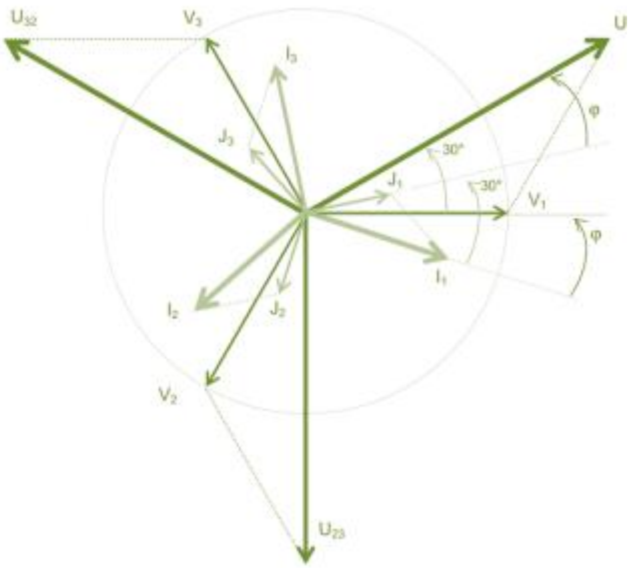
Cours

Systèmes alternatifs triphasés

Distribution triphasée,
Couplage étoile et triangle,
Diagramme de Fresnel,
Puissances actives, réactives et apparentes,
Triphasé déséquilibré.



BERTHILLON

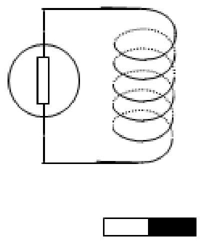
Philippe

1. Présentation

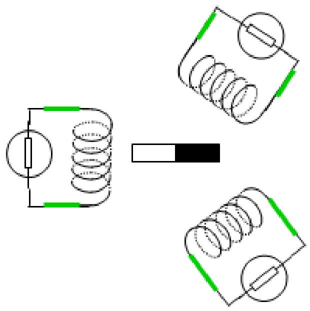
1.1 Pourquoi de l'alternatif, pourquoi du triphasé ?

Il est facile d'obtenir une tension alternative. En effet, il suffit de faire tourner un aimant au voisinage d'une bobine ! On obtient aux bornes de la bobine une tension sinusoïdale.

(Voir animation n°1)

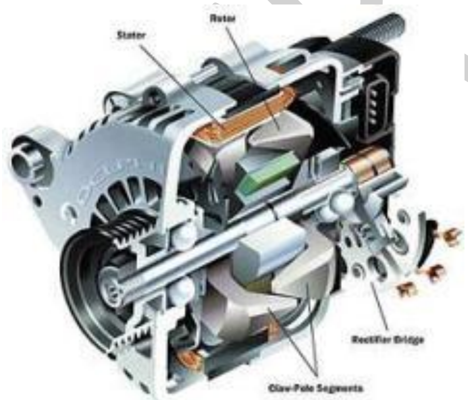


Si, au lieu d'une seule bobine, on place trois bobines décalées de 120° chacune (360° divisé par 3), on obtient alors un système de trois tensions sinusoïdales de même fréquence décalées d'un tiers de période : on a alors un réseau de tensions triphasé. C'est le principe de l'alternateur. Dans la pratique, le rotor de celui ci peut être entrainé par un moteur de voiture, une centrale hydraulique, une centrale thermique ...

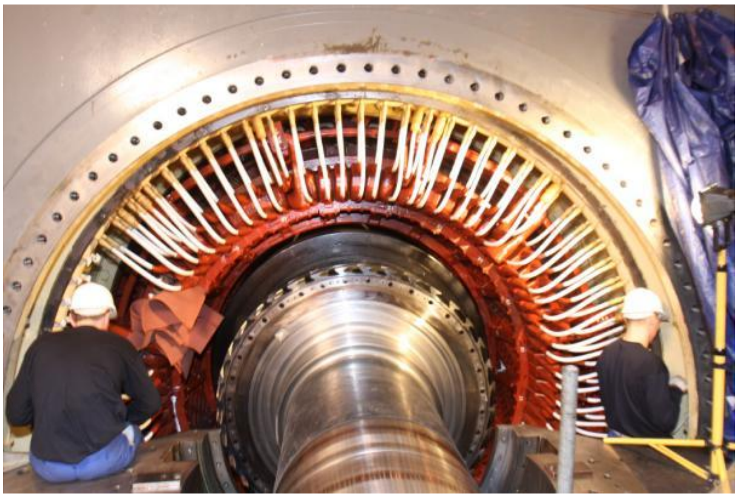


1.2 Avantages du triphasé par rapport au monophasé

- 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).
- Lors du transport de l'énergie électrique, les pertes sont moindres en triphasé par rapport au monophasé.



