I. Généralités : (fig. 30.1)

Un transformateur est un dispositif électromagnétique statique, capable de transformer une énergie électrique alternative d'un circuit en une même énergie électrique alternative dans un autre circuit avec une modification ou une conservation des paramètres tels que le courant, la tension et la fréquence.

Sous sa forme la plus simple la transformation se fait sous la même fréquence. Un transformateur peut être élévateur ou abaisseur de tension avec un rapport inverse concernant le courant. Le fondement physique du transformateur repose sur l'inductance mutuelle entre deux circuits magnétiquement liés et électriquement isolés.

L'enroulement par lequel le transformateur reçoit de l'énergie est appelé enroulement primaire et celui auquel seront connectés les récepteurs est appelé enroulement secondaire. L'enroulement connecté au réseau de tension plus élevée est appelé enroulement haute tension (HT) et celui connecté au réseau de tension le plus faible est appelé enroulement basse tension (BT).

Suivant le nombre d'enroulement, le transformateur peut être monophasé ou triphasé. Le transformateur peut être utilisé pour modifier le nombre de phases ou la fréquence du courant alternatif.

1.1. Le principe du transformateur

Celui-ci est fondé sur le phénomène de l'inductance mutuelle (loi de Faraday sur l'induction électromagnétique) : $e = -\frac{d\emptyset}{dt} = -\frac{Nd\emptyset}{dt} = -\frac{MdI}{dt}$

Avec N : le nombre de spires ; M : l'inductance mutuelle.

Si l'un des enroulements du transformateur est branché à une source de tension alternative, à travers celui-ci va circuler un courant alternatif qui crée un flux magnétique variable dans le noyau. Ce flux variable lié aux deux enroulements va induire une f.e.m dans chaque enroulement. Comme dans la plus part des cas les enroulements comptent des nombres de spires différents, les f.é.m. induites seront aussi différentes. L'enroulement avec le plus grand nombre de spires aura une f.é.m. induite plus élevée et inversement.

La f.é.m. au primaire à vide est environ égale à la tension appliquée et va l'équilibrer entièrement. Au secondaire seront connectés des récepteurs qui vont constituer la charge pour le transformateur. Au niveau de cet enroulement, sous l'action de la f.é.m. induite va apparaitre un courant I_2 et entre ses bornes s'établit la tension U2 qui seront différents du courant I1 et de la tension U1 du primaire. Par conséquent, dans un transformateur, il se produit un changement de paramètres : l'énergie alternative de tension U1 et de courant I1 appliquée au primaire, sous l'action du champ magnétique $\emptyset$ est transmise au secondaire avec de nouveaux paramètres U2 et I2 sous la même fréquence. Il ne faut jamais brancher un transformateur à une source de courant continu ; s'il en est le cas, le flux magnétique serait invariable dans le temps et par conséquent, aucune f.é.m. ne serait induite. Finalement au primaire aurait circulé un courant très élevé (absence de la f.é.m.) qui allait s'équilibrer seulement par rapport à la faible résistance active de l'enroulement. Pour écarter cette éventualité qui pourrait endommager le transformateur, la circulation d'un tel courant est inadmissible.

1.2.La construction (fig. 30.2)

Sous la forme la plus simple, le transformateur est constitué de deux enroulements sous inductance mutuelle supportés par un noyau en acier laminé. Les deux enroulements sont électriquement isolés et isolé du noyau et magnétiquement liés. Les autres éléments sont :

- ✓ Un container rempli d'huile diélectrique ;
- ✓ Les bornes en porcelaine ;
- ✓ Le conservateur ;
- ✓ Le relais Buchholz ;
- ✓ Le thermomètre ;
- ✓ Le déshydrateur ;
- ✓ Le radiateur ;
- ✓ Le ventilateur ;
- ✓ Le tap changer ;
- ✓ Les éléments de manutention.

Dans tous les transformateurs, le noyau est fabriqué à partir d'un acier laminé assemblé pour fournir un flux magnétique continu avec un minimum d'entrefer.

L'acier utilisé est à haute teneur en silicium, traité thermiquement afin de produire une haute perméabilité magnétique et une faible perte en hystérésis à des densités de flux opérationnelles. Les pertes par courant de Foucault sont minimisées en laminant le noyau, les lames étant isolées les unes des autres par une couche de vernis synthétique. L'épaisseur des tôles :

- ✓ 0,35mm à 50Hz ;
- ✓ 0,5mm à 25Hz.

On distingue deux types de construction :

- ✓ Le type noyau ;
- ✓ Le type coquille.

1.3.Théorie élémentaire d'un transformateur idéal (fig. 30.3)

Un transformateur idéal est défini comme un transformateur dépourvu de toute forme de perte càd aucune résistance ohmique au niveau des enroulements, aucune fuite magnétique dans le noyau. En d'autres termes, un transformateur idéal est constitué de deux enroulements purement inductifs sur un noyau sans pertes magnétiques. Faut-il rappeler que dans la pratique, il est impossible de réaliser un tel transformateur mais pour la convenance on entamera l'étude d'un tel transformateur et ensuite procéder par analogie.

Le primaire est branché à une source de tension alternative U1, le secondaire laissé ouvert. Cette différence de potentielle crée un courant alternatif au primaire. Puisque celui-ci est purement inductif, apparaitra un courant magnétisant $I\mu$ ou Ir dont la fonction consiste à magnétiser le noyau. Il est petit en amplitude et retarde sur U1 de $\frac{\pi}{2}$. Le courant produit un flux variable $\emptyset$ qui en tout temps reste proportionnel et en phase avec le courant, lié aux deux enroulements le flux induit E1 au primaire et E2 au secondaire. La f.é.m. E1 auto induite à tout instant est égale et en opposition de phase à U1. Elle est connue sous le nom de f.c.é.m. du primaire.

De façon similaire la f.é.m. E2 induite au secondaire est connue sous le nom de f.é.m. mutuellement induite. Elle se trouve en opposition de phase avec U1 et son amplitude est proportionnelle au rythme de changement du flux et au nombre de spires du secondaire.

Les valeurs instantanées des tensions, des f.é.m. induites, du flux et du courant magnétisant sont illustrées par la figure 30.13b et les diagrammes vectoriels par la figure 30.13c.

1.4.Equation de la f.é.m.

