



المعهد الجزائري للبترول
INSTITUT ALGERIEN DU PETROLE



ECOLE DE SIKKDA

Département Génie Electrique & Instrumentation

MACHINES A COURANT ALTERNATIF



Préparé par Mr : METATLA Rachid

Entreprise Nationale Sonatrach, Institut Algérien du Pétrole, IAP.
Avenue du 1^{er} novembre, Boumerdès 35000, Algérie. Ecole de Skikda les Platanes Filfila,
21101.

E-mail: <http://www.iap.dz> Tel: (213) 38 92.92.46 – Fax: (213)38 92.00.00. Site web:
iap@iap.dz

1-Les circuits monophasés et triphasés	1
1-1 Les circuits électriques.....	1
1-1-1 Introduction	1
1-2 Généralités sur les circuits monophasés	2
1-2-1 Définitions et caractéristiques	2
1-2-2 Représentation vectorielle de Fresnel	4
1-2-3 Puissance active	8
1-2-4 Puissance réactive	9
1-2-5 Puissance apparente	10
1-2-6 facteur de puissance d'une installation monophasée	12
1-3 Généralités sur les circuits triphasés	13
1-3-1 Définitions et caractéristiques	13
1-3-2 Réseaux triphasés	14
1-3-3 Représentation de Fresnel des tensions	14
1-3-4 Relation entre tension simple et tension composée	15
1-3-5 Récepteurs triphasés	16
1-3-6 Système triphasé équilibré	17
1-3-7 Système triphasé déséquilibré	18
1-3-8 Puissance dans un système triphasé	19
1-3-9 Puissance active	20
1-3-10 Puissance réactive	21
1-3-11 Puissance apparente	22
1-3-12 Puissance dissipée	23
1-3-13 Facteur de puissance	24
2-Généralités sur les machines électriques	26
2-1 Classification des machines électriques	26
2-2 Constitution d'une machine électrique	26
2-3 Circulation du flux d'induction	27
2-3-1 Définition	27
2-3-2 Production du flux par les pôles saillants	27
2-3-3 Production du flux par les pôles lisses	28
2-3-4 Répartition du flux dans l'entrefer	28
2-3-5 Fuites magnétiques	29
2-4 Induction dans l'entrefer	29
2-4-1 Nombre de pôles d'un enroulement à courant alternatif	29
2-4-2 Forme de l'induction dans l'entrefer	31
2-4-3 Théorème de Maurice Leblanc	32
2-4-4 Flux tournant circulaire	33
2-5 Flux utile en fonction de la FMM	34
2-5-1 Cas des FMM continues	35

2-5-2 Cas des FMM alternatives	35
3-Les transformateurs monophasés	35
3.1 Rôle d'un transformateur	35
3.2 Transport de l'énergie électrique	35
3-3 Le principe d'un transformateur	36
3-3-1 Constitution	36
3-4 Transformateur parfait	38
3-4-1 Etude à vide	39
3-4-2 Etude en charge	40
3-5 Comparaison avec le transformateur réel	41
3-6 Schémas équivalents	42
3-7 Rendement	43
3-7-1 Pertes dans le fer	44
3-7-2 Pertes dans le cuivre	44
3-9 Tension d'un transformateur	45
3-10 Rapport de transformation	46
3-11 Bilan des puissances	47
3-12 Méthode pour la détermination des pertes Joule	48
3-13 Méthode pour la détermination des pertes Fer	49
3-14 Transformateur réel	49
3-14-1 Equation des tensions	50
3-14-2 L'enroulement primaire	50
3-14-3 L'enroulement secondaire	50
3-14-4 Schéma équivalent	51
3-14-5 Etude du transformateur par l'hypothèse de Kapp	51
3-14-6 Equations des tensions et des courants	52
3-14-7 Etude de la chute de tension (ΔU).....	56
3-14-8 Bilan des puissances	57
3-14-9 Les différents types de transformateurs	58
4-Transformateurs de Puissance triphasés	59
4-1 Constitution	59
4-2 Symbole et orientation	60
4-3 Mode de branchement des enroulements	60
4-3-1 Indice horaire	60
4-3-2 Transformateur étoile-étoile	61
4-3-3 Transformateur triangle-étoile	62
4-3-4 Transformateur triangle-triangle	63
4-3-5 Transformateur étoile-triangle	63
4-3-6 Transformateur étoile zig-zag	64
4-4 Détermination des paramètres du transformateur triphasé par colonne ...	65

4-4-1 Exemple	65
4-4-2 Tableau récapitulatif par colonne pour différents couplages	66
4-4-3 Détermination des paramètres du transformateur triphasé par phase ..	66
4-5 Classification des transformateurs	68
4-5-1 Technologie de construction	69
4-5-2 Caractéristiques, symboles et utilisation	69
4-5-2 La plaque signalétique (lecture et décodage).....	69
4-5-2 Symboles des transformateurs	71
4-5-4 Couplage des transformateurs	71
4-6 Marche en parallèle des transformateurs triphasés	73
4-6-1 But	73
4-6-2 Conditions de couplage en parallèle	73
4-6-3 Groupes d'indices horaires.....	74
4-6-4 Les couplages des transformateurs et les indices horaires	75
4-7 Les transformateurs de distribution	76
4-7-1 Les transformateurs immergés	76
4-7-2 Transformateurs secs	77
5-Protection des transformateurs de puissance	78
5-1 Protections communes à toutes les technologies (protection contre les défauts externes).....	79
5-2 Protections spécifiques à chaque technologie (Protections contre les défauts internes).....	79
5-3 Le relais Bucholtz	82
5-4 Le DMCR (Dispositif de Mesure et Contrôle de Régime).....	83
6-Transformateurs spéciaux	84
6-1 Autotransformateur	84
6-2 Transformateur spéciaux	85
6-3 Autotransformateur variable	87
6-4 Les équations	87
6-5 Avantages et inconvénients.....	88
6-6 Symboles	88
6-7 Transformateur série TI	88
6-8 Transformateur de tension TU.....	89
6-9 Transformateur modifiant le nombre de phases.....	89
7-Moteurs asynchrones	90
7-1 Classification des moteurs	90
7-1-1 Moteurs à courant alternatif (c.a.).....	90
7-1-2 Moteurs à induction triphasés	93
7-1-3 Moteurs à cage d'écureuil	93
7-1-4 Moteurs à induction à rotor bobiné	95

7-1-5 Moteurs à induction monophasés	98
7-1-6 Moteurs à enroulement auxiliaire de démarrage	99
7-1-7 Moteurs à condensateurs	100
7-1-8 Moteurs à condensateur de démarrage	101
7-1-9 Moteurs à condensateurs de démarrage et de marche	102
7-1-10 Moteurs à bague de déphasage	103
8-Les machines synchrones	105
8-1 présentation	105
8-2 Constitution	105
8-2-1 Principe	105
8-2-2 Rotor ou inducteur	105
8-2-3 Stator ou induit	105
8-2-4 Champ tournant	106
8-2-5 Synchronisme	106
8-2-6 Symbole	106
8-3 F.E.M. induite	106
8-4 Fonctionnement de l'alternateur	107
8-4-1 Excitation de l'alternateur	107
8-4-2 Etude à vide	107
8-4-3 Etude en charge	108
8-4-4 Modèle équivalent d'une phase de l'alternateur	109
8-4-5 Bilan des puissances d'un alternateur	111
8-5 Moteur synchrone	113
9-Régime transitoire des moteurs asynchrones.....	113
9-1 Démarrage direct	114
9-1-1 Principe	114
9-1-2 Démarrage semi-automatique à un seul sens de marche	114
9-1-3 Démarrage direct semi-automatique à deux sens de marche	116
9-1-4 Démarrage direct semi-automatique à deux sens de marche avec butées de fin de course	117
9-1-5 Démarrage direct semi-automatique à deux sens de marche avec butées de fin de course et inversion de sens de rotation	118
9-2 Limitation du courant de démarrage	118
9-2-1 Démarrage étoile-triangle	119
9-3 Démarrage par élimination de résistances statoriques	122
9-3-1 Démarrage par élimination de résistances statoriques à un seul sens de marche	122
9-3-2 Démarrage par élimination de résistances statoriques à deux sens de marche	123
9-4 Démarrage par élimination de résistances rotoriques	124

9-4-1 Démarrage par élimination de résistances rotoriques à un seul sens de marche	125
9-4-2 Démarrage par élimination de résistances rotoriques, deux sens de marche (démarrage en deux temps)	126
9-5 Démarreurs électroniques	127
9-6 Freinage des moteurs asynchrones	128
9-6-1 Utilisation d'un moteur Frein action sur le rotor	128
9-6-2 Freinage par contre courant action sur le stator	130
9-6-3 Schémas de puissance et de commande dans le cas d'un moteur à bagues	131
9-6-4 Freinage par injection de courant continu	132
10- Maintenance préventive des moteurs	134
10-1 Contrôle en fonctionnement	134
10-2 Contrôle avant démontage	134
10-3 Contrôle électrique du moteur	136
10-4 Contrôle après démontage	138
10-5 Maintenance corrective	139
11- La maintenance préventive des transformateurs	141
11-1 Le diagnostic d'un transformateur	142
11-1-1 La chromatographie des gaz dissous	143
11-1-2 Les dérivés furaniques	144
11-1-2 Le degré de polymérisation	144
11-1-3 Le soufre corrosif	145
11-1-4 La rigidité diélectrique	145
11-1-5 La teneur en eau	146
11-1-6 L'indice acidité	146
11-1-7 La tangente Delta	146
11-1-8 La coloration et l'aspect	146
11-1-9 Le comptage des particules	146
11-1-10 La recherche des métaux	146
11-1-11 Les dépôts et sédiments dans le fluide	147
11-1-12 La viscosité	147
11-1-13 La tension interfaciale	147
11-1-14 Le point éclair	147
11-1-15 Le dosage des additives	147
11-2 Recommandations de maintenance des transformateurs de Puissance	148
BIBLIOGRAPHIE.....	151

1-Les circuits monophasés et triphasés:

1-1 Les circuits électriques:

1-1-1 Introduction:

Nous avons vu dans un premier chapitre les circuits parcourus par un courant continu. Nous savons que dans un circuit le courant continu circule toujours dans le même sens : du potentiel le plus élevé vers le potentiel le moins élevé ; On dit qu'il est **unidirectionnel**. L'intensité du courant ou la tension (différence de potentiel) peuvent prendre des valeurs différentes en fonction du temps. Avec un oscilloscope nous pouvons visualiser la forme du courant ou de la tension en fonction du temps. Cette représentation est notée $i(t)$ pour le courant et $v(t)$ ou $u(t)$ pour la tension.

Exemple de courants unidirectionnels:

_ Courant continu constant :

L'intensité ne change pas dans le temps La tension ne change pas dans le temps

_ Courant continu redressé :

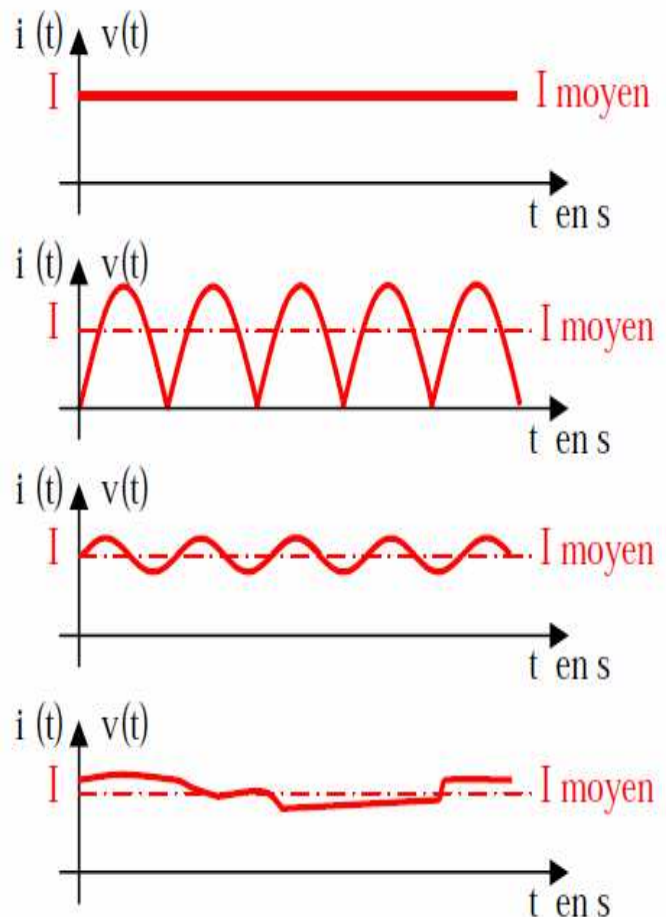
L'intensité change en fonction du temps La tension change en fonction du temps

_ Courant continu ondulé :

L'intensité change en fonction du temps La tension change en fonction du temps

_ Courant continu quelconque :

L'intensité change en fonction du temps La tension change en fonction du temps

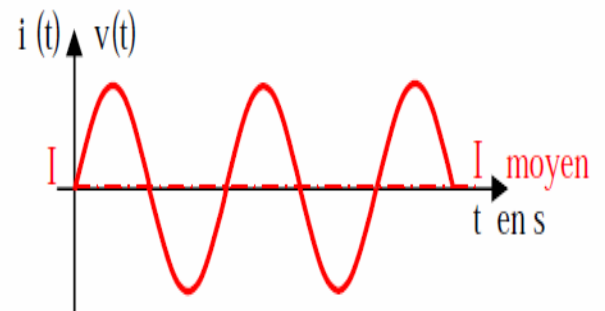
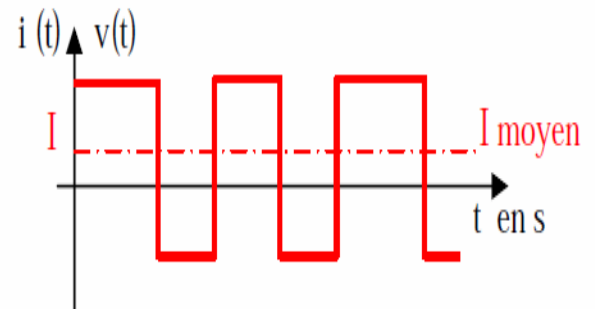


Il existe aussi des courants qui changent de sens en fonction du temps : Ils sont **bidirectionnels**. Ils sont alternativement dans un sens puis dans l'autre puis etc... Ce sont des **courants alternatifs**.

Exemple de courants bidirectionnels:

_ Courant alternatif rectangulaire :
L'intensité et la tension change de sens et de valeur en fonction du temps

_ Courant alternatif sinusoïdal:
L'intensité et la tension change de sens et de valeur en fonction du temps et prend le forme d'une sinusoïde. C'est la forme du courant et de la tension fournie par le réseau en monophasé ou en triphasé.



1-2 Généralités sur les circuits monophasés:

1-2-1 Définitions et caractéristiques:

Un circuit monophasé est un circuit alimenté par une tension alternative sinusoïdale $v(t)$ et parcouru par un courant alternatif sinusoïdal $i(t)$.

Les valeurs de $v(t)$ et de $i(t)$ changent avec le temps.

Le circuit est constitué d'une phase notée Ph ou L référencée par rapport à une masse ou un neutre N.

Un courant alternatif sinusoïdal est un courant bidirectionnel, périodique et symétrique. Il en est de même pour une tension alternative sinusoïdale.

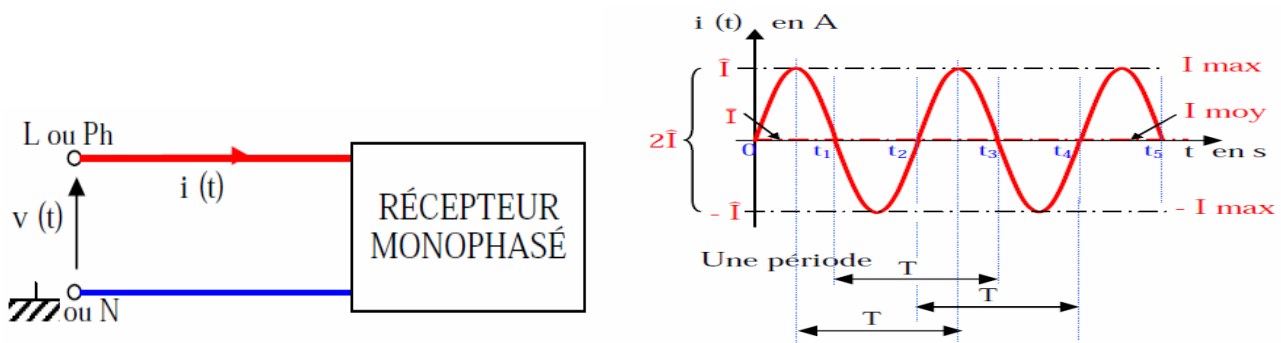
Sa représentation graphique est sinusoïdale. Elle varie en fonction du temps.

Sur la courbe ci contre, on constate que de $t = 0$ à t_1 l'intensité est positive, de t_1 à t_2 l'intensité est négative, de t_2 à t_3 l'intensité est positive, etc...

Le courant s'annule et change de sens à $t = t_1, t_2, t_3, t_4, t_5, \text{etc}\dots$ Le courant est donc bien bidirectionnel.

De plus, le phénomène se reproduit à intervalles réguliers dans le temps: on dit qu'il est périodique.

Enfin, la forme du courant positif est identique à la forme du courant négatif: Il est aussi symétrique.



- On appelle **période** l'intervalle de temps noté T en secondes qui sépare deux instants consécutifs où le phénomène se reproduit identique à lui-même. Par exemple entre les instants t_1 et t_3 ou bien entre t_2 et t_4 ou entre deux maximums consécutifs.
- **L'alternance** est la durée d'une demi période: par exemple: l'alternance positive ou négative
- Plus la période est courte plus le phénomène se reproduit souvent. On définit **la fréquence** notée f d'une grandeur périodique le nombre de périodes par seconde. La fréquence f est en hertz.

$$f = 1 / T$$

f : fréquence en hertz (Hz)

T : période en secondes (s)

- Le courant passe par une valeur maximale lorsqu'il est positif et lorsqu'il est négatif.
La **valeur maximale** du courant ou **valeur crête** est notée \hat{I} ou parfois tout simplement I_{max} .
- Le courant est symétrique par rapport à zéro: il est aussi souvent positif que négatif.
La **valeur moyenne** du courant est égale à 0. Elle est notée \bar{I} ou parfois simplement I_{moy} .
- La valeur du courant à un instant donné s'appelle **la valeur instantanée** et se note i en ampères telle que :

$$i = \hat{I} \cdot \sin(\omega.t + \varphi)$$

Le terme $\sin(\omega.t + j)$ est la fonction mathématique sinus où $(\omega.t + j)$ est un angle en radians, qui désigne la phase du courant à l'instant t , ω la **pulsation** en radians par seconde, t le temps en secondes et j la phase initiale du courant à l'instant $t = 0$

$$\omega = 2.\pi.f = 2.\pi / T$$

Rappels mathématiques sur le cercle trigonométrique:

Le cercle trigonométrique n'a pas d'unité et son rayon vaut 1.

$\frac{1}{4}$ de tour de cercle fait 90 degrés soit $(\pi/2)$ rad

$\frac{1}{2}$ tour de cercle fait 180 degrés soit π rad

$\frac{3}{4}$ de tour de cercle fait 270 degrés soit $(3\pi/2)$ rad

1 tour de cercle fait 360 degrés soit 2π rad

$\frac{1}{12}$ tour de cercle fait 30 degrés soit $(\pi/6)$ rad

$\frac{11}{12}$ tour de cercle fait 330 degrés soit $(\pi/6)$ rad

$$\sin(\pi/2) = 1$$

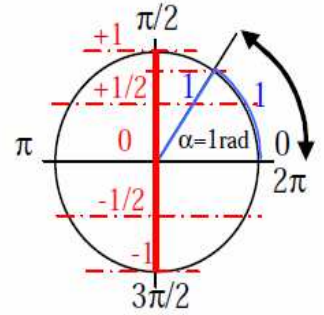
$$\sin(\pi) = 0$$

$$\sin(3\pi/2) = -1$$

$$\sin(2\pi) = 0$$

$$\sin(\pi/6) = \frac{1}{2}$$

$$\sin(11\pi/6) = -\frac{1}{2}$$

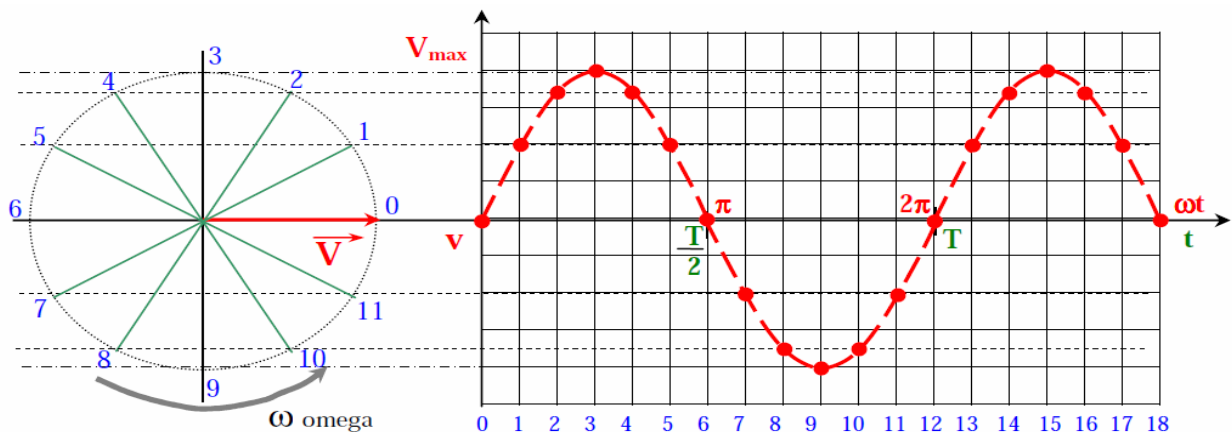


1 radian est la mesure de l'angle dont la longueur de l'arc est égale au rayon du cercle

π radian = 180 degrés donc 1 radian = 57,3 degrés et $\sin 1 = 0,84$ (1 étant 1 radian !)

1-2-2 Représentation vectorielle de Fresnel:

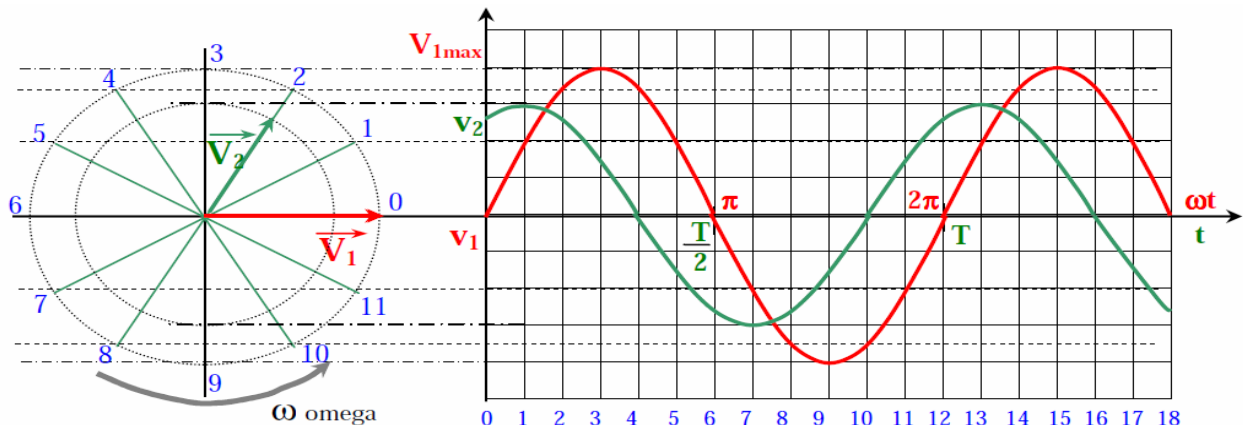
La fonction mathématique sinus peut être représentée par un vecteur tournant. La longueur du vecteur correspond à l'amplitude maximale de la tension ou du courant et, à la phase on associe un angle.



Dans l'exemple ci dessus nous avons représenté la tension

$$v = V_{\max} \sin(\omega.t + \varphi)$$

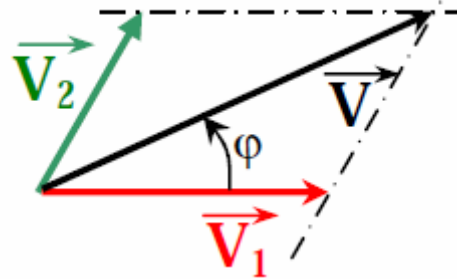
Cette méthode graphique est très utile lorsque l'on veut ajouter deux tensions ou deux courants:



Il est difficile de calculer l'équation trigonométrique telle que

$$v = v_1 + v_2 = V_{1\max} \sin(\omega.t + \varphi_1) + V_{2\max} \sin(\omega.t + \varphi_2)$$

Par contre on mesure facilement la longueur de $V = V_{\max}$ et l'angle φ correspondant à la phase de v à un instant donné.



Le décalage des phases initiales entre les vecteurs V_1 et V_2 est appelé déphasage.

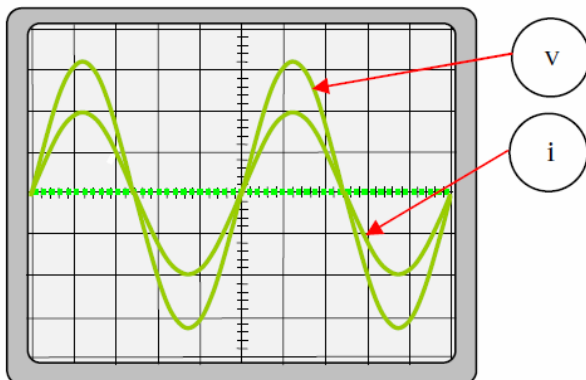
Le vecteur V_2 est en avance de phase par rapport à V_1 ou V_1 est en retard de phase par rapport à V_2 .

Si le déphasage entre V_1 et V_2 est de π rad ou 180 degrés, V_1 et V_2 sont en opposition de phase.

Le déphasage est compté positivement dans le sens trigonométrique.

✓ Cas d'un dipôle purement résistif : le résistor

Un résistor soumis à une tension alternative sinusoïdale est traversé par un courant alternatif sinusoïdal



Lorsque nous visualisons v et i , nous pouvons constater que **dans le cas d'un résistor, v et i sont en phase : $\varphi = 0$**

Représentation de Fresnel : 

Nous pouvons calculer l'impédance :

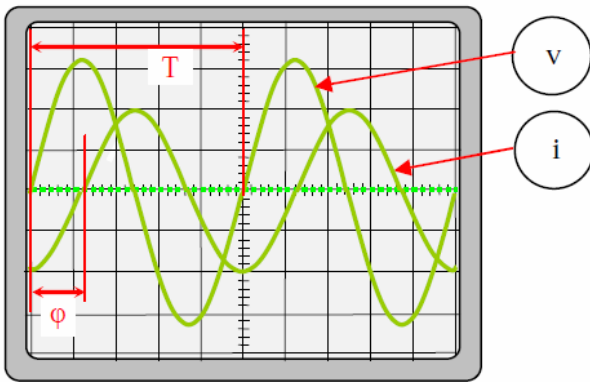
$$Z_R = \frac{V_{\max}}{I_{\max}} = \frac{V}{I} = R$$

✓ Cas d'une bobine: le réactor

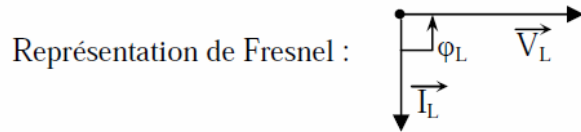
Un réactor soumis à une tension alternative sinusoïdale est traversé par un courant alternatif sinusoïdal

Nous savons qu'une bobine réagit aux variations du courant électrique.