Alternateur de voiture



EDF : Vue d'un alternateur lors d'une opération de maintenance

2. La distribution de l'énergie électrique

2.1 Circuit de distribution simplifié

La centrale de production génère un réseau triphasé 20000V. Un poste élévateur augmente les tensions jusqu'à 400 000V pour alimenter les réseaux de transport. Ces réseaux alimentent des réseaux de distribution 225 000V, 63 000V, 20 000V via des postes de transformation. Les postes de transformation abaissent les tensions pour alimenter les usagers en 230V/400V.

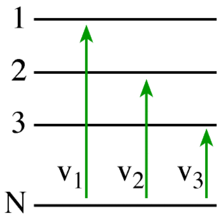
2.2 Chez l'usager

La distribution se fait à partir de quatre bornes :

- Trois bornes de **phase** repérées par 1, 2, 3 ou A, B, C ou R, S, T ;
- Une borne **neutre** N. (parfois le neutre n'est pas présent)

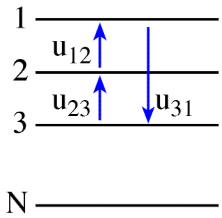
v_1, v_2, v_3 :

tensions simples ou étoilées entre les phases et le neutre.



u_{12}, u_{23}, u_{31} :

tensions composées entre les phases.



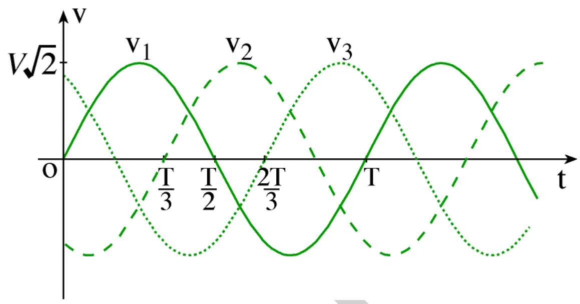
3. Etude des tensions simples

3.1 Observation à l'oscilloscope

• Les tensions sont déphasées de $\frac{2\pi}{3}$ l'une par rapport à l'autre ;

• Elles ont la même valeur efficace.

On dit que le système est équilibré.



Définition :
Un système triphasé est équilibrée lorsque les trois tensions possèdent la même valeur efficace et qu'elles sont déphasées de $2\pi/3$ l'une par rapport à l'autre.

3.2 Equations horaires

On peut modéliser mathématiquement la tension électrique d'un système triphasé par une fonction mathématique sinusoïdale. On a ainsi :

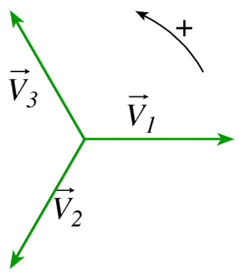
$$v_1(t) = V\sqrt{2}\sin(\omega t) = V_{MAX}\sin(\omega t)$$
$$v_2(t) = V\sqrt{2}\sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) = V_{MAX}\sin(\omega t - \frac{2\pi}{3})$$
$$v_3(t) = V\sqrt{2}\sin(\omega t - \frac{4\pi}{3}) = V_{MAX}\sin(\omega t - \frac{4\pi}{3})$$

où V est la valeur efficace (en V), ω est la pulsation en (rad/s).

3.3 Vecteurs de Fresnel associés

On déduit des équations horaires les vecteurs suivants :

$$\vec{V}_1\begin{pmatrix}V\\0\end{pmatrix};\ \vec{V}_2\begin{pmatrix}V\\\frac{-2\pi}{3}\end{pmatrix};\ \vec{V}_3\begin{pmatrix}V\\\frac{-4\pi}{3}\end{pmatrix}$$



Le système est appelé système <u>**équilibré direct**</u> **:**

- ***Equilibré*** car la construction de Fresnel montre que $\vec{V_1} + \vec{V_2} + \vec{V_3} = \vec{0} \Rightarrow v_1 + v_2 + v_3 = 0$ car les valeurs efficaces des 3 tensions sont identiques.

