

CHAPITRE 3

Année universitaire
2024/2025

Circuits et puissances électriques (Systèmes triphasés)

Electrotechnique Fondamentale 1

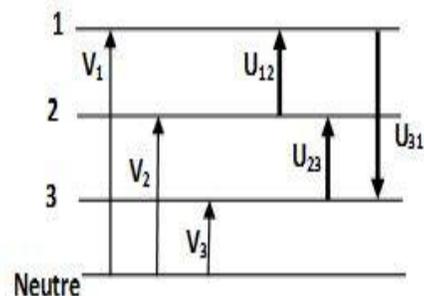
2^{eme} année License tronc commun ST

Filières Génie électrique

Prof. Megherbi Ahmed chaouki
Chargé de Cours

Département de Génie électrique

Université Mohammed Khider Biskra



Contenu du chapitre3

Ce chapitre couvre les points suivants :

- Tensions simples et tensions composées.
- Le Couplage de la charge triphasé en étoile
- Le Couplage de la charge triphasé en triangle
- Les puissances en triphasé

Chapitre III Systèmes triphasés

III.1. Introduction

La quasi-totalité de l'énergie électrique est produite par des alternateurs triphasés au niveau des centrales électriques est transportée par le biais de trois lignes où l'ensemble des courants dans chacune d'elles forment un système triphasé.

Liée principalement aux contraintes du transport de l'énergie électrique, le triphasé présente des avantages par rapport au monophasé. Dont on peut citer les principaux :

Les pertes joules (dues au transport de l'énergie électriques) dans les lignes triphasée sont faibles par comparaison avec les pertes dégagées lors d'un transport de la même puissance par une ligne monophasé : pour bien illustrer selon la figure 1 on peut considérer l'exemple de transport d'une puissance P à une distance L (exemple de la centrale au consommateur) par une ligne triphasée et une autre monophasé sous la même tension U . La résistance d'une ligne (câble) ayant une longueur L et de section S est donnée par $R = \rho \frac{L}{S}$, ρ étant la resistivité du matériau conducteur exprimée en $[\Omega m]$

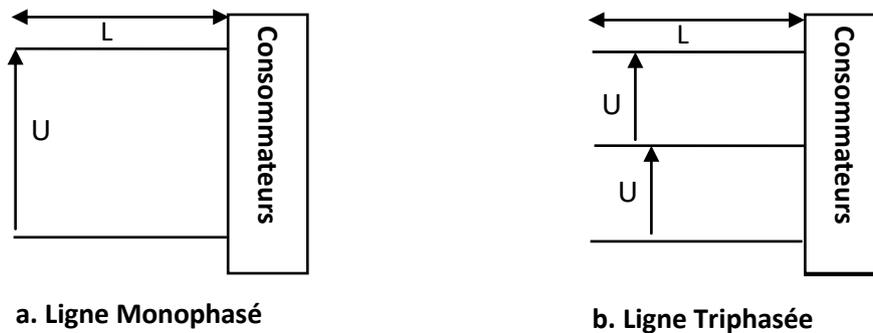


Fig. 3.1. Pertes joules d'une ligne monophasée et triphasée

Calcul des pertes joules :

$$p_{j \text{ monophasé}} = 2 R I^2$$

La puissance consommée par la charge monophasée est $P = UI \cos \varphi \rightarrow$

$$I = \frac{P}{U \cos \varphi}$$

$$\text{Donc } p_{j \text{ monophasé}} = \frac{2 R P^2}{U^2 \cos^2 \varphi}$$

$$p_{j \text{ triphasée}} = 3 R I^2$$

La puissance consommée par la charge triphasée est $P = \sqrt{3} UI \cos \varphi \rightarrow$

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} U \cos \varphi}$$

$$\text{Donc } p_{j \text{ triphasée}} = \frac{R P^2}{U^2 \cos^2 \varphi}$$

Par comparaison des expressions des pertes joules d'une ligne monophasée et triphasée : on constate que les pertes par effet joule dans une la ligne triphasée est la moitié moins de pertes par effet joules qu'une ligne monophasée pour fournir une même puissance à un utilisateur (dans les même condition de transport (L, I,...)).

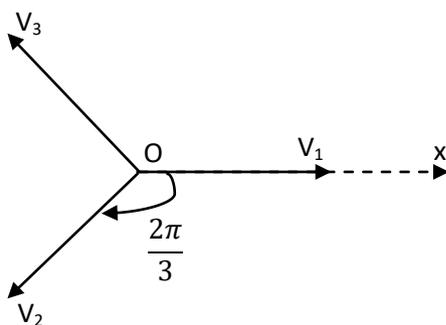
Un autre intérêt intéressant de l'utilisation du système triphasée est la possibilité de produire aisément des champs tournants (pour les moteurs triphasés), ainsi il bien de noter que les machines triphasées ont des puissances plus importantes que celles des machines monophasées de même masse et donc leurs prix sont moins élevés.

