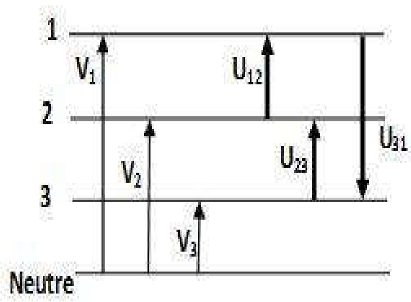
CHAPITRE 3



Année universitaire
2023/2024

Circuits et puissances électriques

(Systèmes triphasés)

Electrotechnique Fondamentale 1

2eme année License tronc commun ST

Filières Génie électrique

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**

Prof. Megherbi Ahmed chaouki
Chargé de Cours

Département de Génie électrique

Université Mohammed Khider Biskra

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, elle 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 :

Pertes en ligne triphasée (transport de l'énergie électrique) beaucoup plus faibles que le courant monophasé : pour bien illustrer selon la figure 1 on peut considérer l'exemple de transport d'une puissance P à une distance L (exemple du centrale au consommateur) par une ligne triphasé et une autre monophasé sous la même tension U. La résistance d'une ligne de longueur L et de section S est donnée par $R = \rho \frac{L}{S}$, ρ étant la resistivité du matériau conducteur exprimée en [Ωm].

a. Ligne Monophasé **b. Ligne Triphasée**

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

Calcul des pertes joules

$$p_{j\,monophasé} = 2\,R\,I^2$$

La puissance consommée par la charge monophasée est $P = UI\cos\varphi \rightarrow I = \frac{P}{U\cos\varphi}$

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

$$p_{j\,triphasée} = 3\,R\,I^2$$

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

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

Par comparaison des pertes joules d'une ligne monophasée et triphasée on constate que la ligne triphasée subit 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 intéressent de l'utilisation du systèmes triphasée est la possibilité de produire aisément des champs tournants (moteurs ...), ainsi les machines triphasées ont des puissances de plus de 50% supérieures aux machines monophasées de même masse et donc leurs prix sont moins élevés (le prix est directement proportionnel à la masse de la machine).

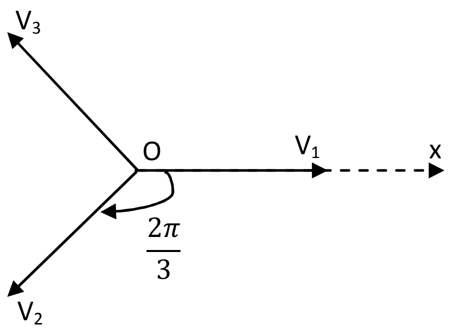
III.2. Systèmes triphasés équilibrés

III.2.1. Définition

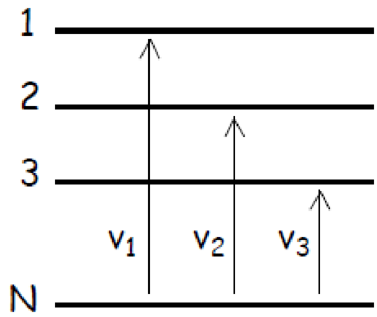
Trois grandeurs sinusoïdales forment un système équilibré si elles ont même valeur efficace et si elles sont régulièrement déphasées entre elles (cette définition implique qu'elles aient la même pulsation).

Le système formé par ces trois grandeurs est dit si, en les ayant repérées par les indices 1, 2 et 3, la deuxième est déphasée en retard de $2\pi / 3$ et la troisième de $4\pi / 3$.