Donc une bobine réagit aux variations du courant alternatif sinusoïdal par son inductance L



Lorsque nous visualisons v et i , nous pouvons constater que **dans le cas d'un réacteur parfait, i est en retard de phase par rapport à v de $\pi/2$**

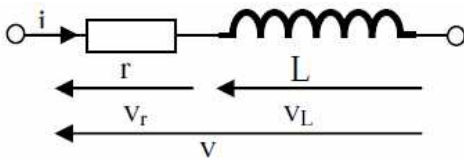


Nous pouvons calculer l'impédance et le déphasage

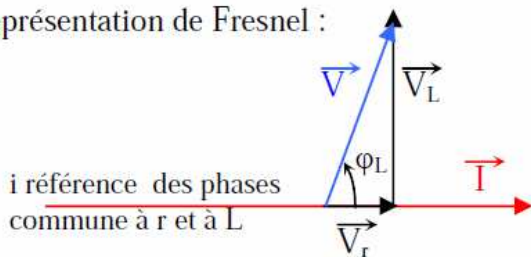
$$Z_L = \frac{V_{\max}}{I_{\max}} \quad \text{et} \quad \varphi_L = \frac{T}{4} = \frac{360^\circ}{4}$$

En réalité, nous savons qu'une bobine a aussi une petite résistance r due à la longueur du fil bobiné.

Donc une bobine réelle peut être considérée comme une résistance en série avec une bobine parfaite :



Représentation de Fresnel :

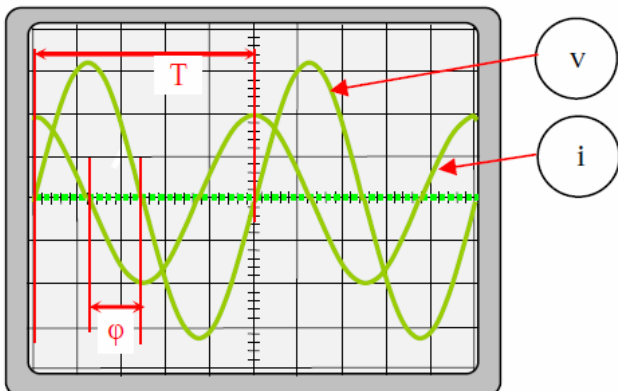


la relation de l'impédance pour un réacteur réel

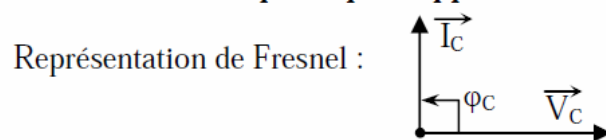
$$Z_L = \sqrt{r^2 + (L\omega)^2} \quad \text{et} \quad \text{tg}\varphi = \frac{L\omega}{r}$$

✓ Cas d'un condensateur:

Un condensateur soumis à une tension alternative sinusoïdale joue le rôle d'une membrane et semble traversé par un courant alternatif sinusoïdal



Lorsque nous visualisons v et i , nous pouvons constater que **dans le cas d'un condensateur, i est en avance de phase par rapport à v de $\pi/2$**



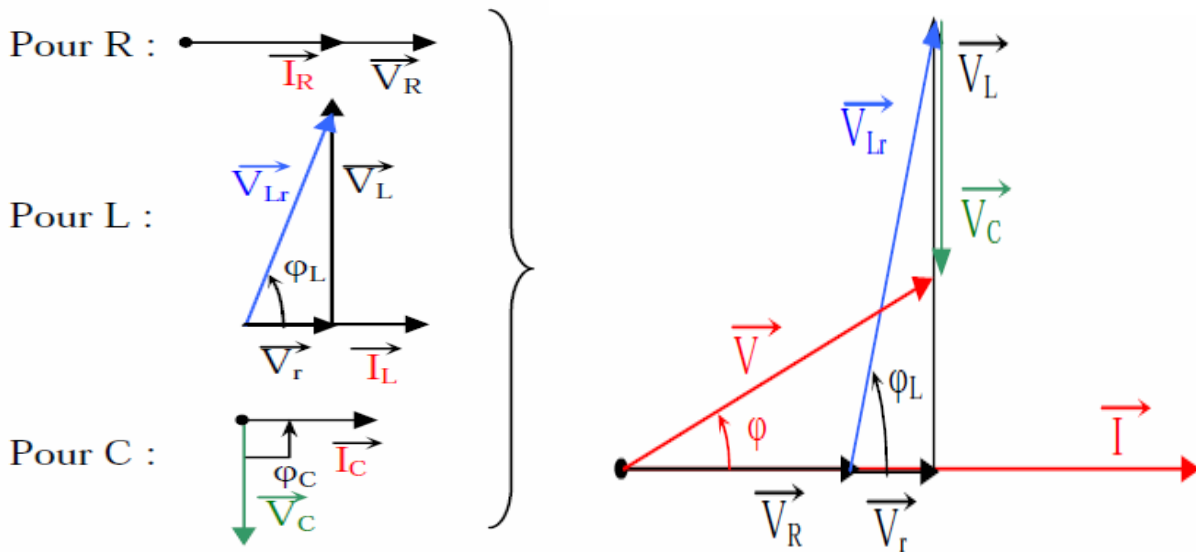
Nous pouvons calculer l'impédance :

$$Z_L = \frac{V_{\max}}{I_{\max}} \quad \text{et} \quad \varphi_L = \frac{T}{4} = \frac{360^\circ}{4}$$

✓ Association en série – Montage RLC série

Prenons l'exemple d'un circuit alimenté sous une tension alternative sinusoïdale et constitué d'une résistance, d'un réacteur et d'un condensateur

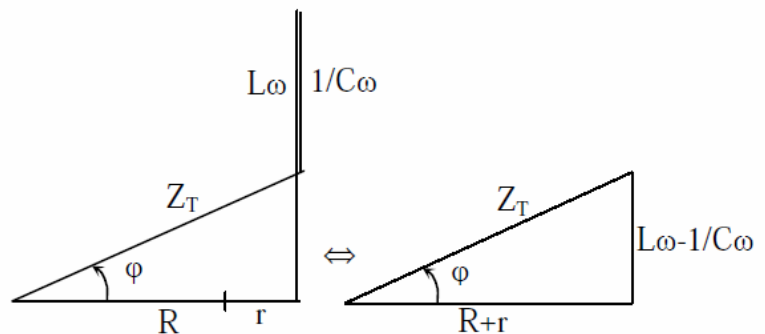
branchés en série : Ces trois dipôles sont traversés par le même courant alternatif sinusoïdal



En série $I_R = I_L = I_C = I$ donc I sera choisi comme référence des phases. A partir de la représentation de Fresnel ci-dessus nous pouvons construire le triangle des impédances qui permet de calculer l'impédance totale Z_T et le déphasage φ entre la tension et le courant : En appliquant les relations de Pythagore dans un triangle rectangle :

$$Z_T = \sqrt{(R+r)^2 + (L\omega - 1/C\omega)^2}$$

Et, $\operatorname{tg}\varphi = (L\omega - 1/C\omega) / (R+r)$



✓ Cas particulier:

lorsque $L\omega = 1/C\omega$, le terme $L\omega - 1/C\omega$ est nul

- l'impédance totale Z_T est minimale : $Z_T = Z_0 = R + r$

Donc pour une tension donnée, la valeur efficace du courant $I = V / Z$ est maximale et égale à I_0

- La tangente de φ est nulle donc le déphasage entre le courant et la tension est nul

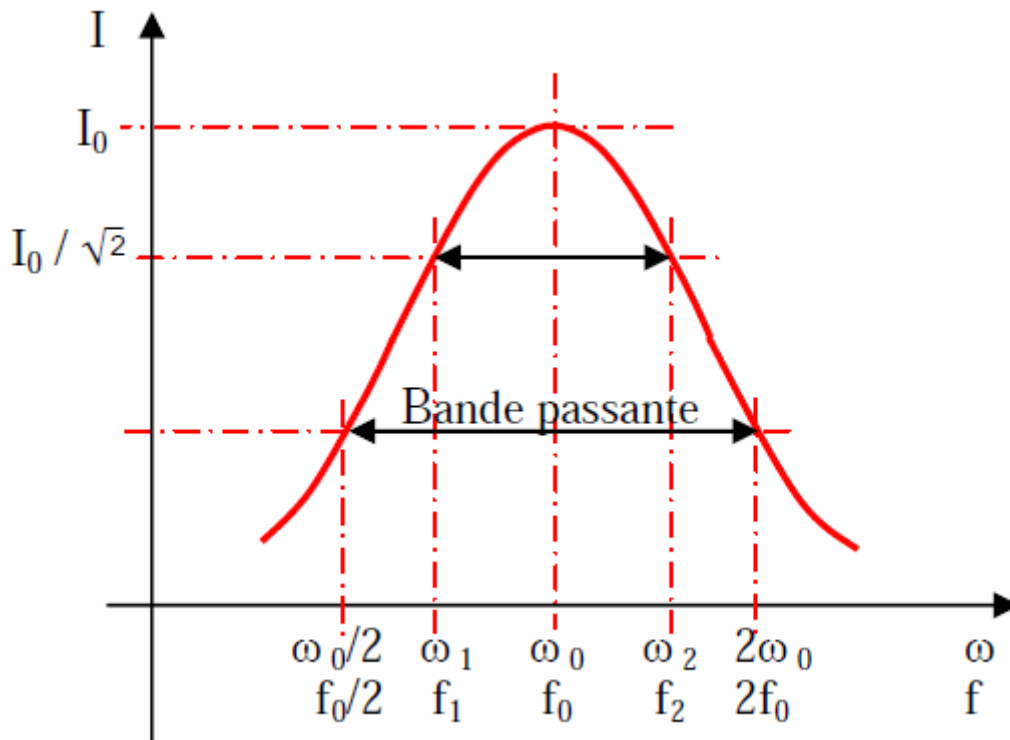
Donc la tension et le courant sont en phase.

On dit que le montage est en résonance

On définit alors une fréquence de résonance f_0 telle que $f_0 = \omega_0 / 2\pi$ avec

$$\omega_0 = 1 / \sqrt{LC}$$

Variation de l'intensité efficace du courant en fonction de la pulsation ou de la fréquence :



- Pour ω_0 on a $L\omega_0 = 1/C\omega_0$

f_0 est la fréquence de résonance

L'intensité est maximale

- Pour $\omega = 2\omega_0$ (fréquence 2 fois plus grande)

$L\omega_0 = L\omega/2$ et $1/C\omega_0 = 2/C\omega$

Donc $L\omega = 4 \times 1/C\omega$

La réactance de la bobine devient prépondérante

- Pour $\omega = \omega_0/2$ (fréquence 2 fois plus petite)

$L\omega_0 = 2L\omega$ et $1/C\omega_0 = 1/2C\omega$

Donc $1/C\omega = 4 L\omega$

La réactance du condensateur est prépondérante

1-2-3 Puissance active:

La puissance active notée P est la valeur moyenne de la puissance instantanée.

Elle est donnée par la relation ci contre dans laquelle

- V est la valeur efficace de la tension
- I est la valeur efficace de l'intensité du courant
- ϕ est le déphasage du courant par rapport à la tension

$$\boxed{P = V \cdot I \cdot \cos\phi}$$

(W) (V) (A)

Pour un résistor nous savons que le déphasage du courant par rapport à la tension est nul donc $\cos\phi = 1$.

D'autre part on sait que dans un résistor toute la puissance consommée est dissipée en chaleur par effet Joule donc :

$$\text{Pour un résistor} \\ P = V \cdot I = R \cdot I^2$$

Pour un réactor parfait le déphasage du courant par rapport à la tension est de $+\pi/2$ rad donc $\cos\phi = 0$.

Une bobine parfaite ne consomme pas de puissance active. En réalité une bobine a toujours une petite résistance r due à la longueur du fil bobiné qui dissipe de la chaleur.

$$\text{Pour un réactor parfait} \\ P = 0 \\ \text{Pour un réactor réel} \\ P = r \cdot I^2 \text{ (Joule)}$$

Pour un condensateur le déphasage du courant par rapport à la tension est de $-\pi/2$ rad donc $\cos\phi = 0$.

Un condensateur ne consomme pas de puissance active.

$$\text{Pour un condensateur} \\ P = 0$$

Dans un montage, la puissance active totale consommée par l'ensemble des récepteurs est la somme arithmétique des puissances actives dissipée dans chaque récepteur.

**Les puissances actives
s'ajoutent arithmétiquement**

1-2-4 Puissance réactive:

La puissance réactive notée Q est la puissance mise en jeu dans les dipôles réactifs.

Elle est due à la réactance et s'exprime en VAr (Volt Ampère réactif)

Elle est donnée par la relation ci contre dans laquelle

- V est la valeur efficace de la tension
- I est la valeur efficace de l'intensité du courant
- ϕ est le déphasage du courant par rapport à la tension

$$Q = V \cdot I \cdot \sin\phi \\ (VAr) \quad (V) \quad (A)$$

Pour un résistor nous savons que le déphasage du courant par rapport à la tension est nul donc $\sin\phi = 0$.

Un résistor n'a pas de réactance

Un résistor ne consomme pas de puissance réactive.

$$\text{Pour un résistor} \\ Q = 0$$

Pour un réactor parfait le déphasage du courant par rapport à la tension est de $+\pi/2$ rad donc $\sin\phi = 1$.

Une bobine parfaite consomme de la puissance réactive.

$$\text{Pour un réactor parfait} \\ Q_L = V.I = L\omega.I^2 = X_L.I^2$$

Pour un condensateur le déphasage du courant par rapport à la tension est de $-\pi/2$ rad donc $\sin\phi = -1$.

Un condensateur fournit de la puissance réactive.

$$\text{Pour un condensateur} \\ Q_C = -V.I = -I^2 / C\omega = -X_C.I^2$$

Dans un montage, la puissance réactive totale est la somme algébrique des puissances réactives absorbées par les bobines (positives) et celles fournies par les condensateurs (négatives).

**Les puissances réactives
s'ajoutent algébriquement**

1-2-5 Puissance apparente:

La puissance apparente notée S est la puissance qui caractérise le générateur source de tension et de courant alternatif. Quand on met à disposition une source d'énergie électrique alternative, on ne connaît pas l'utilisation qui sera faite par l'utilisateur et donc on ne connaît pas le déphasage entre le courant et la tension. Par contre, il est nécessaire de connaître la tension et l'intensité disponible.

La puissance apparente est donnée par la relation ci contre dans La quelle V est la valeur efficace de la tension I est la valeur efficace de l'intensité du courant La puissance apparente s'exprime en VA (Volt Ampère)

$$S = V . I \\ (\text{VA}) \quad (\text{V}) \quad (\text{A})$$

Pour un résistor nous savons que le déphasage du courant

par rapport à la tension est nul donc $\sin\phi = 0$.

Un résistor n'a pas de réactance

Un résistor ne consomme pas de puissance réactive.

$$\text{Pour un résistor} \\ S = P = V \cdot I$$

Dans un montage, la puissance apparente totale est la somme vectorielle des puissances apparentes de chaque récepteur.

$$S_{\text{tot}} = V \cdot I = Z_{\text{tot}} \cdot I^2$$

Facteur de puissance:

Nous venons de voir que la puissance active est donnée par la relation :

$$P = V \cdot I \cdot \cos \phi$$

et que la puissance apparente est donnée par la relation : $S = V \cdot I$

$$\text{donc : } P = S \cdot \cos \phi$$

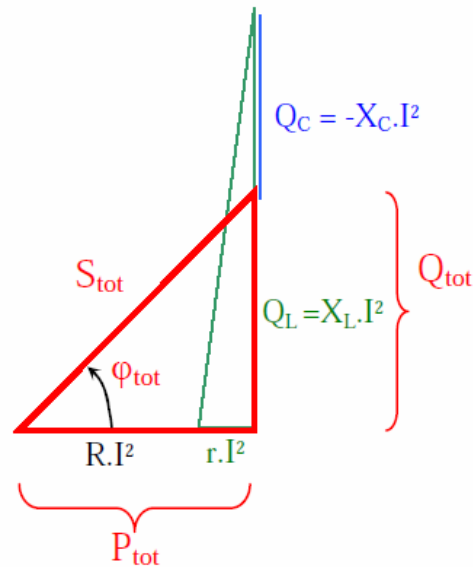
Le rapport de la puissance active sur la puissance apparente est appelé le **facteur de puissance** ou $\cos \phi$ et n'a pas unité.

$$\cos\phi = \frac{P}{S} \\ \text{(W) (VA)}$$

Triangle des puissances:

De la même façon que nous avons défini le triangle des impédances nous pouvons tracer le triangle des puissances :

Puissance active totale :	$P_{\text{tot}} = \Sigma P = R_{\text{tot}} \cdot I^2$
Puissance réactive totale :	$Q_{\text{tot}} = \Sigma Q = X_{\text{tot}} \cdot I^2 = P_{\text{tot}} \operatorname{tg}\phi$
Puissance apparente totale :	$S_{\text{tot}} = \sqrt{P_{\text{tot}}^2 + Q_{\text{tot}}^2} = Z_{\text{tot}} \cdot I^2$
Facteur de puissance :	$\cos\phi = \frac{P_{\text{tot}}}{S_{\text{tot}}}$



1-2-6 facteur de puissance d'une installation monophasée:

Le relèvement du facteur de puissance consiste à diminuer le déphasage ϕ_{tot} pour augmenter $\cos\phi_{tot}$

Pour cela il faut que le montage fournisse plus de puissance réactive.

Il convient donc d'augmenter Q_C en rajoutant des condensateurs.

Avant relèvement : on a $Q_{tot} = P_{tot} \tan\phi_{tot}$ et $S_{tot} = V \cdot I_{tot}$

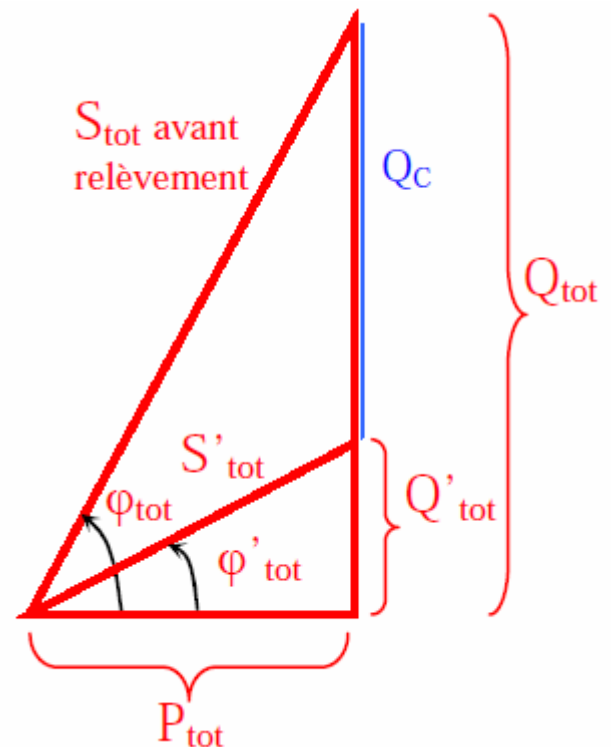
Après relèvement : on veut $Q'_{tot} = P_{tot} \tan\phi'_{tot}$ et $S'_{tot} = V \cdot I'_{tot}$

Il faut donc fournir $Q_C = Q_{tot} - Q'_{tot} = P_{tot} (\tan\phi_{tot} - \tan\phi'_{tot})$

Or un condensateur de capacité C soumis à une tension V

fournit une puissance réactive $Q_C = I^2 / C\omega = V^2.C\omega$ $\Rightarrow C = Q_C / V^2.\omega$

$$C = \frac{P_{tot} (\tan\phi_{tot} - \tan\phi'_{tot})}{V^2.\omega}$$



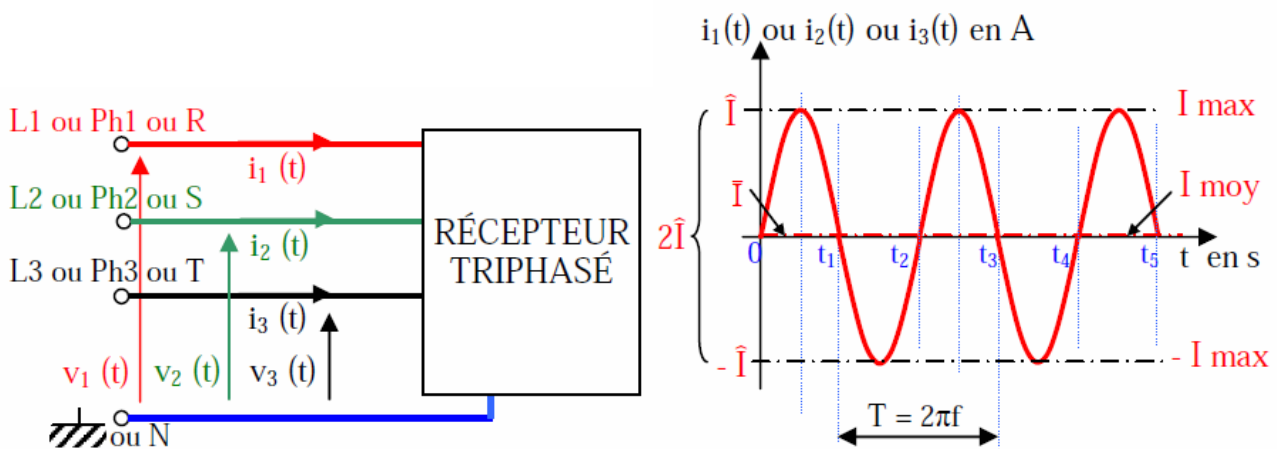
1-3 Généralités sur les circuits triphasés:

1-3-1 Définitions et caractéristiques:

Un circuit triphasé est un circuit alimenté par trois tensions alternatives sinusoïdales $v_1(t)$, $v_2(t)$, $v_3(t)$, et parcouru par 3 courants alternatifs sinusoïdaux $i_1(t)$, $i_2(t)$ et $i_3(t)$.

Les valeurs de $v_1(t)$, $v_2(t)$, $v_3(t)$ et de $i_1(t)$, $i_2(t)$, $i_3(t)$ changent avec le temps. Le circuit est constitué de 3 phases notées Ph1 ou L1 ou R, Ph2 ou L2 ou S, Ph3 ou L3 ou T, référencée par rapport à une masse ou un neutre N.

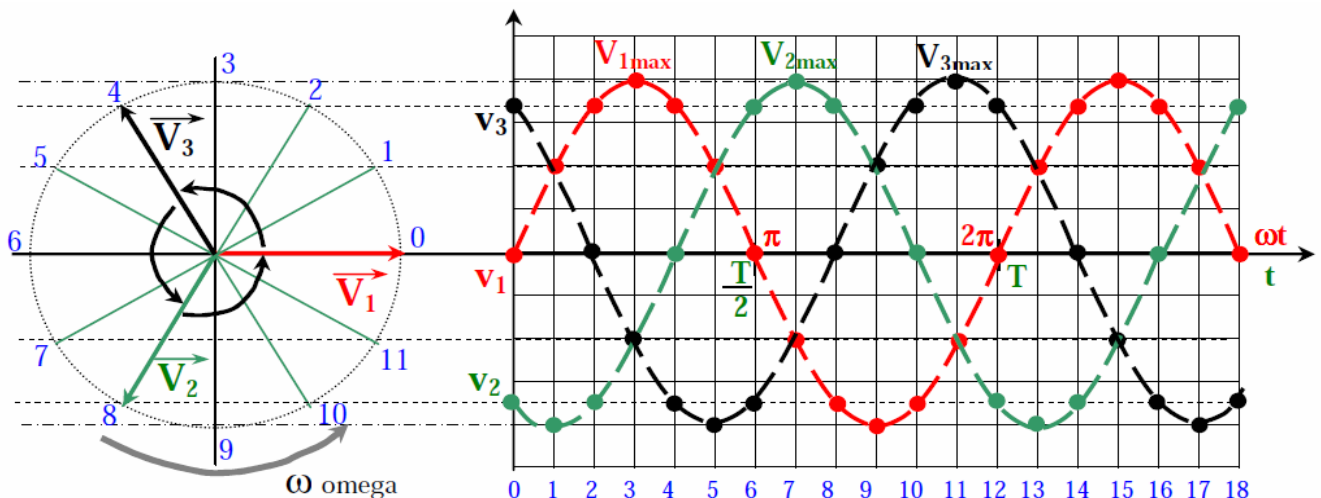
Comme en circuit monophasé, en circuit triphasé, un courant alternatif sinusoïdal est un courant bidirectionnel, périodique et symétrique. Il en est de même pour une tension alternative sinusoïdale.



La représentation graphique du courant varie en fonction du temps de façon sinusoïdale. Les trois courants $i_1(t)$, $i_2(t)$ et $i_3(t)$ ont la même fréquence.

Un circuit triphasé est caractérisé par le fait que les trois tensions ont la même fréquence et sont déphasées les unes par rapport aux autres de 120°

2.2. Représentation vectorielle de Fresnel:



Dans l'exemple ci dessus nous avons représenté la tension:

$$v_1 = V_{1\text{max}} \sin(\omega.t + \phi)$$

Puis, déphasée par rapport à v_1 de 120 degrés ou $2\pi/3$ rad

$$v_2 = V_{2\max} \sin(\omega.t + \phi - 2\pi/3)$$

Puis, déphasée par rapport à v_2 de 120 degrés ou $2\pi/3$ rad

$$v_3 = V_{3\max} \sin(\omega.t + \phi - 4\pi/3)$$

Puis, déphasée par rapport à v_3 de 120 degrés ou $2\pi/3$ rad de nouveau v_1

Etc...

Pour cela nous avons divisé le cercle en 12 parties égales à 30 degrés ou $\pi/6$ rad.

1-3-2 Réseaux triphasés:

Les réseaux triphasés ou secteur triphasé sont des sources de tension constitués de 3 bornes de phase, d'une borne de neutre et d'une borne de terre PE. Parfois, il arrive qu'il n'y est pas de neutre.

Tensions simples:

Dans le cas d'un réseau triphasé avec neutre, on appelle tensions simples les différences de potentiel

mesurées entre une phase et le neutre et dont les valeurs efficaces sont notées :

V_1 pour la phase 1, V_2 pour la phase 2 et V_3 pour la phase 3.

En général sur un réseau triphasé on a $V_1 = V_2 = V_3 = V$.

