

CHAPITRE : 03 TRANSFORMATEUR TRIPHASE

Contenu :

1°-Intérêt.....	33
2°-Constitution.....	34
2°.1-Modes de couplage.....	36
2°.2-Choix du couplage.....	36
3°-Fonctionnement en régime équilibré.....	36
3°.1-Indice horaire.....	36
3°.2-Détermination pratique de l'indice horaire.....	38
3°.3-Rapport de transformation.....	40
3°.4-Schéma monophasé équivalent.....	41
4°-Marche en parallèle des transformateurs triphasés.....	41
4°.1-But.....	44
4°.2-Equations électriques.....	44
4°.3-Mise en parallèle des transformateurs triphasés.....	46
TD N°2 : Transformateur triphasé & marche en parallèle.....	47

Le Transformateur triphasé

1°-Intérêt

La production de l'énergie électrique et son transport se fait généralement en triphasé. Par ailleurs on démontre facilement que le transport de l'énergie en haute tension est plus économique d'où la nécessité d'employer des transformateurs élévateurs à la sortie de centrale de production et abaisseur tout proche des centres de consommation. En effet pour modifier la tension d'un système triphasé on peut choisir d'utiliser :

- ✓ Soit 3 transformateurs monophasés identiques

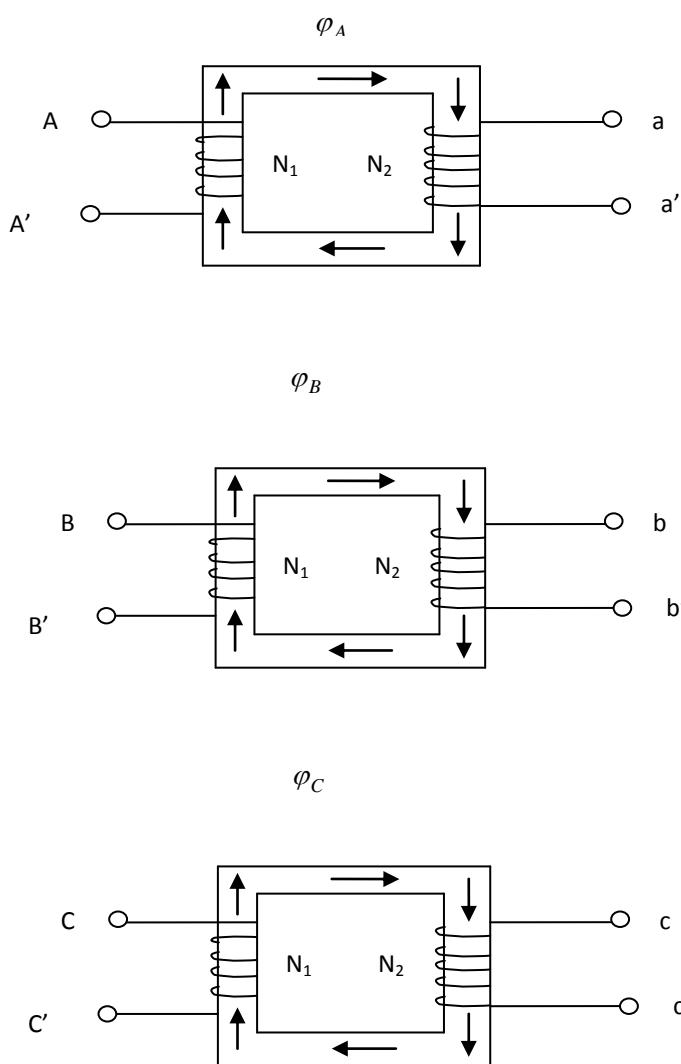


Figure 3.1 : Trois transformateurs monophasés identiques ($\vec{\varphi}_A + \vec{\varphi}_B + \vec{\varphi}_C = \vec{0}$)

- ✓ Soit un seul transformateur triphasé (la solution la plus économique)

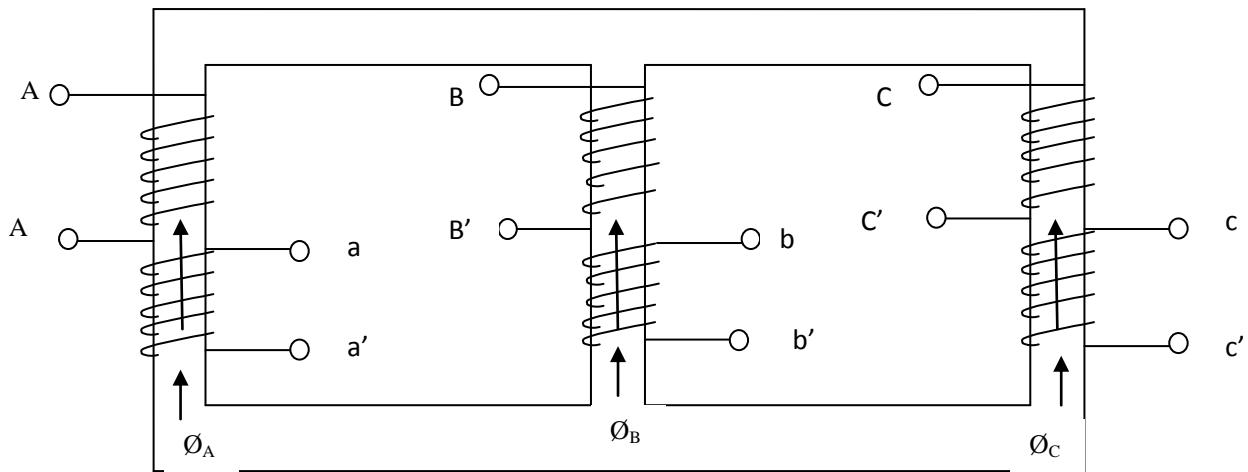


Figure 3.2 : Transformateur triphasé (flux forcés $\vec{\phi}_A + \vec{\phi}_B + \vec{\phi}_C = \vec{0}$)