III.2. Systèmes triphasés équilibrés

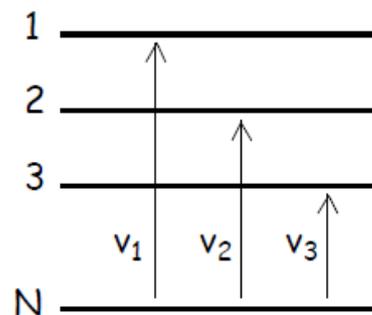
III.2.1. Définition

On dit qu'on a un système triphasé des courants ou des tensions est équilibrés s'il est formé de trois valeurs instantanées sinusoïdales (des courant ou des tensions) de même pulsation ω ayant la même valeur efficace et qui sont régulièrement déphasées entre elles avec un angle de déphasage de $2\pi / 3$.

Comme le montre la fig. 3.2.b représentant une ligne de distributions triphasée ou ces trois grandeurs de tension du système triphasé repérées par les indices 1, 2 et 3 dans la représentation de Fresnel (associée aux trois tensions simples entre phase et neutre.), la tension V_1 est prise comme référence, la deuxième est déphasée en retard de $2\pi / 3$ et la troisième de $4\pi / 3$.



a. Diagramme de Fresnel des tensions simples triphasées



b. Lignes triphasées avec neutre

Fig. 3.2. Ligne de distributions triphasée

La représentation vectorielle (diagramme de Fresnel) nous montre que la somme de trois tensions triphasées est constamment nulle :

$$\vec{V}_1 + \vec{V}_2 + \vec{V}_3 = \vec{0}$$

Les trois tensions ont pour expressions (valeurs) instantanées :

$$\begin{cases} v_1(t) = V\sqrt{2} \sin(\omega t) \\ v_2(t) = V\sqrt{2} \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ v_3(t) = V\sqrt{2} \sin(\omega t - \frac{4\pi}{3}) \end{cases}$$

La représentation graphique associée (on peut la visualiser à l'oscilloscope) est donnée ci-dessous :

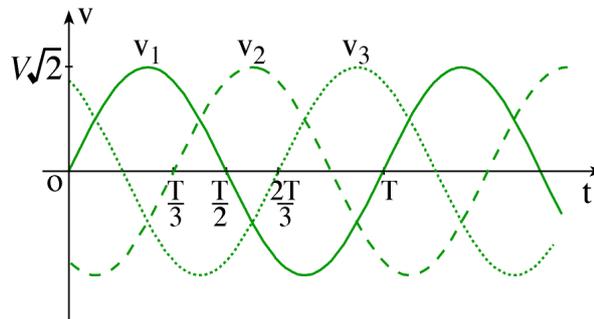


Fig. 3.3 Les tensions simples $v_1(t)$, $v_2(t)$ et $v_3(t)$

III.3. Tensions simples et tensions composées.

Les tensions simples sont celles prises entre ligne (phase) et neutre, par rapport à un point commun, et sont appelées V_1 , V_2 et V_3 . Souvent, les réseaux triphasés de transport de l'énergie électrique n'ont pas de neutre accessible, rendant impossible la mesure de la tension simple efficace. Une option est donc de mesurer les tensions entre les phases appelé tensions composées. Le figure 3.4 ci-dessous montre les notations des tensions simples et composées d'une lignes triphasée en présence du neutre.

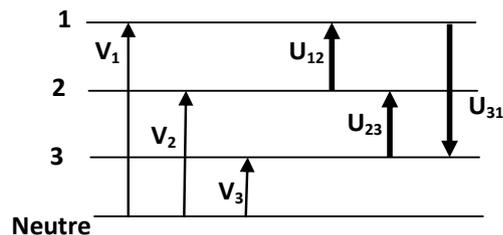


Fig.3.4. Tensions simples notées V et tensions composées notées U d'une ligne triphasées

Il est bien de noter que les tensions composées ont la même pulsation (fréquence) que les tensions simples.

$$\begin{aligned}
 u_{12} = v_1 - v_2 &\Rightarrow \vec{U}_{12} = \vec{V}_1 - \vec{V}_2 \\
 u_{23} = v_2 - v_3 &\Rightarrow \vec{U}_{23} = \vec{V}_2 - \vec{V}_3 \\
 u_{31} = v_3 - v_1 &\Rightarrow \vec{U}_{31} = \vec{V}_3 - \vec{V}_1
 \end{aligned}$$

