

Généralités sur les transformateurs :

**Transformateur monophasé & transformateur
triphasé**



Chapitre 1 :Le Transformateur monophasé

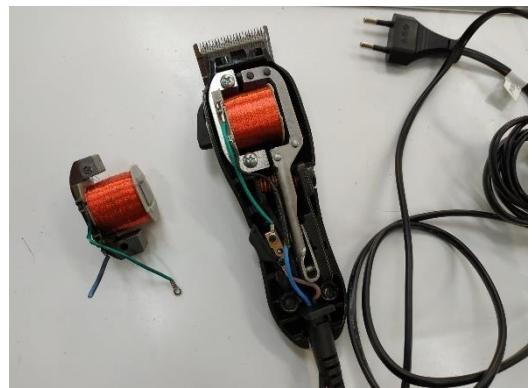
I. -Généralités

1-domaine d'application :

Les transformateurs sont des convertisseurs statiques d'énergie électrique, ils permettent d'adapter un courant électrique en fonction de l'utilisation.

Notons qu'un transformateur modifie suivant le cas, la tension et l'intensité d'un courant électrique sans toutefois en changer la fréquence .

Les transformateurs sont partout autour de nous, qu'ils soient de très grosses puissances comme ceux utilisés dans le réseau de distribution électrique ou de très petites comme les transformateurs monophasés des appareils que l'on utilise tous les jours, chargeur pour ordinateur ou téléphone portable, rasoir électrique, etc.



2-Constitution :

Le transformateur est constitué essentiellement de :

✓ **Un circuit magnétique**

Même chose que pour une bobine à noyau de fer. Il a pour rôle de canaliser le flux magnétique.

✓ **Enroulements**

Sur les noyaux du circuit magnétique, on trouve plusieurs enroulements (isolés électriquement entre eux)

- L'un de ces enroulements est relié à la source alternative : C'est le primaire, on lui adopte la convention réceptrice.
- L'autre bobine (ou les autres) est le siège d'une f.e.m induite. Elle peut débiter dans un récepteur : c'est le secondaire, on lui adopte la convention génératrice .

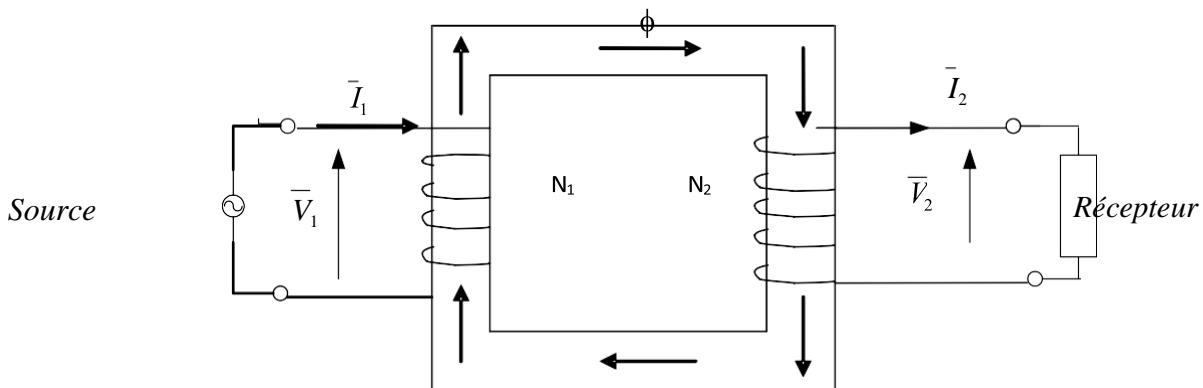


Figure 1: Transformateur monophasé

3-Principe de fonctionnement :

Cette machine est basée sur la loi d'induction électromagnétique (loi de Lenz).

En effet, la tension alternative au primaire va créer un flux magnétique alternatif qui traversant l'enroulement secondaire produira une f.e.m. induite

Par principe de fonctionnement, le transformateur est une machine réversible :

Exemple

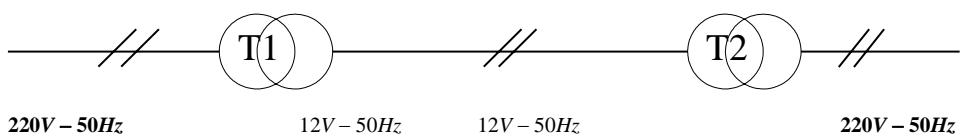


Figure 2: Reversibilité d'un transformateur monophasé

- Le transformateur ne comportera pas des parties en mouvement, il est dit machine statique.
- Le transformateur à vide ($i_2 = 0$) est une bobine à noyau de fer, il est régit par les mêmes équations.

II. -Transformateur parfait

1-Hypothèses :

- Les pertes fer et les pertes joule sont nulles
- Les fuites magnétiques sont négligeables
- La reluctance du circuit magnétique est nulle

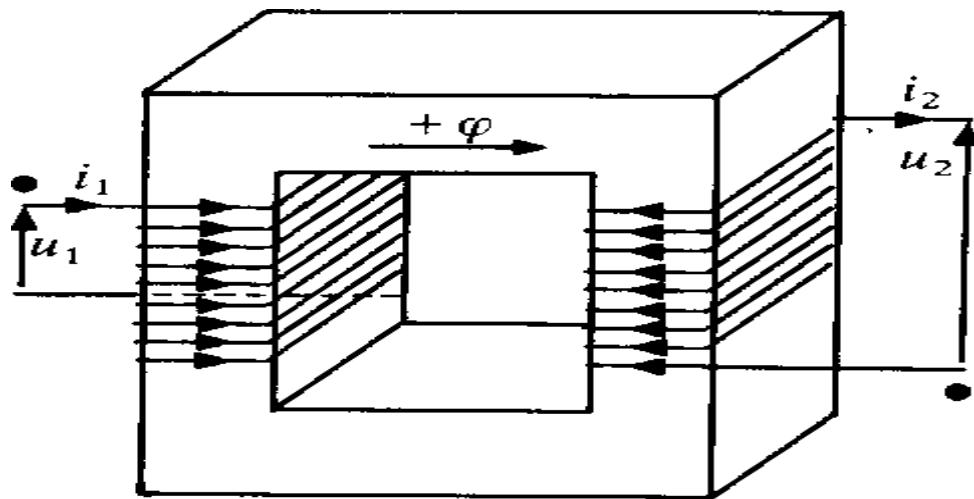


Figure 3:transformateur monophasé parfait

2-Equations de fonctionnement :

