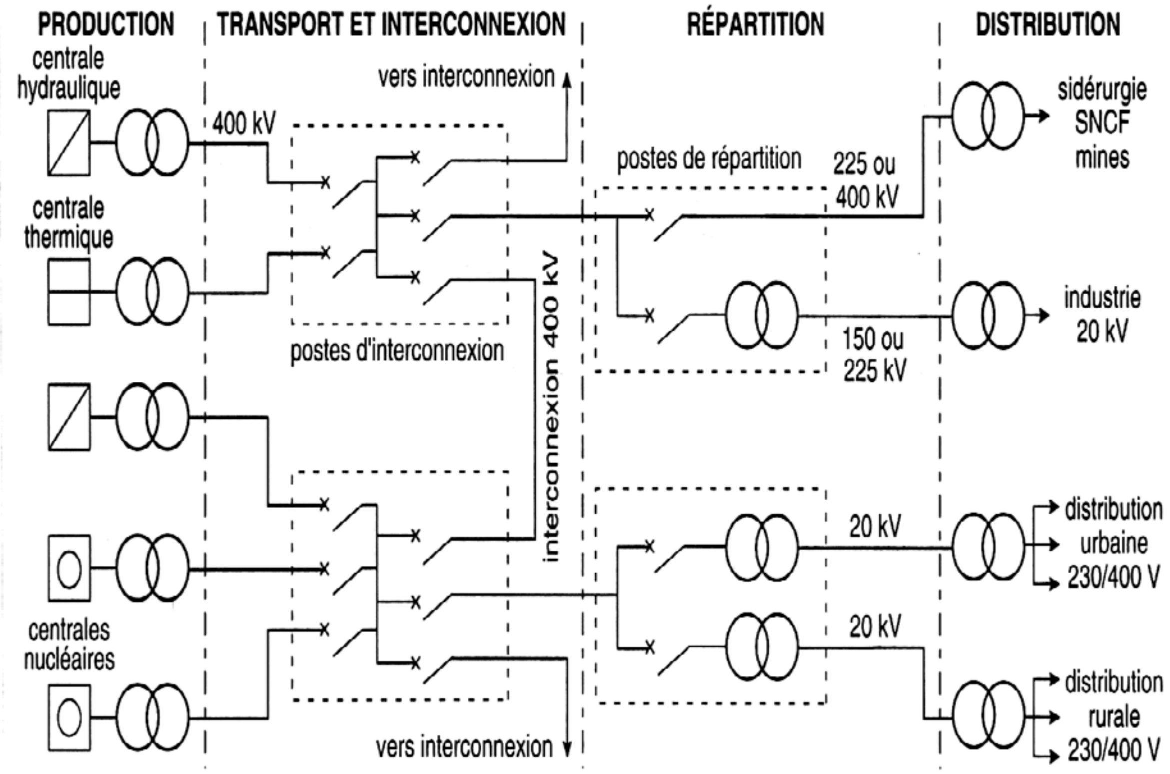
TRANSFOR MATEURS

I- Introduction:

Chaque fois qu'on allume une lampe électrique ou qu'on démarre un moteur, il faut simultanément produire et transporter l'énergie. L'une des raisons principales du succès de l'électricité tient à ce qu'elle est très facilement transportable.
Les transformateurs sont les liens indispensables entre les différentes parties du réseau national de distribution de l'énergie électrique.



De la production à l'utilisation

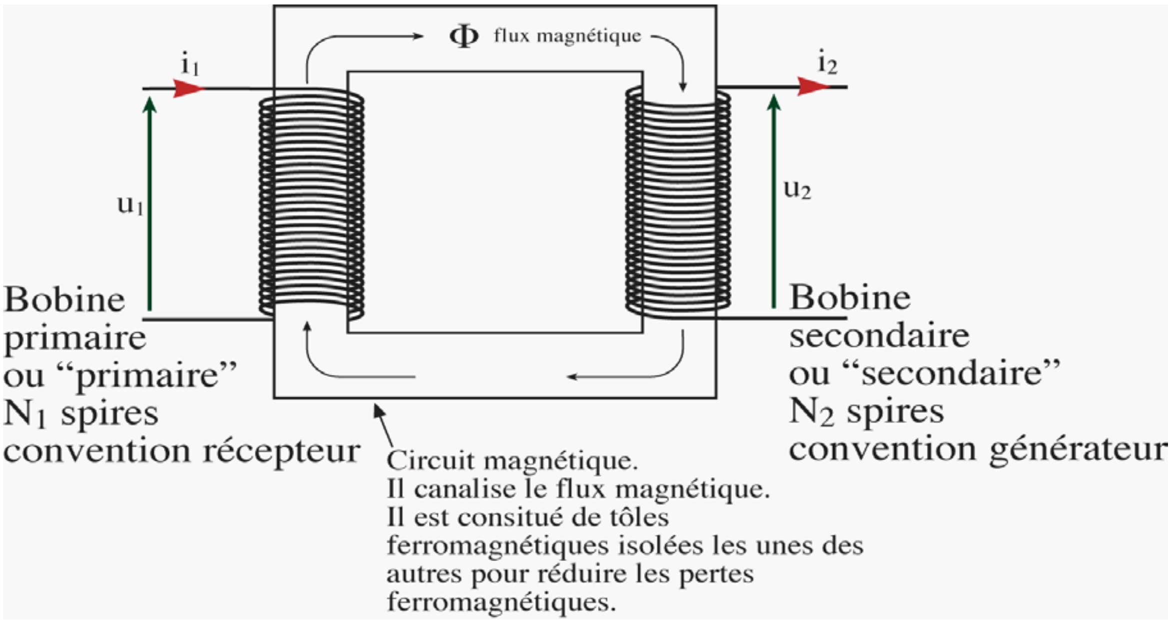
Qu'est ce que c'est qu'un transformateur?

Un **transformateur électrique** est un convertisseur permettant de modifier les valeurs de tension et d'intensité du courant délivrées par une source d'énergie électrique alternative, en un système de tension et de courant de valeurs différentes, mais de même fréquence et de même forme.
Dans un **transformateur**, l'énergie est transférée du primaire au secondaire par l'intermédiaire du **circuit magnétique**, généralement feuilleté pour réduire les pertes par courant de foucault, que constitue la carcasse du transformateur. Ces deux circuits sont alors **magnétiquement couplés**.

II- Transformateur monophasé:

1- Schéma:

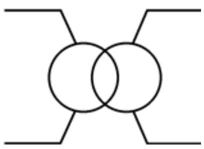
Un transformateur monophasé comporte un circuit magnétique feuilleté sur lequel deux enroulements sont montés: l'enroulement relié à la source appelé primaire et l'enroulement relié à la charge appelé secondaire. On représente ci-dessous le schéma de principe.



