

OFPPT

ROYAUME DU MAROC

مكتب التكوين المهني وإنعاش الشغل

Office de la Formation Professionnelle et de la Promotion du Travail

DIRECTION RECHERCHE ET INGENIERIE DE FORMATION

**RESUME THEORIQUE
&
GUIDE DE TRAVAUX PRATIQUES**

**MODULE N°: 8 ANALYSE DE CIRCUITS A
COURANT ALTERNATIF**

SECTEUR : ELECTROTECHNIQUE

**SPECIALITE : ELECTRICITE DE
MAINTENANCE
INDUSTRIEL**

NIVEAU : TECHNICIEN

ANNEE 2006

Document élaboré par :

Nom et prénom

EFP

DR

KISSIOVA-TABAKOVA
Raynitchka

CDC Génie
Electrique

DRIF

Révision linguistique

-
-
-

Validation

-
-
-

SOMMAIRE

Présentation du Module.....	7
RESUME THEORIQUE.....	8
1. PRODUCTION D'UNE ONDE SINUSOÏDALE.....	9
1.1. Induction électromagnétique.....	9
1.2. Alternateur élémentaire.....	9
2. TERMES ASSOCIES AU COURANT ALTERNATIF.....	13
2.1. Types de courants alternatifs.....	13
2.2. Caractéristiques d'un courant alternatif sinusoïdal.....	14
2.3. Déphasage.....	16
2.4. Caractéristiques d'une onde sinusoïdale.....	16
3. EFFET DES INDUCTANCES.....	19
3.1. Inductance d'une bobine.....	19
3.2. Inductance mutuelle.....	20
3.3. Réactance inductive.....	20
3.4. Déphasage entre le courant et la tension.....	21
3.5. Groupements d'inductances.....	22
3.5.1. Groupement en série.....	22
3.5.2. Groupement en parallèle.....	22
4. EFFET DES CONDENSATEURS.....	23
4.1. Constitution.....	23
4.2. Capacité d'un condensateur plan.....	24
4.3. Types de condensateurs.....	24
4.4. Groupements de condensateurs.....	24
4.4.1. Groupement en série.....	24
4.4.2. Groupement en parallèle.....	25
4.5. Réactance capacitive.....	25
4.6. Déphasage entre courant et tension.....	26
5. LOIS DE ELECTROMAGNETISME.....	27
5.1. Champ magnétique créé par un courant électrique.....	27
5.1.1. Forme et sens du champ.....	27
5.1.2. Densité du flux.....	28
5.1.3. Force magnétomotrice (f.m.m.).....	29
5.1.4. Champ magnétique d'une bobine longue.....	29
5.2. Force électromagnétique.....	30
5.3. Induction électromagnétique.....	30
5.3.1. Loi de Lenz.....	31
5.3.2. Tension induite dans un conducteur.....	31
6. CARACTERISTIQUES DES TRANSFORMATEURS.....	33
6.1. Structure élémentaire du transformateur.....	33
6.2. Rapport de transformation.....	35
6.3. Polarité de transformateur.....	37
6.4. Problèmes d'isolement.....	37
6.5. Autotransformateur.....	38
7. CARACTERISTIQUES DES CIRCUITS A COURANT ALTERNATIF.....	39
7.1. Représentation vectorielle des grandeurs sinusoïdales.....	40
7.2. Diagramme vectoriel d'un circuit à courant alternatif.....	44
7.2.1. Circuit R – L – C série.....	44
7.2.2. Circuit R – L – C parallèle.....	47
7.3. Calcul des valeurs aux différents points d'un circuit à courant alternatif.....	50
7.3.1. Circuit R – L – C série.....	50

7.3.2. Circuit R – L – C parallèle.....	52
8. PUISSANCE.....	56
8.1. Calcul de la puissance active.....	56
8.2. Calcul de la puissance réactive.....	57
8.3. Puissance apparente.....	57
8.4. Facteur de puissance.....	58
9. CARACTERISTIQUES DES CIRCUITS EN RESONANCE.....	59
9.1. Résonance série.....	59
9.1.1. Caractéristiques de la résonance série.....	61
9.1.2. Courbes de la résonance série.....	61
9.1.3. Facteur de qualité du circuit Q.....	62
9.2. Résonance parallèle.....	62
9.2.1. Caractéristiques de la résonance parallèle.....	64
9.2.2. Courbes de la résonance parallèle.....	64
10. CIRCUITS TRIPHASES.....	65
10.1. Système triphasé.....	65
10.1.1. Systèmes mono et polyphasés.....	65
10.1.2. Alternateur triphasé.....	65
10.1.3. Système direct et système inverse.....	66
10.1.4. Propriétés du système monté en « Etoile ».....	67
10.1.5. Charges montées en « Etoile ».....	68
10.1.6. Charges montées en « Triangle ».....	71
10.2. Puissance en régime triphasé.....	72
10.2.1. Puissance en régime triphasé quelconque.....	72
10.2.2. Puissance en régime triphasé équilibré.....	72
11. VERIFICATION DE L'ETAT DES COMPOSANTS D'UN CIRCUIT A COURANT ALTERNATIF.....	73
11.1. Multimètre analogique.....	74
11.1.1. Présentation.....	74
11.1.2. Utilisation comme ohmmètre.....	74
11.2. Ohmmètre.....	74
11.2.1. Ohmmètre série.....	74
11.2.2. Ohmmètre parallèle (dérivation).....	75
11.3. Mégohmmètre.....	76
11.4. Vérification des composants.....	77
11.4.1. Vérification des résistances.....	77
11.4.2. Vérification des bobines.....	78
11.4.3. Vérification des condensateurs.....	78
11.4.4. Vérification des transformateurs.....	79
12. MESURES DANS UN CIRCUIT A COURANT ALTERNATIF.....	79
12.1. Instruments de mesure en courant alternatif.....	79
12.1.1. Ampèremètres et voltmètres magnétoélectriques.....	80
12.1.2. Ampèremètres et voltmètres ferromagnétiques.....	81
12.1.3. Ampèremètres et voltmètres électrodynamiques.....	82
12.2. Interprétation des lectures des instruments de mesure à courant alternatif.....	83
12.2.1. Echelle.....	83
12.2.2. Gammes (Calibres).....	84
12.2.3. Interprétation des lectures des appareils de mesure.....	85
12.3. Mesures en courant alternatif.....	86
12.3.1. Branchement des appareils de mesure.....	86
12.3.2. Mesure des valeurs aux différents points d'un circuit.....	87
12.3.3. Mesure des courants alternatifs.....	88
12.3.4. Mesure des tensions alternatives.....	89
12.4. Erreurs de mesure.....	91

12.4.1. Définition des erreurs.....	91
12.4.2. Types d'erreurs.....	91
12.4.3. Caractéristiques métrologiques des appareils de mesure.....	92
TP1 – Définition des termes associés au courant alternatif	96
TP 2 – Description des effets des inductances dans un circuit à courant alternatif	98
TP3 – Description des effets des condensateurs dans un circuit à courant alternatif	100
TP4 – Calcul des valeurs d'une onde sinusoïdale.....	102
TP5 – Schéma d'un circuit.....	104
TP6 – Diagrammes vectoriels	106
TP7 – Mesure des valeurs aux différents points d'un circuit	109
TP8 – Justification des résultats de mesure.....	114
TP9 – Définition des termes : puissance active, puissance réactive, puissance apparente et facteur de puissance	116
TP10 – Mesure de la puissance active et du facteur de puissance dans des circuits mono et triphasé.....	118
TP11 – Description des caractéristiques des transformateurs	126
EVALUATION DE FIN DE MODULE.....	129
Liste des références bibliographiques	132

MODULE :8 ANALYSE DE CIRCUITS A COURANT ALTERNATIF

Durée : 60 heures

**OBJECTIF OPERATIONNEL DE PREMIER NIVEAU
DE COMPORTEMENT**

COMPORTEMENT ATTENDU

Pour démontrer sa compétence le stagiaire doit **analyser des circuits à courant alternatif** selon les conditions, les critères et les précisions qui suivent.

CONDITIONS D'EVALUATION

- À partir :
 - de directives ;
 - d'un circuit comprenant une résistance, une inductance et un condensateur raccordés en série ou en parallèle ;
 - du schéma du circuit.
- À l'aide :
 - d'outils et d'instruments de mesure et d'équipements appropriés.

CRITERES GENERAUX DE PERFORMANCE

- *Respect des règles de santé et de sécurité.*
- *Utilisation appropriée des instruments et de l'équipement.*
- *Travail soigné et propre.*
- *Démarche de travail structuré.*
- *Respect des normes d'isolation du réseau électrique.*

**OBJECTIF OPERATIONNEL DE PREMIER NIVEAU
DE COMPORTEMENT**

**PRECISIONS SUR LE
COMPORTEMENT ATTENDU**

**CRITERES PARTICULIERS DE
PERFORMANCE**

- | | |
|--|--|
| <p>A) <i>Interpréter le schéma d'un circuit.</i></p> | <ul style="list-style-type: none">✓ <i>Utilisation appropriée de la terminologie.</i>✓ <i>Décodage correct des symboles et des conventions.</i> |
| <p>B) <i>Calculer les valeurs aux différents points d'un circuit.</i></p> | <ul style="list-style-type: none">✓ <i>Application correcte des lois.</i>✓ <i>Exactitude des calculs.</i> |
| <p>C) <i>Mesurer les valeurs aux différents points d'un circuit.</i></p> | <ul style="list-style-type: none">✓ <i>Exactitude des mesures.</i>✓ <i>Respect systématique des mesures de protection.</i>✓ <i>Exactitude du branchement aux points de mesure.</i> |
| <p>D) <i>Justifier les résultats.</i></p> | <ul style="list-style-type: none">✓ <i>Calcul exact des écarts.</i>✓ <i>Justification correcte des causes d'écarts.</i> |

Présentation du Module

Ce module de compétence générale est enseigné en premier semestre du programme. Son enseignement ne devra débuter que lorsque le module 5 « Analyse de circuits à courant continu » sera complété. Il s'appuiera sur les notions fondamentales de l'électricité vues en module 5.

L'objectif de module est de faire acquérir les connaissances nécessaires à l'interprétation de schémas, au calcul de différents paramètres (tension, fréquence, etc.) et à l'utilisation de composants tels que des inductances et des condensateurs afin d'analyser un circuit à courant alternatif.

La compréhension des concepts à l'étude exige l'adoption d'une approche privilégiant l'alternance entre la théorie et les activités réalisées en laboratoire. L'utilisation à outrance de matériel audiovisuel peut générer les situations d'apprentissage statiques. Bien que ce module présente des aspects théoriques importants, des efforts doivent être faits pour en dynamiser les apprentissages. La réalisation progressive de différents montages de base s'avère une stratégie pédagogique utile à l'atteinte de la compétence visée.

***Module 8 : ANALYSE DE CIRCUITS A
COURANT ALTERNATIF***

RESUME THEORIQUE

1. PRODUCTION D'UNE ONDE SINUSOÏDALE

1.1. Induction électromagnétique

Le phénomène de l'induction électromagnétique est à la base du fonctionnement d'un grand nombre d'appareils électrique parmi lesquels on peut citer comme les plus importants : les transformateurs et les moteurs à courant alternatif. Ce phénomène fut découvert par Michel Faraday en 1831.

La loi de l'induction électromagnétique énonce que :

- a) Si le flux magnétique varié avec le temps à l'intérieur d'une spire (voire circuit électrique) une tension appelée force électromotrice est induite entre ses bornes.
- b) La valeur de cette tension induite est proportionnelle au taux de variation du flux.

On obtient l'équation suivante :

$$E = \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} \quad , \text{ où : } E = \text{Tension induite, en volt [V]}$$

$\Delta \Phi$ = Variation du flux à l'intérieur de la spire ou du circuit, en weber [Wb]

Δt = Intervalle de temps correspondant à la variation du flux, en seconde [s].

1.2. Alternateur élémentaire

Considérons un aimant permanent N - S tournant autour d'un axe à l'intérieur d'un anneau de fer F fixe (fig. 1 - 1).

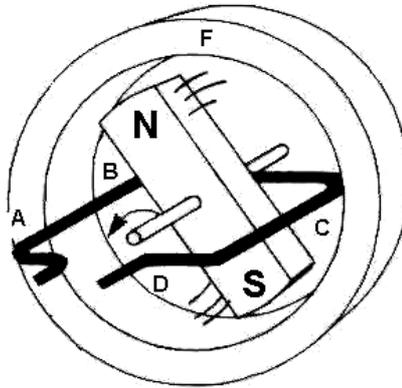


Fig. 1 - 1

Construction d'un alternateur élémentaire

Une spire métallique en forme de cadre ouverte est logée à l'intérieur de l'anneau. L'axe de la spire est celui de l'aimant permanent tournant. Lorsque l'aimant tourne avec une vitesse uniforme, soit 1 tour/s, le flux magnétique dans la spire varie et conformément au phénomène de l'induction électromagnétique il y induit une force électromotrice.

Si on détermine la valeur et la polarité de la tension induite pour les positions sensibles de l'aimant au cours de la rotation : 0° , 90° , 180° , 270° (les valeurs des angles sont exprimées par rapport à la position initiale), on obtient :

- A la position 0° (fig. 1 - 2) le flux dans la spire est nul car les lignes de champs sont parallèles avec la surface de la spire mais la variation du flux est maximum. Les conducteurs AB et CD de la spire coupent un maximum de ligne de champ et la force électromotrice induite dans la spire est maximum.

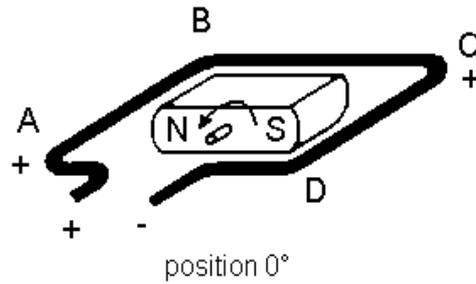


Fig. 1 - 2

- A la position 90° (fig. 1 - 3) le flux dans la spire est maximum car les lignes du champ sont perpendiculaires par rapport à la surface de la spire, mais la variation du flux dans la spire est nulle. Par conséquent la f.é.m. induite en celle-ci est nulle.

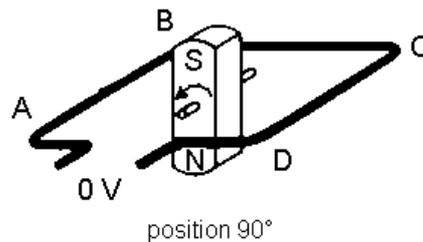


Fig. 1 - 3

- A la position 180° (fig. 1 - 4) les conditions sont identiques à celles de la position 0° (flux nul dans la spire et variation de flux maximum), sauf que les conducteurs AB et CD sont coupés par les lignes de champ d'orientation inverse. Il s'ensuit que la tension induite dans la spire sera identique mais de polarité contraire à celle de la position 0° .

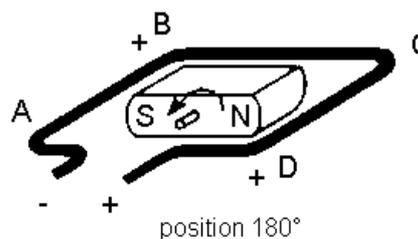


Figure 1 - 4

- A la position 270° (fig. 1 – 5) les conditions sont identiques à celle de la position 90° et pour les mêmes raisons la tension induite dans la spire est nulle.

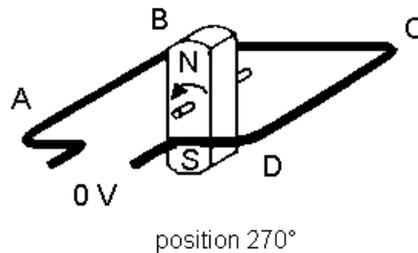


Figure 1 - 5

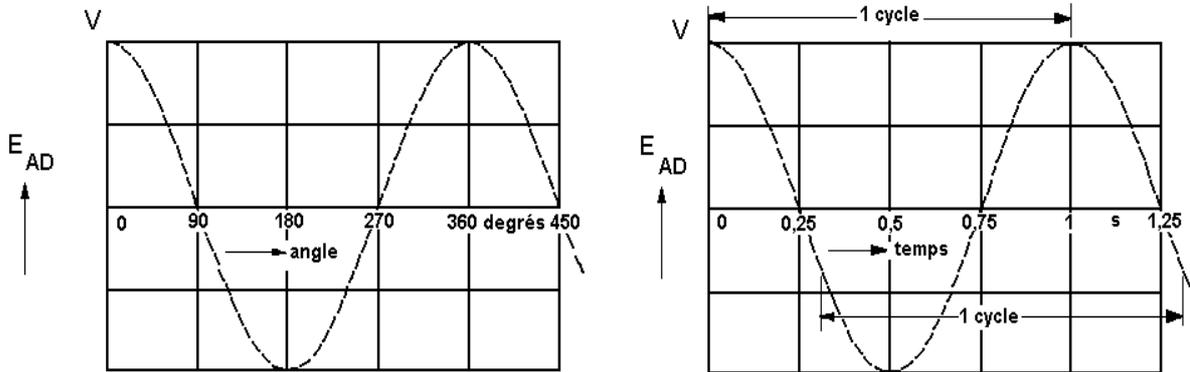
- A la position 360° l'aimant reprend sa position initiale et le cycle recommence.

Lorsqu'on représente sur un graphique les valeurs que la tension induite prise pour chaque position de l'aimant, on obtient une courbe ondulée avec des valeurs extrêmes de même valeur absolue mais de polarité contraire.

Une tension dont la polarité alterne successivement d'une valeur positive à une valeur négative est appelée **alternative**. En plus la forme d'onde de la tension induite dans la spire est sinusoïdale.

Les machines qui génèrent ces tensions s'appellent **alternateur** ou *générateur à courant alternatif*.

Les figures ci-dessous présentent la forme d'onde de la tension induite en fonction de l'angle de rotation de la spire et en fonction de temps (fig. 1 – 6)



Forme d'onde de la tension induite en fonction de l'angle de rotation.

Forme d'onde de la tension induite en fonction de temps.

Fig. 1 - 6

2. TERMES ASSOCIES AU COURANT ALTERNATIF

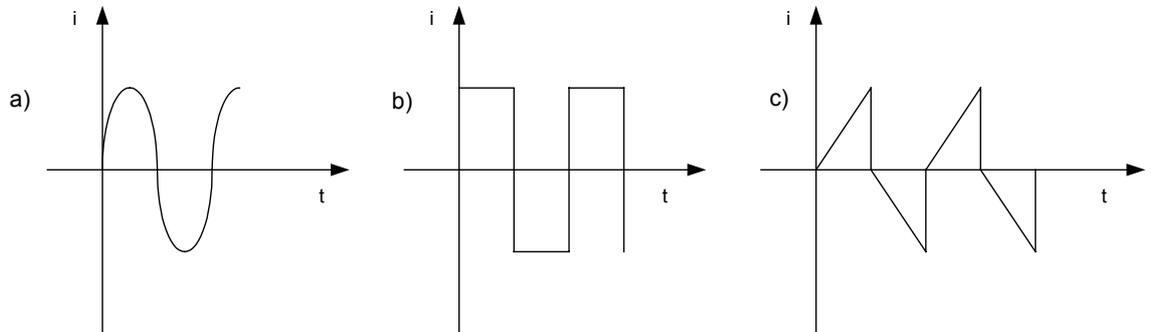
Dans le chapitre précédent on a étudié la production d'une tension induite sinusoïdale dans un alternateur élémentaire et on l'a représenté dans un système de référence en fonction de temps. Dans les circuits électriques alimentés avec des tensions alternatives circulent des courant alternatifs. Une large gamme de récepteurs utilise le courant alternatif, c'est pourquoi l'étude des grandeurs alternatives s'avère de grande importance pour l'électricien.

2.1. Types de courants alternatifs

Ce sont des courants qui changent de sens dans le temps. Les courants alternatifs les plus connus sont (fig. 2 – 1) :

- a) **Sinusoïdaux (se sont les plus utilisés);**
- b) **Carrés;**
- c) **En dent de scie.**

Les courants alternatifs (et cela est valable pour les tension alternatives ou n'importe quel autre signal alternatif) sont périodiques.



a) Courant (signal) sinusoïdal b) Courant (signal) carré c) Courant (signal) en dent de scie

Fig. 2 - 1

2.2. Caractéristiques d'un courant alternatif sinusoïdal

La période représente la durée minimum après laquelle une grandeur alternative reprend les mêmes valeurs. La période est exprimée en seconde et on la symbolise par T .

La fréquence représente le nombre de périodes par seconde. On désigne la fréquence par f et on l'exprime en hertz (Hz).

La relation entre la période et la fréquence d'un courant alternatif ou n'importe quel autre signal alternatif est :

$$f = \frac{1}{T} \quad \text{et} \quad 1\text{Hz} = \frac{1}{\text{s}}$$

Un courant alternatif présente deux **alternances** :

- une alternance positive, représentée au-dessus de l'axe du temps, qui correspond à un certain sens du courant,

- une alternance négative, figurée au-dessous de l'axe horizontal, qui correspond au sens opposé de circulation du courant.

Au cours d'une alternance le sens du courant alternatif reste le même.

L'amplitude d'un courant alternatif est la plus grande valeur atteinte par le courant au cours d'une période. Elle peut être positive ou négative.

Un courant alternatif sinusoïdal est caractérisé par une variation sinusoïdale en fonction du temps (fig. 2 – 2).

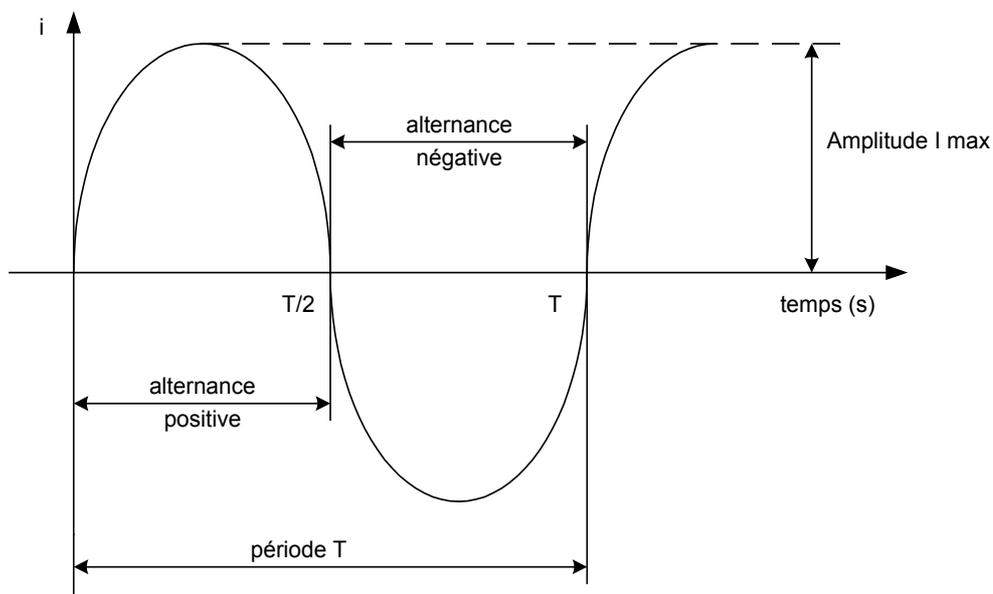


Fig. 2 - 2

Soit I_{\max} l'amplitude du courant alternatif sinusoïdal. On définit pour toute onde sinusoïdale une valeur efficace :

$$I = \frac{I_{\max}}{\sqrt{2}}, \quad I \text{ est la valeur efficace du courant et } I_{\max} \text{ l'amplitude.}$$

La valeur efficace d'un courant alternatif est égale à la valeur du courant continu qui provoquerait le même échauffement dans une même résistance.

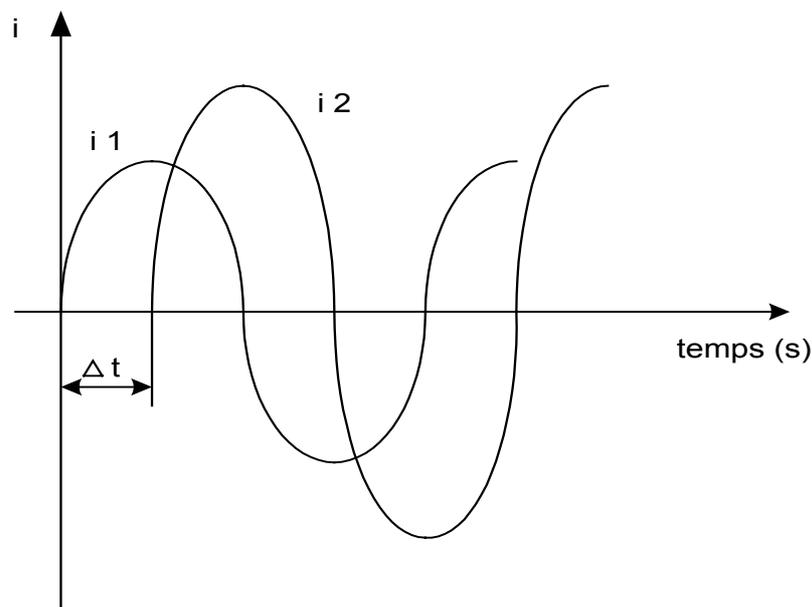
2.3. Déphasage

Lorsqu'on a deux grandeurs alternatives sinusoïdales de même fréquence on peut mettre en évidence le décalage entre les deux ondes qui les représentent. Ce décalage est appelé **le déphasage**.

Le déphasage entre deux grandeurs sinusoïdales peut être identifié facilement lorsqu'on représente les deux grandeurs sur le même système de référence.

L'origine du déphasage peut être :

- un décalage du temps (fig. 2 – 3) ;
- un décalage d'amplitude.



Le déphasage dans le temps de deux grandeurs sinusoïdales

Fig. 2 - 3

2.4. Caractéristiques d'une onde sinusoïdale

L'expression mathématique d'une onde (ou bien grandeur) sinusoïdale est :

$$a = A_m \sin (\omega t + \varphi)$$

où les symboles ont les significations suivantes :

- a : la valeur instantanée de la grandeur, correspondant au moment de temps quelconque t .
- A_m : l'amplitude, appelée aussi valeur de crête de la grandeur. C'est la plus grande valeur que puisse atteindre l'onde sinusoïdale.
- $\omega t + \varphi$: la phase de la grandeur sinusoïdale exprimé en radian.
- φ : la phase initiale ; elle comprend la valeur du temps $t = 0$, c'est donc la phase à l'origine du temps, au début de l'onde. La phase s'exprime en radian, symbole rad.
- ω : la pulsation de l'onde sinusoïdale exprimé en radian par seconde (rad/s).

Une onde sinusoïdale est une grandeur périodique, donc chaque onde sinusoïdale a sa période (T) et sa fréquence (f).

La pulsation de l'onde sinusoïdale s'exprime en fonction de la période par la formule :

$$\omega = 2 \pi f \quad \text{et comme } f = \frac{1}{T} \quad \text{on a également } \omega = \frac{2 \pi}{T}$$

En plus on définit la valeur efficace (symbole A) de la grandeur sinusoïdale :

$$A = \frac{A_m}{\sqrt{2}} = 0,707 A_m$$

La représentation graphique d'une onde sinusoïdale peut être effectuée soit en fonction du temps, soit en fonction de la phase.