➤ Equations aux tensions

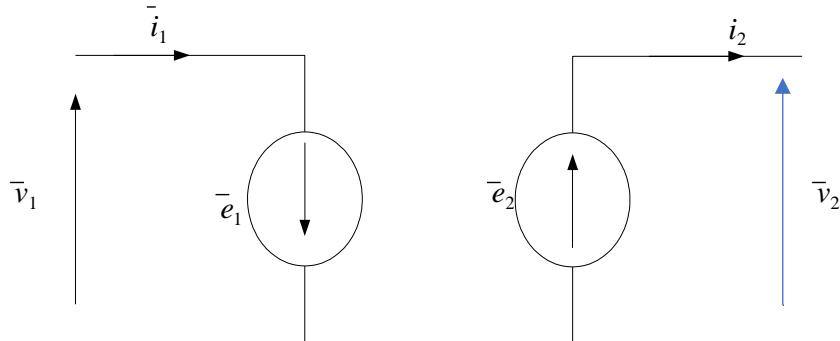


Figure 4:Circuit électrique équivalent

D'après la loi de mailles appliquée au schéma électrique équivalent on aura :

$$v1(t) + e1(t) = 0 \text{ avec } e1(t) = -N1 * \frac{d\Phi(t)}{dt}$$

$$v2(t) - e2(t) = 0 \text{ avec } e2(t) = -N2 * \frac{d\Phi(t)}{dt}$$

En écriture complexe on aura :

$$\begin{cases} \bar{V}_1 = j * N_1 * w * \bar{\phi} \\ \bar{V}_2 = -j * N_2 * w * \bar{\phi} \end{cases} \Rightarrow \frac{\bar{V}_2}{\bar{V}_1} = -\frac{N_2}{N_1} = -m \quad (2)$$

$$\text{En valeurs efficaces ca donne } \frac{V_2}{V_1} = \frac{N_2}{N_1} = m \quad (3)$$

m est appelé rapport de transformation

☒ Remarque

Selon la valeur qui prend m , on peut distinguer :

- ❖ $m = 1 \Rightarrow V_2 = V_1$: le transformateur est un isolateur
- ❖ $m < 1 \Rightarrow V_2 < V_1$: le transformateur est dit abaisseur
- ❖ $m > 1 \Rightarrow V_2 > V_1$: le transformateur est dit élévateur

➤ Equations aux intensités

D'après la loi d'Henckel appliquée au schéma magnétique équivalent, on aura :

$$N_1 * \bar{I}_1 + N_2 * \bar{I}_2 = \mathfrak{R}_m * \bar{\phi}$$

Or par hypothèse la reluctance du circuit magnétique \mathfrak{R}_m est supposée nulle

$$\Rightarrow N_1 * \bar{I}_1 + N_2 * \bar{I}_2 = 0$$

$$\Rightarrow \frac{\bar{I}_1}{\bar{I}_2} = \frac{-N_2}{N_1} = -m \quad (4)$$

En valeurs efficaces on aura :

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} = m \quad (5)$$

3- -Schéma équivalent et diagramme vectoriel :

✓ Schéma équivalent :

Le schéma équivalent d'un transformateur monophasé parfait est représenté par la figure 2.4

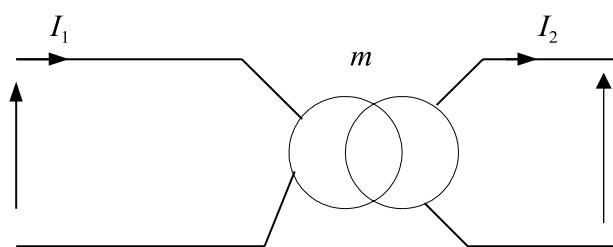


Figure 5: schéma équivalent

✓ Diagramme vectoriel

Ce diagramme vectoriel traduit les équations (2) et (4) précédentes

Soit m , V_2 , I_2 et φ_2 données

On aura :

On aura : $\bar{V}_1 = \frac{-\bar{V}_2}{m}$, $\bar{I}_1 = -m * \bar{I}_2$ et $\varphi_1 = \varphi_2$

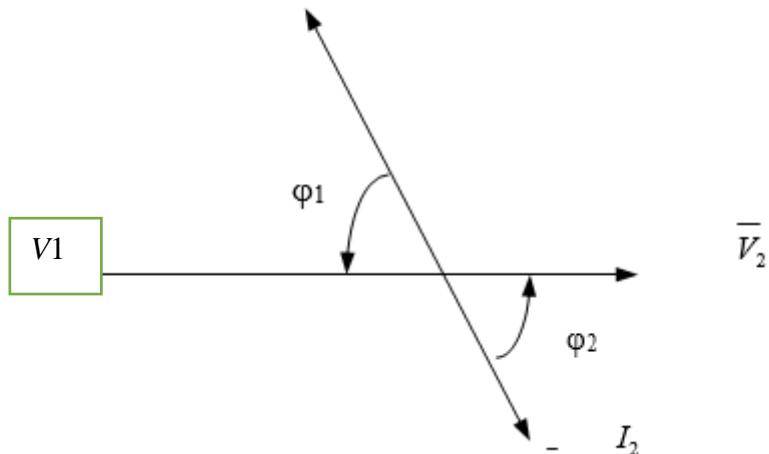


Figure 6: Diagramme vectoriel

4-Propriétés du transformateur parfait :

4.1-Comportement énergétique

On a déjà établit que :

$$\frac{\bar{V}_2}{\bar{V}_1} = \frac{\bar{I}_1}{\bar{I}_2} \Leftrightarrow \frac{\bar{V}_2}{\bar{V}_1} = \frac{\bar{I}_1^*}{\bar{I}_2^*} \Leftrightarrow \bar{V}_2 * \bar{I}_2^* = \bar{V}_1 * \bar{I}_1^* \Leftrightarrow \bar{S}_1 = \bar{S}_2 \quad (6)$$

Sachant que :

$$S_1 = P_1 + j * Q_1$$

$$S_2 = P_2 + j * Q_2$$

$$P_1 = P_2 \text{ & } Q_1 = Q_2$$

Conclusion :

Les puissances active et réactive absorbées par le primaire seront totalement transmises à la charge connectée au secondaire (pas des pertes). Le rendement d'un transformateur parfait est égal à 1.