La distribution d'énergie par le réseau électrique se fait sur trois phases et un neutre, idéalement les tensions simples des trois phases forment un système équilibré direct, elles sont données par rapport au neutre. Les figures suivantes représentent ligne de distributions triphasée et la représentation de Fresnel associée aux trois tensions simples entre phase et neutre.



a. Diagramme de Fresnel des tensions simples triphasée



b. Lignes triphasée 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 :

$$\overrightarrow{V_1} + \overrightarrow{V_2} + \overrightarrow{V_3} = \vec{0}$$

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 :

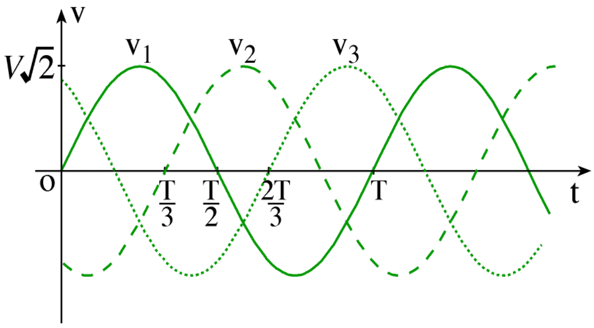


Fig. 3.3 les tensions simples v_1(t), v_2(t)et v_3(t)

III.3. Tensions simples et tensions composées.

Les tensions V_1, V_2 et V_3 prisent entre phase et neutre, c'est à dire par rapport à un point commun, sont appelées tensions simples. La plupart du temps les réseaux triphasés sont sans neutre (ou bien leur neutre n'est pas accessible) ; la mesure de la tension efficace est impossible à effectuer.

Une solution consiste alors à choisir une mesure des tensions entre les phases, on parle alors de tensions composées. Le schéma suivant précise la notation utilisée dans le cadre de ce cours :

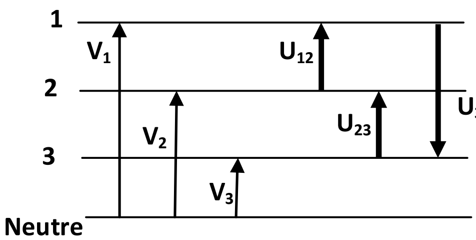


Fig.3.4. Tensions simples notées V et tensions composées notées U d'une ligne triphasées

Les tensions composées ont même fréquence que les tensions simples

$$u_{12} = v_1 - v_2 \quad \Rightarrow \quad \vec{U}_{12} = \vec{V}_1 - \vec{V}_2$$

$$u_{23} = v_2 - v_3 \quad \Rightarrow \quad \vec{U}_{23} = \vec{V}_2 - \vec{V}_3$$

$$u_{31} = v_3 - v_1 \quad \Rightarrow \quad \vec{U}_{31} = \vec{V}_3 - \vec{V}_1$$

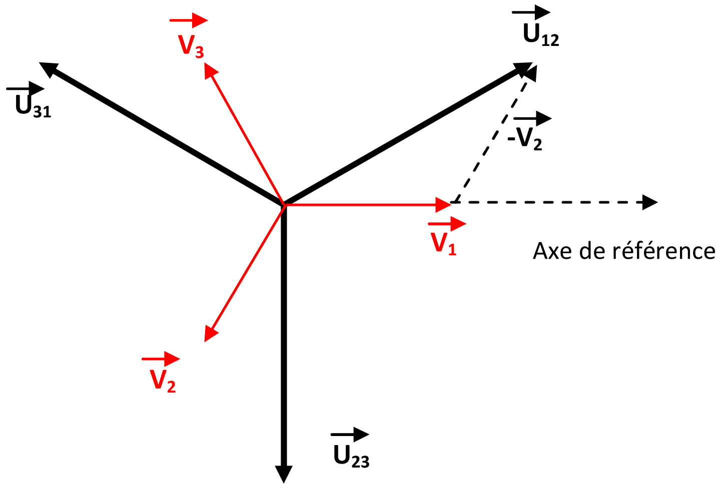


Fig.3.5. Diagramme de Fresnel montrant le tracé des tensions composées à partir des tensions simples

