en fonction de la tension, sont:

- - courbe de la puissance $P_o = f(V)$
- - courbe du courant $I_o = f(V)$
- - courbe du facteur de puissance $\cos \varphi_0 = f(V)$
- - courbe de la Puissance $P_o = f(V)$ Cette courbe a un développement à peu près parabolique (fig.3).

TRANSFORMATEUR MONO-PHASE TRANSFORMATEUR TRIPHASE

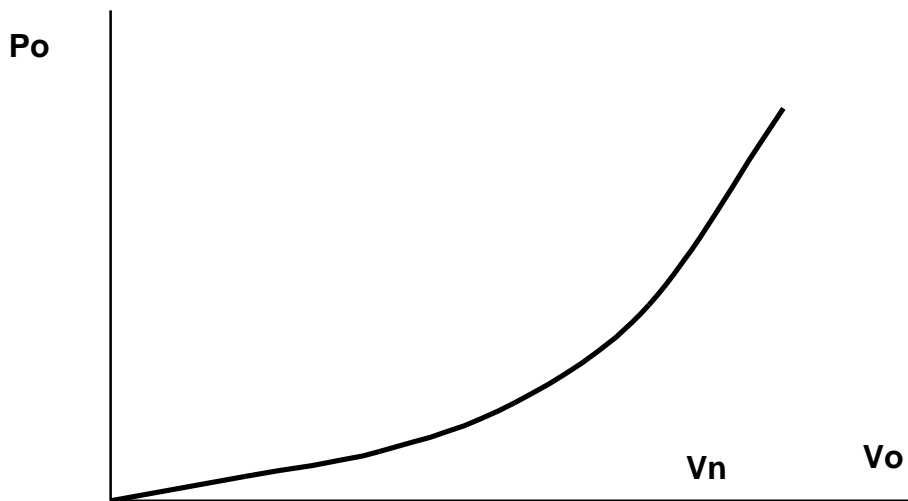


Fig3 courbe de la puissance d'un transformateur mono phase à vide $P_o = f(V)$

La puissance à vide coïncide avec les pertes par hystérésis et les pertes par courant parasite; les **deux pertes dépendantes d'une certaine approximation** ceci à cause de l'exposant de Steinmetz, du carré de l'induction.

Nous savons que dans un transformateur la tension et l'induction sont linéairement proportionnelle, selon la formule $E = 4,44 fNB_{max} A$, il y a une dépendance quadratique entre puissance à vide et tension.

2) Courbe du Courant $I_o = f(V)$

Le courant à vide, mis en évidence, est la somme de la composante magnétisante et de la composante active; cette dernière est due aux pertes dans le fer.

Toutefois, en considérant en priorité celle du courant magnétisé, la courbe $I_o = f(V)$ répètera le cours d'une courbe de magnétisation, où les axes habituels auront été changés (fig.4).

TRANSFORMATEUR MONO-PHASE TRANSFORMATEUR TRIPHASE

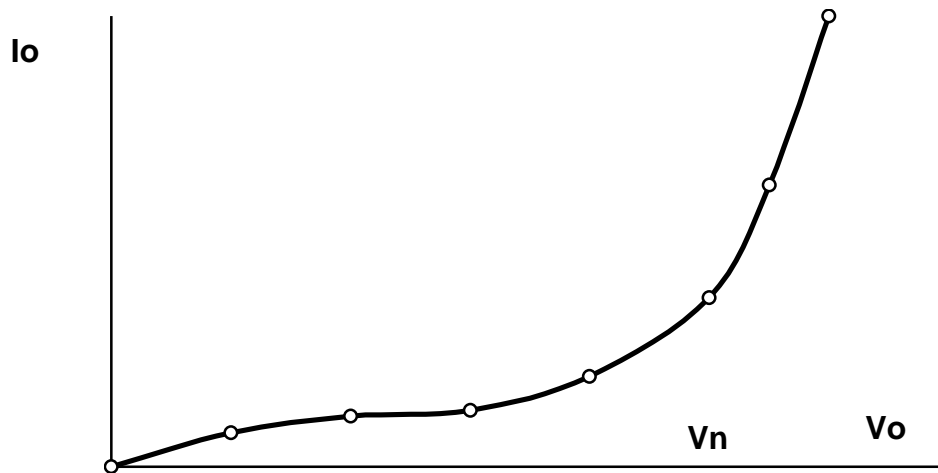


fig.4 - courbe du courant d'un transformateur monophasé a vide $I_0 = f(V)$.

En effet le courant magnétisant est proportionnel à l'intensité du champ magnétique H et la tension dépend de l'induction B .

C'est pour cela que le courant aura un développement croissant faible avec la tension pour des valeurs basses, puis il augmentera plus rapidement que la valeur nominale de tension car il approche de la saturation.

Le genou de la courbe sera moins marqué et quand l'entrefer équivaut au noyau magnétique, il sera plus grand.

En relevant le courant à vide on observera qu'il présente une grande déformation, pour les tensions élevées, l'instrument devra être de préférence électrodynamique.

Un instrument à fer mobile est moins fiable toutefois, dans certaines limites, il peut donner des mesures qui sont dignes de foi. L'usage d'instruments à bobine mobile avec redresseur est à éviter, ceci car le redresseur est sensible à la valeur moyenne, et donc il peut donner des résultats complètement faux, le facteur de forme se modifie à cause de l'onde.

3) Courbe du Facteur de puissance $\cos \phi_0 = f(V)$

Le facteur de puissance à vide a une valeur variable et décroissante par rapport à l'augmentation de la tension (fig.5).

**TRANSFORMATEUR MONO-PHASE
TRANSFORMATEUR TRIPHASE**

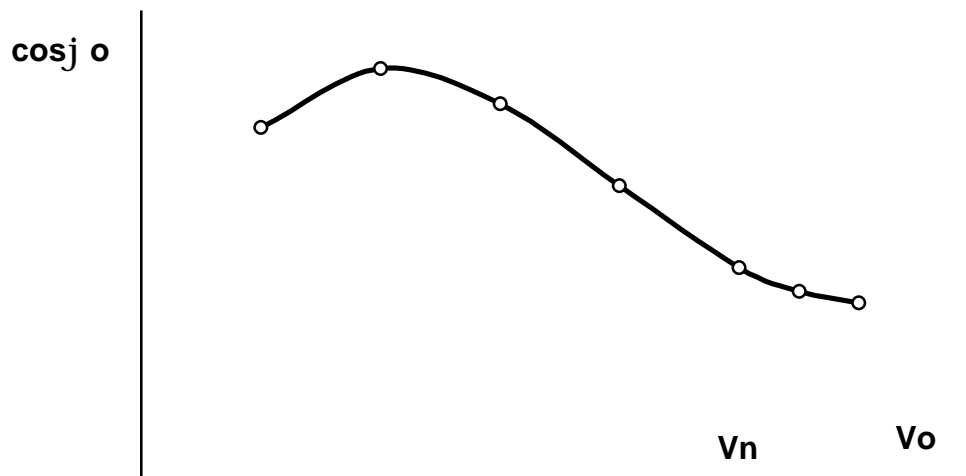


fig.5 courbe du facteur de puissance d'un transformateur mono phase et à vide $\cos \phi = f(V)$

Ceci est dû à la saturation progressive et graduelle du fer qui va causer une augmentation considérable de la composante magnétisante du courant, et qui est très supérieure à l'augmentation, de la composante active.

On a:

$$I_u \operatorname{tg} \phi = I_a$$

La plus haute augmentation du numérateur produit une augmentation du coin et une diminution conséquente du facteur de puissance.

Pour des valeurs de tension proches du zéro, le facteur de puissance à vide peut diminuer de nouveau ; ceci si le matériel dénonce un genou inférieur sensible dans la magnétisation, pour lequel le courant a une pente plus élevée que le trait suivant.

En considérant le changement du coin caractéristique, les paramètres équivalents dérivés R_o et X_o ne seront pas constants, ils changeront en fonction de la tension. C'est pour cette raison qu'ils devront être calculés avec référence à la tension nominale, comme il a été fait en précédence.

TRANSFORMATEUR MONO-PHASE TRANSFORMATEUR TRIPHASE

COURS N 2 - ESSAI D'UN TRANSFORMATEUR TRIPHASE' À VIDE

L'essai du transformateur tri phase à vide a les mêmes objectifs que celui de l'essai d'un **transformateur monophasé en l'occurrence la détermination**, des paramètres équivalents dérivés, et des pertes dans le fer de la machine.

Pour réaliser cet essai on alimentera le transformateur avec un variateur de tension triphasé.

Etant donné qu'il s'agit de tensions tri phases qui sont évidemment identiques, il est suffisant d'insérer un voltmètre entre deux fils pour mesurer la valeur de la tension enchaînée.