4.2-Transformateur d'impédance :

Soit (T) un transformateur monophasé parfait de rapport de transformation m , qui alimente une impédance Z . L'objectif est de transférer l'impédance Z' du secondaire au primaire.

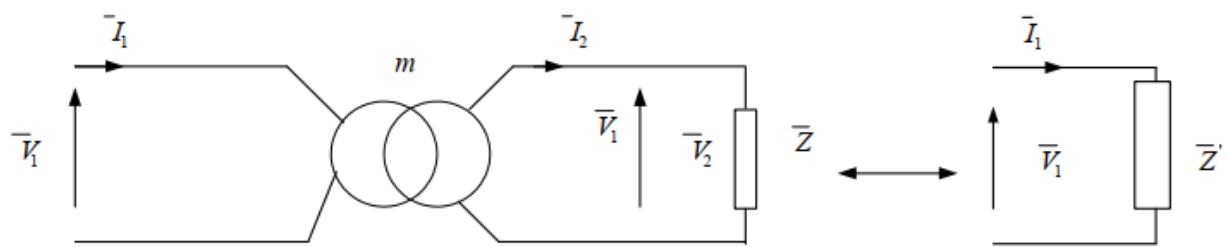


Figure 7: Transfert d'impédance

$$\bar{V}_2 = \bar{Z} * \bar{I}_2 \quad \text{or} \quad \bar{V}_2 = -m * \bar{V}_1 \quad \text{et} \quad \bar{I}_2 = -\frac{\bar{I}_1}{m} \Rightarrow \bar{V}_1 = \frac{\bar{Z}}{m^2} * \bar{I}_1 \quad \text{posons} \quad \bar{Z}' = \frac{\bar{Z}}{m^2}$$

On obtient Finalement, tout se passe, comme si le réseau primaire (la source) alimentait directement l'impédance Z' , ayant des caractéristiques mieux adaptées à la source.

En conclusion, le fonctionnement n'est pas modifié si on respecte les règles suivantes :

- ❖ Règle 1 : on peut transférer (ou ramener) une impédance, située initialement au secondaire, vers le primaire. En la divisant par m^2 .
- ❖ Règle 2 : on peut transférer (ou ramener) une impédance, située initialement au primaire, vers le secondaire. En la multipliant par m^2 .

III. . Transformateur monophasé réel :

Pour modéliser le transformateur réel, on doit tenir compte des grandeurs qui ont été négligées au cours d'étude d'un transformateur parfait.

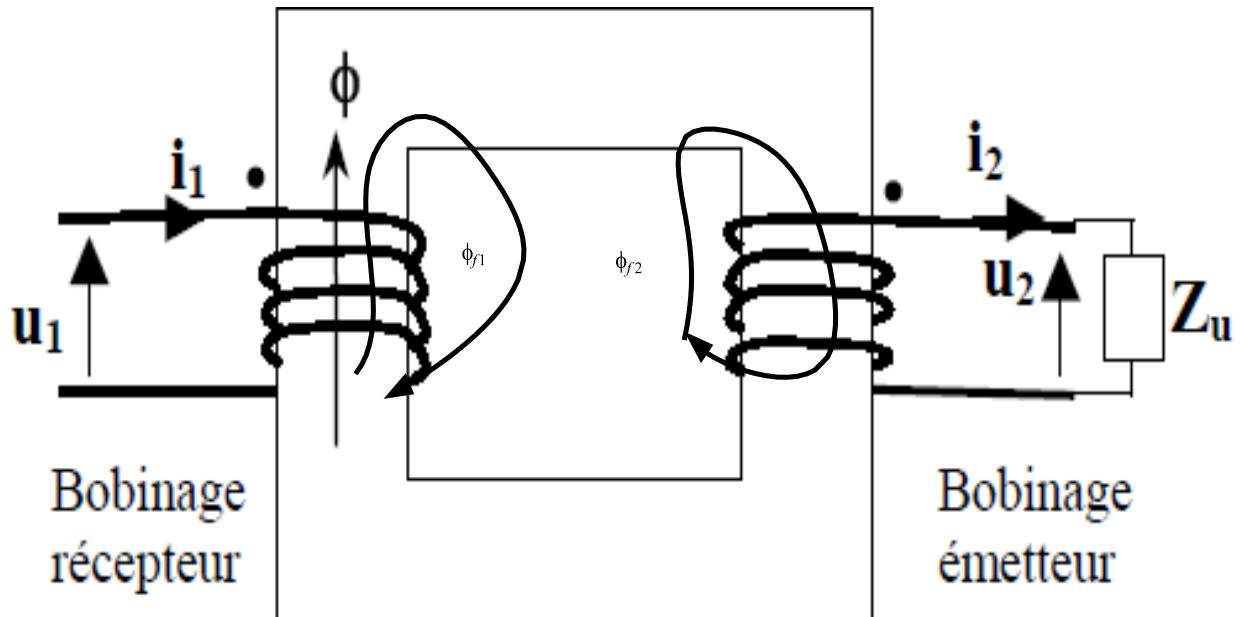


Figure 8: Transformateur réel

1-Equations de fonctionnement

Soit :

$\phi_1 = \phi + \phi_f 1$: Le flux à travers l'enroulement primaire

$\phi_2 = \phi + \phi_f 2$: Le flux à travers l'enroulement secondaire

On aura :

$$l_1 = \frac{N_1 * \phi_{f1}}{I_1} : \text{Inductance de fuites au primaire}$$

$$l_2 = \frac{N_2 * \phi_{f2}}{I_2} : \text{Inductance de fuites au secondaire}$$

2-Schéma équivalent

Si on désigne respectivement par :

- $r_1(\Omega)$: résistance de l'enroulement primaire
- $r_2(\Omega)$: résistance de l'enroulement secondaire
- $l_1(H)$: Inductance de l'enroulement primaire
- $l_2(H)$: Inductance de l'enroulement secondaire
- $R_f(\Omega)$: résistance de circuit magnétique
- $X_m(\Omega)$: réactance de circuit magnétique

Le schéma équivalent du transformateur réel est représenté par la figure 9.

