

Cours : électrotechnique

Résumé : *L'électrotechnique est l'étude des applications techniques de l'électricité, la discipline qui étudie la production, le transport, le traitement, la transformation et l'utilisation de l'énergie électrique.*

L'électrotechnique a un champ d'application extrêmement vaste, elle concerne de très nombreuses entreprises industrielles, dans les domaines de la production et du transport de l'énergie électrique dans les équipements électriques, dans les transports utilisant des moteurs électriques, et également dans le domaine d'hydraulique.

Chapitre 1 : Notion de base de l'Electricité

1. Introduction

L'électricité est une partie de la physique qui étudie les phénomènes électriques et leurs applications. C'est une forme d'énergie produite par le déplacement de particules élémentaires de la matière et se manifestant par différents phénomènes. L'électricité produit des effets calorifiques, mécaniques, chimiques, lumineux, utilisés dans la vie domestique et industrielle.

2. Grandeurs électrique

2.1 Charge électrique

Il existe deux types de charges électriques, les négatives et les positives. Ces charges sont liées à la matière dont les particules fondamentales sont également les « grain » ultime d'électricité. C'est ainsi que l'électron porte la charge élémentaire négative et le proton la charge élémentaire positive. D'un point de vue physique, n'importe quelle charge est multiplication de la charge élémentaire (e) $e = - 1.602 \times 10^{-19}$ Coulomb.

Une des propriétés de la charge est de produire un champ électrique dans l'espace qui l'entoure. $\vec{F} = q\vec{E}$

Lorsque on place une charge électrique témoin dans ce champ électrique cette charge s'est agi par une force (\vec{F}).

2.2 Courant électrique

Le courant électrique de conduction est produit par le mouvement de charge électrique libre. Le vecteur de la densité de courant i est défini grandeur par la charge traversant dans l'unité de temps l'unité de surface perpendiculaire à la direction du courant.

Le courant total I traversant une surface donnée est par conséquent la somme sur cette surface.

$$I = \int_s \vec{i} \cdot d\vec{s} = \frac{dQ}{dt} \quad [Ampère]$$

Les propriétés essentielles du courant électrique sont les suivantes :

1. Le courant électrique produit des effets thermiques dans tous les conducteurs (production de chaleur par effet de Joule).
2. Il produit aussi des effets chimiques (transport d'ions en solution, ou électrolyse).
3. L'effet le plus intéressant est la production d'un champ magnétique.

2.3 Potentiel électrique

Le potentiel électrique [V] est une quantité scalaire, le potentiel est obtenu à partir de l'énergie à fournir pour déplacer les charges électriques à partir du point $V_0 = 0$ au point donne V_1 .

Dans le model physique le voltage [V] est la différence entre deux points de potentiels (figure 1).

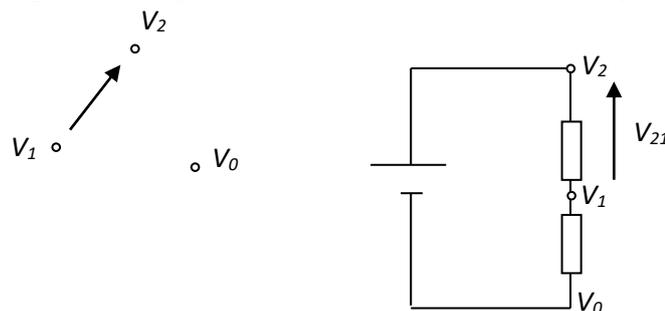


Figure 1 : Relation entre le voltage et potentiel

2.4 Loi d'Ohm

Pour un grand nombre de conducteurs, l'expérience indique une proportionnalité entre densité de courant et champ.

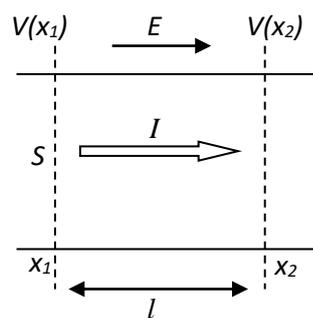
$$i = \sigma E \text{ (loi d'Ohm) } (\sigma : \text{conductivité électrique})$$