Si on veut plus de précision, on peut insérer trois voltmètres sur les trois phases et on prendra comme valeur mesurée la valeur moyenne des trois lectures.

Le transformateur triphasé est un cas de charge détraquée, ceci à cause de la diversité des trois circuits magnétiques; c'est pour cela qu'il faut employer trois ampèremètres chacun sur une phase voir la (fig.6).

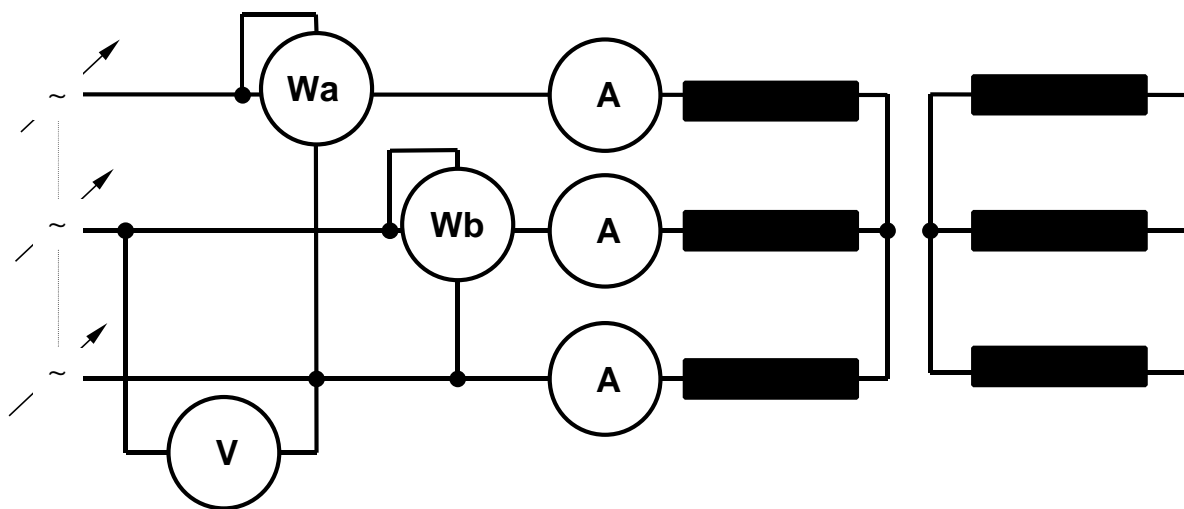


Fig. 6 - essai d'un transformateur triphasé à vide

Si on n'a pas à disposition trois ampèremètres, on pourra utiliser un ampèremètre, commutable sur les trois phases.

Afin de déterminer la puissance et le facteur de puissance à vide il faut utiliser la méthode des trois lectures ou la méthode des quatre lectures.

Comme il s'agit de charge détraquée a) méthode des trois lectures,

- 1) la puissance active: $P_o = A + B$
- 2) La puissance réactive: $A - B + C_2 \quad Q_o = - V_3$

TRANSFORMATEUR MONO-PHASE TRANSFORMATEUR TRIPHASE

- 3) Le facteur de puissance $Q_0 \cos \varphi_0 = \cos \arctan P_0$
- b) Méthode des quatre lectures:
 - 1) La puissance active $P_0 = A + B$:
 - 2) La puissance réactive $A - B + 2(B' - A') Q_0 = -\sqrt{3}$
 - 3) Le paramètre $x A + 2B + A' - B' x = 2A + B - A' + B'$
 - 4) $\cos \varphi_0$

Dans la pratique, le déséquilibre des trois phases est surtout un déséquilibre de module, plus que d'angle, le transformateur réagit comme une charge équilibrée avec un courant à vide moyen entre les courants de chaque phase.

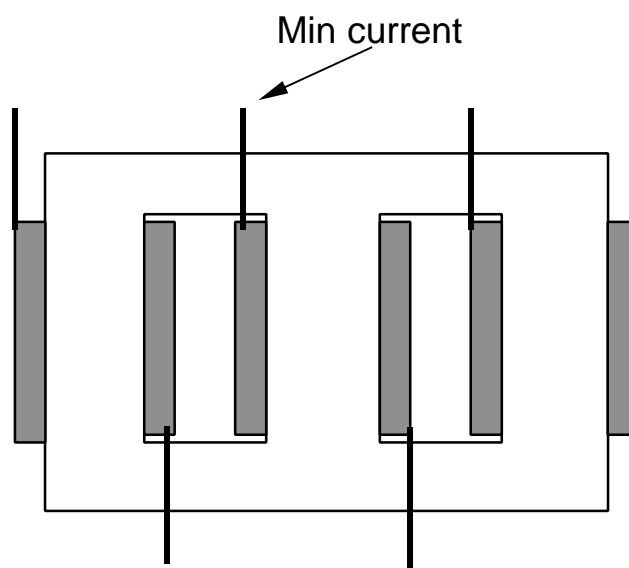
C'est pour cela qu'on réalise l'insertion en ARON pour obtenir la puissance active: On a $P_0 = A + B$; on calculera la moyenne arithmétique des courants à vide ainsi : $I' + I'' + I''' I_0 = 3$
Le facteur de puissance sera donc:

$$P_0 \cos \varphi_0 = \sqrt{3} V I_0$$

Même si cette méthode n'est pas théoriquement correcte, elle offre des valeurs du facteur de puissance suffisamment exactes.

Supposons maintenant que la détermination du courant moyen I_0 à seulement pour but de permettre la détermination du facteur de puissance; En conséquence, l'idée que les courants d'un transformateur tri phase à vide sont trois courants bien différents reste valable selon le type de connexion (voir Fig. 7) et le déséquilibre magnétique produit:

- 1) pour un couplage en étoile, le courant relatif à la phase centrale est inférieur aux autres 2 courants;
- 2) pour un couplage en triangle, le courant correspondant au nœud commun des deux phases latérales est plus haut que les autres deux courants.



**TRANSFORMATEUR MONO-PHASE
TRANSFORMATEUR TRIPHASE**

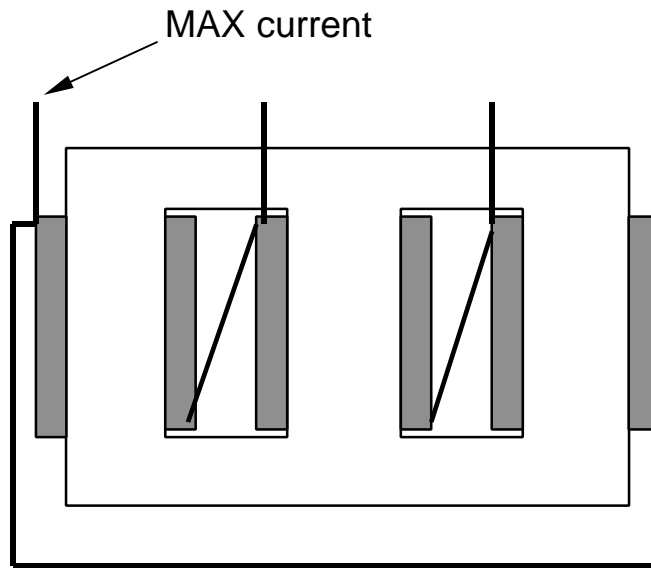


fig7 - Connexion des phases d'un transformateur triphasé

Afin de réduire l'erreur d'insertion, il faut connecter les voltmètres en amont des ampèremètres. Les paramètres équivalents dérivés peuvent être obtenus, **ils se referont au circuit équivalent en étoile par les formules suivantes;**

$$Z_o = \frac{V}{\sqrt{3}I_o} \quad R_o = \frac{Z_o}{\cos j \ o} \quad X_o = \frac{Z_o}{\text{sen} j \ o}$$

Ce cas aussi se réfère à la valeur moyenne du courant à vide obtenant, donc, les impédances d'un transformateur équilibré.

Pour un contrôle complet et satisfaisant du transformateur on doit tracer aussi les fonctions suivantes

$$P_o = f (V) \quad I_o = f (V) \quad \cos j \ o = f (V)$$

Les diagrammes obtenus sont analogues aux diagrammes déjà examinés dans le transformateur monophasé.

TRANSFORMATEUR MONO-PHASE TRANSFORMATEUR TRIPHASE

COURS N 3 - ESSAI EN COURT-CIRCUIT D'UN TRANSFORMATEUR MONOPHASE

L'essai en court-circuit d'un transformateur a pour but d'évaluer les pertes dans le cuivre et de déterminer les paramètres équivalents série.

L'essai en court-circuit s'effectue en mettant en court-circuit les bornes secondaires du transformateur et en alimentant le primaire avec une tension qui permet le passage d'un courant correspond à la valeur nominale.

Cette tension, appelée tension de court-circuit, atteint des valeurs de l'ordre de 5 - 8% de la tension nominale.