- ***Direct*** car un observateur immobile verrait les vecteurs défiler devant lui dans l'ordre 1,2, 3.

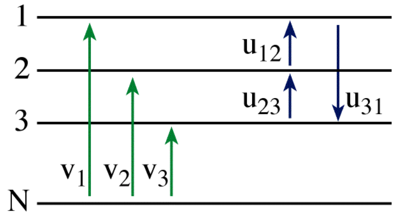
(Voir animation n°2)

4. Etude des tensions composées

4.1 Définition

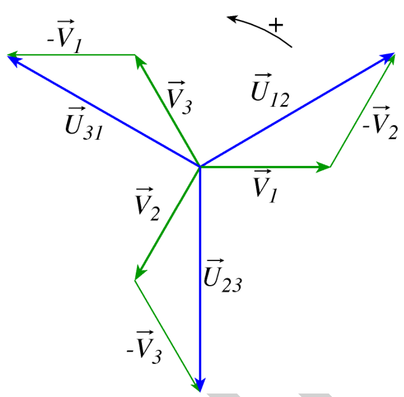
Les tensions composées ont même fréquence que les tensions simples

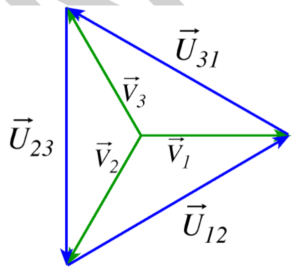
$$u_{12} = v_1 - v_2 \quad \Rightarrow \quad \vec{U}_{12} = \vec{V}_1 - \vec{V}_2$$
$$u_{23} = v_2 - v_3 \quad \Rightarrow \quad \vec{U}_{23} = \vec{V}_2 - \vec{V}_3$$
$$u_{31} = v_3 - v_1 \quad \Rightarrow \quad \vec{U}_{31} = \vec{V}_3 - \vec{V}_1$$



4.2 Vecteurs de Fresnel associés

$$\vec{U}_1 \begin{pmatrix} U \\ \frac{\pi}{6} \end{pmatrix} \qquad \vec{U}_2 \begin{pmatrix} U \\ \frac{-3\pi}{6} \end{pmatrix} \qquad \vec{U}_3 \begin{pmatrix} U \\ \frac{-7\pi}{6} \end{pmatrix}$$



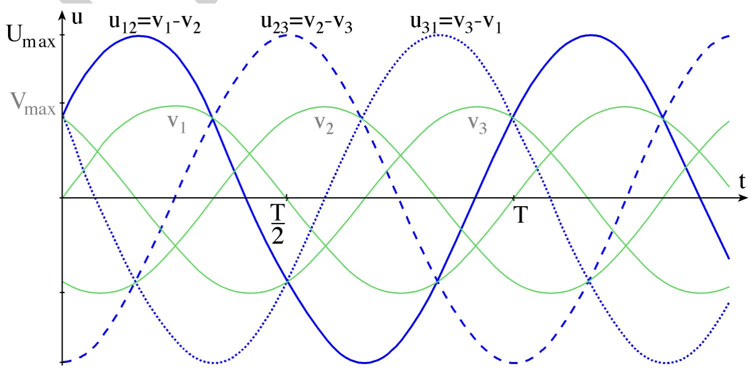


Si le réseau est équilibré : $\vec{U}_{12} + \vec{U}_{23} + \vec{U}_{31} = \vec{0} \Leftrightarrow u_{12} + u_{23} + u_{31} = 0$

Le système des trois tensions composés est équilibré direct.

4.3 Equations horaires et oscillogrammes

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



4.4 Remarque

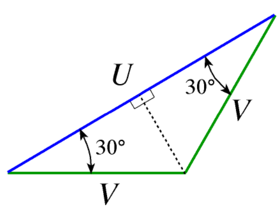
le réseau triphasé disponible en France est un réseau : 230/400 V

4.5 Relation entre U et V

D'après le schéma ci contre on peut écrire :

$U = 2V\cos(30)$ soit $U = 2V\frac{\sqrt{3}}{2}$

Finalement : $\boxed{U = V\sqrt{3}}$



Cette relation est toujours vraie quelque soit la charge.