★ Remarque

On convient de repérer les bornes comme suit :

- Enroulements primaires par des lettres majuscules(A.B.C)
- Enroulements secondaires par des lettres minuscules (a.b.c)

Les bornes désignées par le même lettre sont dites »Homologues »

2°-Constitution du transformateur triphasé

Le circuit magnétique est formé de trois noyaux fermés par 2 culasses .Il est fabriqué en tôles Magnétiques feuillettées .chaque noyau porte :

- Un enroulement primaire
- Un ou plusieurs enroulements secondaires

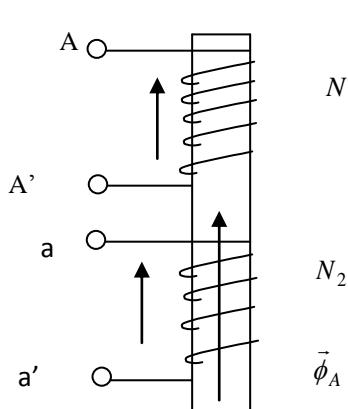


Figure 3.3 : Disposition des enroulements autour du noyau

* Remarque :

L'enroulement primaire (à N_1 spires) et l'enroulement secondaire (à N_2 spires) étant bobinés dans le même sens et traversés par le même flux \Rightarrow les tensions \vec{V}_A et \vec{V}_a sont En phase

2°.1-Mode de couplage

- Au primaire les enroulements peuvent être connectés soit en étoile(Y) soit en triangle(D)

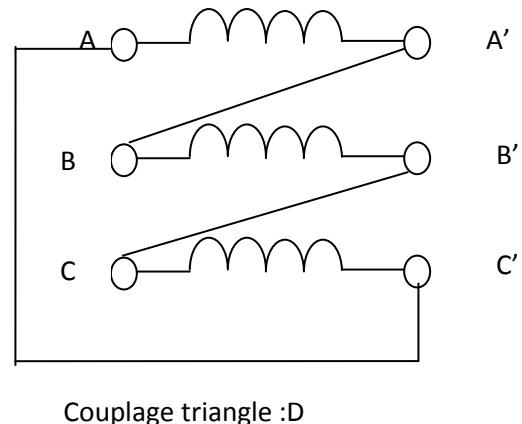
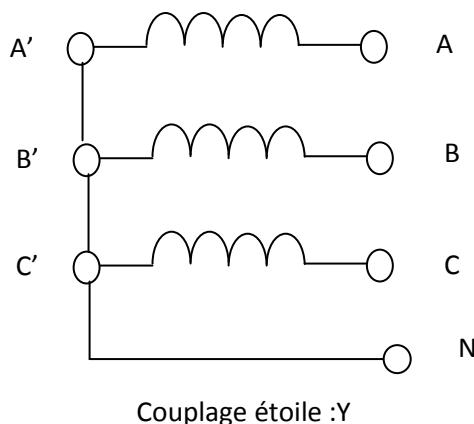


Figure 3.4: Couplage de primaire

- Au secondaire les enroulements peuvent être couplés de 3 manières différentes : étoile(y), triangle(d) et zigzag(z)

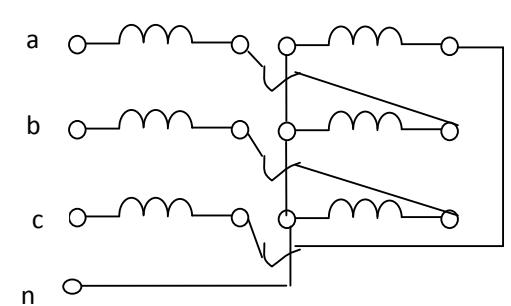
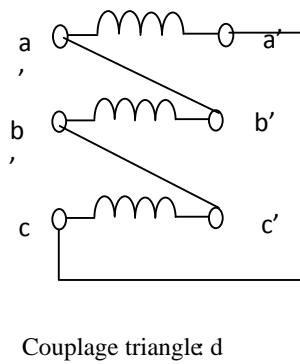
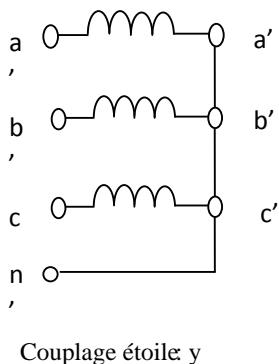


Figure 3.5: Couplage de secondaire

On obtient ainsi 6 couplages possibles entre primaire et secondaire :