On a parlé du primaire et du secondaire mais sans se préoccuper de la connexion du transformateur

Concernant la réversibilité de la machine, l'essai peut être effectué en alimentant un côté quelconque.

En général on alimente le côté haut tension et on ferme en court-circuit le côté bas tension, car la tension d'alimentation en bas pourcentage représente des valeurs pour lesquelles il est plus facile de disposer des instruments aptes pour ce type de mesure (fig. 8).

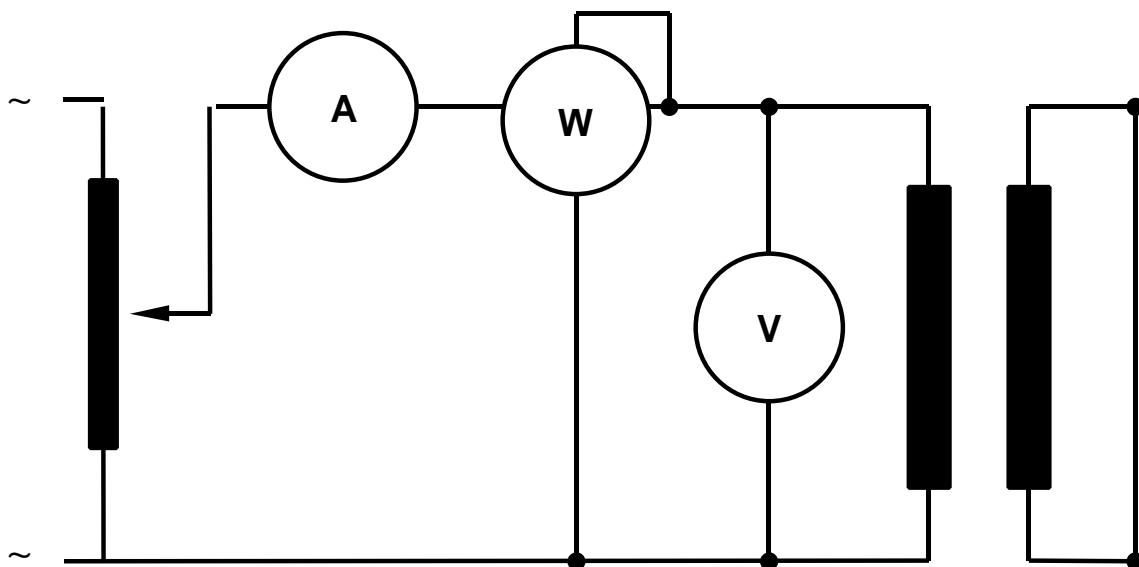


Fig. 8 - essai en court-circuit d'un transformateur monophasé'

Il faut réaliser avec un soin particulier le court-circuit au secondaire, en particulier, s'il s'agit d'intensités de courant très fortes, on doit avoir des résistances de contact négligeables.

Les instruments insérés dans le circuit d'alimentation sont les suivants:

- un fréquencemètre afin de vérifier la fréquence nominale;
- un ampèremètre d'une portée suffisante à celle de la valeur nominale du courant;

TRANSFORMATEUR MONO-PHASE TRANSFORMATEUR TRIPHASE

- un voltmètre d'une portée en relation avec une tension d'une valeur de 5 - 8% de la tension nominale. Pour les transformateurs plus puissants, sont nécessaires des valeurs plus basses
- un wattmètre avec des portées en relation avec les précédentes;
- un thermomètre pour mesurer la température ambiante.

Les voltmètres doivent être mis en aval des ampères-heures car il s'agit d'un circuit avec une impédance basse. En effet le transformateur en court-circuit présente une impédance à l'alimentation qui correspond à l'impédance équivalente série. En se rapportant au schéma équivalent on a la fermeture des bornes secondaires en court-circuit, correspond au circuit parallèle entre l'impédance dérivée Z_0 et l'impédance série secondaire rapportée au primaire $Z_2 K^2$ (voir Fig. 9).

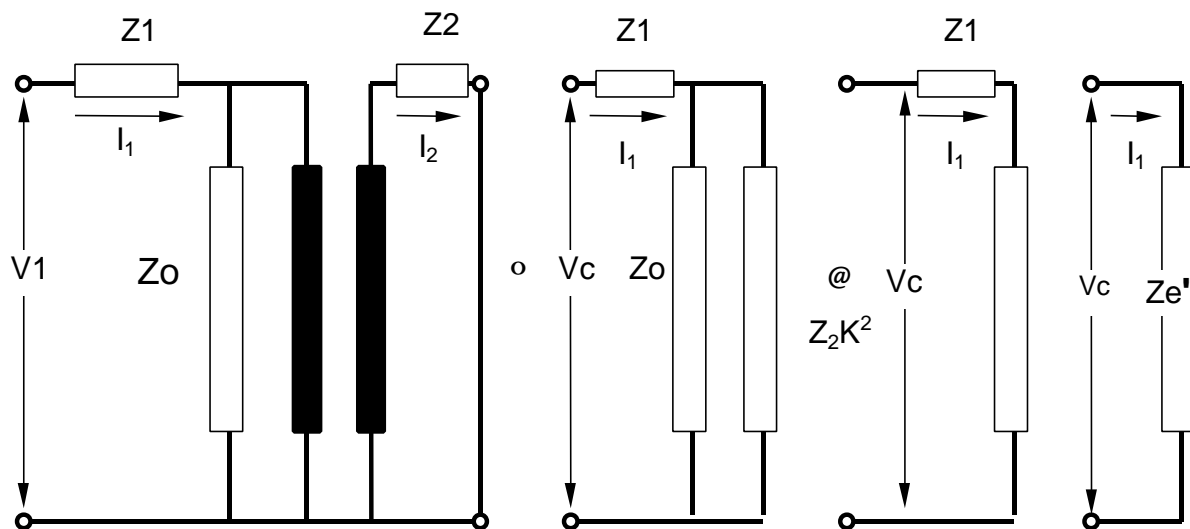


fig. 9 - Circuits équivalents d'un transformateur mono phase

Etant donné que cette impédance série secondaire est plus petite de 500 fois par rapport à la première, l'impédance Z_0 peut être négligée alors que l'impédance équivalente primaire Z_e' restera l'impédance totale.

On peut arriver à la même conclusion avec des considérations énergétiques.

En effet dans l'essai en court-circuit, à cause de la faible impédance fournie par le transformateur, l'application d'une tension très petite suffira à faire passer le courant nominal. Les pertes dans le fer de la machine et qui dépendent du **cadrat** de la machine - auront pour tension égale à $V_{cc} = 5\%$, une valeur égale à 0,25 de la valeur à charge ; ils seront donc négligeables

- On peut conclure que la puissance absorbée d'un transformateur en court-circuit est équivalente aux pertes dans le cuivre.

L'essai nous donne les valeurs suivantes: I_n le courant nominal f la fréquence nominale V_{cc} la tension du court-circuit P_{cc} la puissance du court-circuit

TRANSFORMATEUR MONO-PHASE TRANSFORMATEUR TRIPHASE

ANALYSE DES RESULTATS

On a déjà été dit que les pertes dans le cuivre sont égales à la puissance de court-circuit:

$$P_{cu} @ P_{cc}$$

Pour calculer les paramètres équivalents série on doit évaluer d'abord le facteur de puissance :

$$\cos j_{cc} = \frac{P_{cc}}{V_{cc} I_n}$$

De là on a:

- l'impédance équivalente série $Z_e = V_{cc}/I_n$
- la résistance équivalente série $R_e = Z_e \cos f_{cc}$
- la réactance équivalente série $X_e = Z_e \sin f_{cc}$

Ou:

- la résistance équivalente série $R_e = \frac{P_{cc}}{I_n^2}$
- la réactance équivalente série $X_e = \sqrt{Z_e^2 - R_e^2}$

Les paramètres seront relatifs au côté d'alimentation.

Si on veut les rapporter au côté opposé, il suffira de les diviser par le carré du rapport spires.

$$R_{e''} = \frac{R_e'}{K^2} \qquad Z_{e''} = \frac{Z_e'}{K^2} \qquad X_{e''} = \frac{X_e'}{K^2}$$

TRANSFORMATEUR MONO-PHASE TRANSFORMATEUR TRIPHASE

COURBE DE COURT-CIRCUIT

Pour avoir une étude complète de la machine on doit obtenir les courbes de comportement ceci en variant le courant absorbé.

Les courbes caractéristiques sont:

- courbe de la tension $V_{cc} = f(I)$
- courbe de la puissance $P_{cc} = f(I)$
- courbe du facteur de puissance $\cos \phi_{cc} = f(I)$
- courbe de la Tension $V_{cc} = f(I)$

La tension d'alimentation varie linéairement avec le courant absorbé par le transformateur qui est en court-circuit, donc la fonction représentera une ligne droite passant par l'origine des axes (voir la fig.10).