Tensions composées:

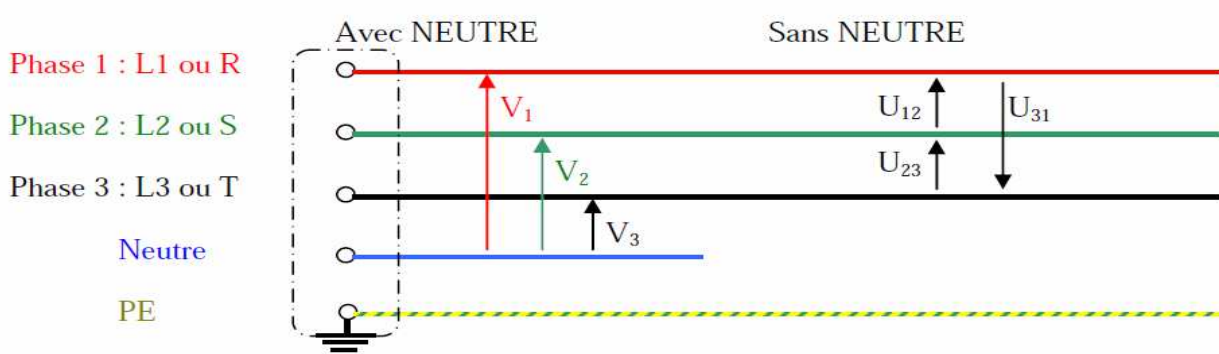
Dans le cas d'un réseau triphasé sans neutre, on appelle tensions composées les différences de

potentiel mesurées entre deux phases et dont les valeurs efficaces sont notées :

$U_{12} = V_1 - V_2$, $U_{23} = V_2 - V_3$ et $U_{31} = V_3 - V_1$.

En général sur un réseau triphasé on a $U_{12} = U_{23} = U_{31} = U$.

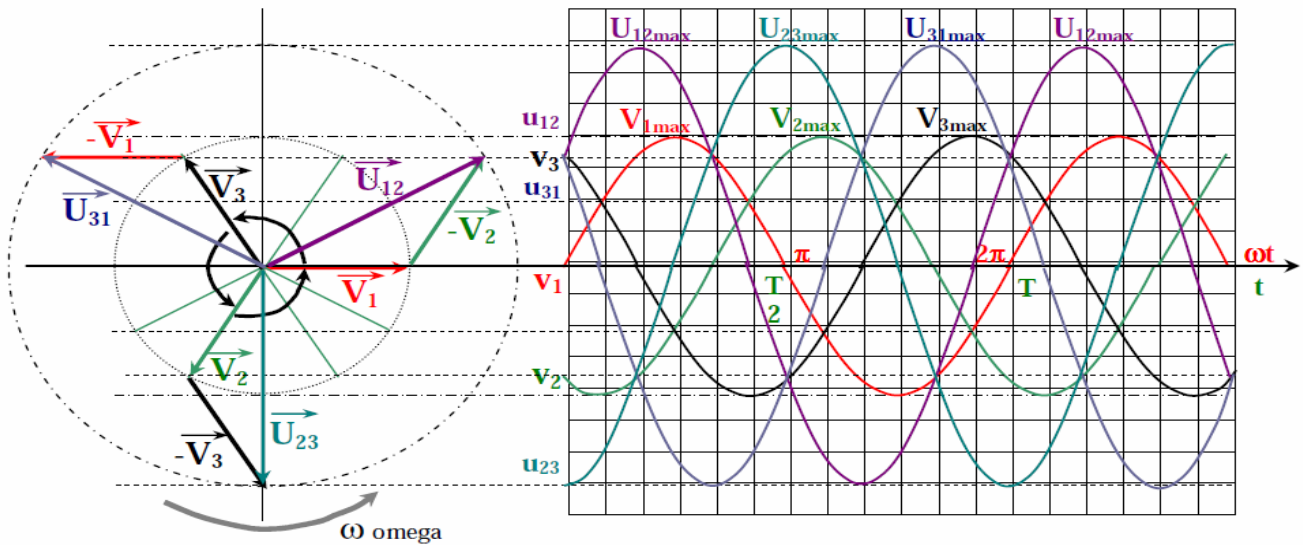
Réseau triphasé:



1-3-3 Représentation de Fresnel des tensions:

A partir des 3 tensions simples définies positivement dans le sens trigonométrique, nous pouvons construire la représentation de Fresnel des tensions composées :

$$\vec{U}_{12} = \vec{V}_1 - \vec{V}_2, \quad \vec{U}_{23} = \vec{V}_2 - \vec{V}_3 \quad \text{et} \quad \vec{U}_{31} = \vec{V}_3 - \vec{V}_1$$



Sur la représentation de Fresnel on constate que les tensions composées sont en avance de phase de $\pi/6$ rad.

Lorsque l'ordre de passage des vecteurs dans le sens trigonométrique est V_1 puis V_2 puis V_3 pour les tensions simples ou bien U_{12} puis U_{23} puis U_{31} pour les tensions composées, le système est dit direct.

Lors du contrôle de la rotation des phases on vérifie le sens direct : RST dans le sens trigonométrique.

1-3-4 Relation entre tension simple et tension composée:

Le triangle ABC est isocèle est telle que :

$$AB = V_1$$

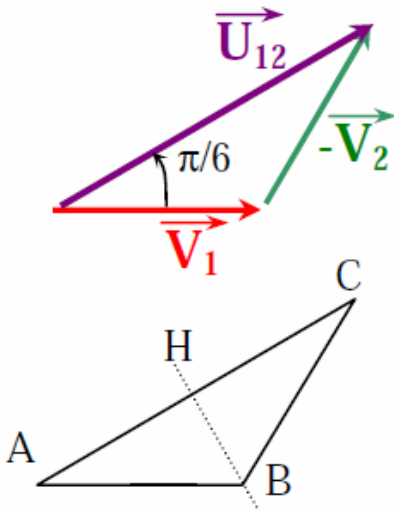
$$BC = V_2$$

$$AC = U_{12} = 2AH = 2HC$$

$$L'angle\ HAB = \pi/6$$

$$\text{Donc } AH = AB \cos(\pi/6) = AB \cdot \sqrt{3} / 2$$

$$\text{Donc } AC = 2AH = AB \cdot \sqrt{3}$$



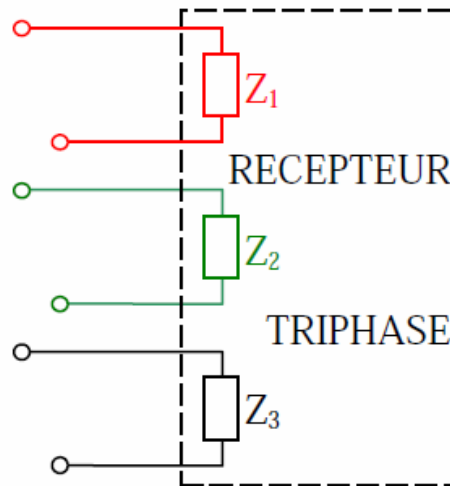
$$U = \sqrt{3} \cdot V$$

1-3-5 Récepteurs triphasés:

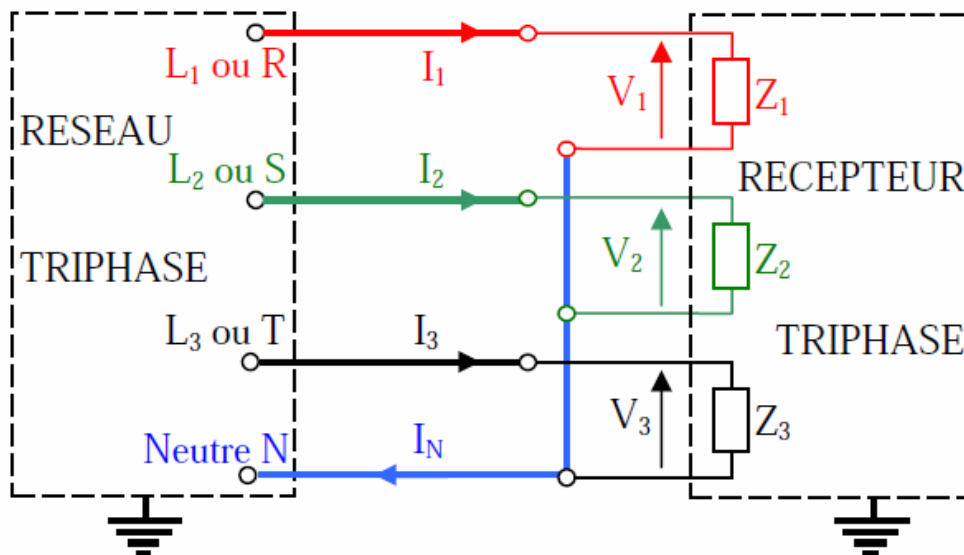
Les récepteurs triphasés sont constitués de trois récepteurs monophasés d'impédances Z_1 , Z_2 et Z_3 .

Un récepteur triphasé est donc un système avec 6 bornes que l'on doit alimenter avec un réseau triphasé constitué de 3 bornes de phase et éventuellement d'une borne de neutre.

Donc pour alimenter un récepteur triphasé avec un réseau triphasé, il est nécessaire de réaliser un couplage des 6 bornes du récepteur.



Couplage ETOILE:



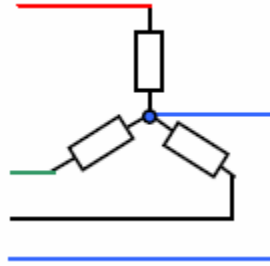
Dans un couplage étoile chacun des récepteurs est branché entre une phase et le neutre ; La tension à ses bornes est donc la tension simple du réseau. Chacun des récepteurs est traversé par le courant de ligne présent dans le conducteur qui l'alimente.

Loi des noeuds :

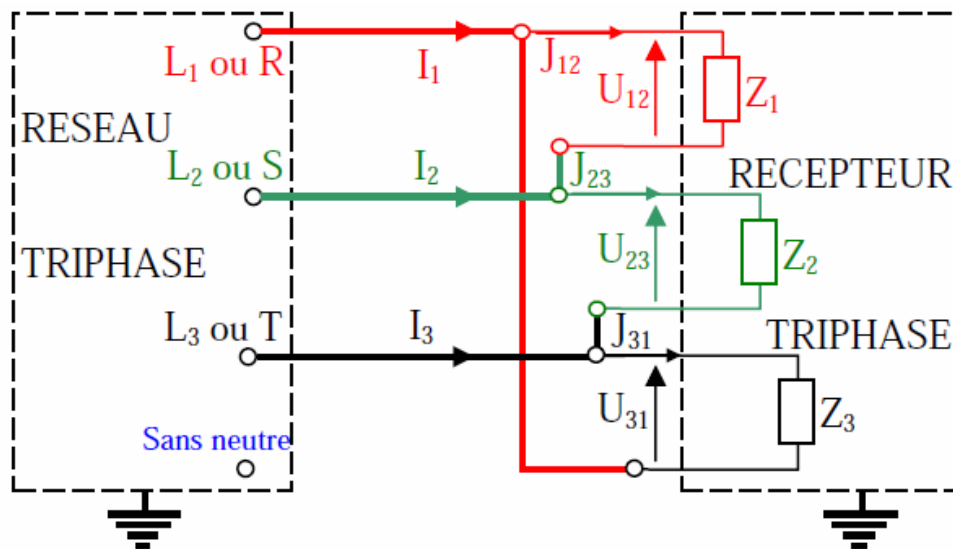
$$\vec{I}_N = \vec{I}_1 + \vec{I}_2 + \vec{I}_3$$

Le couplage étoile est noté : Y

Le nom du couplage vient du fait que les 3 impédances sont reliées en forme d'étoile :



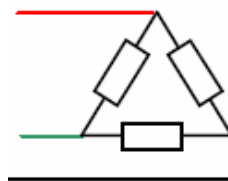
Couplage TRIANGLE



Dans un couplage triangle chacun des récepteurs est branché entre deux phases; La tension à ses bornes est donc la tension composée du réseau. Chacun des récepteurs est traversé par le courant noté J qui n'est pas le courant de ligne présent dans le conducteur qui l'alimente.

Le couplage triangle est noté : Δ

Le nom du couplage vient du fait que les 3 impédances sont reliées en forme de triangle :



1-3-6 Système triphasé équilibré:

Lorsque les trois tensions qui composent le réseau triphasé sont identiques : même amplitude, même fréquence et même déphasage de 120 degrés les unes par rapport aux autres

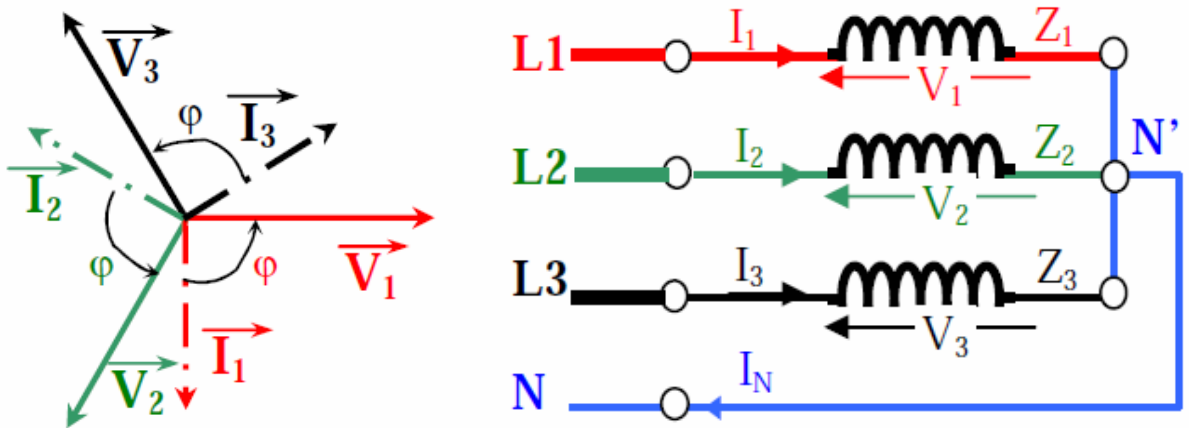
Et lorsque les trois éléments qui composent le récepteur triphasé sont identiques :

même impédance, même résistance, même réactance, même nature

Alors les trois courants qui alimentent le récepteur triphasé sont identiques : même amplitude, même fréquence et même déphasage de 120 degrés les uns par rapport aux autres.

On dit alors que le système triphasé est équilibré.

Prenons l'exemple d'un moteur constitué de 3 enroulements identiques couplés en étoile et alimentés par un réseau triphasé de trois tensions identiques.



La représentation de Fresnel

En régime triphasé équilibré le courant dans le neutre est nul. Donc pour un système triphasé équilibré, couplé en étoile, il n'est pas nécessaire de brancher le fil de neutre sur le couplage.

1-3-7 Système triphasé déséquilibré:

Lorsque les trois tensions qui composent le réseau triphasé ne sont pas identiques :

Amplitude différente, ou fréquence différente ou déphasage différent de 120 degrés

ou lorsque les trois éléments qui composent le récepteur triphasé ne sont pas identiques :

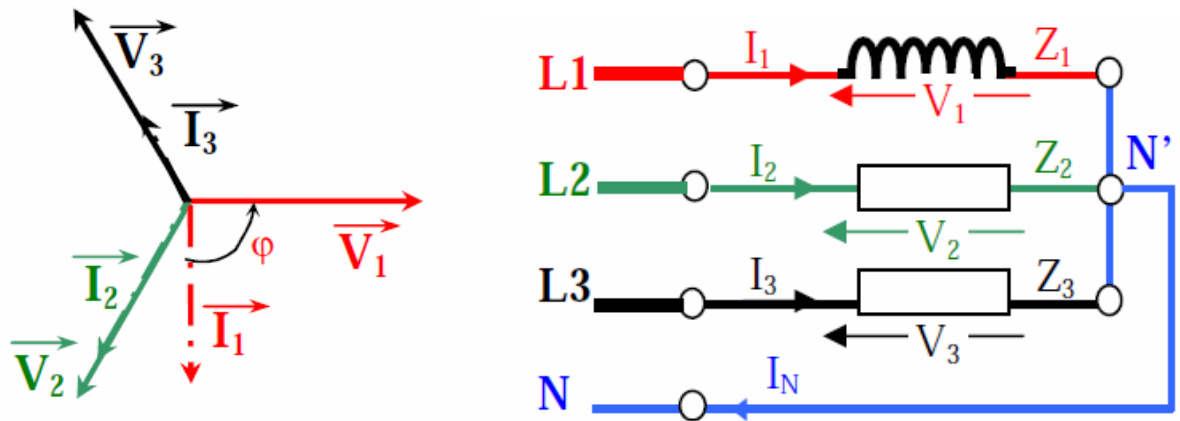
impédance différente, ou résistance différente, ou réactance différente, ou nature différente

Alors les trois courants qui alimentent le récepteur triphasé ne sont pas identiques :

amplitude différente, ou fréquence différente, ou déphasage différent de 120 degrés

On dit alors que le système triphasé est déséquilibré.

Prenons l'exemple d'un récepteur triphasé constitué de trois éléments différents : un enroulement et de deux résistors couplés en étoile et alimentés par un réseau triphasé de trois tensions identiques.



La représentation de Fresnel

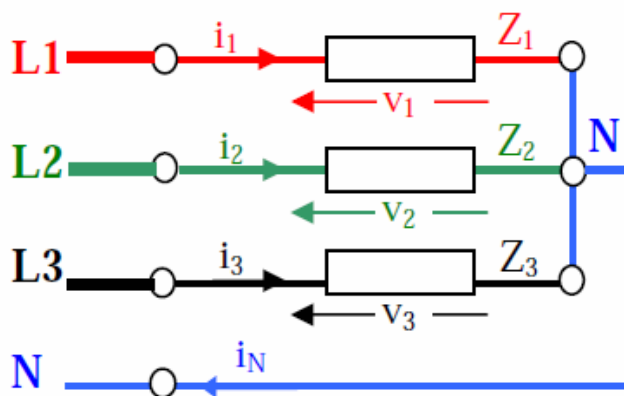
En régime triphasé déséquilibré le courant dans le neutre n'est pas nul. Donc pour un système triphasé déséquilibré, couplé en étoile, il faut absolument s'assurer que le fil de neutre est branché sur le couplage.

1-3-8 Puissance dans un système triphasé:

Nous savons qu'un récepteur triphasé est l'association de trois récepteurs monophasés d'impédances Z_1 , Z_2 et Z_3 .

En régime alternatif sinusoïdal, la tension et le courant varient dans le temps. On peut définir à tout instant une puissance instantanée,

$$p = p_1 + p_2 + p_3 = v_1 \cdot i_1 + v_2 \cdot i_2 + v_3 \cdot i_3$$



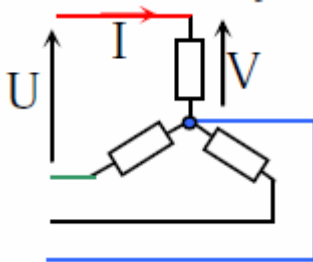
D'autre part nous avons vu qu'en fonction des récepteurs, il existe ou pas un déphasage dont il faut tenir compte pour déterminer les puissances mises en jeu dans un récepteur triphasé.

1-3-9 Puissance active:

La puissance active notée P est la valeur moyenne de la puissance instantanée. Elle est égale à la somme arithmétique des puissance actives des trois récepteurs monophasés C'est à dire à trois fois la puissance active monophasée lorsque le système est équilibré

$$P_{\text{tri}} = P_1 + P_2 + P_3 = 3 \cdot P_{\text{mono}}$$

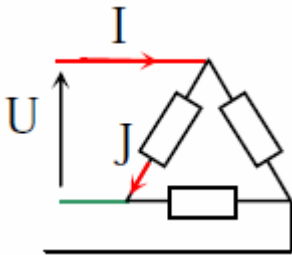
- Cas d'un système équilibré couplé en étoile
- V est la valeur efficace de la tension simple
- I est la valeur efficace du courant de ligne
- φ' est le déphasage de I par rapport à V



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

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

- Cas d'un système équilibré couplé en triangle
- U est la valeur efficace de la tension composée
- J est la valeur efficace du courant d'un récepteur
- φ' est le déphasage de J par rapport à U



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

avec $J = I / \sqrt{3}$

Quelque soit le couplage pour un système triphasé équilibré La puissance active est donnée par la relation ci contre dans laquelle

U est la valeur efficace de la tension composée

I est la valeur efficace du courant en ligne

φ est le déphasage du courant I par rapport à la tension U

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

(W) (V) (A)

- Pour un système constitué de 3 résistors identiques nous savons que

le déphasage du courant par rapport à la tension est nul donc $\cos\phi = 1$.

$$P = \sqrt{3} \cdot U \cdot I = 3 \cdot R \cdot I^2$$

- Pour un système constitué de 3 réacteurs parfaits identiques, le déphasage du courant par rapport à la tension est $+\pi/2$ donc $\cos\phi = 0$.

$$P = 0$$

- Pour un système constitué de 3 condensateurs identiques, le déphasage du courant par rapport à la tension est $-\pi/2$ donc $\cos\phi = 0$.

$$P = 0$$

1-3-10 Puissance réactive:

La puissance réactive notée Q est la puissance mise en jeu dans les dipôles réactifs. Elle est due à la réactance et s'exprime en VAR (Volt Ampère réactif) Elle est égale à la somme arithmétique des puissance actives des trois récepteurs monophasés C'est à dire à trois fois la puissance réactive monophasée lorsque le système est équilibré

$$Q_{\text{tri}} = Q_1 + Q_2 + Q_3 = 3 \cdot Q_{\text{mono}}$$

Quelque soit le couplage pour un système triphasé équilibré La puissance réactive est donnée par la relation ci contre dans laquelle

U est la valeur efficace de la tension composée

I est la valeur efficace du courant en ligne

ϕ est le déphasage du courant I par rapport à la tension U

$$Q = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \sin\phi$$

(VAR) (V) (A)

On peut exprimer la puissance réactive en fonction de la puissance active :

$$Q = P \cdot \text{tg}\phi$$

- Pour un système constitué de 3 résistors identiques nous savons que le déphasage du courant par rapport à la tension est nul donc $\sin\phi = 0$.

$$Q = 0$$

- Pour un système constitué de 3 réacteurs parfaits identiques, le déphasage du courant par rapport à la tension est $+\pi/2$ donc $\sin\phi = 1$.

$$Q_L = \sqrt{3}.U.I = 3.X_L.I^2$$

- Pour un système constitué de 3 condensateurs identiques, le déphasage du courant par rapport à la tension est $-\pi/2$ donc $\sin\phi = -1$.

$$Q_C = -\sqrt{3}.U.I = -3.X_C.I^2$$

1-3-11 Puissance apparente:

La puissance apparente notée S est la puissance qui caractérise le générateur source de tension et de courant alternatif. Quand on met à disposition une source d'énergie électrique alternative, on ne connaît pas l'utilisation qui sera faite par l'utilisateur et donc on ne connaît pas le déphasage entre le courant et la tension. Par contre, il est nécessaire de connaître la tension et l'intensité disponible.

Elle est égale à la somme vectorielle des puissance apparentes des trois sources monophasées C'est à dire à trois fois la puissance apparente monophasée lorsque le système est équilibré

$$\vec{S}_{\text{tri}} = \vec{S}_1 + \vec{S}_2 + \vec{S}_3 = 3 \cdot \vec{S}_{\text{mono}}$$

Quelque soit le couplage pour un système triphasé équilibré La puissance apparente est donnée par la relation ci contre dans laquelle

U est la valeur efficace de la tension composée

I est la valeur efficace du courant en ligne

ϕ est le déphasage du courant I par rapport à la tension U

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

(VA) (V) (A)

On peut exprimer la puissance apparente S en fonction de la puissance active P et de la puissance réactive Q :

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

On peut aussi exprimer la puissance apparente S en fonction de l'impédance d'un récepteur monophasé et du courant qui le traverse

$$S = 3 \cdot Z \cdot I^2$$

1-3-12 Puissance dissipée:

Lorsque le récepteur triphasé est constitué de résistors, il dissipe de la chaleur par effet Joule. Si l'on considère le cas d'un récepteur triphasé équilibré, les 3 résistors sont identiques et ont une résistance égale à R . Chaque résistor étant traversé par un courant d'intensité I , dissipe une puissance égale à $R \cdot I^2$. Donc la puissance totale dissipée pour un récepteur

triphasé équilibré est $P_d = 3 \cdot R \cdot I^2$

Il faut donc connaître l'intensité du courant I traversant le résistor et surtout pouvoir mesurer R . En effet très souvent sur un récepteur triphasé on ne connaît pas la résistance d'un élément et il est difficile de la mesurer car les 3 éléments du récepteur triphasé sont déjà couplés.