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

$$u_{12}(t) = U\sqrt{2}\sin(\omega t + \frac{\pi}{6})$$

$$u_{23}(t) = U\sqrt{2}\sin(\omega t - \frac{\pi}{2})$$

$$u_{31}(t) = U\sqrt{2}\sin(\omega t - \frac{7\pi}{6})$$

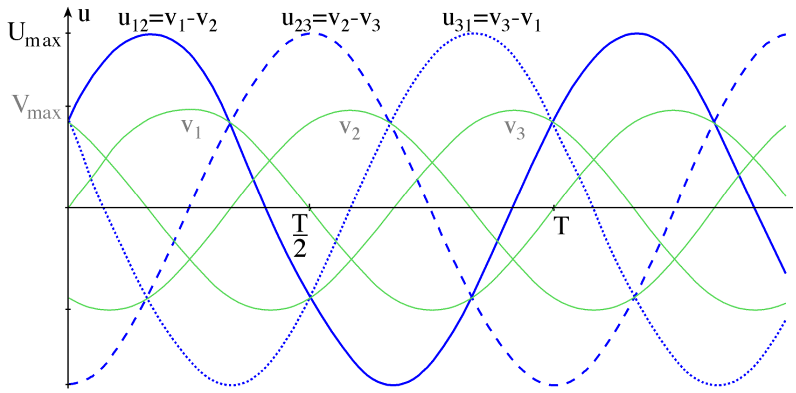


Fig. 3.6.Le système des tensions composées et des tensions simples instantanées

On en déduit que les tensions composées sont déphasées entre elles de 120° comme les tensions simples

le système formé par les trois tensions composées choisies est équilibré et direct. On peut vérifier bien sur le diagramme de Fresnel

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

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 sont liées par la relation suivante :

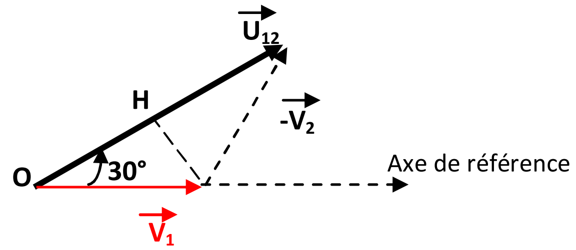


Fig.3.7. Diagramme de Fresnel de la tension composée U_{12} obtenu à partir des tensions simples V_1 et V_2

Le triangle formé par les vecteurs V_1 et V_2 et U_{12} est un triangle isocèle ($V_1 = V_2$), $U_{12} = 2*$ OH

OH = V_1 cos (30°)

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

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

Cette relation est vrai quelque soit la charge.

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

III.5. Charge (récepteur) triphasée équilibrée$\boldsymbol{\overline{V_2} = V\underline{|-120°}}$

$$\boldsymbol{I = \frac{V}{Z} = \frac{132.79}{20} = 6.64A \quad \overline{I_1}\ ?\ \overline{I_2}\ ?\ \overline{I_3}\ ? \qquad \overline{V_1} = V\underline{|0°}}$$

Définitions $\boldsymbol{\overline{V_3} = V\underline{|-240°}}$

$$\boldsymbol{I_1 = \frac{V_1}{Z} = \frac{132.79\underline{|0°}}{20\underline{|36.87°}} = 6.64\underline{|-36.87°}A}$$

$$\boldsymbol{I_1 = \frac{V_1}{Z} = \frac{132.79\underline{|0°}}{20\underline{|36.87°}} = 6.64\underline{|-36.87°}A}$$

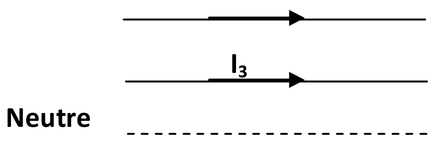
Un récepteur triphasé est composé de trois dipôles dont les impédances $\bar{Z}$ peuvent être différentes, mais lorsqu'elles sont égales on dit que le récepteur est équilibré.

Selon la figure ci-dessous :

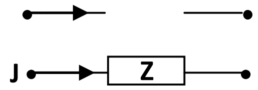
-Les courants par phase sont les courants qui traversent les éléments (impédances) $\bar{Z}$ du récepteur triphasé. On le note par **J.**

- Les courants en ligne sont les courants qui passent dans le fils du réseau triphasé on les symbolise par **I.**

Fig.3.8. Courant en ligne et courant par phases



Ligne triphasée



Charge triphasé équilibrée non couplée

Le couplage de la charge triphasé indiquée dans la fig consiste à connecter les trois phases du récepteur à une ligne triphasée : Il existe deux manières de coupler le récepteur à la ligne :

1-Le couplage triangle.

2-Le couplage triangle.