Soient : N1 et N2 le nombre de spires au primaire et au secondaire ;

$\emptyset = \emptyset m \, sin \, wt$: Le flux magnétique avec $\emptyset m$ l'amplitude max du flux

$w = 2\pi f$: La pulsation ;

Les valeurs instantanées des f.é.m. au primaire et au secondaire sont données par les formules :

- $e1 = -N1 \frac{d\emptyset}{dt} = -w \, N1 \, \emptyset m \, coswt = +2\pi f \, N1 \, \emptyset m \sin(wt - \frac{\pi}{2})$
- $e2 = -N2 \frac{d\emptyset}{dt} = -w \, N2 \, \emptyset m \, coswt = +2\pi f \, N2 \, \emptyset m \sin(wt - \frac{\pi}{2})$ (1.1)

Les amplitudes des f.é.m. au niveau des deux enroulements :

- $E1m = 2\pi f \, N1 \, \emptyset m$
- $E2m = 2\pi f \, N2 \, \emptyset m$ (1.2)

Ainsi :

$$e1 = E1m \sin(wt - \frac{\pi}{2})$$

$$e2 = E2m \sin(wt - \frac{\pi}{2}) \qquad (1.3)$$

A partir des formules (1.1) et (1.3), on peut déduire que les f.é.m. induites retardent sur le flux d'un angle égal à π/2.

Dans le cas pratique, on utilise les valeurs efficaces des f.é.m.

$$E1 = \frac{E1m}{\sqrt{2}} = 4{,}44 \, f1 \, N1 \, \emptyset m$$

(1.4)

$$E2 = \frac{E1m}{\sqrt{2}} = 4{,}44 \, f1 \, N2 \, \emptyset m$$

$$E1 = 4{,}44 \, f \, N1 \, Bm \, S$$

(1.5)

$$E2 = 4{,}44 \, f \, N2 \, Bm \, S$$

$\frac{E1}{N1} = \frac{E2}{N2} = 4{,}44\ f\ \emptyset m$: Cela signifie que la f.e.m induite dans chaque spire est identique pour le primaire et le secondaire. Pour un transformateur idéal : U1 = E1 et U2 = E2.

1.5.Le rapport de transformation

A partir des formules ci-dessus, on peut obtenir :

$\frac{E2}{E1} = \frac{N2}{N1} = m$

La constante m est connue sous le nom de rapport de transformation.

Ainsi :

- ✓ Si N2 > N1 → m > 1 : le transformateur est dit élévateur ;
- ✓ Si N2 < N1 → m < 1 : le transformateur est dit abaisseur ;

Pour un transformateur idéal :

U1 I1 = U2 I2 → S1= S2

$\frac{I2}{I1} = \frac{U1}{U2} = \frac{1}{m}$

Les courants sont en rapport inverse ou rapport de tension.

$$\frac{U2}{U1} = \frac{E2}{E1} = \frac{N2}{N1} = \frac{I1}{I2} = m$$

1.6.Le transformateur avec pertes sans fuite magnétique

Deux cas seront considérés :

- ✓ Fonctionnement à vide ;
- ✓ Fonctionnement en charge.

1.6.1. Le transformateur à vide

Nous avons admis plus haut, qu'un transformateur idéal était dépourvu de toute forme de pertes à savoir les pertes magnétiques et les pertes cuivre. Lors du fonctionnement en charge du transformateur, nous observons des pertes fer au niveau du noyau magnétique et des pertes cuivre au niveau des deux enroulements (primaire et secondaire) et surtout que celles-ci soient non négligeables.

Même à vide, le courant primaire n'est pas entièrement réactif et suivant cette condition, il doit fournir :

a) Les pertes fer : pertes par hystérésis Ph et pertes par courants de Foucault P_F ;
b) Une petite quantité de pertes cuivre au primaire et est nulle au secondaire parce que celui-ci étant ouvert. Ainsi le courant à vide I_0 retarde sur V1 d'un angle $\varphi_0 \approx 90°$.

La puissance absorbée à vide :

$P0 = U1I0cos\varphi 0$ (1.6.1)

Avec $cos\varphi 0$ le facteur de puissance à vide. Le diagramme vectoriel est illustré par la figure 30.16.

Le courant I0 comprend :

a) Une composante active Ia en phase avec U1 et principalement responsable des pertes fer et une petite quantité de pertes cuivre au primaire ; il est encore appelé courant fonctionnel.

$Ia = I0cos\varphi 0$ (1.6.2)

b) Une autre composante réactive Ir en retard sur U1 d'un angle égal à $\frac{\pi}{2}$, son rôle consiste à magnétiser le noyau.

$Ir = I0sin\varphi 0$ (1.6.3)

Remarque :

- ✓ I0 est faible comparé à In : (1-3%) ;
- ✓ Du fait de la faiblesse de I0, les pertes cuivre à vide restent négligeables, c'est-à-dire qu'à vide, la puissance absorbée par le primaire est pratiquement convertie en pertes fer ;
- ✓ L'angle $\varphi 0$ est appelé l'angle d'avance hystérésis.

1.6.2. Le transformateur en charge

Lorsque le transformateur est chargé, le courant I2 apparait. L'amplitude et la phase de I2 par rapport à U2 sont données par la nature de la charge. Ainsi :

- ✓ I2 en phase avec U2 : charge de nature résistive ;
- ✓ I2 en retard sur U2 : charge de nature inductive ;
- ✓ I2 en avance sur U2 : charge de nature capacitive.

Le courant I2 crée sa propre force magnétomotrice f.m.m. F2=N2I2 et son propre flux $\emptyset 2$ qui se trouve en opposition avec le flux $\emptyset$ crée par I0. F2 est appelé ampères tour démagnétisant. Le flux $\emptyset 2$ affaiblit le flux $\emptyset$, ainsi la force électromotrice du primaire E1 diminue. Pendant un certain temps, U1 gagne le dessus sur E1, ce qui entraine la circulation d'un courant plus élevé.

Soit I2 le courant additionnel au primaire, appelé composant de la charge. La f.m.m. F'1=N1I'2 crée un flux $\emptyset' 2$ évoluant dans le même sens que $\emptyset$ par contre opposé à $\emptyset 2$ et lui égal en amplitude.

De ce fait quel que soit la charge, le flux net traversant le noyau reste pratiquement constant (à vide ou en charge). Avec cette constance du flux à travers le noyau, les pertes fer restent pratiquement constantes sous toutes conditions de charge.

Soit : $\emptyset 2 = \emptyset' 2, on\ a: N2I2 = N1I'2$

$$I'2 = \frac{N2}{N1} \times I2 = mI2$$

$I'2 = mI2$ (1.6.4)

Lors d'un fonctionnement en charge d'un transformateur, le primaire est parcouru par deux courants : I0 et I'2 en opposition de phase à I2 et m fois en amplitude égal à I2.

La fig. 30.10 illustre les diagrammes vectoriels d'un transformateur en charge avec :

a) Résistive ;
b) Inductive ;
c) A tracer pour la charge capacitive.

1.6.3. Le transformateur à enroulement résistif sans fuite magnétique fig. 30.22

Un transformateur idéal ne présente aucune résistance ohmique. Dans un transformateur ordinaire on observe une résistance R1 au primaire et R2 au secondaire. Du fait de cette résistance on aura une chute de tension au niveau des enroulements. Ainsi :

1) U2 sera vectoriellement inférieure à E2 de la chute I2R2

U2=E2 - I2R2 (1.6.5)

2) De façon similaire E1 sera vectoriellement inférieure à U1 de la chute de tension I1R1.