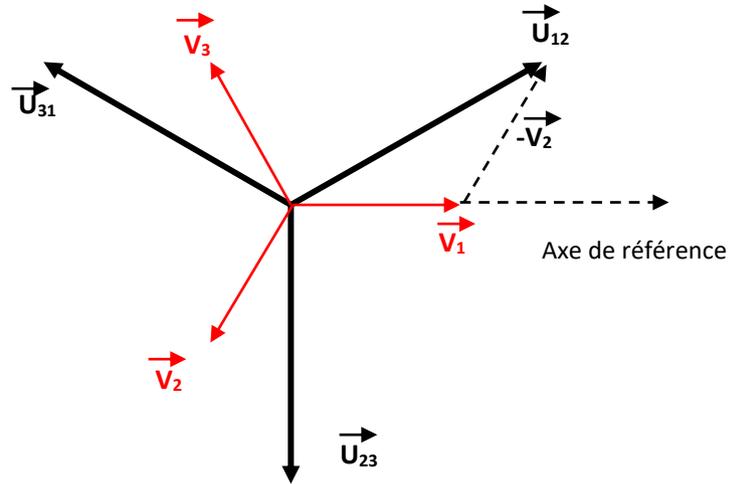


Fig.3.5. Diagramme de Fresnel montrant le tracé des tensions composées à partir des tensions simples

Le système des tensions composées est en avance de 30° sur le système des tensions simples.

$$\begin{aligned}
 u_{12}(t) &= U\sqrt{2} \sin(\omega t + \frac{\pi}{6}) \\
 u_{23}(t) &= U\sqrt{2} \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}) \\
 u_{31}(t) &= U\sqrt{2} \sin(\omega t - \frac{7\pi}{6})
 \end{aligned}$$

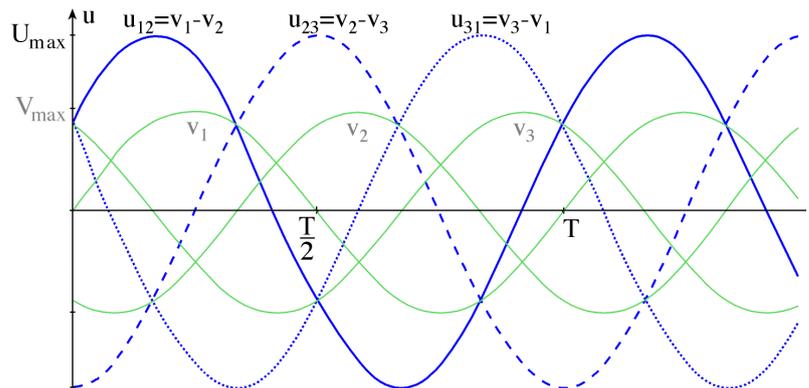


Fig. 3.6. Le système des tensions composées et des tensions simples instantanées

On en déduit que comme les tensions simples, les tensions composées ont un déphasage de 120° entre elles, ayant les mêmes valeurs efficaces : ainsi le système formé par les trois tensions composées est équilibré et direct. On peut vérifier bien sur le diagramme de Fresnel que :

$$\vec{U}_{12} + \vec{U}_{23} + \vec{U}_{31} = \vec{0}$$

Ou par calcul que $u_1(t) + u_2(t) + u_3(t) = 0$

III.4. Relation entre tensions simples et tensions composées.

On peut déduire géométriquement la relations entre les tensions composées et simples à partir du diagramme Fresnel (fig. 3.7)

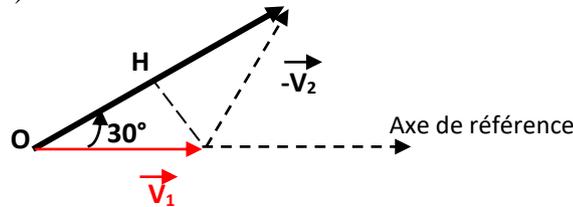


Fig.3.7. Diagramme de Fresnel de la tension composée U_{12} obtenu à partir des tensions simples V_1 et V_2

Le triangle formé par les vecteurs V_1 et V_2 et U_{12} est un triangle isocèle ($V_1 = V_2$), $U_{12} = 2 \cdot OH$
 $OH = V_1 \cos(30^\circ)$

$$U_{12} = 2 V_1 \frac{\sqrt{3}}{2}$$

On obtient donc : $U = \sqrt{3} V$

Cette relation est vraie quel que soit la charge.