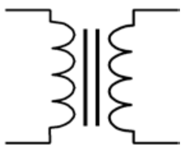
- Le primaire: alimenté par un générateur de tension alternative de tension V_1 et comportant n_1 spires. Il absorbe le courant I_1. Le primaire transforme l'énergie électrocinétique reçue en énergie magnétique. C'est un récepteur d'énergie électrique.
- Le secondaire: comporte n_2 spires ; il fournit, sous la tension V_2, un courant I_2 au dipôle récepteur. Le secondaire transforme l'énergie magnétique reçue du primaire en énergie électrocinétique. C'est un générateur d'énergie électrique.
C'est le phénomène d'induction magnétique qui est exploité dans le transformateur. Il est traduit par la loi de Faraday.
Loi de Faraday : une variation de flux à travers une spire créer une f.é.m. « e ». Inversement une f.é.m. « e » dans une spire crée une variation de flux à travers celle-ci.

$$e = -\frac{d\psi}{dt}$$

Le symbole d'un transformateur monophasé est:



ou



2- Transformateur parfait ou idéal:

C'est un transformateur virtuel sans aucune perte, il est utilisé pour modéliser un transformateur réel. Dans un transformateur parfait, le rendement est de 100%
On alimente le primaire par un générateur de tension sinusoïdale U_1 qui débite un courant I_1 et par conséquent le primaire sera considéré comme récepteur. La puissance au primaire est égale à $U_1 I_1$. Le secondaire génère une puissance égale à $U_2 I_2$ pour un récepteur donné.

a- Transformateur à vide:

On ne branche pas de charge donc $I_2 = 0$ et le transformateur sera équivalent à une bobine ferromagnétique. Dans ce cas, c'est la force magnétomotrice f.m.m $N_1 I_{10}$ qui va donner naissance au champ magnétique. Ceci va entraîner aux bornes du secondaire l'apparition d'une tension secondaire à vide U_{20}.
En négligeant la chute de tension due au passage du courant I_{10} dans la résistance du primaire et en supposant que tout le flux traversant les spires du primaire traverse les spires secondaires, alors:

$$U_1 = N_1 \frac{d\psi}{dt} \quad \text{et} \quad U_{20} = N_2 \frac{d\psi}{dt} \quad \text{d'où} \quad \frac{U_{20}}{U_1} = \frac{N_2}{N_1}$$

b- Transformateur en charge:

Quand on branche un récepteur entre les bornes secondaires, un courant circule dans celui ci càd que $i_2 \neq 0$. En négligeant la chute de tension due au passage des courants I_1 et I_2 dans les résistances R_1 et R_2 du primaire et du secondaire, en supposant aussi que le même flux traverse la totalité des spires des deux enroulements, on a:

$$U_1 = N_1 \frac{d\psi}{dt} \quad \text{et} \quad U_2 = N_2 \frac{d\psi}{dt} \quad \text{d'où} \quad \frac{U_2}{U_1} = \frac{N_2}{N_1}$$

Le champ magnétique, créé cette fois ci par la force magnétomotrice totale, est:
$N_1 I_1 + N_2 I_2$. Or ce champs magnétique est constant par conséquent la cause qui lui a donné naissance restera la même (à vide comme en charge), par la suite $N_1 I_1 - N_2 I_2 = N_1 I_{10}$.
Alors

$$N_1 (I_1 - I_{10}) - N_2 I_2 = 0$$

Or, pour les fortes valeurs du courant débité, $N_1 I_1$ est très supérieur à $N_1 I_{10}$, il en est de même de $N_2 I_2$ ==> $N_1 I_1 = N_2 I_2$ => $m = \frac{N_2}{N_1} = \frac{I_1}{I_2}$.

c- Mise en équation:

Le fonctionnement d'un transformateur parfait est régi par 3 équations:
Au primaire:

$$e_1 = -N_1 \frac{d\psi}{dt}, \qquad U_1 = -e_1 = N_1 \frac{d\psi}{dt}$$

Au secondaire:
Le primaire étant alimenté par une tension sinusoïdale, alors le champ magnétique créé ainsi

que le flux sont aussi sinusoïdaux. Ce champs magnétique vas induire dans les N_2 spires secondaires f.e.m

$$e_2 = -N_2 \frac{d\psi}{dt} \quad , \qquad U_2 = -e_2 = N_2 \frac{d\psi}{dt}$$

On ajoute aux deux équations précédentes la troisième équation suivante Au secondaire:

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

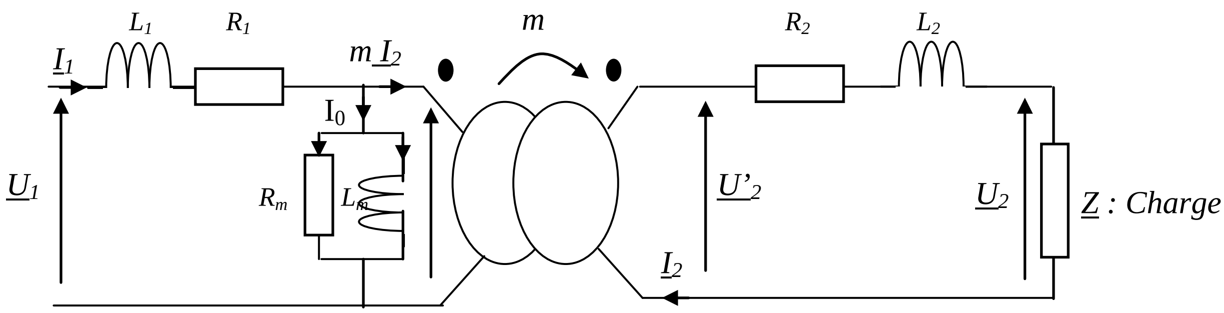
- m est appelé **le rapport de transformation.**

si m > 1, le transformateur est élévateur de tension abaisseur de courant;
si m < 1, le transformateur est abaisseur de tension élévateur de courant.
si m = 1, le transformateur est dit isolateur.
Donc, en basse tension, l'enroulement du transformateur utilisé contient mois de spires de grosse section si l'on compare au cas en haute tension.

- Les transformateurs ont en général un bon rendement. Comme le transformateur est parfait, et que $U_2 I_2 = U_1 I_1$ les puissances primaires sont totalement transmises au secondaire: $P_1 = P_2$ $Q_1 = Q_2$; $S_1 = S_2$; et $\varphi_1 = \varphi_2$.

3- Transformateur réel:

Le schéma équivalent d'un transformateur monophasé réel est le suivant:



En effet,

En réalité, les enroulements primaire et secondaire ont des résistances R_1 et R_2 et ne sont pas parfaitement couplés. Si le flux qui traverse les spires primaires est φ_1 à travers les spires secondaires est φ_2.
Les équations du transformateur sont:

$$\begin{cases} U_1 = R_1 I_1 + N_1 \dfrac{d\varphi_1}{dt} \\ U_2 = R_2 (-I_2) + N_2 \dfrac{d\varphi_2}{dt} \end{cases}$$

Une petite partie φ_{f1}, du flux qui traverse les spires primaires ne traverse pas les spires secondaires. De même, le flux de fuites secondaire φ_{f2} traverse le secondaire mais pas le primaire.
Si φ est le flux commun aux deux enroulements, les flux totaux à travers ceux-ci sont donc:

$$\varphi_1 = \varphi + \varphi_{f1} \quad \text{et} \quad \varphi_2 = \varphi + \varphi_{f2}$$

Les flux de fuites ont une grande partie de leur trajet hors du circuit magnétique, dans l'air ou dans les bobinages eux-mêmes. Ils sont donc pratiquement proportionnels aux courants qui les créent:

$$\varphi_{f1} = \frac{L_1 I_1}{N_1} \ , \qquad \varphi_{f2} = -\frac{L_2 I_2}{N_2}$$

L_1 est l'inductance de fuites du primaire et L_2 est celle du secondaire.
Les équations des tensions deviennent:

$$\begin{cases} U_1 = R_1 I_1 + L_1 \dfrac{d I_1}{dt} + N_1 \dfrac{d\varphi}{dt} \\ U_2 = R_2 (-I_2) - L_2 \dfrac{d I_2}{dt} + N_2 \dfrac{d\varphi}{dt} \end{cases}$$

Ou en notation complexe,

$$\begin{cases} \overline{U_1^{'}} = \overline{U_1} - (R_1 + j\, L_1\,\omega)\,\overline{I_1} \\ \overline{U_2} = \overline{U_2^{'}} - (R_2 + j\, L_2\,\omega)\,\overline{I_2} \end{cases}$$

Avec $\overline{U_1^{'}} = j\,N_1\,\omega\varphi$ et $\overline{U_2^{'}} = j\,N_2\,\omega\varphi$ par conséquent $\dfrac{\overline{U_1^{'}}}{U_2^{'}} = \dfrac{N_1}{N_2}$.

