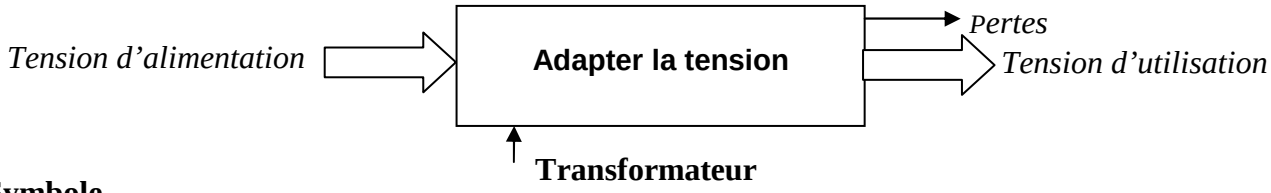
Pour plus des cours, exercices, examens ... Site 9alami.com

I. Transformateurs monophasés

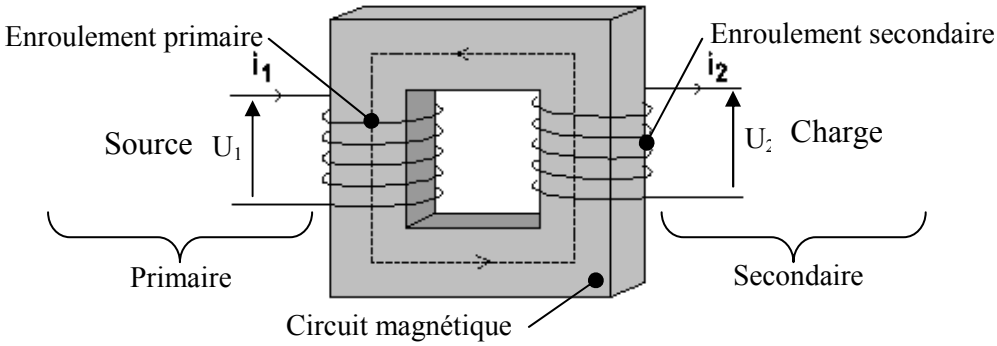
1 Rôle

Les transformateurs sont utilisés pour adapter (élever ou abaisser) une tension aux besoins de l'utilisation.



2. Symbole

3. Principe de fonctionnement



Il est constitué de 2 enroulements placés sur un circuit magnétique fermé :

- **Le primaire** est alimenté par le réseau et se comporte comme un récepteur. Il crée un champ et un flux magnétique ($\Phi(t)$ alternatif) dans le circuit magnétique feuilleté.
- **Le secondaire** est soumis à la variation de ce flux, il est le siège d'une f.é.m. induite due à la loi de Lenz et alimente la charge.

Un transformateur qui produit une tension plus grande est dit *élévateur de tension*, à l'inverse il est dit *abaisseur de tension*.

4. Transformateur parfait

4.1. Hypothèses simplificatrices

- Circuit magnétique fermé de perméabilité infinie (pas de fuites de flux et pas de pertes de fer).
- Enroulements primaire et secondaire de résistance nulle (pas de pertes par effet joule dans les enroulements).

4.2. Relations entre les tensions

A chaque instant, chaque spire est traversée par le même flux magnétique.

Au primaire

$e_1 = -N_1 \frac{d\Phi}{dt}$ et $u_1 = -e_1 \rightarrow \underline{U_1} = -\underline{E_1} = j\,\omega\,N_1\,\underline{\Phi}$ ***(1)***

Au secondaire

$e_2 = -N_2 \frac{d\Phi}{dt}$ et $u_2 = e_2 \rightarrow \underline{U_2} = \underline{E_2} = -j\,\omega\,N_2\,\underline{\Phi}$ ***(2)***

On tire immédiatement : $\frac{u_2}{u_1} = -\frac{e_2}{e_1} = -\frac{N_2}{N_1} = -m$

Cette relation indique que les tensions u_1 et u_2 sont en opposition de phase.

La relation entre les valeurs efficaces U_1 et U_2 ne tient pas compte du déphasage : $\mathbf{m} = \frac{U_2}{U_1}$

m est **le rapport de transformation** du transformateur.