Exemple : Pour un réseau triphasé 220/380 V. La tension simple efficace $V = 220$ Volts donc la tension composée efficace est : $U = 220 \sqrt{3} \cong 380$ Volts

III.5. Charge (récepteur) triphasée équilibrée

Un récepteur triphasé est composé de trois dipôles dont les impédances \bar{Z} peuvent être différentes, mais lorsqu'elles sont égales on dit que le récepteur (ou charge) est équilibré.

Selon la figure 3.8 :

- Les courants qui passent à travers les impédances Z de la charge triphasée sont appelés **courants de phase**.

On le note par **J**.

- Les **courants de ligne** sont ceux qui circulent à travers les lignes du système triphasé et sont représentés par la lettre **I**.

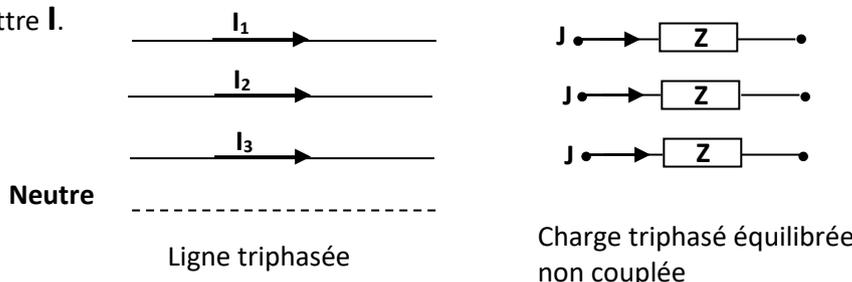


Fig.3.8. Courant en ligne et courant par phases

Le couplage de la charge triphasée indiquée dans la fig.3.9 consiste à connecter les trois impédances de la charge triphasée à une ligne d'une source triphasée : Il existe **deux manières de coupler** la charge triphasée à la ligne :

- 1-Le couplage **étoile**.
- 2-Le couplage **triangle**.

III.5.1. Le Couplage en étoile d'une charge triphasée équilibrée

La figure 3.9 montre le branchement (le couplage) étoile d'une charge triphasée équilibrée ($Z_1 = Z_2 = Z_3 = Z$) :

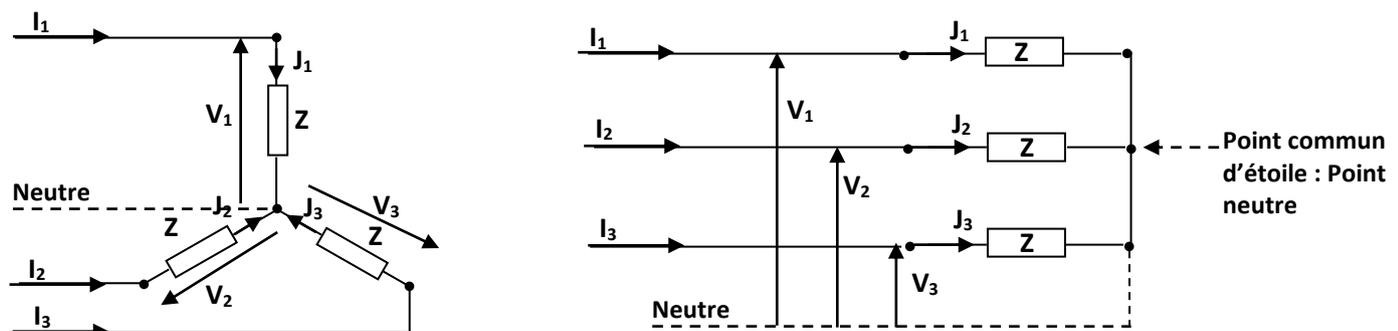


Fig.3.9. Couplage étoile du récepteur

Le premier schéma de la fig 3.9 illustre le terme « étoile ».

Remarque :

Dans la documentation technique ou sur les plaques signalétiques des machines le couplage étoile est schématisé à l'aide d'un **Y** ou d'un λ (lambda).

Exemple :

Une machine électrique porte la mention « Y 400 V » cela veut dire qu'elle doit être couplée en étoile sur une ligne de tension (de ligne) 400 V.

Les trois éléments (récepteurs) de la charge triphasée ont une borne commune appelée point d'étoile où **point neutre**.

Courants

Comme il s'agit d'une charge triphasée équilibrée (les mêmes impédances Z) et d'un réseau équilibré alors : $J_1 = J_2 = J_3 = J$ et $I_1 = I_2 = I_3 = I$

On appliquant la 1^{ère} loi de Kirchhoff (loi des nœuds) au point neutre : $I_1 + I_2 + I_3 = 0$ donc $I_N = 0$.