Ce transformateur nécessite un courant magnétisant $\overline{I_0}$ pour créer le flux dans le circuit magnétique; d'autre part il consomme des pertes fer par hystérésis et courant de Foucault

$$N_1\,\overline{I_1} = N_2\,\overline{I_2} + N_1\,\overline{I_{10}}$$

donc on ajoute des éléments qui tiennent compte de sa consommation en puissance active et en puissance réactive. La résistance R_m et l'inductance L_m présentent les pertes fer ou magnétiques. Le courant magnétisant I_0 présente deux composantes: I_{0a} la composante active et I_{0r} la composante réactive.

$$P_{rm} = U_1^{'} I_0 \cos\varphi_0 = U_1^{'}\, I_{0a} \qquad\qquad Q_m = U_1^{'} I_0 \sin\varphi_0 = U_1^{'}\, I_{0r}$$

Pour faciliter l'étude, on ramène le tout vers soit le primaire soit le secondaire. On peut transférer ou ramener une impédance du secondaire vers le primaire sans aucun problème à condition de la diviser par m^2. De même, on peut ramener une impédance du primaire vers le secondaire à condition de la multiplier par m^2. En effet, puisque $\overline{U_2^{'}} / \overline{U_1^{'}} = n_2 / n_1$, on peut écrire:

$$\frac{n_2}{n_1}\,\overline{U_1} - (R_1 + j\,L_1\,\omega)\left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2 \overline{I_2} - (R_2 + j\,L_2\,\omega)\,\overline{I_2} = \overline{U_2}$$

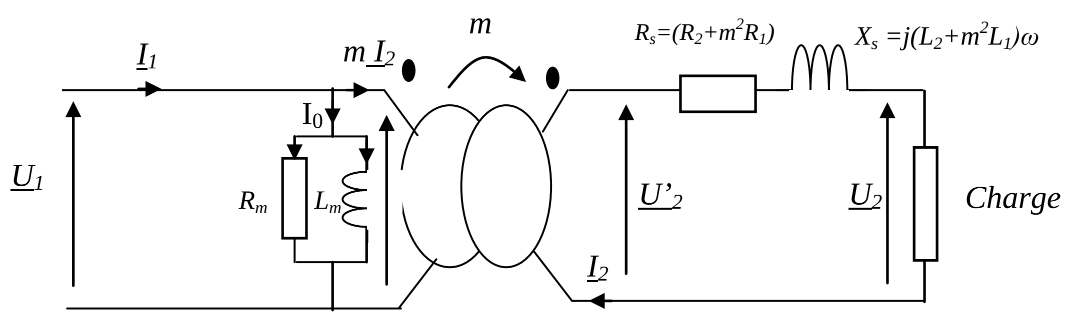
Ou $\dfrac{n_2}{n_1}\,\overline{U_1} - (R_s + j\,X_s)\,\overline{I_2} = \overline{U_2}$

Avec $\begin{cases} R_s = R_2 + R_1 \left(\dfrac{n_2}{n_1} \right)^2 \\ X_s = L_2\,\omega + L_1\,\omega \left(\dfrac{n_2}{n_1} \right)^2 \end{cases}$

$R_s = R_2 + m^2R_1$: résistance totale ramenée au secondaire,
$X_s = L_2 + m^2L_1$: inductance totale ramenée au secondaire.

Dans notre cas, on ramène R_1 et $jL_1\omega$ vers le secondaire, ce qui revient à les multiplier par m^2.

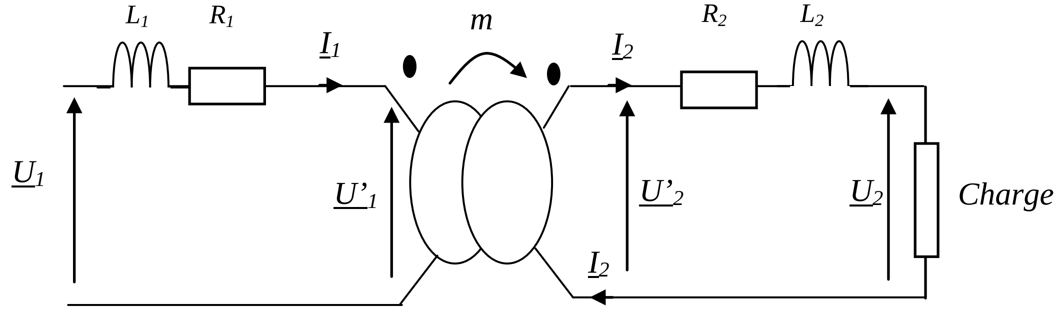
Par conséquent, le schéma équivalent ramené au secondaire devient:



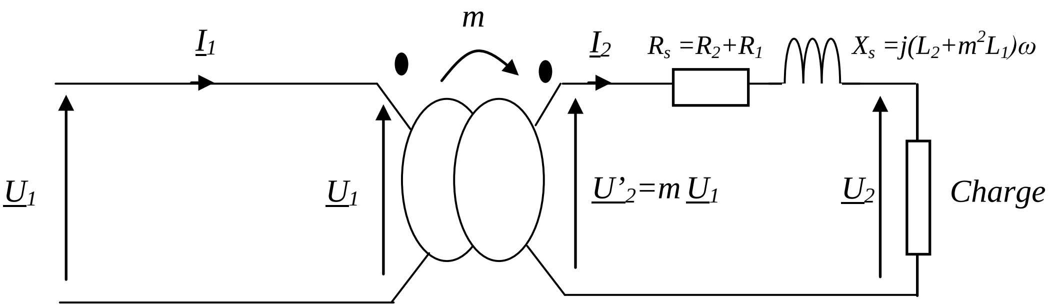
Pour la détermination des éléments du schéma équivalent, on effectue deux essaies différents: l'essai à vide et l'essai en court circuit.

4- Etude du transformateur dans l'approximation de Kapp:

La méthode basée sur le diagramme de kapp est une méthode géométrique pour déterminer U_2 du transformateur.
L'hypothèse de Kapp consiste à négliger I_0 devant I_1 et de prendre $I_1 = m\ I_2$. Comme le courant magnétisant I_0 est négligeable devant le courant primaire I_1, l'hypothèse de Kapp consiste à prendre $I_0 = 0$ càd on débranche l'ensemble R_m // L_m et on obtient le schéma équivalent suivant:

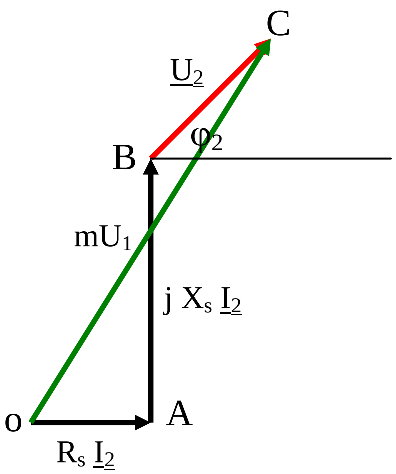


Par conséquent, le schéma équivalent ramené au secondaire devient:



Ceci nous donne $\frac{U_2^{'}}{U_1} = m \quad \Rightarrow \quad U_2^{'} = m\,U_1$ et $m\,\overline{U_1} = R_s\,\overline{I_2} + j\,X_s\,\overline{I_2} + \overline{U_2}$

Principe de construction du diagramme de Kapp:



On commence par construire le triangle de Kapp (OAB), puis au point B on trace la direction de déphasé de φ_2 par rapport à I_2 et à partir du point O, on trace un arc de cercle de rayon mU_1, l'intersection de mU_1 avec la direction de donne le point C et par conséquent U_2 est présenté par BC.
Les éléments du diagramme à déterminer par les essais à vide et en charge soit en court-circuit sont: m, R_s, et X_s.
La tension U_2 se déduit à partir du diagramme.