L'équation (1) donne en valeur efficace : $U_1 = E_1 = \omega N_1 \Phi = 2 \pi f N_1 \Phi_{max} /\sqrt{2} = 4{,}44\ f N_1 \Phi_{max}$

$U_1 = 4{,}44.\ f.\ N_1.s.B_{max}$ et $U_2 = 4{,}44.\ f\ .N_2\ .s.B_{max}$ → ***Formule de Boucherot***

Où U, E (valeurs efficaces) en (**V**), B (champ magnétique) en Tesla (**T**), s (section de fer) en (**m^2**) et f (fréquence) en (**Hz**).

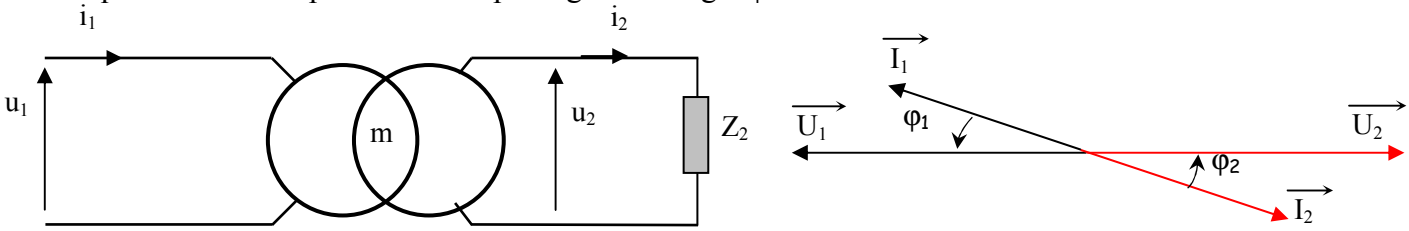
4.3. Relations entre les intensités

Bilan des puissances: $P_1 = P_2$ (transformateur parfait) soit le **rendement** est : $\eta = P_2/P_1$

Comme $\varphi_1 = \varphi_2$ on a: $S_1 = S_2 = U_1 I_1 = U_2 I_2 \Rightarrow$ $\mathbf{m = \frac{U_2}{U_1} = \frac{I_1}{I_2}}$

4.4. Schéma électrique équivalent et diagramme de Fresnel

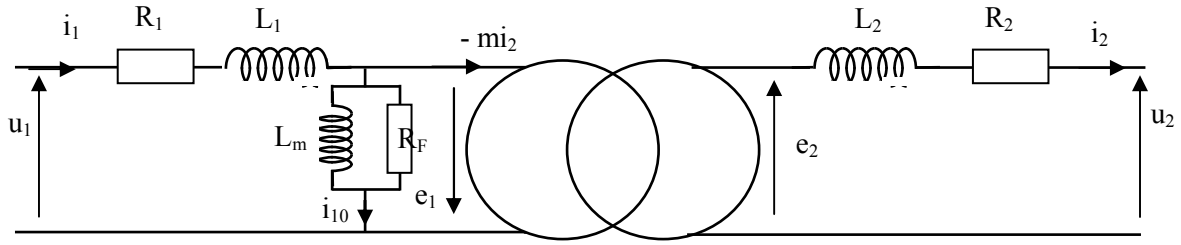
Un transformateur parfait est alimenté au primaire par une tension sinusoïdale u_1. Il alimente une charge Z_2, telle que le courant i_2 présente un déphasage d'un angle φ_2 avec la tension u_2.



L'intensité du courant **I_2** dépend de la charge appliquée au secondaire, il en est de même pour le facteur de puissance **cos φ_2**. Ces deux grandeurs imposent l'intensité du courant **I_1** appelé au primaire, ainsi que le facteur de puissance du primaire, sachant que $\varphi_1 = \varphi_2$.