Les courants de ligne sont égaux aux courants par phase : $I_1 = J_1$; $I_2 = J_2$; $I_3 = J_3$

-Donc pour un couplage en étoile on a toujours : $I = J$

Tensions

- Chaque impédance est soumise à (sous) une tension simple V (prise entre point neutre et une phase) ainsi selon la loi d'ohm : $V = Z \cdot I$

Exemple

Une ligne triphasée 400V est une ligne dont la tension de ligne U vaut 400V (tension composée) lors d'un couplage en étoile d'une charge triphasée alimentée par cette ligne dans ce cas chaque impédance Z est soumise à une tension de 230V (tension simple).

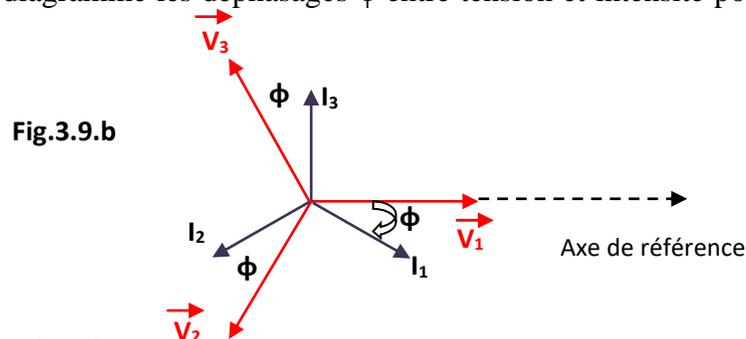
Déphasage

Pour une charge triphasée équilibrée couplée en étoile ($I = J$) : $I = \frac{V}{Z}$

Diagramme de Fresnel (représentation vectoriel) des tensions simples V et courants I

Considérant le cas d'une charge (R-L) triphasée équilibrée couple en étoile, la tension V_1 est prise comme référence, le courant est donc en retard par rapport à la tension V d'un angle ϕ .

Pour le tracé avec une échelle bien précise comme le montre la **figure 3.9.b** on va placer sur un diagramme de Fresnel les vecteurs associés aux tensions simples V_1, V_2, V_3 et aux intensités I_1, I_2, I_3 . Toute en figurant sur le diagramme les déphasages ϕ entre tension et intensité pour les éléments de la charge.



III.5.2. Le Couplage en triangle

Dans ce type de couplage, chacun des trois éléments (impédance Z) du récepteur triphasé est relié aux deux autres par ces deux bornes comme est illustré dans la **figure.3.10**

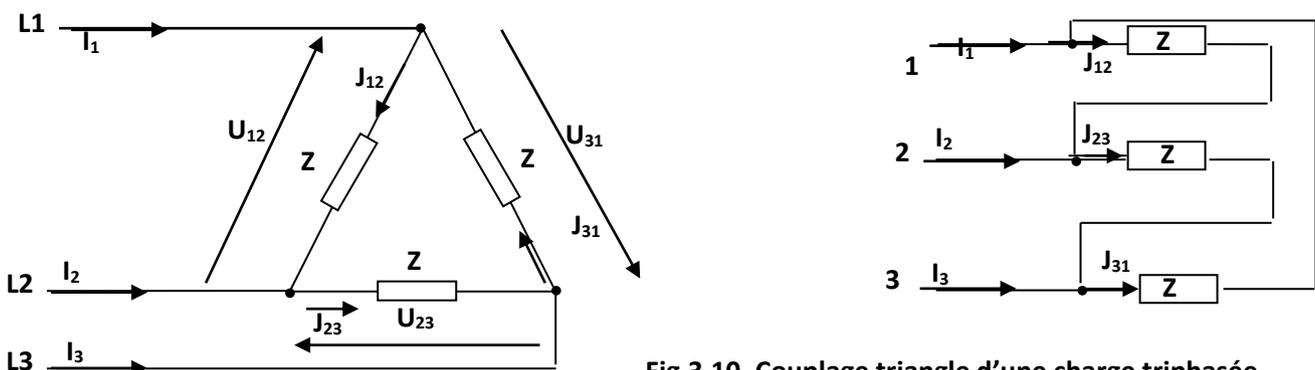


Fig.3.10. Couplage triangle d'une charge triphasée

Dans la figure.3.10 c'est le même branchement (connexion) est représenté de deux façons différentes dont la premier schéma le terme « triangle » est justifié.

Remarque :

Dans la documentation technique ou les plaques signalétiques des machines le couplage triangle est schématisé à l'aide d'un Δ (delta) ou un **D**.