E1=U1 - I1R1 (1.6.5)

Les diagrammes vectoriels pour les différentes natures de charge sont illustrés par la fig. 30.21 avec :

a) Résistive ;
b) Inductive ;
c) Capacitive.

1.6.4. Diagramme vectoriel des impédances fig. 30.27

Sur la figure sont représentées les résistances, réactances et impédances :

- ✓ L'impédance primaire : $Z1 = \sqrt{R1^2 + X1^2}$; $Z1 = R1 + jX1$;
- ✓ L'impédance secondaire : $Z2 = \sqrt{R2^2 + X2^2}$; $Z2 = R2 + jX2$.

La résistance et la réactance de chaque enroulement seront le siège de chute de tension.

Au primaire la chute sur la réactance I1X1 est d'environ 2% de U1.

$U1 = E1 + I1(R1 + jX1) = E1 + I1Z1$ (1.6.6)

Aussi I2R2 et I2X2 au secondaire qui combinées à U2 donnent E2.

$E2 = U2 + I2(R2 + jX2) = U2 + I2Z2$ (1.6.7)

La fig. 30.28 illustre le diagramme vectoriel des impédances avec :

a) Résistive ;
b) Inductive ;
c) Capacitive.

1.6.5. Les paramètres transférés

Les paramètres d'un transformateur peuvent transférés au niveau de n'importe quel des deux enroulements. Le fait de concentrer les paramètres dans un enroulement permet de simplifier les calculs et la représentation de ces paramètres sur un diagramme vectoriel. En plus il revient à opérer avec un transformateur à enroulement unique.

Les pertes cuivre au secondaire : $I2^2R2$; celles-ci sont causées essentiellement par le primaire qui entrainerait les mêmes pertes cuivre que R2 au secondaire.

$$I1^2R'2 = I2^2R2 \rightarrow R'2 = \left(\frac{I2}{I1}\right)^2 \times R2$$

Si on néglige I0,

$$\frac{I2}{I1} = \frac{1}{m} \rightarrow R'2 = \frac{R2}{m^2} \qquad (1)$$

De même, la résistance équivalente du primaire ramenée au secondaire : $I2^2R'1 = I1^2R1 \rightarrow R'1 = m^2R1$

Considérons les figures suivantes : fig. 30.23 et 30.24.

Suivant la fig. 30.23, la résistance secondaire est ramenée au primaire laissant ainsi le secondaire moins résistant.

La résistance $R1 + R'2 = R1 + \frac{R2}{m^2}$ est appelée résistance équivalente effective du transformateur ramené au primaire $Rp = R1 + R'2 = R1 + \frac{R2}{m^2} \qquad (2)$

De même selon la fig. 30.24, la résistance du primaire est ramenée au secondaire, laissant ainsi le primaire moins résistant.

La résistance $R2 + R'1 = R2 + m^2R1$ est appelée résistance équivalente effective ramenée au secondaire $Rs = R2 + R'1 = R2 + m^2R1 \qquad (3)$

Pour les réactances on aura :

$$X'2 = \frac{X2}{m^2} \quad ; \qquad X'1 = m^2X1 \qquad (4)$$

$$Xp = X1 + X'2 = X1 + \frac{X2}{m^2} \qquad (5)$$

$$Xs = X2 + X'1 = X2 + m^2X2 \qquad (6)$$

Pour les impédances :

$$Z'2 = \frac{Z2}{m^2} \quad ; \qquad Z'1 = m^2Z1 \qquad (7)$$

$$Zp = \sqrt{Rp^2 + Xp^2}; \qquad Zs = \sqrt{Rs^2 + Xs^2} \qquad (8)$$

$$Zp = Z1 + Z'2; \;\; Zs = Z2 + Z'1 \qquad (9)$$

$$Zp = Rp + jXp; \;\; Zs = Rs + jXs \qquad (10)$$

$$Rs = m^2Rp; \;\; Xs = m^2Xp; \;\; Zs = m^2Zp \qquad (11)$$

1.6.6. Le circuit équivalent d'un transformateur fig. 32.37

Le transformateur peut être représenté par un circuit équivalent dans lequel la résistance et la réactance seront portées à l'extérieur des enroulements dont la seule fonction va consister à magnétiser le noyau à savoir transformer les paramètres tels que la tension et le courant. Le courant à vide I0 sera absorbée par la charge parallèle (circuit magnétisant) avec Ia à travers R0 et Ir à travers X0. La valeur de E1 est obtenue en soustrayant vectoriellement I1Z1 de U1.

$$X0 = \frac{E1}{Ir} \qquad (1)$$

$$R0 = \frac{E1}{Ia} \qquad (2)$$

E1 et E2 sont liée par la relation $\frac{E2}{E1} = m$

Pour simplifier les calculs, il est préférable de transférer la tension, le courant et l'impédance au primaire ou au secondaire. Dans ce cas il revient à travailler avec un transformateur à enroulement unique.

Ainsi le f.é.m. secondaire ramenée au primaire :

Pour le transfert des paramètres tels que la tension, la f.é.m. et le courant, on utilise le rapport m

$$E'2 = \frac{E2}{m} = E1 \quad (3)$$

La tension secondaire ramenée au primaire :

$$U'2 = \frac{U2}{m} = U1 \quad (4)$$

Le courant secondaire ramené au primaire :

$$I'2 = mI2$$

Pour le transfert des résistances, réactances et des impédances secondaires au primaire on utilise m²

$$R'2 = \frac{R2}{m^2}; X'2 = \frac{X2}{m^2}; Z'2 = \frac{Z2}{m^2}; \ Z'ch = \frac{Zch}{m^2}; \ (5)$$

Le circuit équivalent total est obtenu en additionnant au primaire les impédances. Selon la fig. 30.29, l'impédance totale est donnée par la formule :

$$Z = Z1 + \frac{Zm(Z'2 + Z'ch)}{Zm + (Z'2 + Z'ch)} \qquad (6)$$

Avec Zm ; l'impédance du circuit d'excitation

$$U1 = I1(Z1 + \frac{Zm(Z'2 + Z'ch)}{Zm + (Z'2 + Z'ch)}) \qquad (7)$$

Plusieurs modifications peuvent être apportées en déplaçant le circuit d'excitation aux bornes du primaire : fig. 30.40

$$R0 = \frac{U1}{Ia}; \qquad X0 = \frac{U1}{Ir} \qquad (8)$$

En négligeant aussi R0 et X0

1.6.7. Les tests sur le transformateur

Les paramètres d'un transformateur peuvent être calculés selon le circuit équivalent qui contient (Rp, Rs, Xp, Xs, Zp, Zs, R0 et X0 ou G0 et Y0…). Ces mêmes paramètres peuvent être facilement déterminés en partant de deux essais sur le transformateur.

a) Essai à vide
b) Essai en court-circuit

Ces deux essais se trouvent être très économiques et pratiques car fournissant l'ensemble des paramètres suscités sans pour autant charger le transformateur.