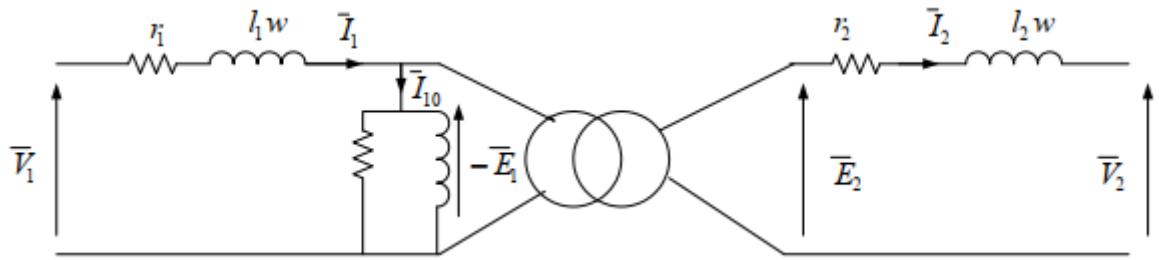


Figure 9: Schéma équivalent

3-Transformateur monophasé dans l'approximation de Kapp

3.1-Hypothèse :

L'hypothèse de Kapp consiste à négliger le courant I_{10} devant le courant I_1

3.2-Schéma équivalent :

Ne pas tenir compte de I_{10} , revient à débrancher l'impédance magnétisante ($R_f // X_m$), le schéma équivalent devient :

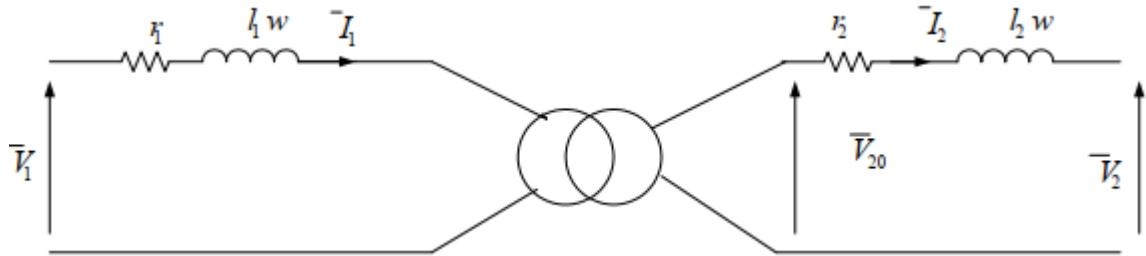


Figure 10: Schéma équivalent +hypothèse de Kapp

$X_1 = L_1 W$: Réactance de fuites au primaire

$X_2 = l_2 * W$: Réactance de fuites au secondaire

❖ Schéma équivalent ramené au secondaire

On peut faire passer l'impédance $Z_1 = R_1 + j * L_1 * w$ du primaire au secondaire, il suffit de la multiplier par m^2 . On obtient le schéma suivant :

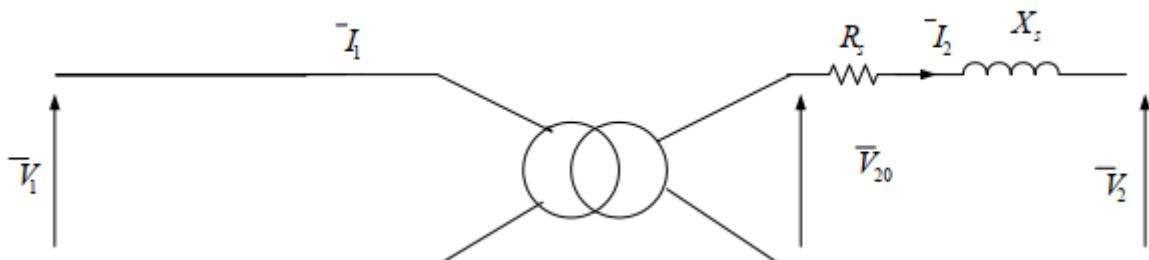


Figure 11: Schéma équivalent ramené au secondaire

Avec :

$$: \bar{V}_2 = \bar{V}_{20} - (R_s + jX_s) * \bar{I}_2 \quad (11)$$

$R_s = r_2 + m^2 * r_1$: la résistance du transformateur ramenée au secondaire

$X_s = X_2 + m^2 * X_1$: La réactance de fuites magnétiques ramenée au secondaire

La loi des mailles appliquée au secondaire donne :

❖ Schéma équivalent ramené au primaire

On peut faire passer l'impédance $Z_2 = r_2 + j * l_2 * w$ du secondaire au primaire, il suffit de la diviser par m^2 . On obtient le schéma suivant

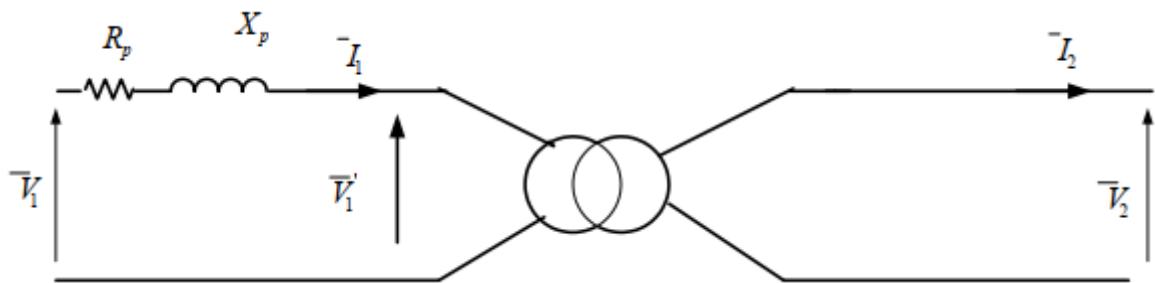


Figure 12: Schéma équivalent ramené au primaire

Avec :

$$R_p = r_1 + \frac{r_2}{m^2} : \text{La résistance du transformateur ramenée au primaire}$$

$$X_p = X_1 + \frac{X_2}{m^2} : \text{La réactance de fuites magnétiques ramenée au primaire}$$

$$\text{La loi des mailles appliquée au primaire donne : } \bar{V}_1 = \bar{V}'_1 + (R_p + jX_p) * \bar{I}_1 \quad (12)$$