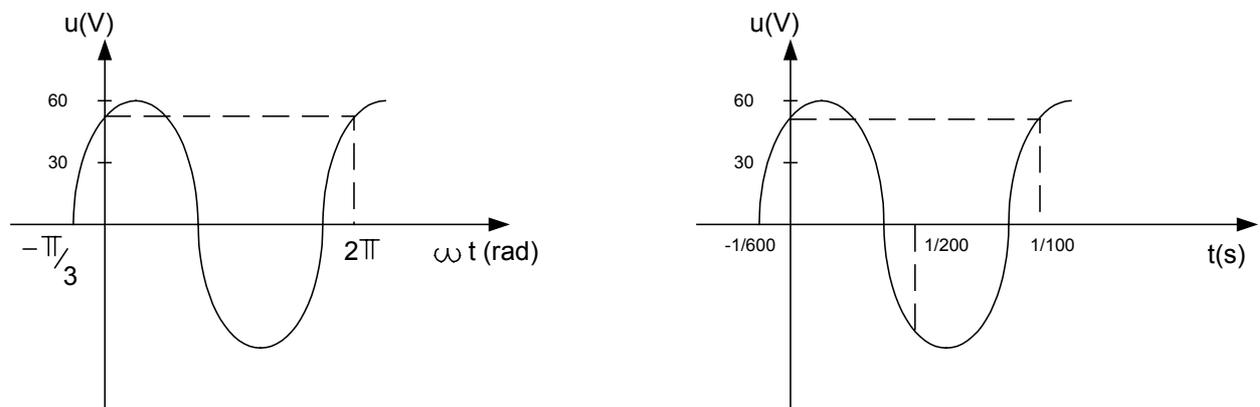
Prenons le cas d'une tension alternative sinusoïdale ayant l'expression :

$$u = 60 \sin (200 \pi t + \pi / 3) \quad (V)$$

- La valeur de crête est $U_m = 60V$
- La pulsation est $\omega = 200 \pi \text{ rad}$
- La période est calculée d'après la formule :

$$T = \frac{2\pi}{\omega}, \text{ donc } T = \frac{2\pi}{200} = \frac{1}{100} \text{ s}$$
- La fréquence est : $f = \frac{1}{T} = 100 \text{ Hz}$
- La phase initiale : $\varphi = \pi / 3$

La représentation graphique de cette onde (fig. 2 – 4) est présentée en 2 variantes :



a) en fonction de l'angle (phase)

b) en fonction du temps

Fig. 2 - 4

Remarque : La valeur efficace d'une grandeur sinusoïdale a une importance particulière pour l'étude des circuits de courant alternatif. Souvent on la met en évidence dans l'expression de la grandeur de la manière suivante :

$$a = A \sqrt{2} \sin (\omega t + \varphi)$$

A - est la valeur efficace de la grandeur alternative,

$A \sqrt{2}$ - c'est l'amplitude A_m de celle-ci.

3. EFFET DES INDUCTANCES

Dans cette partie on étudie le comportement des bobines en courant alternatif, mais au début il faut faire un rappel de leurs propriétés les plus importantes.

3.1. Inductance d'une bobine

Lorsqu'un courant continu passe dans une bobine, celle-ci produit un champ magnétique. Le flux magnétique dans la bobine et le courant sont reliés par la relation :

$$\Phi = L \times I$$

Φ : la valeur du flux en Weber (symbole Wb);

L : l'inductance de la bobine en Henry (symbole H);

I : le courant en Ampère (symbole A).

L'inductance de la bobine est une grandeur qui dépend de ces caractéristiques constructives. On prend pour exemple le cas d'une bobine longue, pour laquelle l'expression de l'inductance est :

$$L = \mu \frac{N^2 S}{l}$$

Où :

μ : perméabilité magnétique du noyau de la bobine en Henry sur mètre (H/m);

N : nombre de spire de la bobine;

S : aire de la section de la bobine en m²;

l : longueur de la bobine en m.

3.2. Inductance mutuelle

Par définition l'inductance mutuelle des deux bobines représente le rapport entre la tension induite dans une bobine et le taux de variation du courant dans l'autre.

Le symbole de l'induction mutuelle est M . Elle est exprimée aussi en Henry (H).

Lorsque deux bobines réalisent un couplage inductif (fig. 3 – 1), les équations des flux mutuelles Φ_1 et Φ_2 sont :

$$\Phi_1 = L_1 I_1 + M I_2$$

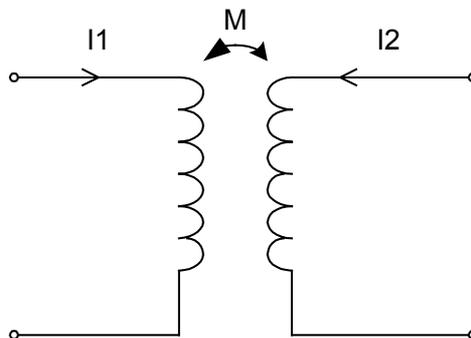
$$\Phi_2 = L_2 I_2 + M I_1$$

Où :

I_1, I_2 : les courant dans les deux bobines;

L_1, L_2 : les inductances des deux bobines;

M : l'inductance mutuelle.



Couplage mutuel de deux bobines

Fig. 3 - 1

3.3. Réactance inductive

Si une bobine est alimentée avec une tension alternative sinusoïdale de fréquence f . On constate l'apparition dans la bobine d'un courant alternatif de même fréquence.

En plus la tension effective est proportionnelle au courant effectif dans la bobine. Leur rapport est une caractéristique de la bobine, la **réactance inductive** X_L .

L'expression de la réactance inductive est :

$$X_L = L \omega \quad , \quad \text{où} \quad \omega = 2\pi.f$$

X_L : réactance inductive en Ohm (Ω);

L : inductance de la bobine en Henry (H);

f : la fréquence en Hertz (Hz).

La loi d'Ohm pour une bobine alimentée en courant alternatif prend la forme :

$$I = \frac{U}{X_L} \quad , \quad X_L = L 2\pi f$$

Où :

I : le courant efficace en A;

U : la tension efficace en V;

X_L : la réactance inductive de la bobine en Ω .

3.4. Déphasage entre le courant et la tension

Lorsqu'on visualise à l'aide d'un oscilloscope bicourbe les graphes de la tension alternative aux bornes d'une bobine et du courant alternatif engendré on obtient l'oscillogramme suivant (fig. 3 – 2) :

Les graphes mettent en évidence le déphasage d'un quart de période ($T/4$) de la tension en avant sur le courant.

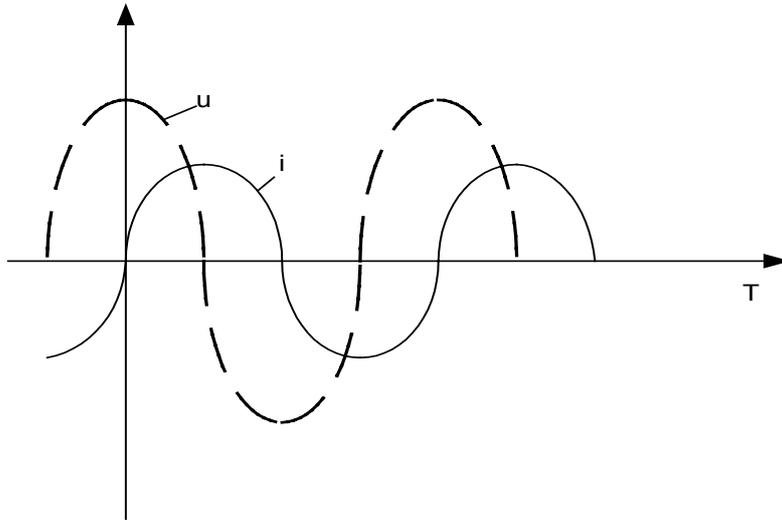


Fig. 3 - 2

3.5. Groupements d'inductances

3.5.1. Groupement en série

Si deux bobines d'inductance L_1 et L_2 sont reliées en série dans un circuit de courant alternatif, l'inductance équivalente est la somme des inductances des deux bobines.

Donc :

$$L_e = L_1 + L_2$$

On peut généralisé pour plusieurs bobines :

$$L_e = L_1 + L_2 + L_3 + \dots + L_n$$

3.5.2. Groupement en parallèle

Si deux bobines d'inductance L_1 et L_2 sont reliées en parallèle dans un circuit de courant alternatif, l'inverse de l'inductance équivalente est la somme des inverses des inductances des bobines :

$$\frac{1}{L} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2}$$

Ce résultat peut être généralisé pour plusieurs bobines en parallèle.

$$\frac{1}{L} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \frac{1}{L_3} + \dots + \frac{1}{L_n}$$

4. EFFET DES CONDENSATEURS

Dans cette partie on étudie le comportement des condensateurs en courant alternatif, mais au début il faut faire un rappel de leurs propriétés les plus importantes.

4.1. Constitution

Un condensateur est constitué par deux surfaces métalliques appelées *armatures* séparées par un isolant ou *diélectrique*. Lorsqu'il est relié à une tension électrique le condensateur se charge.

Soit Q la quantité d'électricité emmagasinée, la charge prise par le condensateur est proportionnelle à la tension appliquée à ses bornes.

$$Q = C U$$

Où :

U : la tension aux bornes en volt, (V)

C : la capacité du condensateur en farad, (F)

Q : la charge en coulomb, (C).

Le **Farad** c'est une unité trop grande, voilà pourquoi on utilise les sous-multiples suivants :

Le microfarad $1\mu\text{F} = 10^{-6} \text{ F}$

Le nanofarad $1\text{nF} = 10^{-9} \text{ F}$

Le picofarad $1\text{pF} = 10^{-12} \text{ F}$

4.2. Capacité d'un condensateur plan

La capacité d'un condensateur est proportionnelle à la surface des plaques, inversement proportionnel à la distance entre les armatures et elle dépend également de la nature de l'isolant. Pour un condensateur plan la formule de la capacité est :

$$C = \varepsilon \frac{S}{d}$$

Où :

C : la capacité du condensateur en farad, (F)

S : la surface des plaques en m²

d : la distance entre les armatures en m

ε : la permittivité électrique de l'isolant en F/m.

4.3. Types de condensateurs

Il y a une large gamme de condensateurs industriels qui peuvent être classifiés d'après la forme des armatures, la nature de l'isolant, etc. On distingue :

- Condensateurs aux armatures fixes :
 - Condensateurs au papier
 - Condensateurs au plastique
 - Condensateurs à l'huile
 - Condensateurs électrochimiques
- Condensateurs variables (utilisant l'air comme isolant).

4.4. Groupements de condensateurs

4.4.1. Groupement en série

Soit deux condensateurs de capacité C_1 et C_2 reliés en série, l'inverse de la capacité équivalente C_e est égale à la somme des inverses des capacités.

$$\frac{1}{C_e} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$$

Ce résultat peut être généralisé pour plusieurs condensateurs en série :

$$\frac{1}{C_e} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \dots + \frac{1}{C_n}$$

4.4.2. Groupement en parallèle

La capacité équivalente des deux condensateurs en parallèle est égale à la somme des capacités

$$C_e = C_1 + C_2$$

Ce résultat peut être généralisé pour plusieurs condensateurs en parallèle :

$$C_e = C_1 + C_2 + C_3 \dots + C_n$$

Remarque importante: Le condensateur arrête le passage du courant continu

4.5. Réactance capacitive

Lorsqu'on applique aux bornes d'un condensateur une tension alternative à fréquence f on constate l'apparition d'un courant alternatif de même fréquence. En plus la tension efficace est proportionnelle au courant efficace dans le condensateur. Leur rapport est une caractéristique du condensateur qu'on appelle la **réactance capacitive** (symbole X_c).

L'expression de la réactance capacitive est :

$$X_c = \frac{1}{C\omega} \quad \text{ou} \quad \omega = 2 \cdot \pi \cdot f$$

Où :

X_c : la réactance capacitive en ohm (Ω)

- C : la capacité du condensateur en Farad (F)
f : la fréquence en Hertz (Hz)
 ω : la pulsation en radian par seconde, rad/s

La loi d'Ohm pour un condensateur alimenté en courant alternatif prend la forme :

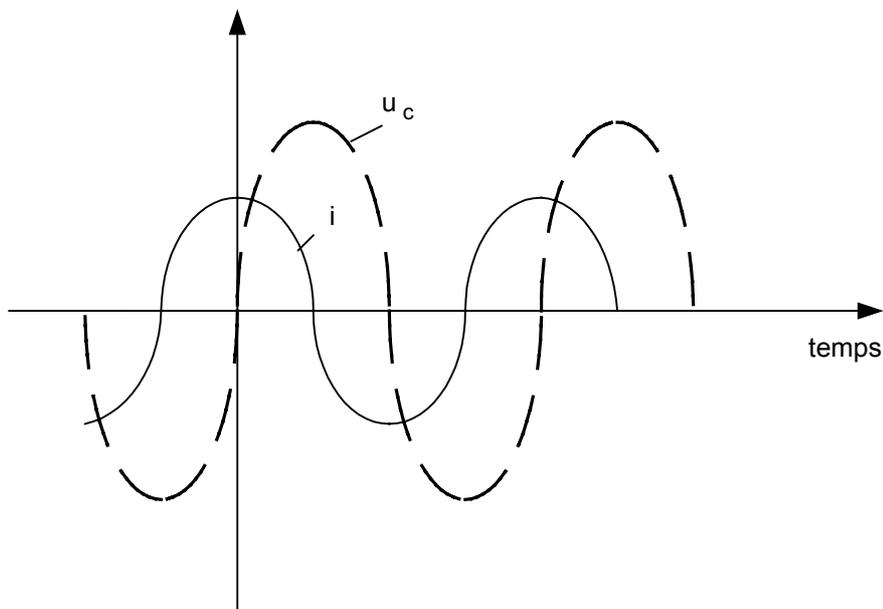
$$I = U / X_c ; I = U.C \omega$$

Où:

- I : le courant efficace en A
U : la tension efficace en V
 X_c : la réactance capacitive en Ω

4.6. Déphasage entre courant et tension

Lorsqu'on visualise à l'aide d'un oscilloscope bicourbe les graphes de la tension alternative aux bornes d'un condensateur et du courant alternatif qui le traverse, on obtient l'oscillogramme présenté ci-dessous (fig. 4 - 1) :



Déphasage de la tension par rapport au courant d'un condensateur

Fig. 4 - 1

Les graphes mettent en évidence le déphasage du courant, en avance d'un quart de période ($T/4$) sur la tension.

5. LOIS DE ELECTROMAGNETISME

Cette partie présente quelques phénomènes et les lois importantes de l'électromagnétisme qui sont à la base d'un grand nombre d'applications reposant sur l'utilisation de l'énergie électrique.

5.1. Champ magnétique créé par un courant électrique

Un conducteur parcouru par un courant électrique crée un champ magnétique ayant de lignes de champ fermées autour de celui-ci (fig. 5 – 1).

5.1.1. Forme et sens du champ

On peut mettre en évidence la forme du champ en utilisant la limaille de fer saupoudré sur un carton traversé par le conducteur parcouru par le courant. La limaille se dispose autour du conducteur en une série de cercles concentriques relevant la présence et la forme de lignes du champ.

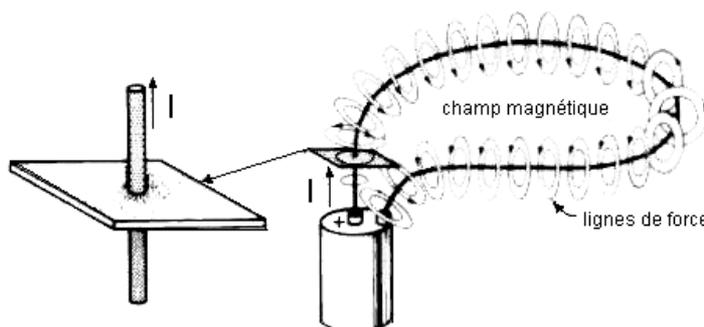


Fig. 5 - 1

Le sens des lignes du champ peut être déterminé à l'aide d'une boussole mais il est plus simple d'utiliser une des 2 règles suivantes :

- *Règle du tire-bouchon* : le sens de ligne du champ est le sens de rotation du tire-bouchon qui avance dans le sens du courant.
- *Règle de la main droite* : on tient le conducteur dans la main droite, le pouce étant orienté dans le sens du courant les doigts pointeront dans le sens du flux (fig. 5 – 2).

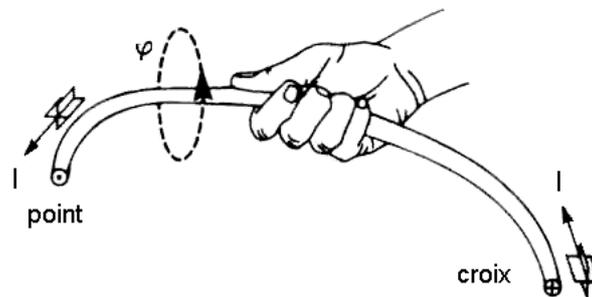


Fig. 5 - 2

5.1.2. Densité du flux

Lorsque on s'éloigne du conducteur on remarque la diminution de la densité du flux magnétique. En effet, les lignes de force qui entourent le conducteur deviennent de plus en plus espacées. A quelques centimètres du conducteur le champ devient si faible qu'il réussit à peine à faire dévier l'aiguille d'une boussole.

On peut calculer la valeur de la densité du flux autour d'un conducteur rectiligne par la formule :

$$B = 2 \times 10^{-7} \times \frac{I}{d}$$

Où :

- B : la densité du flux en tesla, (T)
- I : le courant en ampère, (A)
- d : la distance au centre du conducteur en mètre.

2×10^{-7} : la constante tenant compte des unités

5.1.3. Force magnétomotrice (f.m.m.)

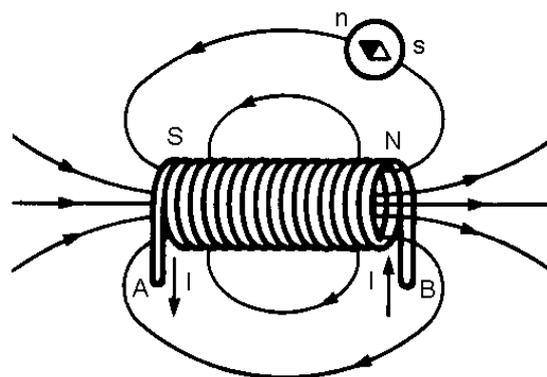
On appelle la *force magnétomotrice* d'une bobine le produit du courant qui la traverse par le nombre de spires. L'unité de la force magnétomotrice en SI est l'ampère [A].

5.1.4. Champ magnétique d'une bobine longue

Un courant qui parcourt une bobine produit autour un champ magnétique. A l'intérieur de la bobine les lignes de force sont parallèles à son axe, à l'extérieur elles se referment d'une extrémité vers l'autre (fig. 5 – 3).

On appelle le pôle Nord l'extrémité de la bobine par laquelle sortent les lignes de force et le pôle Sud l'extrémité par laquelle elles rentrent.

Le sens des lignes de force peut être déterminé avec la règle de la main droite : lorsque les doigts indiqueront le sens du courant dans la bobine, le pouce est pointé vers le pôle Nord. Par ailleurs on peut mettre en évidence le sens des lignes du champ avec une boussole.



Champ magnétique créé par une solénoïde

Fig. 5 - 3

5.2. Force électromagnétique

Lorsqu'un conducteur parcouru par un courant est placé dans un champ magnétique, une force appelée électromagnétique s'exerce sur celui-ci. La valeur maximale de la force électromagnétique correspond à une orientation perpendiculaire du conducteur par rapport aux lignes du champ. Elle est donnée par l'équation :

$$F = B \times I \times l$$

où :

F : la force électromagnétique agissant sur le conducteur [N]

B : densité du flux en tesla [T]

l : longueur du conducteur placé dans le champ en [m]

I : courant circulant dans le conducteur [A]

Remarque : Lorsque le conducteur est parallèle au champ, la force électromagnétique est nul.

Le sens de la force électromagnétique peut être déterminé avec la *règle des trois doigts* :

- 1 - Orienter le pouce, l'index et le majeur de la main droite afin qu'ils soient à 90° l'un sur l'autre.**
- 2 - Pointer le majeur dans la direction du flux**
- 3 - Pointer l'index dans la direction du courant**
- 4 - Le pouce indiquera le sens de la force électromagnétique**

5.3. Induction électromagnétique

Le phénomène de l'induction électromagnétique fut découvert par Michael Faraday en 1831. Il consiste en l'apparition d'une tension induite appelée force électromotrice (f.é.m.) induite dans un circuit électrique à l'intérieur duquel le flux varie avec le temps.

La valeur de cette tension induite est proportionnelle au taux de variation du flux. La loi de l'induction électromagnétique a pour l'expression :

$$E = \frac{\Delta \phi}{\Delta T}$$

où :

E : tension induite en volt

$\Delta \phi$: variation du flux à l'intérieur du circuit en (Wb)

ΔT : intervalle de temps en secondes (s)

On peut facilement mettre en évidence le phénomène de l'induction électromagnétique. Il suffit de déplacer un aimant à l'intérieur d'une bobine aux bornes de laquelle on branche un voltmètre. L'indication de l'appareil coïncide avec le mouvement de l'aimant et cesse une fois que celui-ci est en état de repos.

5.3.1. Loi de Lenz

La polarité de la tension induite est telle qu'elle tend à faire circuler un courant dont le flux s'oppose à la variation du flux inducteur à l'intérieur du circuit.

La loi de l'induction électromagnétique a un grand nombre d'applications pratiques dont la plupart repose sur son action génératrice. Parmi les plus répandues il faut citer les dynamos et les alternateurs qui transforment l'énergie mécanique en énergie électrique.

5.3.2. Tension induite dans un conducteur

Lorsqu'on déplace un conducteur rectiligne dans un champ magnétique de façon à couper les lignes de force, il apparaît une différence de potentiel entre ses extrémités. On dit qu'une tension est induite dans le conducteur. La valeur de la

tension induite dépend seulement du flux coupé par seconde conformément à la loi de l'induction électromagnétique.

$$E = \frac{\Delta \phi}{\Delta T}$$

Si le conducteur rectiligne coupe les lignes du flux à l'angle droit, la valeur de la tension induite prend la forme :

$$E = \frac{B}{v}$$

car la variation du flux est due à la surface balayée par le conducteur :

$$\Delta \phi = B \times \Delta S = B \times l \times v \times \Delta T$$

- E : la tension induite en volts [V]
- B : la densité de flux en teslas [T]
- l : la longueur du conducteur dans le champ en mètres [m]
- v : la vitesse de déplacement en mètre/secondes [m/s]

La polarité de la tension induite peut être déterminé par la règle des trois doigts (la règle de Fleming) (fig. 5 – 4) :

- 1 - Éteindre les doigts de la main droite de sorte que le pouce soit perpendiculaire aux doigts index et majeur écartés à 90°.
- 2 - Pointer le pouce dans la direction du déplacement du conducteur.
- 3 - Pointer l'index dans la direction du flux.
- 4 - Le majeur indiquera l'extrémité (+) du conducteur.

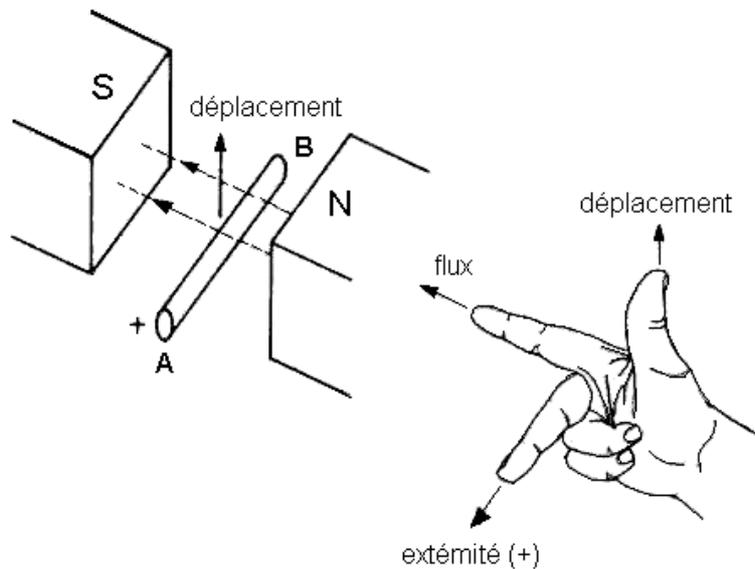


Fig. 5 - 4

6. CARACTERISTIQUES DES TRANSFORMATEURS

Dans ce chapitre seront présentées les notions élémentaires sur le transformateur qui est par ailleurs un des plus simples et utiles appareils électriques.

Le transformateur permet de modifier les paramètres tension et courant de la puissance d'un circuit électrique en courant alternatif. De cette manière il assure les meilleurs performances économiques pour le transport de l'énergie électrique à grandes distances et sa distribution dans les récepteurs.

6.1. Structure élémentaire du transformateur

Les éléments constitutifs principaux d'un transformateur sont :

- le circuit magnétique ;
- les deux enroulements : l'un appelé primaire de N_1 spires et l'autre secondaire de N_2 spires (fig. 6 – 1).

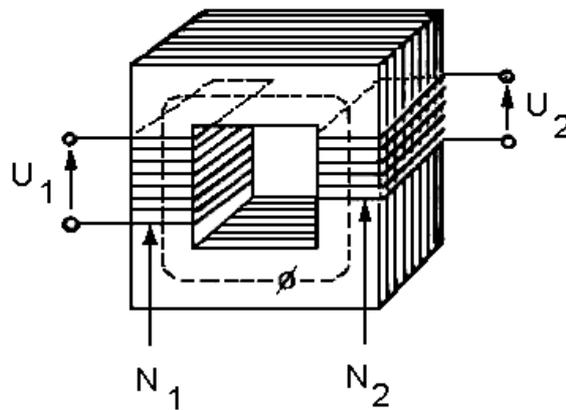


Fig. 6 - 1

Lorsque l'enroulement primaire est alimenté avec une tension alternative U_1 , un flux magnétique est créé par celle-ci. Le flux variable se renferme par le circuit magnétique et il induit dans l'enroulement secondaire, conformément à la loi de l'induction électromagnétique, une force électromotrice (f.é.m.).

Si on branche aux bornes de ce secondaire un récepteur il sera parcouru par un courant alternatif, ayant pour cause la f.é.m. induite. La puissance électrique passe du primaire par l'intermédiaire de la variation du flux au circuit secondaire où elle peut être consommée par un récepteur.

Le flux créé par le courant dans le circuit primaire peut être divisé en deux parties : un flux mutuel Φ_{m1} qui embrasse les spires du secondaire et produit la f.é.m. et un flux de fuite qui ne les embrasse pas.

Pour obtenir une grande f.é.m. et un bon couplage entre les bobines on dispose le secondaire par dessus le primaire. Ainsi le flux de fuite n'est plus qu'une fraction négligeable du flux total et le flux mutuel atteint presque la valeur du flux créé par le primaire.

Dans ce cas le circuit magnétique est dit de forme cuirassée. Les enroulements sont disposés sur la colonne centrale et le flux se renferme à travers les deux colonnes latérales de section réduite à la moitié par rapport à celle de la colonne centrale.

La fig. 6 - 2 présente les formes des tôles pour un circuit magnétique d'un transformateur monophasé de forme cuirassée.

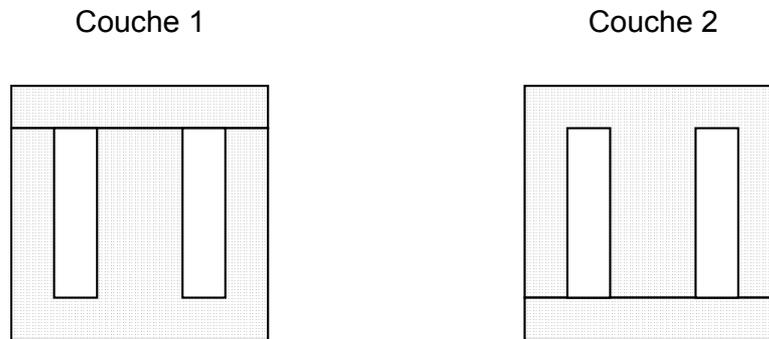


Fig. 6 - 2

6.2. Rapport de transformation

La relation entre la tension inductrice dans le primaire et la f.é.m. induite dans le secondaire constitue le rapport de transformation du transformateur et son expression est :

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

Ou :

U_1 : la tension inductrice au primaire en [V]

U_2 : la f.é.m. au secondaire

N_1 : le nombre de spires du primaire

N_2 : le nombre de spires du secondaire

Le rapport de transformation dépend des nombres de spires et il est indépendant de la charge.

Lorsqu'une charge est raccordée au secondaire d'un transformateur, un courant I_2 s'établit tout de suite. (fig. 6 - 3).