5. Récepteurs triphasés équilibrés

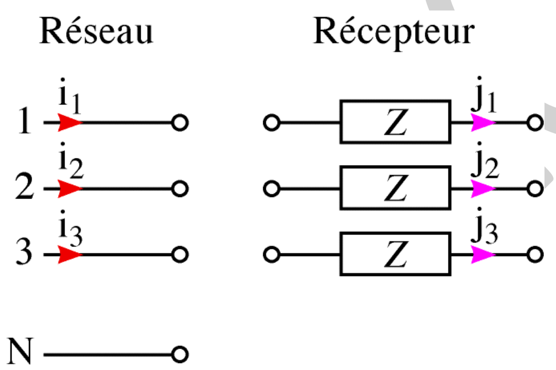
5.1 Définitions

Récepteurs triphasés : ce sont des récepteurs constitués de trois dipôles identiques, d'impédance $\underline{Z}$.

Equilibré : car les trois éléments sont identiques.

Courants par phase : ce sont les courants qui traversent les éléments $\underline{Z}$ du récepteur triphasés. **Symbole** : J

Courants en ligne : ce sont les courants qui passent dans les fils du réseau triphasé. **Symbole** : I



Le réseau et le récepteur peuvent se relier de deux façons différentes : en étoile ou en triangle.

5.2 Théorème de Boucherot

Les puissances active et réactive absorbées par un groupement de dipôles sont respectivement égales à la somme des puissances actives et réactives absorbées par chaque élément du groupement.

Donc d'après ce théorème : $P = P_1+P_2+P_3$ et $Q = Q_1+Q_2+Q_3$

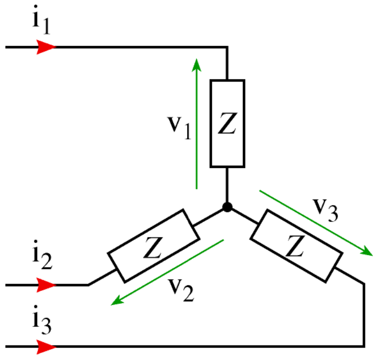
Pour un récepteur équilibré : $P_1=P_2=P_3$ et $Q_1=Q_2=Q_3$

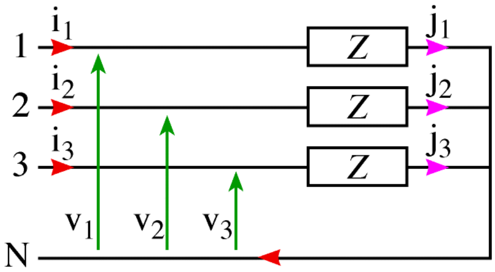
Finalement : $P=3.P_1$ et $Q=3.Q_1$

Facteur de puissance : $k = P / S$.

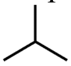
6. Couplage étoile

6.1 Montage étoile



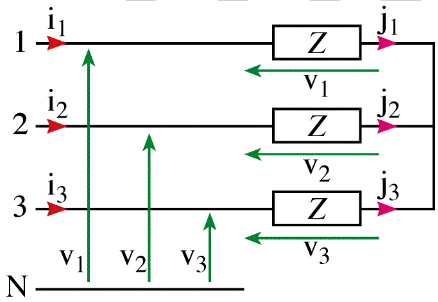


Ci-dessus sont représentés deux schémas du même branchement représenté de deux façons différentes. Le premier schéma justifie le terme « étoile ».

Symbole : 

Comme il s'agit des mêmes impédances, de ce fait : $i_1 + i_2 + i_3 = 0$, donc $i_n = 0$. Le courant dans le fil neutre est nul. Le fil neutre n'est donc pas nécessaire.

Pour un <u>système triphasé équilibré</u>, le fil neutre est facultatif.