3.3-Détermination des éléments du schéma équivalent :

On effectue deux essais :

✓ **Essai à vide**

Cet essai consiste à alimenter l'enroulement primaire par sa tension nominale et on mesure la

tension à vide au secondaire, le courant et la puissance à vide absorbées par le primaire comme le montre la figure suivante :

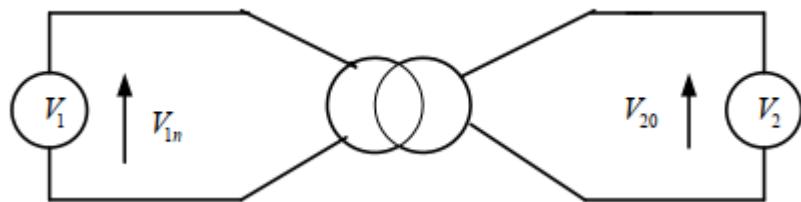


Figure 13:: Essai à vide

Dans ce cas, on peut déterminer pratiquement :

- Le rapport de transformation $m = \frac{V_{20}}{V_{10}}$ (13)

- La résistance de circuit magnétique $R_f = \frac{V_1^2}{P_f} \approx \frac{V_1^2}{P_0}$ (14)

- La réactance magnétisante $X_m = \frac{V_1^2}{O_s} \approx \frac{V_1^2}{O_a}$ (15)

✓ Essai en court-circuit sous tension primaire réduite

On applique au primaire une tension réduite $V_{1cc} \ll V_{1n}$ (tension nominale), on augmente progressivement V_{1cc} depuis 0 jusqu'à avoir $I_{2cc} = I_{2n}$

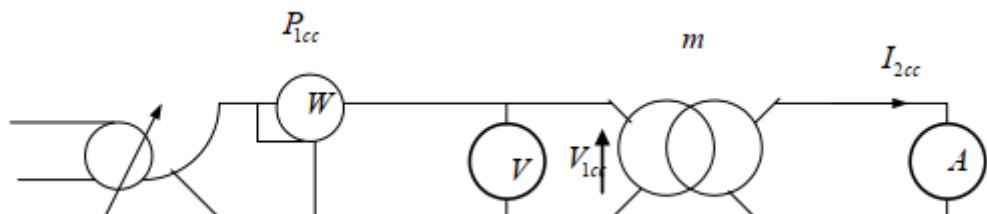


Figure 14: Essai en court circuit

Puisque $V_{1cc} \ll V_{1n} \Rightarrow$ les pertes fer lors de l'essai en court-circuit sont négligeables et par conséquent :

$$P_{1cc} = R_s * I_{2cc}^2 \Rightarrow R_s = \frac{P_{1cc}}{I_{2cc}^2} \quad (16)$$

Le schéma équivalent ramené au secondaire (en court-circuit) est le suivant :

$$Z_s = m \frac{V_{1cc}}{I_{2cc}} \quad (17)$$

$$X_s = \sqrt{(Z_s^2 - R_s^2)} \quad (18)$$

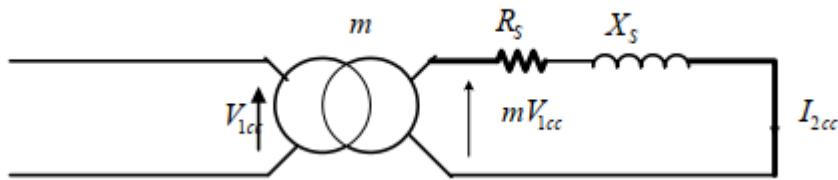


Figure 15: schéma équivalent lors l'essai en court

3.4-Chute de tension

Par définition la chute de tension ΔV_2 est donnée par la différence entre valeurs efficaces de la tension à vide et la tension en charge :

$$\Delta V_2 = V_{20} - V_2 \quad (19)$$

- ❖ Remarque
- ❖ ΔV_2 dépend de I_2 et φ_2
- ❖ ΔV_2 est une grandeur algébrique elle peut être négative $\Rightarrow V_2 > V_{20}$ (surtension)
- ❖ Généralement la chute de tension est donnée par sa valeur relative

Pour déterminer la chute de tension ΔV_2 on peut se servir de l'une des deux méthodes

$$\varepsilon \% = \frac{\Delta V_2}{V_{20}} * 100 \quad (20)$$

suivantes :

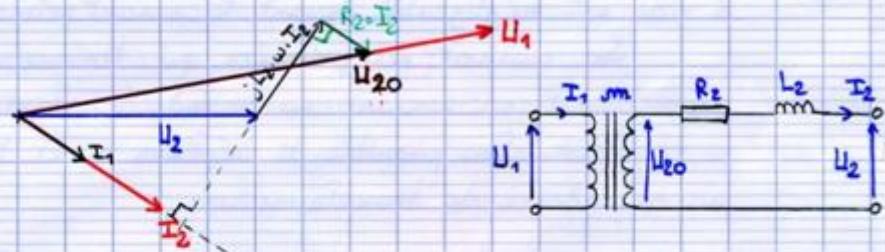
3.4-Diagramme de Kapp :(solution graphique) :

C'est une application de la relation (11) : $V_2 = V_{20} - (R_s + jX_s) * I_2$ avec $V_{20} = m * V_1$
Les données sont : V_1 , m , R_s , X_s , I_2 et φ_2 et on va déterminer V_2 :

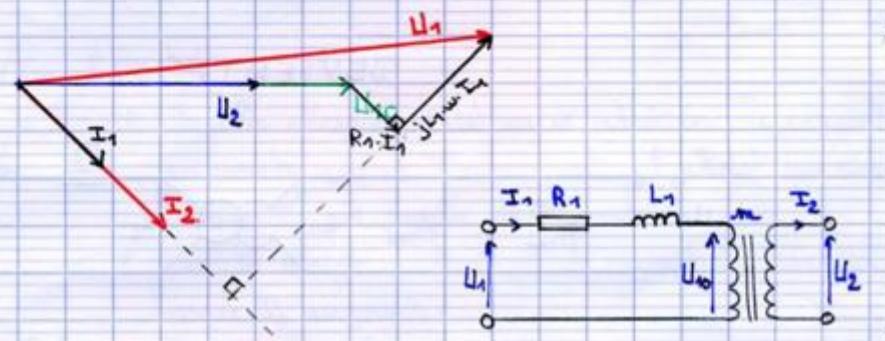
3.4.2-Formule approchée (solution algébrique)