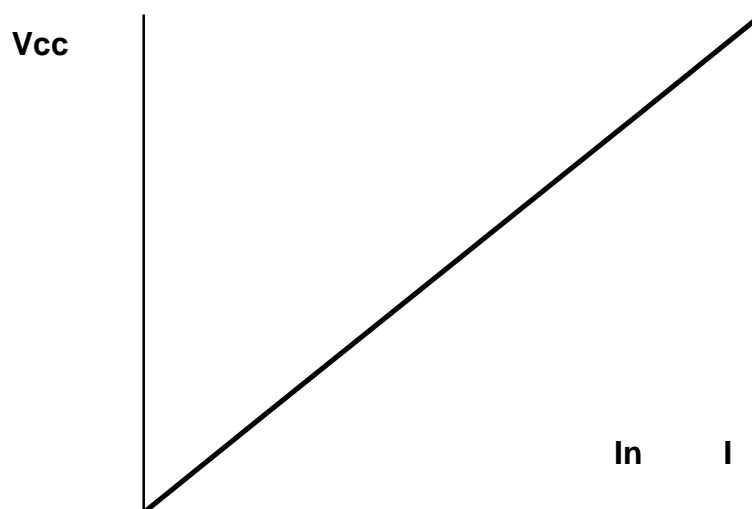


fig10 - courbe de la tension de court-circuit d'un transformateur monophasé' $V_{cc} = f(I)$

Cette droite est due au fait que les deux grandeurs sont liées par la relation:

$$V_{cc} = Z_e I$$

Avec Z_e l'impédance équivalente série.

Cette dernière est constante (les deux composantes ohmique R_e et inductive Z_e sont constantes).

Ici la possibilité d'une variation de température qui modifierait la mesure n'est pas prise en considération car cela aurait une incidence sur la valeur de la résistance. On doit faire

TRANSFORMATEUR MONO-PHASE TRANSFORMATEUR TRIPHASE

attention à ce que les enroulements ne s'échauffent pas trop pendant l'essai. Pour cela il faut commencer l'essai avec des valeurs de courant élevées.

La réactance de dispersion est constante, car les valeurs de l'induction sont très éloignées de la saturation. b)

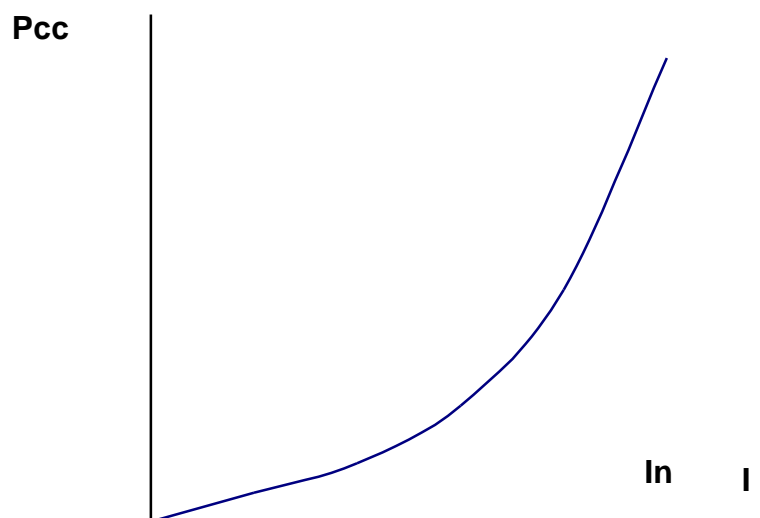
Courbe de la Puissance $P_{cc} = f(I)$

En variant le courant la puissance absorbée du transformateur aura une forme parabolique (fig.11).

fig.11 - courbe de la puissance de court-circuit d'un transformateur mono phase $P_{cc} = f(I)$

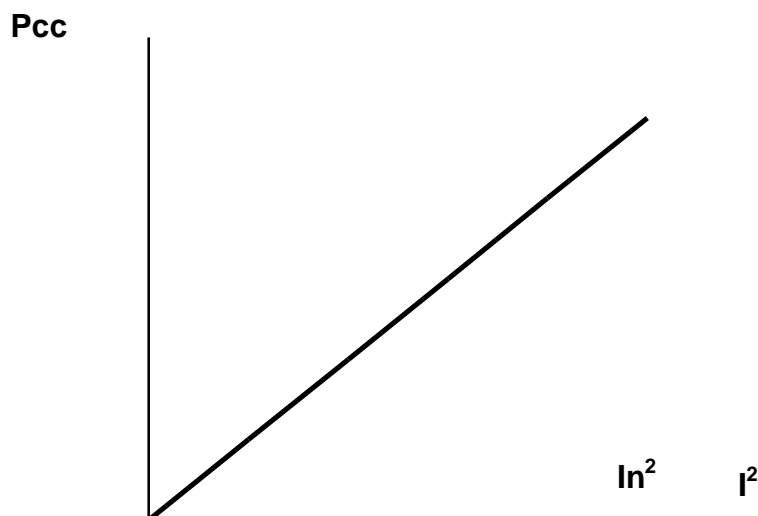
Ceci est du au fait que cette puissance est dans la pratique, la seule perte dans le cuivre de la machine, qui soit proportionnelle au cadrat du courant :

$$P_{cu} = R_e I^2$$



En traçant la courbe à partir de l'axe des abscisses et à l'échelle quadratique, la fonction prendra la forme d'une ligne droite (fig.12).

fig12 - courbe de la puissance en court-circuit d'un transformateur mono phase $P_{cc} = f(I^2)$



**TRANSFORMATEUR MONO-PHASE
TRANSFORMATEUR TRIPHASE**

c) courbe du Facteur de puissance $\cos \varphi_{cc} = f(I)$

Le facteur de puissance de court-circuit a une valeur constante (fig 13) car il dépend des paramètres série de la machine, ces derniers sont constants.

$$\cos \varphi_{cc} = \frac{R_e}{Z_e}$$

REMARQUE:

La constance du facteur de puissance indique que la mesure est correcte et que pendant l'épreuve les enroulements ne se sont pas trop chauffés.

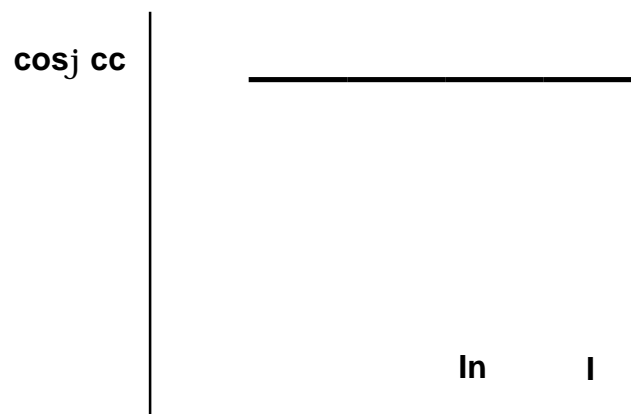


Fig 13 Courbe du facteur de puissance de court-circuit d'un transformateur mono phase $\cos \varphi_{cc} = f(I)$

TRANSFORMATEUR MONO-PHASE TRANSFORMATEUR TRIPHASE

COURS N (4 ESSAI EN COURT-CIRCUIT D'UN TRANSFORMATEUR TRIPHASE'

Pour le transformateur triphasé l'essai en court-circuit est le même que celui pour le transformateur mono phase.

En court-circuit, on doit fermer les bornes d'un côté de la machine et alimenter le transformateur sur l'autre côté avec une tension réduite, ceci pour faire passer un courant nominal dans les enroulements. L'alimentation étant symétrique, pour mesurer la tension de court-circuit, il sera suffisant l'usage d'un seul voltmètre entre 2 fils (fig.14).