Lorsque E dérive d'un potentiel V

Alors
$$i = -\sigma \text{grad}(V)$$

Pour un conducteur linéaire de section constante, cette relation donne pour le courant total $I = S i$

$$I = -\sigma S \frac{\partial V}{\partial x} = \sigma S \frac{V(x_1) - V(x_2)}{x_2 - x_1}$$



$$I = \sigma S \frac{V}{l} = \frac{S}{\rho l} V$$

V : tension entre x_1 et x_2

$$\frac{1}{\sigma} = \rho : \text{résistivité électrique}$$

La grandeur $\frac{\rho l}{S} = R$ est la résistance du segment de longueur l et de section S

On écrira : $I = \frac{V}{R}$ ou

$$V = R I$$

Appelée la loi d'Ohm

2.5 Effet Joule

Une charge $dQ = I dt$ passant de A à B effectue un travail $dQ V$ dans le temps dt

La puissance dissipée dans la résistance est donc

$$w = \frac{dQ}{dt} V = I V = I^2 R = \frac{V^2}{R} \quad \text{loi de Joule}$$

[W]= Ampère x Volt= Joule/Sec= Watt

2.6 Puissance électrique

La puissance électrique \square la puissance électrique P mise en jeu dans un dipôle est le rapport de l'énergie électrique W par le temps de fonctionnement t :

$$P = \frac{w}{t}$$

Si P est exprimée en watt et t en heure, WAB est exprimée en Wattheure (Wh), 1 Wh = 3600 J

2.7 Production d'un champ magnétique par un courant

Tout courant électrique crée un **champ magnétique** dans son voisinage. Celui-ci est toutefois très faible, même pour des courants intenses

Si on considère un conducteur cylindrique droit dans lequel circule un courant I (figure 2). Ce courant crée un champ magnétique. L'intensité de ce champ est donnée par la loi D'Ampère :

$$\int \mathbf{H} d\mathbf{l} = I \quad (\text{eqH})$$

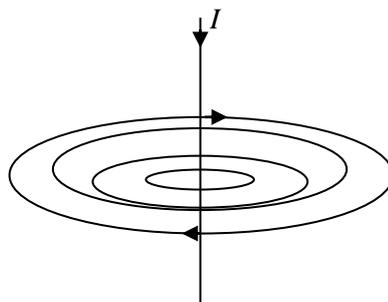
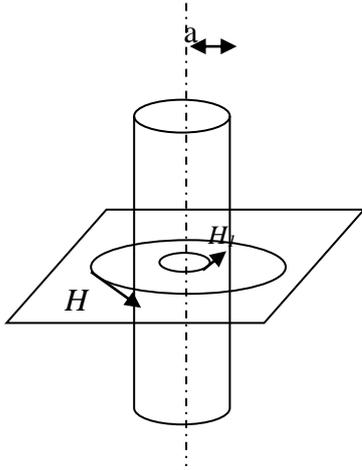


Figure 2 : Champ magnétique créé par un courant circulant dans un fil

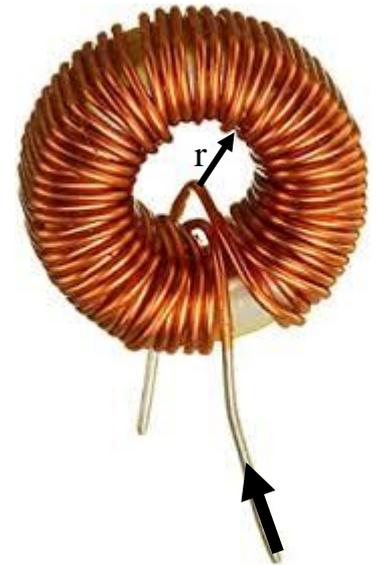
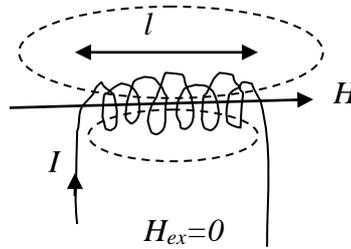
Pour les dispositifs dont la symétrie permet de prédire la forme des lignes de champ, la relation (eqH) fournit facilement la valeur du champ H

Exemple

Conducteur cylindrique rectiligne parcouru par un courant I (uniforme)



Solénoïde supposé très long par rapport à son diamètre Enroulement toroïdal



I

à l'extérieur :

$$\oint_{H1} HdS = H2\pi r = I$$

Donc

$$H = \frac{I}{2\pi r}$$

A l'intérieur

$$\oint_{c2} HdS = H2\pi r = \frac{I}{\pi a^2} \pi r^2$$

Donc $H = \frac{I}{a^2} r^2$

$$\oint_c HdS = H l = N I$$

Donc

$$H = \frac{N}{l} I$$

On voit que le champ est uniforme à l'intérieur

$$B = \mu \mu_0 H$$

$$\oint_c HdS = H2\pi r = N I$$

Donc

$$H = \frac{N}{2\pi r} I$$

Le champ n'existe qu'à l'intérieur ; il ya même grandeur sue tout cylindre coaxial mais diminue avec r.