5. Transformateur réel

En éliminant toutes les hypothèses précédentes :



5.1. Relations entre les tensions

Le circuit du primaire peut se mettre en équation comme suit : $\underline{U_1} = -\underline{E_1} + R_1.\underline{I_1} + j\ L_1\ \omega.\underline{I_1}$

Le circuit du secondaire peut se mettre en équation comme suit : $\underline{U_2} = \underline{E_2} - R_2.\underline{I_2} - j\ L_2\ \omega.\underline{I_2}$

5.2. Relations entre les intensités

La relation s'écrit : $i_1 = i_{1o} - \frac{N_2}{N_1} i_2 = i_{1o} - m\ i_2$

Avec **i_{10}**, intensité du courant absorbé par le primaire du transformateur à vide.

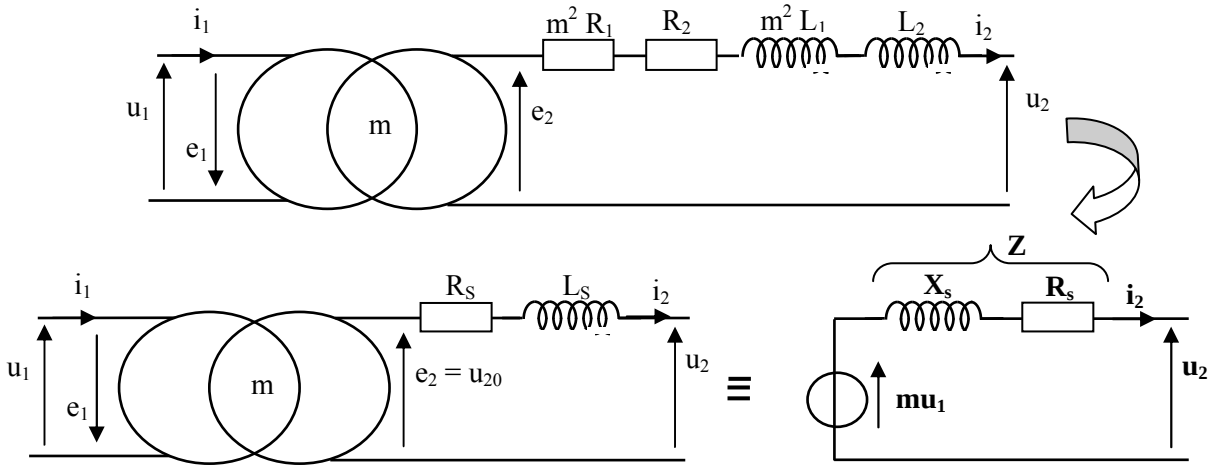
5.3. Comportement simplifié dans l'hypothèse de Kapp

L'hypothèse de Kapp permet de négliger le courant i_{10} vis à vis de i_1 si bien que i_1 et i_2 sont dans le rapport de transformation.

Schéma équivalent simplifié ramené au secondaire :

Le modèle de Thévenin équivalent au transformateur vu du secondaire consiste à ramener tous les éléments du transformateur sur le circuit du secondaire. Connaissant la charge, il sera aisé de calculer les paramètres électriques du transformateur complet.

Les éléments R_1 et $X_1 = L_1\omega$ peuvent être déplacés au secondaire en les multipliant par $\mathbf{m^2}$, ainsi :



Le secondaire se comporte comme une source:

- de tension. : $\mathbf{U_{20}}$; et
- d'impédance $\mathbf{Z_S} = \sqrt{\mathbf{X_S}^2 + \mathbf{R_S}^2}$ avec : $\mathbf{R_S} = (R_2 + m^2 R_1)$ et $\mathbf{X_S} = (X_2 + m^2 X_1)$

On peut écrire l'équation du transformateur ramenée au secondaire : $\underline{U_2} = \underline{U_{20}} - (R_S + jX_S)\,\underline{I_2}$

En valeur efficace : $\mathbf{U_2 = U_{20} - \Delta U_2}$

Calcul approché de la chute de tension au secondaire :

Le calcul de la chute de tension peut être alors réalisé à l'aide d'une formule approchée :