1. L'essai à vide : fig. 32.43

L'objectif de ce test consiste à déterminer :

- ✓ Les pertes à vide P0
- ✓ Le courant à I0
- ✓ Le facteur de puissance à vide cosφ0
- ✓ Les composantes active et réactive du courant à vide
- ✓ La réactance X0 ou la susceptance B0
- ✓ La résistance R0 ou la conductance G0
- ✓ La tension secondaire à vide V20
- ✓ Le rapport de transformation m

Lors de cet essai, l'un des enroulements du transformateur et de préférence l'enroulement HT est laissé ouvert tandis que l'enroulement BT est connecté à la source de tension alternative à fréquence normale. A l'aide d'un alternostat, on fait varier la tension entre (0-1,1) la tension de l'enroulement BT. Le montage du côté BT est complété par un wattmètre, un ampèremètre et un voltmètre. Avec une tension normale appliquée à partir de la source, un flux normal apparaitra dans le noyau, ainsi des pertes fer normales seront engendrées et seront enregistrées par le wattmètre. Puis que le courant à vide I0 est très faible (2-10%) In, les pertes cuivres du côté BT seront négligeables et nulles du coté HT parce que celui-ci étant ouvert. La lecture du wattmètre va correspondre pratiquement aux pertes fer qui d'ailleurs resteront constantes sous toute condition de charges. Elles sont utilisées pour le calcul du rendement. Un voltmètre à haute résistance sera connecté sur le côté HT pour mesurer V20 afin de déterminer le rapport de transformation.

$$P_0 = V_1 I_0 cos\varphi_0 \ \rightarrow cos\varphi_0 = \frac{P_0}{V_1 I_0}$$

$I_a = I_0 cos\varphi_0$

$I_r = I_0 sin\varphi_0$

$R_0 = \frac{V_1}{I_a}$

$X_0 = \frac{V_1}{I_r}$

Lorsque le courant est entièrement magnétisant à vide, $I_0 \approx I_r$ et la chute de tension sur l'impédance négligeable on aura : $I_0=V_1Y_0$ avec $Y_0=1/Z_0$ (admitance)

$G_0 = \frac{P_0}{V_1^2}$ avec $G_0=1/R_0$ (conductance)

$B_0 = \sqrt{Y_0^2 + G_0^2}$ $B_0=1/X_0$ (suceptance)

2. Essai en court-circuit (fig. 32.45)

L'objectif de ce test consiste à déterminer :

- Les résistances : Rp et Rs ;
- Les réactances : Xp et Xs ;
- Les impédances : Zp et Zs.

Ces paramètres concernent l'enroulement au niveau duquel les instruments de mesure sont branchés.

- Les pertes cuivre en pleine charge (on a une charge désirée). Ces pertes seront utilisées pour calculer le rendement du transformateur.
- Connaissant Zp et Zs, la chute de tension totale peut être calculée ainsi que la régulation.

Pendant ce test encore appelé essai en basse tension ou essai des impédances, de préférence l'enroulement HT est connecté à la source tandis que l'enroulement BT est solidement court-circuité par un conducteur de faible résistance ou par un ampèremètre à faible résistance interne.

Une basse tension (5-10%) de la tension de l'enroulement HT à fréquence normale est appliquée mais juste nécessaire pour faire circuler les courants nominaux au niveau des enroulements.

Un wattmètre, un voltmètre, un ampèremètre et un alternostat complètent le circuit HT. Puisque la tension appliquée est faible, le flux induit sera aussi faible et par conséquent les pertes fer. Ainsi la lecture du wattmètre va correspondre pratiquement aux pertes cuivre pour l'ensemble des enroulements.

Soit Vcc la tension de court-circuit appliquée $Zp = \frac{V_{cc}}{I_{1cc}}$

$$Pcc = Ucc\, I1cc\, cos\varphi cc = I_1^2 Rp = I_2^2 Rs$$

$$Xp = \sqrt{Z_P^2 - R_P^2}$$

$Zp = Rp + jXp$

$Cos\varphi cc = \frac{Rp}{Zp}$; $Sin\varphi cc = \frac{Xp}{Zp}$

La tension de court-circuit Vcc est exprimée en pourcentage

$\%Vcc = \frac{Vcc}{V1n} \times 100 = \frac{I1Zp}{V1n}$

1.6.8. Pourquoi évalue-t-on un transformateur en VA ?

Comme nous l'avons vu plus haut, les pertes cuivre dépendent du courant qui est exprimé en A et les pertes fer dépendent de la tension appliquée exprimée en V. Ainsi les pertes totales dans un transformateur dépendant des VA malgré qu'elles soient exprimées en W. Les pertes dépendent des VA et non de l'angle de déphasage entre la tension et le courant c.à.d. du facteur de puissance de la charge le cosφ.

En plus le manufactureur ne connait pas à priori la nature de la charge qui sera appliquée au transformateur.

1.6.9. Les chutes de tension dans un transformateur

1. Les chutes approximatives

A vide $V1 \approx E1$

Ainsi $E2 = mE1 = mV1$

$E_2 = V_{20} \rightarrow V_{20} = mV1$; soit V_2 la tension secondaire en charge

La différence entre V_{20} et V_2

$V_{20} - V_2 = I_2 Zs$

La chute de tension référée au secondaire

$\Delta U_2 = I_2(R_s cos\varphi \pm X_s sin\varphi)$

Avec + : charge de nature inductive, $cos\varphi$ en retard

- : charge de nature capacitive, $cos\varphi$ en avance

$\Delta U_2 = I_2 R_s$

$\Delta U_1 = I_1(R_p cos\varphi \pm X_p sin\varphi)$

Les chutes de tension en pourcentage

$\Delta U_\% = \frac{I_2(R_s cos\varphi \pm X_s sin\varphi)}{V_{20}} \times 100 = \frac{I_1(R_p cos\varphi \pm X_p sin\varphi)}{V_1} \times 100$

$\Delta U_{\%} = vrcos\varphi \pm vxsin\varphi \quad avec\ vr = \frac{100 I_2 R_s}{V_{20}} = \%R = \frac{100 I_1 R_p}{V_1}$

$vx = \frac{100 I_2 X_s}{V_{20}} = \%X = \frac{100 I_1 X_p}{V_1}$

2. Les chutes de tension exactes

En général au secondaire

$$\Delta U_2 = I_2(R_s cos\varphi \pm X_s sin\varphi) + \frac{[I_2(X_s cos\varphi \pm R_s sin\varphi)]^2}{2V20}$$

En général au primaire

$$\Delta U_1 = I_1(R_P cos\varphi \pm X_P sin\varphi) + \frac{[I_1(X_P cos\varphi \pm R_P sin\varphi)]^2}{2V1}$$

En pourcentage

$$(vrcos\varphi \pm vxsin\varphi) + \frac{1}{200}(vrcos\varphi \pm vxsin\varphi)^2$$

Exercice d'application 1 : un transformateur de 230/460V à au primaire une résistance 0,2 Ω et une réactance de 0,5 Ω. Au secondaire la résistance et la réactance sont respectivement 0,75 Ω et 1,8 Ω. Trouver la tension secondaire lorsque le transformateur fournit une intensité de 10A avec un facteur de puissance de 0,8 en retard.