2.7.1 Phénomène d'induction

La loi d'induction exprime, sous sa forme générale, une connexion entre la variation temporelle $\frac{\partial}{\partial t} B$ du champ magnétique B (d'où le champ d'induction) et un champ électrique résultant de cette variation.

Mathématique s'exprime :

$$V_{AB} = \oint_C E ds = -\frac{\partial}{\partial t} \int_S \vec{B} \cdot \vec{ds} = -\frac{\partial \Phi_B}{\partial t}$$

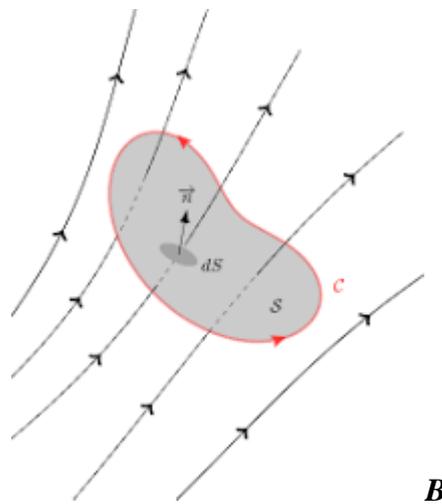


Figure 3: induction magnétique

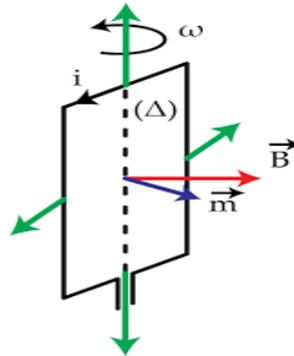
3. Application du phénomène d'induction (Générateur de tension alternative)

La loi d'induction apparaît comme une conséquence de l'existence de la force de Lorentz sur une particule chargée en mouvement dans un champ magnétique.

$$F = e(v \wedge B) = e\left(\frac{dl}{dt} \wedge B\right)$$

$$V_{AB} = -\frac{\partial \Phi_B}{\partial t}$$

Soit un cadre tournant à vitesse angulaire constante ($\alpha = \omega t$) dans un champ magnétique uniforme B



Alors $\Phi_B = NBS \cos(\alpha)$

La tension induit entre A et B aux bornes du cadre est donnée

$$V_{AB} = -\frac{\partial \Phi_B}{\partial t} = NBS \sin(\omega t) = V_0 \sin(\omega t)$$

Donc l'amplitude V_0 de cette tension alternative est proportionnelle à la vitesse de rotation ω c-à-d à la fréquence circulaire $\omega = 2\pi f$

Ainsi le réseau industriel de tension alternative est alimenté par des générateurs tournants à une vitesse angulaire à 50 période/s $f = 50\text{Hz}$

Donc la tension sinusoïdale est écrite sous la forme :

$$V(t) = V_m \cos(\omega t + \varphi)$$

V_m : amplitude [V]

ω : pulsation (rad/s)

φ : phase initiale (rad)

$(\omega t + \varphi)$: phase instantanée (rad)

$$\text{Valeur moyenne : } \langle V(t) \rangle = \frac{1}{T} \int_T V dt = 0$$

$$\text{Valeur efficace : } V_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_T V^2 dt} = \frac{V_m}{\sqrt{2}}$$

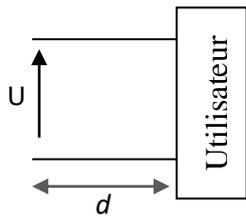
Lorsqu'on parle du réseau électrique domestique à 220V il s'agit bien de la valeur efficace de la tension (celle indiquée par des voltmètres).