3) Schéma équivalent et diagramme vectoriel

Lorsque les éléments sont au secondaire:



Lorsque les éléments sont au primaire:



Pour déterminer la chute de tension on peut se servir de la relation suivante

$$\Delta V_2 = I_2 \cdot (R_z \cdot \cos(\varphi_2) + X_z \cdot \sin(\varphi_2)) \quad (21)$$

Sachant que l'impédance du transformateur ramenée au secondaire est :

$$\therefore \bar{Z}_z = Z_z \cdot e^{j\varphi_\alpha}$$

$$\text{Avec } \varphi_\alpha = \arctg\left(\frac{X_z}{R_z}\right)$$

$$\text{On peut donc écrire : } \Delta V_2 = I_2 \cdot Z_z \cdot \cos(\varphi_2 - \varphi_\alpha) \quad (22)$$

☒ Remarque :

- ❖ $\Delta V_2 = 0$ pour une charge ayant $\varphi = -\pi/2 + \varphi_{cc}$ (charge à caractère capacitif) ;
- ❖ ΔV_2 est maximale pour $\varphi_2 = \varphi_{cc}$ (charge à caractère inductif)

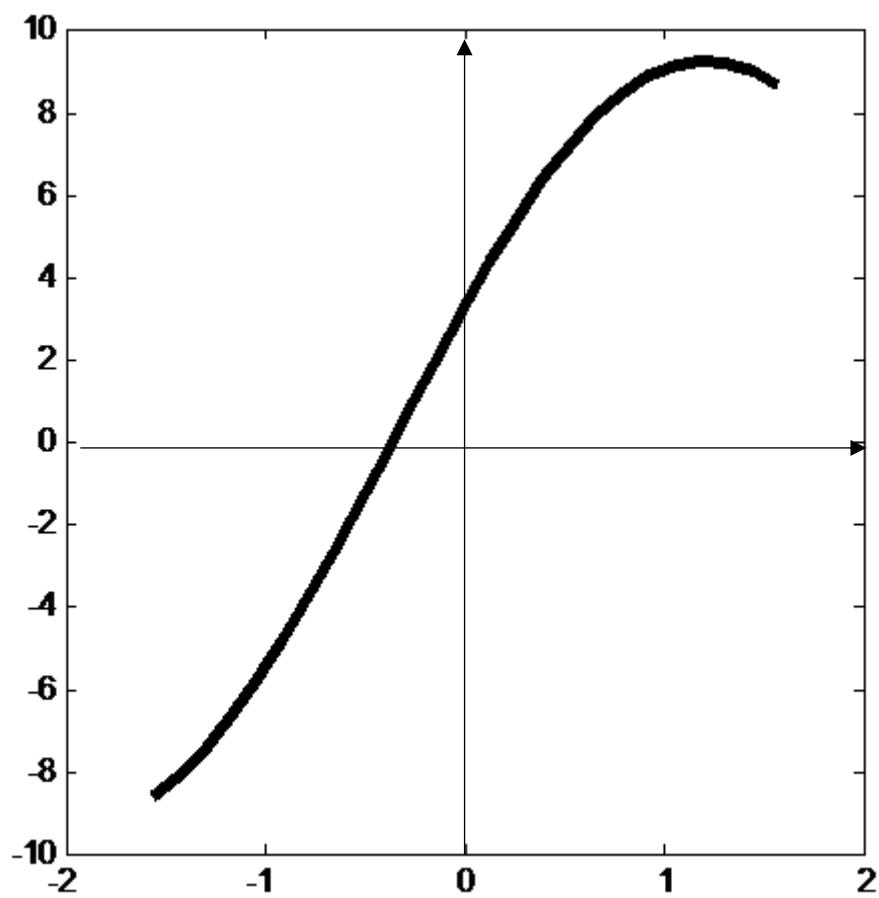


Figure 16: Allure de la tension aux bornes de la charge

5-Rendement du transformateur

❖ Bilan des puissances

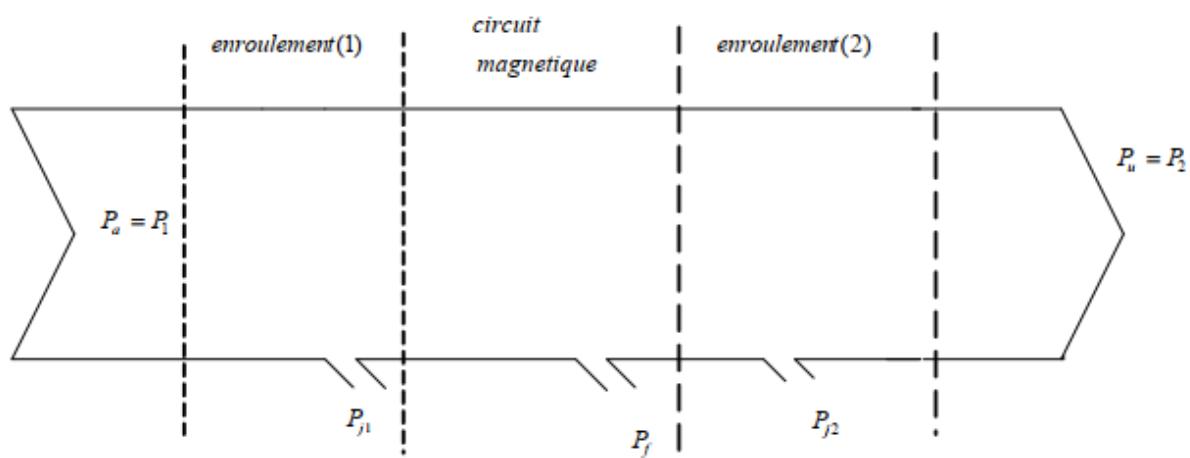


Figure 17: Bilan de puissance

- ❖ Puissance absorbée : $P_a = P_1 = V_1 I_1 \cos(\varphi_1)$
 $P_a = P_1 = P_2 + \sum \text{Pertes}$
- ❖ Puissance utile : $P_u = P_2 = V_2 I_2 \cos(\varphi_2)$

$$\text{Pertes par effet joule totales : } P_j = P_{j1} + P_{j2} = R_s I_2^2 = R_p I_1^2$$

$$\text{Pertes par effet joule au primaire : } P_{j1} = r_1 I_1^2$$

$$\text{Pertes par effet joule au secondaire : } P_{j2} = r_2 I_2^2$$

$$\text{Pertes fer : } P_f = P_0 - r_1 I_{10}^2 \approx P_0$$

❖ Rendement

Le rendement est donné par la relation suivante :