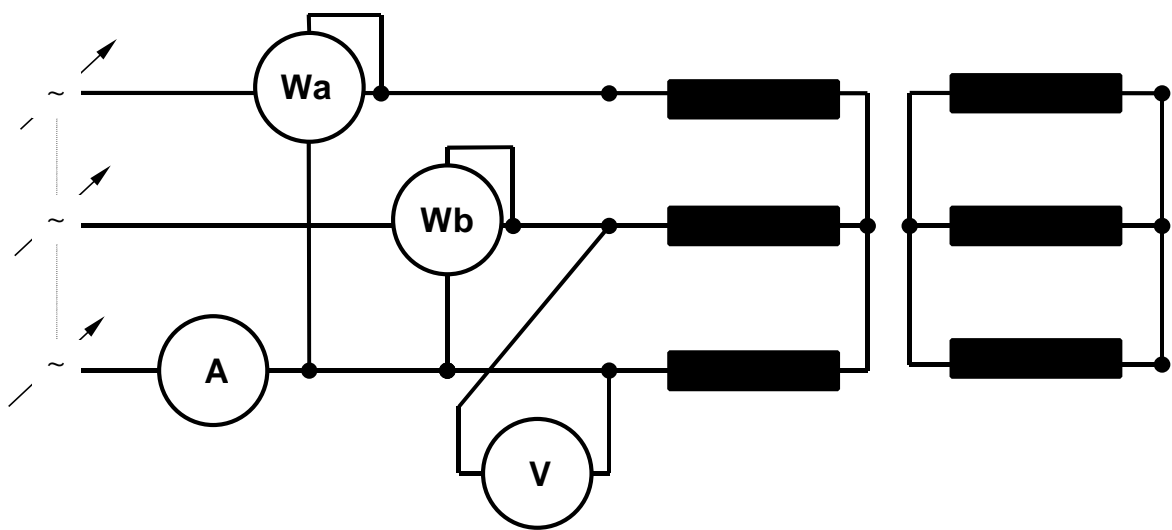


Fig. 14 - essai en court-circuit d'un transformateur triphasé'.

Si on voulait plus de sécurité on pourrait utiliser trois voltmètres, pour mesurer les trois tensions enchaînées, ou bien un seul instrument commutable sur les trois phases, mais habituellement tout cela n'est pas nécessaire.

La mesure du courant s'effectue en reliant l'ampèremètre à un des trois fils. Cette opération est suffisante car le transformateur triphasé en court-circuit est une charge équilibrée constituée par des enroulements de phase similaires.

On pourrait aussi connecter trois ampèremètres identiques sur les trois fils et exécuter la moyenne des trois indications, mais en général cela n'est pas nécessaire.

La puissance absorbée par le transformateur est indiquée par deux wattmètres insérés en ARON, donc $P_{cc} = A + B$.

Avec les indications des deux wattmètres on peut aussi obtenir le facteur de puissance grâce à la relation. $B \times \cos \varphi = A$ la valeur des pertes dans le cuivre quand elle est égale à la puissance absorbée: $P_{cu} = P_{cc}$ les paramètres équivalents en étoile pourront être calculés comme ci dessous:

TRANSFORMATEUR MONO-PHASE TRANSFORMATEUR TRIPHASE

$$V_{cc} Z_e = - \sqrt{3} I_{Pcc} R_e' = X_e = V Z_e^2 - R_e^2 \quad 3 I_2 \text{ ou: } R_e' = Z_e' \cos \varphi \quad X_e = Z_e' \sin \varphi$$

Les paramètres dépendent du côté de mesure.

Si on veut les référer à l'autre côté il faudra les diviser par le carré du rapport de spires.

$$R_e' \quad X_e' \quad Z_e' \quad R_e'' = X_e'' = Z_e'' = K_2^2 \quad K_2^2 \quad K_2^2$$

REMARQUE:

Le transformateur peut être connecté de différentes façons, cependant les paramètres donnés par les formules au-dessus indiquées se réfèrent à un transformateur dont les phases sont connectées en étoile. Ce qui est plus simple pour réaliser les mesures car les enroulements sont directement affectés par le courant de ligne PERTES ADDITIONNELLES

Pour déterminer ce type de pertes il faut calculer la résistance des enroulements en courant continu ceci avec la méthode volt-ampèremétrique ou avec une autre méthode équivalente. On détermine ensuite la puissance perdue dans les enroulements avec la formule suivante:

$$P_W = R_m I_2^2$$

ou bien, pour le triphasé (ceci quel que soit le couplage de la machine):

$$P_W = 1,5 R_m I_2^2$$

On peut constater que les pertes ohmiques dans les enroulements ne sont pas équivalentes aux pertes dans le cuivre obtenues pendant l'essai en court-circuit de la machine. La différence entre les deux donnera la valeur des pertes additionnelles.

$$P_{ad} = P_{cc} - P$$

REMARQUES:

Ces pertes ne peuvent pas être déterminées individuellement avec exactitude. Ces pertes comprennent toutes les dissipations énergétiques, qui n'entrent pas directement dans les pertes des matériaux magnétiques et électriques principaux.

L'influence de ces pertes sur le fonctionnement de la machine n'est pas très importante, on les ignore lorsqu'il s'agit de machines de petite puissance.

Pour des puissances élevées ces pertes sont plus importantes, c'est pour quoi qu'il fallait les séparer des pertes dans le cuivre. Ces pertes sont inversement proportionnelles à la température

TRANSFORMATEUR MONO-PHASE TRANSFORMATEUR TRIPHASE

COURS N (5 DETERMINATION DU RENDEMENT CONVENTIONNEL ET DE LA VARIATION DE LA TENSION

L'essai indirect sur le transformateur permet de déterminer le rendement et la variation de la tension, en fonction du courant distribué, de mettre donc en évidence les qualités de la machine.

On a dit variations de tension, et non courbe extérieure car, avec l'essai indirect on peut déduire immédiatement la variation de tension.

Cependant si on voulait obtenir la courbe extérieure de la machine, on devrait soustraire la variation de tension de la valeur de la tension à vide: $V_2 = V_{20} - DV$

Pour respecter les prescriptions des dispositions CEI, les deux courbes sous indiquées $h = f(I)$ $DV = f(I)$ devront se référer à la meilleure condition de fonctionnement, c'est à dire à la température conventionnelle de 75 °C.

Elles sont aussi demandées pour les facteurs de puissance 1 et 0,8.

PARAMETRES EQUIVALENTS À 75 °C

En changeant la température, la valeur de la résistance ohmique changera aussi, ceci selon la formule suivante. $309,5 Kt = 234,5 + t$; - t étant la température ambiante.

Maintenant prenons en considération le type de transformateur

1) Transformateurs de petite puissance

Dans ce cas les pertes additionnelles ont de petites valeurs, elles sont englobées dans les pertes dans le cuivre, calculées pendant l'essai en court-circuit.

Dans l'essai en court-circuit, à température ambiante, on a calculé les paramètres suivants:

- la résistance équivalente R_e
- la réactance équivalente X_e

Pour la température $T = 75^\circ\text{C}$ on aura une augmentation de la résistance selon facteur K_t :

$R_t = K_t R_e$ la réactance restera la même: $X_t = X_e$ l'impédance augmente: $Z_t = \sqrt{R_t^2 + X_e^2}$

Les valeurs de la tension et de la puissance de court-circuit change:

- pour le mono phase on aura
- $V_{ccT} = Z_t I_n$
- $P_{ccT} = R_t I_n^2$
- $I_n^2 = K_t P_{cc}$
-
- pour le triphasé on aura: $V_{ccT} = 3 Z_t I_n$ $P_{cct} = 3 R_t I_n^2$ $I_n^2 = K_t P_{cc} / 2$

TRANSFORMATEUR MONO-PHASE TRANSFORMATEUR TRIPHASE

2) Transformateurs de grande puissance

Il faut faire la séparation des pertes additionnelles avant d'effectuer la retenue à 75 °C.
Grâce à l'essai en court-circuit et la mesure directe des résistances ohmiques de la machine les pertes additionnelles peuvent être calculées par différence : $P_{ad} = P_{cc} - P_W$

Les pertes ohmiques se reportent à 75 °C directement avec le coefficient de température:
 $P_{WT} = K_t P_W$. Les pertes additionnelles, elles sont inversement proportionnelles, $P_{adT} = - K_t P_{ad}$

En faisant l'addition des pertes ohmiques et additionnelles on obtient les pertes en court-circuit à 75°C: $P_{ccT} = P_{WT} + P_{adT}$

CONCLUSION:

- pour le mono phase: la résistance équivalente est $R_T = P_{ccT}/I_n^2$
- l'impédance équivalente est $Z_T = \sqrt{R_T^2 + X_e^2}$
- le facteur de puissance est $\cos \phi_{ccT} = R_T/Z_T$
- la tension en court-circuit est $V_{ccT} = Z_T I_n$
- pour le triphasé: la résistance équivalente est $R_T = P_{ccT}/3I_n^2$
- l'impédance équivalente est $Z_T = \sqrt{R_T^2 + X_e^2}$
- le facteur de puissance est $\cos \phi_{ccT} = R_T/Z_T$
- la tension en court-circuit est $V_{ccT} = 3 Z_T I_n$

TRANSFORMATEUR MONO-PHASE TRANSFORMATEUR TRIPHASE

CALCUL DU RENDEMENT

Le rendement conventionnel d'un transformateur se calcule grâce à la formule suivante: $P_r h = P_r + P_p$

Pour un transformateur mono phase la puissance rendue est donnée par: $P_r = V_n I \cos f$.
La puissance perdue se calcule en additionnant les pertes dans le fer et dans le cuivre: $P_p = P_f + P_{cu} = P_f + R_T I^2$

En substituant, le résultat sera:

$$V_n I \cos f h = V_n I \cos f + P_f + R_T I^2$$

En général on exprime la formule en fonction de la charge relative, c'est à dire en fonction du rapport entre le courant effectif et le courant nominal.