Exercice d'application 2 : calculer la régulation du transformateur dans lequel le pourcentage de chute dans la résistance est 1%, 5% au niveau de la réactance lorsque le facteur de puissance est :

a. 0,8 en arrière
b. L'unité
c. 0,8 en avance

1.6.10. Régulation du transformateur

Lorsque le transformateur est en charge avec une tension primaire constante, la tension secondaire diminue à cause de la résistance et de la réactance de l'enroulement.

Soit V_{20} : la tension secondaire à vide

$$V_{20} = E_2 = KE_1 = KV_1$$

Parce qu'à vide la chute de tension au niveau de l'impédance primaire est négligeable.

V_2 : la tension secondaire en pleine charge.

La variation sur la tension secondaire de l'état à vide à l'état en charge est V_{20} - V_2. Cette variation divisée par V_{20} est appelée régulation 'en bas' si cette régulation est divisée par V_2 la régulation est dite 'en haut'.

$$\%\ \text{régulation 'en bas'} = \frac{V_{20} - V_2}{V_{20}} \times 100$$

$$\%\text{ régulation 'en haut'} = \frac{V_{20} - V_2}{V_2} \times 100$$

$$\%\text{ régulation 'en bas'} = vrcos\varphi \pm vxsin\varphi$$

Moins sera cette valeur, meilleur sera le transformateur, car un bon transformateur devrait préserver sa tension secondaire le plus constant possible sous toutes les conditions de charge.

Cette régulation peut être aussi exprimée en termes de valeurs du primaire. La f.é.m. $E'_2=E2/k=E_1=V_1$ et si la tension secondaire référée au primaire c'est $V'_2=V_2/k$

$$\%\text{ régulation} = \frac{V_1 - V'_2}{V_1} \times 100$$

$$\%\text{ régulation} = vrcos\varphi \pm vxsin\varphi$$

Dans les cas précédents, la tension primaire était maintenue constante tandis que la variation était constatée au niveau du secondaire. Si le transformateur est chargé, la tension secondaire chute avec un $cos\varphi\ en\ retard$ et augmente avec un $cos\varphi\ en\ avance$. Ainsi pour maintenir la tension secondaire constante, la tension primaire devrait être haussée. Cette hausse sur la tension primaire pour maintenir la tension de sortie de l'état à vide à l'état en charge sous un facteur de puissance donnée, exprimée en pourcentage de la tension nominale primaire, donne la régulation du transformateur supposons que la tension primaire V_1 soit élevée à V_1'.

$$\%\text{ régulation} = \frac{V'_1 - V_1}{V_1} \times 100$$

Exercice d'application 3 : un transformateur de 100 KVA possède 400 tours au primaire et 80 tours au secondaire. Les résistances primaire et secondaire sont respectivement 0,3 Ω et 0,01 Ω et les réactances sont respectivement 1,1 Ω et 0,035 Ω. La tension source est 2200V. Calculer :

a. L'impédance équivalente référée au primaire
b. La régulation et la tension secondaire en pleine charge sous un facteur de puissance en avance de 0,8.

1.6.11. Rendement du transformateur

Comme dans le cas des autres machines électriques, le rendement du transformateur sous une charge particulière et un facteur de puissance est défini comme la sortie divisée par l'entrée. Les deux puissances étant mesurées avec les mêmes unités (watts ou kilowatts).

$$Rendement = \frac{Puissance\ sortie}{puissance\ entrée}$$

Le transformateur étant une machine à haut rendement, comporte de très faibles pertes, ainsi il est impraticable d'essayer de calculer le rendement du transformateur en mesurant la puissance de sortie et d'entrée. Ces quantités sont à peu près de la même valeur et la meilleure façon de calculer est la suivante :

$$Rendement = \frac{Puissance\ sortie}{Puissance\ sortie + \Sigma pertes}$$

$$Rendement = \frac{Puissance\ sortie}{Puissance\ sortie + pertes\ cuivre + pertes\ fer}$$

$$\eta = \frac{Entrée - \Sigma Pertes}{Entrée} = 1 - \frac{Pertes}{Entrée}$$

Il faut noter que le rendement est basé sur la puissance de sortie en watts et non en volts-ampères (VA), bien que les pertes soient proportionnelles aux VA. Ainsi en toute charge en VA, le rendement dépend du facteur de puissance. Le rendement est maximum sous un facteur de puissance égal à l'unité.

Le rendement peut être calculé en déterminant les pertes fer (expérience à vide) et les pertes cuivre (test en court-circuit).

1.6.12. Condition pour le rendement maximum

Pertes cuivre $= I_1^2 R_P\ ou\ I_2^2 R_S = P_{cu}$

Pertes fer = pertes hystérésis + pertes courant de Foucault = $P_h + P_F = P_f$

En considérant le coté primaire, si $P_1 = V_1 I_1 cos\varphi$

$$\eta = \frac{V_1 I_1 cos\varphi_1 - \Sigma Pertes}{V_1 I_1 cos\varphi_1} = \frac{V_1 I_1 cos\varphi_1 - I_1^2 R_P - P_f}{V_1 I_1 cos\varphi_1} = 1 - \frac{I_1 R_P}{V_1 cos\varphi_1} - \frac{P_f}{V_1 I_1 cos\varphi_1}$$

en dérivant chaque membre par rapport à I_1 on a :

$$\frac{d\eta}{dI_1} = 0 - \frac{R_P}{V_1 cos\varphi_1} + \frac{P_f}{V_1 I_1^2 cos\varphi_1}$$

Pour que le rendement soit max il faut que

$$\frac{d\eta}{dI_1} = 0 \rightarrow \frac{R_P}{V_1 cos\varphi_1} = \frac{P_f}{V_1 I_1^2 cos\varphi_1}$$

Ou bien

$$R_P I_1^2 = P_f = I_2^2 R_S$$

Le rendement est maximum lorsque les pertes cuivre sont égales aux pertes fer

Pertes Cu= pertes Fe

L'intensité de sortie correspondant au rendement maximum est : $I_2 = \sqrt{\frac{P_f}{R_S}}$

C'est cette valeur de I_2 qui donne l'égalité entre P_f et Pcu.