3.1 Caractéristique du réseau de distribution électrique

(régime monophasé et régime triphasé)

La production et le transport de l'énergie électrique se font sous forme triphasée, en régime sinusoïdal.

Considérons le transport d'une puissance P à la distance d respectivement en monophasé et en triphasé. (on fixe une même tension efficace $U_{eff} = U$).



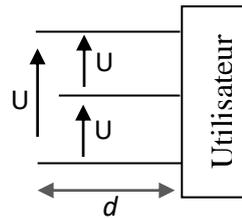
Perte Joule

$$\text{Pertes} = 2RI^2 \text{ avec } I_e = P/U_e \cos(\varphi)$$

$$= 2RP^2/U_e \cos^2(\varphi)$$

Avec $R = \frac{\rho d}{S}$ et ρ : résistivité

$$= 2 \frac{\rho d P^2}{S U^2 \cos^2(\varphi)}$$



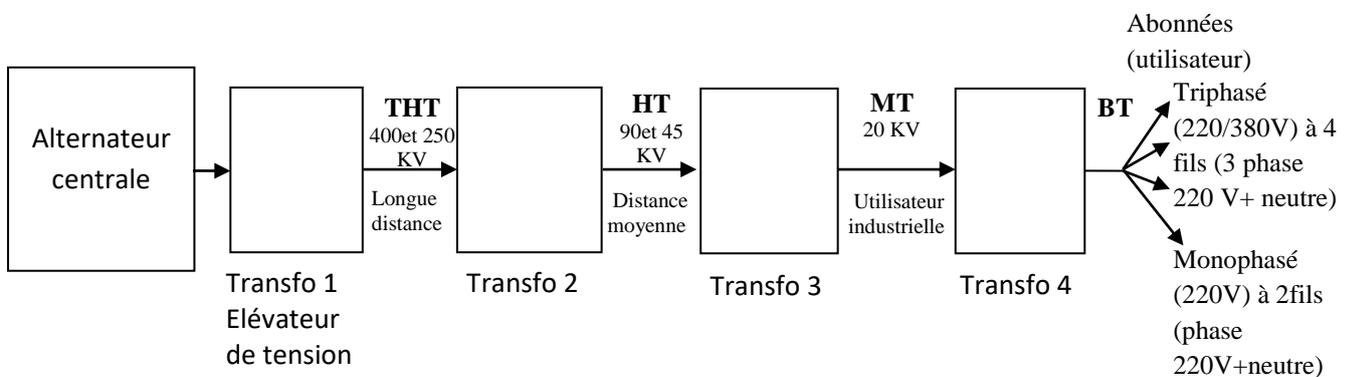
perles Joule

$$\text{Pertes} = 3RI^2 \text{ avec } I = P/\sqrt{3}U \cos(\varphi)$$

$$= RP^2/U \cos^2(\varphi)$$

$$= \frac{\rho d P^2}{S U^2 \cos^2(\varphi)}$$

Pour fournir une même puissance P à un utilisateur une ligne triphasée subit moitié moins de pertes par effet Joule qu'une ligne monophasé (de même section). D'où le choix du transport électrique par le régime triphasé.



le réseau de transport partant des centrales électriques et dédié au transport longue distance de l'électricité, il est constitué de lignes très haute tension (THT) à 400 et 225 kV,

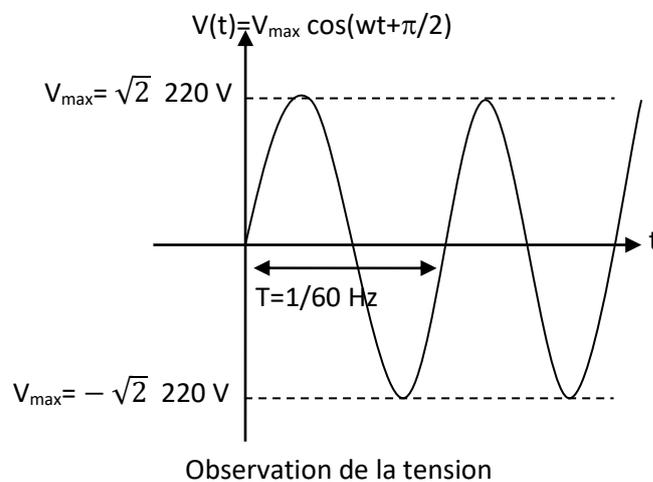
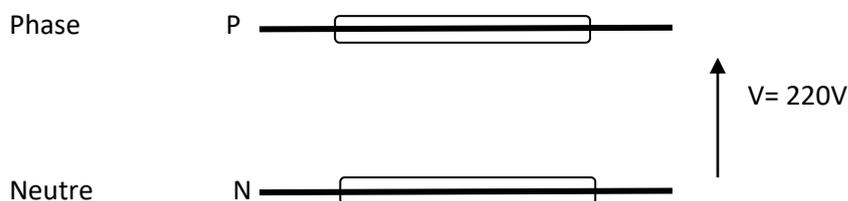
le réseau de répartition, réseau intermédiaire dédié aux distances moyennes (quelques dizaines de kilomètres) et constitué de lignes haute tension (HT) à 90 et 45 kV.