Par $a = I/I_n$ on obtient $I = a I_n$,

en substituant, le rendement sera:

$$a V_n I_n \cos f h = a V_n I_n \cos f + P_f + a^2 R_T I_n^2 \quad a S_n \cos f h = a S_n \cos f + P_f + a^2 P_{cun}$$

Avec: $S_n = V_n I_n$ représente la puissance nominale de la machine $P_{cun} = R_T I_n^2$ représente les pertes dans le cuivre à 75°C obtenues des essais précédents et qui sont relatives au courant nominal

Pour un transformateur tri phase le rendement est: $3 V_n I \cos f h = 3 V_n I \cos f + P_f + 3 R_T I^2$
ou encore : $a S_n \cos f h = a S_n \cos f + P_f + a^2 P_{cun}$ ou c'est : $S_n = 3 V_n I_n \quad P_{cun} = 3 R_T I_n^2$

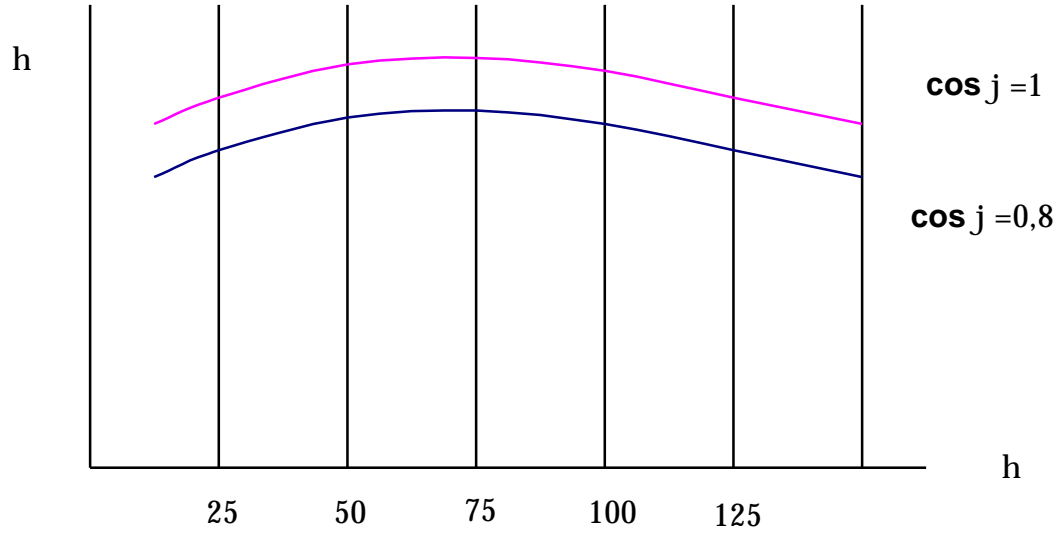
CONCLUSION:

En conclusion, pour le calcul du rendement on doit évaluer :

- 1) la puissance nominale S_n
- 2) les pertes dans le fer P_f
- 3) les pertes dans le cuivre à pleine charge P_{cun} à 75 C

Pour $\cos f = 1$ et $\cos f = 0,8$ on doit attribuer à la valeur des fractions de charge fixées: $0 \frac{1}{4} \frac{2}{4} \frac{3}{4} \frac{4}{4} \frac{5}{4}$ ou : 0 0,25 0,5 0,75 1 1,25. A partir des valeurs du rendement obtenues on peut tracer la courbe du rendement en fonction du courant distribue ou de la puissance distribuée, ou bien en fonction des quarts de charge (fig 15)., - courbe du rendement conventionnel d'un transformateur $h = f(a)$.

**TRANSFORMATEUR MONO-PHASE
TRANSFORMATEUR TRIPHASE**



**TRANSFORMATEUR MONO-PHASE
TRANSFORMATEUR TRIPHASE**

CALCUL DE LA VARIATION DE LA TENSION

La formule qui donne la variation de tension, dans les limites de son terme principal est: pour le mono phase:

$$V = I (RT \cos j + Xe \sin j) = a \ln (RT \cos j + Xe \sin j)$$

- Pour le triphasé:

$$V = a \sqrt{3} \ln (RT \cos j + Xe \sin j)$$

Où:

RT étant la résistance reportée à 75°C

Xe étant la réactance équivalente

In étant la valeur nominale du courant

Si on substituait les valeurs connues par Cos φ = 1 et Cos φ = 0,8 on obtiendrait la variation de la tension aux quarts de charge (fig.16).

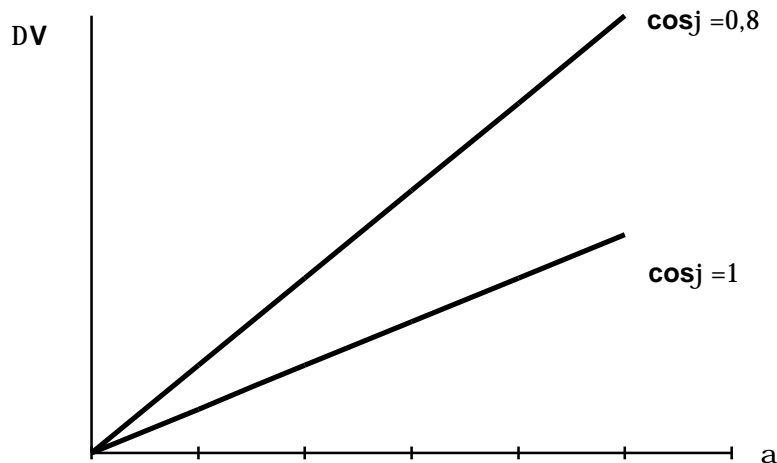


Fig. 16 courbe de la variation de la tension d'un transformateur $V = f(a)$.

La valeur de la variation de la tension est souvent référée à la tension nominale comme étant une valeur relative en pourcentage; c'est pour cela qu'on doit effectuer les calculs au 4/4 de la charge:

$$DV \% = 100 \frac{DV}{Vn}$$

TRANSFORMATEUR MONO-PHASE TRANSFORMATEUR TRIPHASE

COURS N.6 (ESSAI DIRECT D'UN TRANSFORMATEUR)

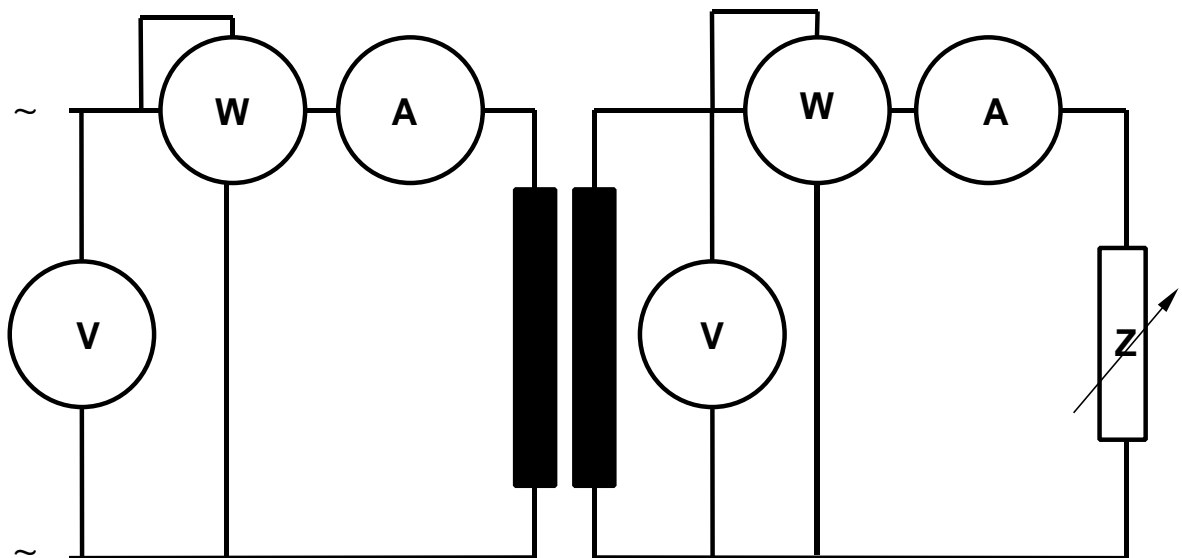
L'essai direct d'un transformateur donne du relief au rendement et à la courbe extérieure de la machine ceci en appliquant une charge effective au transformateur.

Le circuit électrique de mesure doit être alimenté avec une source de tension constante et égale à la nominale.