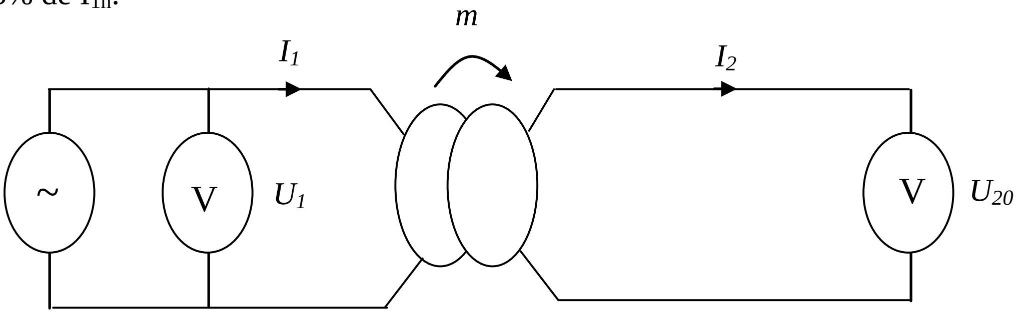
Remarque:

Si on ne dispose pas d'une charge pouvant supporter le courant secondaire nominal, on ne peut pas faire l'essai en charge, par conséquent on fait appel à l'essai à vide et à l'essai en court circuit qui ne nécessitent pas de charge.

5- Détermination des caractéristiques du transformateur:

a- Essai à vide:

Dans cet essai, il n'y a pas de charge (I_2=0). Pour calculer le rapport de transformation, on utilise, en pratique, deux voltmètres un au primaire et un autre au secondaire et on alimente le primaire par une source sinusoïdale de valeur efficace égale à U_{1n} (valeur indiquée par la plaque signalétique du transformateur) comme le montre la figure ci-dessous. Dans ce cas, I_{10} est de 1 à 5% de I_{1n}.



Puisque le courant I_2 est nul, les chutes de tension dans R_s et X_s sont nulles ($U_2 = U'_2$). Pour désigner qu'on travaille à vide, on rajoute « o » à la tension U_2 (càd U_2 est noté U_{20}).

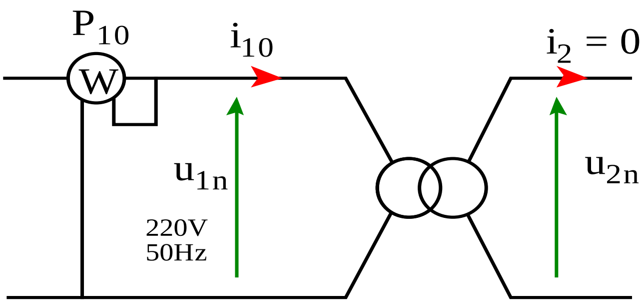
Le rapport de transformation sera donc: $m = \frac{U'_2}{U_1} = \frac{U_{20}}{U_1}$.

Bilan des puissances :

A vide le circuit secondaire est ouvert : $I_2 = 0 \Rightarrow P_2 = 0$ et $P_{J2} = 0$

En plus $P_{10} = P_{J10} + P_{fer}$ autrement dit toute l'énergie absorbée au primaire est utilisée pour compenser les pertes fer P_{fer} et les pertes joules au primaire P_{J10}.

Or, à vide I_0 est très faible. Par conséquent $P_{J10} << P_{10}$ donc $P_{10} = P_{fer}$. Pour mesurer P_{10} on insère un wattmètre au primaire comme le montre la figure ci-dessous:



Finalement l'essai à vide donne: $P_{10} = P_{fer}$

par conséquent:

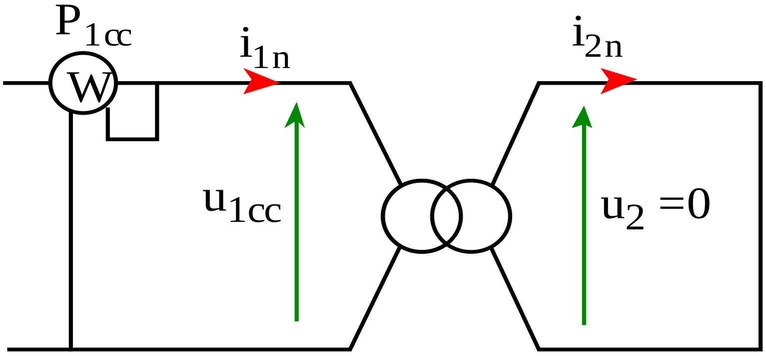
$$R_m = \frac{U_1}{I_{10a}} = \frac{U_1}{I_{10}\cos(\varphi_{10})} \qquad \text{et} \qquad L_m = \frac{U_1}{I_{10r}} = \frac{U_1}{I_{10}\sin(\varphi_{10})}$$

Remarque:

- Les pertes fer dépendent essentiellement du champ magnétique donc de la tension U_1 et de la fréquence f. Comme ces deux grandeurs restent les mêmes à vide ou en charge, les pertes fer mesurées à vide sont les mêmes que celles en charge.
- De même pour le rapport de transformation qui est calculé à vide. Il est le même pour tous les essais.

b- Essai en court-circuit:

On alimente le primaire sous une tension variable qu'on fait croître de 0 à une tension U_{1cc} très réduite qui correspond à un courant secondaire $I_{2cc} = I_{2n}$. U_{1cc} est de 1 à 5% de U_{1n}. On mesure U_{1cc}, I_2 et on relève la puissance P_{1cc} fournie au transformateur comme le montre le schéma ci-dessous:



Le circuit secondaire est en court-circuit: $U_2 = 0 \Rightarrow P_2 = 0$ donc toute l'énergie absorbée au primaire (la puissance mesurée P_{1cc}) est utilisée pour compenser les pertes fer et les pertes joules.

$$P_J = R_1 I_1^2 + R_2 I_{2n}^2 \quad \Rightarrow \quad P_J = R_1(m\, I_{2n})^2 + R_2 I_{2n}^2 = I_2^2 (R_2 + m^2 R_1) = R_s I_{2n}^2$$

d'une part: $$P_{1cc} = P_{mag} + P_J = \frac{U_{1cc}^2}{R_m} + \left(R_1 I_1^2 + R_2 I_{2n}^2\right)$$

Or I_{2n} est grand et U_{1cc} faible => $P_{1cc} = R_s I_{2n}^2 = P_J$ d'où $R_s = \frac{P_{1cc}}{I_{2n}^2}$

En plus $(mU_{cc})^2 = (R_s\, I_{2n})^2 + (X_s\, I_{2n})^2$ => $X_s = \sqrt{\frac{(m\, U_{1cc})^2}{I_{2n}^2} - R_s^2}$

Bilan des puissances : $P_{1cc} = P_J$.

c- Transformateur en charge:

Cet essai sert à calculer le rendement et la chute de tension du transformateur.

c-1 Chute de tension:

Il a été constaté qu'il y a une chute de tension provoquée par la résistance du bobinage. Autrement dit: $U_2 < m.U_1$.