le réseau de distribution amenant l'énergie électrique aux abonnés, il comporte des lignes moyenne tension (MT) à 20 kV, auxquelles peuvent être relié directement les utilisateurs industriels, et des lignes basse tension (BT) pour la distribution au particulier en monophasé à 220 V entre phase et neutre (valeur efficace de la tension) et parfois en triphasé à quatre fils (réseau 220 / 380 V).

3.2 Puissance en régime sinusoïdal pour les systèmes monophasé

Un système monophasé est un système électrique alternatif fourni au moyen d'une ligne bifilaire (à deux lignes). C'est système qui a une seule phase.

Les systèmes monophasés ne conviennent que pour de faibles puissances. S'il faut produire, transporter ou consommer de grandes puissances et créer des champs tournants, on utilise des systèmes polyphasés.

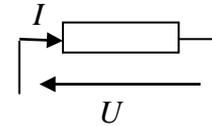


3.2.1 Puissance instantanée

La puissance instantanée P absorbée à chaque instant t par un dipôle D traversé par un courant d'intensité I sous la tension U s'exprime par la relation :

$$P = U I \quad [W] \text{ en watt}$$

Dans le cas : $U = U_{eff} \sqrt{2} \cos(\omega t)$ et $I = I_{eff} \sqrt{2} \cos(\omega t + \varphi)$



$$P(t) = U_{eff} I_{eff} \cos(\varphi) + U_{eff} I_{eff} \cos(2\omega t + \varphi)$$

3.2.2 Puissance active (puissance moyenne)

C'est la valeur moyenne de la puissance instantanée

$$P_m = \langle P \rangle = \frac{1}{T} \int_T P(t) dt \quad [W]$$

Dans le cas : $U = U_{eff} \sqrt{2} \cos(\omega t)$ et $I = I_{eff} \sqrt{2} \cos(\omega t + \varphi)$

D'où :

$$P = P_{active} = U_{eff} I_{eff} \cos(\varphi)$$

3.2.2 Puissance apparente

On définit la puissance apparente par

$$S = U_{eff} I_{eff}$$

Ce qui permet d'introduire le facteur de puissance :

$$k = P/S$$

en régime sinusoïdal on trouve donc

$$k = \cos \varphi$$

3.2.4 Puissance réactive

C'est un nombre algébrique, fonction du signe de φ , donc de la nature inductive ou capacitive du circuit.

$$Q = U_e I_e \sin \varphi$$

$$\text{On peut alors écrire : } Q = \sqrt{S^2 - P^2}$$

$$\tan(\varphi) = \frac{Q}{P}$$

$$\cos(\varphi) = \frac{P}{S}$$

$$\sin(\varphi) = \frac{Q}{S}$$

3.3 Puissance en régime sinusoïdal pour les systèmes Triphasé

Une ligne triphasée comporte 3 conducteurs appelés "phases" (1, 2, 3) et éventuellement un conducteur de référence appelé " neutre " (N).