- Cas d'un système équilibré couplé en étoile

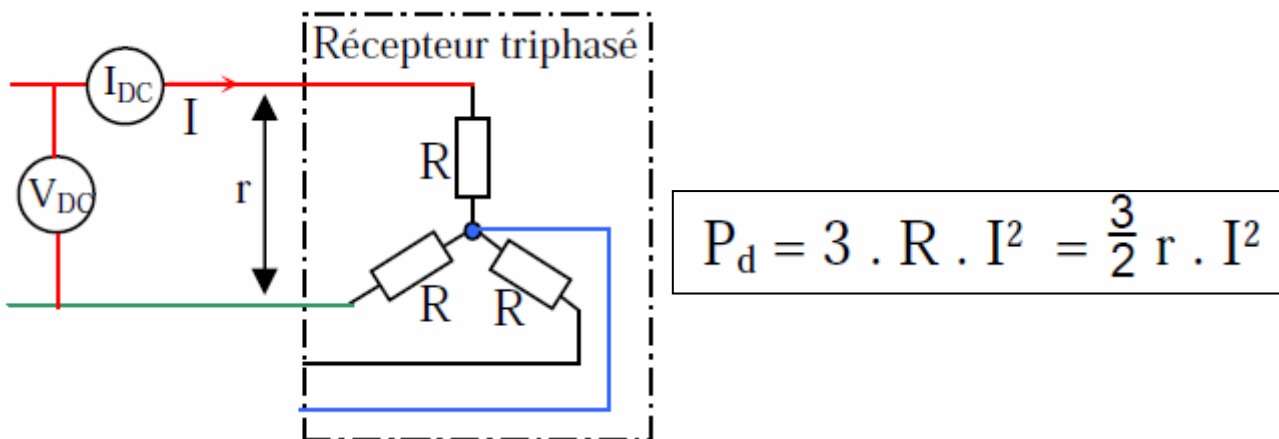
Les résistors sont traversés par l'intensité I de ligne

Avec un ohmmètre ou par la méthode voltampère métrique en continu on peut déterminer la résistance r entre deux fils de phase telle que

$$r = V_{DC} / I_{DC}$$

D'autre part on voit que $r = R + R = 2 \cdot R \rightarrow R = r / 2$

Donc



- Cas d'un système équilibré couplé en triangle

Les résistors sont traversés par l'intensité $J = I / \sqrt{3} \rightarrow J^2 = I^2 / 3$

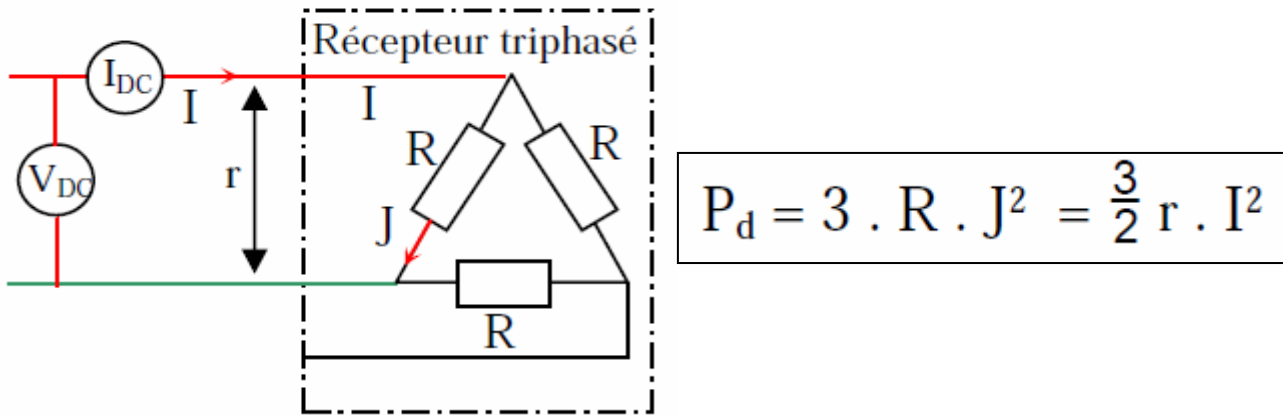
Avec un ohmmètre ou par la méthode voltampère métrique en continu on peut déterminer la résistance r entre deux fils de phase telle que

$$r = V_{DC} / I_{DC}$$

D'autre part on voit que r est égale à R en parallèle avec $2R$

donc $r = R // 2R = 2 \cdot R^2 / 3 \cdot R = 2 \cdot R / 3 \rightarrow R = 3 \cdot r / 2$

Donc



Quelque soit le couplage pour un système triphasé équilibré La puissance dissipée par effet Joule est donnée par la relation : dans laquelle I est la valeur efficace du courant en ligne r est la résistance mesurée entre deux fils d'alimentation du récepteur couplé

$$P_d = \frac{3}{2} r \cdot I^2$$

1-3-13 Facteur de puissance:

Nous venons de voir que la puissance active est donnée par la relation :

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

et que la puissance apparente est donnée par la relation :

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

donc : $P = S \cdot \cos\varphi$

Donc comme en monophasé, le facteur de puissance en triphasé est :

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

(W) (VA)

Triangle des puissances:

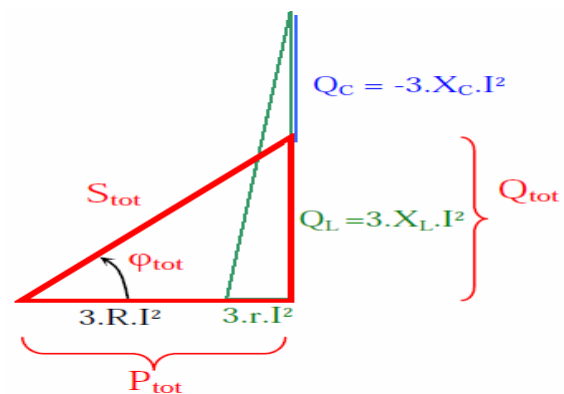
De la même façon que nous avons défini le triangle des impédances nous pouvons tracer le triangle des puissances :

Puissance active totale : $P_{tot} = \sum P = R_{tot} \cdot I^2$

Puissance réactive totale : $Q_{tot} = \sum Q = X_{tot} \cdot I^2 = P_{tot} \operatorname{tg}\varphi$

Puissance apparente totale : $S_{tot} = \sqrt{P_{tot}^2 + Q_{tot}^2} = Z_{tot} \cdot I^2$

Facteur de puissance : $\cos\varphi = \frac{P_{tot}}{S_{tot}}$



Relèvement du facteur de puissance d'une installation triphasée:

Le relèvement du facteur de puissance consiste à augmenter $\cos\phi_{tot}$

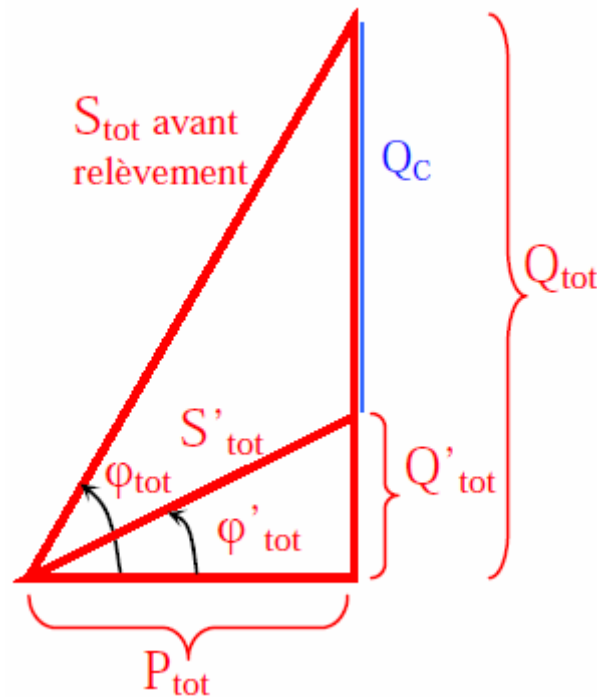
Pour cela il faut que le montage fournisse plus de puissance réactive.

Il convient donc d'augmenter Q_C en rajoutant des condensateurs aux bornes du récepteur triphasé sans déséquilibrer le système.

Avant relèvement : on a $Q_{tot} = P_{tot} \operatorname{tg}\phi_{tot}$ et $S_{tot} = V \cdot I_{tot}$

Après relèvement : on veut $Q'_{tot} = P_{tot} \operatorname{tg}\phi'_{tot}$ et $S'_{tot} = V \cdot I'_{tot}$

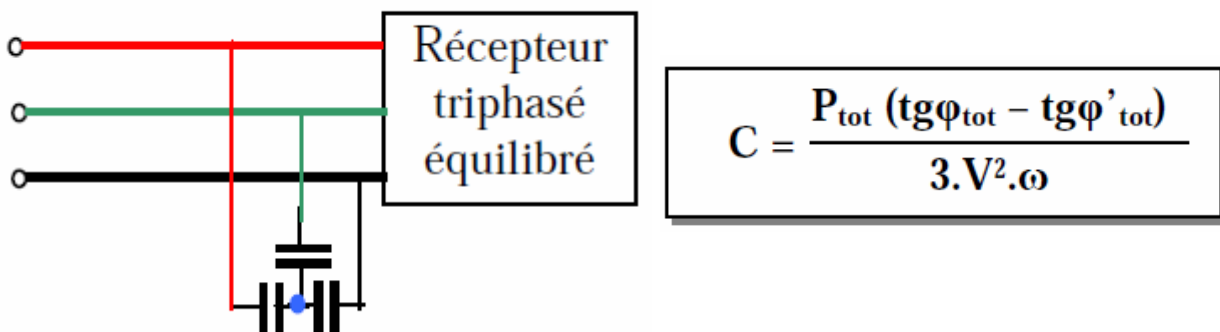
Il faut donc fournir $Q_C = Q_{tot} - Q'_{tot} = P_{tot} (\operatorname{tg}\phi_{tot} - \operatorname{tg}\phi'_{tot})$



- Cas du couplage étoile

Les 3 condensateurs de capacité C sont soumis à une tension V . La puissance réactive fournie est $Q_C = 3.V^2.C\omega \rightarrow C = Q_C / 3.V^2.\omega$

La capacité s'exprime en Farad ou en microfarad μF

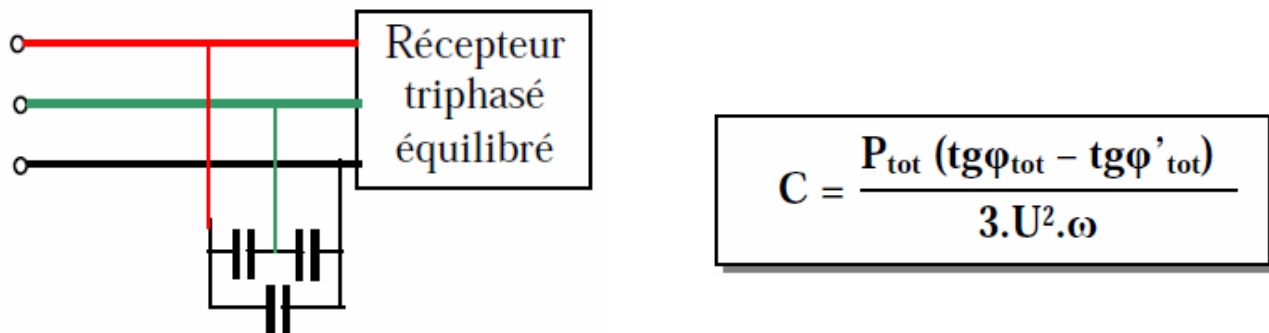


- Cas du couplage triangle

Les 3 condensateurs de capacité C sont soumis à une tension U .

La puissance réactive fournie est $Q_C = 3.U^2.C\omega \rightarrow C = Q_C / 3.U^2.\omega$

La capacité s'exprime en Farad ou en microfarad μF



Le couplage triangle est préférable car la valeur des condensateurs est 3 fois moins importante.

Avantages du relèvement du facteur de puissance

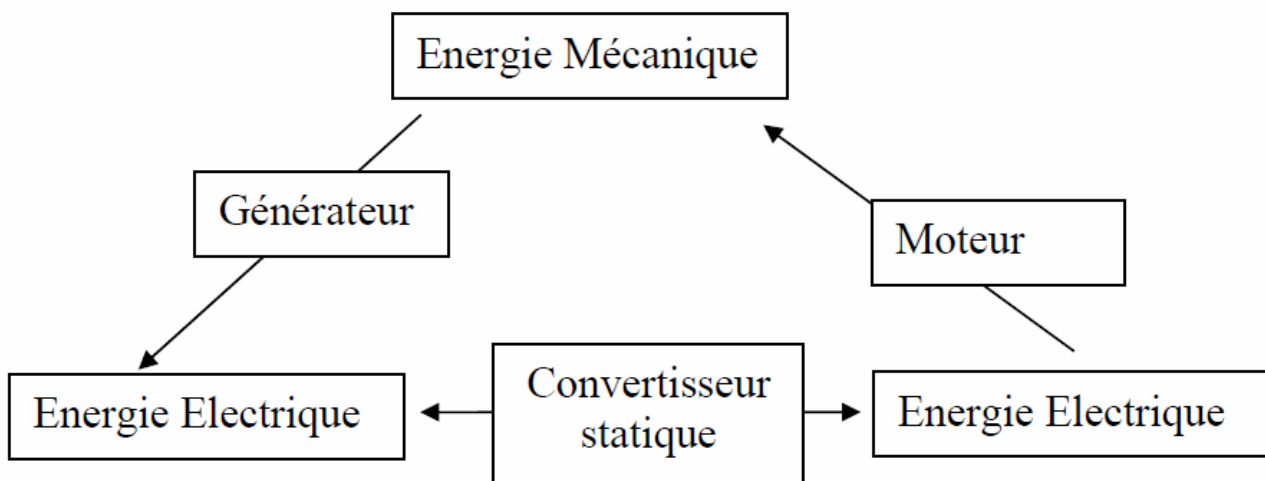
Le relèvement du facteur de puissance permet aussi de diminuer S_{tot} et donc pour une tension donnée, de diminuer l'intensité I_{tot} et tout ce qui en découle : diminution des pertes joule, diminution de la section des conducteurs, diminution du calibre des appareillages etc... En conclusion pour que le relèvement du facteur de puissance soit le plus efficace possible il faut brancher les condensateurs directement aux bornes du récepteur triphasé.

2-Généralités sur les machines électriques:

2-1 Classification des machines électriques

Les machines électriques peuvent être classées en 3 catégories :

- 1) **Générateurs** : qui transforment l'énergie mécanique en énergie électrique
- 2) **Moteurs** : qui transforment l'énergie électrique en énergie mécanique
- 3) **Convertisseurs statiques** : qui transforment l'énergie électrique en énergie électrique

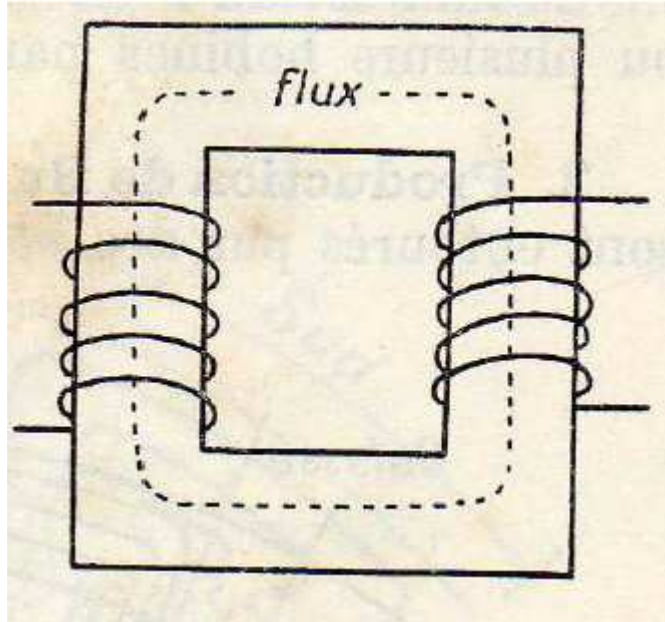


2-2 Constitution d'une machine électrique:

a) **Mécaniquement**, un générateur ou un moteur est constitué par une partie fixe appelée stator et une partie mobile appelée rotor qui tourne à l'intérieur du stator. Entre ces 2 parties est aménagé un petit intervalle d'air appelé

entrefer.

b) Du point de vue électromagnétique : une machine électrique comporte un circuit magnétique et souvent 2 circuits électriques. Entre le flux (dans le circuit magnétique) et les courants (dans les circuits électriques) s'exerce une action réciproque des principes de l'électromagnétisme déjà connus.



2-3 Circulation du flux d'induction:

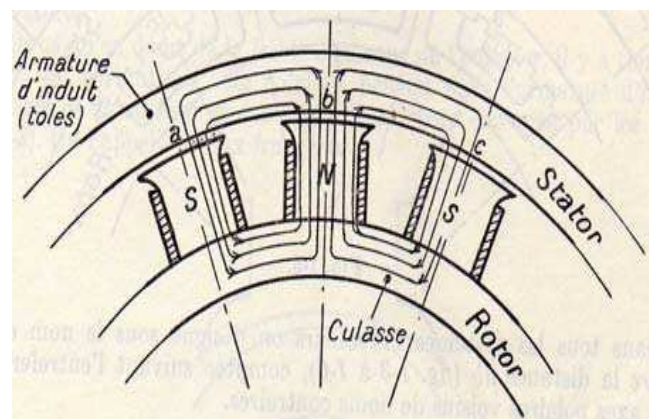
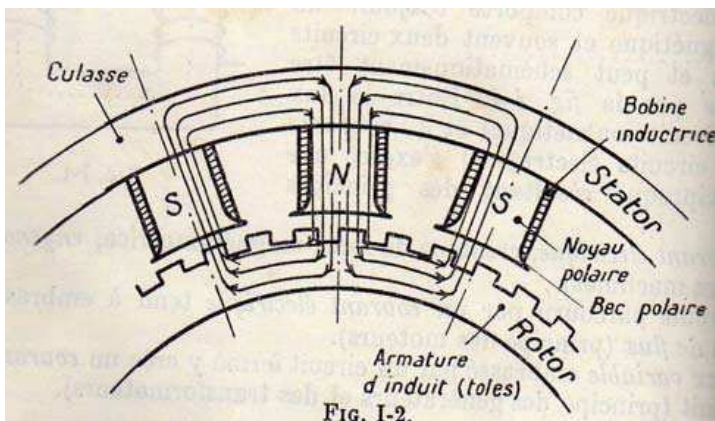
2-3-1 Définition:

Un circuit magnétique d'une machine électrique est l'ensemble d'éléments de nature ferromagnétique dont le rôle est de canaliser le flux d'induction qui est due à une FMM créée par un courant électrique.

2-3-2 Production du flux par les pôles saillants:

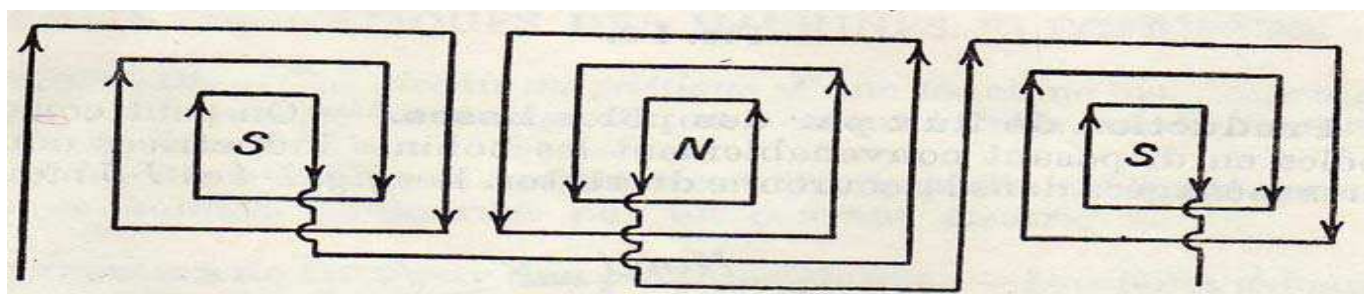
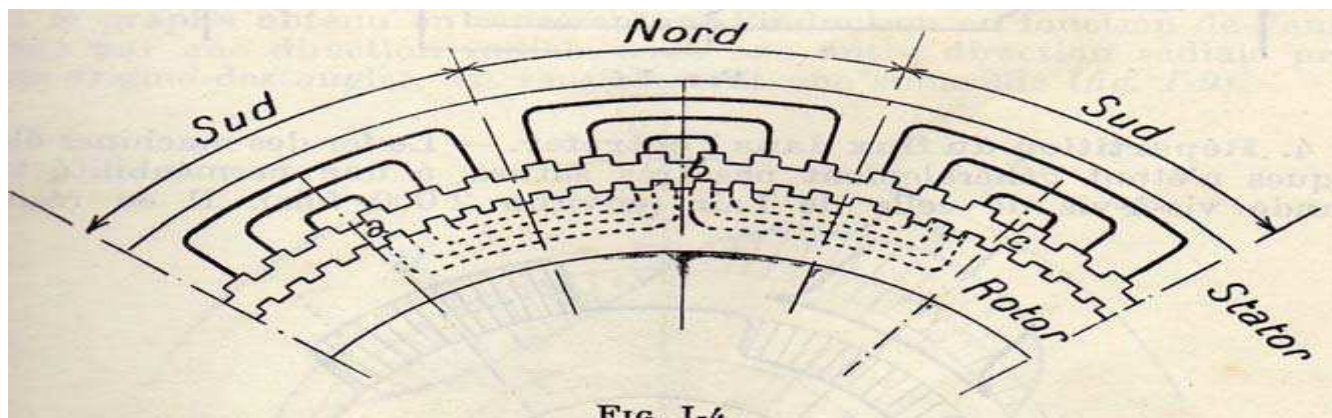
Les pôles saillants sont entourés par des bobines parcourues par un courant électrique. Ces pôles peuvent être fixes c'est-à-dire portés par le stator ; ou bien mobiles c'est-à-dire portés par le rotor.

Dans tous les cas, les pôles voisins sont de noms contraires et leur nombre est toujours pair puisque le flux sortant du pôle nord doit rentrer à travers le pôle sud.



2-3-3 Production du flux par les pôles lisses:

On peut constituer des pôles en disposant convenablement les bobines inductrices dans les rainures (encoche) dans le stator ou dans le rotor. L'entrefer est constant dans ce cas.



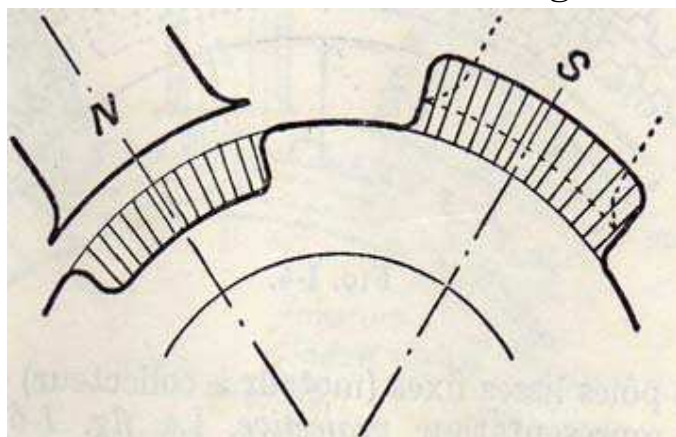
2-3-4 Répartition du flux dans l'entrefer:

Le fer des machines électriques a une perméabilité très grande vis-à-vis de l'air ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$) ; il en résulte que les lignes d'induction dans l'air sont sensiblement perpendiculaires au fer (radiales).

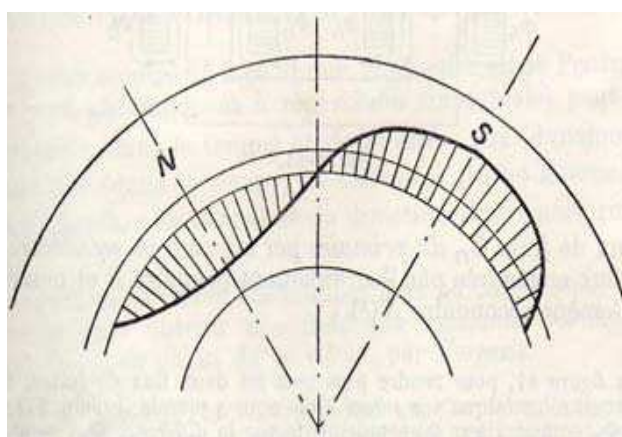
On a 2 cas à envisager :

a) pour les machines à courant continu : la densité du flux est presque uniforme

b) Pour les machines à courant alternatif : l'induction a une forme presque sinusoïdale en fonction de l'angle .



a) Machines C.C



b) Machines C.A

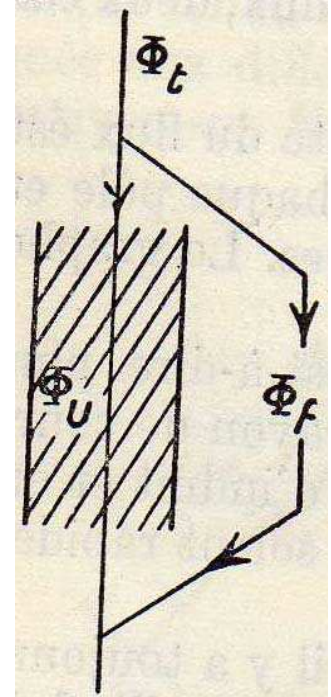
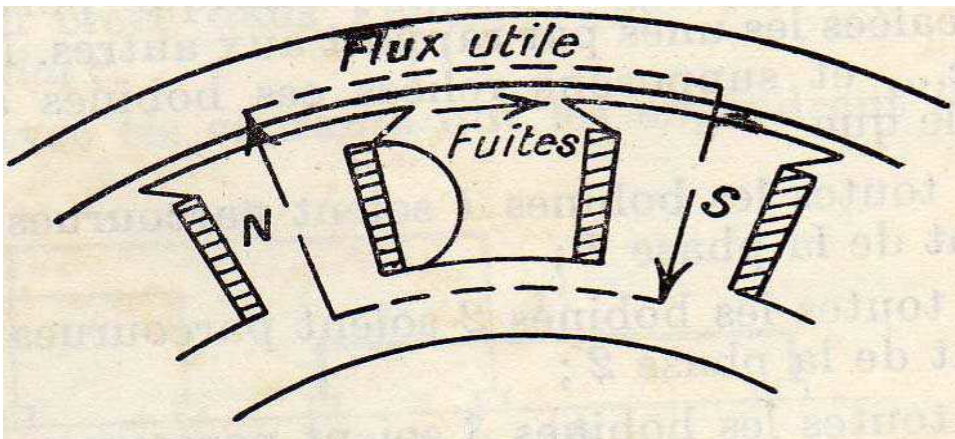
2-3-5 Fuites magnétiques:

Le flux total engendré par l'enroulement inducteur est

$$\Phi_t = \Phi_u + \Phi_f$$

Φ_u : le flux utile embrassé par l'enroulement induit

Φ_f : le flux de fuites ou de dispersion



2-4 Induction dans l'entrefer:

2-4-1 Nombre de pôles d'un enroulement à courant alternatif:

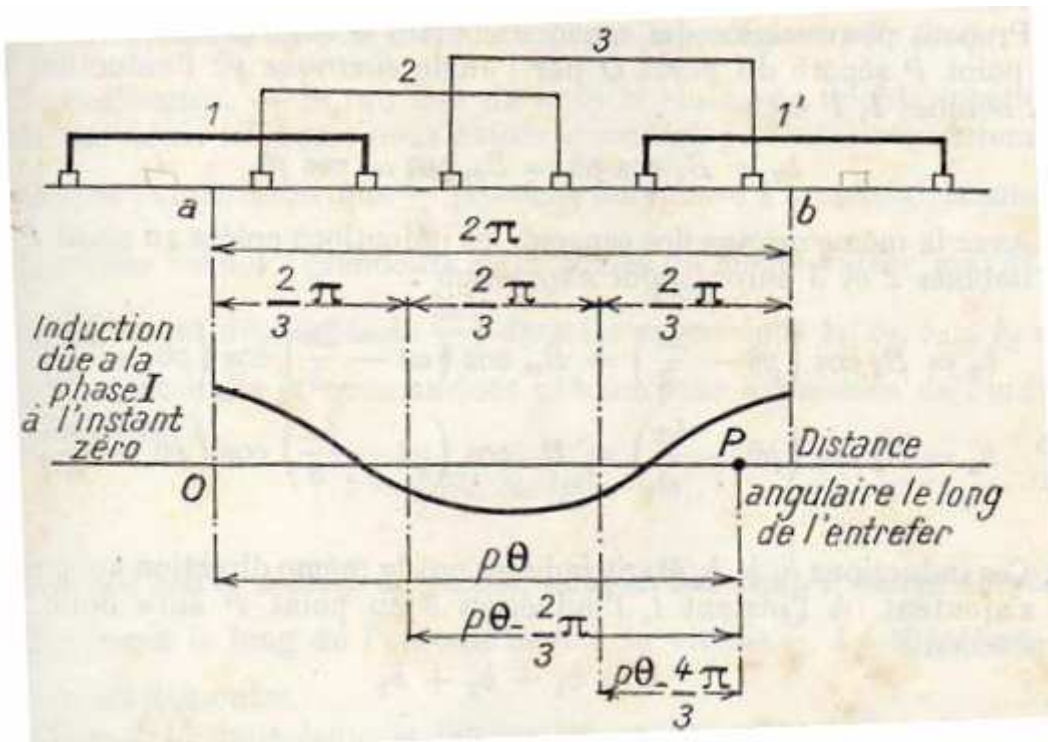
Supposons l'enroulement triphasé de la figure suivante.

Désignons par double intervalle polaire l'angle θ formé par les axes des bobines identiques (1) et (1') de la même phase. Si ce double intervalle polaire se répète « p » fois dans la circonférence, on dit que l'enroulement a « p » paire de pôles. Ce double intervalle polaire est donc l'angle $2\pi/p$; par définition, on dit qu'il correspond à l'angle électrique 2π électrique.