Y-y : étoile –étoile

Y-d : étoile-triangle

Y-z : étoile-zigzag

D-y : triangle- étoile

D-d : triangle –triangle

D-z: triangle-zigzag

On donne ci dessous les représentations symboliques des couplages normalisés

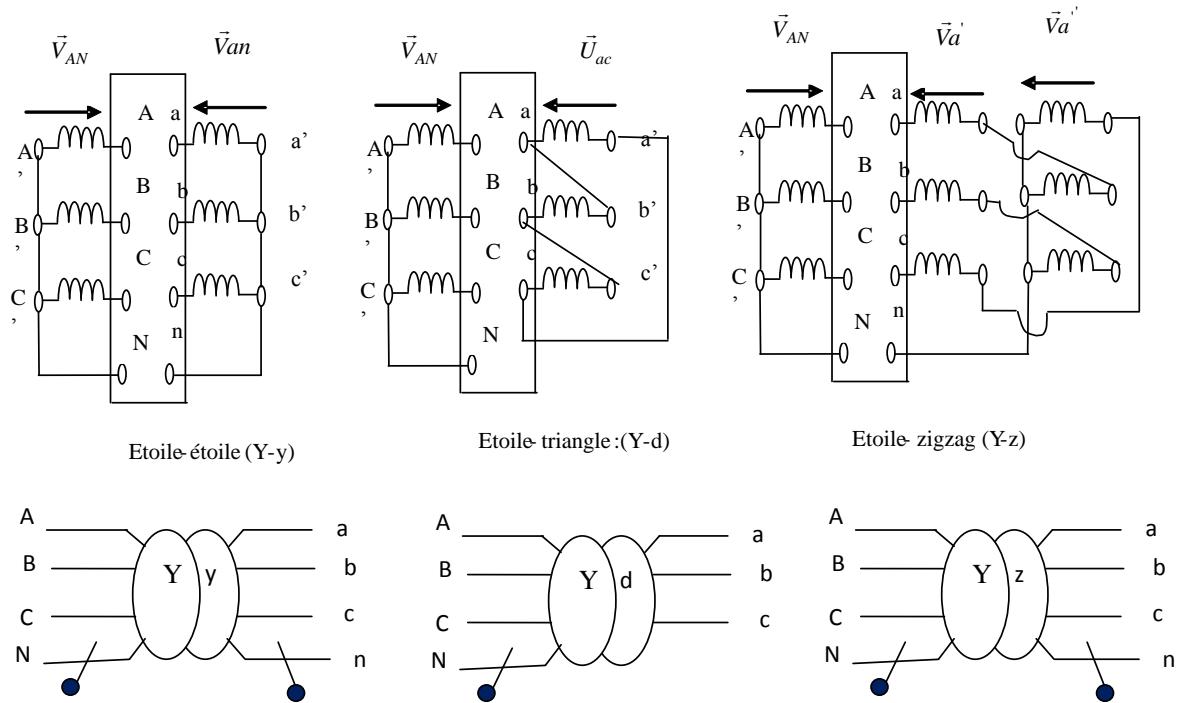


Figure 3.6: Représentation symboliques

Chacune des schémas de la figure (3.6) est une représentation conventionnelle qui suppose que les deux enroulements d'un même noyau sont rabattus de part et d'autre de la plaque à bornes. Compte tenu de la remarque précédente on pourrait dire que :

- Dans le couplage Y-d : \vec{V}_A et \vec{U}_{ac} sont en phase
- Dans le couplage Y-z : \vec{V}_A ; \vec{V}_a et $\vec{V}_{a''}$ sont en phase

2°.2-Choix du couplage

Le choix du couplage repose sur plusieurs critères :

- La charge nécessite la présence du neutre (par exemple réseau BT de la steg). Le secondaire doit être connecté soit en étoile soit en zigzag
- Le fonctionnement est déséquilibré (courant de déséquilibre dans le neutre I_n est \vec{V}_A supérieur à 0.1 le courant nominal), le secondaire doit être couplé en zigzag
 - Côté haute tension on a intérêt à choisir le couplage étoile (moins de spire à utiliser)
- Pour les forts courants, on préfère le couplage triangle

3°-Fonctionnement en régime équilibré

3°.1-Indice horaire

3°.1.1-Définition

L'indice horaire (I_h) est un nombre entier compris entre 0 et 11 qui traduit le déphasage θ entre deux tensions primaire et secondaire homologues

$$I_h = \frac{\theta}{30^\circ} \quad (1)$$

$$\theta = (\vec{V}_A; \vec{V}_a) = (\vec{V}_B; \vec{V}_b) = (\vec{V}_C; \vec{V}_c)$$

❖ Remarque

On sait qu'un système de tensions primaires triphasé équilibré et direct donne naissance à un système secondaire triphasé équilibré et direct. Il est donc clair que θ est aussi le déphasage entre les tensions composées homologues

$$\theta = (\vec{U}_{AB}; \vec{U}_{ab}) = (\vec{U}_{BC}; \vec{U}_{bc}) = (\vec{U}_{CA}; \vec{U}_{ca})$$

On peut déterminer θ :

- Soit à partir du schéma des connections
- Soit pratiquement par des essais

3°.1.2-Détermination de l'indice horaire à partir du schéma

On dispose du schéma des connections internes d'un transformateur et il est question de déterminer son indice horaire