En considérant les tension simples V_1, V_2, V_3 et les courant de ligne i_1, i_2, i_3

En régime triphasé équilibré sinusoïdal on a :

$$V_1 = V\sqrt{2}\cos(\omega t)$$

$$I_1 = I\sqrt{2}\cos(\omega t + \varphi)$$

$$V_2 = V\sqrt{2}\cos(\omega t - 2\frac{\pi}{3})$$

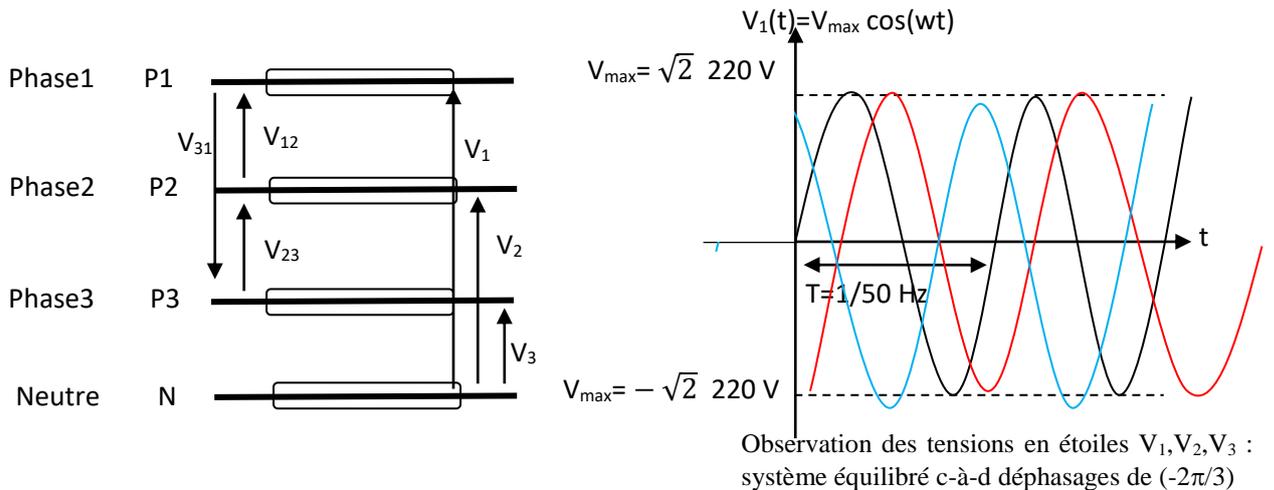
$$I_2 = I\sqrt{2}\cos(\omega t - 2\frac{\pi}{3} + \varphi)$$

$$V_3 = V\sqrt{2}\cos(\omega t - 4\frac{\pi}{3})$$

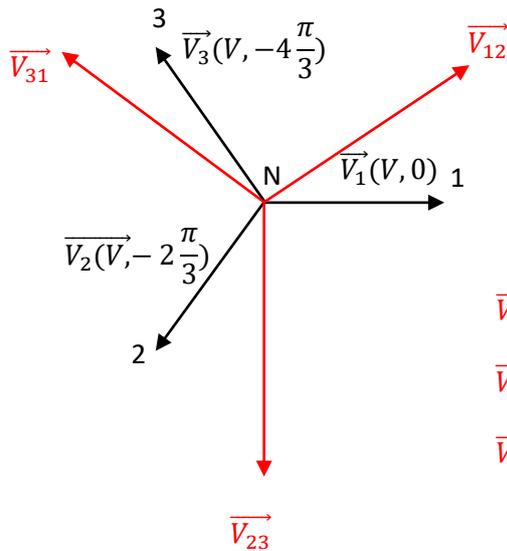
$$I_3 = I\sqrt{2}\cos(\omega t - 4\frac{\pi}{3} + \varphi)$$

On distingue deux types de tensions:

- Les tensions en étoilées (tensions entre phase et neutre). Nous les noterons : $V_1(t), V_2(t)$ et $V_3(t)$.
- Les tensions composées (ou tensions entre phases). Nous les noterons : $V_{12}(t), V_{23}(t)$ et $V_{31}(t)$.



Vecteurs de **Frensel** associés :



Système équilibré direct :

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

$$\vec{V}_{12} = \vec{V}_1 - \vec{V}_2$$

$$\vec{V}_{23} = \vec{V}_2 - \vec{V}_3$$

$$\vec{V}_{31} = \vec{V}_3 - \vec{V}_1$$

Les vecteurs $\vec{V}_{12}, \vec{V}_{23}, \vec{V}_{31}$ ont même module
même déphasées de $2\pi/3$ le système est équilibré