Donc on définit l'angle électrique par la relation suivante :

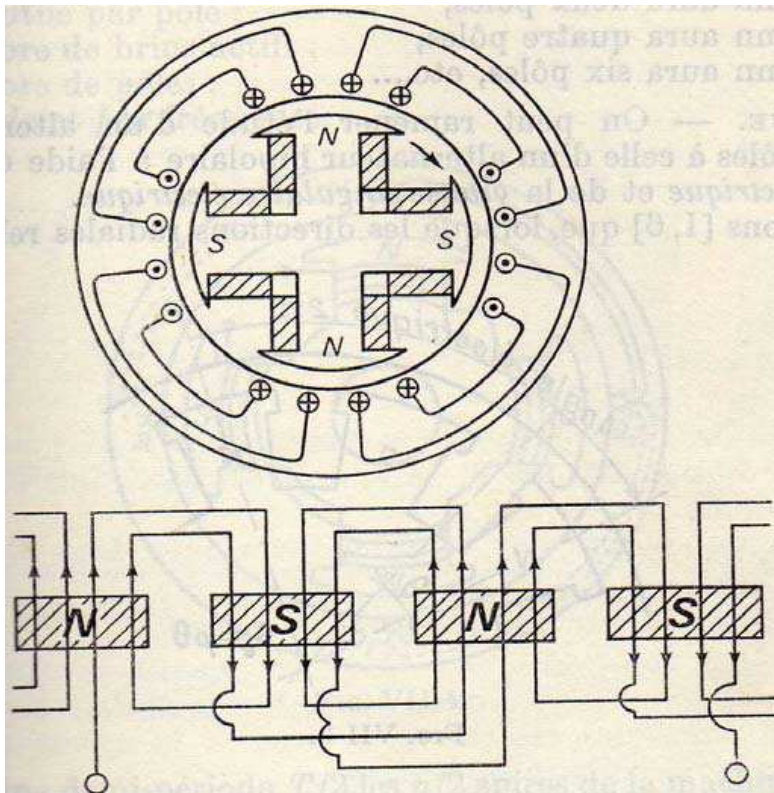
$$\theta_e = p \cdot \theta$$

Tel que θ_e : l'angle électrique, θ : l'angle géométrique (ou mécanique) et p : le nombre de paire de pôles.

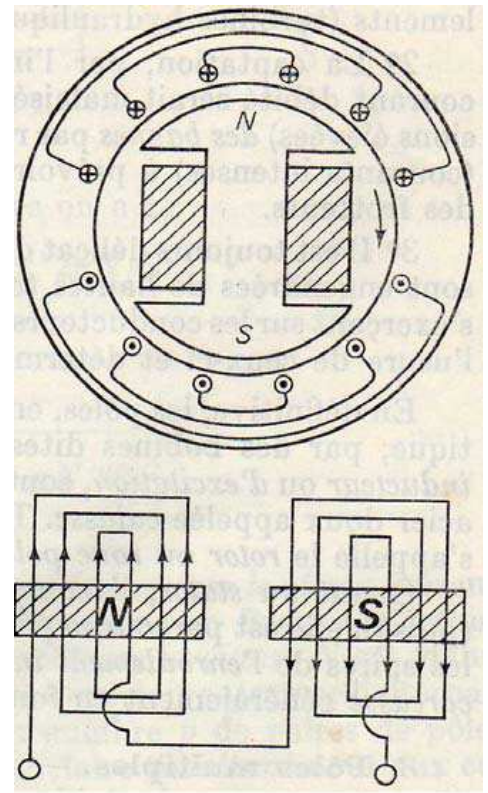


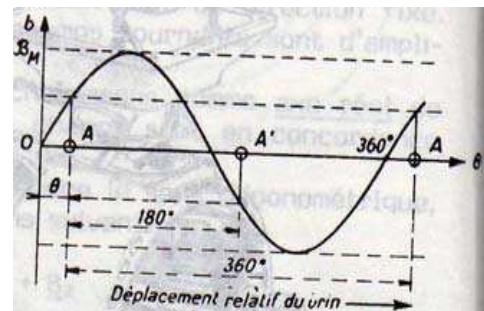
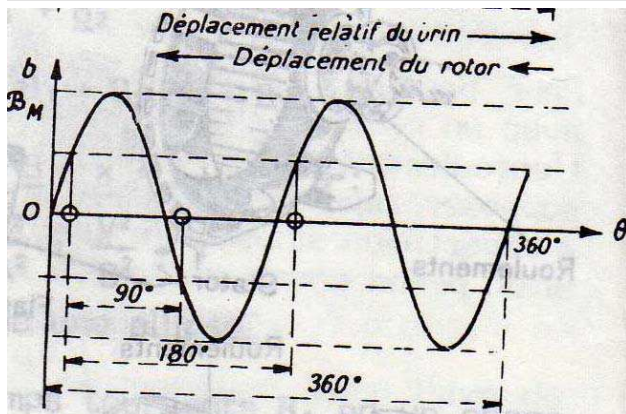
Exemple :

$2p=4$ (tétrapolaire)



$2p=2$ (bipolaire)





2-4-2 Forme de l'induction dans l'entrefer:

Supposons le système de courant triphasé équilibré suivant :

$$\begin{aligned} i_1 &= I_m \cos \omega t \\ i_2 &= I_m \cos \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right) \\ i_3 &= I_m \cos \left(\omega t - \frac{4\pi}{3} \right) \end{aligned}$$

Ces courants créent suivant l'axe de chacune des bobines les inductions suivantes :

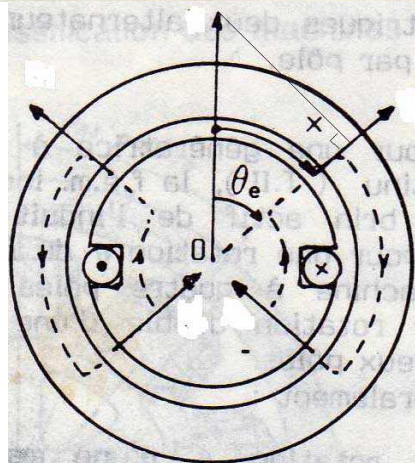
$$\begin{aligned} B_1 &= B_m \cos \omega t \\ B_2 &= B_m \cos \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right) \\ B_3 &= B_m \cos \left(\omega t - \frac{4\pi}{3} \right) \end{aligned}$$

Supposons aussi que les inductions des 3 bobines sont à répartition sinusoïdale.

Prenons comme origine des espaces le point O sur l'axe de la bobine (1)

Au point P séparé du point O par l'angle électrique : $\theta_e = p\theta$, l'induction due aux bobines 1, 1' (c'est-à-dire due à la première phase) est :

$$b_1 = B_1 \cos p\theta = B_m \cos \omega t \cos p\theta$$



Avec la même origine des espaces, les inductions créées au point P par les bobines 2 et 3 auront pour expressions :

$$b_2 = B_2 \cos \left(p\theta - \frac{2\pi}{3} \right) = B_m \cos \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right) \cos \left(p\theta - \frac{2\pi}{3} \right)$$

$$b_3 = B_3 \cos \left(p\theta - \frac{4\pi}{3} \right) = B_m \cos \left(\omega t - \frac{4\pi}{3} \right) \cos \left(p\theta - \frac{4\pi}{3} \right)$$

Ces inductions b_1, b_2, b_3 , étant radiales ont la même direction au point P et s'ajoutent. A l'instant t , l'induction b au point P aura donc pour expression :

$$b = b_1 + b_2 + b_3$$

Soit en transformant les produits de cosinus en sommes de cosinus :

$$b = \frac{1}{2} B_m [\cos(p\theta + \omega t) + \cos(p\theta - \omega t)]$$

$$+ \frac{1}{2} B_m \left[\cos \left(p\theta + \omega t - \frac{4\pi}{3} \right) + \cos(p\theta - \omega t) \right]$$

$$+ \frac{1}{2} B_m \left[\cos \left(p\theta + \omega t - \frac{2\pi}{3} \right) + \cos(p\theta - \omega t) \right]$$

Les 3 premiers termes représentent des grandeurs sinusoïdales ayant la même valeur maximale, mais régulièrement déphasées de $2\pi/3$, leur somme est nulle. On a donc :

$$b = \frac{3}{2} B_m \cos(p\theta - \omega t).$$

Cette expression montre que l'induction ayant pour valeur $+3B_m/2$.

A l'instant ($t=0$) à l'origine des espaces ($\theta=0$), aura la même valeur au point P à l'instant t_1 tel que :

$$p\theta - \omega t_1 = 0$$

Ce qui donne :

$$t_1 = \frac{\theta}{\omega/p} = \frac{\text{angle dont a tourné l'induction maximale,}}{\text{vitesse angulaire de l'induction maximale}}$$

On appelle ω/p : vitesse angulaire de l'induction ou champ.

2-4-3 Théorème de Maurice Leblanc:

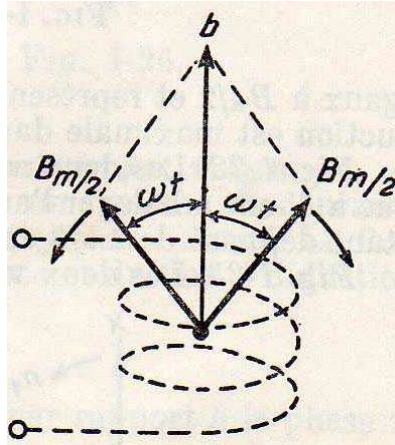
Supposons qu'on a un système monophasé, c'est-à-dire une seule bobine alimentée par un courant alternatif, l'induction à un point quelconque P dans l'entrefer a pour expression :

$$b = B_m \cos \omega t \cos p\theta$$

Que l'on peut écrire :

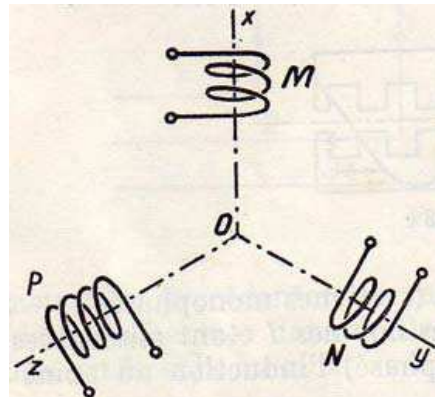
$$b = \frac{1}{2} B_m \cos (p\theta + \omega t) + \frac{1}{2} B_m \cos (p\theta - \omega t)$$

Expression montre que l'induction au point P est la somme des inductions dues à 2 ensembles de p paires de pôles d'induction maximale $B_m/2$, à répartition sinusoïdale tournant en sens inverse, l'un glissant à la vitesse angulaire $+\omega/p$ l'autre à la vitesse $-\omega/p$.

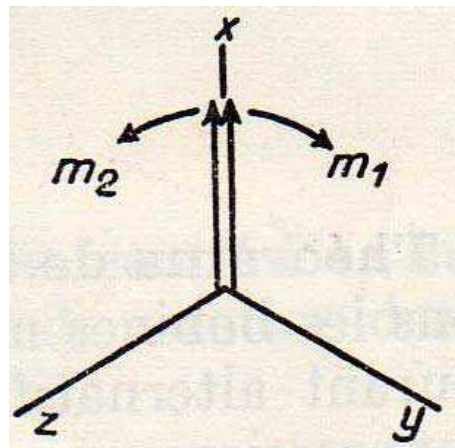


2-4-4 Flux tournant circulaire:

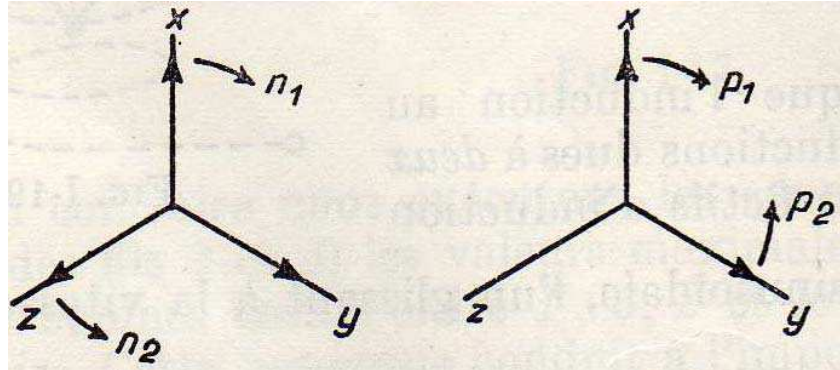
Soit le système triphasé équilibré suivant :



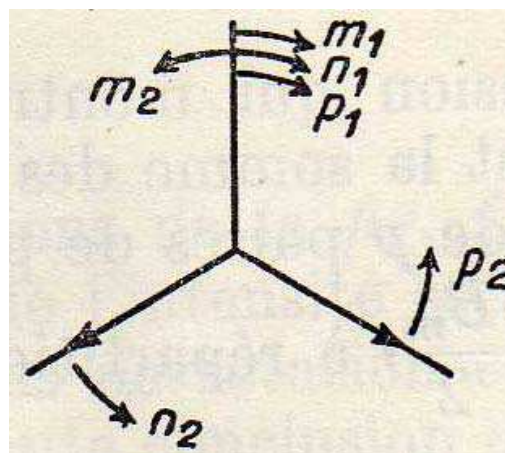
D'après le théorème de Maurice Leblanc, représentons les 2 vecteurs $m_1 = m_2 = B_m/2$ à l'instant où l'induction est maximale (induction est maximale suivant l'axe ox dans la bobine M).



De la même façon, on peut représenter $n_1 = n_2 = Bm/2$ dues à l'enroulement N, ces 2 vecteurs ont à balayer $2/3\pi$ pour arriver à l'axe oy et $p_1 = p_2 = Bm/2$ dues à l'enroulement P ces 2 vecteurs ont à balayer $4/3\pi$ pour arriver à l'axe oz.



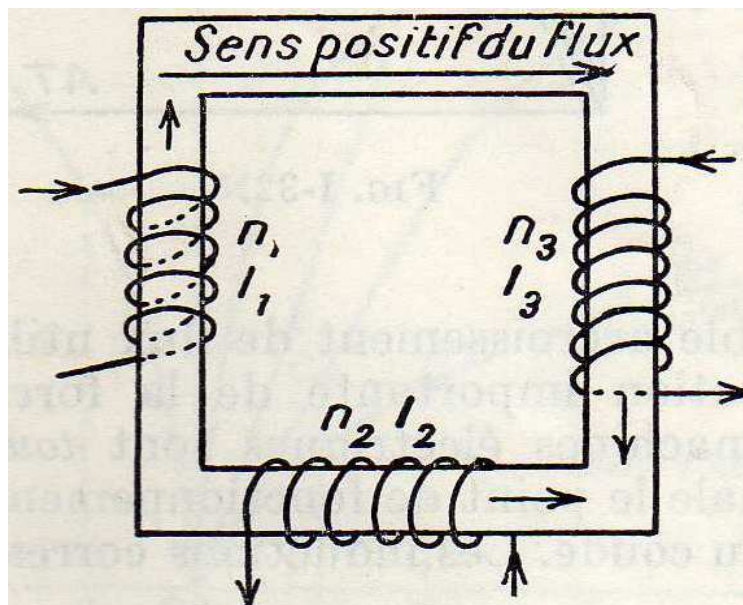
Représentons les inductions dues aux 3 enroulements sur un seul système d'axe :



En analysant cette figure, on peut dire que $m_2 + n_2 + p_2 = 0$ et $m_1 + n_1 + p_1 = 3 \cdot Bm / 2$. Donc, on peut dire que l'induction résultante est circulaire de valeur maximale $3 \cdot Bm / 2$ (c'est le même résultat trouvé précédemment).

2-5 Flux utile en fonction de la FMM:

Exemple :



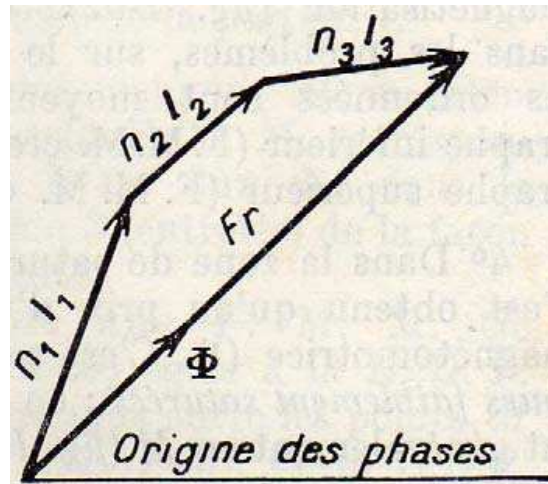
2-5-1 Cas des FMM continues:

D'après la figure précédente, la FMM résultante F a pour expression :

$$F_r = F_1 + F_3 - F_2$$

2-5-1 Cas des FMM alternatives:

La FMM résultante est la somme géométrique (vectorielle) de toutes les FMM donc elle est caractérisée par son module et sa phase.



3-Les transformateurs monophasés:

3.1 Rôle d'un transformateur:

Un transformateur est une machine électrique statique permettant un changement de tension alternative avec un excellent rendement. Il peut être utilisé en abaisseur de tension (par ex. pour des raisons de sécurité) ou en élévateur de tension (transport de l'énergie électrique).

3.2 Transport de l'énergie électrique:

Supposons qu'une petite ville située à 50 km d'une source électrique consomme $P = 2000$ kW sous la tension $U = 200$ V. L'intensité du courant dans les fils est donc $I = 10000$ A !!!!

Si l'on admet que la densité de courant maximale du cuivre est d'environ 5 A/mm², il faut donc choisir un conducteur de section $S = 2000$ mm².

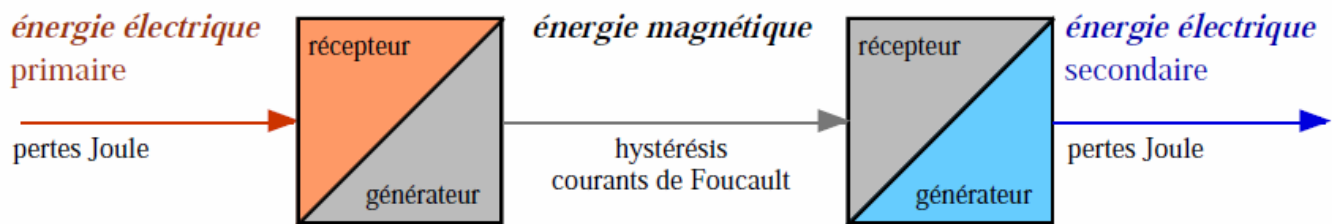
$$R = \rho \frac{L}{S}$$

La résistance de la ligne est égale à 1 Ω environ ce qui correspond à une chute de tension en ligne $\Delta U = R I = 10\,000$ V \gg 200 V.

Le transport sous basse tension est donc impossible.

Le même calcul sous la tension $U = 200$ kV, avec une intensité $I = 10$ A (plus raisonnable), nécessite une ligne de section 2 mm², de résistance $R = 1000$ Ω . Dans ce cas la chute de tension en ligne est de 10 kV soit 5% de la tension au départ.

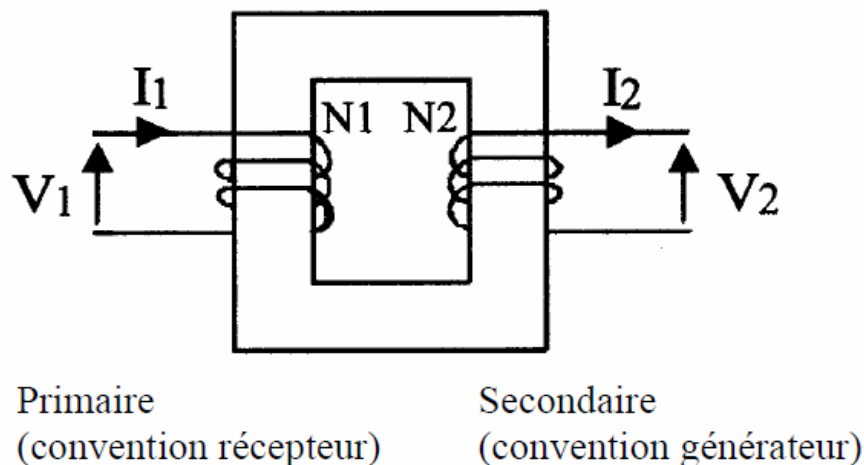
Bilan énergétique du transformateur



3-3 Le principe d'un transformateur:

3-3-1 Constitution:

Un transformateur est constitué d'un noyau de fer, circuit magnétique fermé, autour duquel on a placé deux enroulements électriques indépendants (primaire et secondaire)..



a. Inducteur

Il est constitué de deux parties :

- l'enroulement primaire.
- Le circuit magnétique.

Il est alimenté par une tension alternative, il se comporte comme un récepteur.

- avec un seul noyau qui porte la totalité de l'enroulement primaire.

L'enroulement primaire est traversé par un champ magnétique variable, il est donc le siège de pertes magnétiques (pertes par courants de Foucault et par hystérésis).

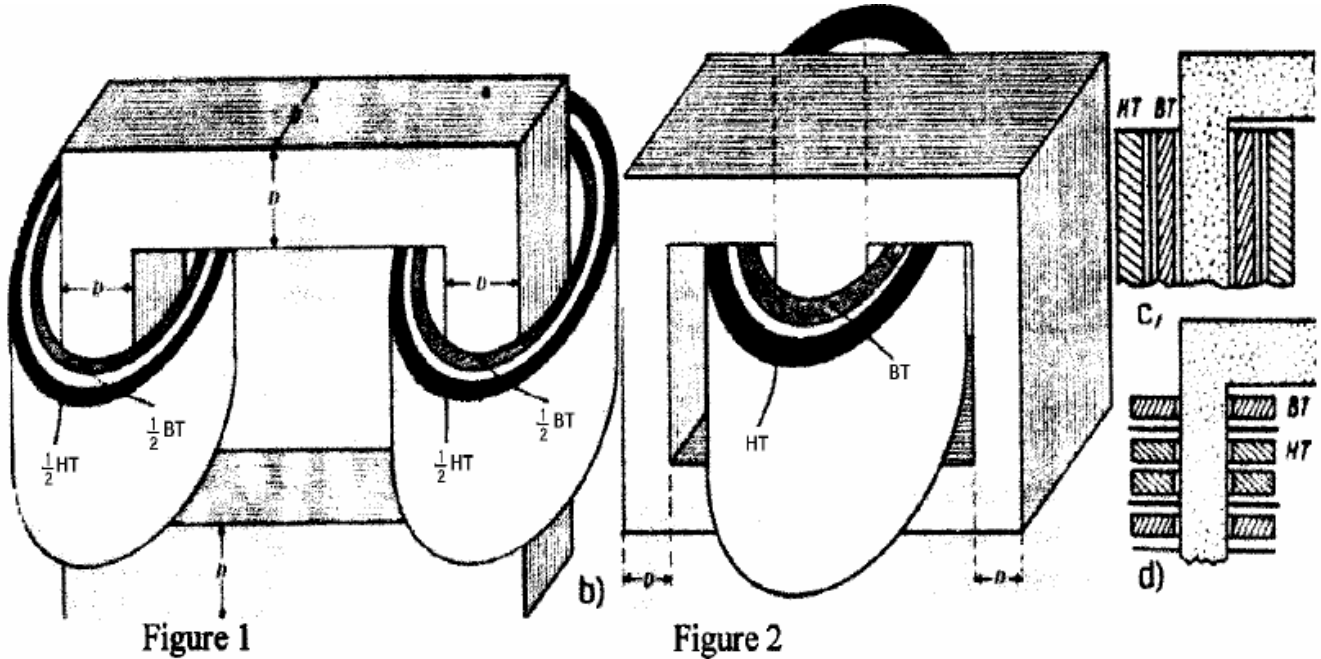
On limite :

- les pertes par courants de Foucault en utilisant un circuit feuilleté.
- Les pertes par hystérésis en utilisant un acier au silicium.

b. Induit

Dans les représentations, on le laisse apparaître le plus souvent comme s'il était bobiné sur un noyau différent du primaire. Il n'en est pas ainsi dans la

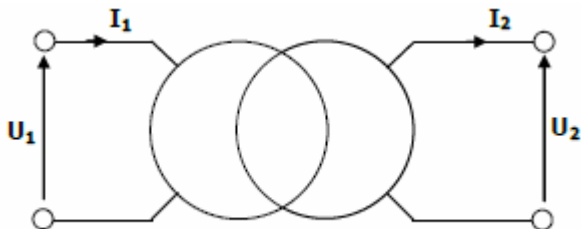
pratique car pour limiter les fuites, on s'efforce d'enchevêtrer le primaire et le secondaire. A cet effet on utilise les montages suivants :



Principe de fonctionnement:

Les transformateurs utilisent le phénomène d'induction électromagnétique : la bobine du primaire est soumise à une tension variable introduisant un champ magnétique variable donc un flux magnétique variable. Grâce au circuit magnétique, la variation de flux magnétique au primaire entraîne une variation du flux au secondaire donc une nouvelle f.é.m. induite variable.

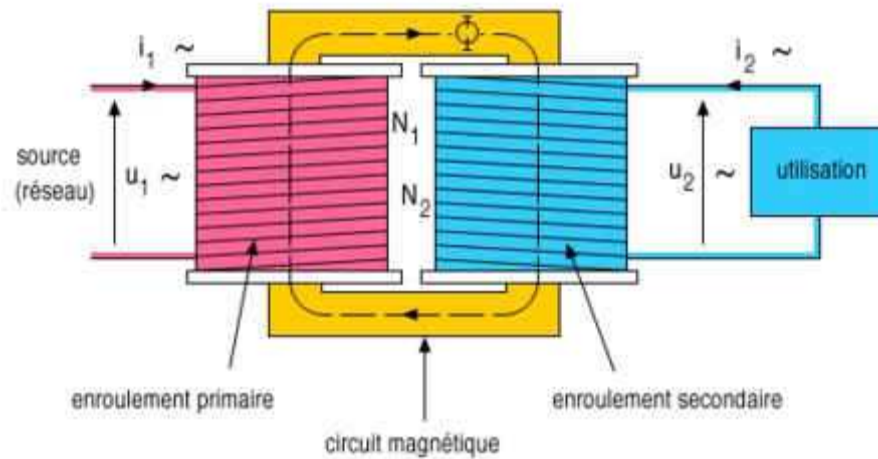
Schéma électrique:



En théorie le transformateur est parfaitement réversible, mais dans la pratique les enroulements sont imbriqués de façon à obtenir un rendement optimum pour une utilisation dans un seul sens (voir plaque signalétique).

Principe sommaire:

- Le circuit primaire alimenté sous la tension alternative u_1 engendre un flux magnétique variable dans le circuit magnétique.
- Le circuit magnétique fermé "canalise" les lignes de champ : le flux ϕ est le même à chaque instant à travers toute section du noyau : flux conservatif.
- Le circuit secondaire est donc soumis à un flux variable, il est le siège d'une fem induite. On observe donc une tension alternative u_2 aux bornes du secondaire.



3-4 Transformateur parfait:

Un transformateur est supposé parfait si l'on néglige la résistance des enroulements primaire et secondaire et les pertes magnétiques (hystérésis et Foucault) et que l'on considère que le circuit magnétique est parfait (fuites nulles ou flux conservatif).