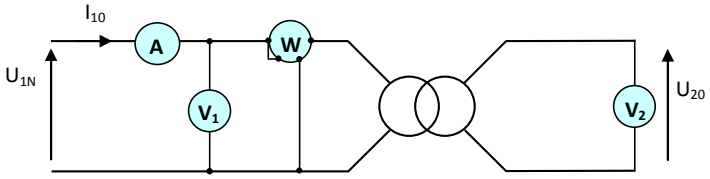
$$\mathbf{\Delta U_2 = R_S I_2 \cos \varphi_2 + X_S I_2 \sin \varphi_2}$$

Détermination des éléments R_S et X_S :

A partir de ces deux essais :

- *Essai à vide*
- *Essai en court-circuit*

Essai à vide



Pour $\mathbf{U_1 = U_{1N}}$, on mesure $\mathbf{U_{20}}$ et $\mathbf{P_{10}}$

On calcule :

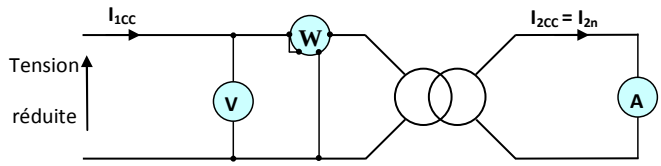
le rapport de transformation du transformateur

On tire : $\mathbf{m} = \dfrac{\mathbf{U_{20}}}{\mathbf{U_1}}$

Puisque I_{10} est très faible donc $P_{J10} << P_{10}$.

Finalement : essai à vide $\mathbf{P_{10} = P_{fer}}$

Essai en court-circuit



Cet essai doit être réalisé sous ***tension réduite U_{1CC}*** (*sinon destruction du transformateur*)

Pour $\mathbf{I_{2cc} = I_{2n}}$, on mesure: $\mathbf{U_{1CC}}$ et $\mathbf{P_{1CC}}$.

On calcule : $\mathbf{Rs = P_{1CC} / I_2^2}$

$Zs = mU_{1CC} / I_{2CC}$ et $\mathbf{Xs = \sqrt{Z_S^2 - R_S^2}}$

5.4. Rendement du transformateur

Le rendement d'un appareil est le rapport de la puissance restituée à la puissance fournie.

Méthode directe

Cette méthode consiste à mesurer avec deux wattmètres P_1 et P_2.

$$\eta = P_2 / P_1$$

Méthode indirecte ou méthode des pertes séparées

Cette méthode consiste à évaluer les différentes pertes dans les conditions nominales d'utilisation.

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{U_2.I_2.\cos\varphi_2}{U_2.I_2.\cos\varphi_2 + P_{10} + R_S.I_2^2}$$

Remarque *: le rendement est maximal lorsque pertes fer et pertes Joule sont identiques.*

II. Transformateurs triphasés

1. Exemple de transformateurs

Transformateur de poteau 20 kV / 400 V

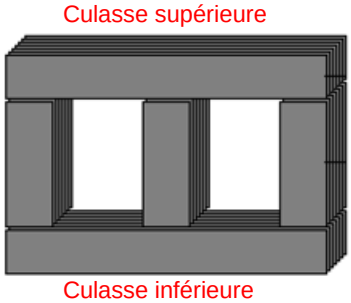
Transformateur d'interconnexion de réseau

2. Constitution

2.1. Circuit magnétique

Le circuit magnétique canalise le flux magnétique. Il est constitué d'un empilage de tôles. Ces tôles sont :

- Isolées entre elles par oxydation (diminutions des pertes par courant de Foucault) ;
- à cristaux orientés (diminution des pertes par hystérésis) ;
- assemblées en alterné pour limiter l'entrefer (réductions des fuites magnétiques).



2.2. Circuit électrique

Il comprend les enroulements primaires et secondaires ainsi que les éléments permettant les connexions avec les circuits extérieurs. Pour les transformateurs triphasés, il y a 3 enroulements primaires et 3 enroulements secondaires.

2.3. Couplage

Comme tous les récepteurs triphasés, le primaire d'un transformateur peut avoir ses enroulements couplés en étoile ou en triangle. De la même façon, les bobines secondaires pourront être connectées en étoile, en triangle ou en zig- zag.