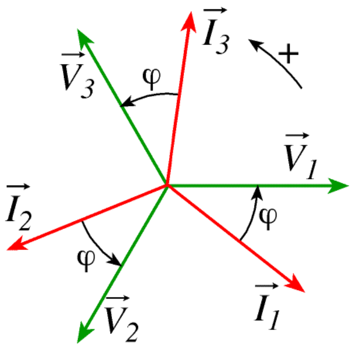
6.2 Relations entre les courants en étoile

On constate sur les schémas du paragraphe 6.1 que les courants en ligne sont égaux aux courants par phase.

$i_1 = j_1$; $i_2 = j_2$; $i_3 = j_3$

De plus la charge et le réseau sont équilibrés, donc : $I_1 = I_2 = I_3 = I = J$

On retiendra pour le couplage étoile : $\boxed{I = J}$



6.3 Puissances en étoile

Pour une phase du récepteur : $P_1 = VI\cos\varphi$ avec $\boxed{\varphi\ (I,\ V)}$

Pour le récepteur complet : $P = 3.P_1 = 3VI\cos\varphi$ de plus $V = \dfrac{U}{\sqrt{3}}$

Finalement pour le couplage étoile : $\boxed{P = \sqrt{3}UI\cos(\varphi)}$

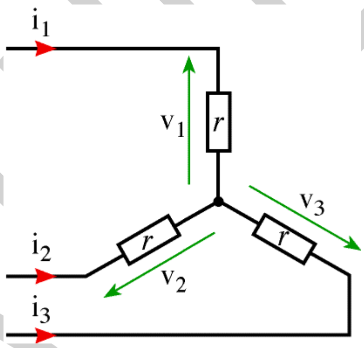
De la même façon : $\boxed{Q = \sqrt{3}UI\sin(\varphi)}$

Et : $\boxed{S = \sqrt{3}UI}$ on remarque que S=$\sqrt{P^2 + Q^2}$

Facteur de puissance : $\boxed{k = \cos(\varphi)}$

6.4 Pertes par effet Joule en étoile

Considérons que la partie résistive du récepteur.



Pour une phase du récepteur : $P_{J1} = rI^2$

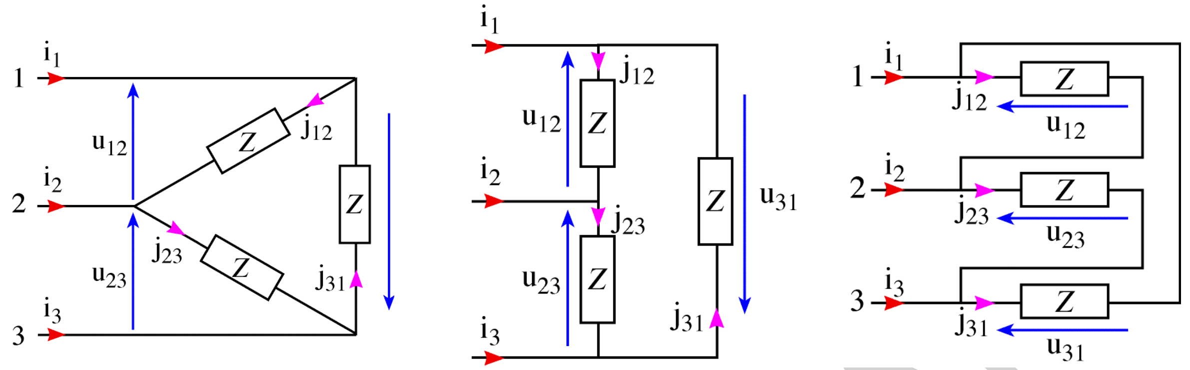
Résistance vue entre deux bornes : $R = 2r$

Pour le récepteur complet : $P = 3.P_{J1} = 3rI^2 = \dfrac{3}{2}RI^2$

Finalement pour le couplage étoile : $\boxed{P = \dfrac{3}{2}RI^2}$

7. Couplage triangle

7.1 Montage triangle



Ci-dessus sont représentés trois schémas du même branchement représenté de trois façons différentes.
Le premier schéma explique le terme « triangle ».

Symbole : $\triangle$

Comme il s'agit des mêmes impédances, $i_1 + i_2 + i_3 = 0$ et $j_{12} + j_{23} + j_{31} = 0$

On remarque que le fil neutre est absent.