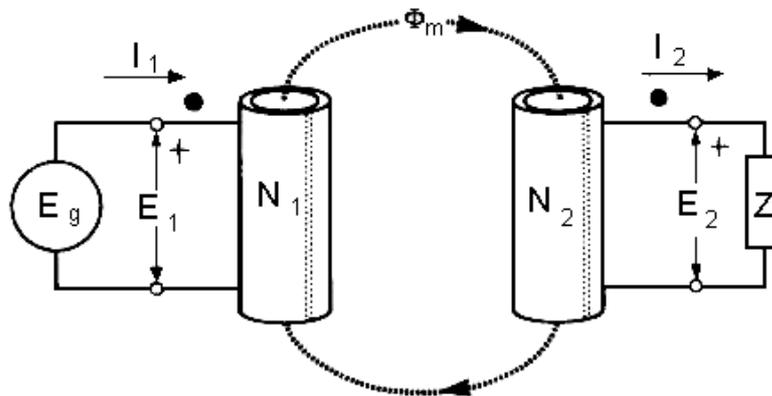


Fig. 6 - 3

Dans le cas d'un transformateur idéal il n'y a aucune perte de puissance, donc les puissances apparentes dans le primaire et le secondaire sont égales :

$$S_1 = S_2$$

Les expressions des puissances apparentes sont :

$$S_1 = U_1 \times I_1$$

$$S_2 = U_2 \times I_2$$

On a $U_1 \times I_1 = U_2 \times I_2$ ou encore $\frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1} = \frac{N_1}{N_2}$

Remarque : L'épaisseur du fils de l'enroulement dépend de l'intensité du courant.

Ainsi pour un transformateur élévateur de tension, la tension primaire U_1 sera inférieure à celle du secondaire, le courant primaire I_1 sera supérieur à celui du secondaire. L'enroulement primaire comprendra un petit nombre de spires en fil épais et l'enroulement secondaire, un grand nombre de spires en fil fin.

Si le transformateur est abaisseur de tension le fil sera plus gros au secondaire. Il faut mentionner que le transformateur est parfaitement réversible en ce sens que le primaire peut agir comme un secondaire et vice-versé.

6.3. Polarité de transformateur

Dans un transformateur monophasé alimenté par une tension alternative U_1 les bornes de l'enroulement primaire sont repérées par les nombre 1 et 2 et les bornes du secondaire sont repérées par 3 et 4 (fig. 6 - 4). Au secondaire on obtient la f.é.m. induite U_2 . Supposant qu'au moment où les tensions atteignent leur maximum la borne 1 est positive par rapport à la borne 2 et que la borne 3 est positive par rapport à la borne 4, on dit que les bornes 1 et 3 possèdent la même polarité.

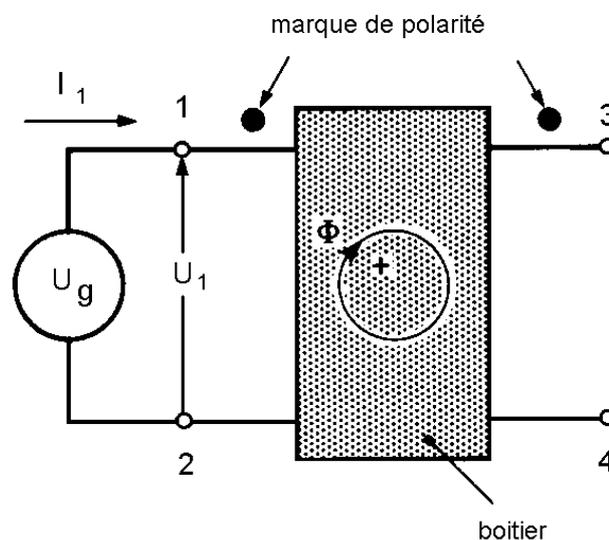


Fig. 6 - 4

On indique la polarité en plaçant un point noir vis-à-vis de la borne 1 et un autre vis-à-vis de la borne 3. Ces points sont appelés des marques de polarité.

Remarque : On pourrait aussi bien placer les marques de polarité à côté des bornes 2 et 4 car elles deviennent à leur tour simultanément positives.

6.4. Problèmes d'isolement

Il est nécessaire de bien isoler les enroulements entre eux et par rapport à la masse. On utilise des écrans isolants placés entre la masse et les bobinages ou entre les bobinages primaire et secondaire.

Pour le transformateur de forme cuirassée l'enroulement de basse tension est disposé sur la colonne. Elle est plus facile à bobiner et à isoler.

6.5. Autotransformateur

C'est un transformateur composé d'un enroulement unique sur lequel on réalise une prise qui peut être fixe ou réglable. L'enroulement est monté sur un noyau d'acier.

La haute tension comprend tout l'enroulement et la basse tension est obtenue entre une extrémité de l'enroulement haute tension et une prise intermédiaire.

La tension induite est proportionnelle au nombre de spires. Ainsi pour une tension d'alimentation U_1 dans la primaire comprenant N_1 spires et une prise C (fig. 6 - 5), donnant accès à une section de N_2 spires, la tension induite U_2 accessible dans le secondaire est :

$$U_2 = \frac{N_2}{N_1} \times U_1$$

Cette relation est la même que celle obtenue avec un transformateur à 2 enroulement séparés N_1 et N_2 . Cependant l'enroulement secondaire fait partie de l'enroulement primaire. Il suit que l'autotransformateur est plus petit, moins lourd et moins coûteux qu'un transformateur conventionnel de même puissance.

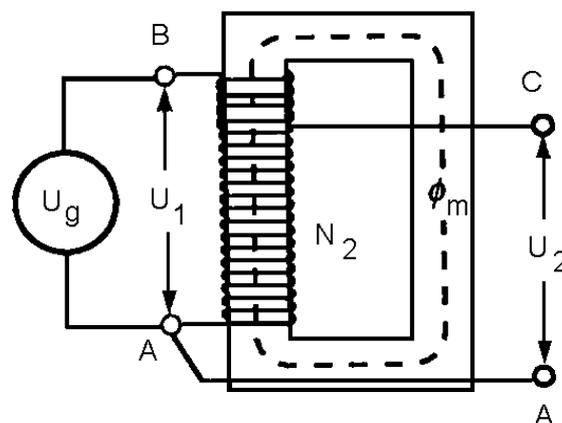


Fig. 6 - 5

Par contre l'absence d'isolation entre les enroulements de la basse tension et de la haute tension peut constituer un grand inconvénient et même être dangereux.

7. CARACTERISTIQUES DES CIRCUITS A COURANT ALTERNATIF

Dans les chapitres précédentes on a vu que les composants linéaires et passifs qu'on peut trouver dans les circuits de courant alternatif sont : les résistances, les bobines et les condensateurs et on a pris connaissance de leurs caractéristiques.

Un circuit de courant alternatif peut comprendre un, deux ou plusieurs composants des types mentionnés, groupés d'une certaine façon, ou identifier l'association série, l'association parallèle ou l'association mixte des composants.

L'alimentation d'un circuit à courant alternatif est réalisée avec une tension alternative sinusoïdale qui s'applique aux bornes du circuit.

Quelque soit la structure du circuit on peut identifier le courant principal du circuit : c'est le courant qui sort d'une borne d'alimentation et entre dans l'autre borne d'alimentation.

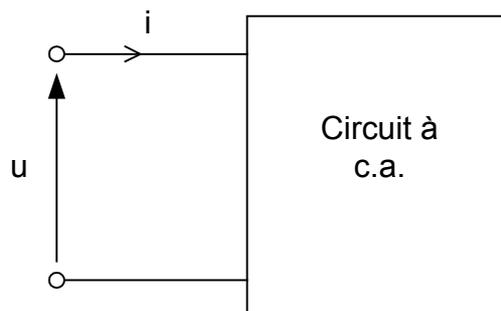


Fig. 7 - 1

La fig. 7 - 1 présente symboliquement un circuit à courant alternatif, d'une structure quelconque, alimenté avec la tension alternative de valeur efficace U et parcourue par le courant principal de valeur efficace I .

Par définition, l'impédance d'un circuit à courant alternatif est le rapport entre la tension efficace appliquée aux bornes et le courant efficace principal de celui-ci.

L'impédance est une caractéristique très importante du circuit à courant alternatif. Elle est symbolisée par la lettre majuscule Z. Alors :

$$Z = \frac{U}{I}$$

Où :

- U : la tension efficace en Volt.
- I : le courant efficace en Ampère.**
- Z : l'impédance en Ohm (Ω).

La puissance apparente d'un circuit à courant alternatif est exprimée par le produit entre la tension efficace aux bornes du circuit et le courant efficace principal.

Le symbole de la puissance apparente est S, donc :

$$S = U \times I$$

Où :

- U : la tension en volts (V)
- I : le courant en ampères (A)**
- S : la puissance apparente en volt-ampères (VA).

On remarque que l'unité de la puissance apparente n'est pas le watt, par ailleurs l'unité de mesure de la puissance. En fait, la puissance apparente n'est pas la puissance consommée dans le circuit respectif. La puissance efficace consommée dans le circuit est appelée puissance active et elle est exprimée en watts (W).

7.1. Représentation vectorielle des grandeurs sinusoïdales

Dans une des chapitres précédentes on a mis en évidence l'existence d'un déphasage entre les grandeurs - tension et courant alternatif - associées à un élément de circuit.

Dans le cas d'une résistance pure la tension et le courant sont en phase.

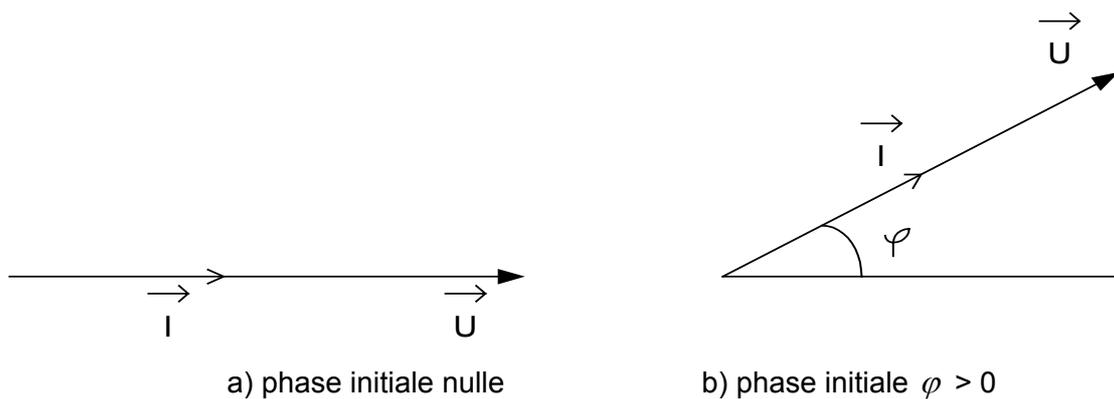
Dans le cas d'une bobine (inductance pure), la tension est déphasé de 90° en avant sur le courant.

Dans le cas d'un condensateur (capacité pure), la tension est déphasé de 90° en arrière sur le courant.

La plus part des récepteurs ne sont pas des éléments purs de circuit, la tension et le courant associés sont déphasé d'un angle différent de 90° . La grandeur qui caractérise dans ce cas le récepteur est l'impédance.

Le physicien français Fresnel a proposé une représentation vectorielle des grandeurs sinusoïdales de la même fréquence : le module du vecteur est proportionnel à la valeur efficace de la grandeur et l'orientation du vecteur est définie par rapport à une axe de référence des phases et elle garde le sens trigonométrique positif.

La représentation vectorielle permet de mettre en évidence le déphasage entre les grandeurs sinusoïdales de même fréquence, associées à un élément ou à un circuit.

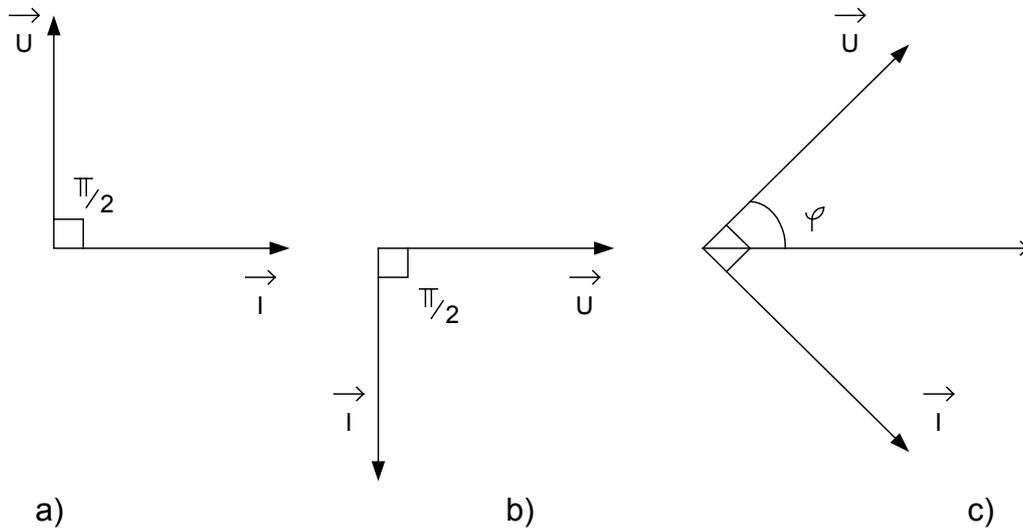


Représentation des vecteurs de la tension et du courant dans le cas d'une résistance pure

Fig. 7 - 2

Les figures ci-dessus donnent la représentation des vecteurs de la tension et du courant associés à chaque élément idéal de circuit : résistance pure (fig. 7 - 2),

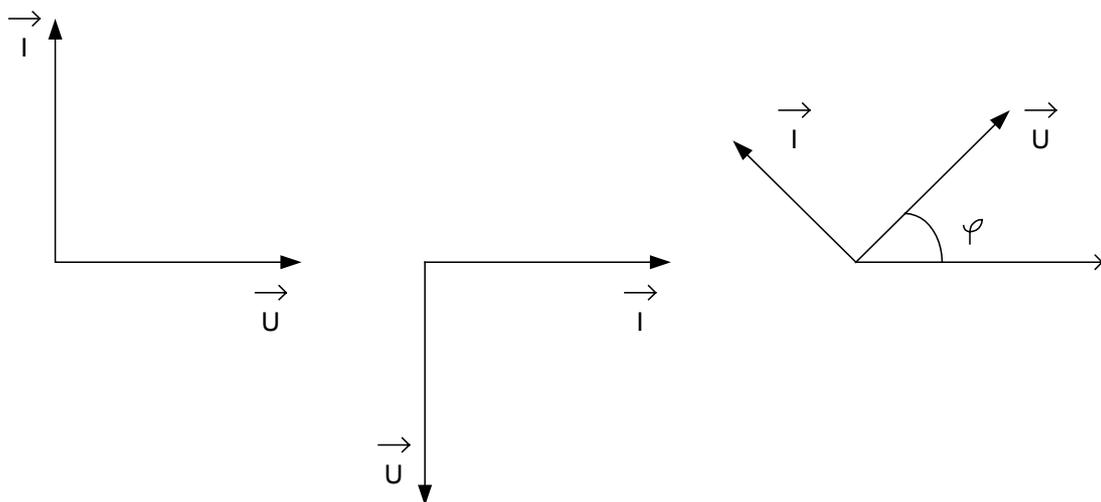
inductance pure (fig. 7 – 3) et capacité pure (fig. 7 - 4), ainsi qu'à des éléments réels caractérisés par l'impédance (fig. 7 - 5).



Représentation des vecteurs de la tension et du courant dans le cas d'une inductance pure

- a) Le vecteur du courant est pris comme référence ; b) Le vecteur de la tension pris comme référence ; c) Le vecteur d'origines des phases pris comme référence

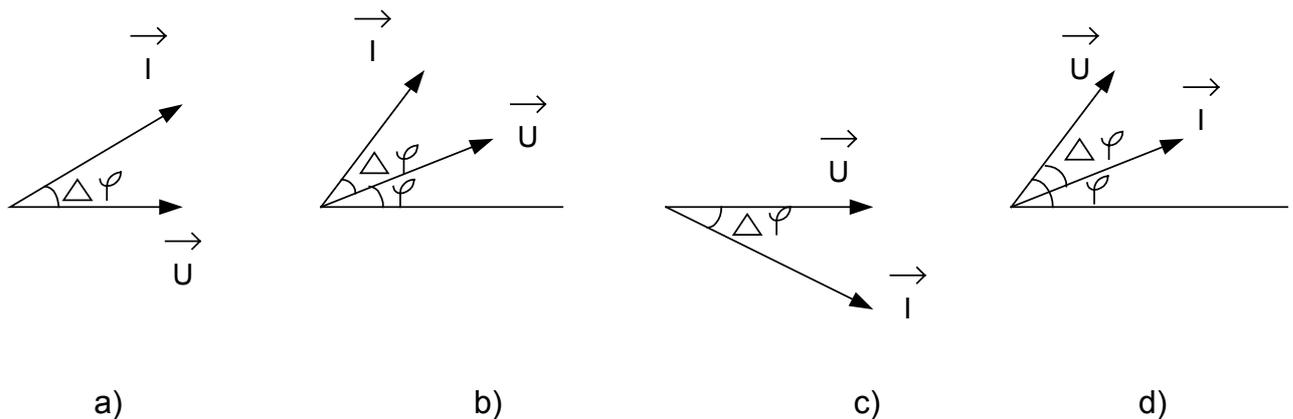
Fig. 7 - 3



Représentation des vecteurs de la tension et du courant dans le cas d'une capacité pure

- a) Le vecteur du courant est pris comme référence ; b) Le vecteur de la tension pris comme référence ; c) Le vecteur d'origines des phases pris comme référence

Fig. 7 - 4



Représentation des vecteurs de la tension et du courant dans le cas d'un récepteur réel :

- Récepteur à caractère capacitif (le courant de phase $\Delta\varphi < 90^\circ$ en avant sur la tension), vecteur tension comme référence (phase nulle) ;
- Récepteur à caractère capacitif (le courant est déphasé de $\Delta\varphi < 90^\circ$ en avant sur la tension), vecteur tension de phase $\varphi > 0$;
- Récepteur à caractère inductif (le courant est déphasé de $\Delta\varphi < 90^\circ$ en arrière sur la tension), vecteur tension comme référence (plan nulle)
- Récepteur à caractère inductif (le courant est déphasé de $\Delta\varphi < 90^\circ$ en arrière sur la tension), vecteur tension de phase $\varphi > 0$.

Fig. 7 - 5

Conclusion :

Le comportement des composants en courant alternatif, visant le déphasage entre le courant et la tension qui leurs sont associés, peut être mis en évidence avec la représentation vectorielle :

- Un déphasage de 0° indique que le composant est une résistance.
- Un déphasage de 90° caractérise une réactance (donc une bobine ou un condensateur).
- Un déphasage compris entre 0° et 90° indique une impédance (donc un récepteur réel).

7.2. Diagramme vectoriel d'un circuit à courant alternatif

Le chapitre étudie les combinaisons en série et en parallèle des éléments passifs des circuits en courant alternatif : la résistance, la bobine et le condensateur, en utilisant les diagrammes vectoriels.

7.2.1. Circuit R – L – C série

Soit un circuit constitué d'une résistance de valeur R, d'une bobine d'inductance L et d'un condensateur de capacité C associés en série et alimentés avec une tension alternatif de valeur efficace U et de fréquence f. Un courant alternatif de valeur efficace I s'établit dans le circuit. Les tensions aux bornes de chaque composant seront U_R , U_L et U_C (fig. 7 - 6).

Les valeurs efficaces de ces tensions ont pour l'expression :

$U_R = R I$ la tension efficace aux bornes de la résistance.

$U_L = X_L I$ la tension efficace aux bornes de la bobine avec X_L la réactance inductive de la bobine, où $X_L = L \omega$, et $\omega = 2\pi f$

$U_C = X_C I$ la tension efficace aux bornes du condensateur, avec X_C la réactance capacitive du condensateur, ou $X_C = \frac{1}{C\omega}$ et $\omega = 2\pi f$

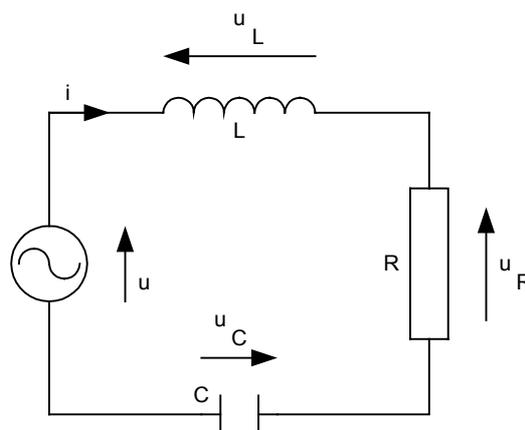


Fig. 7 - 6

Les représentations des vecteurs de la tension et du courant pour chaque composant : résistance, inductance et condensateur, sont présentées sur la fig. 7 – 7.

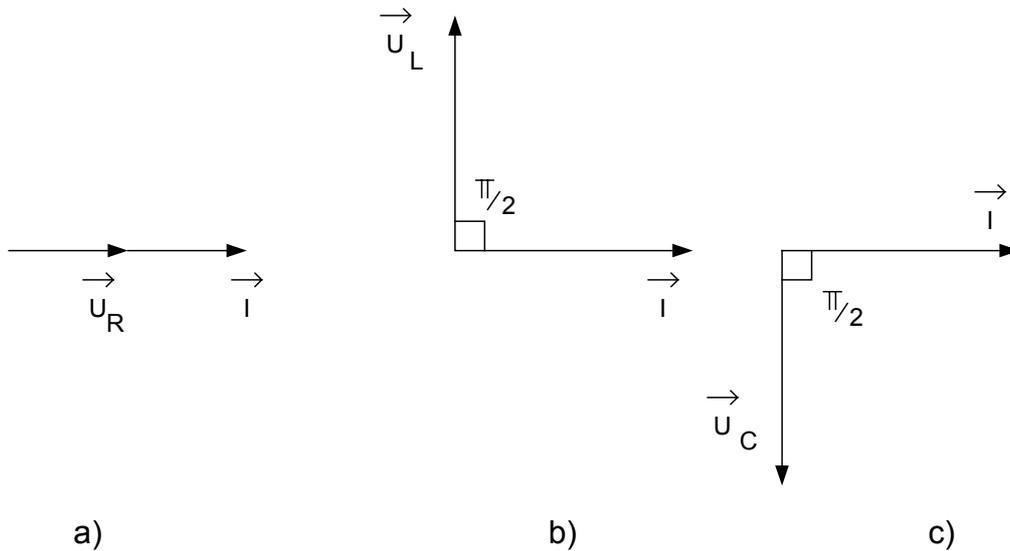


Fig. 7 - 7

Le vecteur représentant la tension U est donné par la somme vectorielle des vecteurs : U_R , U_L et U_C (la loi des mailles pour un circuit en série). On obtient graphiquement le vecteur U en traçant le diagramme vectoriel du circuit.

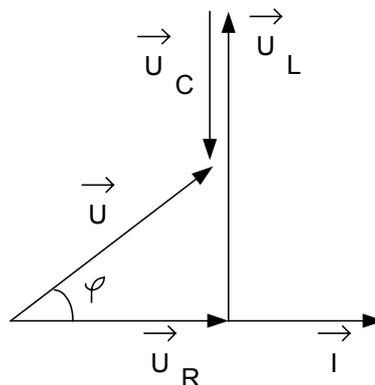


Fig. 7 - 8

En effet, le diagramme vectoriel est obtenu suite à la combinaison des représentations des vecteurs de la tension et du courant pour chaque composant. On choisit le courant comme référence des phases car il est commun pour tous les composants (fig. 7 – 8)

Les vecteurs des tensions U_R , U_L et U_C sont disposés de sorte qu'ils réalisent une ligne polygonale (l'extrémité du U_R coïncide avec l'origine du U_L , l'extrémité du U_L coïncide avec l'origine du U_C) tout en présentant leurs déphasages sur le vecteur du courant I : 0° pour U_R et 90° pour U_L et -90° pour U_C . Le vecteur U referme la ligne polygonale réalisée par les vecteurs des tensions.

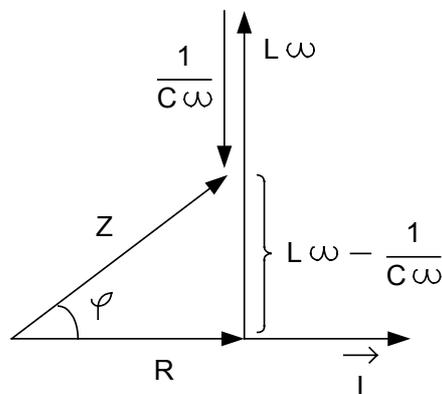


Fig. 7 - 9

Le diagramme vectoriel réalisé (appelé aussi le diagramme de Fresnel) permet d'obtenir graphiquement les phases et les modules des vecteurs représentés. Ainsi on a marqué le déphasage φ entre la tension aux bornes du circuit et le courant.

Il est possible de tracer le diagramme de Fresnel à l'échelle des impédances. Il suffit de diviser par I le module de chacun des vecteurs représentant les tensions aux bornes des éléments U_R , U_L et U_C pour obtenir une représentation homologue qu'on appelle **le triangle des impédances** (fig. 7 – 9).

7.2.2. Circuit R – L – C parallèle

Soit un circuit constitué d'une résistance R, d'une bobine d'inductance L et d'un condensateur de capacité C associés en parallèle et alimentés avec tension alternative de valeur efficace U et fréquence f. Les trois composants associés en parallèle sont soumis à cette même tension U. Dans chaque composant s'établit un courant alternatif de valeur efficace I_R pour la résistance, I_L pour la bobine et I_C pour le condensateur et I c'est la valeur efficace du courant principal dans le circuit (fig. 7 – 10).

Les valeurs efficaces de ces courants ont les expressions suivantes :

$$I_R = \frac{U}{R}, \quad \text{le courant efficace à travers la résistance ;}$$

$$I_L = \frac{U}{X_L}, \quad \text{le courant efficace à travers la bobine, où } X_L \text{ est la réactance inductive, } X_L = L \omega$$

$$I_C = \frac{U}{X_C}, \quad \text{le courant efficace à travers le condensateur, où } X_C \text{ est la réactance capacitive, } X_C = \frac{1}{C\omega}$$

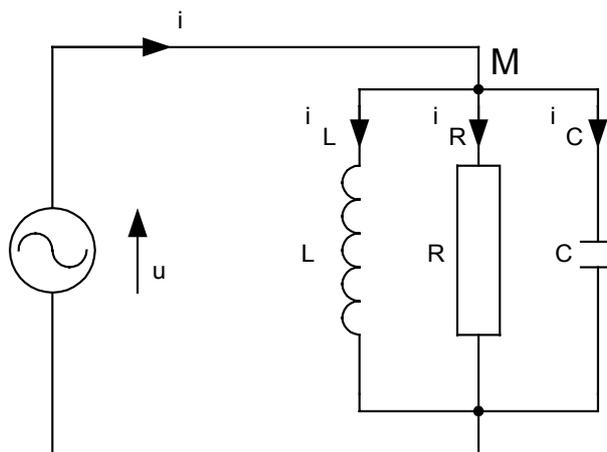


Fig. 7 - 10

Les représentations des vecteurs de la tension et du courant pour chaque composant : résistance, bobine et condensateur, sont présentées sur la fig. 7 - 11 :

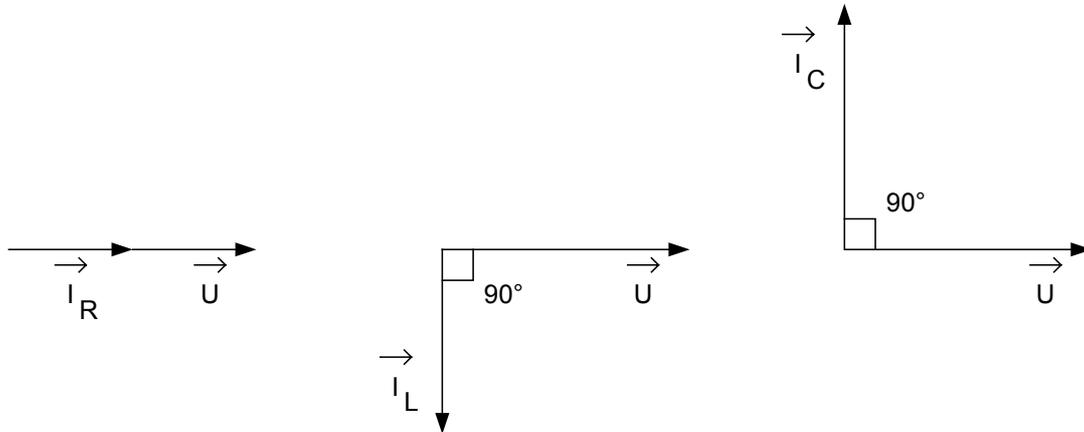


Fig. 7 - 11

Le vecteur I représentant le courant principal du circuit est donné par la somme vectorielle des vecteurs I_R , I_L et I_C .