Les instruments qui doivent être insérés en court-circuit sont:

-a) sur le primaire: un fréquencemètre pour mesurer la fréquence appliquée; un voltmètre pour vérifier la tension appliquée; un ampèremètre pour mesurer le courant absorbé; un wattmètre pour mesurer la puissance absorbée. (Pour les transformateurs tri phase on doit faire une insertion ARON.)

- b) sur le secondaire et ceci de la même façon que sur le primaire: un voltmètre pour mesurer la tension distribuée; un ampèremètre pour mesurer le courant distribué; un wattmètre pour mesurer la puissance transférée à la charge. (Pour les transformateurs tri phase on doit faire une insertion en ARON).



- Fig 17 - Circuit pour l'essai direct d'un transformateur monophasé.

**TRANSFORMATEUR MONO-PHASE
TRANSFORMATEUR TRIPHASÉ**

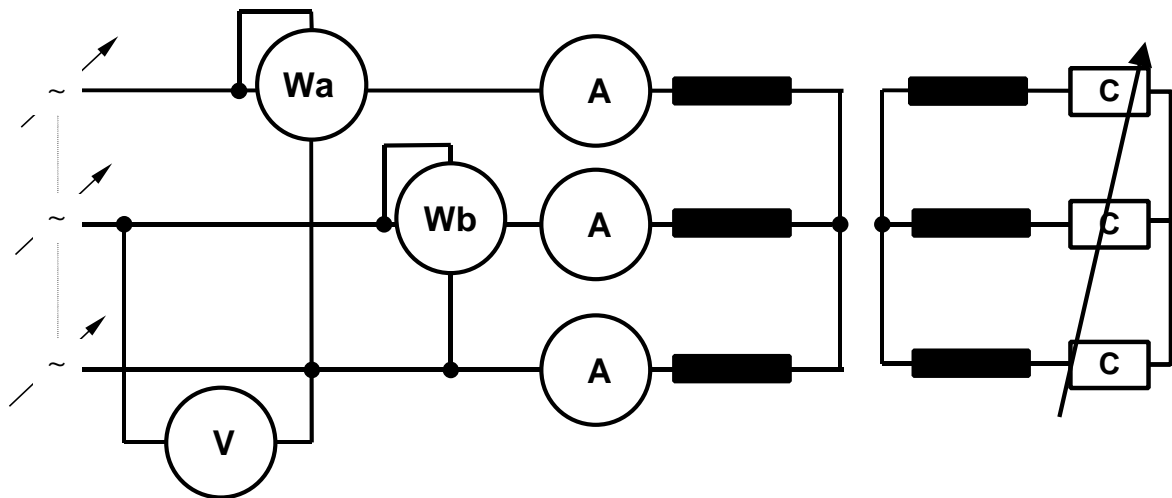


Fig 18 - Circuit pour l'essai direct d'un transformateur triphasé.

REMARQUES:

Tous les instruments devront être pour le courant alternatif et avoir une charge correspondante aux valeurs nominales de la machine. Ici les erreurs dues à l'auto-consommation des instruments ne sont pas prises en considération. La charge connectée au transformateur devra être réglable pour les valeurs aussi bien que pour les phases,

Ceci risque de rendre difficile l'essai direct, à moins de se limiter à des charges ohmiques, comme on va le faire. L'essai doit être fait la machine en régime thermique afin d'éviter les variations de température pendant sa réalisation.

On doit maintenir constante la tension primaire, la charge doit être variée de telle manière que l'ampèremètre secondaire subisse des valeurs de courant faible, qui correspondent approximativement aux quarts de la charge à vide et jusqu'à une surcharge d'environ 20% à 25%.

Pour chaque valeur du courant secondaire on doit observer:

- la puissance distribuée P_r
- la tension au secondaire V_2
- la puissance absorbée P_a
- le courant absorbé au primaire I_1 .

Pour les valeurs ci-dessus indiquées on aura:

le rendement $h = P_r/P_a$

La variation de tension $DV = V_{20} - V_2$ V_{20} étant la tension à vide les courbes demandées dans cet essai sont :

- le rendement $h = f(I_2)$
- la courbe extérieure $V_2 = f(I_2)$

TRANSFORMATEUR MONO-PHASE TRANSFORMATEUR TRIPHASE

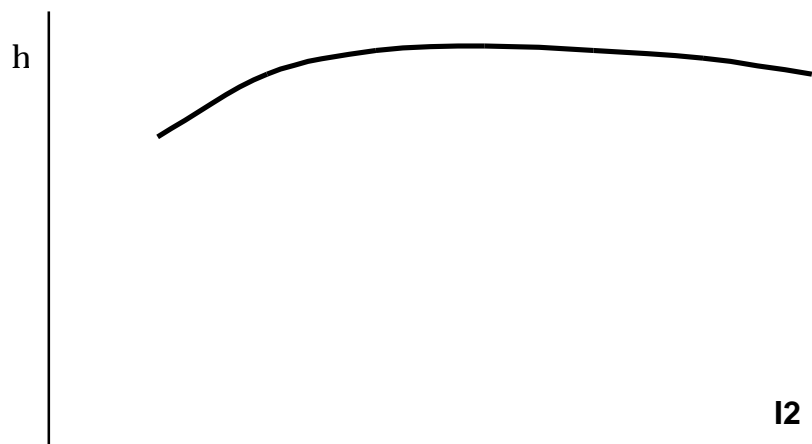
- Les deux courbes sont tracées en fonction du courant distribué. cependant dans
-
- l'essai direct la variable indépendante assignée est le courant; la puissance est aussi en fonction de ce paramètre. Les deux grandeurs, puissance et courant distribué, sont proportionnelles s'il n'y a pas de chute de tension avec la charge ne survient pas. Cette chute provoque une réduction de l'augmentation du courant.

De toute façon la différence n'est pas importante, car il arrive, dans le pire des cas, aux valeurs du 5-6%. (Voir page 34 - manuel 1)

COURBE DU RENDEMENT:

La courbe du rendement est presque droite, le rendement n'a pas de grandes variations par rapport au courant de charge, la variation a une valeur maximume d'environ $\frac{3}{4}$ la valeur de charge (fig. 19)

Fig 19
Courbe du rendement
en fonction du courant
de charge.



TRANSFORMATEUR MONO-PHASE TRANSFORMATEUR TRIPHASE

2) COURBE EXTERIEURE:

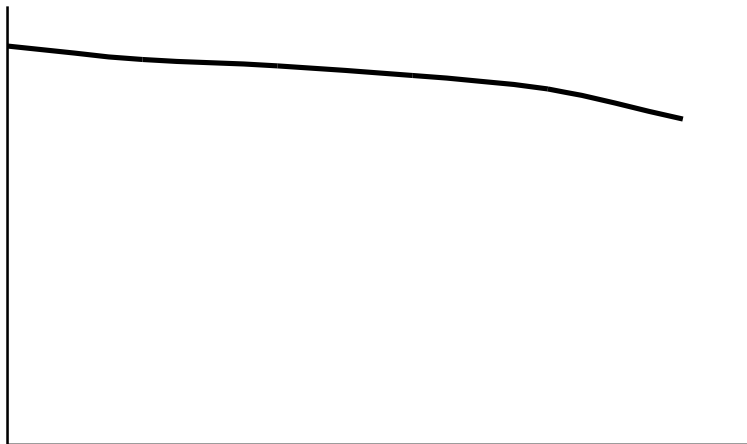
La courbe extérieure à charge ohmique, est en pente mais presque rectiligne.

La variation de la tension est mesurée directement à partir du segment supplémentaire qui est entre V20 et V2 (voir fig. 20).

Fig20 - courbe
extérieure d'un
transformateur à charge
ohmique.

A la charge de 4/4 on
peut évaluer la variation
de tension en
pourcentage, ce qui
offrira une indication sur
la qualité de la machine:

$$\Delta V\% = 100 \frac{\Delta V}{V_n}$$



REMARQUE:

Pendant l'essai du transformateur, les variations du courant primaire absorbé et du facteur de puissance ne sont pas très intéressantes. Ici elles ne sont pas prises en considération.

TRANSFORMATEUR MONO-PHASE TRANSFORMATEUR TRIPHASE

COURS N 7 CONNEXION DE DEUX TRANSFORMATEURS MONO-PHASES EN PARALLELE ET CONTROLE DE LA REPARTITION AUTOMATIQUE DE LA CHARGE GLOBALE

- Afin qu'il soit possible de connecter en parallèle les deux circuits secondaires des deux transformateurs, il faut réaliser les conditions suivantes:

- 1 - Les tensions distribuées des deux transformateurs doivent avoir la même valeur efficace;

- 2 - Les tensions secondaires distribuées des deux transformateurs doivent être entre elles en phase. La mise en parallèle de deux ou plusieurs transformateurs est une opération fréquente, surtout lorsqu'il s'agit de sous-stations et cabines de transformation où il faut partager la charge totale entre plusieurs transformateurs de puissance inférieure. Le courant en augmentant la demande de la charge, il faut insérer un transformateur neuf en parallèle aux transformateurs déjà en fonction pour éviter les surcharges.