Par convention :

- les bornes haute tension sont repérées par des lettres majuscules : **A , B , C**.
- les bornes basse tension sont repérées par des lettres minuscules : **a , b , c.**

1ére lettre (majuscule) Couplage primaire			**2ème lettre (minuscule) couplage secondaire**			**3ème lettre**	**Indice horaire**
Etoile	Triangle	Zig zag	Etoile	Triangle	Zig zag		
Y	D	Z	y	d	z	N ou n	0, 1,2,…, 11

3. Rapport de transformation

Par définition : **$M = U_{ab} / U_{AB}$**

Ce rapport dépend non seulement des nombres de spires primaires et secondaires, mais aussi des couplages au primaire et au secondaire.

4. Indice horaire

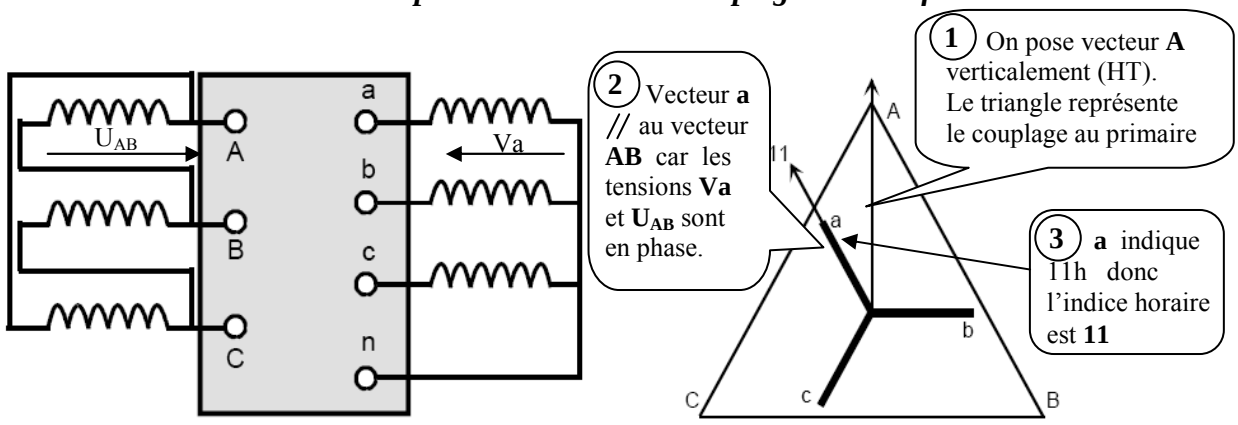
Les conditions de couplage des enroulements primaires et secondaires ont aussi pour effet d'introduire un déphasage entre des tensions primaires et secondaires et homologues, c'est à dire apparaissant entre les bornes désignées par des mêmes lettres (**V_A , V_a**) ou (**U_{AB} , U_{ab}**).

En pratique, le déphasage θ obtenu est toujours un multiple entier de ± 30°.

θ = retard d'une tension BT sur son homologue HT.

L'indice horaire I est : **$I = \theta / 30°$** **$0 \leq I \leq 11$** (entier)

Détermination de l'indice horaire à partir du schéma de couplage du transformateur.



Représentation de Fresnel

Donc la désignation de ce transformateur est Dyn11

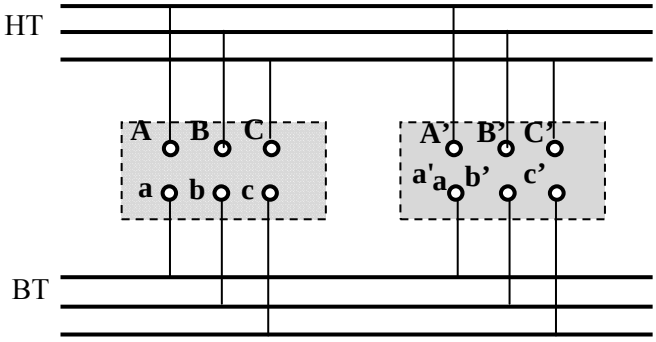
5. Caractéristiques d'un transformateur triphasé

La plaque signalétique d'un transformateur donne les principales caractéristiques électriques et de raccordement.