On obtient graphiquement le vecteur I en rassemblant les représentations des vecteurs tension – courant pour chaque composant du diagramme vectoriel (fig. 7 – 12).

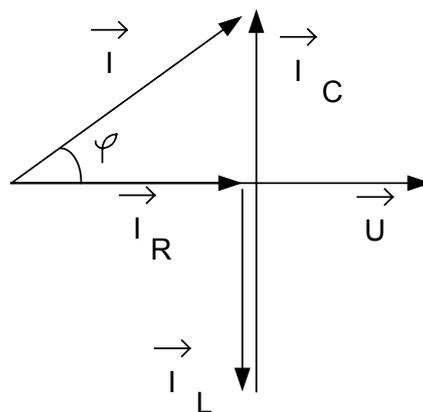


Fig. 7 - 12

Il est commode de choisir le vecteur de la tension comme référence des phases car pour le groupement parallèle la tension est commune pour tous les composants (la loi des nœuds).

Les vecteurs I_R , I_L , et I_C sont disposés de sorte qu'ils réalisent une ligne polygonale (l'extrémité du I_R coïncide avec l'origine du I_L ; l'extrémité du I_L coïncide avec l'origine du vecteur I_C) tout en préservant leur déphasage sur le vecteur de la tension $U : 0$ pour la résistance, -90° pour la bobine et 90° pour le condensateur. Le vecteur I referme la ligne polygonale réalisée par les vecteurs des courants.

Le diagramme vectoriel réalisé (appelé aussi le diagramme de Fresnel) permet d'obtenir graphiquement les phases et les modules des vecteurs représentés. L'angle marqué correspond au déphasage entre la tension aux bornes du circuit et le courant principal.

L'admittance représente l'inverse de l'impédance. Cette grandeur est symbolisé par Y :

$$Y = \frac{1}{Z}$$

Lorsqu'on divise par U le module de chacun des vecteurs représentant les courants dans chaque composant : I_R , I_L et I_C , on obtient une représentation homologue qu'on appelle **le triangle d'admittances** (fig. 7 – 13).

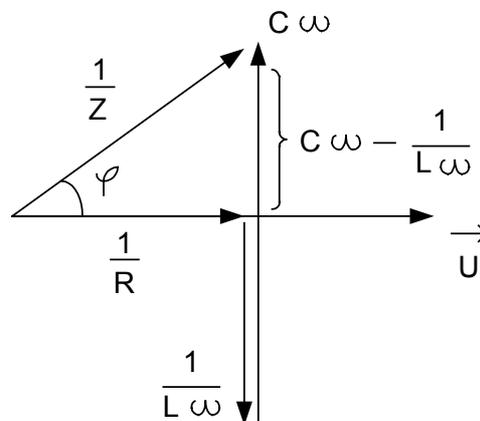


Fig. 7 – 13

7.3. Calcul des valeurs aux différents points d'un circuit à courant alternatif

Dans ce chapitre on complète l'étude des circuits simples série et parallèle en courant alternatif avec le calcul des grandeurs caractéristiques : l'impédance, le déphasage, le facteur de puissance, le courant principal.

7.3.1. Circuit R – L – C série

Rappelons les significations des symboles utilisés (fig. 7 – 14) :

U : la tension efficace aux bornes du circuit

I : le courant efficace dans le circuit

Les expressions des tensions efficaces aux bornes de chaque élément sont :

$U_R = I R$, pour la résistance

$U_L = I X_L$, pour la bobine, $X_L = L \omega$ étant sa réactance inductive.

$U_C = I X_C$, pour le condensateur ; $X_C = \frac{1}{C \omega}$ étant sa réactance capacitive

Dans le triangle rectangle des tensions, mis en évidence dans le diagramme de Fresnel (fig. 7 – 15), on peut appliquer le théorème de Pythagore :

$$U^2 = U_R^2 + (U_L - U_C)^2$$

Lorsqu'on remplace les tensions aux bornes des éléments par leurs expressions, on trouve :

$$U^2 = (I R)^2 + (I X_L - I X_C)^2 \text{ et } U^2 = I^2 [R^2 + (X_L - X_C)^2]$$

D'où la valeur efficace du courant dans le circuit :

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}}$$

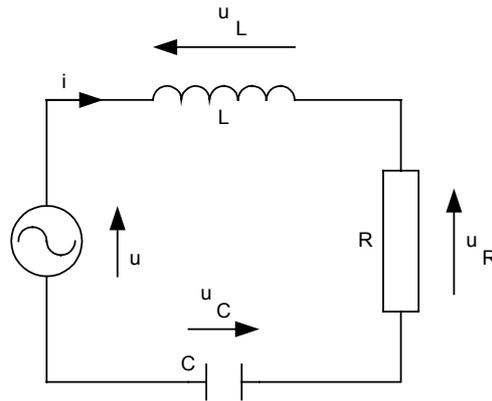


Fig. 7 - 14

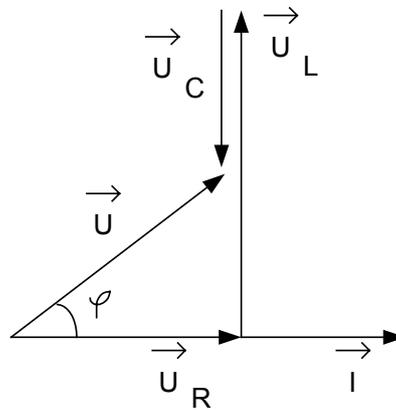


Fig. 7 - 15

soit également :

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (L\omega - \frac{1}{C\omega})^2}}$$

L'impédance du circuit R - L - C série (définie comme le rapport entre la tension et le courant aux bornes du circuit) :

$$Z = \sqrt{R^2 + (L\omega - \frac{1}{C\omega})^2}$$

Remarque : On pourrait déterminer l'impédance à partir du triangle d'impédances présenté auparavant et redessiné ci-dessous (fig. 7 – 16).

$$Z = \sqrt{R^2 + (L\omega - \frac{1}{C\omega})^2}$$

L'angle de déphasage φ entre la tension et le courant est compris entre -90° et 90° , tel que :

$$\text{tg } \varphi = \frac{L\omega - \frac{1}{C\omega}}{R}$$

- Pour $L\omega > 1/C\omega$, $90 > \varphi > 0$ et le circuit est appelé à caractère inductif.
- Pour $L\omega < 1/C\omega$, $-90 > \varphi < 0$ et le circuit est appelé à caractère capacitif.
- Pour $L\omega = 1/C\omega$, $\varphi = 0$ et le circuit est en résonance.

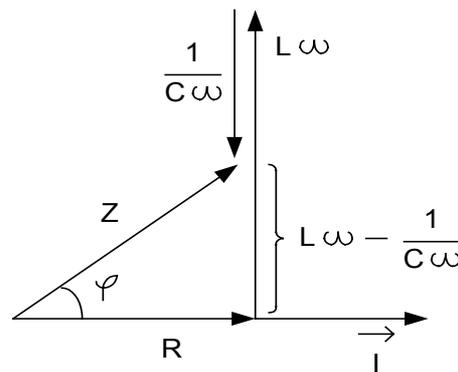


Fig. 7 - 16

Le triangle d'impédance permet aussi l'évaluation du facteur de puissance en fonction des caractéristiques des composants.

$$\cos \varphi = \frac{R}{Z} \quad \text{ou} \quad \cos \varphi = \frac{R}{\sqrt{R^2 + (L\omega - \frac{1}{C\omega})^2}}$$

7.3.2. Circuit R – L – C parallèle

Rappelons les significations des symboles utilisés (fig. 7 – 17) :

U : la tension efficace aux bornes du circuit et en même temps aux bornes de chaque élément.

I : le courant principal dans le circuit.

Les expressions des valeurs efficaces des courants à travers chaque élément sont :

$I_R = U / R$ pour la résistance.

$I_L = U / X_L$ pour la bobine, où $X_L = L\omega$ étant sa réactance inductive.

$I_C = U / X_C$ pour le condensateur, où $X_C = \frac{1}{C\omega}$ étant sa réactance capacitive.

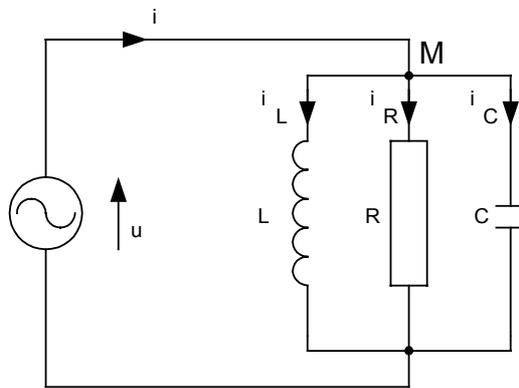


Fig. 7 - 17

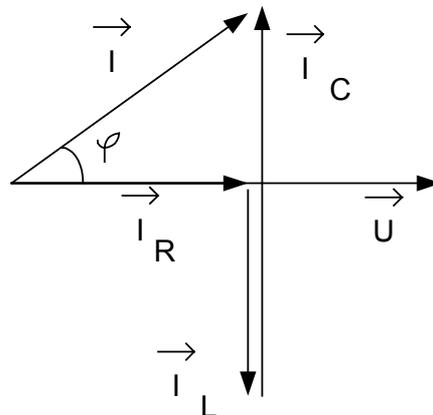


Fig. 7 - 18

Si on applique le théorème de Pythagore dans le triangle rectangle mis en évidence par le diagramme de Fresnel (fig. 7 – 18) :

$$I^2 = I_R^2 + (I_C - I_L)^2$$

Lorsqu'on remplace les courants dans les composants par leurs expressions, on obtient :

$$I^2 = \left(\frac{U}{R}\right)^2 + \left(\frac{U}{X_C} - \frac{U}{X_L}\right)^2$$

soit également :

$$I^2 = U^2 \left[\frac{1}{R^2} + \left(\frac{1}{X_C} - \frac{1}{X_L}\right)^2 \right]$$

D'où la valeur efficace du courant principal dans le circuit :

$$I = U \sqrt{\frac{1}{R^2} + \left(\frac{1}{X_C} - \frac{1}{X_L}\right)^2}$$

Soit :

$$I = U \sqrt{\frac{1}{R^2} + \left(C\omega - \frac{1}{L\omega}\right)^2}$$

Et l'admittance du circuit R-L-C parallèle définie comme le rapport entre le courant effectif et la tension effective aux bornes du circuit :

$$Y = \sqrt{\frac{1}{R^2} + \left(C\omega - \frac{1}{L\omega}\right)^2}$$

L'impédance du circuit qui est l'inverse de l'admittance a pour l'expression :

$$Z = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{R^2} + \left(C\omega - \frac{1}{L\omega}\right)^2}}$$

Remarque : On pourrait déterminer l'admittance du circuit à partir du triangle d'admittances, associé au circuit, présenté auparavant et redessiné ci-dessous (fig. 7 – 19):

$$Y = \sqrt{\frac{1}{R^2} + (C\omega - \frac{1}{L\omega})^2}$$

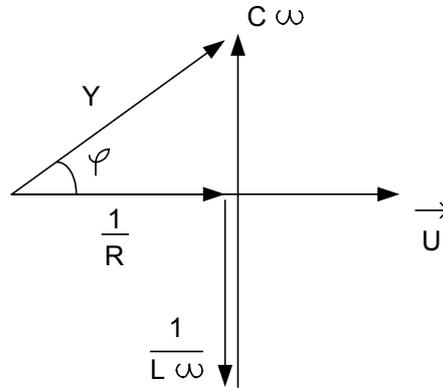


Fig. 7 - 19

L'angle de déphasage φ entre la tension et le courant est compris entre -90° et 90° .

Il peut être exprimé tel que :

$$\text{tg } \varphi = R(C\omega - 1/L\omega)$$

- Pour $C\omega > \frac{1}{L\omega}$, le circuit à caractère capacitif.
- Pour $C\omega < \frac{1}{L\omega}$, le circuit à caractère inductif.
- Pour $C\omega = \frac{1}{L\omega}$, le circuit est en résonance.

On peut facilement déterminer aussi le facteur de puissance du circuit en fonction de ses caractéristiques :

$$\cos \varphi = \frac{1}{RY}, \quad \text{ou} \quad \cos \varphi = \frac{Z}{R} \quad \text{ou} \quad \text{encore}$$

$$\cos \varphi = \frac{1}{R \sqrt{\frac{1}{R^2} + (C\omega - \frac{1}{L\omega})^2}}$$

8. PUISSANCE

Ce chapitre a pour l'objectif l'étude de la puissance absorbée par un récepteur dans le cas du régime alternatif et sinusoïdal. On introduit les notions : les puissances active, réactive et apparente et l'importance du facteur de puissance.

8.1. Calcul de la puissance active

Soit un récepteur réel alimenté en courant alternatif sous une tension efficace U . La valeur efficace du courant qui le traverse est I . On considère un caractère inductif pour le récepteur. Le diagramme vectoriel associé au circuit est présenté sur la fig. 8 - 1 :

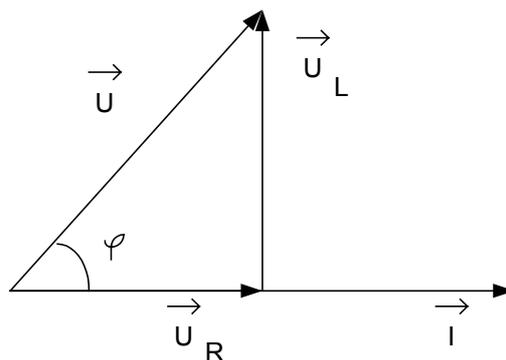


Fig. 8 - 1

Si on multiplie par I les côtés du triangle des tensions on peut obtenir un triangle des puissances (fig. 8 - 2) :

Le produit $U_R \cdot I$ exprime une *puissance réelle*. Elle est effectivement consommée dans le récepteur. Pour une puissance réelle les vecteurs du courant et de la tension sont en phase.

La puissance réelle, appelée la **puissance active**, correspond à un apport net d'énergie électromagnétique. La puissance active (réelle) est exprimée en W.

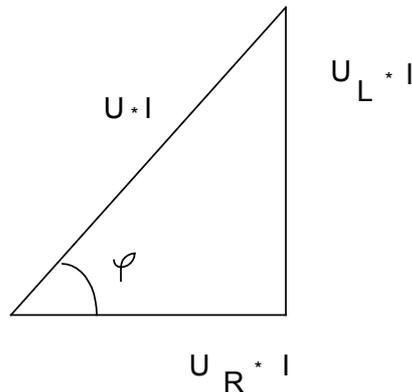


Fig. 8 - 2

8.2. Calcul de la puissance réactive

Le produit $U_L \cdot I$ (fig. 8 – 2) exprime une **puissance réactive**. Pour une puissance réactive les vecteurs de la tension et du courant sont déphasés de 90° , donc elle est associée aux éléments de circuit réactifs : la bobine et le condensateur.

La puissance réactive caractérise l'échange d'énergie que les éléments réactifs font avec l'extérieur.

La puissance réactive est exprimée en var (Volt Ampère Réactif) .

Pour un déphasage de la tension sur le courant de 90° la puissance réactive est positive (le cas de la bobine idéale).

Pour un déphasage du courant sur la tension de 90° la puissance réactive est négative (le cas d'un condensateur idéal).

8.3. Puissance apparente

Le produit $U \cdot I$ exprime une **puissance apparente** résultante d'une puissance réelle et une puissance réactive. La puissance apparente est exprimée en volt ampère (VA).

Les puissances active, réactive et apparente sont reliées entre elles par la relation :

$$S^2 = P^2 + Q^2$$

Où :

- S : la puissance apparente en VA
- P : la puissance active (réelle) en W
- Q : la puissance réactive en var

8.4. Facteur de puissance

Le facteur de puissance $\cos \varphi$ est défini comme le rapport entre la puissance active (réelle) et la puissance apparente :

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

On demande d'une installation électrique de fonctionner avec une efficacité élevée, donc avec un maximum de puissance active. Le facteur de puissance doit être le plus proche de l'unité.

Conclusion :

On peut construire le triangle de puissances ayant les trois puissances pour côtés pour tous les récepteurs, les circuits ou les installations en courant alternatif (fig. 8 – 3).

Les relations pour le calcul des puissances en fonction des grandeurs globales sont :

- pour la puissance apparente :

$$S = U I$$

- pour la puissance active :

$$P = U I \cos \varphi$$

- pour la puissance réactive :

$$Q = U I \sin \varphi$$

Où :

U = la tension efficace aux bornes du récepteur, du circuit ou de l'installation ;

I = le courant efficace dans le récepteur, le circuit ou l'installation ;

φ = le déphasage entre la tension U et le courant I aux bornes du récepteur, du circuit ou de l'installation ;

ou bien :

$$P = S \cos \varphi$$

$$Q = S \sin \varphi$$

$$P \operatorname{tg} \varphi = Q$$

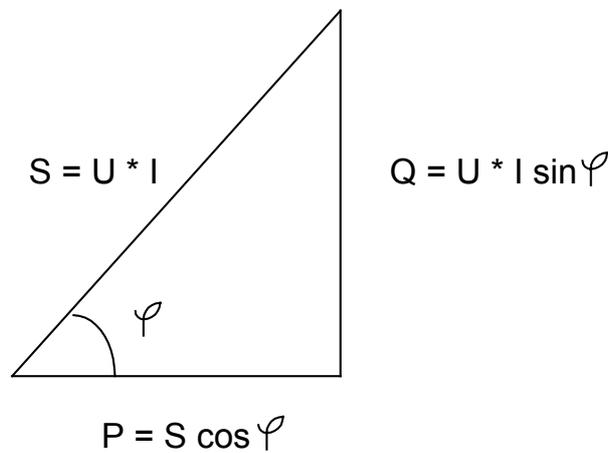


Fig. 8 – 3

9. CARACTERISTIQUES DES CIRCUITS EN RESONANCE

9.1. Résonance série

Soit le circuit composé d'une résistance R , une bobine L et un condensateur C , associés en série et alimentés avec un générateur basse fréquence (fig. 9 - 1).

La tension efficace du générateur est maintenue constante tout en modifiant la valeur de la fréquence. On peut trouver alors, une fréquence particulière pour laquelle les réactances des deux éléments réactifs sont égales :

$$X_L = X_C, \quad \text{soit : } L\omega = \frac{1}{C\omega}, \quad \text{soit : } f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

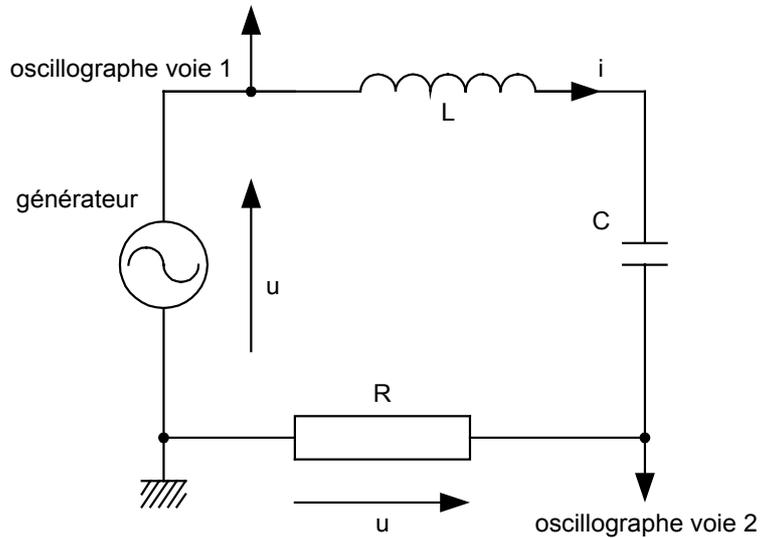


Fig. 9 - 1

Le diagramme vectoriel associé au circuit pour cette situation est décrite sur la fig. 9 - 2 :

On dit qu'à cette fréquence il y a la résonance du courant I dans le circuit R-L-C, ou que le circuit se trouve à la résonance.

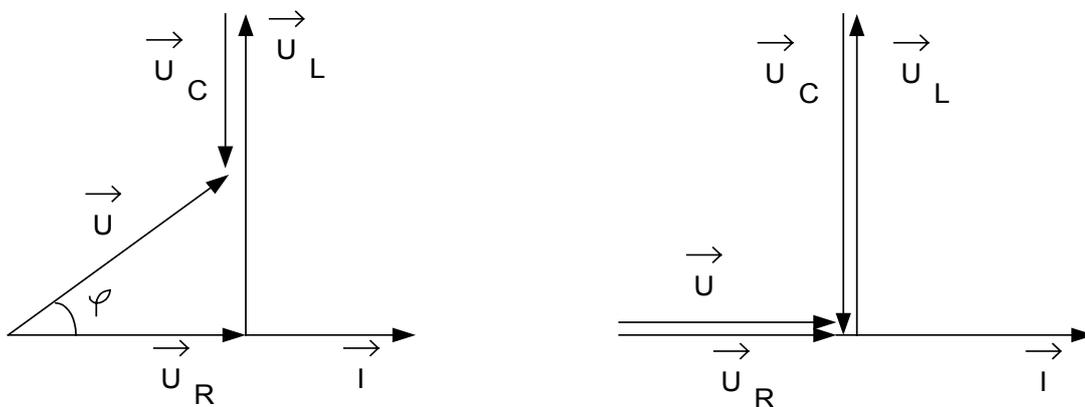


Diagramme de Fresnel pour $f \neq f_0$

Diagramme de Fresnel pour $f = f_0$

Fig. 9 - 2

9.1.1. Caractéristiques de la résonance série

La tension U_R aux bornes de la résistance devient égale à la tension d'alimentation U du circuit R-L-C. Ces deux tensions sont en phase. Le caractère du circuit est résistif. Le courant I et la tension U sont en phase.

Pour la fréquence de résonance :

- **le courant atteint un maximum dans le circuit, de même que la tension U_R ;**
- l'impédance du circuit devient égale à la résistance ;

$$Z = R$$

L'impédance d'un circuit R-L-C à la résonance est minimum.

La fréquence de résonance ne dépend que des caractéristiques des éléments réactifs :

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

9.1.2. Courbes de la résonance série

Les graphiques sur la fig. 9 - 3 présentent :

- la variation de l'impédance d'un circuit R-L-C série en fonction de la fréquence;
- la variation du courant dans un circuit R-L-C série en fonction de la fréquence d'une tension de valeur efficace constante.

Remarque :

A la résonance la tension d'alimentation est égale à la tension aux bornes de la résistance. Cela ne signifie pas que la bobine et le condensateur n'ont pas de tensions aux bornes. Les tensions aux bornes des éléments réactifs sont égales en valeur efficace mais déphasées de 180° une sur l'autre.

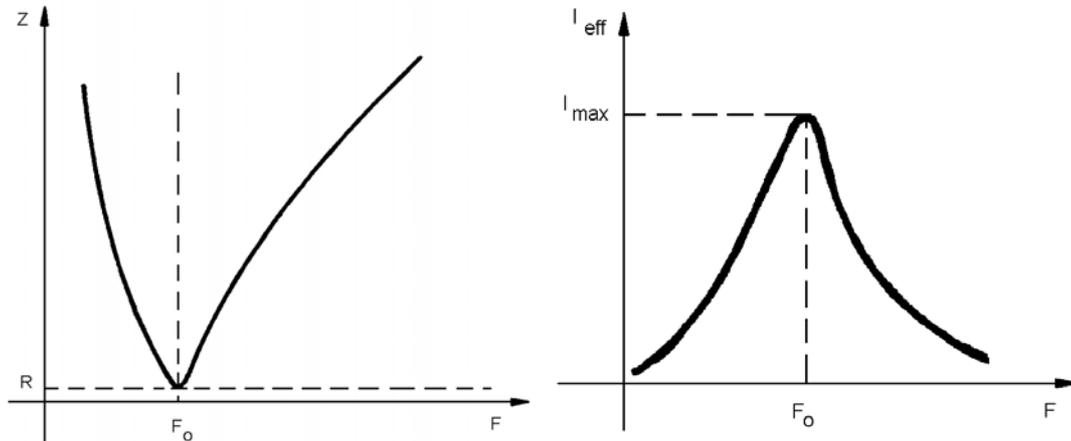


Fig. 9 - 3

9.1.3. Facteur de qualité du circuit Q

A la résonance d'un circuit R-L-C série la tension aux bornes des éléments réactifs peuvent même dépasser la tension d'alimentation.

On appelle le *facteur de qualité* du circuit (symbole Q) le rapport entre la tension aux bornes d'un élément réactif et la tension d'alimentation pour la fréquence de la résonance :

$$Q = \frac{U_{LO}}{U} = \frac{U_{CO}}{U} = \frac{\omega_0 L}{R} = \frac{1}{\omega_0 C R}$$

Comme $\omega_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ ou trouve :

$$Q = \frac{L}{2\pi R \sqrt{LC}} \quad \text{et} \quad Q = \frac{1}{2\pi R} \sqrt{\frac{L}{C}}$$

9.2. Résonance parallèle

Le circuit est composé d'une résistance R, d'une bobine L et d'un condensateur C associés en parallèle et alimentés par le générateur basse fréquence. La tension du

générateur est considérée de valeur efficace constante, mais sa fréquence peut être modifiée (fig. 9 - 4).

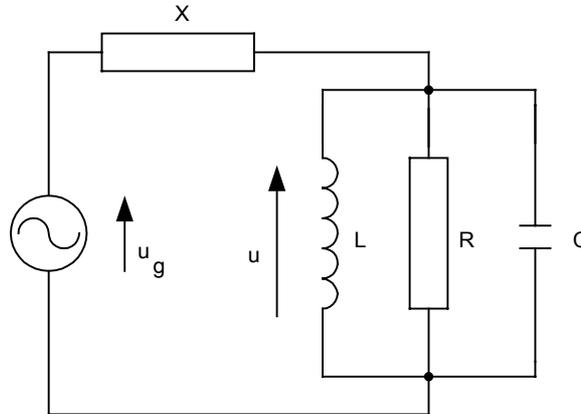


Fig. 9 - 4

Il existe une fréquence particulière pour laquelle les réactances des deux éléments réactifs sont égales :

$$X_L = X_C \quad \text{et} \quad L\omega = \frac{1}{C\omega} \quad f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

La condition de résonance ainsi que l'expression de la fréquence de résonance sont les mêmes que celles associées au circuit R-L-C série. Les diagrammes vectoriels associés sont présentés sur la fig. 9 - 5.

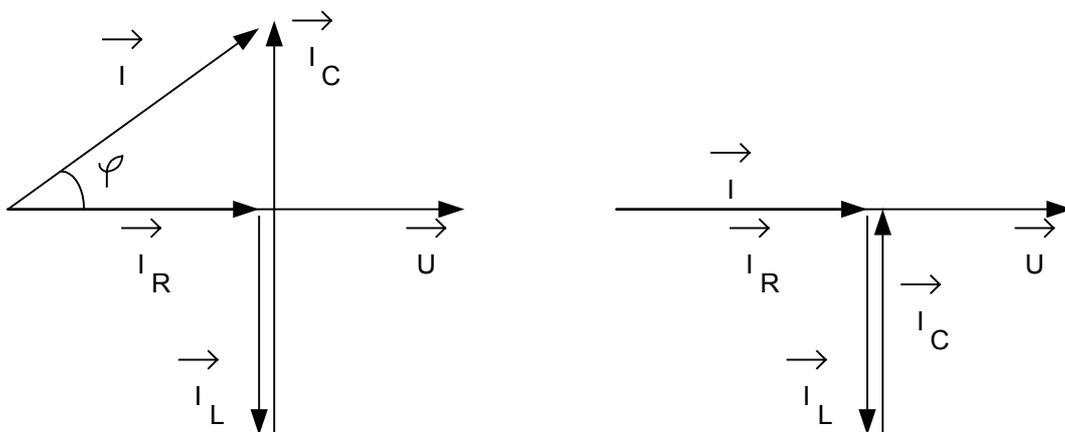


Diagramme de Fresnel pour $f \neq f_0$

Diagramme de Fresnel pour $f = f_0$

Fig. 9 - 5

On dit que pour cette fréquence f_0 il y a la résonance de la tension U ou aussi que le circuit R-L-C se trouve à la résonance.