Exemple :

Une machine électrique porte la mention « Δ 230 V » cela veut dire qu'elle doit être couplée en triangle sur une ligne de tension (de ligne) 230 V.

Pour un **couplage triangle** de la charge triphasée on constate **l'absence du Neutre**.

Comme il s'agit d'une charge triphasée équilibrée (même impédances) on a :

$$I_1 + I_2 + I_3 = 0 \quad \text{et} \quad J_{12} + J_{23} + J_{31} = 0$$

D'après le schéma de couplage triangle on a :

$$I_1 = J_{12} - J_{31}$$

$$I_2 = J_{23} - J_{12}$$

$$I_3 = J_{31} - J_{23}$$

Le système triphasé étant équilibré : $J_{12} = J_{23} = J_{31} = J$ et $I_1 = I_2 = I_3 = I$

Pour le couplage triangle, la relation entre I et J est la même que la relation entre V et U ainsi :

$$J = \frac{I}{\sqrt{3}}$$

Tensions

- **Chaque impédance** est soumise à (sous) **une tension composée U** ainsi selon la loi d'ohm :

$$U = Z \cdot J$$

Déphasage

Le déphasage φ est définit entre U et J

Remarque :

Le déphasage imposé par l'impédance Z de la charge triphasée équilibrée est identique pour les montages en toile et en triangle.

$$\varphi_{\Delta}(\vec{U}, \vec{J}) = \varphi_*(\vec{V}, \vec{I})$$

III.6. Les puissances en triphasé

III.6.1. La puissance active P

Couplage étoile

D'après le théorème de Boucherot dans le cas d'un couplage étoile, la puissance active consommée par la charge triphasée est la somme des puissances consommées par chacun des récepteurs :

$$P = 3 V I \cos \varphi$$

Où V est la valeur efficace des tensions simples, I celle du courant de ligne, φ le déphasage dans chacun des récepteurs, c'est-à-dire entre tension simple et courant de ligne. La grandeur **cos (φ)** représente le **facteur de puissance**.

En utilisant la relation : $U = \sqrt{3} V$

L'expression de la puissance P devient :

$$P = \sqrt{3} U I \cos \varphi$$

Couplage triangle

Dans le cas d'un couplage triangle, la puissance active consommée par la charge triphasée est la somme des puissances consommées par chacun des récepteurs. Donc :

$$P = 3 U J \cos \varphi$$

Φ étant le déphasage entre la tension composée U et le courant de phase J, en remplaçant J par $\frac{I}{\sqrt{3}}$ on obtient :

$$P = \sqrt{3} U I \cos \varphi$$

$P = \sqrt{3} * (\text{tension composée}) * \text{courant de ligne} * \text{facteur de puissance}$

Conclusion : Peu importe le couplage d'une charge triphasée que soit connecté en étoile ou en triangle, la puissance active qu'il utilise est déterminée par la relation suivante :

$$P = \sqrt{3} U I \cos \varphi$$

III.6.2. Puissance réactive Q

La puissance réactive absorbée par une charge triphasée s'exprime en montage étoile comme en montage triangle à travers la relation suivante :

$$Q = \sqrt{3} U I \sin \varphi$$

III.6.3. Puissance apparente S

La puissance apparente est définie par les relations suivantes :

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

et

$$S = \sqrt{3} U I$$

III.7. Pertes joules dans une charge triphasée équilibrée

Le cas de calcul des pertes joules dans les systèmes électriques triphasés est les machines triphasées. Où ces pertes peuvent être évaluées en connaissance de certaines grandeurs de ligne et à partir de certaine mesure de résistance.

III.7.1. Calcul des pertes joules en couplage étoile de la charge

On considère une charge triphasée équilibrée (exemple d'un enroulement triphasé d'une machine électrique) couplée en étoile de résistance r comme est illustrer dans la **figure.3.11** :

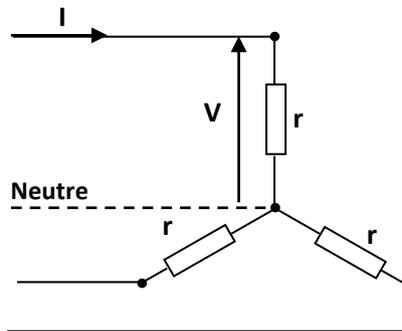


Fig.3.11. Calcul des pertes joules en couplage étoile

En utilisant le théorème de Boucherot relative aux puissances on peut écrire la relation suivante :

$$p_j = 3 r I^2 \quad (**)$$

Où r est la résistance d'une phase de la charge (d'un enroulement dans le cas de machine).