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

Relation entre les tensions composées et en
étoiles:

$$U = \sqrt{3} V$$

3.3.1 Puissance instantanée

$$P = P_1 + P_2 + P_3$$

$$\mathbf{P} = V_1 \mathbf{i}_1 + V_2 \mathbf{i}_2 + V_3 \mathbf{i}_3$$

3.3.2 Puissance active

$$\mathbf{P} = \langle P \rangle = \langle P_1 + P_2 + P_3 \rangle = \langle P_1 \rangle + \langle P_2 \rangle + \langle P_3 \rangle$$

$$\mathbf{P} = 3VI \cos(\varphi) = \sqrt{3} V_e I_e \cos(\varphi) \quad [\text{W}]$$

$$\text{Puisque } V_e = \sqrt{3} V = 380 V \text{ si } V = 220V$$

3.3.3 Puissance réactive

$$Q = 3V I \sin(\varphi) = \sqrt{3}V_e I_e \sin(\varphi)$$

3.3.4 Puissance apparente

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

$$S = 3 V I = \sqrt{3}V_e I_e$$

3.4 Couplage des générateurs et des récepteurs pour le système triphasé

3.4.1 Couplage en étoile

Dans un couplage en étoile, les éléments d'un générateur ou d'un récepteur sont couplés comme l'indiquent les figures (a.1) et (a.2), chaque élément est traversé par le courant qui parcourt la ligne à laquelle il est relié.

La tension aux bornes d'un élément est la tension simple, soit :

$$V = \frac{U}{\sqrt{3}} \quad (220=380/\sqrt{3})$$

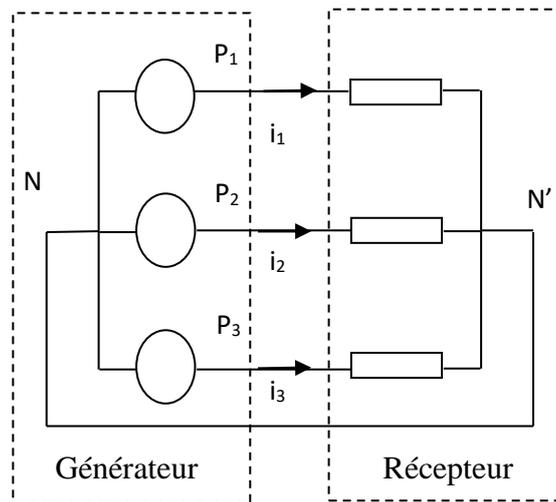


Figure a.1 : installation triphasée

En régime équilibré, le courant dans le neutre est nul.

3.4.1 Couplage en triangle

Les éléments sont soumis à une tension composée de valeur efficace $U=V\sqrt{3}$.

Le courant qui les traverse n'est plus le courant qui parcourt une ligne. En appliquant la loi des nœuds en R, S, T nous pouvons écrire :

$$i_1 = I_1 - I_3, \quad i_2 = I_2 - I_1, \quad i_3 = I_3 - I_2$$

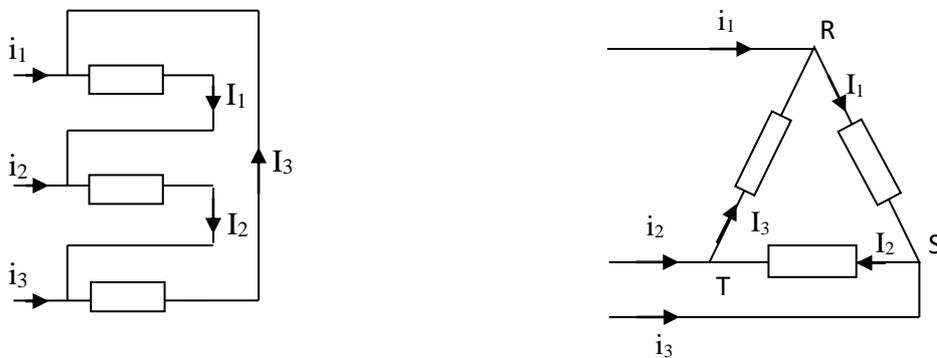


Figure 1.b : couplage en triangle d'un récepteur

$$i_{\text{eff}} = I_{\text{eff}} \sqrt{3}$$

L'utilisation d'une charge en triangle Δ ne permet pas l'existence d'un neutre.

Exemple 1

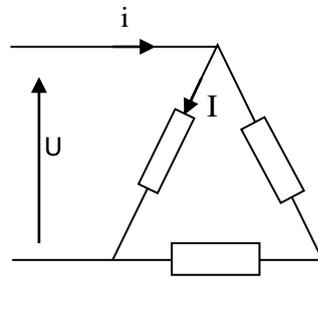
Une installation, alimentée sous 220V, comporte un disjoncteur de calibre 30A.