Exemple 1 :Y-y

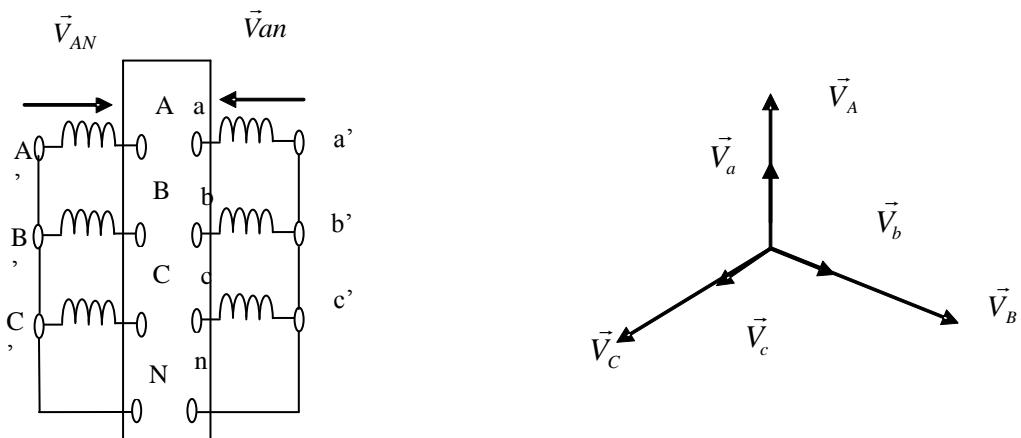


Figure 3.7: Détermination de l'indice horaire(Y-y0)

D'après le schéma on peut voir que \vec{V}_A et \vec{V}_a sont En phase, car, portés par le même noyau. Ils sont orientés dans le même sens $\Rightarrow \theta = 0^\circ \Rightarrow I_h = 0$

★ Remarque

- ✓ Une permutation directe des liaisons aux bornes primaires ou aux secondaires (enroulement ② sera lié à **a**, enroulement ③ à **b** et enroulement ① à **c**) fait passer l'indice horaire à **4**(augmente l'indice de +4)
- ✓ 2 permutations directes ou un inverse fait passer l'indice à **8**(augmente l'indice de +8)

Exemple 2 :Y-d

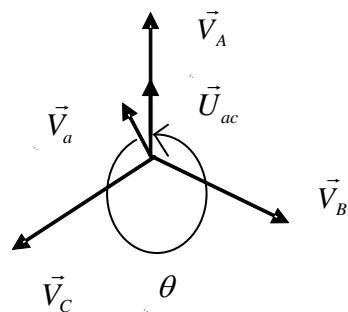
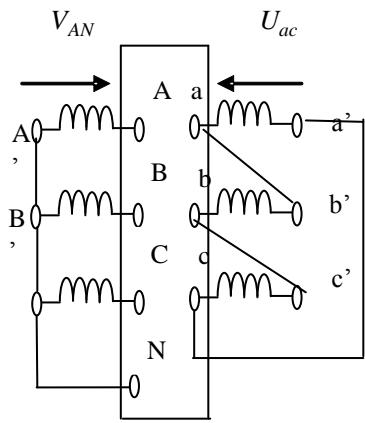


Figure 3.8: Détermination de l'indice horaire (Y-d11)

D'après le schéma, on peut voir que :

\vec{V}_A et \vec{U}_{ac} sont En phase ; \vec{V}_B et \vec{U}_{ba} sont En phase et \vec{V}_C et \vec{U}_{cb} sont En phase ;

$$\Rightarrow \theta = 330^\circ \Rightarrow I_h = 11$$

Exemple 3 :Y-z

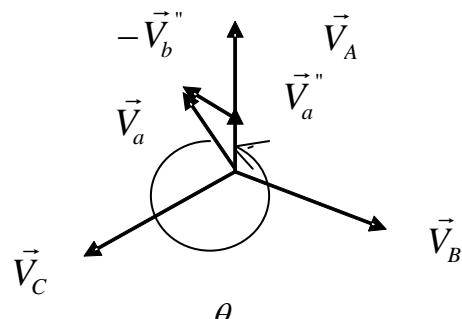
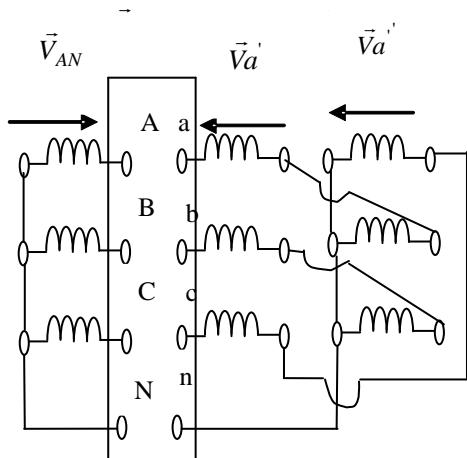


Figure 3.9: Détermination de l'indice horaire (Y-z11)

3°.2-Détermination pratique de l'indice horaire

3°.2.1- Méthode oscilloscopique

Cela revient à mesurer le déphasage θ entre deux tensions homologues à l'aide d'un oscilloscope et à en déduire l'indice horaire

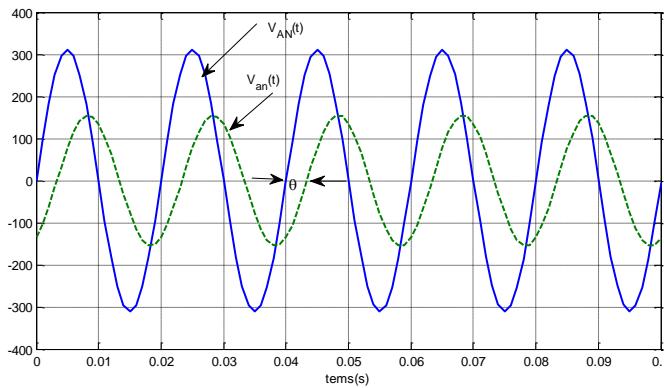


Fig 3.10 : Méthode oscilloscope

3°.2 .2-Méthode des électriciens

La méthode des électriciens est la plus simple car elle nécessite juste l'utilisation d'un voltmètre.