III.5.1. Le Couplage en étoile

Schéma

La figure suivante montre même branchement (le couplage) étoile d'une charge triphasée équilibrée ($Z_1 = Z_2 = Z_3 = Z$) de deux façon différentes :

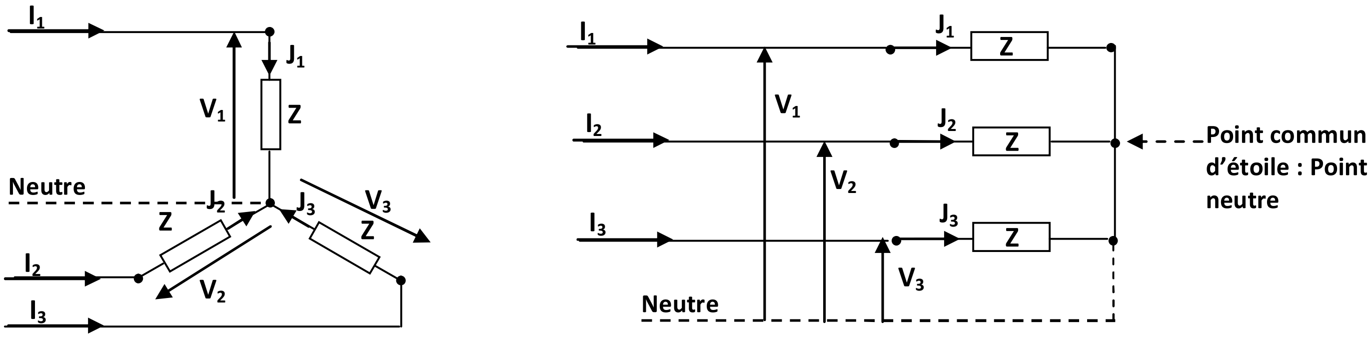


Fig.3.9. Couplage étoile du recepteur

Le premier schéma 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 1ère 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 : $\boldsymbol{I = J}$

Tensions

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

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

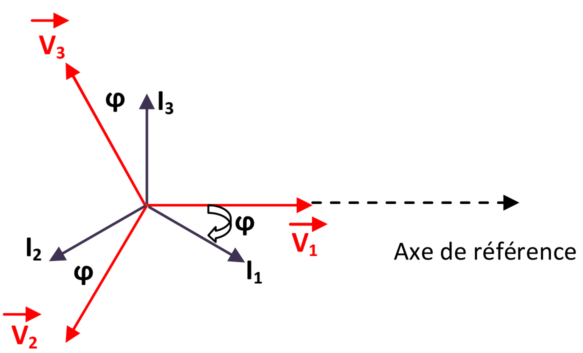
Pour une charge triphasée équilibrée couplée en étoile (I = J), φ est le déphasage entre le courant de ligne I et la tension simple V : φ (V, I)

$$\boldsymbol{I = \frac{V}{Z}}$$

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

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

Pour le tracé comme le montre la **figure** on va placer sur un diagramme de Fresnel les vecteurs associés aux tensions simples et aux intensités. 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 illustrer dans la **figure**

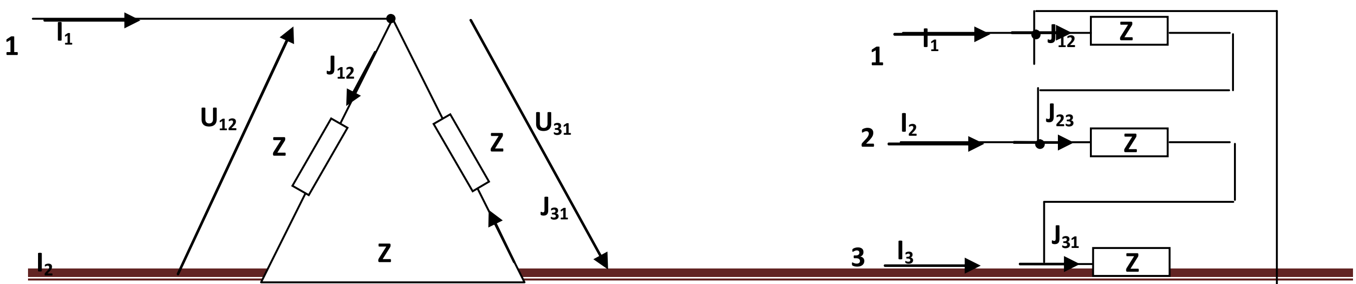


Fig.3.10. Couplage triangle du recepteur triphasé

Dans la figure même branchement 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.