Par définition, la chute de tension dans un transformateur est la différence des tensions secondaires à vide et en charge: $\Delta U = U_{20} - U_2$.

ou encore: $\Delta U_2 = R_s\ I_2\ \cos\varphi_2 + L_s\ I_2\ \sin\varphi_2$

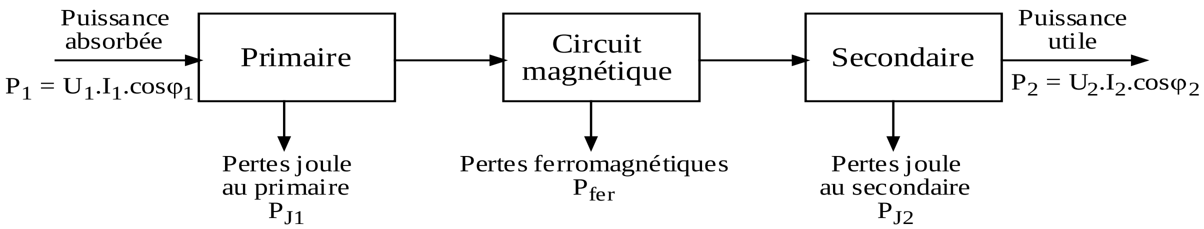
Plus I_2 augmente (la charge augmente) plus U_2 diminue. Si I_2 augmente ΔU augmente aussi.

En désignant par φ_2 le déphasage de I_2 en arrière de U_2, ΔU_2 dépend beaucoup de φ_2:

- Si I_2 est déphasé en arrière de U_2, les deux termes $R_s I_2 \cos\varphi_2$ et $L_s I_2 \sin\varphi_2$ s'ajoutent.
- Si I_2 est déphasé en avant, le second terme se soustrait du premier. Pour les déphasages importants, ΔU_2 est négatif, càd que U_2 est supérieur à U_{20}.

c-2 Rendement du transformateur:

Avant de donner l'expression du rendement, il est judicieux de présenter le bilan de puissance d'un transformateur réel:



Le bilan des puissances nous donne la relation: $P_1 = P_{J1} + P_{J2} + P_{fer} + P_2$

Le rendement est le rapport de la puissance débitée par le secondaire $U_2\ I_2\ \cos\varphi_2$ à la puissance entrant au primaire $U_1\ I_1\ \cos\varphi_1$. La différence est due aux pertes.

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{U_2\, I_2\, \cos\varphi_2}{U_1\, I_1\, \cos\varphi_1} = \frac{P_2}{P_2 + \sum pertes} = \frac{U_2\, I_2\, \cos\varphi_2}{U_2\, I_2\, \cos\varphi_2 + P_{mag} + P_J}$$

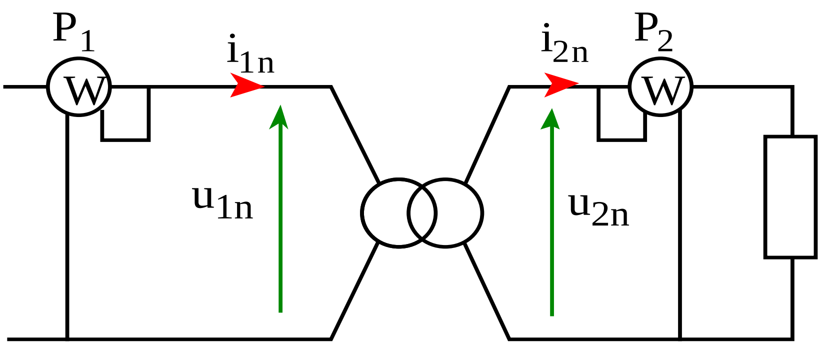
ou
$$\eta = \frac{P_1 - \sum pertes}{P_1}$$

Le rendement varie en fonction des conditions d'utilisation du transformateur. Le meilleur rendement s'obtiendra pour les grandeurs d'utilisation nominales indiquées sur la plaque signalétique du transformateur.
Les bons transformateurs de fortes puissances peuvent atteindre un rendement de 98%.
Le rendement maximal si $P_J = P_{mag}$. En effet:
Si on divise l'expression du rendement par I_2 on obtient:

$$\frac{\eta}{I_2} = \frac{U_2 \cos\varphi_2}{U_2 \cos\varphi_2 + \frac{P_{mag}}{I_2} + R_s\, I_2} = \frac{U_2 \cos\varphi_2}{U_2 \cos\varphi_2 + A} \qquad \text{avec} \qquad A = \frac{P_{mag}}{I_2} + R_s\, I_2$$

Le rendement est maximal quand A est minimal
$$\frac{dA}{dI_2} = 0 = -\frac{P_{mag}}{I_2^2} + R_s \Rightarrow \quad P_{mag} = R_s\, I_2^2 = P_J$$
Le rendement est maximal quand $P_J = P_{mag}$.
Expérimentalement, on trouve le rendement soit par les mesures directes soit par la méthode des pertes séparées.

- La méthode directe consiste à mesurer les puissances avec deux wattmètres P_1 et P_2 comme le montre la figure ci-dessous:



Ceci nous donne la formule suivante: $\eta = \frac{P_2}{P_1}$

- Dans la méthode des pertes séparées, deux essais particuliers du transformateur permettent de mesurer séparément les pertes par effet joule (p_j) et les pertes ferromagnétiques (p_{fer}). Ce sont l'essai à vide et l'essai en court-circuit (voir paragraphes précédents).

III- Présentation d'un transformateur triphasé:

1- Nécessité des transformateurs triphasés:

A la sortie des centrales, on trouve des alternateurs triphasés transformant une énergie quelconque en énergie électrique (10 à 20 Kv). Si les utilisateurs de cette énergie électrique demandent une puissance active sous une tension entre phases U et un courant de ligne I ($P = \sqrt{3} U\, I\, \cos\varphi$); et si la ligne présente une résistance R on aura des pertes par effet joule:

$$P_J = 3\, R\, I^2 = 3\, m^2\, R \left(\frac{I}{m}\right)^2$$

et si on multiplie U par m>1, il faut diviser le courant par m afin de garder la même puissance:

$$P = \sqrt{3}\,(m\,U)\left(\frac{I}{m}\right)\cos(\varphi).$$

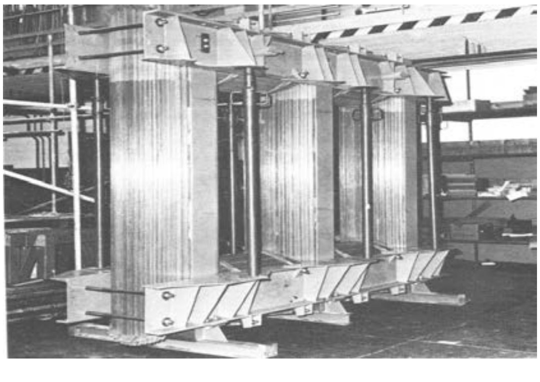
Pour garder les mêmes pertes par effet joule, il faut multiplier la résistance par m^2 d'où:

$$m^2\, R = m^2\, \rho \frac{l}{s} = \rho \frac{l}{s/m^2}$$

On remarque bien que la section des fils est divisée par m^2 et par conséquent on réduit la masse des fils et leurs prix d'achat.
Pour arriver avec une tension faible (220/380) aux utilisateurs (minimiser les risques) il faut abaisser successivement la tension tout le long du trajet de transport et de distribution de l'énergie électrique. Ceci est réalisé grâce à des transformateurs triphasés.