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} * 100 = \frac{P_2}{P_1} * 100$$

Il peut être déterminé pratiquement à l'aide des deux wattmètres pour les faibles puissances, cependant, pour les grandes puissances on utilise généralement la méthode des pertes séparées basée sur l'estimation des pertes. La relation utilisée est la suivante :

$$\eta \% = \frac{P_2}{P_2 + \sum \text{Pertes}} * 100 = \frac{P_2}{P_2 + R_s I_2^2 + P_0} * 100$$

L'allure de la courbe de rendement est donnée par la figure 18. C'est une courbe croissante au début, elle passe par un maximum puis elle décroît.

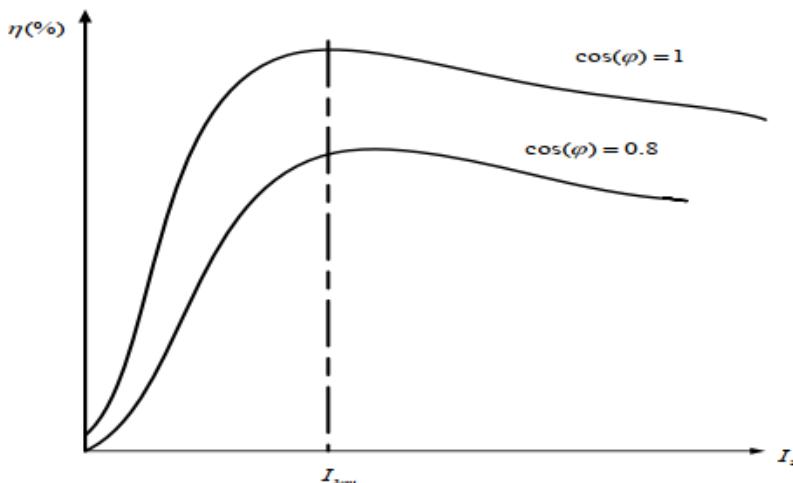


Figure 18: Allure de rendement

Chapitre 2 :Le Transformateur Triphasé

1-Introduction :

Dans le transport et la distribution de l'énergie électrique, on utilise des transformateurs triphasés de grande puissance.

Ils sont installés dans :

- les centrales ;
- les postes d'interconnexion ;
- de distribution ;
- sur les poteaux ;
- dans les zones de distribution.

On peut considérer dans le principe de fonctionnement qu'un transformateur triphasé est équivalent à trois transformateurs monophasés.

La différence tient essentiellement **aux modes de couplage des enroulements** des transformateurs triphasés.

2 . Constitution et caractéristiques d'un transformateur triphasé :

La figure suivante vous montre la constitution d'un transformateur triphasé.

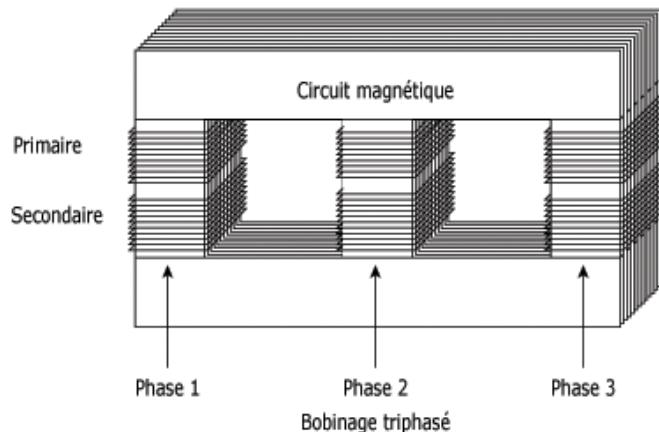


Figure 19:constitions de transformateur triphasé

Le circuit magnétique est constitué de trois colonnes en général alignées et de deux culasses qui assurent la fermeture du circuit.

Il est réalisé par empilage **de tôles d'acier au silicium**.

Chacune des colonnes **reçoit les bobinages primaires et secondaires** d'une phase comme pour les transformateurs monophasés (figure ci-dessus).

Les organes mécaniques ont un rôle plus important pour les transformateurs de forte puissance, tels que les anneaux de manutention ou le système de refroidissement.

La figure ci-après montre un système de refroidissement.

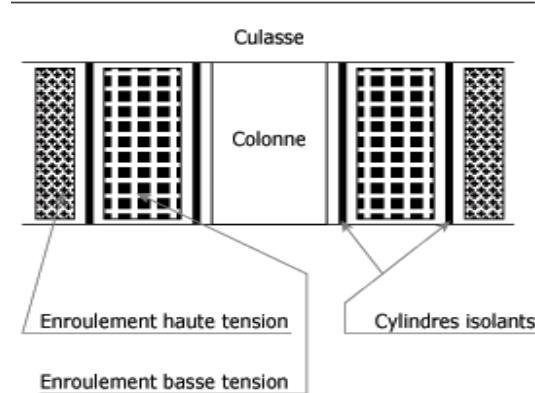


Figure 20:système de refroidissement de transfo

3. Couplage des enroulements d'un transformateur triphasé :

Comme illustré par la figure suivante, les enroulements du primaire comme du secondaire, du côté Haute Tension (HT) comme du côté Basse Tension (BT) peuvent se coupler selon **trois schémas de base** :

- ❖ **Le couplage étoile** permet la sortie du neutre et ainsi de disposer des tensions simples et composées. Il est, pour cela, très utilisé en BT.
- ❖ **Le couplage triangle** ne permet pas la sortie du neutre ; de plus, comme les enroulements sont alimentés par la tension composée, ils nécessitent un plus grand nombre de spires qu'en étoile.
- ❖ Les enroulements du **couplage zigzag** sont divisés en deux demi-bobines placées sur deux colonnes différentes comme indiqué sur la figure suivante. De plus la deuxième demi-bobine est inversée par rapport à la première. On obtient avec ce couplage une meilleure répartition des tensions sur un réseau BT déséquilibré.