On relie entre elles deux bornes homologues(par exemple A et a)

On mesure les tensions composées au primaire

$$U_{AB} = U_{BC} = U_{CA} = U$$

On mesure les tensions mixtes entre les bornes HT et BT

$$U_{Ab} ; U_{Bb} ; U_{Cb} ; U_{Ac} ; U_{Bc} ; U_{Cc}$$

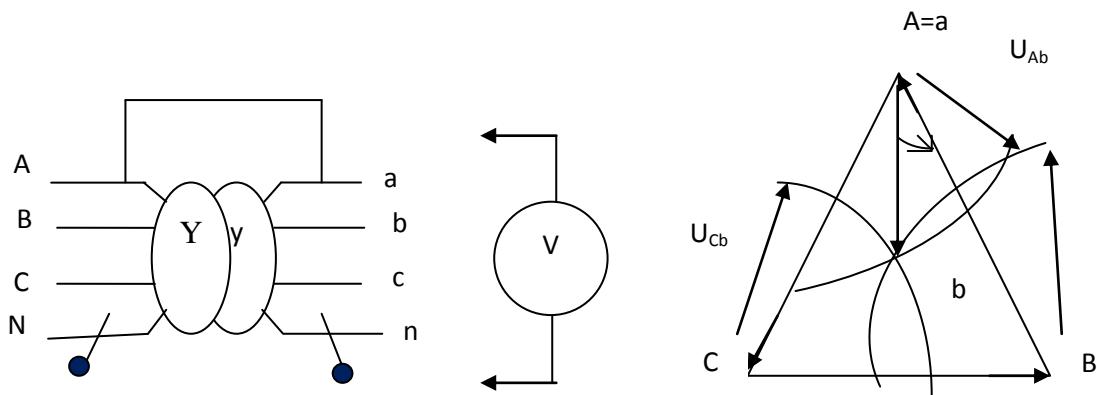
Ces mesures permettent de construire le diagramme vectoriel et d'enduire le déphasage θ

On choisit une échelle

On construit le triangle des tensions primaires(A.B.C)

Le potentiel A est celui de a, donc on construit »a » confondu avec « A »

Pour avoir le point b, il suffit de tracer les 3 les arcs de cercles de rayon U_{Ab} ; U_{Bb} et U_{Cb} et d'origines respectivement A.B et C

**Figure 3.11 : Méthode des électriciens**

Le déphasage θ sera donné par l'angle entre \vec{U}_{AB} et \vec{U}_{ab} (dans l'exemple de la figure 3.11) $\theta = 30^\circ \Rightarrow I_h = 1$

3°.3-Rapport de transformation

3°.3.1-Définition

Par définition, le rapport de transformation à vide m est donné par :

$$m = \frac{U_{ab}}{U_{AB}} = \frac{V_{a0}}{V_{A0}} \quad (2)$$

Le rapport de transformation triphasé dépend de N_1 et N_2 les nombres de spires au primaire et au secondaire et du couplage

3°.3.2-Exemples

Exemple 1 :Y-y

En se référant à la figure 3.7 et sachant que la tension aux bornes d'un enroulement est proportionnelle au nombre de spires (d'après la relation de Boucherot). On aura donc :

$$m = \frac{V_{a0}}{V_A} = \frac{N_2}{N_1}$$

☒ Remarque

On démontre de la même manière que le rapport de transformation pour un couplage D-d est égal aussi : $m = \frac{N_2}{N_1}$ (3)

Exemple 2 :Y-d

En se référant à la figure 3.8 on démontre que $m = \frac{U_{ab}}{U_{AB}} = \frac{V_{ab0}}{N_1 \sqrt{3}}$ (4)

Exemple 3 :Y-z

En se référant à la figure 3.9, on démontre que :

$$V_a = \sqrt{3} * V_a' \text{ avec } V_a' = V_a'' = V_b' = V_b'' = V_c' = V_c'' = k \frac{N_2}{2}$$

$$\Rightarrow m = \frac{V_{aa}}{V_A} = \sqrt{3} \frac{V_a'}{V_A} = \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{N_2}{N_1} \quad (5)$$

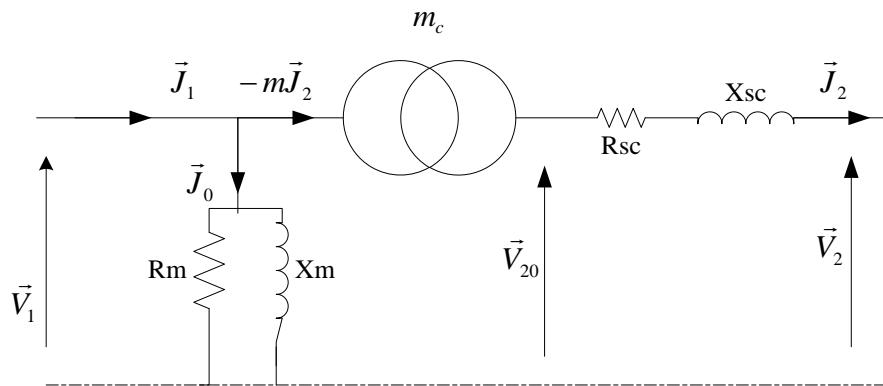
3°.4-Schéma monophasé équivalent

Le fonctionnement étant équilibré, l'étude d'un transformateur triphasé peut être ramenée à l'étude d'un transformateur monophasé équivalent par la méthode de Kapp