On désigne par un transformateur parfait lorsqu'il possède les caractéristiques suivantes :

- Une réluctance du circuit magnétique très faible, telle que

$$R = \int \frac{dl}{S\mu_a} \rightarrow 0 ;$$

- une résistance du circuit électrique pratiquement nulle, telle que

$$R = \frac{\rho l}{S} \rightarrow 0 ;$$

- les pertes joules sont nulles $P_j = 0$;

- les pertes fer sont nulles $P_{fer} = 0$;

- les flux de fuite sont nuls $P_H = 0$ et $P_F = 0$, avec $P_H = K_H f B_{\max}^2$ et

$$P_F = K_F f^2 B_{\max}^2 \frac{e}{\rho} ;$$

- l'induction magnétique (**B**) est uniforme dans le transformateur.

- a. Les pertes par courant de Foucault sont liées directement à la variation temporelle du champ magnétique,

$$P_F = K_F f^2 B_{\max}^2 \frac{e}{\rho} \text{ telle que } 3,5 < K_F < 17, \text{ où } P_F : \text{en } [W / kg],$$

$$B : \text{en } [T], f : \text{en } [Hz], e : \text{en } [m] \text{ et } \rho : \text{en } [\Omega m].$$

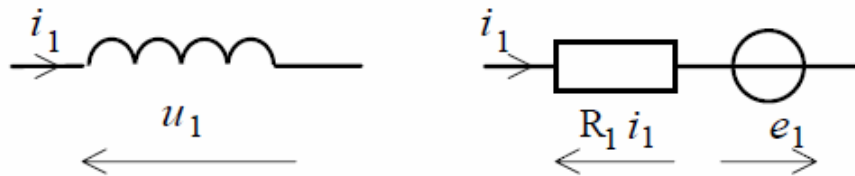
- b. Les pertes par hystérésis sont liées à la nature des matériaux,

$$P_H = K_H f B_{\max}^2 \text{ telle}$$

$$\text{que } 1,6 < K_H < 5, \text{ où } P_H : \text{en } [W / m^3], B : \text{en } [T], f : \text{en } [Hz].$$

3-4-1 Etude à vide : Le courant secondaire est nul : $I_2 = 0$.

Au primaire:

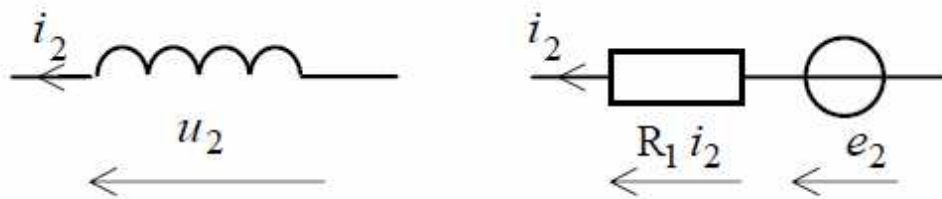


$$u_1 = R_1 i_1 - e_1 = -e_1 = + \frac{d\phi_1}{dt}$$

Soit ϕ le flux à travers le noyau de fer, et N_1 le nombre de spires de l'enroulement primaire, le flux à travers le primaire est donc $\phi_1 = N_1 \phi$

$$u_1 = +N_1 \frac{d\phi}{dt}$$

Au secondaire:



$$u_2 = +e_2 = - \frac{d\phi_2}{dt}$$

Le flux ϕ à travers le noyau de fer est conservatif et l'enroulement secondaire comporte N_2 spires. Le flux à travers le secondaire est donc $\phi_2 = N_2 \phi$

$$u_2 = -N_2 \frac{d\phi}{dt}$$

$$\text{Donc } \frac{u_2}{u_1} = -\frac{N_2}{N_1}$$

Les tensions u_1 et u_2 sont donc **en opposition de phase** et leurs valeurs efficaces sont proportionnelles aux nombres de spires.

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{N_2}{N_1} = m_v \quad \text{rapport de transformation à vide}$$

Remarques :

Le courant secondaire I_2 est nul mais le courant primaire I_{10} n'est pas nul. Le primaire est assimilable à une inductance pure, i_{10} est en quadrature arrière sur la tension primaire u_1 ($\varphi_{10} = +\pi/2$).

La puissance P_{10} consommée au primaire est donc nulle :

$$P_{10} = U_1 I_{10} \cos \varphi_{10} = 0.$$

3-4-2 Etude en charge:

Les résistances des enroulements étant nulles les expressions des tensions u_1 et u_2 calculées précédemment sont identiques :

$$u_1 = -e_1 = +\frac{d\phi_1}{dt} \quad u_2 = +e_2 = -\frac{d\phi_2}{dt}$$

Les valeurs efficaces vérifient donc la même relation :

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

Courants:

Le courant secondaire n'est pas nul : $I_2 \neq 0$

On admettra que le flux à travers le circuit magnétique est indépendant de la charge, il ne dépend que de la tension U_1 .

On traduira cette propriété par l'expression suivante :

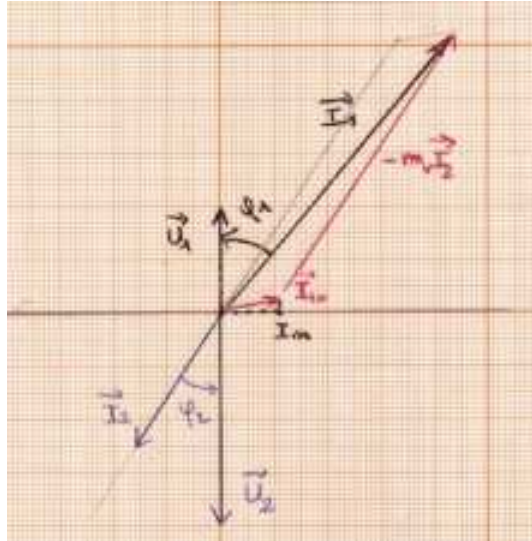
Le "nombre d'ampères-tours" à vide nécessaire à la magnétisation du circuit est le même que le "nombre d'ampères-tours" en charge pour la même tension primaire U_1 soit

$$N_1 \vec{I}_{10} = N_1 \vec{I}_1 + N_2 \vec{I}_2$$

ou

$$\vec{I}_{10} = \vec{I}_1 + m_v \vec{I}_2$$

Construction de Fresnel:



Transformateur idéal:

Admettons que le courant primaire à vide soit négligeable devant les courants primaire et secondaire en charge, soit $I_{10} = 0$.

Avec cette hypothèse la relation des courants se simplifie et devient :

$$\vec{0} = \vec{I}_1 + m_v \vec{I}_2$$

$$m_v = \frac{U_2}{U_1} = \frac{I_1}{I_2}$$

3-5 Comparaison avec le transformateur réel:

A vide:

- Le rapport de transformation m_v reste à peu près constant, particulièrement au voisinage des valeurs nominales.
- Par contre la puissance P_{10} consommée au primaire n'est pas nulle, mais reste très faible devant la puissance nominale (φ_{10} voisin de $\pi/2$; $\cos \varphi_{10} \approx 0,2$ à $0,3$ suivant le transformateur).

En charge:

- Rapport des tensions $\frac{U_2}{U_1} < m_v$, ce qui se traduit par une chute de tension :

$U_2 \text{ en charge} < U_2 \text{ à vide}$ pour la même tension primaire U_1 .

- Rapport des courants $\frac{I_1}{I_2} > m_v$

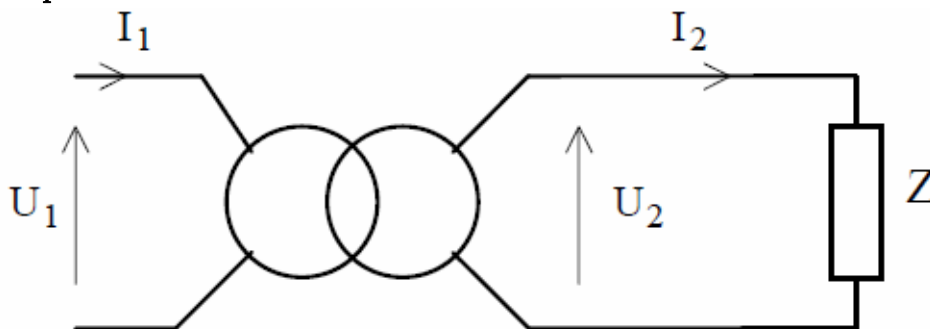
Remarque :

Le courant primaire à vide I_{10} (voir construction de Fresnel précédente) n'est pas exactement en quadrature avec la tension primaire U_1 , il peut être décomposé en :

- une composante active I_a en phase avec U_1 , correspondant à l'effet Joule dans le circuit primaire et aux pertes dans le fer
- une composante réactive en quadrature avec U_1 : courant magnétisant que l'on peut assimiler à I_{10} .

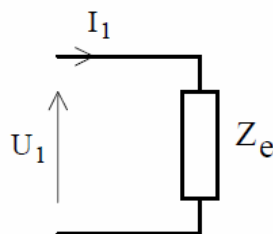
La courbe $U_1 = f(I_{10})$ à vide représente donc la courbe d'aimantation $B = f(H)$ du transformateur ($B = k U_1$ et $H = N_1 I_{10}$).

3-6 Schémas équivalents:



On se propose de rechercher les schémas équivalents d'un transformateur idéal "vu du primaire" puis "vu du secondaire" lorsqu'il est chargé par une impédance quelconque Z .

Vu du primaire:



Vu du primaire le transformateur est équivalent à une impédance Z_e , impédance réduite au primaire (impédance d'entrée du quadripôle)

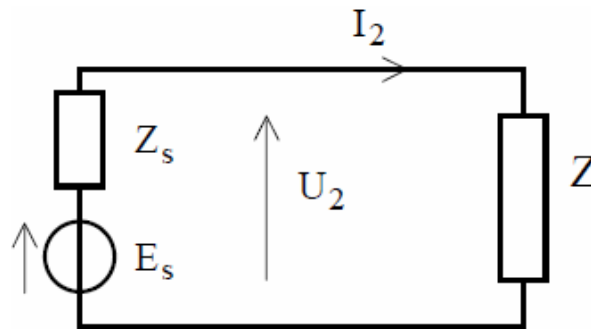
$$Z_e = \frac{U_1}{I_1}$$

N.B. $Z_e \neq Z_1$ (impédance du primaire).

$$Z = \frac{U_2}{I_2} = \frac{m U_1}{\frac{I_1}{m}} = m^2 \frac{U_1}{I_1}$$

$$Z_e = \frac{Z}{m^2}$$

Vu du secondaire



Vu du secondaire le transformateur est équivalent à un générateur de Thévenin de fem E_s et d'impédance interne Z_s .

- E_s est la tension à vide soit $E_s = m_v U_1$
- Z_s , impédance ramenée au secondaire telles que $Z_s = R_s + jL_s\omega$

Essai en court-circuit

Dans cet essai, $U_2 = 0$ donc $P_2 = 0$. La puissance consommée au primaire P_{1cc} est donc perdue.

En utilisant le montage équivalent vu du secondaire, les pertes correspondent à la puissance active consommée dans Z_s soit :

$$P_{1cc} = R_s I_{2cc}^2$$

$$R_s = \frac{P_{1cc}}{I_{2cc}^2}$$

3-7 Rendement : méthode des "pertes séparées":

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}$$

Le rendement d'un transformateur réel est excellent et très proche de 1. La mesure directe des puissances P_1 et P_2 ne donne pas de bons résultats, les deux valeurs étant trop proches (l'incertitude peut être supérieure à l'écart entre les deux puissances). Il est donc préférable de chercher à évaluer les pertes.

3-7-1 Pertes dans le fer

Les pertes dans le "fer" ou pertes magnétiques représentent :

- les pertes dues aux courants de Foucault (courants induits dans les masses métalliques)
- les pertes par l'hystérésis

On montre qu'elles varient avec la fréquence et la tension primaire. Elles sont indépendantes de la charge.

$$P_F = kU_1^2$$

3-7-2 Pertes dans le cuivre

Les pertes par effet Joule, dues à l'échauffement des conducteurs, ont lieu essentiellement dans le "cuivre". Elles peuvent donc s'exprimer en fonction des résistances R_1 et R_2 des deux enroulements :

$$P_C \approx R_1 I_1^2 + R_2 I_2^2$$

$$\frac{I_1}{I_2} \approx m$$

Or (transformateur idéal), il est donc possible d'exprimer les pertes "cuivre" uniquement en fonction du courant secondaire I_2 :

$$P_C \approx R_1 m^2 I_2^2 + R_2 I_2^2$$

$$P_C \approx (m^2 R_1 + R_2) I_2^2$$

$$P_C \approx R_S I_2^2$$

N.B. $R_S = m^2 R_1 + R_2$ Représente la résistance ramenée au secondaire

3-8 Rendement:

Pour mesurer le rendement d'un transformateur on mesure la puissance secondaire en charge P_2 , puis on effectue deux autres essais afin d'évaluer séparément les pertes dans le fer P_F (essai à vide) et les pertes dans le cuivre P_C (essai en court-circuit), alors :

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + P_F + P_C}$$

Essai en charge

On mesure la tension primaire U_1 , le courant secondaire I_2 et la puissance au secondaire P_2

Essai à vide

Sous la même tension primaire U_1 , on mesure le courant primaire à vide I_{10} et la puissance au primaire à vide P_{10} .

P_{10} représente des pertes car la puissance au secondaire est nulle ($I_2 = 0$). Or le courant primaire I_{10} est faible devant les valeurs nominales, les pertes par effet Joule ($R_1^2 I_{10}^2$) sont négligeables devant P_{10} .

P_{10} représente les pertes dans le fer P_F pour la tension primaire U_1 . Elles sont indépendantes de la charge.

Essai en court-circuit

Sous tension réduite, pour le même courant secondaire I_2 que l'essai en charge, on mesure la puissance au primaire en court-circuit P_{1cc} .

P_{1cc} représente des pertes, car la puissance au secondaire est nulle ($U_2 = 0$). Or la tension primaire U_1 est très faible, les pertes dans le fer ($k U_1^2$) sont négligeables devant P_{1cc} .

P_{1cc} représente les pertes dans le cuivre P_C pour le courant secondaire I_2 .

Remarque

$$P_2 = U_2 I_2 \cos \varphi_2$$

$$P_C \approx R_S I_2^2 \text{ et } P_F = k U_1^2$$

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + P_F + P_C} = \frac{\frac{P_2}{I_2}}{\frac{P_2}{I_2} + \frac{P_F}{I_2} + R_S I_2} = \frac{U_2 \cos \varphi_2}{U_2 \cos \varphi_2 + \frac{P_F}{I_2} + R_S I_2}$$

$$\frac{P_F}{I_2} = R_S I_2$$

Le rendement est donc maximum lorsque $\frac{P_F}{I_2} = R_S I_2$ soit $P_F = P_C$; les pertes "cuivre" sont égales aux pertes "Fer".

Le but d'un transformateur est d'augmenter ou d'abaisser la tension alternative.

Remarque : si on alimente un transformateur en continu il ne fonctionnera pas car pour voir apparaître une tension sur le circuit secondaire il faut qu'il y ait une variation de flux ($\mathbf{Emoy} = \Delta\phi / \Delta t$). De plus en continu comme la seule partie des récepteurs qui existe est la résistance et que pour un fil celle-ci est très faible, il risque d'y avoir destruction du transformateur.

3-9 Tension d'un transformateur:

La variation de la tension primaire (U_1) va créer un champ magnétique qui va être transmis par l'armature métallique au bobinage secondaire qui va voir apparaître à ses bornes une tension secondaire (U_2).

La valeur efficace de ces tensions est donnée par la formule de Boucherot.

$$\phi = B S$$

$$U_1 = 4,44 \times N_1 \times f \times \Phi$$

$$U_2 = 4,44 \times N_2 \times f \times \Phi$$

Avec

U_1 : valeur efficace de la tension primaire en Volt (V)

U_2 : valeur efficace de la tension secondaire en Volt (V)

N_1 : nombre de conducteurs du primaire.

N_2 : nombre de conducteurs du secondaire.

f : fréquence des tensions primaire et secondaire en Hertz (Hz).

ϕ : flux magnétique maximum en Weber (Wb).

S La section du circuit magnétique

B l'induction magnétique en tesla

Remarques :

- La valeur 4,44 est liée à deux éléments : le premier est le fait que l'on veut la valeur efficace de la tension et pas sa valeur maximum (on a donc divisé par $\sqrt{2}$), le deuxième est le fait que c'est la pulsation $\omega = 2\pi f$ qui est à l'origine de la formule (on a donc multiplié par 2π). Le coefficient est donc $2\pi / \sqrt{2} \approx 4,44$.
- La fréquence au primaire et au secondaire est obligatoirement la même car c'est la fréquence de la tension primaire qui donne la fréquence au flux magnétique puis le flux qui donne la fréquence à la tension secondaire.
- Le flux magnétique peut être calculé par $\phi = B \times S$ (le champ magnétique en Tesla fois la surface d'une spire en mètre carré).
- Un circuit magnétique peut comme un aimant permanent se saturer. Pour que les formules ci-dessus fonctionnent, il ne faut pas être dans cette zone de saturation.

3-10 Rapport de transformation:

Dans les deux formules ci-dessus, on remarque qu'entre les deux tensions il n'y a qu'un seul élément qui change : le nombre de conducteurs N .

Ce constat nous permet d'écrire le rapport de transformation suivant :

$$m = N_2 \div N_1 = U_{20} \div U_{10}$$

Avec

m : rapport de transformation du transformateur, sans unité

N_2 : nombre de conducteurs du secondaire.

N_1 : nombre de conducteurs du primaire.

U_{20} : tension à vide efficace au secondaire en Volt (V)

U_{10} : tension à vide efficace au primaire en Volt (V)

Remarques :

- Le rapport de transformation peut être calculé en divisant U_2 par U_1 en charge si on considère le transformateur comme étant parfait (sans pertes) : $m = U_2 / U_1$.
- Le rapport de transformation peut être calculé en divisant I_1 par I_2 en charge si on considère le transformateur comme étant parfait (sans pertes) : $m = I_1 / I_2$.

La fonction du transformateur dépend de la valeur de m :

- ✓ Si $m = 1$: transformateur isolateur ($U_2 = U_1$).
- ✓ Si $m > 1$: transformateur élévateur ($U_2 > U_1$).
- ✓ Si $m < 1$: transformateur abaisseur ($U_2 < U_1$).

3-11 Bilan des puissances:

Comme pour les autres appareils que nous avons étudiés, il y a :

Une puissance absorbée : c'est la puissance au primaire.

Une puissance utile : c'est la puissance au secondaire.

Des puissances perdues : dans le cas du transformateur ce sont les pertes Joule et les pertes Fer.

$$P_a = P_u + P_J + P_F$$

Il en est de même pour le rendement :

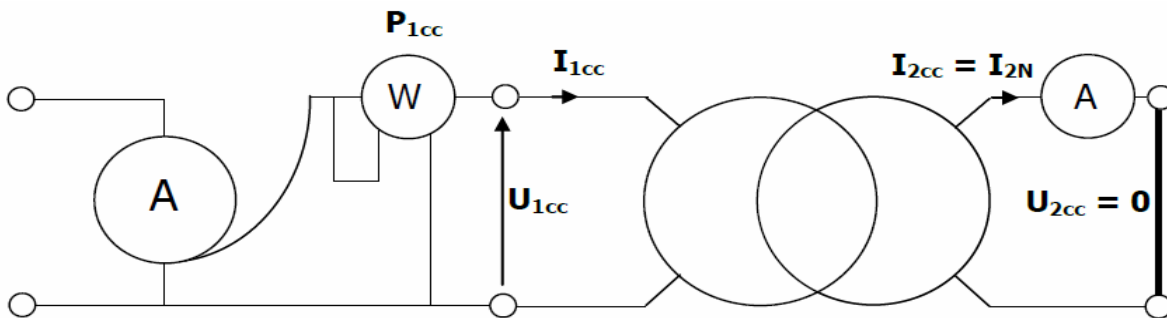
$$\eta = P_u \div P_a = (P_a - (P_J + P_F)) \div P_a = P_u \div (P_u + (P_J + P_F))$$

Le calcul de ce rendement peut se faire de 2 manières différentes :

- Par la méthode directe : on mesure la puissance au primaire (P_a) et la puissance au secondaire (P_u) puis on fait le rapport de ces 2 valeurs.

- Cette méthode est peu précise car pour un transformateur de qualité, l'écart entre les deux puissances peut être inférieur à l'incertitude des appareils de mesure.
- Par la méthode indirecte dite des pertes séparées : on fait des essais spécifiques afin de déterminer les différentes pertes que l'on viendra retrancher à la puissance absorbée.

3-12 Méthode pour la détermination des pertes Joule:



Pour déterminer les pertes Joule :

- On met le secondaire en court-circuit : $U_{2CC} = 0$.
- On alimente obligatoirement le transformateur avec un alternostat afin d'appliquer une tension réduite au primaire : $U_{1PJ} \ll U_{1N}$.
- On règle l'alternostat de manière à avoir $I_{2CC} = I_{2N}$.
- On mesure la puissance au primaire P_{1CC} .

La puissance de court-circuit mesurée au primaire P_{1CC} correspond à la totalité des pertes par effet Joule du transformateur :

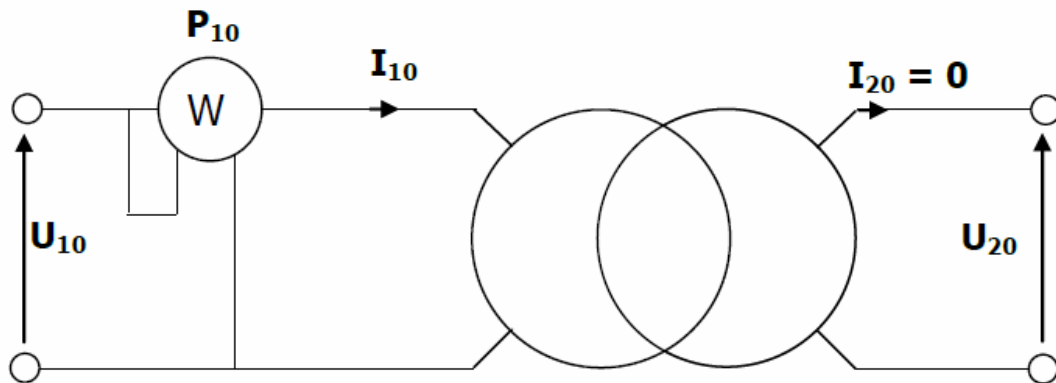
$$P_{1CC} = P_J = P_{J1} + P_{J2}$$

Remarques :

- L'indice « N » signifie « nominal » c'est-à-dire la meilleure situation de fonctionnement de l'appareil. Ces valeurs dites « nominales » sont données par le constructeur.
- Pour que la puissance P_{1CC} soit représentative de P_J il faut faire absolument que l'essai en court-circuit se fasse à $I_{2CC} = I_{2N}$.
- Sur les plaques signalétiques des transformateurs il est souvent écrit une tension de court-circuit en pourcentage (par exemple $U_{CC} = 3\%$). Cela correspond au pourcentage de la tension primaire U_{1N} qu'il faut appliquer en court-circuit pour obtenir le courant secondaire nominal I_{2N} .

- o Les pertes Joule sont fortement influencées par la variation du courant ($P_J = R I^2$). Il est donc nécessaire pour être précis de les mesurer pour une valeur du courant la plus proche de la réalité.

3-13 Méthode pour la détermination des pertes Fer.



Pour déterminer les pertes Fer :

- o On met le secondaire à vide : $I_{20} = 0$.
- o On alimente le transformateur sous une tension nominale : $U_{10} = U_{IN}$.
- o On mesure la puissance au primaire P_{10} .

La puissance à vide mesurée au primaire P_{10} correspond à la totalité des pertes Fer du transformateur :

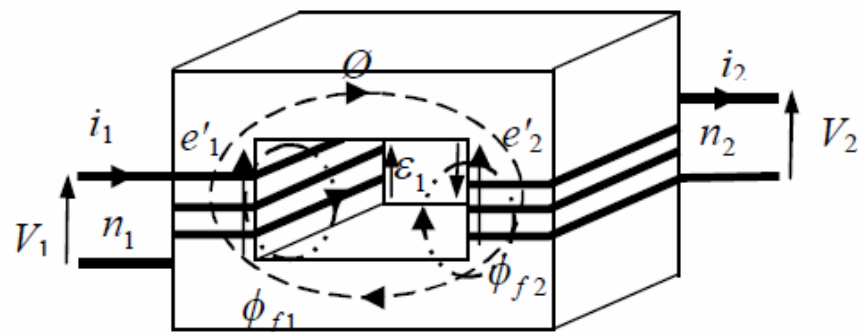
$$P_{10} = P_F$$

Remarque :

Les pertes Fer représentent les pertes magnétiques. Comme la tension d'alimentation d'un transformateur et sa fréquence varie peu, ce sont des pertes qui sont considérées comme indépendantes de la charge.

3-14 Transformateur réel:

Transformateur
monophasé réel



- o e'_1, e'_2 les forces électromotrices (f.e.m), telles que

$$e'_1 = n_1 \frac{d\phi_1}{dt} + \frac{d\phi_{f1}}{dt} \quad (\text{avec la convention récepteur}) \text{ et}$$

$$e'_2 = -n_2 \frac{d\phi_2}{dt} - \frac{d\phi_{f2}}{dt} \quad (\text{avec la convention générateur}).$$

- o ψ_1, ψ_2 les flux totaux respectivement au primaire et au secondaire.

Soient : $\psi_1 = n_1\phi_1 + \phi_{f1}$ et $\psi_2 = n_2\phi_2 + \phi_{f2}$, notant que $\phi_1 = \phi_2 = \phi$ puisque l'induction magnétique est uniforme dans le fer.

3-14-1 Equation des tensions:

Chaque enroulement admet son propre résistance, telles que r_1 la résistance du premier enroulement et r_2 a résistance du second enroulement.