2- Constitution des transformateurs triphasés:

Dans les réseaux électriques triphasés, on pourrait parfaitement envisager d'utiliser 3 transformateurs, un par phase. Dans la pratique, l'utilisation de transformateurs triphasés (un seul appareil regroupe les 3 phases) est généralisée: cette solution permet la conception de transformateurs moins coûteux, avec en particulier des économies au niveau du circuit magnétique.
Il est constitué de deux parties essentielles, le circuit magnétique et les enroulements. Le circuit magnétique d'un transformateur est soumis à un champ magnétique variable au cours du temps. Pour les transformateurs reliés au secteur de distribution, cette fréquence est de 50 ou 60 hertz. Le circuit magnétique est généralement feuilleté pour réduire les pertes par courants de Foucault, qui dépendent de l'amplitude du signal et de sa fréquence. Pour les transformateurs les plus courants, les tôles empilées ont la forme de E et de I, permettant ainsi de glisser une bobine à l'intérieur des *fenêtres* du circuit magnétique ainsi constitué. Les enroulements sont en général concentriques pour minimiser les fuites de flux. Le conducteur électrique utilisé dépend des applications, mais le cuivre est le matériau de choix pour toutes les applications à fortes puissances.



pour les transformateurs les plus puissants, par exemple ceux des grandes lignes THT de 400 à 150 kV, on utilise des systèmes de ventilation forcée d'un important flux d'air associé ou non à un échange thermique avec l'huile de la cuve. Le dispositif de refroidissement est toujours couplé à un système de capteurs de température faisant office de thermostat (commande automatique de la mise en route de la ventilation).

3- Fonctionnement d'un transformateur triphasé:

Un transformateur triphasé peut être considéré comme un ensemble de 3 transformateurs monophasés. Ceci nous donne les relations:

$$V_A = V_1\sqrt{2}\,\sin(\omega t) = N_1\frac{d\psi_A}{dt}$$

$$V_B = V_1\sqrt{2}\,\sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) = N_1\frac{d\psi_B}{dt}$$

$$V_C = V_1\sqrt{2}\,\sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) = N_1\frac{d\psi_C}{dt}$$

Les grandeurs qui sont facilement mesurables sont des tensions entre deux phases (entre 2 bornes). On définit, donc, un rapport de transformation industriel $m = \frac{U_{ab}}{U_{AB}}$ (rapport de deux tensions composées). Ce rapport n'est pas toujours égal à $\frac{N_2}{N_1}$, car il dépend du nombre de spires N_1 et N_2 et aussi de la nature du couplage des enroulements primaire et secondaire.

4- Caractéristiques des transformateurs triphasés:

a- Grandeurs nominales:

La plaque signalétique d'un transformateur triphasé indique les valeurs nominales:

- La tension primaire U_{1n} entre phase;

- La tension secondaire U_{2n} entre phase;
- La puissance apparente secondaire $S_{2n} = \sqrt{3} U_{2n} \ I_{2n}$;
- La fréquence f ;

Parfois on indique aussi le facteur de puissance nominal au secondaire $\cos(\varphi_{2n})$.

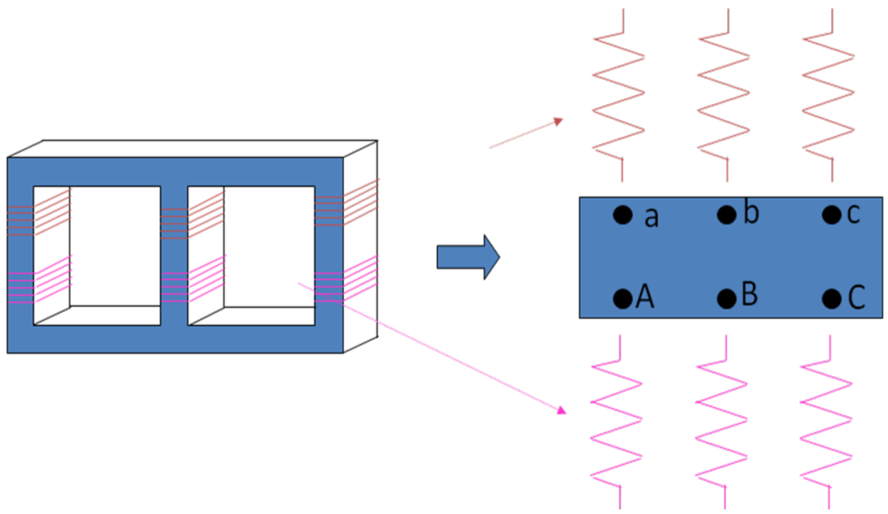
b- Couplage du transformateur - Notations industrielles:

Le primaire et le secondaire comportent chacun trois phases à coupler pour être reliés à des lignes triphasés. Pour un transformateur triphasé, il existe 3 types de couplage d'enroulement :

- Le couplage étoile, défini par la lettre Y ou y.
- Le couplage triangle, défini par la lettre D ou d.
- Le couplage zig-zag, défini par la lettre Z ou z.

Le couplage zig-zag est obtenu en divisant les trois bobines d'un enroulement en six bobines. Pour avoir une phase, on met en série deux demi-bobines prises sur des colonnes différentes en sens inverse.

Au lieu de distinguer le primaire et le secondaire, comme dans le cas d'un transformateur monophasé, nous distinguons les enroulements haute tension (HT) et les enroulements basse tension (BT).



Les lettres majuscules désignent l'enroulement H.T alors que les lettres miniscules désignent l'enroulement B.T. Autrement dit, les bornes sont désignées par A, B, C, N pour H.T alors qu'elles sont désignées par a, b, c, n pour B.T.

Remarque:

- Dans les couplages étoile et zigzag nous ajoutons la lettre N ou n si le point neutre est accessible.

- Le couplage zigzag ne peut être qu'au secondaire d'un transformateur triphasé abaisseur de tension lorsqu'il y a risque de déséquilibres importants. En effet, puisque le couplage zig-zag (z) possède un neutre, il permet, lors de la perte d'une phase au primaire, d'avoir au secondaire une tension pratiquement identique sur les trois phases.

c- Choix du couplage:

Il s'effectuera à partir de nombreux critères selon des règles générales:

- Dimensionnement des enroulements :

* Aux très hautes tensions, on aura intérêt à choisir un couplage étoile pour que chaque bobine n'ait à supporter que: $V = \frac{U}{\sqrt{3}}$

* Pour les très forts courants, on préférera le montage triangle où chaque enroulement n'est parcouru que par un courant d'intensité: $J = \frac{I}{\sqrt{3}}$.

- Fonctionnement déséquilibré :

* Aux faibles déséquilibres (I neutre ≤ 10%.I ligne), primaire et secondaire seront couplés en étoile avec conducteurs neutres;

* Si le déséquilibre est plus important, le primaire restera en étoile mais le secondaire sera connecté en zigzag ;

* Si le déséquilibre et la puissance sont importants, on utilisera un montage triangle-étoile.

d- Calcul du rapport de transformation industriel:

Il est défini par la relation: $m = \frac{U_{20}}{U_1}$ par exemple:

- Pour le couplage étoile – étoile Yy $m = \frac{U_{ab0}}{U_{AB}} = \frac{\sqrt{3}V_{a0}}{\sqrt{3}V_A} = \frac{V_{a0}}{V_A} = \frac{N_2}{N_1}$

- Pour le couplage étoile – triangle Yd $m = \frac{U_{ab0}}{U_{AB}} = \frac{V_{a0}}{\sqrt{3}V_A} = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{N_2}{N_1}$

- Pour le couplage triangle – triangle Dd $m = \frac{U_{ab0}}{U_{AB}} = \frac{V_{a0}}{V_A} = \frac{N_2}{N_1}$

- Pour le couplage triangle – étoile Dy $m = \frac{U_{ab0}}{U_{AB}} = \frac{\sqrt{3}V_{a0}}{V_A} = \sqrt{3} \frac{N_2}{N_1}$

N.B: Pour les enroulements primaires, le couplage étoile est plus économique que le couplage triangle car, pour une tension entre phase U, l'enroulement couplé en étoile doit supporter $V = \frac{U}{\sqrt{3}}$ donc l'isolation des enroulements est moins chère.