.

Le couplage triangle ne fait pas apparaître l'existence d'un Neutre.

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

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

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 :

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

Tensions

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

$$\boldsymbol{U = Z.J}$$

Déphasage

Le déphasage φ est définit entre U et J

Remarque :

Le déphasage pour les deux montages toile et triangle sont les mêmes. Il s'agit du déphasage provoqué par le dipôle Z du montage

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

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 le récepteur 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 le récepteur 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 :

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

Conclusion : Que le récepteur triphasé soit couplé en étoile ou en triangle, la puissance active qu'il consomme est donnée 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 joule 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 certain 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 triphasée d'une machine électrique) couplée en étoile de résistance r comme est illustrer dans la **figure** suivante :

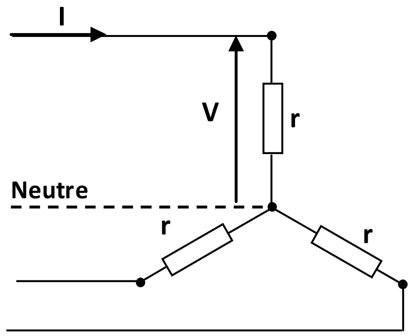


Fig3.11. Calcul des pertes joules en couplage étoile

En utilisant le théorème de Boucherot relative au puissance on peut écrire la relation suivante :

$$p_j = 3\, r\, I^2$$

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 :

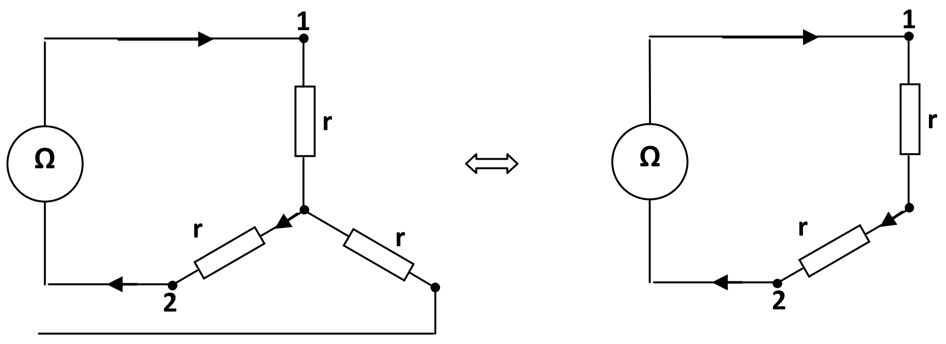


Fig.3.12. Mesure la résistance entre deux bornes 1 et 2 de la charge triphasée

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 *R* est la résistance 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**, les pertes joules s'écrivent :