3-14-2 L'enroulement primaire:

Les écritures instantanées des f.e.m sont les suivantes :

$$V_1 = e'_1 + r_1 i_1$$

$$e'_1 = n_1 \frac{d\phi_1}{dt} + \frac{d\phi_{f1}}{dt} \quad \text{avec la convention du récepteur}$$

On pose

$$\frac{d\psi_1}{dt} = n_1 \frac{d\phi_1}{dt} + \frac{d\phi_{f1}}{dt}, \quad n_1 \frac{d\phi_1}{dt} = n_1 \frac{d\phi}{dt} = -e_1 \quad \text{et} \quad \frac{d\phi_{f1}}{dt} = l_1 \frac{di_1}{dt}$$

$$V_1 = -e_1 + l_1 \frac{di_1}{dt} + r_1 i_1$$

ce qui implique

$$\bar{V}_1 = -\bar{E}_1 + j l_1 \omega \bar{I}_1 + r_1 \bar{I}_1$$

L'écriture complexe serait :

3-14-3 L'enroulement secondaire:

Les écritures instantanées des f.e.m sont les suivantes :

$$V_2 = e'_2 - r_2 i_2$$

$$e'_2 = -n_2 \frac{d\phi_2}{dt} - \frac{d\phi_{f2}}{dt} \quad \text{avec la convention du générateur}$$

On pose

$$\frac{d\psi_2}{dt} = n_2 \frac{d\phi_2}{dt} + \frac{d\phi_{f2}}{dt}, \quad -n_2 \frac{d\phi_2}{dt} = -n_2 \frac{d\phi}{dt} = e_2 \quad \text{et} \quad \frac{d\phi_{f2}}{dt} = l_2 \frac{di_2}{dt}$$

ce qui implique

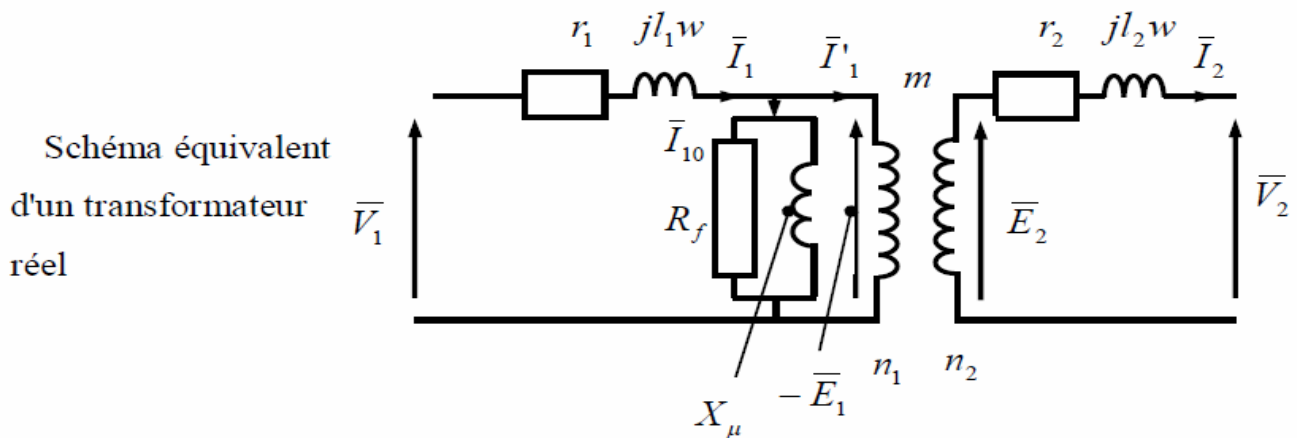
$$V_2 = e_2 - l_2 \frac{di_2}{dt} - r_2 i_2$$

L'écriture complexe serait :

3-14-4 Schéma équivalent:

I_0 est le courant de fuit dans la réluctance, qui est l'association électrique de deux composantes, une résistance désigné par R_f et une inductance nommée X_μ , telles que ces deux derniers termes font l'objet d'une impédance magnétisante fictive.

On a les relations ci-dessous des tensions et des courants, qui font l'objet du schéma équivalent un transformateur parfait.



$$\bar{V}_1 = -\bar{E}_1 + j l_1 \omega \bar{I}_1 + r_1 \bar{I}_1$$

$$\bar{E}_2 = \bar{V}_2 + j l_2 \omega \bar{I}_2 + r_2 \bar{I}_2$$

$$\bar{I}_1 - \bar{I}'_1 = \bar{I}_{10}$$

3-14-5 Etude du transformateur par l'hypothèse de Kapp:

L'hypothèse de Kapp consiste à négliger le courant \bar{I}_{10} à vide devant le courant de la charge, ce qui revient à supposer que le circuit à réluctance

$$R = \frac{L}{S\mu_a} = \frac{L}{S\mu_0\mu_{rfer}} \rightarrow 0$$

nulle,

Cette hypothèse permet d'éliminer dans le

schéma équivalent l'impédance fictive magnétisante \bar{Z}_m , telle qu'elle est l'association d'une résistance R_f et d'une inductance X_μ en parallèle.

3-14-6 Equations des tensions et des courants:

a) A vide:

Pendant l'essai à vide, le courant secondaire est nul : $\bar{I}_2 = 0$ ce qui implique

les courants \bar{I}'_1 et \bar{I}_1 sont pratiquement nuls, les f.e.m

$$\bar{E}_2 = \bar{U}_{20} \text{ et } \bar{V}_1 = \bar{E}_1, \text{ alors } \frac{\bar{E}_2}{\bar{E}_1} = -m = \frac{\bar{U}_{20}}{\bar{V}_1}, \quad \bar{U}_{20} = -m\bar{V}_1$$

b) En charge:

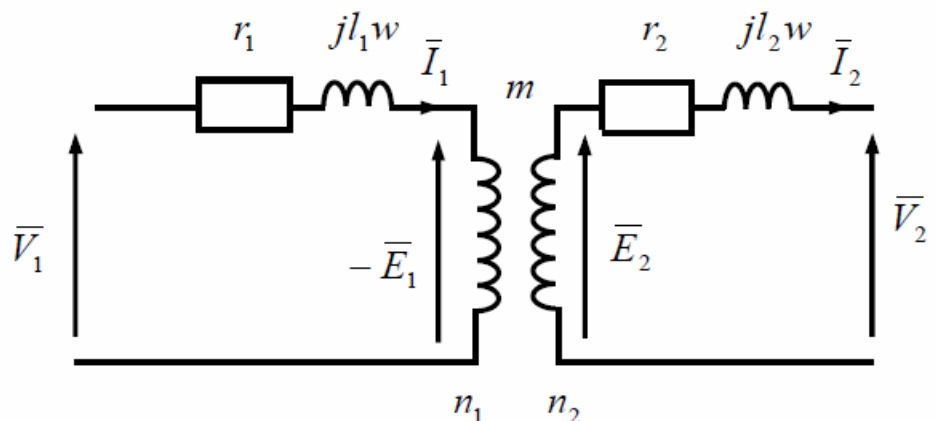
L'application de l'hypothèse de Kapp, en négligeant \bar{I}_{10} devant le courant

primaire \bar{I}_1 , les intensités \bar{I}_1 et \bar{I}_2 seront égales.

Les tensions de l'entrée et de la sortie sont respectivement

$$\bar{V}_1 = -\bar{E}_1 + j l_1 \omega \bar{I}_1 + r_1 \bar{I}_1 \text{ et } \bar{V}_2 = \bar{E}_2 - j l_2 \omega \bar{I}_2 - r_2 \bar{I}_2$$

Schéma équivalent
d'un transformateur
réel par l'hypothèse de
Kapp



c) Impédance ramenée au secondaire:

Dans l'hypothèse de Kapp, on néglige de courant \bar{I}_{10} .

$$\bar{U}_{20} = -m\bar{V}_1 \quad \text{et} \quad \bar{I}_1 = -m\bar{I}_2$$

$$\bar{V}_2 = \bar{U}_{20} - j l_2 \omega \bar{I}_2 - r_2 \bar{I}_2$$

$$\bar{V}_2 = m\bar{E}_1 - j l_2 \omega \bar{I}_2 - r_2 \bar{I}_2$$

$$\bar{V}_2 = m(-\bar{V}_1 + j l_1 \omega \bar{I}_1 + r_1 \bar{I}_1) - j l_2 \omega \bar{I}_2 - r_2 \bar{I}_2$$

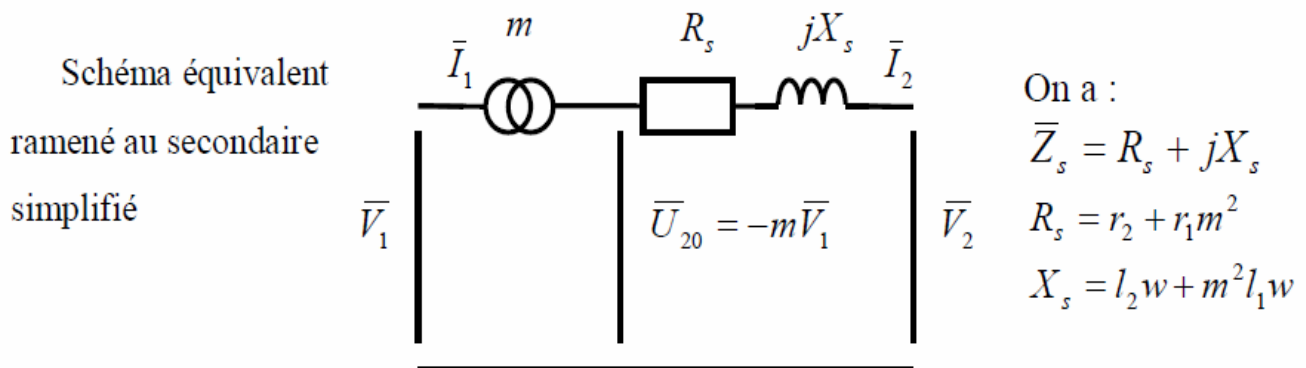
$$\bar{V}_2 = -m\bar{V}_1 - m^2 r_1 \bar{I}_2 - r_2 \bar{I}_2 - j(m^2 l_1 \omega \bar{I}_1 + m l_2 \omega \bar{I}_2)$$

$$\Rightarrow \bar{V}_2 = \bar{U}_{20} - \bar{I}_2 \left[(m^2 r_1 + r_2) + j \omega (m^2 l_1 + l_2) \right]$$

$$\bar{V}_2 = \bar{U}_{20} - \bar{I}_2 [R_s + jX_s]$$

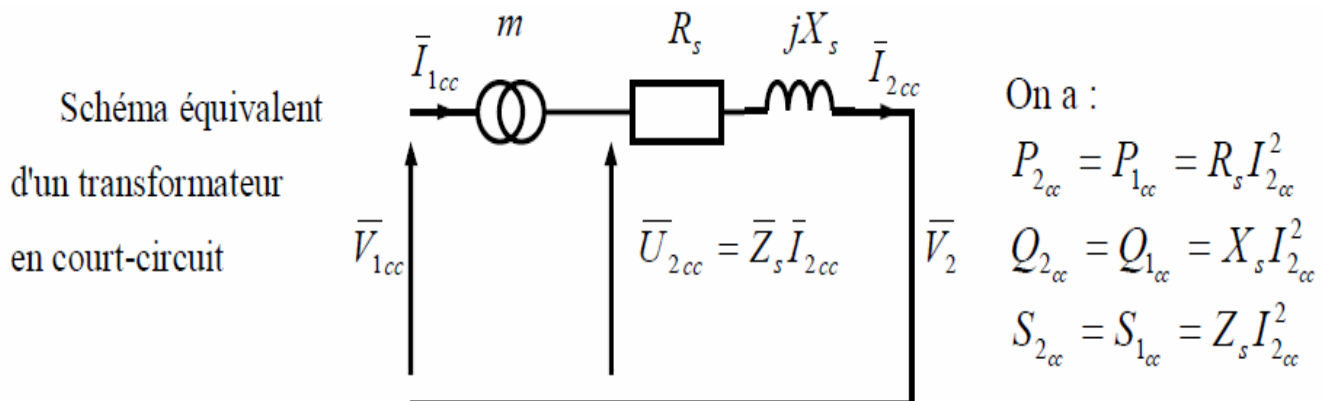
$$\text{où } R_s = r_2 + r_1 m^2 \quad \text{et} \quad X_s = X_2 + X_1 m^2$$

Un transformateur parfait sera représenté par le schéma suivant :



d) Etude du transformateur en court-circuit:

Le transformateur en court-circuit est représenté par la figure ci-dessous :



e) Diagrammes vectoriels:

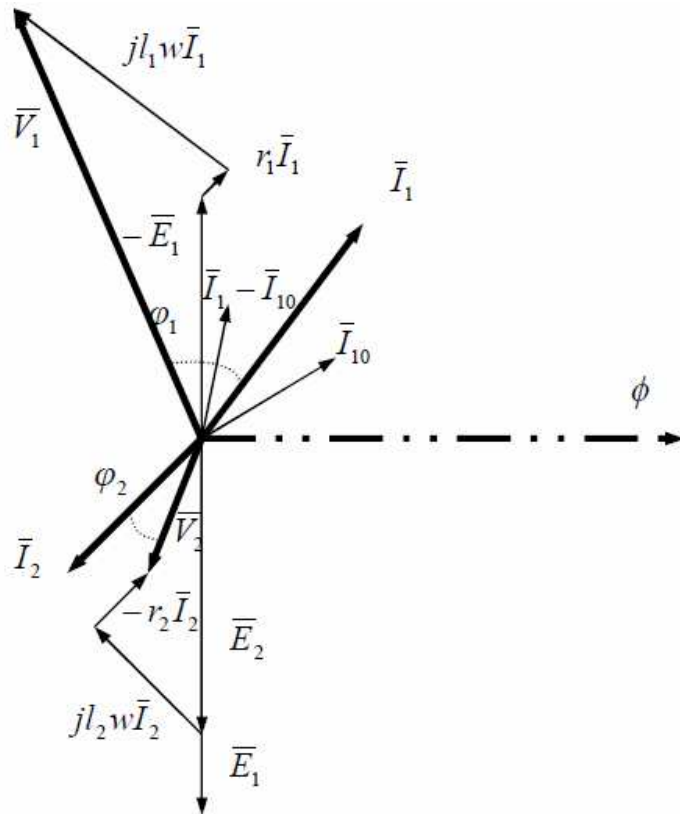
Diagramme vectoriel non simplifié

$$\bar{E}_1 = -n_1 \frac{d\bar{\phi}}{dt} = -jn_1 \omega \bar{\phi} = n_1 \omega \bar{\phi} e^{-j\frac{\pi}{2}}$$

$$\bar{E}_2 = m\bar{E}_1 = mE_1 e^{j0}$$

$$\bar{V}_1 = -\bar{E}_1 + jl_1 \omega \bar{I}_1 + r_1 \bar{I}_1$$

$$\bar{V}_2 = \bar{E}_2 - jl_2 \omega \bar{I}_2 - r_2 \bar{I}_2$$



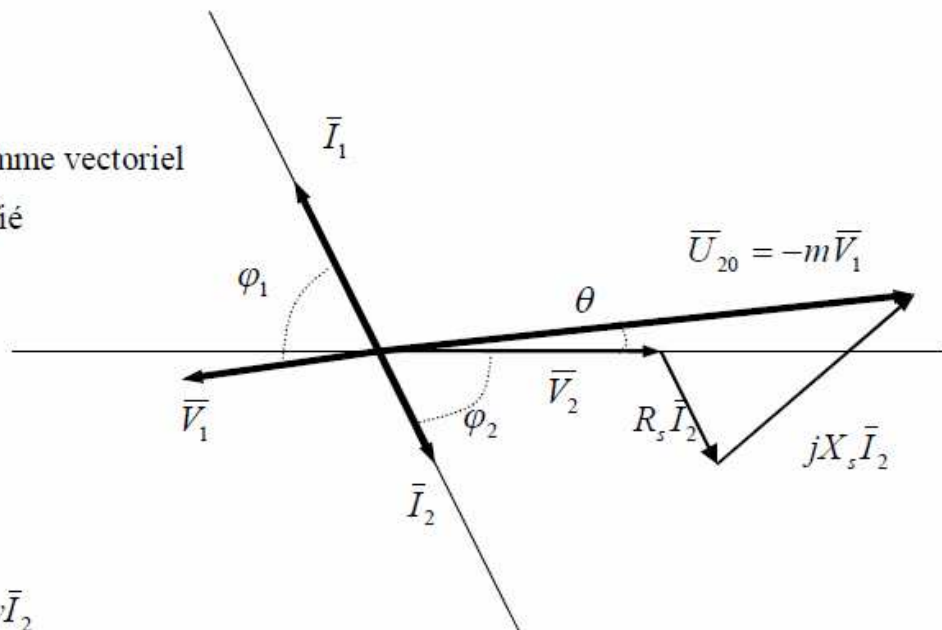
Dans l'hypothèse de Kapp, on néglige de courant \bar{I}_{10} ,

$$\bar{I}_{10} \Rightarrow \bar{I}_2 = -\frac{1}{m} \bar{I}_1 = \frac{1}{m} I_1 e^{-j\pi}$$

alors le diagramme vectoriel simplifié peut être représenté comme suit :

représenté comme suit :

Diagramme vectoriel simplifié

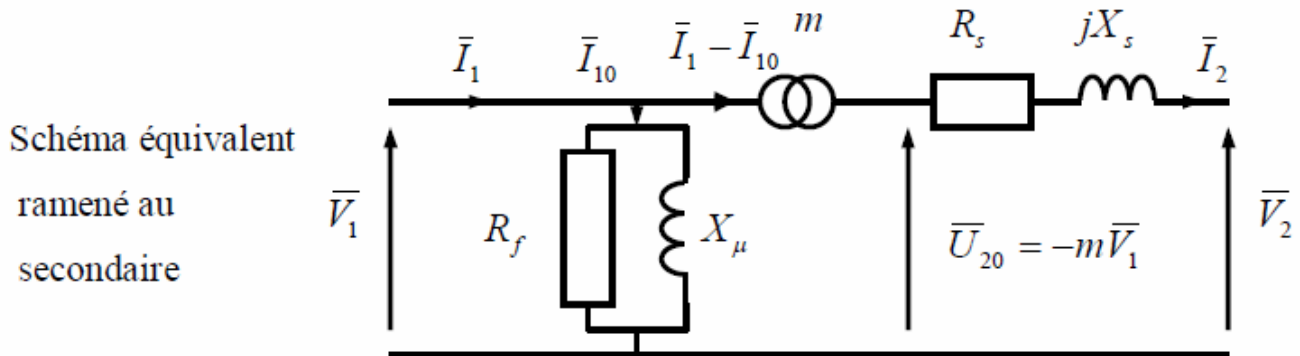


$$\bar{U}_{20} = \bar{V}_2 + r_2 \bar{I}_2 + jl_2 \omega \bar{I}_2$$

$$\bar{I}_1 = -m\bar{I}_2 = mI_2 e^{j\pi}$$

f) Calcul des paramètres (m , R_f , X_μ , R_s et X_s) :

Voici le schéma équivalent d'un transformateur monophasé avec ses différents paramètres.



g) Données:

Pendant l'essai à vide, on prélève :

- La tension à vide (U_{20}) ;
- La tension au primaire (V_1) ;
- La puissance active à vide (P_{10}).

Pendant un essai en court circuit, on détermine :

- Le courant de court au primaire ou au secondaire (I_{1cc} ou I_{2cc} , avec $I_{1cc} = mI_{2cc}$) ;
- La puissance active (P_{1cc}).

h) Détermination des paramètres:

- ✓ Lors d'un essai à vide, le courant de sortie I_2 est nul. Les paramètres (m , R_f et X_μ)

$$m = \frac{U_{20}}{V_1} = \frac{n_2}{n_1} ;$$

- le rapport de transformation :

$$P_{10} = \frac{V_1^2}{R_f} \Rightarrow R_f = \frac{V_1^2}{P_{10}} ;$$

- la résistance de fuite :

$$Q_{10} = \frac{V_1^2}{X_\mu} \Rightarrow X_\mu = \frac{V_1^2}{Q_{10}} .$$

- l'inductance de fuite :

$$Z_m = \sqrt{R_f^2 + X_\mu^2}$$

- l'impédance fictive magnétisante

- ✓ Lors d'un essai en court-circuit (R_s et X_s) peuvent être déterminés comme suit :

$$P_{1cc} = P_{2cc} = R_s I_{2cc}^2 = R_s \frac{I_{1cc}^2}{m^2};$$

- la résistance ramenée à la sortie :

$$Q_{1cc} = Q_{2cc} = X_s I_{2cc}^2 = X_s \frac{I_{1cc}^2}{m^2}.$$

- l'inductance ramenée à la sortie:

$$S_{1cc} = S_{2cc} = Z_s I_{2cc}^2 = Z_s \frac{I_{1cc}^2}{m^2}$$

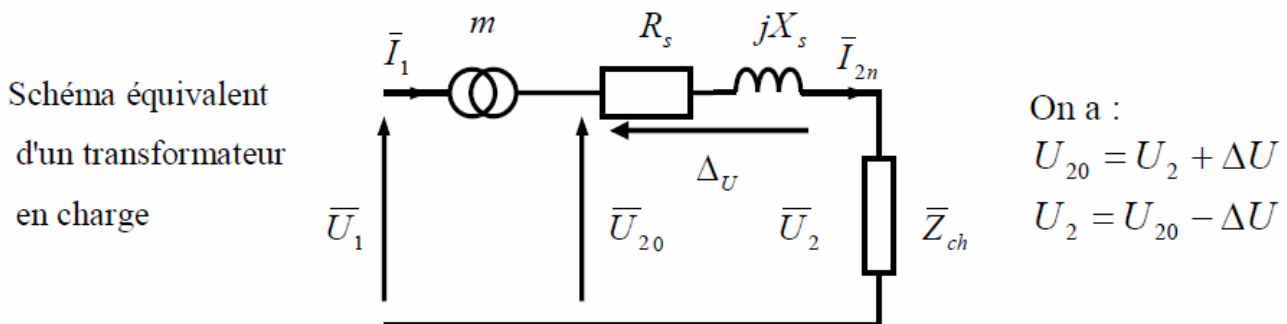
- l'impédance ramenée à la sortie

avec $I_{1cc}^2 = m^2 I_{2cc}^2$ et $Z_s = \sqrt{R_s^2 + X_s^2}$

3-14-7 Etude de la chute de tension (ΔU):

La chute de tension est donnée par la relation suivante :

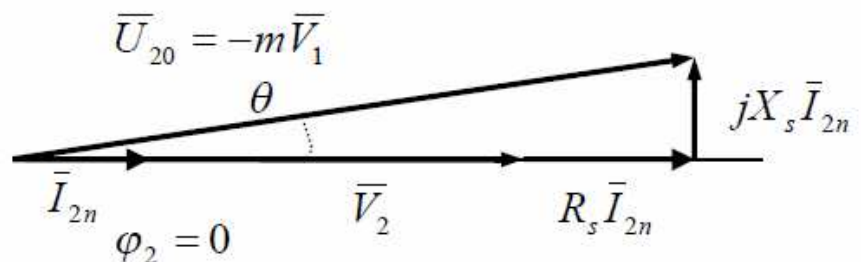
$$\Delta U = R_s I_{2n} \cos \varphi_2 + X_s I_{2n} \sin \varphi_2$$



- a. Le cas d'une charge résistive $\cos \varphi_2 = 1 \Rightarrow \varphi_2 = 0$

$$\Delta U = R_s I_{2n} \Rightarrow U_2 = U_{20} - R_s I_{2n}$$

Diagramme de Fresnel dans le cas d'une charge résistive



- b. Le cas d'une charge inductive $\varphi_2 > 0 \Rightarrow \cos \varphi_2 > 1$ et $\sin \varphi_2 > 0$, on

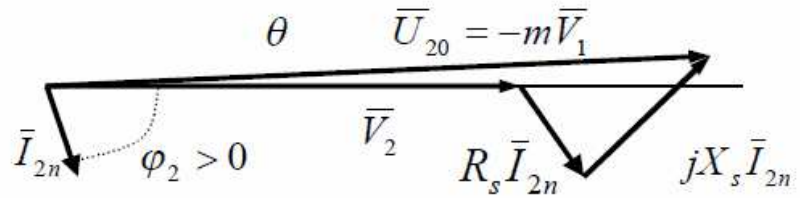
dit que φ_2 est en arrière (AR), c'est que le courant est déphasé en arrière par rapport à la tension.

$$\Delta U = R_s I_{2n} \cos \varphi_2 + X_s I_{2n} \sin \varphi_2$$

$$\Rightarrow U_2 = U_{20} - R_s I_{2n} \cos \varphi_2 - X_s I_{2n} \sin \varphi_2$$

$$\Rightarrow U_{20} = U_2 + R_s I_{2n} \cos \varphi_2 + X_s I_{2n} \sin \varphi_2$$

Diagramme de Fresnel
dans le cas d'une
charge inductive



c. Le cas d'une charge capacitive $\varphi_2 < 0 \Rightarrow \cos \varphi_2 > 1$ et $\sin \varphi_2 < 0$,

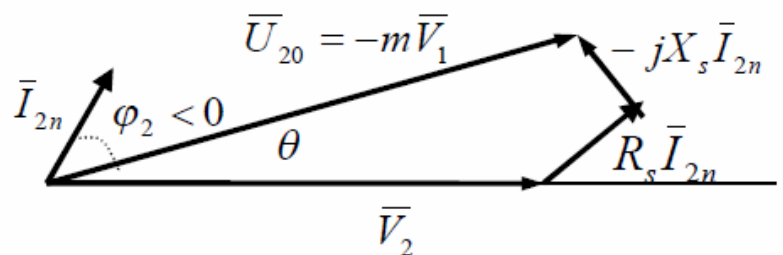
on dit que φ_2 est en avance (AV), c'est que le courant est déphasé en avant par rapport à la tension.

$$\Delta U = R_s I_{2n} \cos|\varphi_2| - X_s I_{2n} \sin|\varphi_2|$$

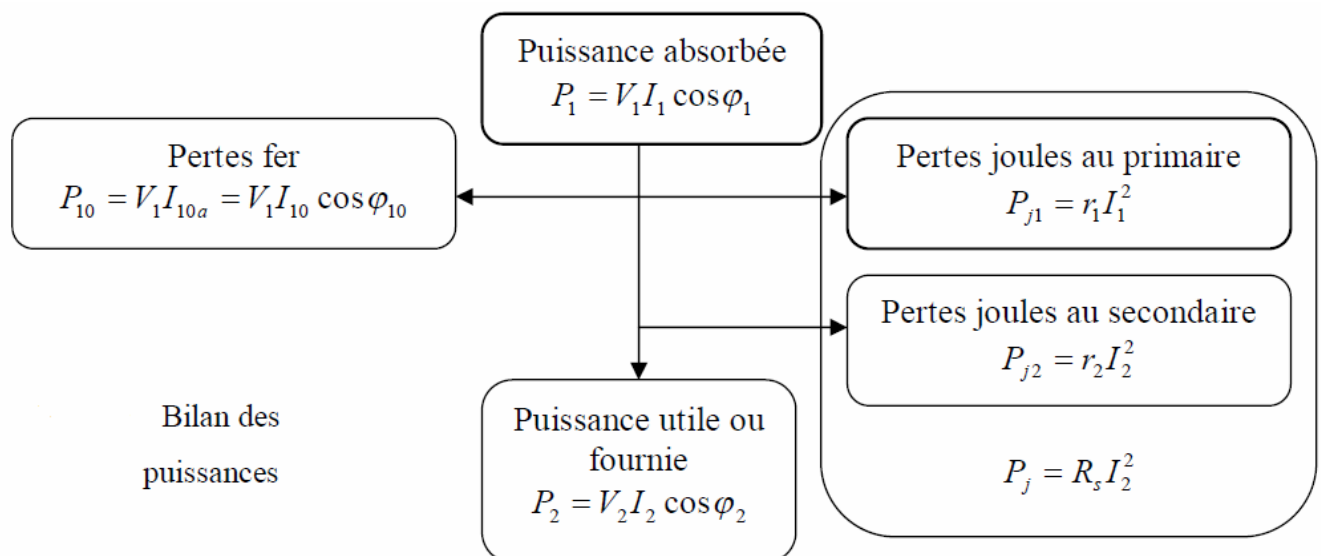
$$\Rightarrow U_2 = U_{20} - R_s I_{2n} \cos|\varphi_2| + X_s I_{2n} \sin|\varphi_2|$$

$$\Rightarrow U_{20} = U_2 + R_s I_{2n} \cos|\varphi_2| - X_s I_{2n} \sin|\varphi_2|$$

Diagramme de Fresnel
dans le cas d'une
charge capacitive



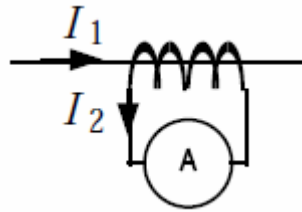
3-14-8 Bilan des puissances



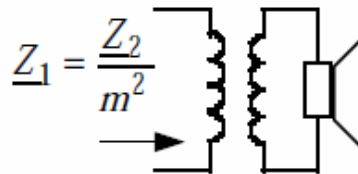
Bilan des
puissances

3-14-9 Les différents types de transformateurs:

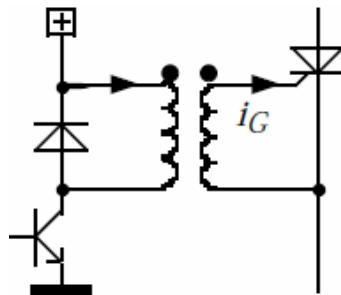
- **Transformateur de mesure** : transformateur utilisé pour adapter la gamme et assurer l'isolation par rapport au dispositif mesuré d'un voltmètre ou d'un ampèremètre.
- **Transformateur de courant** : transformateur de mesure abaisseur de courant (donc élévateur de tension), soit : $m > 1$. On l'utilise notamment pour mesurer l'intensité d'un courant fort. Le primaire peut alors se réduire à une seule spire ! Ce type de transformateur s'utilise avec secondaire en court-circuit (dans le cas contraire, la tension apparaissant au secondaire pourrait être très élevée).