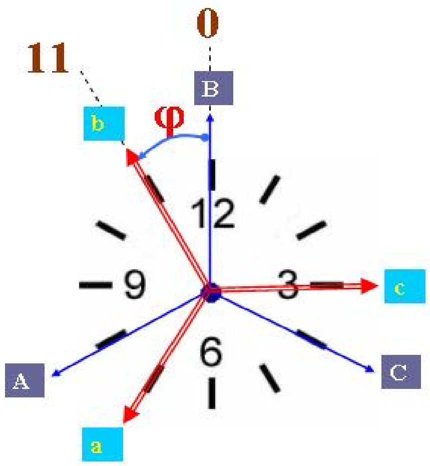
e- Indice horaire:

Pour un transformateur monophasé les tensions au primaire et au secondaire ne peuvent être déphasées que de 0 ou de 180° suivant les sens d'enroulement. Pour un transformateur

triphasé alimenté par un réseau équilibré, le déphasage des tensions en ligne HT et BT peuvent prendre toutes les valeurs multiples des 30°. Un angle de 30° représentant l'écart entre deux chiffres consécutifs sur le cadran d'une horloge, ce déphasage sera dit d'une heure.
Soit $\theta = (V_a, V_A)$ le déphasage existant entre une tension primaire quelconque et la tension secondaire correspondante ($\overrightarrow{V_a}$ et $\overrightarrow{V_A}$ par exemple) est toujours un multiple de $\pi/6$ ou 30°.

Si $\overrightarrow{V_A}$ est représenté par un vecteur vertical orienté vers le haut, $\overrightarrow{V_a}$ sera représenté par un vecteur plus court et l'ensemble évoque les aiguilles d'une horloge indiquant une heure entière ($\overrightarrow{V_A}$: grande aiguille sur 12 et $\overrightarrow{V_a}$ petite aiguille indiquant les heures).
Si on désigne par «I_h » l'indice horaire, l'angle θ qui exprime le retard d'une tension B.T sur son homologue H.T est $\theta = I_h \, \pi/6$. Par exemple pour $I_h = 3$, $\theta = \pi/2$.

Par exemple: pour $I_h = 11$, $\theta = 330° = 11\pi/6$



f- Indice du couplage:

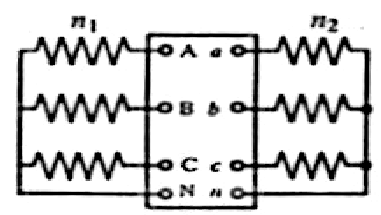
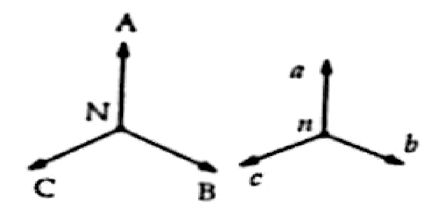
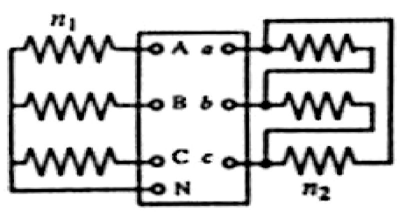
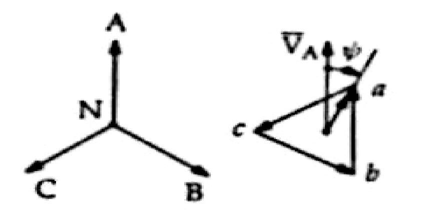
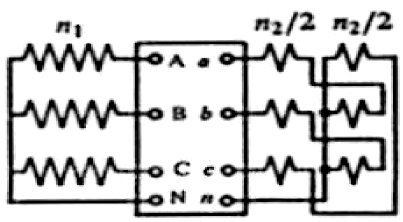
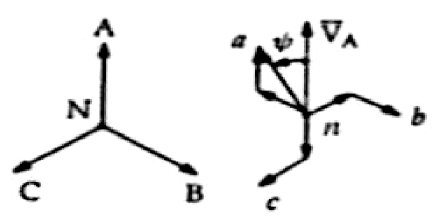
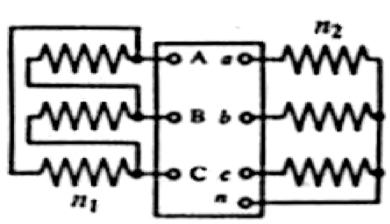
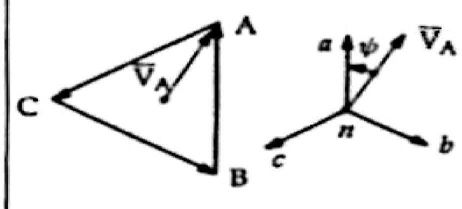
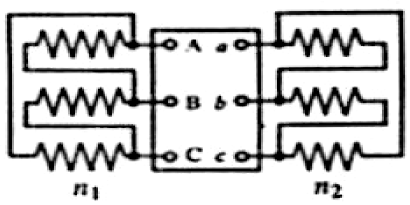
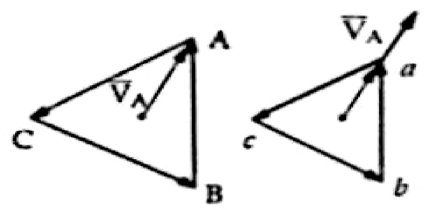
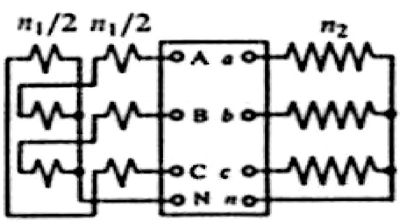
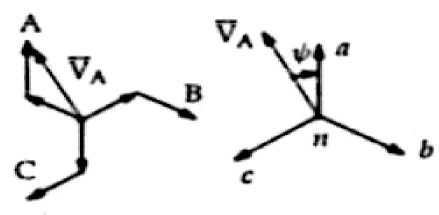
Pour simplifier la représentation, on donne aux transformateurs triphasés un indice, appelé indice de couplage, qui résume toutes les caractéristiques. C'est la caractéristique d'un transformateur triphasé indiquant le type de couplage réalisé au primaire et au secondaire ainsi que le déphasage entre le système de tensions primaires et le système de tensions secondaires. Les systèmes triphasés de tension sont : « triangle » (D ou d) et « étoile » (Y ou y). La première lettre de l'indice de couplage est toujours en majuscule et indique le système triphasé à tension la plus élevée; la deuxième lettre est en minuscule et indique le système à tension la plus basse. Il existe également le couplage zig-zag (z), utilisé majoritairement au secondaire. Enfin, l'indice de couplage est complété par « l'indice horaire » qui donne, par pas de 30°, le déphasage horaire en 12es de tour (comme sur une montre) entre le primaire et le secondaire du transformateur (ex. : 11 = 11×30° = 330° en sens horaire ou 30° en sens anti-horaire).

Par exemple, un indice de couplage « Dyn11 » définit donc un transformateur dont :

- le système triphasé de tension élevé est en « triangle » ;

- le système triphasé de tension basse est en « étoile » avec neutre sorti (indiqué par le « n ») ;
- le décalage entre les deux systèmes est de 330° (= –30° ou bien 11×30°).

Le tableau ci-dessous donne les six groupements retenus le symbole, le rapport de transformation, le schéma des enroulements et le diagramme des tensions.