9.2.1. Caractéristiques de la résonance parallèle

Le courant principal devient le courant dans le circuit en résonance. Le groupement obtient un caractère purement résistif et le courant total et la tension à ses bornes sont en phase.

Pour la fréquence de résonance :

- Le courant total du groupement parallèle atteint un minimum;
- L'impédance du circuit devient égale à la résistance

$$Z = R$$

Alors l'impédance d'un circuit R-L-C parallèle à la résonance est minimum. La fréquence de résonance ne dépend que des caractéristiques des éléments réactifs :

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

9.2.2. Courbes de la résonance parallèle

Les graphiques sur la fig. 9 - 6 présentent :

- la variation de l'impédance du circuit R-L-C parallèle en fonction de la fréquence;
- la variation du courant dans un circuit R-L-C parallèle en fonction de la fréquence d'une tension d'alimentation de valeur efficace constante.

Remarque :

A la résonance d'un circuit R-L-C parallèle le courant total du groupement est égal au courant dans la résistance. Cela ne signifie pas que les éléments réactifs ne seraient pas

parcourus par des courants. On observe dans le diagramme vectoriel que les courants dans les éléments réactifs sont égaux en valeur efficace, mais déphasés de 180° un sur l'autre.

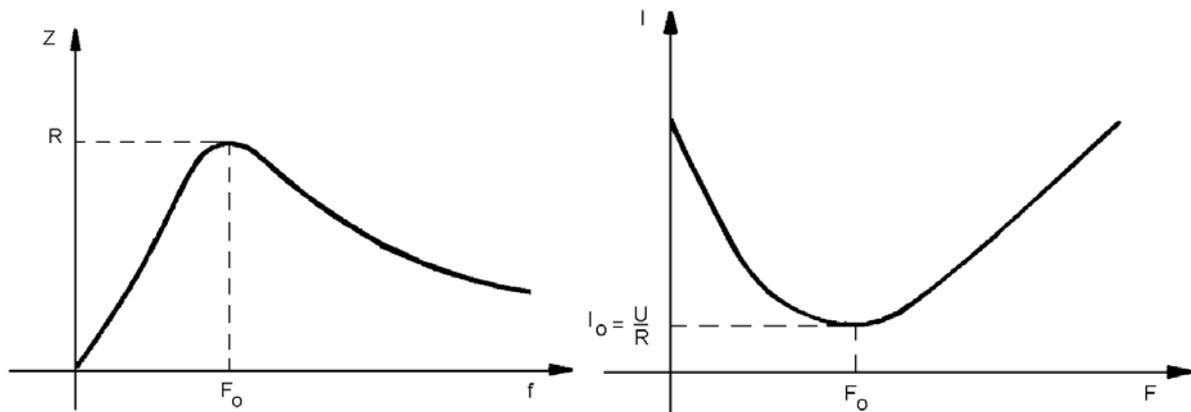


Fig. 9 – 6

10. CIRCUITS TRIPHASES

10.1. Système triphasé

10.1.1. Systèmes mono et polyphasés

Le système *monophasé* est un circuit simple à courant alternatif qui comporte 2 fils.

Le système *polyphasé* est un système de plusieurs circuits monophasés dont les f.é.m. possèdent la même fréquence, la même valeur maximale et sont décalées l'une par rapport à l'autre de même angle électrique.

10.1.2. Alternateur triphasé

Le système comportant trois circuits monophasés est produit par les alternateurs dont les bobines sont décalées l'une par rapport à l'autre à un angle électrique de $2\pi/3$ (fig. 10-1). Les expressions des f.é.m. induites sont (fig. 10 – 2) :

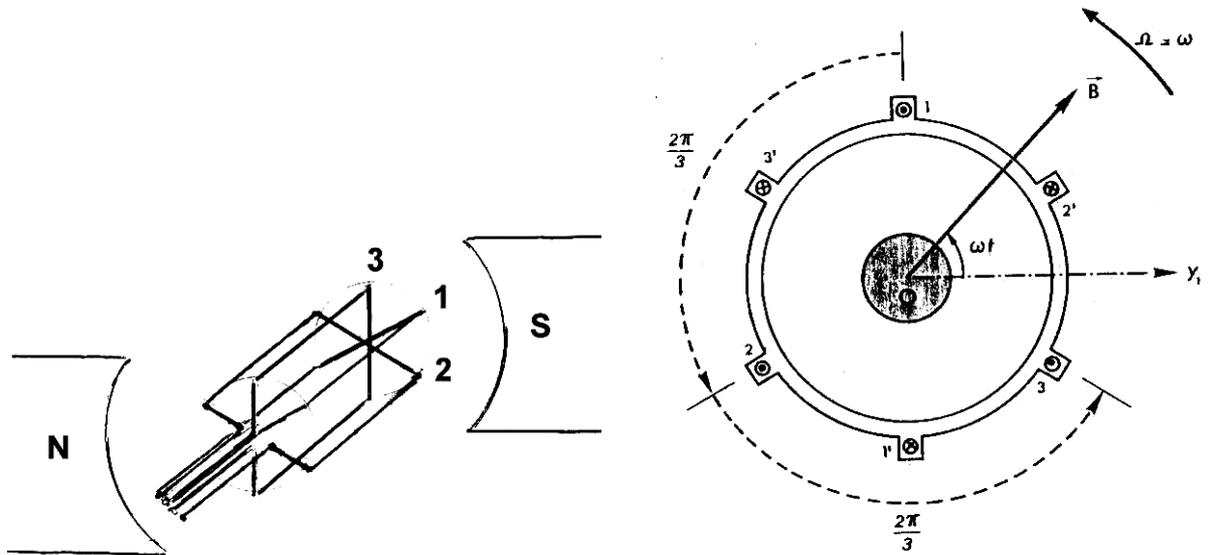


Fig. 10 - 1

$$e_1 = N.S.B.\omega.\sin \omega t = E_m \cdot \sin \omega t$$

$$e_2 = N.S.B.\omega.\sin (\omega t - 2\pi/3) = E_m \cdot \sin (\omega t - 2\pi/3)$$

$$e_3 = N.S.B.\omega.\sin (\omega t - 4\pi/3) = E_m \cdot \sin (\omega t - 4\pi/3)$$

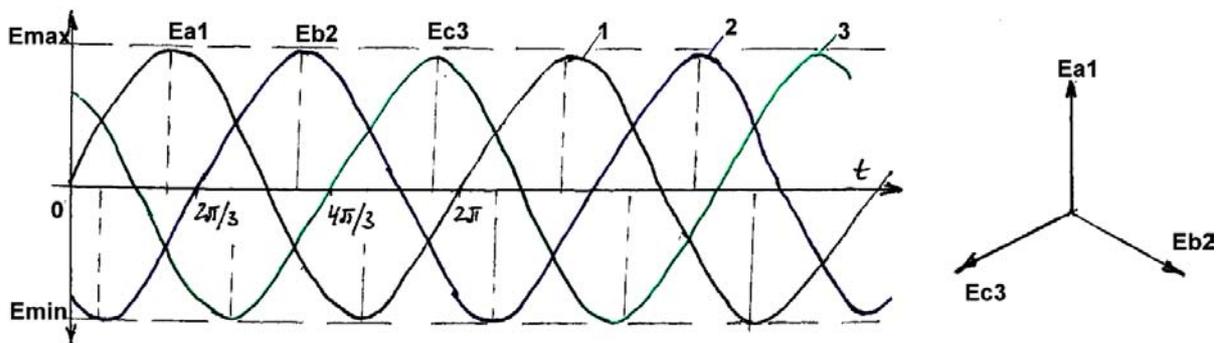


Fig. 10 - 2

10.1.3. Système direct et système inverse

Les trois enroulements d'un alternateur triphasé pourraient alimenter trois circuits monophasés distincts. Cet arrangement exigerait 6 fils pour alimenter la charge totale constituée par trois charges monophasées.

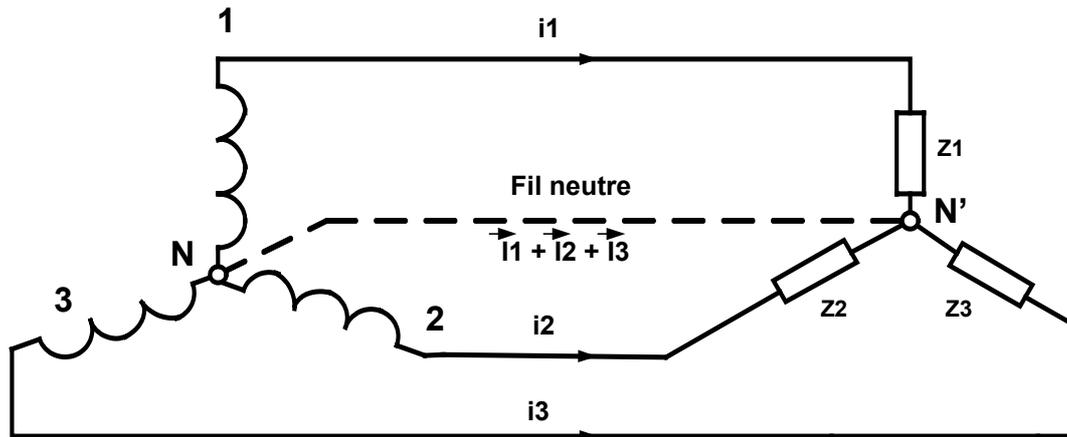


Fig. 10 - 3

Le nombre de fils de ligne peut être réduit en groupant les trois fils de retour en un seul (fig. 10 – 3). Ce fil de retour est appelé **fil neutre** (ou *phase neutre*) et il porte la somme des trois courants de ligne.

$$\vec{I}_n = \vec{I}_1 + \vec{I}_2 + \vec{I}_3$$

Si les vecteurs de Fresnel des trois phases se succèdent « en tournant » dans le sens *positif* le système est **direct**. Si les vecteurs des trois phases se succèdent dans le sens *néгатif*, le système est **inverse**.

Si le système triphasé alimente une charge équilibrée (les impédances de mêmes valeurs, $Z_1 = Z_2 = Z_3 = Z$), $I_N = 0$ et le fil neutre est absent. Le système est à 3 fils.

Si les charges ne sont pas identiques ($Z_1 \neq Z_2 \neq Z_3$), courant dans le fil neutre est différent de zéro ($\vec{I}_n = \vec{I}_1 + \vec{I}_2 + \vec{I}_3 \neq 0$) et le fil neutre est indispensable. Le système est à 4 fils.

10.1.4. Propriétés du système monté en « Etoile »

Si les trois enroulements de l'alternateur sont branchés en « Etoile » on peut obtenir deux types de systèmes des f.é.m. (fig. 10 – 4) :

$$E_{1N} = E_{2N} = E_{3N} = V \quad \Rightarrow \quad \text{Tension simple}$$

$$\vec{E}_{1n} + \vec{E}_{2n} + \vec{E}_{3n} = 0$$

$$\vec{E}_{12} = \vec{E}_{1n} - \vec{E}_{2n} = U \quad \Rightarrow \quad \text{Tension composée}$$

$$U = 2.V.\cos 30^\circ = \sqrt{3}.V$$

Dans un système triphasé équilibré la somme des grandeurs qui le constituent est nulle à tout instant.

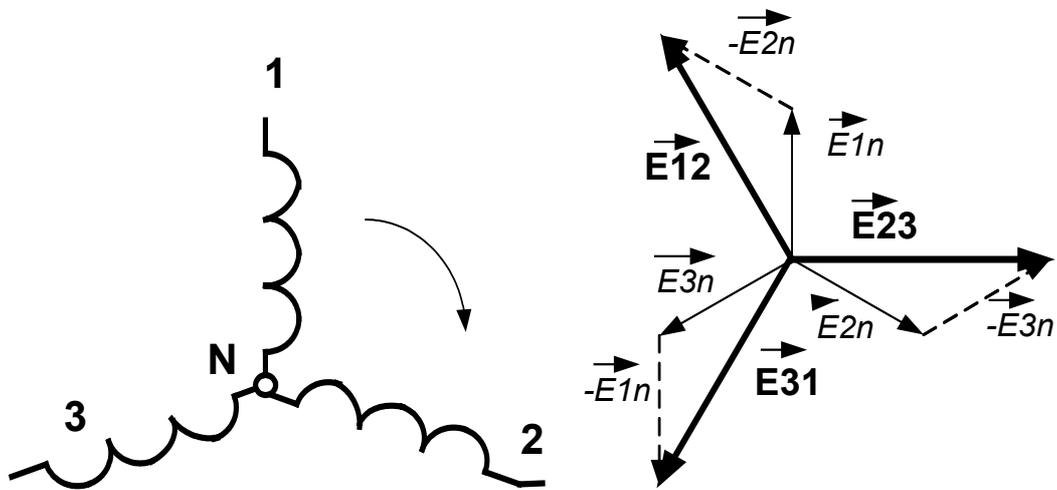


Fig. 10 - 4

10.1.5. Charges montées en « Etoile »

Charge équilibrée

Une charge est équilibrée si elle est constituée de trois impédances identiques $Z_1 = Z_2 = Z_3 = Z$ (fig. 10 – 5). Le courant dans chaque élément est égal au courant I_L dans la ligne ($I_1 = I_2 = I_3 = I_L$).

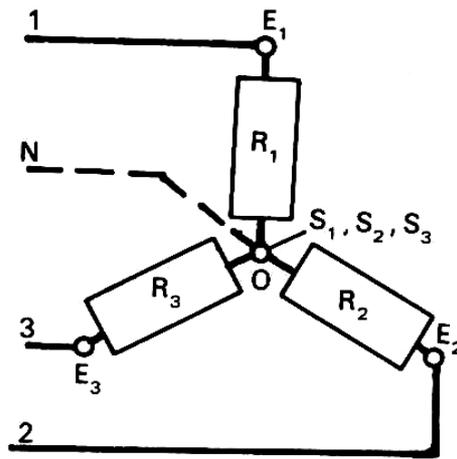


Fig. 10 - 5

La tension aux bornes de chaque élément est égale à la tension simple V . Les tensions aux bornes des éléments (fig. 10 – 6a) et les courants qui les traversent (fig. 10 – 6b) sont déphasées à 120° ($2\pi/3$).

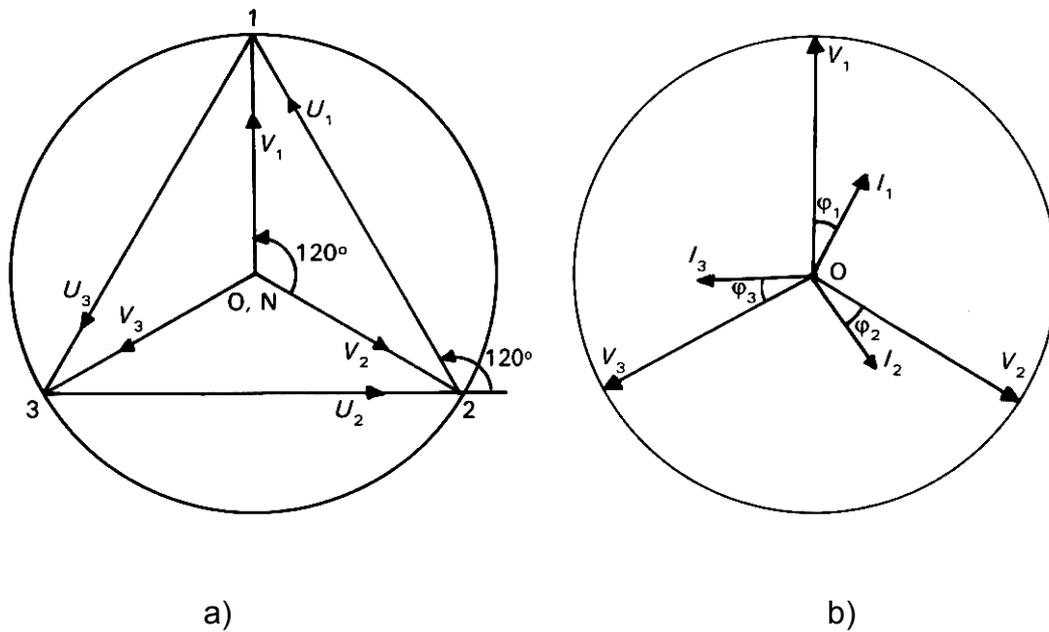


Fig. 10 - 6

Note : Si le récepteur est équilibré, le courant dans le fil neutre étant nul à tout instant, la différence de potentiel $V_{NN'}$ est nulle et le fil neutre peut être supprimé.

Charge déséquilibrée

Une charge est déséquilibrée si elle est constituée de trois impédances non identiques $Z_1 \neq Z_2 \neq Z_3$ (fig. 10 – 5). Le courant dans chaque élément est égal au courant de ligne, mais différent dans chacune des phases ($I_1 \neq I_2 \neq I_3$). Le courant dans le fil neutre n'est pas nul et la différence de potentiel $V_{NN'}$, non nulle apparaît entre les points N et N' (fig. 10 – 7). Le fil neutre ne peut pas être supprimé.

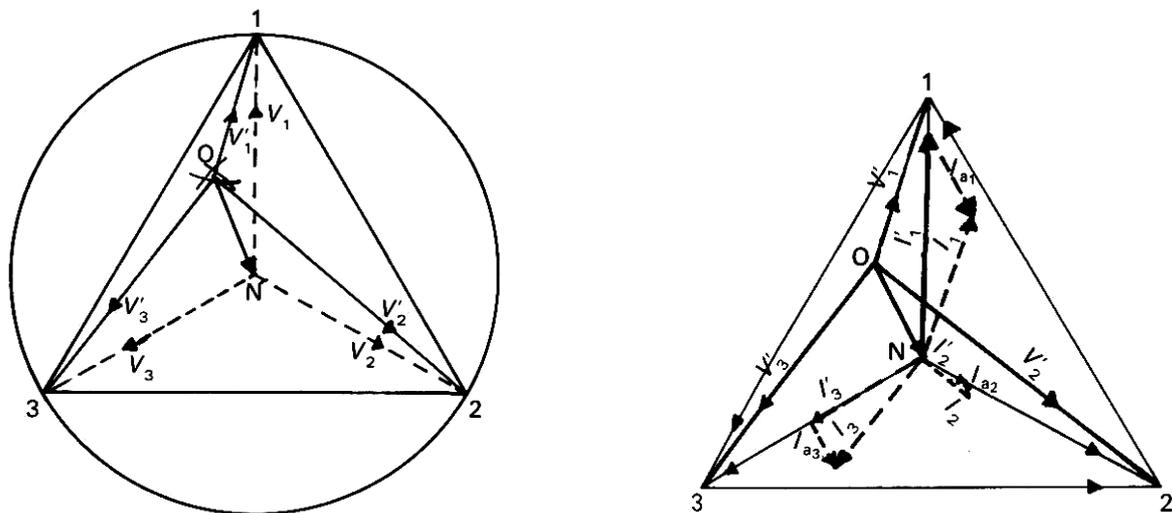


Fig. 10 - 7

Importance du fil neutre : La présence du fil neutre assure une tension constante aux bornes des récepteurs élémentaires que le récepteur soit équilibré ou non. La moindre dissymétrie provoque un déséquilibre des tensions efficaces aux bornes des récepteurs élémentaires. Il en résulte, soit une surtensions, soit une sous tension et une modification de fonctionnement des récepteurs.

Remarque : Le fil neutre est indispensable dans une installation d'alimentation triphasée afin de récupérer l'intensité éventuelle due à un déséquilibre accidentel ou pas.

10.1.6. Charges montées en « Triangle »

Trois récepteurs élémentaires sont associés en série et chaque fil de ligne est relié à un sommet du triangle (fig. 10 – 8).

Chaque récepteur élémentaire est soumis à la tension composée U et est traversé par un courant appelé courant de branche J :

$$\vec{I}_1 = \vec{J}_1 - \vec{J}_3$$

$$\vec{I}_2 = \vec{J}_2 - \vec{J}_1$$

$$\vec{I}_3 = \vec{J}_3 - \vec{J}_2$$

- Charge équilibrée:

$$J_1 = J_2 = J_3 = J;$$

$$\vec{J}_1 + \vec{J}_2 + \vec{J}_3 = 0;$$

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

- Charge déséquilibrée : $J_1 \neq J_2 \neq J_3$

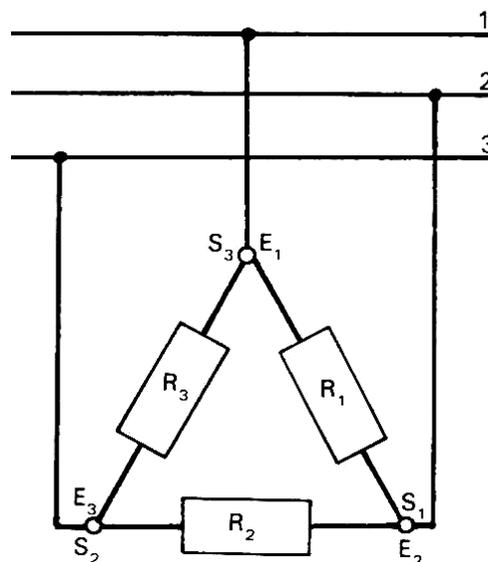


Fig. 10 - 8

10.2. Puissance en régime triphasé

10.2.1. Puissance en régime triphasé quelconque

Montage « Etoile » avec neutre

$$P_k = V_{kN} \cdot I_k \cdot \cos \varphi_k$$

$$Q_k = V_{kN} \cdot I_k \cdot \sin \varphi_k$$

Puissance active totale absorbée par le circuit:

$$P = \sum P_k = \sum V_{kN} \cdot I_k \cdot \cos \varphi_k = V \cdot \sum I_k \cdot \cos \varphi_k$$

Puissance réactive totale absorbée par le circuit:

$$Q = \sum Q_k = \sum V_{kN} \cdot I_k \cdot \sin \varphi_k = V \cdot \sum I_k \cdot \sin \varphi_k$$

Montage « Triangle »

$$P_k = U_k \cdot J_k \cdot \cos \varphi_k$$

$$Q_k = U_k \cdot J_k \cdot \sin \varphi_k$$

Puissance active totale absorbée par le circuit:

$$P = \sum P_k = \sum U_k \cdot J_k \cdot \cos \varphi_k = U \cdot \sum J_k \cdot \cos \varphi_k$$

Puissance réactive totale absorbée par le circuit:

$$Q = \sum Q_k = \sum U_k \cdot J_k \cdot \sin \varphi_k = U \cdot \sum J_k \cdot \sin \varphi_k$$

10.2.2. Puissance en régime triphasé équilibré

Montage « Etoile » (avec ou sans fil neutre)

$$V_1 = V_2 = V_3 = V \quad \text{et} \quad I_1 = I_2 = I_3 = I$$

$$P_k = V \cdot I \cdot \cos \varphi$$

$$Q_k = V \cdot I \cdot \sin \varphi$$

Puissance active totale absorbée par le circuit:

$$P = \Sigma P_k = 3 \cdot V \cdot I \cdot \cos \varphi = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi$$

Puissance réactive totale absorbée par le circuit:

$$Q = \Sigma Q_k = 3 \cdot V \cdot I \cdot \sin \varphi = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \sin \varphi$$

Montage « Triangle »

$$U_1 = U_2 = U_3 = U \quad \text{et} \quad J_1 = J_2 = J_3 = J = \sqrt{3} \cdot I$$

$$P_k = U \cdot J_k \cdot \cos \varphi$$

$$Q_k = U \cdot J \cdot \sin \varphi$$

Puissance active totale absorbée par le circuit:

$$P = \Sigma P_k = 3 \cdot U \cdot J \cdot \cos \varphi = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi$$

Puissance réactive totale absorbée par le circuit:

$$Q = \Sigma Q_k = 3 \cdot U \cdot J \cdot \sin \varphi = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \sin \varphi$$

11. VERIFICATION DE L'ETAT DES COMPOSANTS D'UN CIRCUIT A COURANT ALTERNATIF

Dans ce chapitre seront présentées les procédures de vérification des composants de circuit à courant alternatif : bobine, résistance, condensateur, ainsi que les transformateurs. Les appareils utilisés dans ce but sont : le multimètre et le mesureur de tension d'isolement. Une courte présentation de ces appareils ainsi que quelques conseils sur leurs utilisations s'avèrent non seulement utiles mais aussi nécessaires.

11.1. Multimètre analogique

11.1.1. Présentation

Sur le terrain ou dans un atelier il s'impose fréquemment le besoin de déterminer et d'évaluer rapidement les résultats d'un test. Un multimètre analogique peut répondre parfaitement à cette atteinte.

Le multimètre analogique est construit à partir d'un appareil de mesure de type magnétoélectrique. Muni d'un dispositif de redressement (couplé automatiquement suite à une sélection convenable effectuée avec le commutateur rotatif de gamme) il permet d'effectuer des mesures des courants et des tensions, ainsi que des mesures des résistances, en courant alternatif ou en courant continu.

11.1.2. Utilisation comme ohmmètre

L'ohmmètre est un appareil de mesure des résistances. Un multimètre possède dans son répertoire la fonction d'ohmmètre et peut être utilisé comme tel.

11.2. Ohmmètre

L'ohmmètre est un appareil pour la mesure des résistances avec une lecture directe. Son fonctionnement est basé sur la loi d'Ohm. Bien qu'il y a une grande variété d'ohmmètres analogiques on peut citer les deux variantes les plus utilisées : ohmmètre série et ohmmètre parallèle (dérivation).

11.2.1. Ohmmètre série

Un ohmmètre série est caractérisé par une échelle inversement graduée et fortement non uniforme.

Les valeurs extrêmes de l'échelle sont :

- ∞ , pour les bornes de l'ohmmètre à vide ;

- 0, pour les pointes du touches en court-circuit.

L'ohmmètre série est utilisé pour la mesure des résistances de grandes valeurs. Un multimètre est muni d'au moins deux domaines de mesures qu'on peut choisir avec le commutateur rotatif.

Exemple :

Le domaine de mesure est indiqué par un facteur de multiplication : $\times 1 \text{ K}\Omega$ ou $\times 100 \text{ K}\Omega$. La valeur de la résistance mesurée est obtenue suite à la multiplication de la lecture avec le facteur de multiplication indiqué par le commutateur rotatif.

Réglage de l'ohmmètre. Un problème particulier des ohmmètres est leur alimentation par des piles. Celles-ci vieillissent, ce qui conduit à des indications erronées. Pour éviter la diminution de la précision, avant l'utilisation, il est nécessaire d'effectuer le réglage des indications des extrémités de l'échelle.

Le réglage de l'indication pour résistance ∞ (l'ohmmètre à vide) est effectué à l'aide du correcteur de zéro du multimètre.

Le réglage de l'indication pour résistance 0 (pointe de touche de l'ohmmètre en court-circuit) est effectué à l'aide d'un potentiomètre rotatif placé sur le boîtier de l'appareil.

11.2.2. Ohmmètre parallèle (dérivation)

Les multimètres modernes et performants permettent aussi la mesure des résistances de valeurs réduites avec assez grande précision. A cette fin les multimètres peuvent fonctionner en mode ohmmètre dérivation.

L'échelle d'un ohmmètre parallèle est normale (le 0 à gauche de l'échelle) et à la base non uniforme.

En utilisant des dispositifs adéquats on a réalisé des multimètres avec des échelles linéaires et de calibres finis.

Exemple :

Le multimètre MX 430 a 2 gammes linéaires de mesure pour les résistances de calibres 50 Ω et 500 Ω .

La valeur de la résistance mesurée correspond à la lecture effective sur l'échelle marquée avec le symbole Ω ayant 50 graduation, lorsque le calibre utilisé est 50 Ω . Lorsque le calibre utilisé est 500 Ω il faut multiplier par 10 la lecture relevée en utilisant la même échelle.

Réglage de l'ohmmètre dérivation. Le réglage de l'indication pour la résistance à mesurer 0 (pointes de touche de l'ohmmètre en court-circuit) s'effectue à l'aide du correcteur zéro du multimètre.