Essayons de mesurer la résistance entre deux bornes 1 et 2 de la charge 'figure à l'aide d'un ohmmètre :

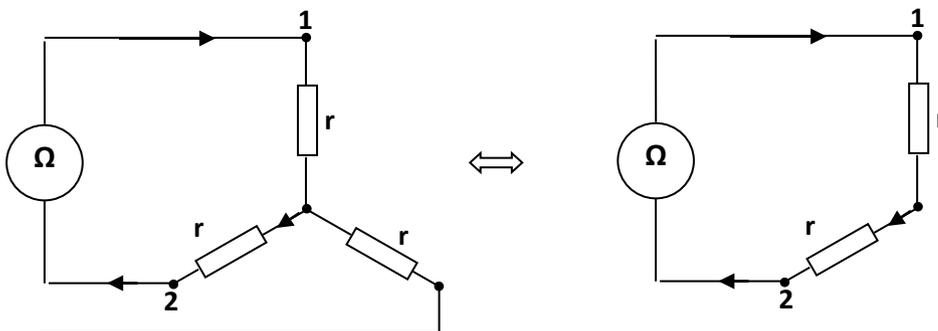


Fig.3.12. Mesure la résistance entre deux bornes 1 et 2 de la charge triphasée

La résistance R mesurée entre deux bornes 1 et 2 n'est autre que deux résistances r en série, donc

$$R = 2 r$$

D'où la relation (**) devient :

$$p_j = \frac{3}{2} R I^2$$

A rappeler que R est la résistance mesurer entre bornes

III.7.2. Calcul des pertes joules en couplage triangle de la charge

Considérons le cas d'une charge triphasée couplée en triangle **figure.3.13**, les pertes joules s'écrivent :