7.2 Relations entre les courants en triangle

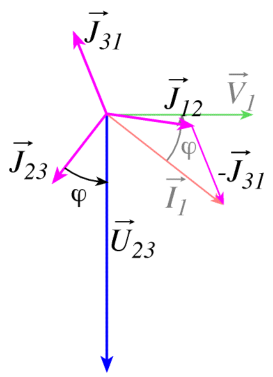
D'après les schémas précédents :

$$
\begin{aligned}
i_1 &= j_{12} - j_{31} \quad \Rightarrow \quad \vec{I_1} = \vec{J_{12}} - \vec{J_{31}} \\
i_2 &= j_{23} - j_{12} \quad \Rightarrow \quad \vec{I_2} = \vec{J_{23}} - \vec{J_{12}} \\
i_3 &= j_{31} - j_{23} \quad \Rightarrow \quad \vec{I_3} = \vec{J_{31}} - \vec{J_{23}}
\end{aligned}
$$

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

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

Pour le couplage triangle : $\boxed{J = \dfrac{I}{\sqrt{3}}}$



Remarque :
Les déphasages pour les deux montages étoile et triangle sont les mêmes. Il s'agit du déphasage provoqué par le dipôle <u>Z</u> du montage.

$$\varphi_{\triangle}(\vec{J}, \vec{U}) = \varphi_{\curlywedge}(\vec{I}, \vec{V})$$

7.3 Puissances en triangle

Pour une phase du récepteur : $P_1 = UJ\cos\varphi$ avec $\boxed{\varphi\ (J,\ U)}$

Pour le récepteur complet : $P = 3.P_1 = 3UJ\cos\varphi$ de plus $J = \dfrac{I}{\sqrt{3}}$

Finalement pour le couplage triangle : $\boxed{P = \sqrt{3}UI\cos\varphi}$

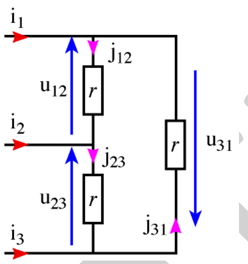
De la même façon : $\boxed{Q = \sqrt{3}UI\sin(\varphi)}$

et : $\boxed{S = \sqrt{3}UI}$ on remarque que $S=\sqrt{P^2 + Q^2}$

Facteur de puissance : $\boxed{k = \cos(\varphi)}$

7.4 Pertes par effet Joule en triangle

Considérons que la partie résistive du récepteur.



Détail du calcul de la résistance équivalente vue entre deux bornes du récepteur :

nous avons 2r en parallèle avec r ;

résistance mesurée entre 2 phases

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

Pour une phase du récepteur (pour un enroulement) : $P_{J1} = rJ^2$

Résistance vue entre deux bornes : $R = \dfrac{2}{3}r$

Pour le récepteur complet : $P = 3.P_{J1} = 3rJ^2 = 3\dfrac{3}{2}R(\dfrac{I}{\sqrt{3}})^2 = \dfrac{3}{2}RI^2$

Finalement pour le couplage triangle : $\boxed{P = \dfrac{3}{2}RI^2}$ avec R =résistance mesurée entre 2 phases

7.5 Remarques

Quel que soit le couplage, les puissances s'expriment de la même façon en fonction :

- de la tension composée U
- du courant en ligne I

Ces deux grandeurs sont les seules qui soient toujours mesurables quel que soit le couplage, même inconnu, du récepteur utilisé.

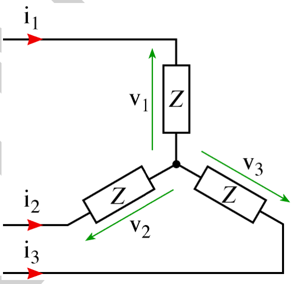
8. Couplage d'un récepteur sur le réseau

On cherche à appliquer la tension maximale acceptée par le récepteur.

8.1 Exemple n°1

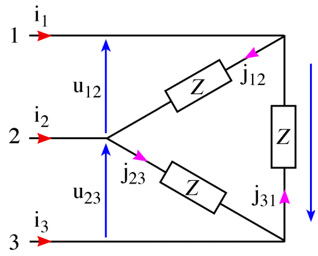
Supposons que vous voulez coupler un récepteur triphasé au réseau 230V/400V et que la tension nominale pour chaque phase du récepteur soit de 400V. Quel couplage étoile ou triangle faut-il choisir? Les deux couplages sont-ils possibles ?

si on couple le récepteur en étoile :



La tension appliquée à chaque récepteur est égale à V=230V
Ce couplage est possible mais chaque phase du récepteur est sous alimentée (230V<400V !)