Remarque :

Pour les ohmmètres dérivation ayant la plage de mesure infini, le réglage de l'indication correspondant à cette extrémité de l'échelle s'effectue en laissant les bornes à vide et en utilisant le potentiomètre rotatif placé sur le boîtier de l'appareil.

Lorsque la plage en mode ohmmètre est limitée (*exemple* : le multimètre MX 430 de calibre 50 Ω et 500 Ω), ce réglage n'est plus faisable.

Note importante : Après avoir effectué les mesures avec un ohmmètre (série ou dérivation) il faut changer la position du commutateur sur une position différente. Si non, le circuit reste alimenté et la pile se décharge inutilement.

11.3. Mégohmmètre

Ce sont des appareils à lecture directe destinés à mesurer des résistances de très grandes valeurs (de l'ordre de mégohms). Les mégohmmètres fonctionnent d'après le même principe que les ohmmètres.

Une mégohmmètre (ou bien contrôleur d'isolation; *exemple* : MX 435 Métrix) permet la mesure d'isolement et de continuité.

Avant d'effectuer une mesure avec le mégohmmètre il faut faire le réglage de l'appareil (appelé aussi, tarage).

Le réglage de l'indication 0 est effectué en agissant sur un potentiomètre rotatif, les bornes de l'appareil en court circuit; ce qu'on peut également réaliser en introduisant une fiche banane dans une douille de tarage (l'extrémité droite de l'échelle).

Le réglage de l'indication maximum de l'aiguille (l'extrémité gauche de l'échelle) est effectué avec le correcteur de zéro de l'appareil.

11.4. Vérification des composants

Les résistances, les bobines et les condensateurs comme tous les autres composants, peuvent être endommagés ou déclassés suite à une utilisation abusive impliquant le non-respect des paramètres nominaux : la puissance maximale et la tension nominale pour les résistances, la tension nominale pour les bobines et les condensateurs.

La vérification d'un composant s'avère nécessaire dans toutes activités pratiques de maintenance. En outre, il faut faire une différence entre la vérification d'un composant et la mesure d'un paramètre du composant.

11.4.1. Vérification des résistances

La vérification des résistances peut s'effectuer avec un multimètre fonctionnant en mode ohmmètre. Une résistance en état de défaut ne permet plus le passage du courant électrique. Elle présente une interruption dans sa continuité et sa résistance est infinie ou au moins très grande.

La résistance infinie, mise en évidence avec le multimètre, équivaut à l'interruption de la résistance dans sa structure et relève un composant défectueux.

Remarque :

Avant de faire une vérification avec l'appareil de mesure de résistance, on peut faire une vérification visuelle. Une résistance défectueuse peut montrer des déformations de sa forme, des traces noires de la fumée, ce qui témoigne un possible état défectueux.

11.4.2. Vérification des bobines

La vérification des bobines peut s'effectuer avec un multimètre fonctionnant en mode ohmmètre. Les bobines ont une résistance très faible (*exemple* : les bobines d'un moteur triphasé de 4,5 CV ont une résistance qui ne dépasse pas un ohm). Cette résistance peut être assimilée avec une valeur zéro, même pour un multimètre de sensibilité élevé.

Une bobine défectueuse présente une interruption qui augmente beaucoup sa résistance.

On peut supposer la vérification de l'état d'une bobine comme une vérification de sa continuité prouvée par l'indication «0 » d'un multimètre en mode ohmmètre.

Remarque :

Avant de faire la vérification avec l'ohmmètre il est recommandé de faire une vérification visuelle. Une bobine défectueuse peut présenter des déformations, des traces de brûlures ou de fumée, etc.

11.4.3. Vérification des condensateurs

Le condensateur bloque le passage du courant continue. La vérification avec un ohmmètre est basée sur ce principe. Lorsqu'on branche les pointes de touche du multimètre en mode ohmmètre aux bornes d'un condensateur déchargé, on enregistre un mouvement de l'aiguille d'une valeur presque « 0 », vers l'infini qui

traduit sa charge progressive. Une fois le condensateur chargé, l'ohmmètre indique « absence de continuité » ou résistance infinie.

Un condensateur défectueux ne se charge pas. Il présente toujours la résistance infinie et l'aiguille ne bouge pas au cours de la vérification.

Remarque :

Il ne faut pas oublier à décharger le condensateur en court-circuitant ses armatures avant d'effectuer la vérification.

Avant la vérification avec l'ohmmètre il est recommandé d'effectuer une vérification visuelle afin d'identifier l'état physique du composant ainsi que des traces de brûlure ou de fumée.

11.4.4. Vérification des transformateurs

La vérification des bobines des transformateurs a été présentée au paragraphe précédent (10.4.2.).

Pour la vérification de la résistance d'isolement on utilise un contrôleur de tension d'isolement ou encore en mégohmmètre. La valeur de cette résistance d'isolement dépasse en générale l'ordre des mégohms ($10^6 \Omega$).

12. MESURES DANS UN CIRCUIT A COURANT ALTERNATIF

12.1. Instruments de mesure en courant alternatif

En courant alternatif on utilise les ampèremètres et les voltmètres de courant alternatif pour mesurer les courants et les tensions.

Les appareils analogiques de courant alternatif les plus utilisés sont :

- appareils magnétoélectriques;
- appareils ferromagnétiques;

- appareils électrodynamiques.

12.1.1. Ampèremètres et voltmètres magnétoélectriques

Les symboles sont présentés sur la fig. 11 - 1 :

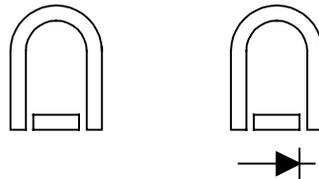


Fig. 11 - 1

Ils sont réalisés à la base d'un élément central du type magnétoélectrique. A l'absence des dispositifs supplémentaires on peut les utiliser seulement pour la mesure en courant continu. Munis d'un dispositif de redressement les ampèremètres ou les voltmètres peuvent mesurer aussi en courant alternatif. Le couplage du dispositif de redressement à l'appareil magnétoélectrique est réalisé à l'aide d'un bouton ou d'un commutateur situé sur le boîtier de l'appareil. C'est le sélecteur du type du courant à mesurer.

Remarque importante :

Lorsqu'on effectue une mesure avec un ampèremètre ou un voltmètre magnétoélectrique en courant alternatif il faut bien faire l'attention au type du courant et au choix du calibre. L'équipage mobile réagit à la valeur moyenne de la grandeur mesurée qui est égale à zéro en courant alternatif. Si les caractéristiques de l'appareil ne sont pas correctement sélectionnées, l'aiguille indicateur peut montrer la graduation 0 pendant que le courant dans l'appareil n'est pas nul (le dispositif de redressement n'étant branché) ou bien « taper » très fort à droite vers la fin de l'échelle (parce que le courant est plus grand que le calibre utilisé). La conséquence peut être l'endommagement de l'appareil.

Il est évident combien il est important de sélectionner correctement le type de courant lorsqu'on fait une mesure de courant. Un ampèremètre ou un voltmètre

magnétoélectrique présentent aussi d'habitude des échelles différentes correspondant au type du courant.

La présence du dispositif de redressement influence de façon négative la précision de l'appareil. Souvent on peut voir marquées sur le cadran de l'ampèremètre ou de voltmètre magnétoélectrique deux classes de précisions différentes, correspondant au type du courant : celle en courant alternatif est toujours plus grande que celle en courant continu.

Les bornes de l'ampèremètre et du voltmètre magnétoélectrique, ainsi que les calibres (sauf de rares exception), restent les mêmes en courant continu et en courant alternatif.

12.1.2. Ampèremètres et voltmètres ferromagnétiques

Le symbole est présenté sur la fig. 11 - 2 :



Fig. 11 - 2

Les appareils sont réalisés à la base d'un organe de mesure ferromagnétique et ils peuvent fonctionner en même temps en courant continu et courant alternatif sans un dispositif supplémentaire comme dans le cas d'un appareil magnétoélectrique.

Les erreurs de mesure augmentent avec la fréquence ce qui limite leur fonctionnement jusqu'à quelques centaines de hertz.

Ce sont des appareils à performances réduites mais robustes, simples et au coût réduit. On les utilise comme appareils de tableau. Les ampèremètres

ferromagnétiques peuvent mesurer directement des courants allant jusqu'à 1A ou même 5A sans avoir de shunts dans leurs construction.

12.1.3. Ampèremètres et voltmètres électrodynamiques

Le symbole est présenté sur la fig. 11 - 3 :

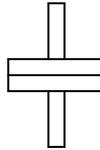


Fig. 11 - 3

Ils sont fondés sur les actions électrodynamiques développées entre un circuit inducteur fixe (généralement constitué par deux demi bobines) créant un champ magnétique à l'intérieur duquel se déplace un cadre mobile de faible inertie monté sur des pivots et entraînant une aiguille.

Les appareils électrodynamiques peuvent fonctionner avec la même précision en courant continu ainsi qu'en courant alternatif. Ils sont utilisés surtout comme wattmètres.

Leur construction est très compliquée, ce qui augmente leur coût. Les ampèremètres et les voltmètres de grande précision (classe 0,5 et moins) sont les appareils préférés dans les laboratoires de mesure.

Comme conclusion on rappelle que le branchement de **l'ampèremètre** dans le circuit est effectué en **série**. Le branchement en parallèle peut conduire à son endommagement (à cause de sa faible résistance un courant de forte intensité traverserait l'appareil). Ce branchement défectueux est considéré comme une grave erreur dans la technologie des mesures.

Quant au branchement du **voltmètre**, il est fait en **parallèle** entre les deux points où on veut déterminer la tension. Le branchement incorrect du voltmètre, c'est à dire en série, conduit à une chute brutale du courant dans le circuit, a cause de sa grande résistance, mais ne conduit pas à l'endommagement de l'appareil.

12.2. Interprétation des lectures des instruments de mesure à courant alternatif

Dans ce chapitre on présente deux caractéristiques essentiels pour tous les appareils de mesure analogiques : les échelles et les gammes.

12.2.1. Echelle

L'échelle représente un ensemble de graduations sur le cadran de l'appareil. Avec l'aiguille elle réalise le dispositif de lecture de l'appareil de mesure.

La lecture d'un appareil de mesure au cours d'une mesure ne présente pas (dans la plupart des cas) directement la valeur mesurée. On effectue d'habitude cette lecture comme un nombre de graduations et ensuite par un calcul simple on obtient la valeur de la grandeur mesurée.

Pour la plupart des appareils de mesure multicalibres on remarque la présence de plusieurs échelles sur le cadran. Chaque échelle est destinée à un ou plusieurs calibres précis.

Exemple :

- Un ampèremètre magnétoélectrique, réalisé à effectuer de mesures en courant continu ainsi qu'en courant alternatif, présente deux échelles différentes correspondantes aux types du courant.
- Un multimètre conçu pour la mesure du courant, de la tension et des résistances comprend des échelles appropriées aux types de grandeurs mesurées.

12.2.2. Gammes (Calibres)

La gamme (le calibre) d'un appareil de mesure représente l'intervalle constitué par les valeurs minimale et maximale qui peuvent être mesurées par celui-ci. Pour la plupart des appareils de mesure une gamme (un calibre) commence de zéro. Sa limite supérieure représente le calibre. Pour une grandeur ayant la valeur égale au calibre l'aiguille de l'appareil dérive de toutes les graduations de l'échelle appropriée.

Les appareils de mesure portables (ampèremètre, voltmètre, wattmètre, ohmmètre) sont réalisés généralement avec plusieurs gammes de mesure, donc avec plusieurs calibres. Les appareils de mesure de tableau possède un seul calibre.

Choisir un certain calibre c'est accéder à une gamme de valeurs mesurables. Un appareil à plusieurs gammes est plus performant et plus efficace.

Adapter la gamme de mesure (le calibre) à la grandeur mesurée, permet de bénéficier de la qualité de l'appareil reflétée par sa classe de précision.

L'exemple suivant va faire bien comprendre cet aspect très important visant l'utilisation des appareils de mesure.

On suppose que les résultats obtenus suite à la mesure de deux courants effectuée avec un ampèremètre de classe de précision $C = 1,5$ sont $I_1 = 0,85 \text{ A}$ et $I_2 = 3,65 \text{ A}$.

Le calibre utilisé pour les mesures était $\text{Cal} = 5 \text{ A}$.

L'incertitude absolue est donnée par la relation :

$$\Delta I = \frac{C \times \text{Cal}}{100} \Rightarrow \Delta I = \frac{5 \times 1,5}{100} = 0,075 \text{ A}$$

L'incertitude relative qui exprime la précision de la mesure est déterminée par la relation :

$$\Delta I_r = \frac{\Delta I}{I} \times 100$$

Pour le premier courant I_1 on a :

$$\Delta I_1 = \frac{0,075}{0,85} \times 100 = 8,82\%$$

Pour le deuxième courant I_2 on a :

$$\Delta I_2 = \frac{0,075}{3,65} \times 100 = 2,06\%$$

La qualité de la deuxième mesure est nettement plus élevée et cette mesure est plus précise que la première. On peut dire que le calibre utilisé dans le premier cas n'a pas été adapté correctement.

Un calibre approprié à la grandeur mesurée est celui qui permet d'obtenir des déviations dans le dernier tiers (voir deuxième moitié) de l'échelle de lecture. C'est donc le plus petit calibre supérieur à la grandeur mesurée.

Ce n'est qu'en utilisant les calibres appropriés au cours des mesures qu'on bénéficie des qualités des appareils de mesure afin d'obtenir de mesure de bonne précision.

12.2.3. Interprétation des lectures des appareils de mesure

Lorsqu'on effectue une mesure on utilise évidemment un calibre approprié, symbolisé C. L'aiguille prendra une position exprimée par un certain nombre de divisions lu par le manipulateur, symbolisé L. Cette lecture est effectuée sur une échelle comportant un certain nombre de divisions, symbolisée E.

On définit le coefficient de lecture K de l'appareil comme le rapport :

$$K = \frac{\text{calibre}}{\text{nombre de divisions de l'échelle}}$$

ou avec la relation :

$$K = \frac{C}{E}$$

La valeur de la grandeur mesurée avec son unité (qui est celle du calibre) est alors égale au produit du coefficient K par la lecture L. Donc :

$$V = K.L,$$

où V est la valeur de la grandeur mesurée.

L'échelle peut être uniforme (c'est le cas des appareils magnétoélectriques) ou non uniforme (c'est le cas des appareils ferromagnétiques ou électrodynamiques).

Des solutions constructives convenables peuvent rendre uniforme l'échelle graduée des appareils modernes, à l'exception des graduations dans la première partie.

12.3. Mesures en courant alternatif

Dans ce chapitre on apporte des précisions sur les activités liées à la prise de mesures et sur les mesures de sécurité qui les concernent.

12.3.1. Branchement des appareils de mesure

Au cours du branchement des instruments de mesure doivent être suivies les règles de prévention citées ci-dessous. Leur respect assure en même temps la sécurité des personnes et la protection de l'équipement.

Les règles du câblage de la source d'énergie vers le récepteur en essai exigent l'isolation du secteur :

- Câbler d'abord le circuit de puissance en série (le circuit d'intensité), puis les circuits de dérivation (de tension).
- Prévoir les sections de conducteurs conformes aux normes industrielles et tenir compte de leur isolement.
- Vérifier le serrage des connexions (cosses, fiches, connecteurs) et leur état d'isolement pour la sécurité de l'opération et la protection des contacts aux borniers.
- S'assurer de l'existence des dispositifs de protection de surcharge (fusible) correctement calibrés.
- Remplacer les fusibles défectueux avec des fusibles calibrés de valeurs appropriés et ne pas essayer de les « refaire ».

12.3.2. Mesure des valeurs aux différents points d'un circuit

Effectuer avec le respect des certaines consignes la prise de mesure assure l'utilisation correcte de l'appareil de mesure et conduit à des déterminations exactes et sécuritaires des grandeurs électriques.

- Une bonne posture de travail permet une manipulation correcte des appareils de mesure et une lecture exacte de leurs indications.
- S'assurer du fonctionnement correct de l'appareil utilisé pour la prise de mesure et de sa propriété à la grandeur visée. Le choix convenable de la gamme de mesure est un impératif qu'il faut envisager toujours pour ne pas mettre en danger le fonctionnement des appareils de mesure.
- S'assurer que le calibre choisi pour l'appareil au cours d'une mesure est suffisamment grand par rapport à la grandeur à mesurer.
- Lorsqu'on n'a pas une idée de la valeur de la grandeur à mesurer, choisir toujours le plus grand calibre de l'appareil utilisé.
- Choisir pour la lecture des indications des appareils l'échelle appropriée.

Exemple : Pour un appareil de mesure permettant des mesures en courant alternatif et en courant continu les échelles peuvent être différentes. Utiliser donc l'échelle correspondante au type du courant.

- Manipuler de façon sécuritaire les sondes utilisées, lorsqu'il y a le cas, et les pointes de touche.
- Vérifier la mise à la terre en un seul point.

12.3.3. Mesure des courants alternatifs

Lorsqu'on veut mesurer des courants alternatifs dans un circuit il faut utiliser un ampèremètre convenable. Sur son cadran doit être marqué le symbole « alternatif », « ~ », qui exprime sa capacité d'être utilisé pour les mesures en courant alternatif. L'ampèremètre doit être branché en série dans le circuit où on veut déterminer le courant alternatif. Il faut que le courant à mesurer passe à travers l'appareil.

Le point d'insertion de l'ampèremètre doit être convenablement choisi afin de ne pas nuire à l'intégrité du circuit et de pouvoir assurer sa continuité après le branchement et, en suite, après l'enlèvement de l'ampèremètre.

Les ampèremètres, ayant de faibles résistances, sont des appareils très sensibles.

L'ampèremètre doit être branché seulement dans le circuit hors l'alimentation. Le branchement incorrect en parallèle, peut aboutir à l'endommagement de l'ampèremètre.

Avant de commencer la mesure vérifier si le commutateur qui réalise la sélection du type du courant est en position correcte (fonctionnement en courant alternatif). Le choix incorrect du type du courant représente une autre erreur grave de manipulation car elle peut conduire de même à l'endommagement de l'appareil.

Le choix du calibre est aussi très important. Il faut s'assurer que le calibre est suffisamment grand pour permettre la mesure, c'est-à-dire il est supérieur à la valeur du courant. Il est recommandé de commencer la mesure en choisissant un calibre élevé et de l'adapter convenablement en suite et à petit pas au courant de la mesure. De cette manière on évite le déplacement brutal de l'équipage mobile suite auquel l'aiguille peut se déformer ou même se briser en frappant l'arrêt de fin d'échelle.

Pour la mesure il faut rédiger toujours un tableau d'enregistrement dans lequel on spécifie le calibre utilisé pour la mesure et l'échelle.

Le tableau comprendra une colonne pour le coefficient de lecture K, une colonne pour inscrire le résultat de la lecture et une dernière colonne pour inscrire la valeur de la grandeur mesurée. N'oublier jamais à inscrire dans chaque colonne l'unité de mesure !

Tableau d'enregistrement pour la mesure d'un courant

Calibre [A] C	Echelle [div] E	Coefficient K [A / div] $K = C / E$	Lecture [div] L	Intensité [A] I

Les calculs associés aux processus de mesure sont élémentaires :

- Calculer le coefficient de la lecture $K = \frac{C}{E}$, exprimé en A/div pour une mesure de courant.
- Calculer la valeur du courant : $I = L.K$.

12.3.4. Mesure des tensions alternatives

Lorsqu'on veut mesurer une tension alternative (une différence de potentiels) aux bornes d'un composant ou entre deux points d'un circuit électrique il faut utiliser un voltmètre convenable. Le marquage du type du courant (alternatif, dans ce cas) doit figurer sur son cadran, ce qui prouve la possibilité d'utilisation de l'appareil en courant alternatif.

Le voltmètre doit être branché en parallèle avec le composant aux bornes duquel on veut déterminer la tension ou directement aux points entre lesquelles on veut mesurer la différence de potentiels.

Avant de commencer le processus de mesure il faut s'assurer de la correcte sélection du type du courant. Le choix incorrect du type du courant peut conduire à des fausses conclusions sur la mesure et peut mettre en danger l'appareil.

Le branchement incorrect (en série) ne conduit pas à l'endommagement du voltmètre, à cause de sa grande résistance, mais diminue fortement le courant dans le circuit.

Au cas de manque d'informations sur la grandeur approximative de la tension à mesurer il est recommandé de commencer le processus de mesure en utilisant un grand calibre qu'on adaptera en suite à la valeur de la tension. Cette approche permet de protéger l'aiguille de détérioration suite au coup brusque sur l'arrêt de fin d'échelle et de profiter de la précision de l'appareil.

Le tableau d'enregistrement comprendra les mêmes cinq colonnes et les calculs associés aux processus de mesure sont analogues à ceux présentés pour la mesure des courants.

Tableau d'enregistrement pour la mesure d'une tension

Calibre [V] C	Echelle [div] E	Coefficient K [V / div] $K = C / E$	Lecture [div] L	Tension [V] U

Remarque :

Au cours du processus de mesure il faut se préoccuper seulement de la correcte manipulation de l'appareil (le choix du calibre et de l'échelle utilisés) et de l'inscription des résultats de la mesure dans le tableau d'enregistrement. Une fois le processus de mesure achevé on s'occupe des calculs des valeurs des grandeurs mesurées (courant, tension, puissance).

12.4. Erreurs de mesure

12.4.1. Définition des erreurs

Une grandeur à mesurer possède sa valeur réelle. Le résultat obtenu pour la valeur de cette grandeur suite à un processus de mesure peut différer plus ou moins de sa valeur réelle et cela en dépit des moyens et des méthodes de mesure utilisés, ainsi que des soins de la manipulation.

Soit X_0 la valeur de référence de la grandeur et X_m la valeur obtenue pour la grandeur suite à la mesure.

L'*erreur absolue* est définie comme la différence :

$$\varepsilon = X_m - X_0$$

L'*erreur absolue* exprime de combien on s'est « trompé » lors de la mesure mais elle ne donne pas des informations sur la précision de la mesure.

L'*erreur relative* ε_r est exprimée par le pourcentage définie comme :

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{X_0} \cdot \frac{100}{X_0} \cdot 100 [\%]$$

L'*erreur relative* permet d'apprécier la précision d'une mesure.

12.4.2. Types d'erreurs

D'après les causes qui les produisent, les erreurs sont classifiées comme:

- *Erreurs subjectives* : dues aux manipulations et produites par l'attention, l'habilité et l'acuité visuelle de l'opérateur.

Les *erreurs subjectives* les plus fréquentes sont :

- La mauvaise appréciation des fractions des graduations de l'échelle.

- Le choix incorrect de l'échelle de lecture.
 - Le défaut de parallaxe (l'axe de la visée n'est pas perpendiculaire à l'aiguille et au cadran en même temps lorsqu'on fait la lecture).
- *Erreurs objectives* : dues aux imperfections des appareils de mesure, aux influences de l'environnement ou encore à la méthode utilisée.

12.4.3. Caractéristiques métrologiques des appareils de mesure

Les appareils de mesure sont définis par des caractéristiques qui sont en effet des critères de qualité des ceux-ci. Ces caractéristiques font l'objet des normes internationales et nationales qui imposent aussi les vérifications périodiques de conformité. L'utilisation et le vieillissement ont pour conséquence une possible diminution des qualités initiales d'où la nécessité de contrôle régulier.

- *La sensibilité* est l'aptitude de l'appareil de mesure (à aiguille) à déceler de petites variations de la grandeurs à mesurer.

Note : Il ne faut pas oublier qu'un appareil de mesure peut avoir plusieurs calibres, mais il est incorrect de dire qu'il a plusieurs sensibilités!

- *La résolution* est la valeur du pas de quantification dans la gamme d'un appareil numérique. Elle correspond au coefficient de lecture des appareils électromécaniques. C'est la plus petite variation de la valeur de la grandeur que l'appareil peut détecter dans une gamme.

La résolution de l'appareil de mesure est caractéristique pour chacun de son calibre. On peut accepter pour résolution d'un appareil la valeur qui correspond à une graduation (la plus petite) d'une gamme de mesure.

Exemples :

- 1) Soit un voltmètre électromagnétique ayant une échelle $E = 120$ graduations. Lorsqu'on utilise une gamme (un calibre) $C = 60 \text{ V}$, la résolution de l'appareil est égale à :
 $60 / 120 = 0,5 \text{ V}$.
- 2) Un appareil numérique a 100000 points de mesure. Dans la gamme 1 V , la résolution est égale à $10 \mu\text{V}$.

- *La précision* d'un appareil de mesure est une caractéristique globale. Elle exprime la propriété de l'appareil de mesure de donner des indications les plus rapprochées possibles de la valeur de la grandeur à mesurer.

La précision d'un appareil de mesure électromécanique est caractérisée par la classe de précision (la norme C 42 100).

Les valeurs utilisées pour la classe de précision des appareils de mesure sont :

- Classes 0,05 ; 0,1 ; 0,2 : pour les appareils étalons (utilisés en laboratoire) ;
- Classes 0,5 ; 1 ; 1,5 : pour les appareils de contrôles techniques (utilisés pour contrôle et vérifications) ;
- Classes 0,5 et 1 (rarement), 1,5 ; 2,5 et 5 : pour les appareils de tableau.

Remarque : La classe de précision caractérise l'appareil et pas la mesure. Elle peut être définie comme l'erreur relative due à l'appareil quand on mesure une grandeur dont la valeur est égale au calibre. Pour obtenir une bonne précision de la mesure il faut utiliser l'appareil de manière que l'indication obtenue soit la plus proche au calibre (au moins dans la deuxième partie de l'échelle).

La précision des appareils de mesure numériques n'est pas exprimée par une classe de précision. Elle est généralement donnée en pourcentage de la lecture pour chaque gamme et l'exactitude du dernier chiffre, donc elle représente une erreur absolue. La précision ne dépend pas que de sa résolution. Il faut prendre en

considération la qualité des composants, la précision des références de la tension et de temps, etc.

Exemple :

Pour la gamme 2 V la résolution est 1 mV et la précision est :

$\pm 0,1\% L \pm 2d$ (L : Lecture ; d : digit ou unité).

Si on mesure $L = 1 V$ la précision sera : $\pm 0,1\% \cdot 1V \pm 2 \cdot 1 mV = \pm 3 mV$

La précision d'un appareil de mesure implique deux autres caractéristiques :

- *La fidélité* : la propriété de l'appareil de donner des indications les plus rapprochées lorsqu'on répète la mesure dans les mêmes conditions .

Différents facteurs intérieurs et extérieurs peuvent perturber ces indications : les chocs sur les organes mobiles, les champs magnétiques terrestres ou produits par un appareil voisin générateur de champs parasites, les phénomènes électrostatiques, la diminution de la valeur des résistances d'isolement des circuits électriques de l'appareil due à l'humidité, la diminution du champ magnétique des aimants permanents dans les appareils magnétoélectriques, la dilatation des pièces mécaniques et la résistance des conducteurs subissant des variations de température.

- *La justesse* : c'est la qualité d'un appareil à traduire la vraie valeur de la grandeur qu'il mesure.

Dans les performances d'efficacité de mesure il faut aussi citer :

- pour les appareils électromécaniques : *la rapidité d'indication* (c'est la qualité que possède un appareil à donner dans un temps minimal la valeur de la grandeur à mesurer ou ses variations) ;
- pour les appareils numériques : *la cadence de lecture* (elle indique le nombre de mesures qu'effectue l'appareil en une seconde).

***Module 8 : ANALYSE DE CIRCUITS A
COURANT ALTERNATIF
GUIDE DE TRAVAUX PRATIQUES***

TP1 – Définition des termes associés au courant alternatif

1.1. Objectif visé

Sensibiliser les stagiaires à définir les termes associés au courant alternatif.

1.2. Durée du TP

Le travail pratique proposé est d'une durée de 2 heures.

1.3. Equipements et matière d'œuvre par équipe

- Dessins des graphiques de courants sinusoïdaux de même fréquence

1.4. Description du TP

Sur la fig. TP1-1 ci-dessous sont représentés les graphiques de deux courants alternatifs sinusoïdaux de même fréquence.