- Dans ces cas les transformateurs à mettre en parallèle sont alimentés au primaire par la même source. Donc la condition N.1 précédemment énumérée peut être exprimée comme ci-dessous: - les deux transformateurs à coupler en parallèle doivent avoir le même rapport de transformation à vide. Pour la même raison, la condition N.2 précédemment énumérée peut être réalisée en une phase: c'est suffisant de connecter ensemble les bornes correspondantes, primaires et secondaires. D'après ce qui ressort des exercices précédents les deux transformateurs T-1 et T-2 ont le même rapport de transformation: $k_1 = k_2$ (0,573). Leur connexion en parallèle est donc possible.

- REMARQUES: Avant d'exécuter la connexion en parallèle des deux circuits secondaires, il faut vérifier qu'il n'y a pas d'inversions des fils de distribution; pour cela on peut utiliser un système révélateur réalisé avec deux lampes (L1 - L2) insérées au milieu des fils qui devront être connectés entre eux afin d'exécuter le parallèle. S'il n'y a pas d'inversions, les deux lampes resteront éteintes; mais s'il y a inversion des fils secondaires les deux lampes s'allumeront, comme illustré à la fig 21 et 22, 1er. Cas. - Les deux lampes restent éteintes.

- On peut réaliser la connexion en parallèle. 2em. Cas fig. 22 - Les deux lampes s'allument. La connexion n'est pas possible, il y a une inversion de conducteurs.

- CONCLUSION: Il faut vérifier qu'il n'y a pas d'allumage des lampes L1 - L2, avant de connecter les secondaires. Si aucune des charges n'est insérée, les deux transformateurs fonctionnent à vide s'ignorant réciproquement. Comme nous avons déjà dit la connexion en parallèle a pour but de répartir une charge sur plusieurs transformateurs. La condition idéale serait une subdivision automatique de la charge globale entre les deux transformateurs et ceci proportionnellement à la puissance nominale des transformateurs.

TRANSFORMATEUR MONO-PHASE TRANSFORMATEUR TRIPHASE

Pour expliquer cela on prend à titre d'exemple une charge de 200 KVA qu'il faut partager entre deux transformateurs, l'un de 150 KVA et l'autre de 50 kVA nominaux. Les deux étant connecter en parallèle, on aura le transformateur de 150 kVA qui doit se charger des 150 kVA et le transformateur de 50 kVA qui doit s'occuper des 50 kVA restants.

On sait que deux transformateurs connectés en parallèle se partagent automatiquement la puissance globale demandée et ceci en proportion avec les puissances des plaques, toutefois cela est possible aux conditions suivantes:

- qu' ils aient la même valeur de la tension de court-circuit;

- qu' ils aient la même valeur du $\text{Cos } \phi$ de court-circuit.

Comme montré dans les exercices précédents, les transformateurs T-1 et T-2 répondent aux conditions au-dessus énumérées

En effet le Cos CC est presque identique pour les deux transformateurs, mais la V_{cc} de T-1 est légèrement plus élevée par rapport à celle de T-2. Si on veut exécuter l'essai en parallèle et vérifier en pratique ce qui a été ci-dessus mentionné, on doit réaliser le circuit de la fig n.23, et régler les commutateurs de charge en obligeant les deux transformateurs à se charger.

Ensuite, on doit lire les courants indiqués par les ampèremètres I1 et I2 et vérifier que le rapport $I1/I2$ est légèrement inférieur (pour les raisons décrites) au rapport: ou est la fig 23 $I1$ PUISSANCE DE PLAQUE DE T-1 1200 = = $I2$ PUISSANCE DE PLAQUE DE T-2 1000
Enfin on doit changer la charge et vérifier que cette répartition reste la même.

TRANSFORMATEUR MONO-PHASE TRANSFORMATEUR TRIPHASE

COURS N 8 CONNEXION EN PARALELE DE DEUX TRANSFORMATEURS TRIPHASES ET CONTROLE DE LA REPARTITION AUTOMATIQUE DE LA CHARGE GLOBALE

Afin qu'il soit possible de connecter en parallèle les secondaires des deux transformateurs, il faut satisfaire les conditions suivantes: 1 - Les tensions distribuées des deux transformateurs doivent avoir la même valeur efficace; 2 - Les tensions secondaires distribuées des deux transformateurs doivent être en phase entre eux.

La mise en parallèle de deux ou plusieurs transformateurs est une opération fréquente, surtout pour la conduite de sous-stations et de cabines de transformation où il faut partager la charge totale entre plusieurs transformateurs de puissance inférieure. Le courant en augmentant la demande de la charge, il faut insérer un transformateur neuf en parallèle aux transformateurs déjà en fonction ceci pour éviter leur surcharge.

Dans ce cas les transformateurs à mettre en parallèle sont alimentés au primaire par la même source. Donc la condition N.1 précédemment énumérée pourra être exprimée comme ci dessous: - les deux transformateurs à connecter en parallèle doivent avoir le même rapport de transformation à vide.

Pour la même raison, la condition N.2 précédemment énumérée est toujours satisfaisante

D'après ce qui ressort des exercices précédents les deux transformateurs T-1 et T-2 ont le même rapport de transformation: $(k_1 = k_2 = 0,573)$. Leur connexion en parallèle est donc possible.

REMARQUES:

Avant d'exécuter la connexion en parallèle des deux secondaires, il faut vérifier qu'il n'y a pas d'inversions des fils d'alimentation; pour cela on peut utiliser un système révélateur réalisé avec trois lampes (L1 - L2 - L3) insérées au milieu des fils qui devront être connectés pour exécuter le couplage parallèle. S'il n'y a pas d'inversions, les deux lampes restent éteintes; si les fils secondaires sont inversés on obtient l'allumage des lampes comme illustre dans la fig 24. 1er. Cas. Fig 24 - Les trois lampes restent éteintes. On peut donc réaliser la connexion en parallèle. 2em. Cas Fig 25 - Les trois lampes restent allumées. La connexion ne peut pas être exécutée car il y a une inversion de conducteurs. 3em. Cas Fig 26 La lampe L1 reste éteinte L2 et L3 sont allumées. La connexion ne peut pas être exécutée car il y a une inversion de conducteur.

CONCLUSION:

Il faut vérifier qu'il n'y a pas d'allumage des lampes L1 - L2 - L3, avant de connecter les secondaires Si aucune des charges n'est insérée, les deux transformateurs fonctionnent à vide s'ignorant réciproquement.

Comme on l'a déjà dit, la connexion en parallèle a pour but de répartir une charge sur plusieurs transformateurs. La condition idéale serait une subdivision automatique de la charge globale entre les deux transformateurs et ceci proportionnellement à la puissance nominale des transformateurs.

TRANSFORMATEUR MONO-PHASE TRANSFORMATEUR TRIPHASE

Pour expliquer cela on prend à titre d'exemple une charge de 200 kVA qu'il faut partager entre deux transformateurs l'un de 150 kVA et l'autre de 50 kVA nominaux. Les deux étant connectés en parallèle, on aura le transformateur de 150 kVA qui doit se charger des 150 kVA et le transformateur de 50 kVA qui doit s'occuper des 50 kVA restants.

Il est connu que deux transformateurs connectés en parallèle se partagent automatiquement la puissance globale demandée et ceci en proportion avec les puissances des plaques, e si: toutefois cela est possible aux conditions suivantes:

- qu' ils aient la même valeur de la tension de court-circuit;
- qu' ils aient la même valeur du $\cos \varphi$ de court-circuit

Comme vue dans les exercices précédents, les transformateurs T-1 et T-2 répondent aux conditions au-dessus mentionnées.

En effet le $\cos \varphi$ CC est presque exactement le même pour les deux transformateurs, mais la V_{cc} de T-1 est légèrement plus élevé de celle de T-2.

Si on veut exécuter l'essai parallèle et vérifier en pratique ce qui a été ci-dessus indiqué, on doit réaliser le circuit de la fig N.27. et régler les commutateurs de charge en obligeant les deux transformateurs à se charger.

Ensuite on doit lire les courants indiqués par les ampèremètres I1 et I2 et vérifier que le rapport I1/I2 est légèrement inférieur (pour les raisons au-dessus mentionnées) au rapport:
I1 PUISSANCE DE PLAQUE DE T-1 1200 = - = - I2 PUISSANCE DE PLAQUE DE T-2 1000
Enfin il faut varier la charge et vérifier que cette répartition reste inchangée. Fig 27 47