- La puissance assignée (en KVA).
- Les tensions primaire et secondaire assignées (en V ou KV).
- Les courants primaire et secondaire assignés (en A ou KA).
- La fréquence d'emploi (50 Hz).
- Les couplages côtés HT et BT.
- L'indice horaire.
- La tension de court-circuit (*pourcentage de la tension primaire assignée pour obtenir le courant nominal au secondaire, lorsque le secondaire est en court-circuit*).
- Le mode de refroidissement.

6. Conditions de couplage en parallèle

Des transformateurs sont en parallèle lorsque leurs primaires sont alimentés par un même réseau et leurs secondaires connectés à une même ligne ou débitent dans une même charge.



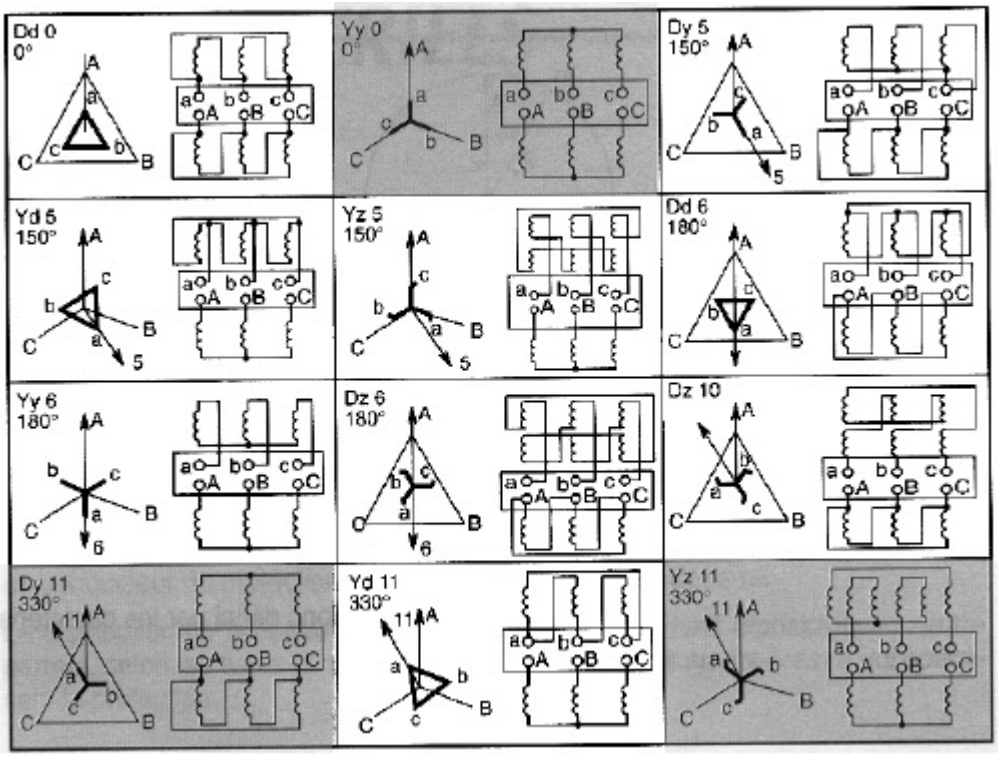
Pour cela il faut que:

- *Les transformateurs soient alimentés sous la même tension.*
- *Les rapports de transformations à vide soient identiques.*
- *Les tensions de court-circuit égales à 10 % près.*
- ***Mêmes indice horaire de couplage ou indices compatibles.***

7. Groupes d'indices horaires

En pratique, on peut aisément modifier l'indice horaire d'un transformateur en effectuant une permutation circulaire des lettres affectées aux bornes : toute permutation correspond à une augmentation ou à une diminution de 4 de la valeur de l'indice horaire.

On pourra donc coupler en parallèle sans difficulté des transformateurs dont les indices diffèrent de ±4.

Groupe	Indices	Couplages
I	0 , 4 , 8	Yy Dd Dz
II	2 , 6 , 10	Yy Dd Dz
III	1 , 5	Dy Yz Yd
IV	7 , 11	Dy Yz Yd

8. Couplages normalisés