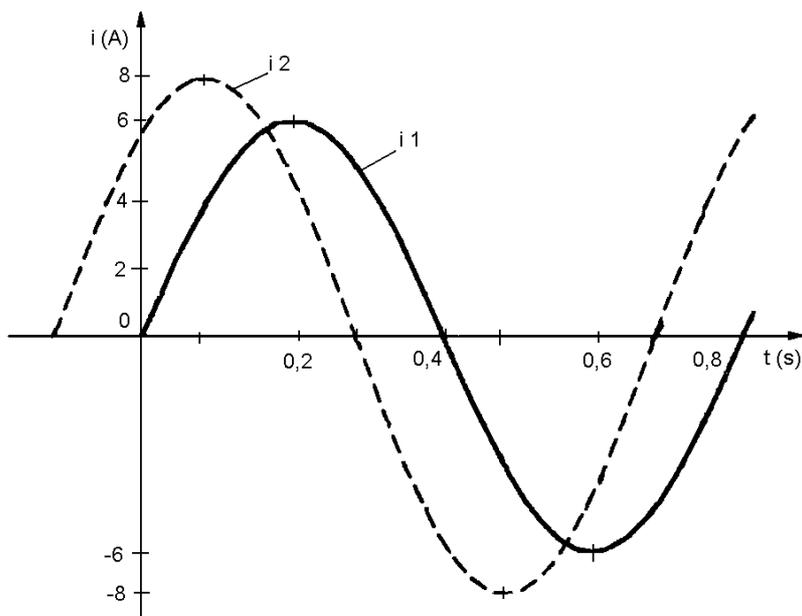


Fig. TP1-1

1.5. Déroulement du TP

- Identifier pour chaque courant les alternances positives et négatives.
- Identifier l'amplitude de chaque courant.
- Identifier la période des deux courants.
- Calculer la fréquence des deux courants.
- Calculer la valeur efficace de chaque courant.
- Indiquer le déphasage entre les deux courants.
- Représenter un courant alternatif sinusoïdal i_3 de même fréquence déphasé d'un quart de période an avant par rapport au courant i_1 , et d'amplitude $I_3 \text{ max} = 4 \text{ A}$.
- Représenter sur la fig. TP1-2 un courant alternatif sinusoïdal i_4 de même fréquence, déphasé d'un quart de période derrière le courant i_1 et dont l'amplitude $I_4 \text{ max} = 8 \text{ A}$.

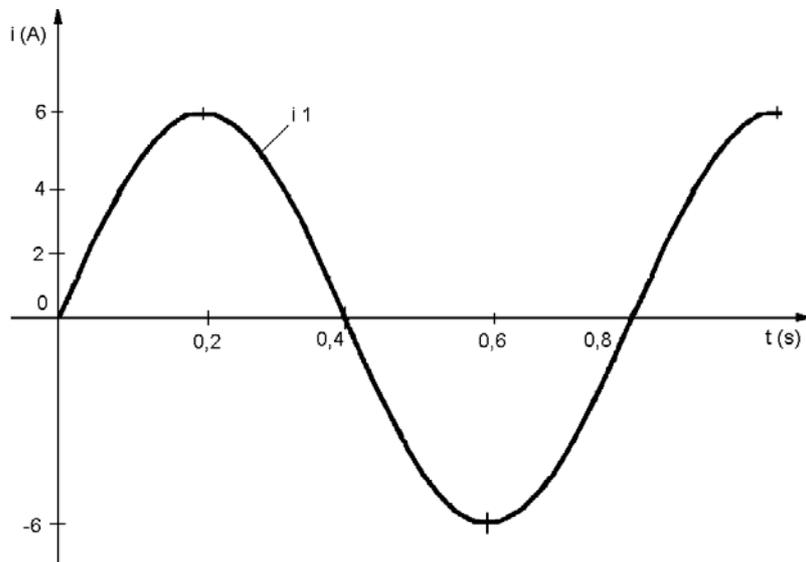


Fig. TP1-2

TP 2 – Description des effets des inductances dans un circuit à courant alternatif

2.1. Objectif visé

Apprendre aux stagiaires à calculer les caractéristiques d'un circuit à courant alternatif comportant une bobine réelle à partir des oscillogrammes des graphiques du courant et de la tension.

2.2. Durée du TP

Le travail pratique proposé est d'une durée de 2 heures.

2.3. Equipements et matière d'œuvre par équipe

- Plusieurs oscillogrammes du courant et de la tension aux bornes d'une bobine alimentée en courant alternatif

2.4. Description du TP

Calculer individuellement à partir des graphiques les différentes caractéristiques d'un circuit comportant une bobine alimentée en courant alternatif.

2.5. Déroulement du TP

A. A partir des graphiques présentées sur la fig. TP2-1 de la tension et du courant d'une bobine alimentée en courant alternatif :

- Identifier le graphique qui correspond à la tension et celui qui correspond au courant, en expliquant votre choix.
- Déterminer l'amplitude de la tension et sa valeur efficace.
- Déterminer l'amplitude du courant et sa valeur efficace.
- Déterminer la fréquence de la tension.
- Calculer la réactance inductive de la bobine.

- Calculer l'inductance de la bobine.

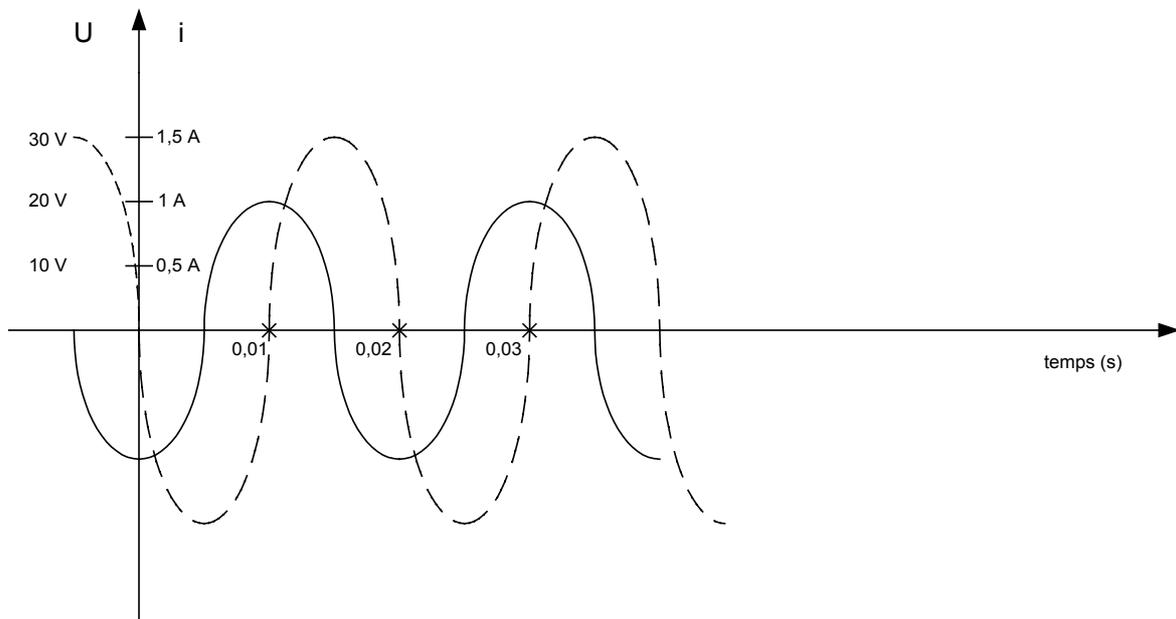


Fig. TP2-1

B. Trois bobines d'inductances $L_1 = 0,2 \text{ H}$, $L_2 = 0,4 \text{ H}$ et $L_3 = 0,8 \text{ H}$ sont connectées en série et sont alimentées sous une tension de valeur efficace $U = 50 \text{ V}$ et de fréquence $f = 50 \text{ Hz}$:

- Déterminer la réactance de chaque bobine.
- Déterminer la réactance de l'ensemble.
- Déterminer le courant effectif dans le circuit.
- Déterminer la tension effective pour chaque bobine.

C. Les mêmes trois bobines d'inductances $L_1 = 0,2 \text{ H}$, $L_2 = 0,4 \text{ H}$ et $L_3 = 0,8 \text{ H}$ sont connectées en parallèle et sont alimentées sous la même tension de valeur efficace $U = 50 \text{ V}$ et de fréquence $f = 50 \text{ Hz}$:

- Déterminer la réactance de l'ensemble.
- Déterminer le courant dans chaque bobine.
- Déterminer le courant principal du circuit.

TP3 – Description des effets des condensateurs dans un circuit à courant alternatif

3.1. Objet du TP :

Apprendre aux stagiaires à calculer les caractéristiques d'un circuit à courant alternatif comportant un condensateur à partir des oscillogrammes des graphiques du courant et de la tension.

3.2. Durée :

Le travail pratique proposé est d'une durée de 2 heures.

3.3. Equipement :

- Plusieurs oscillogrammes du courant et de la tension aux bornes d'un condensateur alimenté en courant alternatif

3.4. Description du TP :

Calculer individuellement à partir des graphiques les différentes caractéristiques d'un circuit comportant un condensateur alimenté en courant alternatif.

3.5. Déroulement du TP :

A. A partir des graphiques présentées sur la fig. TP3-1 de la tension et du courant d'un condensateur alimenté en courant alternatif :

- Identifier le graphe qui correspond à la tension et celui qui correspond au courant et expliquer votre choix.
- Déterminer l'amplitude de la tension et sa valeur efficace.
- Déterminer l'amplitude du courant et sa valeur efficace.
- Déterminer la fréquence et la période de la tension.
- Calculer la réactance capacitive des condensateurs.

- Calculer la capacité du condensateur.

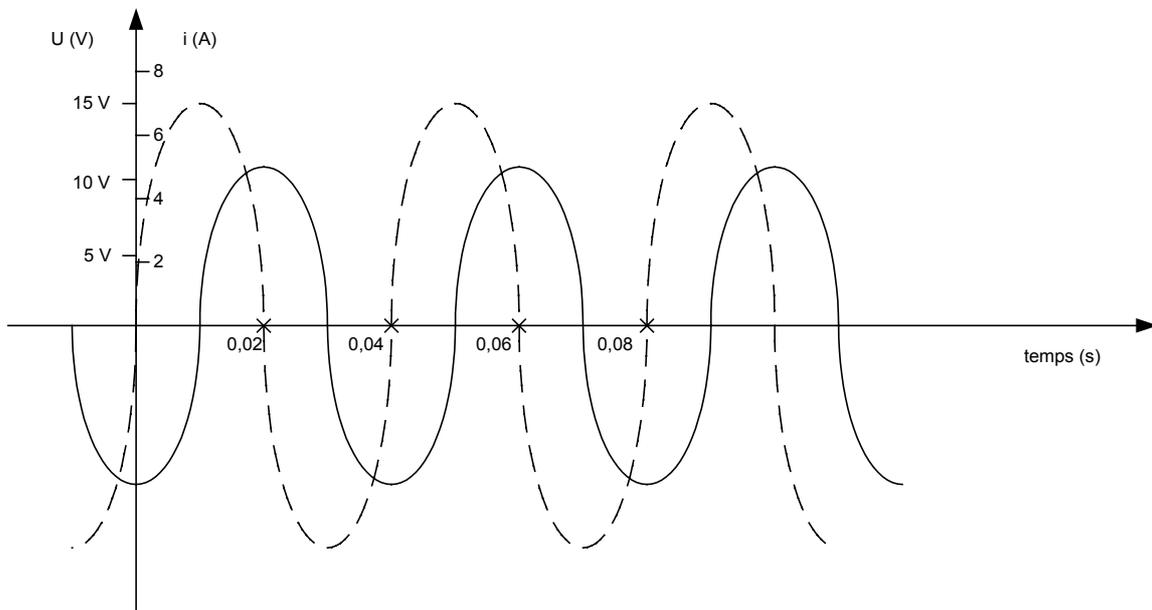


Fig. TP3-1

B. **Trois condensateurs des capacités : $C_1 = 0,2 \mu F$, $C_2 = 0,3 \mu F$ et $C_3 = 0,6 \mu F$ sont connectés en série et sont alimentés sous une tension de valeur efficace $U = 60 V$ et de fréquence $f = 50 Hz$:**

- Déterminer la réactance capacitive de chaque condensateur.
- Déterminer la capacité de l'ensemble et sa réactance capacitive.
- Déterminer le courant efficace dans le circuit.
- Déterminer la tension efficace aux bornes de chaque condensateur.

C. **Les mêmes trois condensateurs des capacités : $C_1 = 0,2 \mu F$, $C_2 = 0,3 \mu F$ et $C_3 = 0,6 \mu F$ sont connectés en parallèle et sont alimentés sous une tension de valeur efficace $U = 60 V$ et de fréquence $f = 50 Hz$:**

- Déterminer la capacité de l'ensemble et sa réactance capacitive.
- Déterminer le courant dans chaque condensateur.
- Déterminer le courant principal du circuit.

TP4 – Calcul des valeurs d'une onde sinusoïdale

4.1. Objectif visé

Apprendre aux stagiaires à calculer à partir d'un oscillogramme les caractéristiques d'une onde sinusoïdale : l'amplitude, la période, les valeurs instantanées pour des moments de temps choisis, la valeur efficace, la fréquence et la pulsation.

4.2. Durée du TP

Le travail pratique proposé est d'une durée de 2 heures.

4.3. Equipements et matière d'œuvre par équipe

- Oscillogramme des ondes sinusoïdales

4.4. Description du TP

Calculer individuellement à partir des graphiques les différentes caractéristiques d'une onde sinusoïdale.

4.5. Déroulement du TP

A. Calcul des valeurs caractéristiques d'une onde sinusoïdale

Un courant et une tension alternative de même fréquence ont les expressions suivantes :

$$i = 6 \sqrt{2} \sin 100 \pi t \quad (A)$$

$$u = 70,5 \sin (100 \pi t + \pi / 2) \quad (V)$$

- Préciser la pulsation et la phase initiale de chaque grandeur.
- Calculer la période et la fréquence des deux grandeurs.
- Spécifier la valeur efficace et la valeur de crête (l'amplitude) de chaque grandeur.

- Calculer les valeurs instantanées des deux grandeurs sinusoïdales pour les moments de temps : $t = 0$ $t = \frac{1}{50}$ s $t = \frac{1}{100}$ s

B. Pour l'oscillogramme de la fig. TP4-1 représentant l'onde d'une tension sinusoïdale :

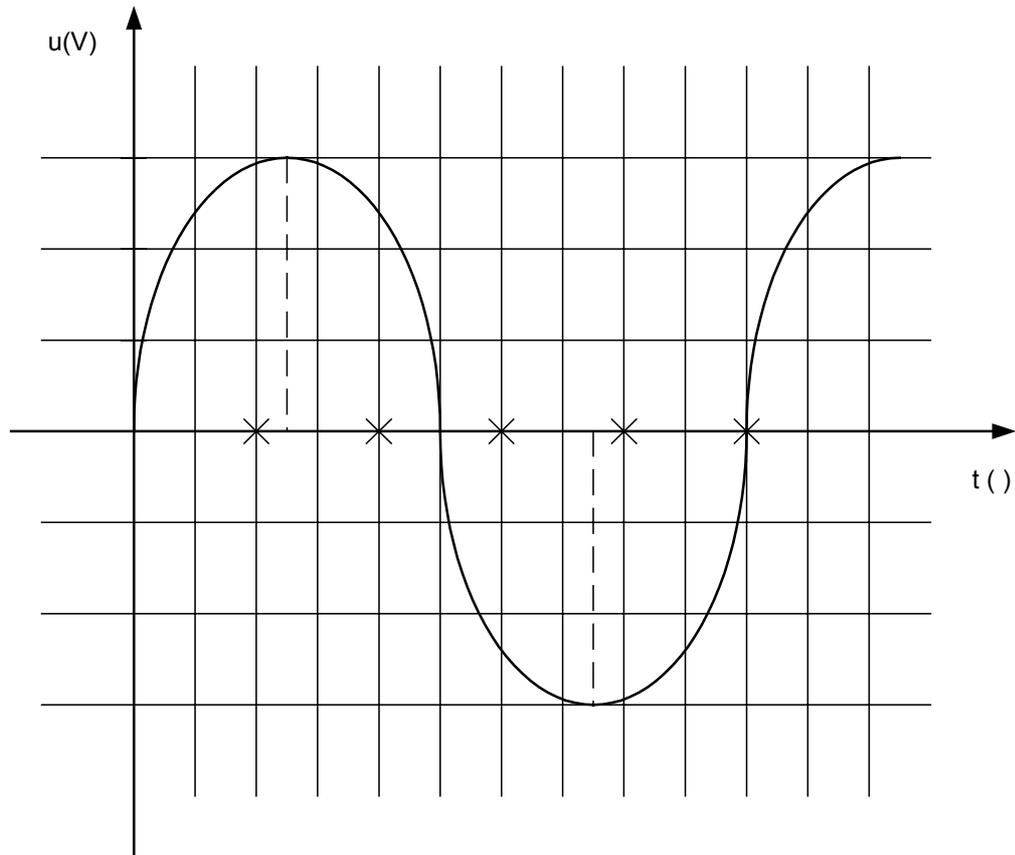


Fig. TP4-1

Les échelles de l'oscillogramme sont : 100 V/carreau et 4 ms/carreau.

- Calculer la valeur de crête et l'amplitude de la tension visualisée.
- Relever la période de la tension visualisée.
- Calculer la fréquence et la pulsation.
- Déterminer la valeur instantanée de la tension alternative pour $t_1 = 5$ ms ; $t_2 = 10$ ms ; $t_3 = 15$ ms et $t_4 = 20$ ms.
- Écrire l'expression de l'onde sinusoïdale correspondante à cette tension.

TP5 – Schéma d'un circuit

5.1. Objectif visé

Apprendre aux stagiaires à calculer à identifier les symboles des composants et leurs groupements dans un schéma d'un circuit à courant alternatif.

5.2. Durée du TP

Le travail pratique proposé est d'une durée de 2 heures.

5.3. Equipements et matière d'œuvre par équipe

- Schémas des circuits à courant alternatif

5.4. Description du TP

Identifier individuellement à partir des schémas les différents symboles des composants et leurs groupements.

5.5. Déroulement du TP

Chaque composant du circuit (fig. TP5 – 1) symbolisé dans le circuit est repéré avec une lettre : R, L ou C, suivie d'un indice. A côté se trouve sa valeur nominale.

- Identifier chaque composant du schéma et indiquer la valeur codée. (Exemple : R1 = une résistance de 7,5 k Ω , soit 7500 Ω).
- Identifier tous les groupements série en indiquant leurs composants.
- Identifier tous les groupements parallèles en indiquant leurs composants.
- Identifier chaque groupement série de composants de la même nature et calculer sa valeur équivalente.
- Identifier chaque groupement parallèle de composants de la même nature et calculer sa valeur équivalente.

- Identifier les groupes de condensateurs parcourus par le même courant.

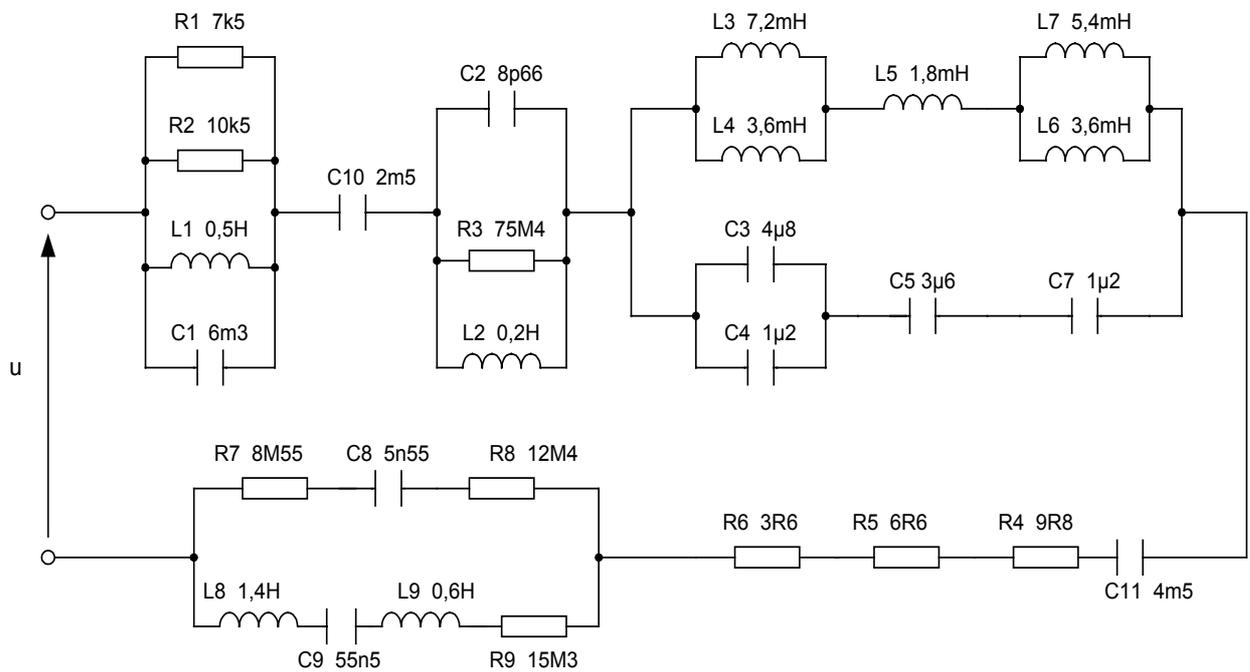


Fig. TP5-1

- Redessiner le circuit en remplaçant tout groupement de composants du même type. Marquer en suite les composant équivalents conformément au code des lettres et des chiffres.

TP6 – Diagrammes vectoriels

6.1. Objectif visé

Apprendre aux stagiaires à dessiner le diagramme vectoriel d'un circuit série et d'un circuit parallèle comprenant une résistance, une bobine et un condensateur. Sur le diagramme doivent être représentés les vecteurs de la tension et du courant pour chaque composant et le vecteur tension du circuit série et courant principal pour le circuit parallèle. A partir des résultats il doit relever le triangle d'impédances dans les deux cas, d'identifier et de calculer le déphasage.

6.2. Durée du TP

Le travail pratique proposé est d'une durée de 2 heures.

6.3. Equipements et matière d'œuvre par équipe

- Données techniques de plusieurs circuits

6.4. Description du TP

Chaque stagiaire doit effectuer indépendamment l'exercice. Il est recommandé d'effectuer les diagrammes vectoriels en respectant une échelle choisie.

6.5. Déroulement du TP

A. Circuit série

Un circuit de courant alternatif comprend les éléments suivants associés en série : deux résistances R_1 et R_2 , deux bobines L_1 et L_2 et un condensateur C . Les tensions relevées aux bornes de chaque élément ont les valeurs efficaces suivantes :

$$U_{R1} = 10 \text{ V} ; U_{R2} = 30 \text{ V} ; U_{L1} = 15 \text{ V} ; U_{L2} = 25 \text{ V} ; U_C = 10 \text{ V}$$

- Dessiner le diagramme vectoriel associé au circuit en utilisant une échelle appropriée.
- Déterminer graphiquement la tension d'alimentation du circuit.
- Indiquer le caractère du circuit (capacitif ou inductif).
- Estimer le déphasage entre le courant et la tension aux bornes du circuit.
- Pour une valeur efficace du courant principal $I = 4 \text{ A}$ déterminer l'impédance du circuit.
- Dessiner le triangle des impédances.

Considérons maintenant que le circuit décrit ci-dessus comprend des éléments réels de circuit : deux bobines, de résistance R_1 et inductance L_1 pour la première et de résistance R_2 et inductance L_2 pour la deuxième, et un condensateur de capacité C et résistance négligeable. Les valeurs efficaces des tensions sont celles indiquées avant.

- Redessiner le diagramme vectoriel du circuit afin de mettre en évidence la tension aux bornes de chaque bobine.
- Déterminer graphiquement la tension aux bornes de chaque bobine.
- Indiquer et ensuite estimer le déphasage entre le courant et la tension aux bornes de chaque bobine.
- Pour une valeur efficace du courant principal $I = 4 \text{ A}$ déterminer l'impédance de chaque bobine.
- Spécifier la tension d'alimentation du circuit et le déphasage entre le courant et la tension aux bornes du circuit.

B. Circuit parallèle

Un circuit de courant alternatif comprend les composants suivants associés en parallèle : deux résistances R_1 et R_2 , une bobine L et deux condensateurs C_1 et C_2 . Les courants relevés à travers chaque élément ont les valeurs efficaces suivantes :

$$I_{R1} = 6 \text{ A} ; I_{R2} = 3 \text{ A} ; I_L = 15 \text{ A} ; I_{C1} = 2 \text{ A} ; I_{C2} = 7 \text{ A}$$

- Dessiner le diagramme vectoriel associé au circuit en utilisant une échelle appropriée.
- Déterminer graphiquement le courant principal du circuit.
- Indiquer le caractère du circuit (inductif ou capacitif).
- Estimer le déphasage entre le courant principal et la tension aux bornes du circuit.
- Pour une valeur efficace de la tension d'alimentation du circuit $U = 50 \text{ V}$, déterminer l'impédance du circuit.
- Dessiner le triangle d'admittances.

TP7 – Mesure des valeurs aux différents points d'un circuit

7.1. Objectif visé

Apprendre au stagiaire à brancher les appareils de mesure de courant alternatif (un ampèremètre et un voltmètre) dans un circuit comprenant un groupement mixte afin de mesurer le courant et la tension pour chaque élément du circuit.

7.2. Durée du TP

Le travail pratique proposé est d'une durée de 5 heures.

7.3. Equipements et matière d'œuvre par équipe

- Ampèremètre de courant alternatif magnétoélectrique à plusieurs calibres ;
- Voltmètre de courant alternatif magnétoélectrique à plusieurs calibres ;
- Deux résistances de valeurs de l'ordre des $K\Omega$;
- Une bobine d'inductance 0,5H ;
- Un condensateur de capacité de l'ordre de 6 μF ;
- Conducteurs de raccordements.

7.4. Description du TP

Le travail s'effectue en groupe de 2 stagiaires. Chaque stagiaire doit brancher les appareils de mesure dans le circuit.

Chaque stagiaire doit rédiger un tableau d'enregistrement qu'il complétera au cours du TP. Le traitement des données doit être effectué séparément par chaque stagiaire.

Pour personnaliser les tableaux d'enregistrement il est nécessaire soit de modifier la tension d'alimentation pour chaque groupe de stagiaires, soit de modifier les valeurs

des composants (par exemple, on peut utiliser à la place de la résistance et du condensateur une boîte à résistance et une boîte à condensateurs).

7.5. Déroulement du TP

Le stagiaire doit mesurer la tension et le courant pour tous les éléments d'un circuit simple alimenté en courant alternatif comportant un ensemble parallèle et un ensemble série.

Le schéma du circuit à étudier est présenté sur la fig. TP7 - 1 :

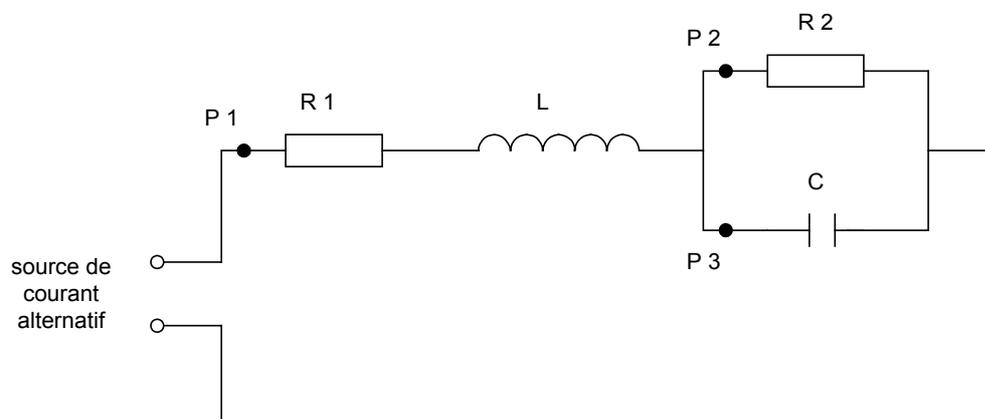


Fig. TP7 - 1

Le circuit doit être réalisé par le groupe de stagiaire. Le tableau d'enregistrement dans lequel seront inscrites les lectures des appareils de mesure est présenté ci-dessous :

Le travail pratique se déroule en trois étapes :

- Mesurer la tension aux bornes de chaque élément et compléter le tableau d'enregistrement avec les relevés pris, ainsi qu'avec les données caractérisant la prise de mesure : calibre et échelle utilisés.
- Mesurer le courant dans chaque élément et compléter le tableau d'enregistrement avec les relevés pris avec les conditions dans lesquelles la mesure a été effectuée : calibre et échelle utilisés.
- Interprétation des résultats.