Si on couple le récepteur en triangle :



La tension appliquée à chaque récepteur est égale à U=400V
Chaque phase du récepteur est alimentée avec la tension nominale. Ce couplage est idéal.

8.2 Exemple n°2

Supposons que vous voulez coupler un récepteur triphasé au réseau 230V/400V et que la tension nominale pour chaque phase du récepteur soit de 230V. Quel couplage étoile ou triangle faut-il choisir? Les deux couplages sont-ils possibles ?

Si on couple le récepteur en étoile :

La tension appliquée à chaque récepteur est égale à V=230V
Chaque phase du récepteur est alimentée avec la tension nominale. Ce couplage est idéal.

Si on couple le récepteur en triangle :

La tension appliquée à chaque récepteur est égale à U=400V
Ce couplage est impossible, la tension appliquée à chaque phase est supérieure à la valeur maximale !

9. Mesure de puissance : le wattmètre

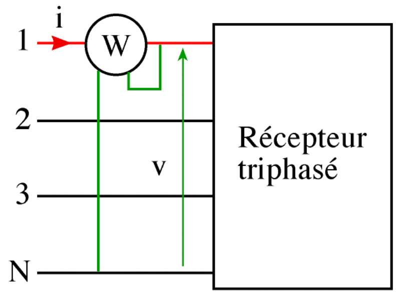
9.1 Le wattmètre monophasé

Le wattmètre monophasé permet de mesurer la puissance active P en monophasé ou triphasé.

Il possède au moins quatre bornes : deux bornes pour mesurer la tension et deux bornes pour mesurer le courant. Il y a donc deux branchement à réaliser : un branchement en parallèle comme un voltmètre) pour mesurer la tension, et un branchement en série (comme un ampèremètre) pour mesurer le courant. Le wattmètre tient compte du déphasage.

Mesure en triphasé lorsque le fil neutre est accessible : ligne à quatre fils.

il n’est pas nécessaire de connaître le couplage du récepteur



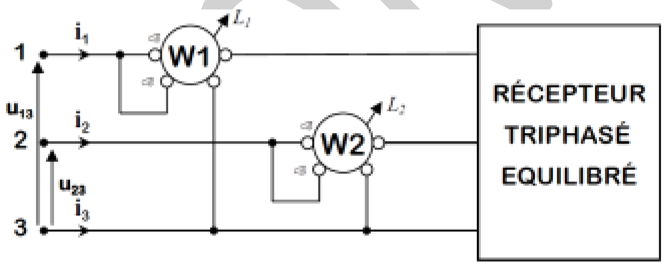
Le wattmètre branché de cette façon mesure (puissance lue) : $P' = VI\cos(\varphi)$

La relation entre la puissance lue et la puissance absorbée par le récepteur est :
P=$3 \times P'$

La puissance du récepteur s’exprime (puissance absorbée) : $P = \sqrt{3}UI\cos(\varphi)$

9.2 Méthode des deux wattmètres

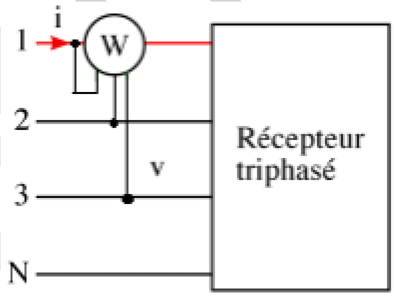
On utilise donc deux wattmètres monophasés câblés comme le schéma ci contre :
La lecture du premier appareil est appelée L1.