$$p_j = 3 r J^2$$

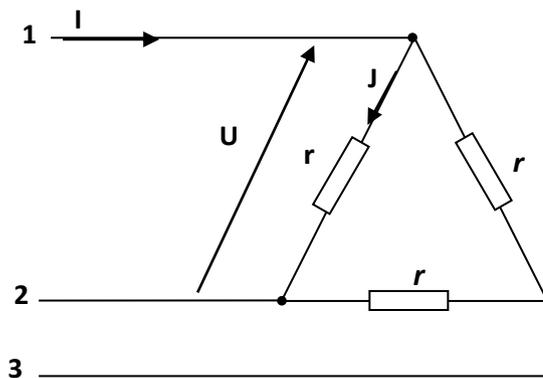


Fig.3.13. Calcul des pertes joules en couplage triangle

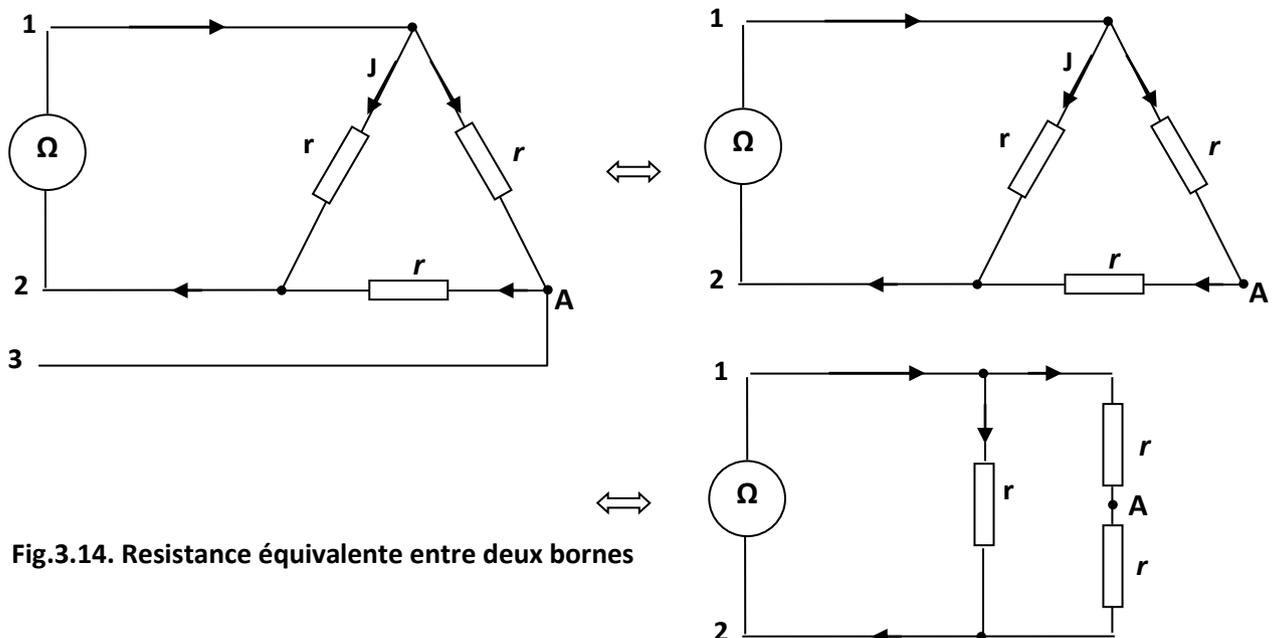


Fig.3.14. Resistance équivalente entre deux bornes

La résistance R mesurée entre bornes 1 et 2 n'est autre qu'une résistance r en parallèle avec deux résistances r montées en série : $R = r // 2r$ de sorte que :

$$R = \frac{r \cdot 2r}{r + 2r} = \frac{2}{3} r$$

On déduit : $r = \frac{3}{2} R$

On sait que le courant de ligne I et de phase dans le cas couplage triangle sont liés par la relation :

$$J = \frac{I}{\sqrt{3}} \text{ donc :}$$

$$p_j = 3 \frac{3}{2} R \frac{I^2}{3} = \frac{3}{2} R I^2$$

En conclusion les pertes joules dans une charge triphasée équilibrée qu'elle soit couplée en triangle ou en étoile et en connaissance de la résistance mesurée entre les bornes de cette charge R et le courant de ligne I , ces pertes se calculent selon la relation suivante :

$$p_j = \frac{3}{2} R I^2$$

III.8. Mesure de puissance en triphasé : (Elle sera étudiée aussi dans les séances travaux pratiques)

La puissance active P est mesurée à l'aide du wattmètre que ce soit en monophasé ou en triphasé.

III.8.1. Méthode des trois wattmètres (montages 4 fils) :

Dans cette méthode trois wattmètres sont branchés comme il est indiqué dans la figure suivante :

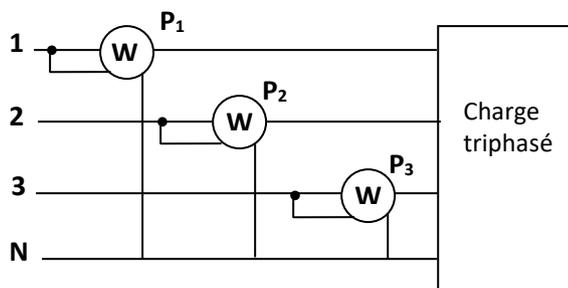


Fig.3.15. Mesure de puissance avec trois wattmètres

Chaque wattmètre mesure la puissance active consommée sur chaque phase.

La puissance active totale P de la charge triphasée est la somme des trois valeurs lues :

$$P = P_1 + P_2 + P_3$$

Remarques

1-Si le charge est équilibrée, un seul wattmètre est nécessaire car $P_1 = P_2 = P_3$, donc :

$$P = 3 P_1.$$

2-La méthode des trois wattmètres nécessite la distribution et l'accessibilité au fil du neutre. Si ce n'est pas le cas, on peut toujours réaliser un neutre artificiel à l'aide de trois impédances identiques.

III.8.2. Méthode de deux wattmètres**III.8.2.1. Puissance active**

La méthode des deux wattmètres consiste à réaliser le branchement des wattmètres comme il est indiqué dans la figure ci-dessous :

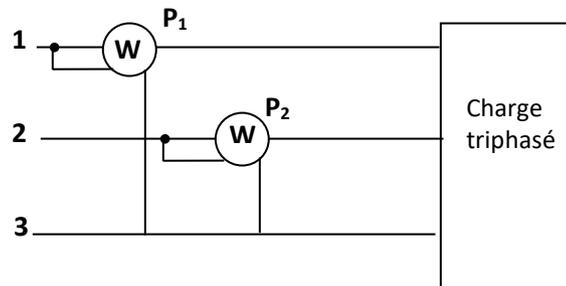


Fig.3.16. Principe de branchement de la méthode deux wattmètres

Pour connaître la puissance active P , il suffit d'additionner les grandeurs lues sur les deux wattmètres :

$$P = P_1 + P_2$$

Remarque :

-Dans certains cas la lecture de P_1 ou de P_2 peut être négative

III.8.2.2. Puissance réactive

Dans le cas d'une charge triphasée équilibrée, la puissance réactive Q , peut être mesurée par la méthode des deux wattmètres par le biais de la relation suivante :

$$Q = \sqrt{3} (P_1 - P_2)$$

Q peut être positif (si la charge est inductive) peut être négative si la charge est capacitive.