$$p_j = 3\ r\ J^2$$

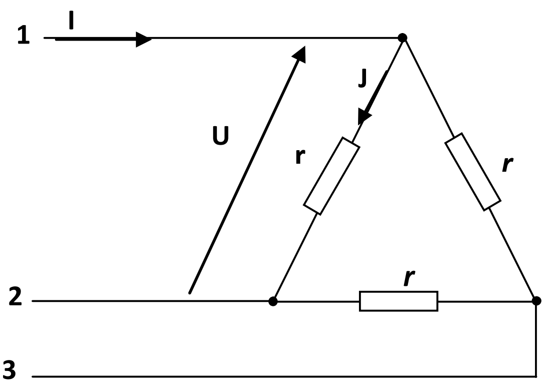


Fig.3.13. Calcul des pertes joules en couplage triangle

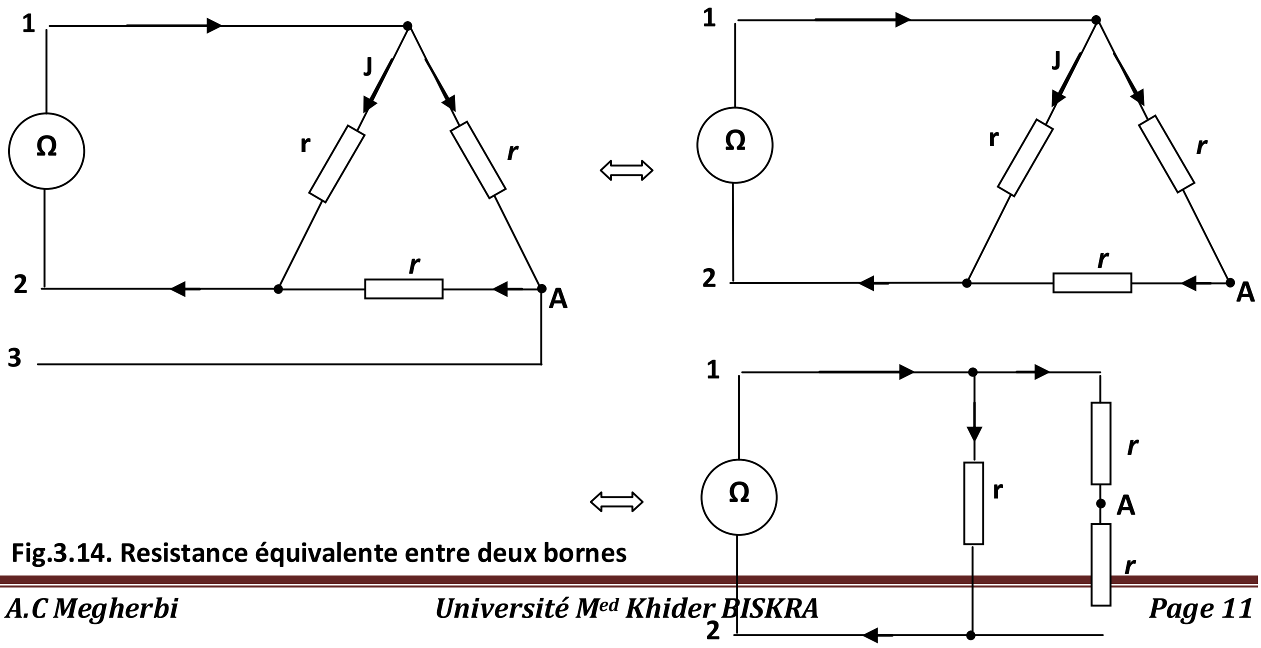


Fig.3.14. Resistance équivalente entre deux bornes

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 : $R = r \,//\, 2\, r$ de sorte que :

$$R = \frac{r.2r}{r+2r} = \frac{2}{3}\, r$$

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

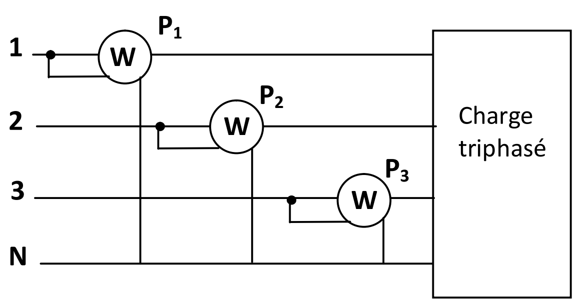


Fig.3.15. Mesure de puissance avec trois wattmètres

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 :

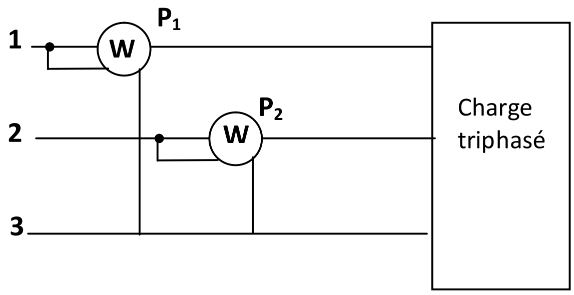


Fig.3.16. Principe de branchement de la méthode deux wattmètres

Pour connaitre 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 inductif) peut être négative si la charge est capacitive.