Remarque : si on donne les pertes fer et les pertes cuivre en pleine charge, alors la charge à la quelle les pertes seraient égales correspond au

$$I_2 = I_{2n} \times \sqrt{\frac{P_F}{P_{cun}}}$$

Le rendement à n'importe quelle charge est donnée par la formule.

$$\eta = \frac{x \times Sn \times cos\varphi}{(x \times Sn \times cos\varphi) + x^2 P_{cun} + P_f} \times 100$$

x est la fraction de la charge actuelle sur la pleine charge ou la proportion par rapport à la pleine charge.

$P_f: W\ ou\ KW$; $P_{cu}: W\ ou\ KW$

1.6.13. Les pertes dans le transformateur

Elles regroupent les pertes fer et pertes cuivre.

1. Les pertes fer

Elles sont les pertes sur l'hystérésis P_h et les pertes sur les courants de Foucault P_F. Le flux dans le noyau du transformateur demeure pratiquement constant pour toute charge (la variation étant de l'ordre de 1 à 2% de l'état à vide à l'état en charge). Les pertes fer sont pratiquement les même sous toute charge.

$$P_h = \eta . B_{max}^{1,6} . f . V\ en\ watts$$

$$P_F = P . B_{max}^2 . f^2 . t^2\ en\ watts$$

2. Les pertes cuivre

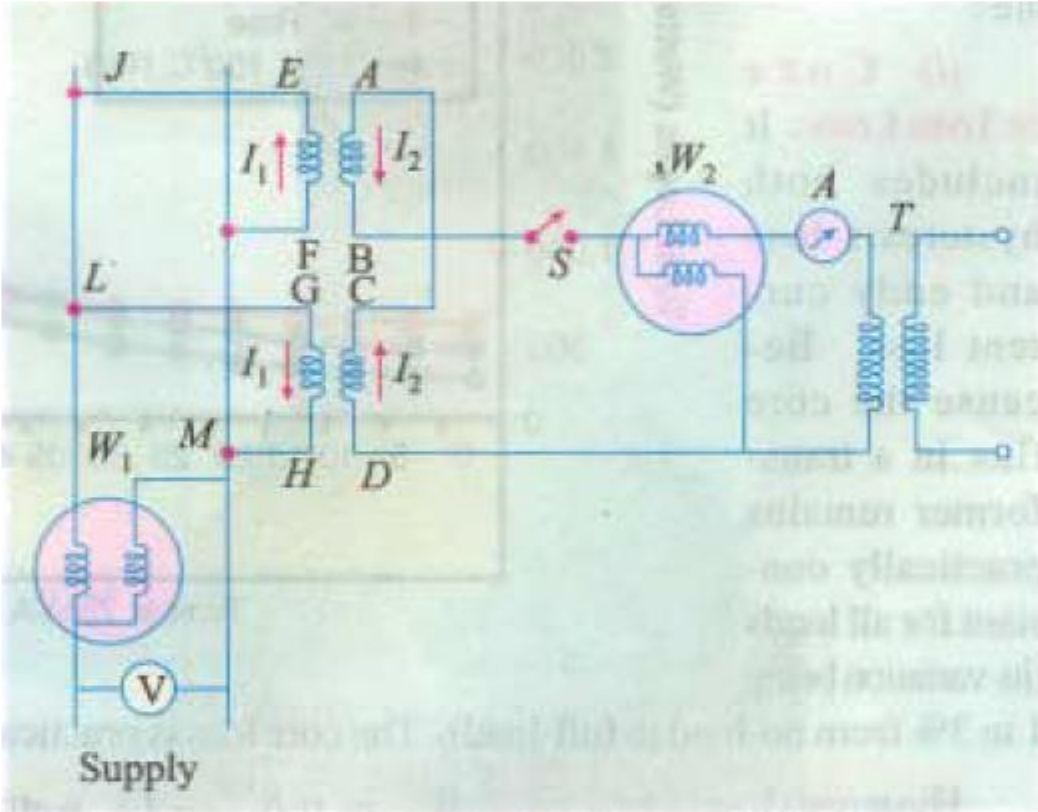
Elles sont dues à la résistance ohmique des enroulements du transformateur. Les pertes cuivre totales sont égales à :

$P_{cu} = I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2 = I_1^2 R_P = I_2^2 R_S$

Les pertes cuivre sont proportionnelles au carré de l'intensité ou KVA^2. En d'autres termes Pcu est le ¼ de sa valeur en pleine charge.

1.6.14. Le test Sampner ou test dos à dos

Ce test fournit les données pour calculer la régulation, le rendement et l'échauffement suivant les conditions de charge et il est réalisable sauf si deux transformateurs identiques sont disponible. L'un des transformateurs sert à charger l'autre et l'ensemble est connecté à la source. La puissance consommée à partir de la source est celle nécessaire pour fournir les pertes au niveau des deux transformateurs et aussi une petite partie perdue dans le circuit de contrôle.



Comme nous le voyons, les primaires des deux transformateurs sont branchés en parallèle aux bornes de la source A.C. lorsque S est ouvert, W1 lit les pertes fer pour les deux transformateurs. Les secondaires sont branchés tels que leurs potentiels sont en opposition l'un de l'autre. Ceci est positif lorsque $V_{AB}=V_{AC}$ et A est relié à C tandis que B est relié à D. dans ce cas aucune intensité ne va circuler dans la maille constituée par les secondaires. T est un transformateur auxiliaire à basse tension qui peut être ajuster afin d'obtenir une tension variable et par conséquent une intensité dans le circuit secondaire, ainsi on peut établir l'intensité I_2 en pleine charge.

On peut voir que I_2 circule suivant le trajet DCAB, I_1 circule suivant la trajectoire FEJLGHMF et ne traverse pas W1. Pendant ce temps-là W1 continue à lire les pertes fer tandis que W2 mesure les pertes cuivre en pleine charge (ou bien à toute autre valeur du courant de charge I_2).