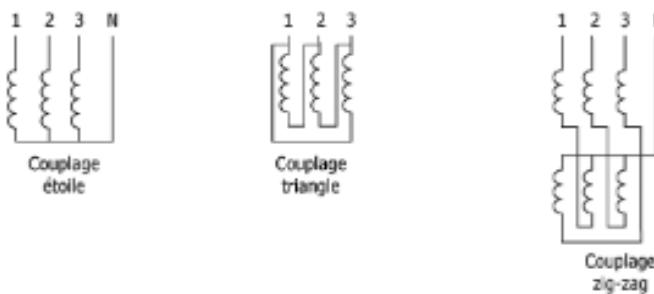


Figure 21: Couplages des enroulements d'un transformateur triphasé

4. Indices horaires ou déphasage

Comme nous avons trois couplages possibles pour le coté HT et trois pour le coté BT, cela nous fait six possibilités de couplage pour le transformateur.

De plus, un enroulement peut être pris dans un sens ou dans l'autre ; l'ordre dans lequel se suivent les enroulements peut être changé, on obtient de ce fait des déphasages entre la HT et la BT qui sont des multiples de 30° .

Un angle de 30° correspond à une heure sur une horloge.

On peut faire ainsi correspondre la valeur du déphasage à une heure du cadran de l'horloge comme l'indique la figure ci-dessous. Le déphasage porte le nom d'indice horaire.

Les différents modes de couplage sont symbolisés par des lettres, majuscules pour la haute tension, minuscules pour la basse tension :

- Y ou y pour le couplage étoile ;
- D ou d pour le couplage triangle ;
- Z ou z pour le couplage zigzag.

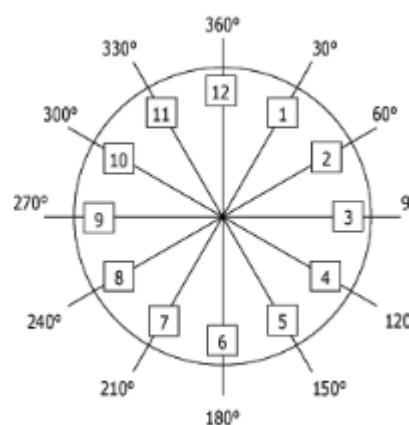


Figure 22: Correspondance entre le déphasage et l'indice horaire

Les différents couplages des enroulements d'un transformateur triphasé se désignent par une lettre majuscule correspondant au couplage du côté HT, une lettre minuscule correspondant au couplage BT et un nombre correspondant à l'indice horaire.

Exemple : D y 11

- D : couplage des enroulements HT en triangle ;
- y : couplage des enroulements BT en étoile ;
- 11: indice horaire du couplage (déphasage de 330°).

Lorsque l'on veut brancher deux transformateurs en parallèle, afin de satisfaire une augmentation de la consommation d'énergie par exemple, les transformateurs doivent avoir :

- la même tension d'alimentation ;
- le même rapport de transformation ;
- les mêmes tensions de court-circuit à 10 % près ;
- les mêmes indices horaires de couplage.

Plaque à bornes d'un transformateur triphasé

Sur la plaque à bornes, les enroulements sont repérés par les **lettres A, B, C pour le côté HT et a, b, c pour le côté BT**. On ajoute éventuellement **la lettre n si le neutre est présent**.

La représentation schématique du couplage se fait de part et d'autre de la plaque à bornes comme si on avait écarté les enroulements placés sur les mêmes colonnes, **la BT vers le haut, la HT vers le bas** comme le montre l'exemple de la figure suivante où on a également représenté le diagramme de Fresnel des tensions pour un couplage D y 11.

❖ **Schéma et diagramme de Fresnel d'un couplage D y 11 :**

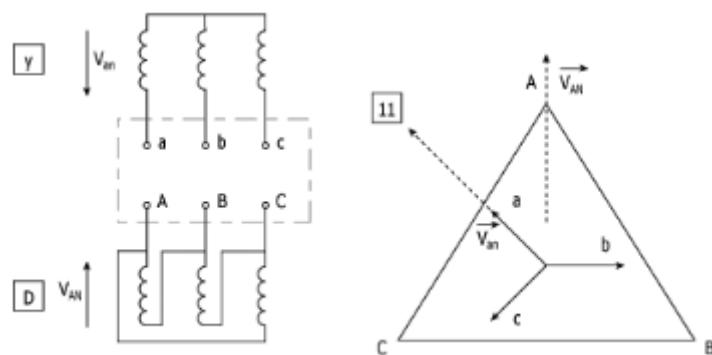


Figure 23: Schéma et diagramme de Fresnel d'un couplage D y 11

Les couplages les plus utilisés sont représentés sur la figure suivante. Le couplage des enroulements d'un transformateur triphasé est un élément qui est indiqué sur sa plaque signalétique, en plus de ceux indiqués précédemment.

3 -les rapports de transformations :

Le rapport de transformation qui est défini par le rapport de la tension du secondaire sur le primaire n'est plus égal à N_2/N_1 mais dépendra du couplage choisi au primaire et au secondaire.

Symbol	V_{an}/V_{AN}	Montage	Diagramme Vectoriel
$Yy\ 0$	$\frac{N_2}{N_1}$		
$Yd\ 1$	$\frac{N_2}{\sqrt{3}N_1}$		
$Yz\ 11$	$\frac{\sqrt{3}}{2} \frac{N_2}{N_1}$		
$Dy\ 11$	$\sqrt{3} \frac{N_2}{N_1}$		
$Dd\ 0$	$\frac{N_2}{N_1}$		
$Zy\ 1$	$\frac{2}{\sqrt{3}} \frac{N_2}{N_1}$		

Figure 24: rapports de transformations de chaque couplages

Conclusion générale :

Sur un transformateur monophasé **les tensions qui pointent sur les bornes homologues (marquées d'un point) sont en phase.**

Alors que sur un transformateur monophasé le primaire et le secondaire sont en phase (ou en opposition de phase) ;

sur un transformateur triphasé le primaire et le secondaire seront déphasés d'un angle qui dépendra des couplages choisis au primaire et au secondaire.