3°.4.1-Méthode du transformateur colonne

- ✓ Marche à suivre :
 - On ramène les données à une colonne (tension par colonne, courant par colonne et puissances par colonne) tout en tenant compte des couplages
 - On résout le problème au niveau d'une colonne
 - On exprime les résultats finaux en fonction des grandeurs des lignes
- ☒ Remarque

Cette méthode est inapplicable lorsqu'on ignore le couplage. Elle est délicate si le couplage du secondaire est en zigzag
- ✓ Schéma équivalent par colonne vu du secondaire

**Figure 3.12 :** schéma équivalent par colonne

Les éléments du schéma équivalent sont donnés par :

$$m = \frac{N_2}{N_1} = \frac{V_{20}}{V_1} \quad (6)$$

$$R_s = \frac{P_{cc}}{3(J_{2cc})^2} \quad (7)$$

$$Z_s = m_c \frac{V_{1cc}}{J_{2cc}} \quad (8)$$

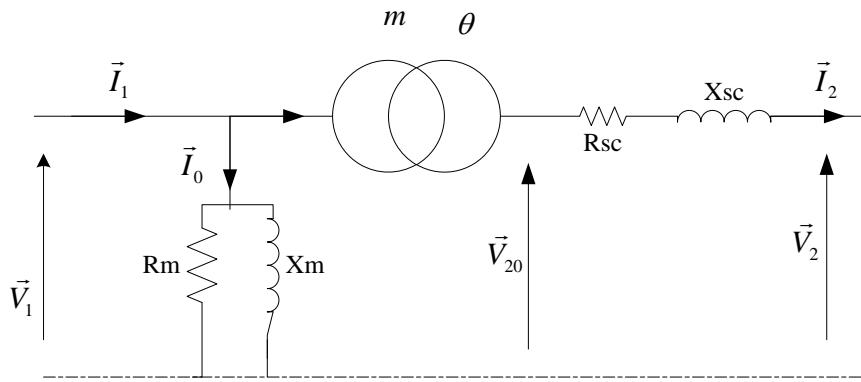
$$X_s = \sqrt{(Z_s)^2 - (R_s)^2} \quad (9)$$

La chute de tension peut être déterminée de la même manière qu'avec un transformateur monophasé.

3°.4.2-Méthode des dipôles équivalents de Thévenin

Cette méthode est applicable même si l'on ignore le couplage. Dans ce cas, on considère les données par phase (tension étoilée, courant de ligne et puissance et pertes par phase). chaque phase sera remplacé par son dipôle de thévenin équivalent :

- ✓ **Dipôle de Thévenin équivalent vu du secondaire**

**Figure 3.13 :** Dipôle de Thévenin équivalent

Les éléments du schéma sont donnés par :

$$m = \frac{V_{20}}{V_{10}} \quad (10)$$

$$R_s = \frac{P_{cc}}{3(I_{2cc})^2} \quad (11)$$

$$Z_s = m \frac{V_{1cc}}{I_{2cc}} \quad (12)$$

On détermine graphiquement ou par calcul la chute de tension ΔU_2

✓ Equations et diagramme

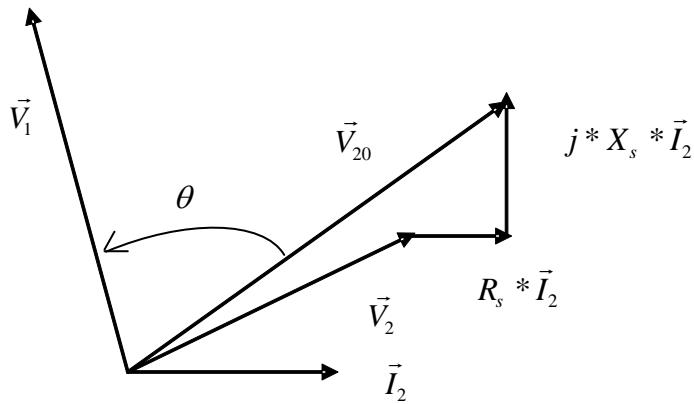
La loi des mailles appliquée au secondaire donne :

$$\bar{V}_2 = \bar{V}_{20} - \bar{Z}_s * \bar{I}_2 \text{ avec } \bar{V}_{20} = m * \bar{V}_1 * e^{-j*\theta}$$

$$\bar{V}_2 = m * \bar{V}_1 * e^{-j*\theta} - (R_s + jX_s) * \bar{I}_2 \quad (13)$$

Quant aux courants on aura, d'après la loi des nœuds :