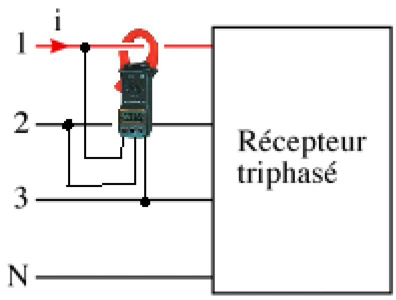
La lecture du deuxième appareil est appelée L2.
La puissance active totale se calcule de la façon suivante: P=L1+L2
La puissance réactive totale se calcule de la façon suivante: Q=$\sqrt{3}(L1 - L2)$

9.3 Le wattmètre triphasé et la pince wattmétrique

Le wattmètre triphasé est branché sur un fil de ligne et sur les 3 phases. On mesure directement la puissance absorbée



wattmétre triphasé



pince wattmétrique

10. Résumé

	Couplage étoile	Couplage triangle
Relation entre U et V	$U = V\sqrt{3}$	$U = V\sqrt{3}$
Relation entre I et J	$I = J$	$I = J\sqrt{3}$
Déphasage	$\varphi\ (\vec{I},\ \vec{V})$	$\varphi\ (\vec{J},\ \vec{U})$
Puissance active	$P = 3.P_1 = 3VI\cos(\varphi)$ $P = \sqrt{3}UI\cos(\varphi)$	$P = 3.P_1 = 3UJ\cos(\varphi)$ $P = \sqrt{3}UI\cos(\varphi)$
Pertes joules	$P = 3rI^2$ $P = \frac{3}{2}RI^2$	$P = 3rJ^2$ $P = \frac{3}{2}RI^2$
Résistance équivalente entre 2 phases	$R = 2r$	$R = \frac{2}{3}r$
Puissance réactive	$Q = \sqrt{3}UI\sin(\varphi)$	$Q = \sqrt{3}UI\sin(\varphi)$
Puissance apparente	$S = \sqrt{3}UI$	$S = \sqrt{3}UI$
Facteur de puissance	$k = \cos(\varphi)$	$k = \cos(\varphi)$

11. Relèvement du facteur de puissance en triphasé

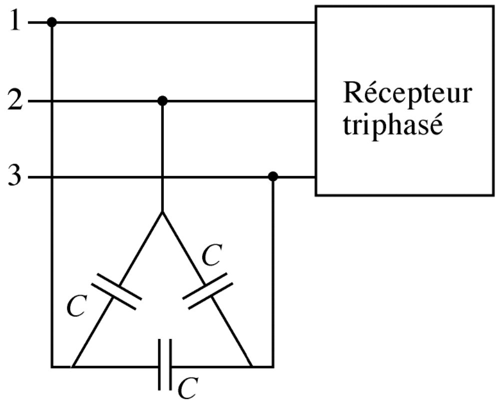
11.1 Utilité.

Pour une même puissance active, plus le facteur de puissance est faible (déphasage tension / courant important) plus il faut fournir un courant de ligne important.
On cherche donc à obtenir un facteur de puissance le plus proche possible de la valeur "1". On parle de relèvement du facteur de puissance.

Comme la plupart des récepteurs sont inductifs (Bobinages) cette opération est effectuée en rajoutant des condensateurs au système.

11.2 Couplage des condensateurs en triangle

Montage :



Tension aux bornes d'un condensateur : U

Puissance réactive absorbée par un condensateur :
$Q_{C1} = -C\omega U^2$

Puissance réactive absorbée par les trois condensateurs :
$Q_C = 3Q_{C1} = -3C\omega U^2$

	Puissance active	**Puissance réactive**	**Facteur de puissance**
Charge seule	P	$Q = P.\tan(\varphi)$	On a $\cos(\varphi)$
les trois condensateurs seuls	0	$Q_C = -3C\omega U^2$	0
Charge + condensateurs	P	$Q' = Q + Q_C = P.\tan(\varphi')$	On veut $\cos(\varphi')$

On en déduit la capacité du condensateur de la manière suivante :

$$Q_C = -3C\omega U^2 = Q' - Q$$

$$-3C\omega U^2 = P.\tan(\varphi' -)P.\tan(\varphi)$$

Finalement : $\boxed{C = \dfrac{P(\tan(\varphi) - \tan(\varphi'))}{3\omega U^2}}$

11.3 Couplage des condensateurs en étoile

En utilisant le même raisonnement que précédemment, on montre que la capacité du condensateur est donnée par la relation :

$$C = \frac{P(\tan(\varphi) - \tan(\varphi'))}{\omega U^2}$$

Le couplage en étoile est donc moins intéressant puisque la capacité des condensateurs nécessaires est trois fois plus grande que pour le couplage en triangle. Plus la capacité est grande, plus le condensateur est volumineux et onéreux.