Symbole	V_a/V_A	Montage électrique des phases	Diagramme vectoriel
$Yy0$	$\frac{n_2}{n_1}$		
$Yd1$	$\frac{n_2}{\sqrt{3}\,n_1}$		
$Yz11$	$\frac{\sqrt{3}}{2}\frac{n_2}{n_1}$		
$Dy11$	$\sqrt{3}\frac{n_2}{n_1}$		
$Dd0$	$\frac{n_2}{n_1}$		
$Zy1$	$\frac{2}{\sqrt{3}}\frac{n_2}{n_1}$		

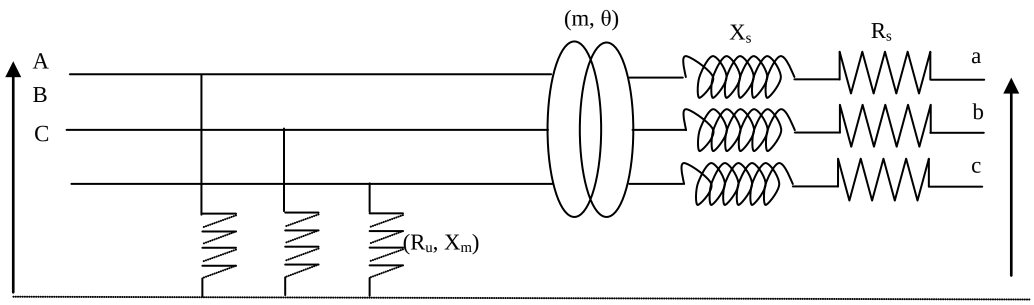
Les couplages les plus utilisés sont au nombre de quatre:

- Le couplage Yy0 employé comme abaisseur de tension à la sortie des centrales électriques,
- le couplage Yzn11 adopté en distribution lorsque les déséquilibres peuvent être importants,
- le couplage Yd11 utilisé comme élévateur de tension à la sortie des centrales électriques,
- le couplage Dyn11 utilisé en distribution lorsque les déséquilibres risquent d'être peu importants.

5- Etude en régime équilibré:

L'étude théorique en régime équilibré d'un transformateur triphasé se déduit à partir de celle du cas du transformateur monophasé, en ajoutant au transformateur idéal:

- L'impédance magnétisante $Z_m = R_m + j\, L_m\, \omega$,
- L'impédance $Z_s = R_s + j\, L_s\, \omega$ qui tient compte de la résistance des enroulements et de leurs réactances de fuites



Le rapport de transformation du transformateur idéal diffère du rapport des nombres de tours des enroulements si les couplages de ceux-ci sont différents.
Les essais en triphasé sont réalisés comme en monophasé. Cependant les puissances (à vide et en court circuit) étant mesurées par la méthodes des deux wattmètres. Celles-ci sont les puissances globales des trois phases du transformateur.

a- Essai à vide:

Lors de l'essai à vide du transformateur alimenté en triphasé, sous sa tension nominale au primaire et un courant secondaire nul. On mesure U_1, P_{10}, I_{10} et U_{20}. On en déduit:

$$m = \frac{U_{20}}{U_1}$$

$$Z_m = \frac{U_1}{\sqrt{3}\, I_0} \quad ; \qquad R_m = \frac{P_{10}}{3\, I_0^2} \quad ; \qquad X_m = L_m\, \omega = \sqrt{Z_m^2 - R_m^2}$$

Cet essai sert donc à trouver le rapport du transformateur et des pertes fer.

b- Essai en court-circuit:

Lors de l'essai en court-circuit du transformateur alimenté en triphasé sous une tension très réduite et un courant secondaire égal à I_{2n}. On mesure U_{1cc}, P_{1cc} et I_2. On en déduit:

$$Z_S = \sqrt{R_s^2 + X_s^2} = \frac{\frac{U_{1cc}}{\sqrt{3}}\ m}{I_2} \quad ; \quad R_s = \frac{P_{1cc}}{3 I_2^2} \quad ; \quad \text{d'où} \quad X_s = \sqrt{Z_s^2 - R_s^2}$$

Cet essai set à mesurer les pertes joule du transformateur.

c- Essai en charge:

Comme pour le cas du transformateur monophasé, cet essai sert à calculer le rendement et la chute de tension du transformateur triphasé.

- **La chute de tension:**

La chute de tension est définie comme $\Delta U_2 = U_{20} - U_2$. Pour la calculer, on déterminer en premier lieu la chute de tension simple ΔV_2 ensuite la chute de tension composée. En effet:

$$\overline{V_{20}} = \overline{V_2} + R_s\, \overline{I_2} + j X_s\, \overline{I_2}$$

d'où on déduit:

$$\Delta V_2 = \overline{V_{20}} - \overline{V_2} \approx R_s\, I_2 \cos\varphi_2 + X_s\, I_2 \sin\varphi_2$$

En désignant par φ_2 le déphasage de I_2 en arrière par rapport à V_2 alors:

$$\Delta U_2 = \sqrt{3}\ \Delta V_2 \approx \sqrt{3}\ \left(R_s\, I_2 \cos\varphi_2 + X_s\, I_2 \sin\varphi_2\right)$$

- **Le rendement:**

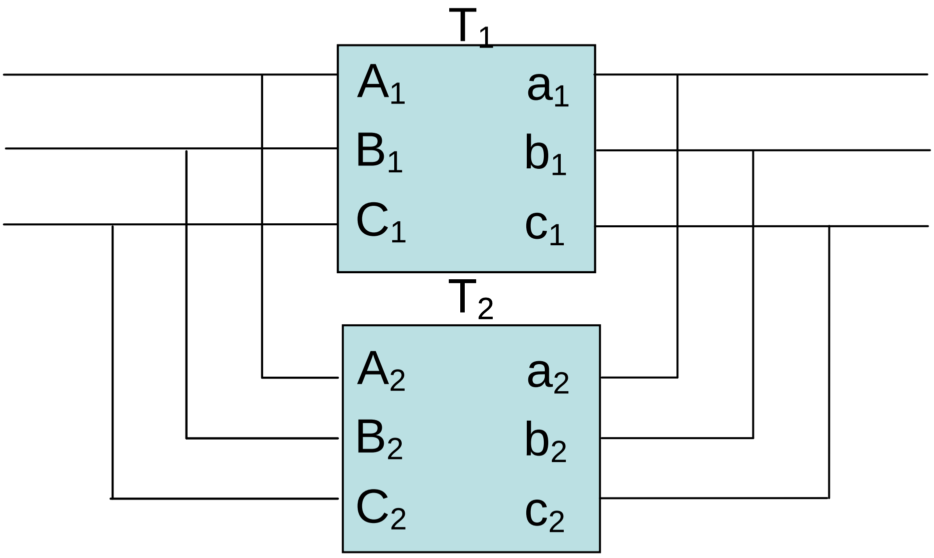
Comme pour le transformateur monophasé, il est préférable d'utiliser la méthode indirecte (par les pertes séparées) plutôt que la méthode directe.
On mesure les pertes fer par un essai à vide, puis on calcule les pertes Joule par l'essai en court-circuit qui nous permet de déterminer la résistance: $R_s = P_{1cc} / I^2_{2cc}$.

$$\eta = \frac{3 V_2\, I_2 \cos\varphi_2}{3 V_2\, I_2 \cos\varphi_2 + pertes} = \frac{\sqrt{3}\, U_2\, I_2 \cos\varphi_2}{\sqrt{3}\, U_2\, I_2 \cos\varphi_2 + P_{fer} + 3 R_s\, I_2^2}$$

Il est maximum pour la valeur de I_2 qui rend les pertes Joule égales aux pertes fer.

6- Mise en parallèle de transformateurs:

Afin d'alimenter une charge demandant plus d'une puissance que ne peut en fournir un transformateur T_1, on associe à celui-ci un transformateur T_2 en parallèle.
Lorsque les deux transformateurs T_1 et T_2 ont leur primaires alimentés par le même réseau et leurs secondaires débitant dans la même installation, ils sont dits branchés en parallèle.



Pour raccorder deux transformateurs triphasés en parallèle T_1 et T_2, il faut satisfaire les conditions suivantes:

- Leurs rapports de transformation doivent être égaux,
- Leurs tensions de court-circuit doivent être identiques à ± 10%, des mêmes tensions,
- Ils doivent avoir le même couplage et le même indice horaire.