	N°	Ampèremètre					Voltmètre				
		Calibre [A] E	Echelle [grd] E	Coef. K[A/grd] K=C/E	Lecture [grd] L	Intensité [A] I=K.L	Calibre [V] C	Echelle [grd] E	Coef. K[V/grd] K=C/E	Lecture [grd] L	Tension [V] U=K.L
Résistance R1	1 2 3										
Bobine L	1 2 3										
Résistance R2	1 2 3										
Condensateur C	1 2 3										
Valeur globale du circuit	1 2 3										

Remarque : Il est nécessaire d'effectuer au moins trois mesures pour la même grandeur.

A. Mesure de la tension aux bornes de chaque élément

Avant d'alimenter le circuit en courant alternatif :

- Vérifier que le commutateur du type du courant du voltmètre est sur la position C.A.
- Choisir un grand calibre (même le plus grand) pour l'appareil de mesure.
- Effectuer la mise à zéro de l'aiguille de l'appareil utilisé en agissant sur son correcteur de zéro.

Mesurer en suite la tension pour chaque élément en suivant les étapes :

- Brancher le voltmètre aux bornes de l'élément ;
- Alimenter le circuit ;
- Prendre la mesure et inscrire dans le tableau d'enregistrement dans les colonnes correspondantes le calibre et l'échelle utilisés ainsi que l'indication en graduation du voltmètre.
- Si l'indication reste dans le premier tiers de l'échelle, effectuer une nouvelle mesure pour un calibre inférieur.

- Couper l'alimentation du circuit.

Remarque : L'alimentation du circuit doit être faite avec une tension alternative de préférence de valeur efficace réduite ($30 \div 50V$) qu'on gardera constante au cours du TP).

B. Mesure du courant dans chaque élément

Avant d'alimenter le circuit en courant alternatif :

- Vérifier que le commutateur du type du courant de l'ampèremètre est sur la position C.A. ;
- Choisir un grand calibre (même le plus grand) pour l'ampèremètre ;
- Effectuer la mise à zéro de l'aiguille de l'ampèremètre en agissant sur le correcteur de zéro (seulement s'il y a le cas).

Mesurer en suite le courant à travers chaque élément du circuit en suivant les étapes :

- Brancher l'ampèremètre dans le circuit en P_1 premièrement (en P_2 et P_3 en suite), donc en série avec l'élément où on veut mesurer le courant.
- Alimenter le circuit.
- Prendre la mesure et inscrire dans le tableau d'enregistrement, dans les colonnes correspondantes, le calibre et l'échelle utilisés ainsi que l'indication en graduation de l'ampèremètre.
- Si l'indication reste dans le premier tiers de l'échelle effectuer une nouvelle mesure pour un calibre inférieur ;
- Après avoir effectué la mesure la plus exacte couper l'alimentation, et passer au branchement suivant de l'ampèremètre.

Attention : Le branchement de l'ampèremètre s'effectue seulement dans le circuit hors de tension. La continuité du circuit doit être refaite après l'enlèvement de l'ampèremètre et son emplacement en vue d'une nouvelle mesure.

C. Interprétation des lectures des appareils de mesure

Calculer pour chaque prise de mesure le coefficient de lecture K de l'appareil utilisé en utilisant la formule connue :

$$K = C / E$$

La valeur K ainsi calculée sera inscrite dans le tableau dans la position appropriée.

Calculer pour chaque mesure effectuée la valeur de la grandeur mesurée : courant ou tension, en utilisant les données du tableau : lecture inscrite et coefficient K (calculer au paravent)

Le courant vaut : $I = K \cdot L$

La tension vaut : $U = K \cdot L$

où K : le coefficient correspondant à la mesure.

L : la valeur lue en graduations au cours de la mesure.

Compléter le tableau d'enregistrement avec les valeurs calculées.

Remarque : Les valeurs du courant et de la tension du circuit seront mesurées au cours du TP et la valeur de l'impédance du circuit sera calculée à l'aide des résultats de mesure.

TP8 – Justification des résultats de mesure

8.1. Objectif visé

Le stagiaire doit effectuer un exercice par écrit concernant le calcul de l'incertitude à partir du tableau des résultats du TP précédent.

8.2. Durée du TP

Le travail pratique proposé est d'une durée de 2 heures.

8.3. Equipements et matière d'œuvre par équipe

- Résultats des mesures effectuées du TP7.

8.4. Description du TP

Chaque stagiaire doit effectuer indépendamment le travail exigé. Le formateur doit vérifier si les stagiaires ont effectué correctement le calcul d'incertitude.

8.5. Déroulement du TP

Le travail à effectuer portera sur les données comprises dans le tableau d'enregistrement rédigé et complété au cours du travail pratique correspondant. On a les mesures de chaque grandeur (tension et courant) plusieurs fois avec le même appareil mais utilisant des calibres différents.

A. Calcule d'incertitude pour chaque mesure effectuée.

- Établir l'incertitude absolue en fonction du calibre et classe de précision de l'appareil.

$$\Delta \varepsilon = \frac{C.Cp}{100} \text{ [en unités dont le calibre est exprimé]}$$

- Établir l'intervalle d'incertitude de la grandeur mesurée.
- Indiquer la plus exacte de mesure de chaque série concernant la détermination d'une grandeur.

B. Calcul d'incertitude pour une grandeur déterminée indirectement.

Calculer l'impédance du circuit

$$Z = U / I$$

Où :

Z : impédance en ohm.

U : tension aux bornes du circuit en V (valeur présentée dans le tableau).

I : courant principal du circuit en A (valeur présentée dans le tableau).

- Établir l'intervalle d'incertitude de l'impédance.

L'incertitude de l'impédance est due aux appareils. On a alors :

$$\frac{\Delta Z}{Z} = \frac{\Delta U}{U} + \frac{\Delta I}{I}$$

Les incertitudes relatives pour les valeurs (tension et courant) étant déterminées au paravent, on trouve :

$$\Delta Z = Z \left(\frac{\Delta U}{U} + \frac{\Delta I}{I} \right)$$

et l'intervalle d'incertitude $Z \in [Z \text{ min. } ; Z \text{ max.}]$,

Où : $Z_{\text{min}} = Z - \Delta Z$, et $Z_{\text{max}} = Z + \Delta Z$.

C. Calculer l'erreur absolue et relative pour l'impédance et comparer-la avec la tolérance de sa valeur.

TP9 – Définition des termes : puissance active, puissance réactive, puissance apparente et facteur de puissance

9.1. Objectif visé

Le stagiaire doit effectuer un exercice sur papier reposant sur le calcul de la puissance active, réactive et apparente dans un circuit de courant alternatif, et mettre en évidence le triangle des puissances et le facteur de puissance du circuit.

9.2. Durée du TP

Le travail pratique proposé est d'une durée de 2 heures.

9.3. Equipements et matière d'œuvre par équipe

- Données techniques de plusieurs circuits à courant alternatif

9.4. Description du TP

Chaque stagiaire doit effectuer le travail indépendamment après avoir consulté attentivement les notions théoriques présentées dans le résumé de théorie.

9.5. Déroulement du TP

A. Dans un circuit à courant alternatif alimenté sous une tension efficace de 220V, un wattmètre (le wattmètre est un appareil de mesure de puissance active) indique 660 W. Le courant efficace absorbé par le circuit vaut 8 A.

- Calculer la puissance apparente absorbée par le circuit ;
- Calculer la puissance réactive du circuit ;
- Calculer le facteur de puissance de l'installation ;
- Calculer la capacité d'une batterie de condensateur branchée en parallèle avec l'installation afin de compenser la puissance réactive du circuit.

B. Un circuit qui comporte une bobine et une résistance branchées en série absorbe une puissance active $P = 600 \text{ W}$ et une puissance réactive $Q = 800 \text{ VAR}$.

- Déterminer le facteur de puissance du circuit ainsi que la puissance apparente ;
- Exprimer le facteur de puissance en fonction de la résistance R et de la réactance X de la bobine ;

C. On associe après la bobine et la résistance en parallèle :

- Exprimer le facteur de puissance du circuit parallèle en fonction de la résistance R et de la réactance X de la bobine ;
- Calculer la valeur numérique du facteur de puissance du circuit parallèle.

TP10 – Mesure de la puissance active et du facteur de puissance dans des circuits mono et triphasé

10.1. Objectif visé

Apprendre aux stagiaires à mesurer la puissance active et de calculer le facteur de puissance des circuits mono et triphasé.

10.2. Durée du TP

Le travail pratique proposé est d'une durée de 3 heures.

10.3. Equipements et matière d'œuvre par équipe

- Wattmètre électrodynamique
- Ampèremètre magnétoélectrique à courant alternatif
- Voltmètre magnétoélectrique à courant alternatif
- Résistances
- Inductances
- Condensateur
- Transformateur monophasé 220 V / 24 V
- Transformateur triphasé 3 x 380 V / 220 V

10.4. Description du TP

Le travail s'effectue en groupe de 2 stagiaires. Chaque stagiaire doit brancher les appareils de mesure dans le circuit.

10.5. Déroulement du TP

A. Mesure des puissances d'un système monophasé

On retrouve les deux montages de base : amont (fig. TP10 - 1a) et aval (fig. TP10 - 1b).

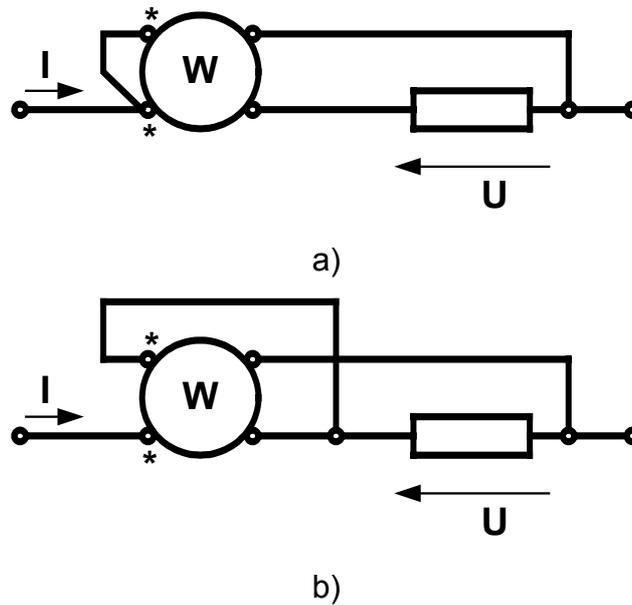


Fig. TP10 - 1

Dans le cas général, la tension d'alimentation du récepteur varie peu. Par contre, la variation d'intensité du courant peut être très importante. Ainsi, en fonction de la valeur du facteur de puissance ($\cos \varphi$), l'intensité peut prendre une valeur dangereuse pour le calibre choisi sur le wattmètre (fig. TP10 - 2).

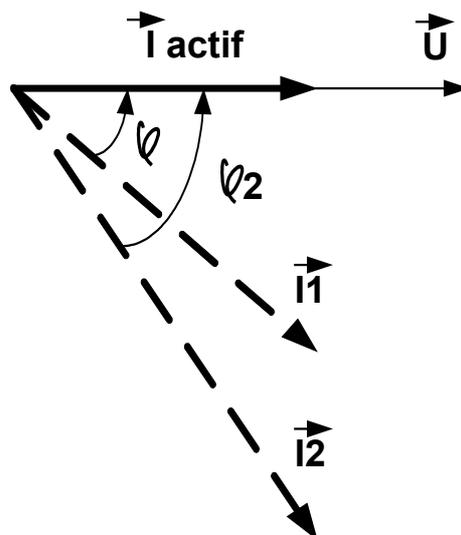


Fig. TP10 - 2

Les corrections de consommations des appareils peuvent être faites comme en courant continu. Dans le cas général, les puissances mises en cause étant importantes, plusieurs centaines de watts, la correction de consommation est négligeable devant l'incertitudes d'étalonnage et de lecture. La correction n'intervenant pas, on choisira le montage (amont ou aval) en tenant compte de la disposition des bornes de wattmètre (fig. TP10 - 3).

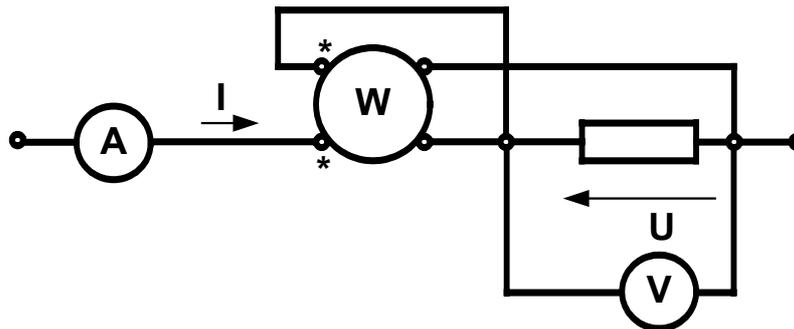


Fig. TP10 - 3

Remarque : Pour les faibles puissances, il faut effectuer les corrections ou utiliser un wattmètre ferro-dynamique compensé.

B. Mesure des puissances d'un système triphasé

Pour placer un récepteur dans une situation optimale de fonctionnement, il faut déterminer son facteur de puissance $\cos \varphi = P / S$, donc effectuer des mesures de puissances active et apparente.

D'autre part, tout système de distribution équilibré ou non, doit fonctionner avec un rendement optimal, qu'il faut évaluer par des mesures de puissance.

Mesure de la puissance active dans un système à 4 fils

Un tel montage correspond à un système des récepteurs couplés en « Etoile » avec le point commun O raccordé au neutre du réseau. On dit aussi que ce montage correspond à un *neutre sorti*, appellation vraie uniquement dans le cas d'une alimentation à quatre fils.

Dans le cas de **ystème équilibré** les trois récepteurs sont identiques, mêmes impédances et mêmes déphasages, et il suffit de mesurer la puissance consommée dans une seule phase $P_1 = U_{1N} \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1$ (fig. TP10 - 4).

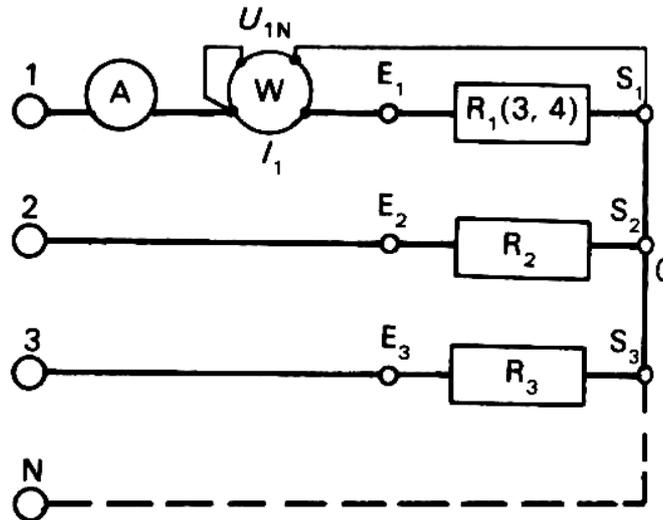


Fig. TP10 - 4

La puissance totale du récepteur triphasé vaut $P = 3 \cdot (U_{1N} \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1)$, puisque $U_{1N} = U_{2N} = U_{3N} = V$ et $I_1 = I_2 = I_3 = I$. Il n'y a pas de courant dans le fil neutre.

Dans un **ystème non équilibré** chaque récepteur est alimenté sous la même tension grâce au fils neutre, mais pour les courants on a :

$$\vec{I}_1 + \vec{I}_2 + \vec{I}_3 = \vec{I}_n \neq 0$$

La puissance absorbée par l'ensemble vaut :

$$P = P_1 + P_2 + P_3$$

Il faut donc monter trois wattmètres monophasés pour mesurer la puissance totale (fig. TP10 - 5).

Comme dans toute utilisation du wattmètre, on place systématiquement un ampèremètre, précédant le wattmètre. En mesurant l'intensité on peut déterminer le

facteur de puissance propre à chaque récepteur
($\cos \varphi_2 = \dots$ etc.).

$$(\cos \varphi_1 = P_1 / V_1 \cdot I_1 ,$$

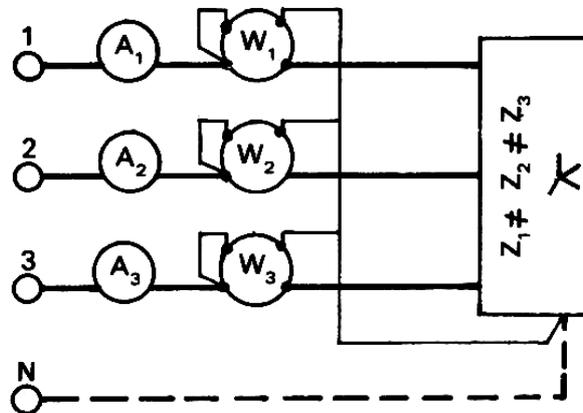


Fig. TP 10 - 5

Remarque : Une puissance active totale est toujours positive. Si dans les montages une déviation devient négative, il faut permuter les deux fils du circuits de tension. Il faut prendre en considération le repérage des bornes d'entrée.

Mesure de la puissance active dans un système à 3 fils

Les récepteurs peuvent être couplés en « Etoile » ou en « Triangle ». Dans le dernier cas le point commun (O) du montage est inaccessible et toutes les mesures doivent être effectuées au niveau de la ligne.

Dans un **système équilibré** (trois récepteurs identiques) on peut utiliser deux méthodes de mesure :

- *Méthode du neutre artificiel*

On utilise trois wattmètres identiques (fig. TP10 - 6) qui possèdent pour le même calibre en tension des résistances internes identiques.

En conséquence, la liaison côté sorties des circuits de tension des wattmètres forment un point neutre, appelé *neutre artificiel*. Ce point neutre N' jouit de mêmes propriétés qu'un point neutre réel (celui du réseau ou du couplage « Etoile ») ou qu'un point neutre fictif (celui du couplage « Triangle »).

$$P_1 = U_{1N} \cdot I_1 \cdot \cos \varphi ; P_2 = U_{2N} \cdot I_2 \cdot \cos \varphi ; P_3 = U_{3N} \cdot I_3 \cdot \cos \varphi$$

La puissance active totale est égale:

$$P = P_1 + P_2 + P_3$$

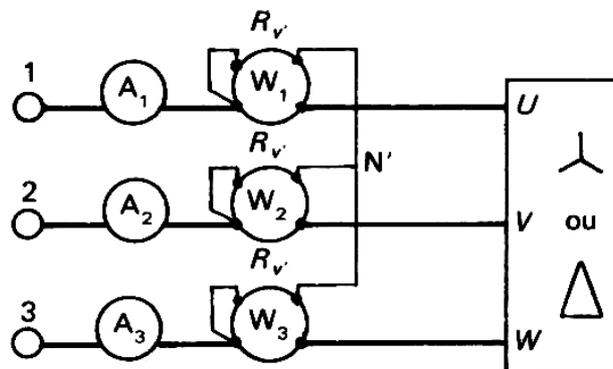


Fig. TP10 - 6

- *Méthode des deux wattmètres*

Dans ce montage on utilise le même principe que dans le précédent : on raccorde le point neutre artificiel N' au potentiel du fil de ligne 3. En conséquence, le wattmètre W₃ n'indique plus rien et il peut être supprimé (fig. TP10 - 7).

Le wattmètre W₁ a son circuit d'intensité parcouru par le courant de ligne I₁ et son circuit de tension soumis à la tension composée U₁₃, d'où :

$$P_1 = U_{13} \cdot I_1 \cdot \cos (\overline{U_{13}}, \overline{I_1})$$

Le wattmètre W₂ indique:

$$P_2 = U_{23} \cdot I_2 \cdot \cos (\overline{U_{23}}, \overline{I_2})$$

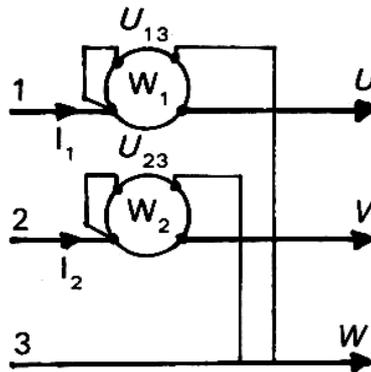


Fig. TP10 - 7

Justification du montage : La puissance instantanée mise en jeu dans les couplage est :

$$\text{En « Etoile » : } P = P_1 + P_2 + P_3 = v_1 \cdot i_1 + v_2 \cdot i_2 + v_3 \cdot i_3$$

$$\text{En « Triangle »: } P = P_1 + P_2 + P_3 = u_{12} \cdot j_3 + u_{23} \cdot j_1 + u_{31} \cdot j_2$$

On démontre dans les deux cas que:

$$P = P_1 + P_2 + P_3 = u_{13} \cdot i_1 + u_{23} \cdot i_2$$

Donc les puissances moyennes actives indiquées par les deux wattmètres donnent en valeurs algébriques la puissance totale du montage :

$$P = P_1 \pm P_2 = U \cdot I \cdot \sqrt{3} \cdot \cos \varphi$$

Que mesurent en réalité les deux wattmètres? Le diagramme vectoriel d'un montage « Etoile » (fig. TP10 – 8) montre que :

$$W_1 \text{ mesure } P_1 = U_{13} \cdot I_1 \cdot \cos (\pi/6 - \varphi)$$

$$W_2 \text{ mesure } P_2 = U_{23} \cdot I_2 \cdot \cos (\pi/6 + \varphi)$$

La distribution étant équilibrée $U_{13} = U_{23} = U$ et $I_1 = I_2 = I_3 = I$, d'où :

$$P_1 + P_2 = U \cdot I \cdot [\cos (\pi/6 - \varphi) + \cos (\pi/6 + \varphi)] = U \cdot I \cdot 2 \cdot \cos \pi/6 \cdot \cos \varphi$$

et $\cos \pi/6 = \sqrt{3} / 2$, donc :

$$P = P_1 + P_2 = U \cdot I \cdot \sqrt{3} \cdot \cos \varphi$$

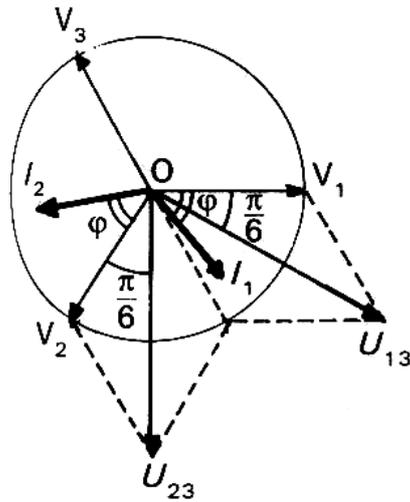


Fig. TP10 - 8

Les récepteurs peuvent être inductifs (φ positif) et capacitifs (φ négatif). L'évolution du déphasage, de $-\pi/2$ à $+\pi/2$, entraîne un changement du signe pour les indications des wattmètres W_1 et W_2 .

Pour les **récepteurs déséquilibrés** est utilisée la méthode des deux wattmètres.

Pour les montages du TP peuvent être utilisés les circuits primaires et secondaires des transformateurs mono et triphasés, des bobines, des condensateurs et des résistances.

TP11 – Description des caractéristiques des transformateurs

11.1. Objet du TP :

Apprendre aux stagiaires à identifier la structure élémentaire et les caractéristiques d'un transformateur monophasé.

11.2. Durée :

Le travail pratique proposé est d'une durée de 2 heures.

11.3. Equipement :

- Transformateur monophasé de faible puissance ;
- Transformateur triphasé de faible puissance
- Autotransformateur
- Conducteurs
- Alimentation 220 V / 380 V

11.4. Description du TP :

Le travail pratique doit être effectué par groupe de deux stagiaires. Chaque stagiaire doit avoir à sa disposition un transformateur monophasé, sur lequel il identifiera les composants. A la fin chaque stagiaire doit effectuer les calculs exigés par le TP.

11.5. Déroulement du TP

A. Transformateur monophasé

Identifier la structure élémentaire du transformateur

- **Le circuit magnétique :**
 - La forme du circuit magnétique.
 - Le matériel du circuit magnétique.
- **Les enroulements :**
 - Enroulement de basse tension ;
 - Enroulement de haute tension ;
 - Différencier les deux enroulements d'après le diamètre du fil utiliser pour leur réalisation ;
 - Différencier les deux enroulements d'après le nombre de spires de chaque enroulement ;
 - Pour le transformateur à circuit magnétique de forme cuirassé, différencier les deux enroulements d'après leur disposition sur la colonne centrale.
- **Les bornes:**
 - Repérer les bornes de l'enroulement basse tension et leur marquage s'il y en a.
 - Repérage des bornes de l'enroulement haute tension et leur marquage s'il y en a.
 - Repérage des marques de polarité pour chaque enroulement.

Exercice

Les deux enroulement d'un transformateur monophasé compte $N_1=1696$ spires et $N_2 = 424$ spires.

- Calculer le rapport de transformation du transformateur.
- Calculer la tension aux bornes du secondaire lorsqu'il est utilisé comme abaisseur de tension et il est alimenté sous la tension du secteur (tension primaire 220 V).
- Calculer la tension aux bornes du secondaire lorsqu'il est utilisé comme éleveur de tension et il est alimenté sous la tension du secteur (tension primaire 220 V).
- Calculer le courant absorbé du réseau, si le courant dans un récepteur branché dans le secondaire et $I_2 = 2,5$ A, pour les deux cas : transformateur abaisseur et transformateur éleveur.

B. Transformateur triphasé

Différencier un transformateur triphasé d'un transformateur monophasé par :

- La forme du circuit magnétique.
- Le nombre des bobines qui réalisent chaque enroulement.
- Le nombre des bornes.

***Module 8 : ANALYSE DE CIRCUITS A
COURANT ALTERNATIF***

EVALUATION DE FIN DE MODULE

O.F.P.P.T.
EFP

MODULE 8 : ANALYSE DE CIRCUITS A COURANT ALTERNATIF

FICHE DE TRAVAIL

Stagiaire : _____ Code : _____
Formateur : _____

Durée : 4 heures

(Exemple)

1. Tracer le diagramme de Fresnel (tension, intensité) d'un dipôle d'impédance $Z = 14 \Omega$ alimenté sous tension $u(t) = 99 \sin(\omega t + \pi/4)$ qui introduit un déphasage $\Phi_{u/i} = 60^\circ$. Ecrire l'équation de l'intensité $i(t)$.

.../6

2. L'association parallèle de deux dipôles (L, R_L) et (C, R_C) est alimentée par une installation de tension efficace $U = 50 \text{ V}$. Donner les caractéristiques (valeur efficace et phase d'origine) des courants i_1, i_2 et i , si $R_L = 100 \Omega$; $L\omega = 100 \Omega$.

.../7

3. Un récepteur triphasé équilibré formé de trois bobines identiques (réactance $L\omega = 70 \Omega$, résistance série $R_s = 70 \Omega$) est couplé en triangle à une installation triphasé équilibrée 127 / 220 V.

- a) Dessiner le schéma de mesure de la puissance par la méthode des deux wattmètres et déterminer les indications des deux appareils.
- b) Que deviennent ces indications si l'on place un élément de résistance $R = 100 \Omega$ entre les bornes (1) et (2) et entre les bornes (2) et (3) du récepteur ?

.../7

Liste des références bibliographiques

Ouvrage	Auteur	Edition
Mesures et essais d'électricité	Dupart B. Le Gall A. Prêt R. Floc'h J.	Dunod, 1997
Lois générales de l'Electricité	F. Lucas P. Charruault	Delagrave, 1987
Les Installations électriques	Fraysse R. Deprez A.M.	Edition Casteilla, 1985
MEMOTECH – Equipements et installations électriques	René Bourgeois Denis Cogniel Bernard Lehalle	Edition Casteilla, 2002
Technologie d'Electricité	Henri NEY	Nathan, 1996
Technologie d'Electricité	R. Pustelnik, B. Deriquehem	Dunod, 1989