1.7. Pourcentage résistance, réactance et impédance.

Ces quantités sont d'habitudes mesurées par la chute de tension en pleine charge. L'intensité de charge est exprimée en pourcentage de la tension nominale de la bobine sur laquelle les calculs sont faits.

a) Les pourcentages de chute sur la résistance en pleine charge

$$\%R = \frac{I_1 R_P}{V_1} \times 100 = \frac{I_1^2 R_P}{V_1 I_1} \times 100 = \frac{I_2^2 R_S}{V_2 I_2} \times 100 = \%P_{cu}\ (en\ pleine\ charge) = vr$$

b) Le pourcentage de chute sur la réactance en pleine charge

$$\%X = \frac{I_1 X_P}{V_1} \times 100 = \frac{I_2 X_S}{V_2} \times 100 = vx$$

c) Le pourcentage de chute sur l'impédance en pleine charge

$$\%Z = \frac{I_1 Z_P}{V_1} \times 100 = \frac{I_2 Z_S}{V_2} \times 100 = \sqrt{(\%R)^2 + (\%X)^2}$$

d) De ces équations on peut noter que la valeur ohmique des résistances, réactances et impédances sont obtenus par les formules suivantes :

$$R_P = \frac{\%RV_1}{100 \times I_1} = \frac{\%P_{cu} \times V_1}{100 \times I_1} \quad ; \quad R_S = \frac{\%RV_2}{100 \times I_2} = \frac{\%P_{cu} \times V_2}{100 \times I_2}$$

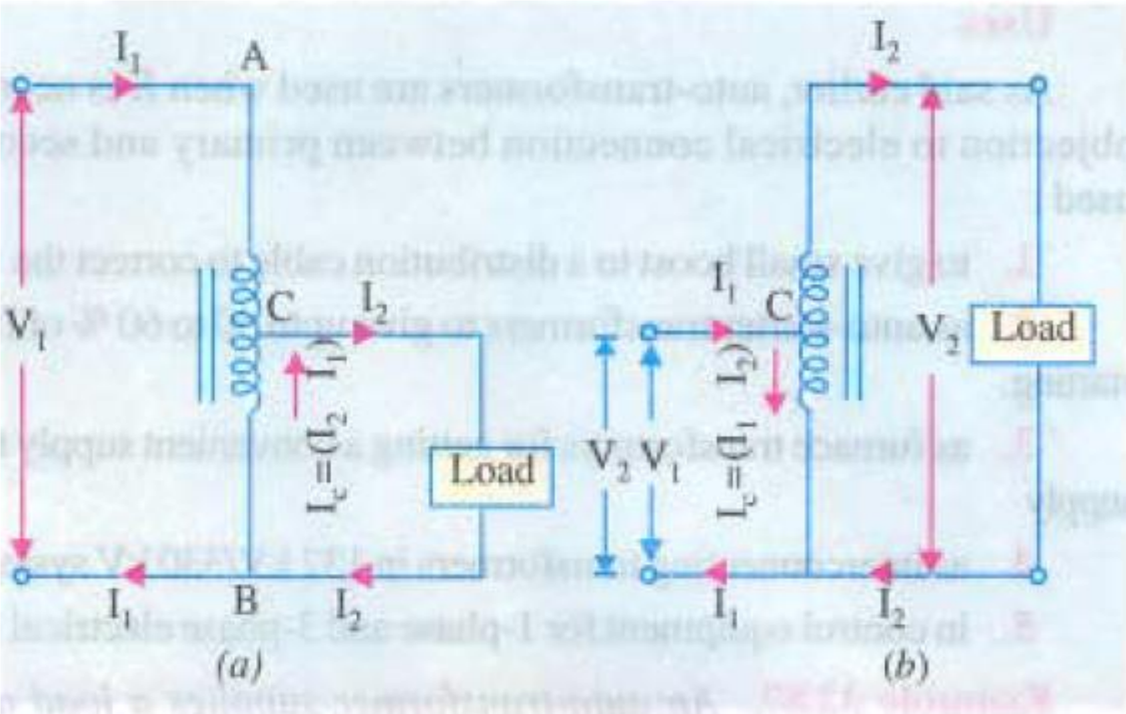
$$X_P = \frac{\%XV_1}{100 \times I_1} = \frac{vx \times V_1}{100 \times I_1} \quad ; \quad X_S = \frac{\%XV_2}{100 \times I_2} = \frac{vx \times V_2}{100 \times I_2}$$

$$Z_P = \frac{\%ZV_1}{100 \times I_1} \quad ; \quad Z_S = \frac{\%ZV_2}{100 \times I_2}$$

1.8. Autotransformateur

C'est un transformateur avec un seul enroulement, une partie de celui étant commune au primaire et au secondaire. De manière évidente dans ce transformateur le primaire et le secondaire ne sont pas électriquement isolés l'un de l'autre comme c'était dans le cas du transformateur ordinaire à deux enroulements. A cause d'une seule bobine, ce transformateur consomme moins de fil en cuivre et par conséquent coutera moins cher. Il est utilisé là où le rapport de transformation est légèrement différent de l'unité.

Sur les figures a et b sont respectivement l'autotransformateur abaisseur et élévateur.



Suivant la figure a, la portion AB constitue l'enroulement primaire comportant N_1 spires et la portion BC le secondaire avec N_2 spires. Si on néglige les pertes fer et le courant à vide I_0 :

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{I_1}{I_2} = m$$

Le courant dans la portion CB est la différence vectorielle entre I_2 et I_1. Cependant, les deux courants étant pratiquement en opposition de phase, le courant résultant est égal à (I_2-I_1), car I_2 est supérieure à I_1.

Comparer à un transformateur ordinaire à deux enroulements de même puissance de sortie, l'autotransformateur possède un rendement plus élevé et un gabarit inférieur. En plus sa régulation est supérieure.

Applications :

Comme énoncé plus haut, les autotransformateurs sont utilisés là où le rapport de transformation est proche ou égal à l'unité, et aussi là où il n'y a pas d'objection pour une connexion électrique entre le primaire et le secondaire. Ces transformateurs sont utilisés pour :

1) Apporter un léger survoltage au début d'une ligne de transport d'énergie électrique afin de corriger la chute de tension survenue sur la tension de réception ;
2) Pour le démarrage afin de de fournir jusqu'à 50-60% de la tension nominale à un moteur asynchrone.

3) Interconnecter les transformateurs dans des systèmes non standardisés exemple : 90KV/225KV

1.9. Economie du cuivre

Le volume, donc la masse de cuivre est proportionnel à la longueur et à la section des conducteurs. La longueur du conducteur est proportionnelle au nombre de spires ; entre autres la section d'un conducteur dépend du courant qui la traverse. Par conséquent, la masse est proportionnelle au produit du courant par le nombre de spires.

Selon la figure (a) :

La masse de cuivre dans la section AC est proportionnelle à : $(N_1\text{-}N_2)\ I_1$

La masse de cuivre dans la section BC est proportionnelle à : $N_2\ (I_2\text{-}I_1)$

La masse totale de cuivre dans l'autotransformateur est proportionnelle à : $(N_1\text{-}N_2)\ I_1 + N_2\ (I_2\text{-}I_1)$. Lorsqu'un transformateur à deux enroulements devrait développer la même fonction :

La masse de cuivre au primaire est proportionnelle à $N_1\ I_1$ et au secondaire est proportionnelle à $N_2\ I_2$

La masse totale de cuivre dans un transformateur à double enroulements est proportionnelle à : $N_1\ I_1 + N_2\ I_2$.