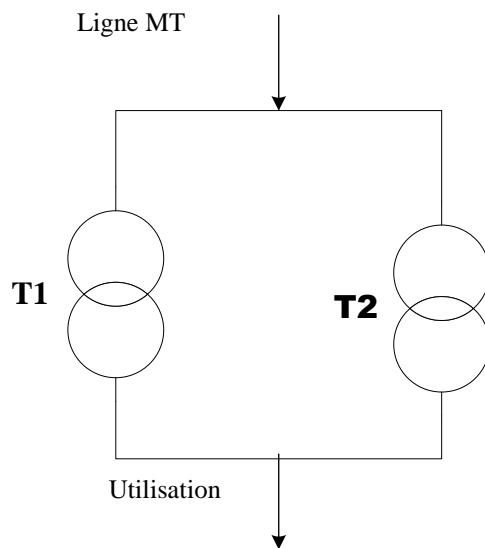
$$\bar{I}_1 = m * \bar{I}_2 * e^{j*\theta} + \bar{I}_{10} \quad (14)$$

**Figure 3.14:** Diagramme vectoriel

4°-Marche en parallèle des transformateurs triphasés

4°.1-But

Répondre à une demande croissante en énergie électrique la figure 3.14 est un exemple, généralement T_1 et T_2 sont de même ordre de puissance pour garantir un bon rendement de l'ensemble

**Figure 3.15 :** Branchement en parallèle

4°.2-Equations électriques

Soient deux transformateurs T_1 et T_2 de même ordre de puissance et dont les caractéristiques sont :

- $T_1 : R_{s1} ; X_{s1} ; m ; \theta$ et $Z_{\mu 1}$

- $T_2 : R_{s2} ; X_{s2} ; m ; \theta$ et $Z_{\mu 2}$

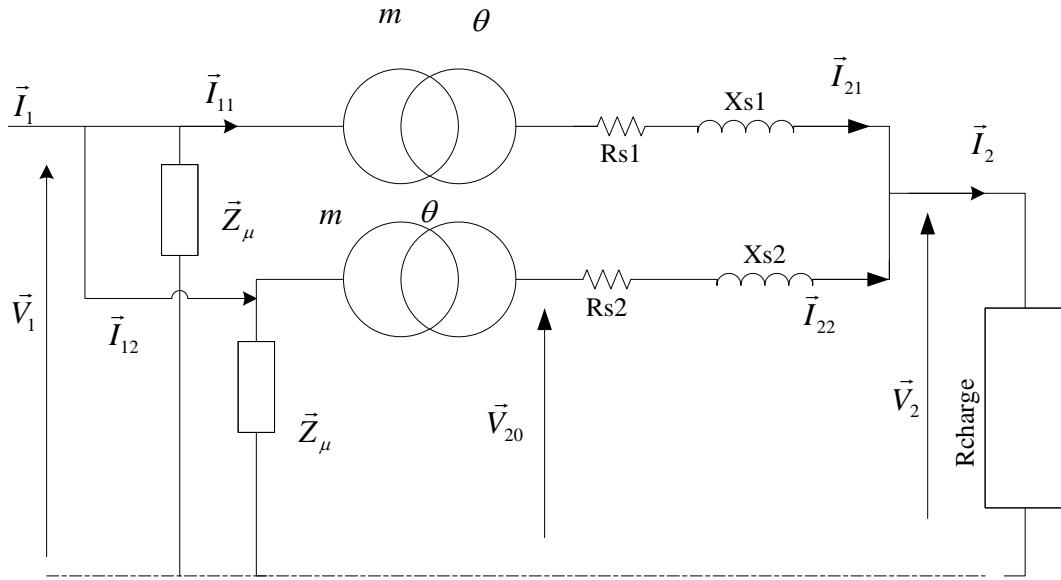


Figure 3.16 : Schéma équivalent des deux transformateurs en parallèle

Appliquons la loi des mailles aux secondaires :

$$T_1 : \bar{V}_2 = m * \bar{V}_1 * e^{-j*\theta} - \bar{Z}_{s1} * \bar{I}_{21} \quad (15)$$

$$T_2 : \bar{V}_2 = m * \bar{V}_1 * e^{-j*\theta} - \bar{Z}_{s2} * \bar{I}_{22} \quad (16)$$

$$\Rightarrow \bar{Z}_{s1} * \bar{I}_{21} = \bar{Z}_{s2} * \bar{I}_{22}$$

(17)

Si l'on désigne par : $\varphi_{1cc} = \arg \text{ument}(\bar{Z}_{s1})$; $\varphi_{2cc} = \arg \text{ument}(\bar{Z}_{s2})$ et $k = \frac{Z_{s1}}{Z_{s2}}$

\bar{I}_{21} est déphasé de $\Psi = \varphi_{1cc} - \varphi_{2cc}$ sur \bar{I}_{22}

$$\frac{\bar{I}_{22}}{\bar{I}_{21}} = \frac{\bar{Z}_{s1}}{\bar{Z}_{s2}} \quad (18)$$

$$\Rightarrow I_{22} = k * I_{21} \text{ (en valeurs efficaces)} \quad (19)$$

$$\Rightarrow \bar{I}_{22} = k * \bar{I}_{21} * e^{j\Psi} \text{ (en valeurs complexes)} \quad (20)$$

Et le courant global dans la charge : $\bar{I}_2 = \bar{I}_{21} + \bar{I}_{22} = \bar{I}_{21}(1 + K e^{j\Psi})$ (21)

☒ Remarques

- Répartition des courants :