On met en service un four électrique de 3KW, un fer à repasser de 800W, et deux radiateurs de 1000W chacun.

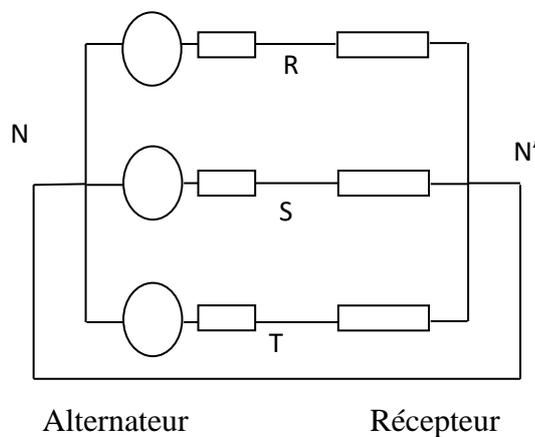
Combien de lampe d'une puissance P_1 de 75 W peut-on brancher en même temps ?

Exemple 2

Quelle est l'intensité (courant) efficace du courant traversant une branche d'un récepteur triphasé équilibré, couplé en triangle, lorsque l'intensité du courant en ligne a pour valeur efficace $i = 17,3\text{ A}$?

**Exemple 3**

Un alternateur triphasé, couplé en étoile, débite dans le récepteur triphasé couplé également en étoile figure suivante :



Les systèmes triphasés de tensions et de courants sont équilibrés. La tension efficace entre les bornes R, S est $U = 500\text{ V}$

Quelle est la tension entre les bornes T et N' ?

Exemple 4

Sur la plaque signalétique d'un moteur triphasé équilibré on relève les indications suivantes :

220V/380V ; 6,2A/3,6A

Quelle est la signification de ces différentes indications ?

Solution exemple 1

Au total, l'installation peut recevoir une puissance :

$$P_T = 220 \times 30 = 6600 \text{ W}$$

Lorsque tous les appareils sont branchés on dispose d'une puissance P' pour les lampes :

$$P' = 6600 - 800 - 3000 - 2000 = 800 \text{ W}$$

Le nombre n de lampes qu'il est possible de brancher est égal à :

$$n = P' / P_1 \quad \Rightarrow \quad n = 800 / 75 = 10,66$$

soit 10 Lampes de 75W

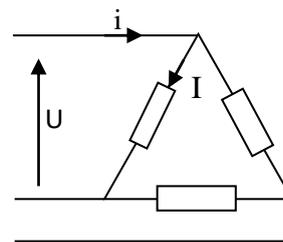
Solution exemple 2 :

Chaque branche du récepteur triphasé couplé en triangle est soumise à la tension entre phases.

Appelons I l'intensité efficace du courant dans un enroulement

$$I = i / \sqrt{3}$$

$$\text{Soit } I = 17,3 / \sqrt{3} \text{ A} \quad \Rightarrow \quad I = 10 \text{ A}$$



Solution exemple 3:

La tension entre T et N' est une tension simple.

La tension entre R et S est une tension composée

$$\text{Donc : } U_{TN'} = V = U / \sqrt{3} \quad \text{soit } V = (500 / \sqrt{3}) \text{ V} = 289 \text{ V}$$

Solution exemple 4

La plaque signalétique du moteur donne les conditions normales de fonctionnement (condition nominales). Généralement, ce sont les conditions pour lesquelles le rendement du moteur est le plus élevé.

Indication : 220/380V la plus petite des deux (ici 220V) indique la tension efficace aux bornes d'un enroulement.

Les enroulements seront couplés de telle sorte que chacun d'entre eux soit soumis à une tension efficace de 220V. Deux cas sont possibles selon le réseau triphasé d'alimentation.

Réseau 127/220V (appelé réseau 220V) => montage en triangle

Réseau 220/380V (appelé réseau 380V) => montage en étoile

Indication : 6,2A / 3,6A c'est l'intensité efficace nominale I du courant traversant chaque fil de phase avec le montage adapté au réseau

Réseau 127/220V et montage en triangle : $I=6,2A$