Le rapport :

On désigne par M_{cuA} la masse de cuivre dans l'autotransformateur et par M_{cuO} la masse de cuivre dans un transformateur ordinaire à double enroulements, ainsi :

$$\frac{\text{McuA}}{\text{McuO}} = \frac{(N_1 - N_2)I_1 + N_2(I_2 - I_1)}{N_1I_1 + N_2I_2}$$

$$= \frac{N_1I_1 - N_2I_1 + N_2\,I_2 - N_2\,I_1}{N_1I_1 + N_2I_2} = \frac{N_1I_1 + N_2\,I_2 - 2N_2\,I_1}{N_1I_1 + N_2I_2}$$

$$= 1 - \frac{2N_2\, I_1}{N_1 I_1 \left(1 + \frac{N_2}{N_1} \times \frac{I_2}{I_1}\right)} = 1 - \frac{2\,\frac{N_2}{N_1}}{1 + \frac{N_2}{N_1} \times \frac{I_2}{I_1}}$$

$$= 1 - \frac{2m}{1+1} = 1 - \frac{2m}{2} = 1 - m$$

$$M_{cuA} = (1 - m) \times M_{cuO}$$

On désigne par ΔM_{cu} l'économie de cuivre, ainsi :

$$\Delta \mathrm{Mcu} = M_{cuO} - M_{cuA} = M_{cuO} - (1 - m) \times M_{cu0} = mM_{cuO}$$

1.10. Fonctionnement (opération) parallèle des transformateurs monophasés

En termes d'opération parallèle de plusieurs transformateurs il faut comprendre un fonctionnement suivant lequel leurs bobines secondaires sont connectées à une charge commune alors que leurs primaires reçoivent une alimentation à partir d'un même réseau figure 1.10.

On peut procéder à cette opération lorsque les cas suivants se posent :

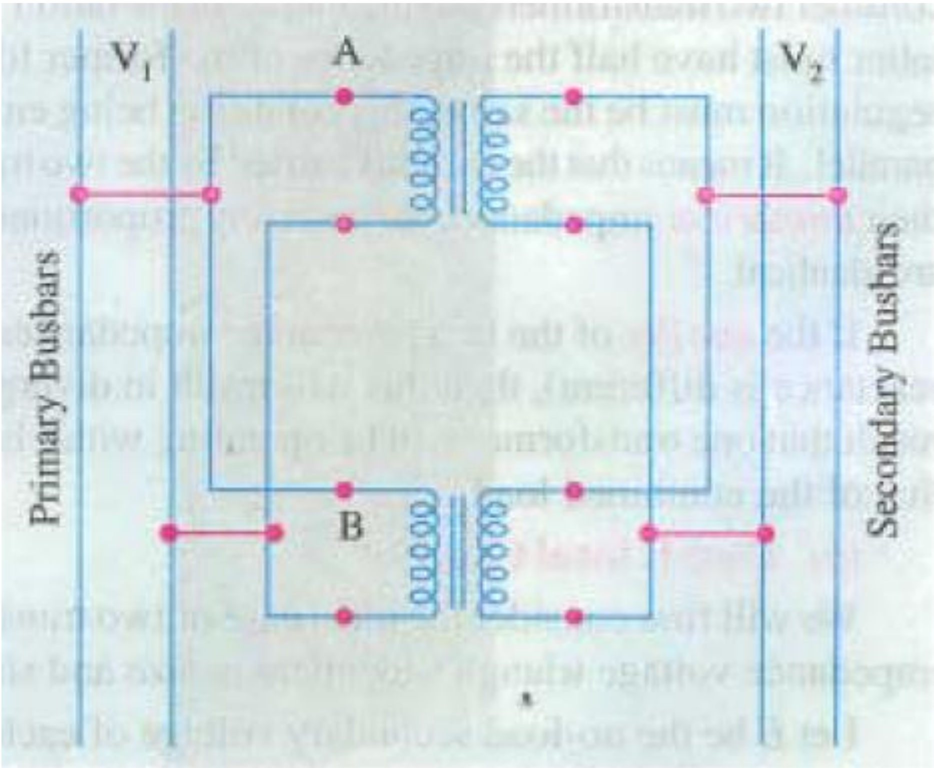
1) En période de forte oscillation (saisonnière ou quotidienne) des charges. Dans ce cas en fonction de la charge commune, il est possible de laisser en opération autant de transformateurs afin que chacun reçoive une charge proche de la nominale et que les pertes en eux soient minimum.
2) Pour disposer d'une réserve dans les réseaux de distribution d'énergie en cas d'incident ou de réparation effectuée sur d'autre transformateurs.
3) Lorsque la puissance transmise dépasse celle sous laquelle le transformateur est conçu.

Condition de mise en parallèle :

Certaines conditions devraient être remplies afin d'assurer un partage équitable de la charge commune au niveau des transformateurs selon leur rangée de puissance apparente et écarter toute circulation de courant local.

1. Les enroulements primaires des transformateurs doivent être conformes à la tension et à la fréquence du système d'alimentation.
2. Les transformateurs devraient être connectés en tenant compte de la polarité.

3. Les tensions nominales au primaire et au secondaire doivent être identiques, en d'autres termes les transformateurs auront le même rapport de transformation.
4. Le pourcentage des impédances sera égal en amplitude et avoir le même rapport X/R dans le but d'éviter la circulation de courant local donc d'opérer sous différents facteurs de puissance.
5. Lorsque les transformateurs sont de différentes puissances apparentes, les impédances équivalentes devraient être inversement proportionnelles à la puissance individuelle en KVA, si on doit parer à la circulation du courant local.



La condition (1) est facilement réalisable.

La condition (2) est essentielle car à défaut de la satisfaire la mise en parallèle serait impossible. Le non respect de la polarité entraine un court-circuit.

Il existe une liberté d'action avec les conditions (3) et (4) si (3) n'est exactement satisfaite, càd lorsque les deux transformateurs ont des rapports de transformation légèrement différents, l'opération en parallèle reste possible. Mais suivant l'inégalité des f.é.m. induites dans les secondaires même à vide, il y'aura toujours un courant qui circule entre les deux enroulements et aussi entre les primaires lorsque les secondaires sont connectés en parallèle.

Lorsque les secondaires sont chargés, ce courant local va tenter de produire une condition d'inégalité de charge. Ainsi il serait impossible de réaliser la sortie en pleine puissance en KVA à partir du groupe connecté en parallèle sans que l'un des transformateurs ne soit surchauffé.

Lorsque la condition (4) n'est pas satisfaite (si les triangles des impédances ne sont pas identiques), l'opération en parallèle serait encore possible mais les facteurs de puissances suivant lesquels les deux transformateurs vont fonctionner seront différents du facteur de puissance de la charge commune. Dans ce cas les deux transformateurs ne vont pas se partager proportionnellement la charge selon leur capacité en KVA.