D'après l'équation (17) on trace $I_{22} = f(I_{21})$

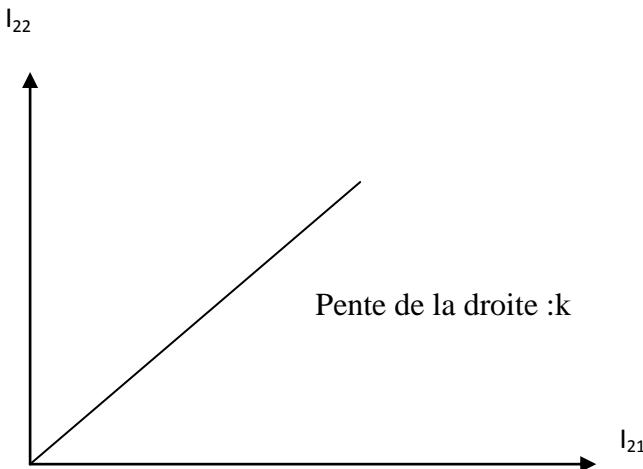


Figure 3.17 : Relation entre courants secondaires

Si $Z_{s1} = Z_{s2} \Leftrightarrow I_{22} = I_{21}$

Le transformateur ayant Z_s la plus faible débite le courant le plus fort

- Répartition des puissances apparentes :

$$(17) \Leftrightarrow Z_{s1} * I_{21} * (3 * V_2) = Z_{s2} * I_{22} * (3 * V_2)$$

$$Z_{s1} * S_{21} = Z_{s2} * S_{22}$$

La répartition des puissances apparentes s'effectue en raison inverse des impédances ramenées aux secondaires

- Le Transformateur équivalent :

Les deux transformateurs du schéma de la figure 3.16 peuvent être remplacés par le schéma d'un transformateur équivalent ayant :

Même rapport de m et même déphasage θ

Impédance équivalente ramenée au secondaire $\bar{Z}_s = \bar{Z}_{s1} // \bar{Z}_{s2}$

4°.3-Mise en parallèle des transformateurs triphasés

Les conditions nécessaires pour brancher deux transformateurs triphasés en parallèle, ce qu'ils aient :

- Même tension primaire
- Même rapport de transformation

- Même indice horaire ou même groupe d'indice horaires

Groupes	Indices	Couplages
I	0,4,8	Y-y,D-d,D-z
II	1,5,9	Y-y,D-d,D-z
III	2,6,10	D-y,Y-z,Y-d
IV	3,7,11	D-y,Y-z,Y-d

Exemple : Marche en parallèle des transformateurs du groupe 1

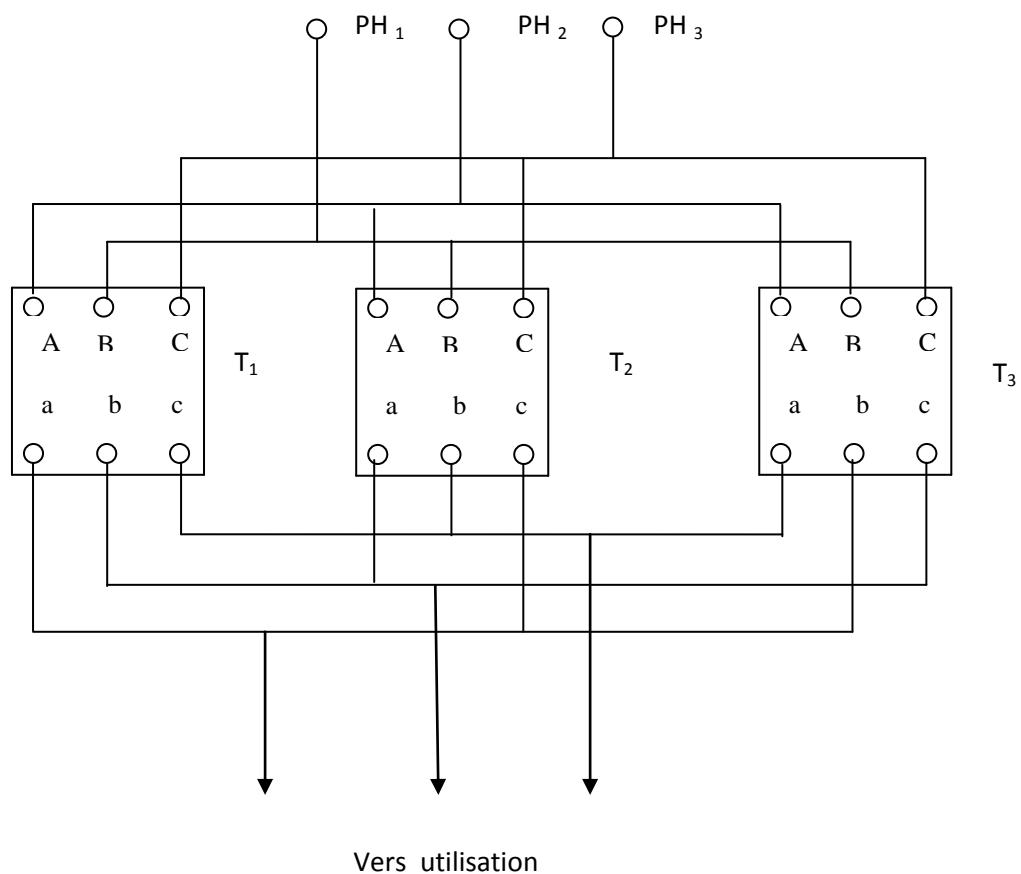


Fig 4.18 : Connexion des transformateurs en parallèle