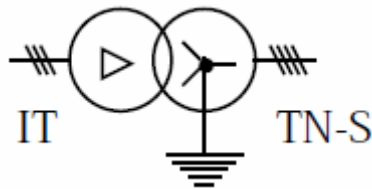
- **Transformateur d'impédance** : transformateur utilisé pour adapter l'impédance de deux circuits. Exemple : sortie d'un amplificateur basse fréquence (audio) dont la charge est un haut-parleur d'impédance normalisée égale 8W à 1000Hz.



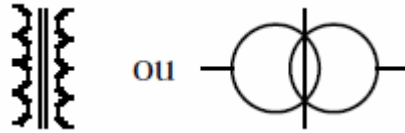
- **Transformateur d'impulsions** : transformateur utilisé pour la commande (isolée) de gachette des thyristors et des triacs. Il est important de respecter le sens de branchement des bobinages, puisque l'impulsion de courant que le transformateur transmet est orientée dans le sens de conduction des semi-conducteurs.



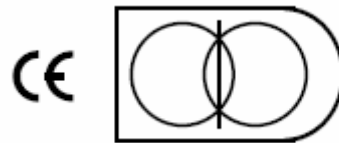
- **Transformateur d'isolement** : transformateur tel que $m = 1$. Utilisé pour assurer une isolation galvanique entre circuits, ou encore adapter le régime de neutre (schéma de mise à la terre) aux besoins de l'installation. Exemple : IT → TN-S



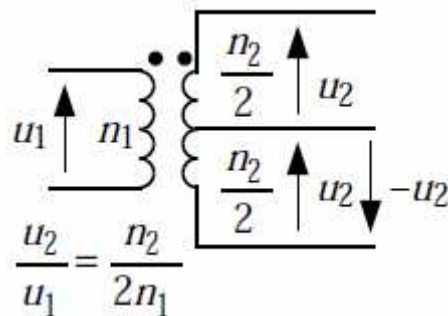
- **Transformateur à écran** : transformateur d'isolement incluant un écran électrostatique (utilisation : CEM)



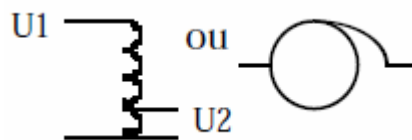
- **Transformateur de sécurité** : transformateur à écran à isolation renforcée (utilisation : CEM et sécurité électrique)



- **Transformateur à point milieu** : transformateur dont le primaire ou le secondaire possède une borne de connexion supplémentaire au milieu de l'enroulement. Permet un schéma symétrique



- **Autotransformateur** : transformateur simplifié à un seul enroulement. Ne permet pas l'isolation galvanique, mais autorise un réglage fin de la tension secondaire par déplacement du curseur servant de connexion de sortie sur l'enroulement.

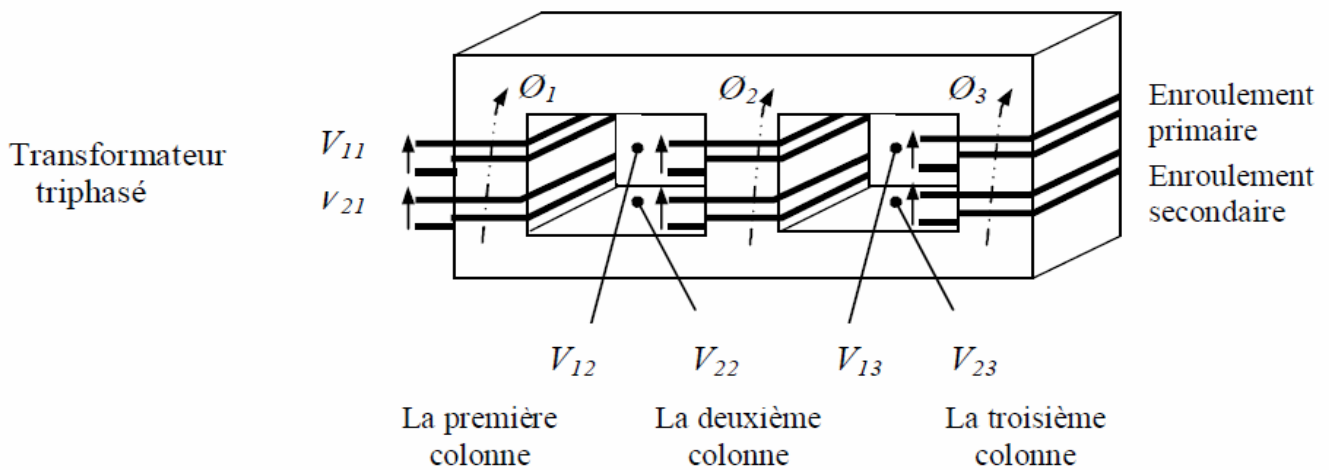


4-Transformateurs de Puissance triphasés:

4-1 Constitution:

Le transformateur triphasé est composé de deux circuits :

- un circuit magnétique (la culasse).
- un circuit électrique comportant trois enroulements primaires et trois secondaires.



4-2 Symbole et orientation:

a. Les symboles en majuscule correspondent au mode de câblage des enroulements primaires.

Prenant les exemples suivants :

- Y : Couple en étoile.
- Δ : Couplage en triangle.
- Z : Couplage en zig-zag

b. Les symboles en minuscule correspondent au mode de câblage des enroulements secondaires.

Citant les exemples suivants :

- y : Couple en étoile.
- d : Couplage en triangle.
- z : Couplage en zig-zag

4-3 Mode de branchement des enroulements:

4-3-1 Indice horaire:

- Les tensions simples V_A , V_B , V_C , respectivement des enroulements primaires "A", "B" et "C";
- Les tensions composées U_{AB} , U_{BC} , U_{CA} , respectivement entre les enroulements primaires "A et B", "B et C", et "C et A";
Les tensions simples V_a , V_b , V_c , respectivement des enroulements secondaires "a", "b" et "c";
- les tensions composées U_{ab} , U_{bc} , U_{ca} , respectivement entre les enroulements secondaires "a et b", "b et c", et "c et a".

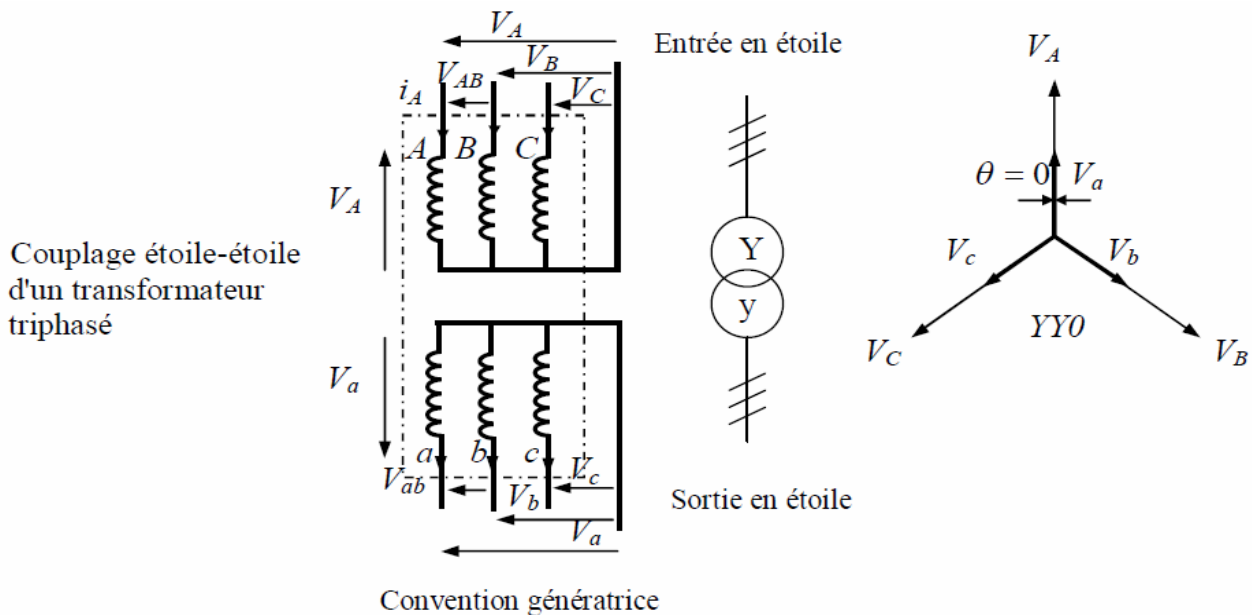
Selon le couplage des enroulements primaires et secondaires, il apparaît un déphasage θ entre les tensions homologues

$$\left(\overline{V}_a, \hat{\overline{V}}_A \right) = \left(\overline{V}_b, \hat{\overline{V}}_B \right) = \left(\overline{V}_c, \hat{\overline{V}}_C \right) = \left(\overline{V}_{ab}, \hat{\overline{V}}_{AB} \right) = \theta \quad \text{dont :}$$

- θ est un multiple de $(30^\circ) \equiv \pi/6$;
- le déphasage θ indique le retard d'une tension de sortie en basse tension (BT) sur son homologue tension d'entrée en haute tension (HT), le déphasage θ est divisé par $(30^\circ) \equiv \pi/6$ donnant un nombre entier I compris entre 0 à 11 ;
- I est appelé "Indice horaire".

Remarque : Si on permute les tensions d'alimentation primaire, en respectant l'ordre de succession des phases, I change de 4 ou de 8. Si on change le sens des enroulements, I sera modifié de 6.

4-3-2 Transformateur étoile-étoile:



On a les tensions homologues V_a et V_A en phase.

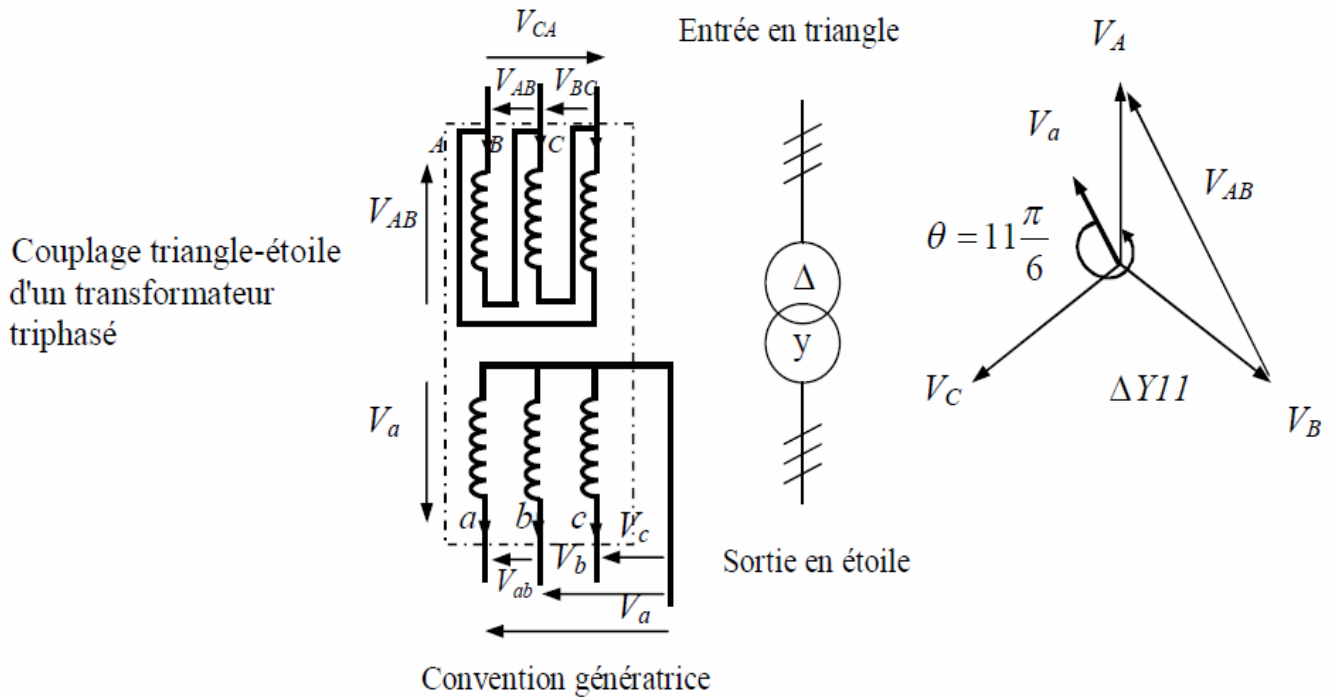
$\theta = \left(\overline{V_a}, \widehat{\overline{V_A}} \right) = 0$ et $I = \frac{\theta}{\pi/6}$, implique que $I = 0$. D'où la représentation de l'indice horaire d'un couplage étoile-étoile est la suivante : **Yy0**

$$V_A = \frac{V_{1\max}}{m} \sin(\omega t) \quad V_a = \frac{V_{2\max}}{m} \sin(\omega t)$$

On suppose que $V_B = \frac{V_{1\max}}{m} \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right)$, alors $V_b = \frac{V_{2\max}}{m} \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right)$

$$V_C = \frac{V_{1\max}}{m} \sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) \quad V_c = \frac{V_{2\max}}{m} \sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right)$$

4-3-3 Transformateur triangle-étoile:



On a la tension \bar{V}_a est en arrière par rapport à la tension \bar{V}_A de $\frac{11\pi}{6}$.

$\theta = \left(\bar{V}_a, \bar{V}_A \right) = \frac{11\pi}{6}$ et $I = \frac{\theta}{\pi/6}$, implique que $I=11$. D'où la représentation de l'indice horaire d'un couplage triangle-étoile est la suivante : $\Delta y11$

$$V_A = \frac{V_{1\max}}{m} \sin(\omega t)$$

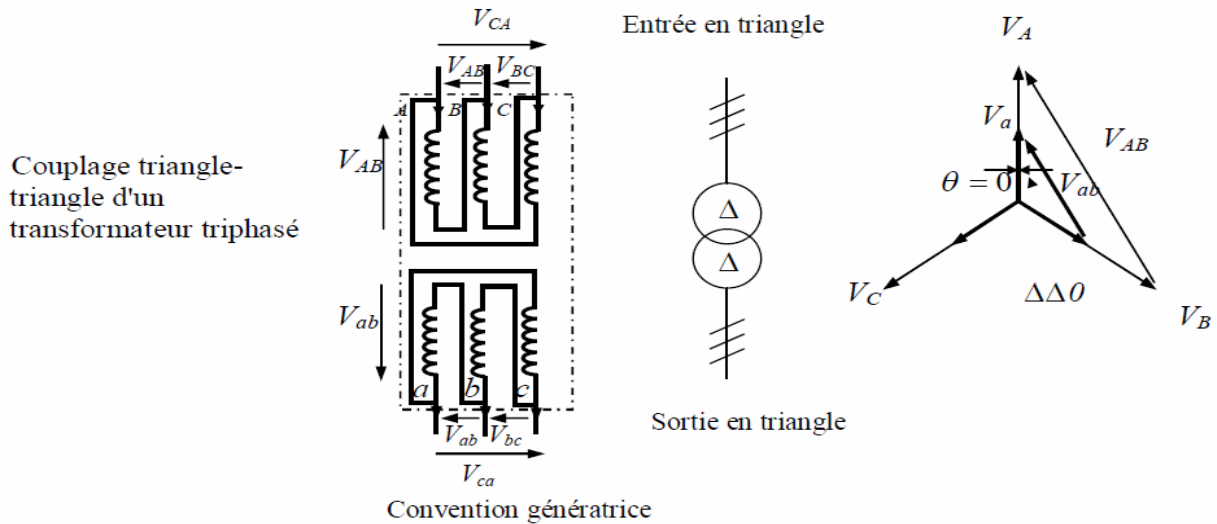
$$V_a = \frac{V_{\max}}{m} \sin\left(\omega t - 11\frac{\pi}{6}\right)$$

On suppose que $V_B = \frac{V_{1\max}}{m} \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right)$, alors $V_b = \frac{V_{\max}}{m} \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3} - 11\frac{\pi}{6}\right)$

$$V_C = \frac{V_{1\max}}{m} \sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right)$$

$$V_c = \frac{V_{\max}}{m} \sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3} - 11\frac{\pi}{6}\right)$$

4-3-4 Transformateur triangle-triangle:



On a les tensions homologues V_{ab} et V_{AB} en phase.

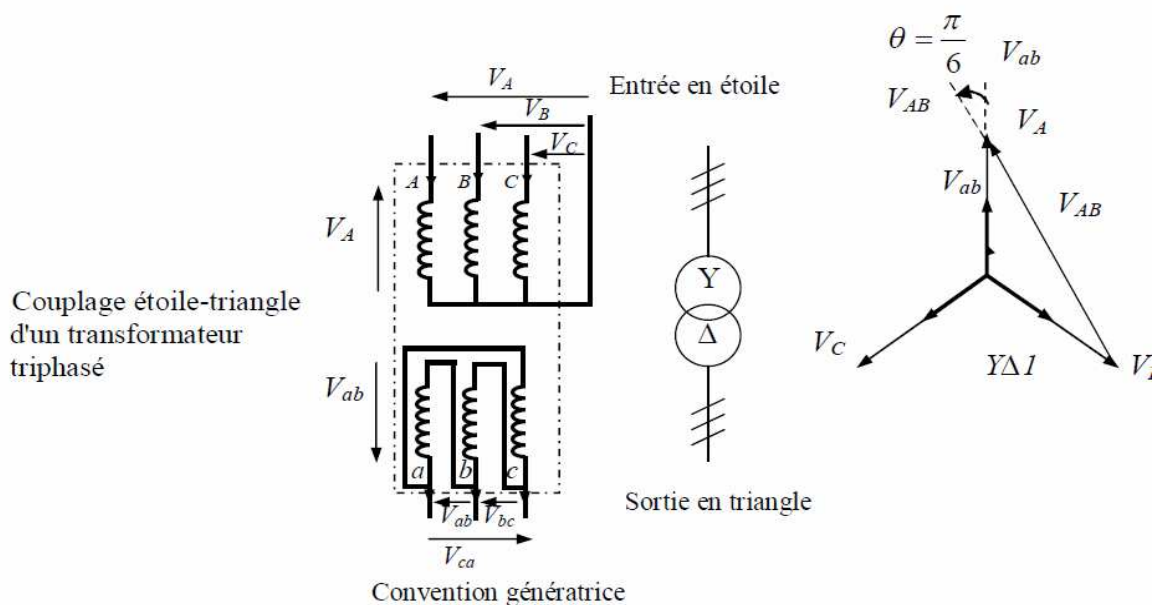
$\theta = \left(\overline{V_{ab}}, \hat{\overline{V_{AB}}} \right) = 0$ et $I = \frac{\theta}{\pi/6}$, implique que $I = 0$. D'où la représentation de l'indice horaire d'un couplage étoile-étoile est la suivante : $\Delta\Delta 0$

$$V_A = \frac{V_{1\max}}{m} \sin(\omega t) \qquad V_a = \frac{V_{2\max}}{m} \sin(\omega t)$$

On suppose que $V_B = \frac{V_{1\max}}{m} \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right)$, alors $V_b = \frac{V_{2\max}}{m} \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right)$

$$V_C = \frac{V_{1\max}}{m} \sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) \qquad V_c = \frac{V_{2\max}}{m} \sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right)$$

4-3-5 Transformateur étoile-triangle:



On a la tension \bar{V}_{ab} est en arrière par rapport à la tension \bar{V}_{AB} de $\frac{\pi}{6}$.

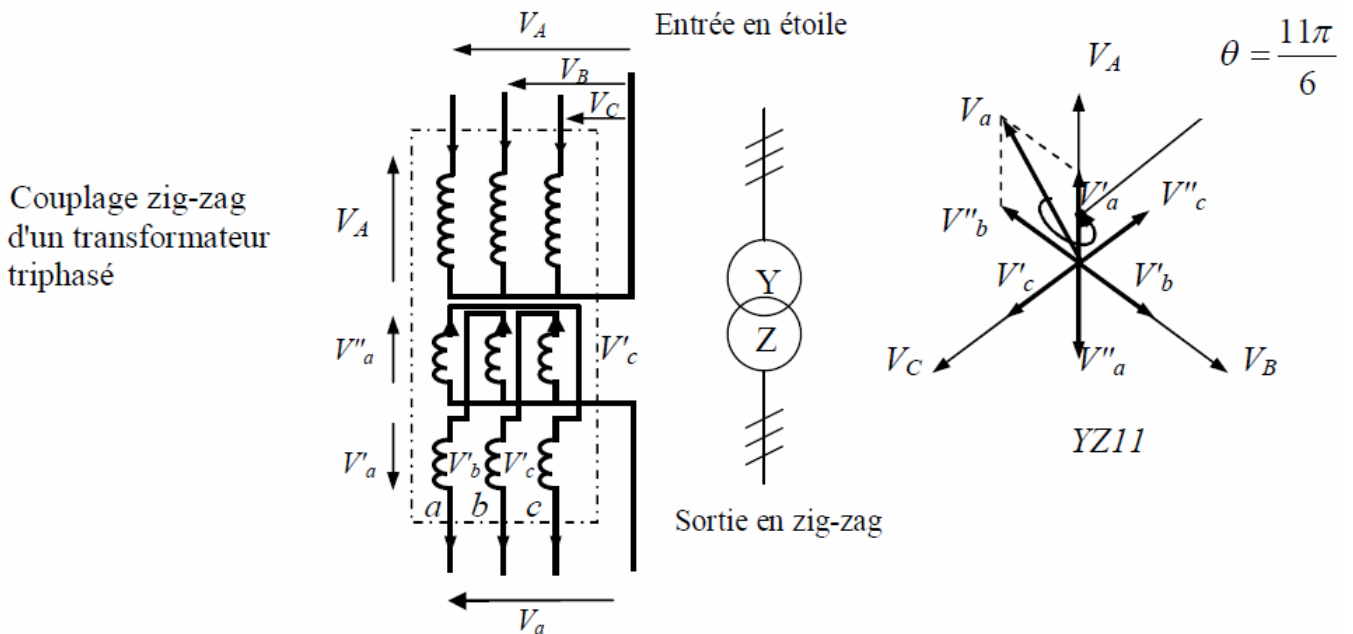
$\theta = \left(\bar{V}_{ab}, \hat{\bar{V}}_{AB} \right) = \frac{\pi}{6}$ et $I = \frac{\theta}{\pi/6}$, implique que $I=1$. D'où la représentation de l'indice horaire d'un couplage étoile-triangle est la suivante : YΔ1

$$V_A = \frac{V_{1\max}}{m} \sin(\omega t) \qquad V_a = \frac{V_{\max}}{m} \sin\left(\omega t - 11\frac{\pi}{6}\right)$$

On suppose que $V_B = \frac{V_{1\max}}{m} \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right)$, alors $V_b = \frac{V_{\max}}{m} \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3} - 11\frac{\pi}{6}\right)$

$$V_C = \frac{V_{1\max}}{m} \sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) \qquad V_c = \frac{V_{\max}}{m} \sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3} - 11\frac{\pi}{6}\right)$$

4-3-6 Transformateur étoile zig-zag:



$$V_a = V'_a + V''_b$$

Soient les tensions de sorties : $V_b = V'_b + V''_c$ de convention génératrice

$$V_c = V'_c + V''_a$$

Et telles que \bar{V}'_a de même direction que \bar{V}_A et \bar{V}''_b de sens opposé que \bar{V}_B .

Ce qui implique la somme vectorielle des deux tensions composées égale à \bar{V}_a

$$\bar{V}_A \text{ de } \frac{11\pi}{6}.$$

qui est en arrière par rapport à la tension d'entrée

$$\theta = \left(\bar{V}_a, \hat{\bar{V}}_A \right) = \frac{11\pi}{6} \text{ et } I = \frac{\theta}{\pi/6}, \text{ implique que } I=11. \text{ D'où la}$$

représentation de l'indice horaire d'un couplage étoile-zig-zag est la suivante :
Yz11

$$V_A = \frac{V_{1\max}}{m} \sin(\omega t) \qquad V_a = \frac{V_{\max}}{m} \sin\left(\omega t - 11\frac{\pi}{6}\right)$$

$$\text{On suppose que } V_B = \frac{V_{1\max}}{m} \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right), \text{ alors } V_b = \frac{V_{\max}}{m} \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3} - 11\frac{\pi}{6}\right)$$

$$V_C = \frac{V_{1\max}}{m} \sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) \qquad V_c = \frac{V_{\max}}{m} \sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3} - 11\frac{\pi}{6}\right)$$

4-4 Détermination des paramètres du transformateur triphasé par colonne:

4-4-1 Exemple:

Prenant l'exemple d'un transformateur triphasé couplé en triangle-étoile.

Il faut exprimer tous les paramètres du transformateur par les grandeurs du colonne :

- Le rapport de transformation

$$m_c = \frac{U_{20}}{\sqrt{3}} \times \frac{1}{V_1} = \frac{U_{20}}{\sqrt{3}} \times \frac{1}{U_1} = V_{20} \times \frac{1}{V_1} = V_{20} \times \frac{1}{U_1};$$

$$R_{fc} = \frac{3V_1^2}{P_{10}} = \frac{3U_1^2}{P_{10}};$$

- La résistance de fuite dans le fer

$$X_{\mu c} = \frac{3V_1^2}{Q_{10}} = \frac{3U_1^2}{Q_{10}};$$

- L'inductance de fuit

$$R_{sc} = \frac{P_{1cc}}{3J_2^2} = \frac{P_{1cc}}{3I_2^2};$$

- La résistance ramenée au secondaire

$$X_{sc} = \frac{Q_{1cc}}{3J_2^2} = \frac{Q_{1cc}}{3I_2^2}$$

- L'inductance ramené au secondaire

4-4-2 Tableau récapitulatif par colonne pour différents couplages:

Notant que les tensions et les courants peuvent être exprimés suivant le mode de couplage :

o l'entrée en étoile : $U_1 = \sqrt{3}V_1$ et $I_1 = J_1$;

o l'entrée en triangle : $U_1 = V_1$ et $I_1 = \sqrt{3}J_1$;

o la sortie en étoile : $U_2 = \sqrt{3}V_2$ et $I_2 = J_2$;

o la sortie en triangle : $U_2 = V_2$ et $I_2 = \sqrt{3}J_2$.

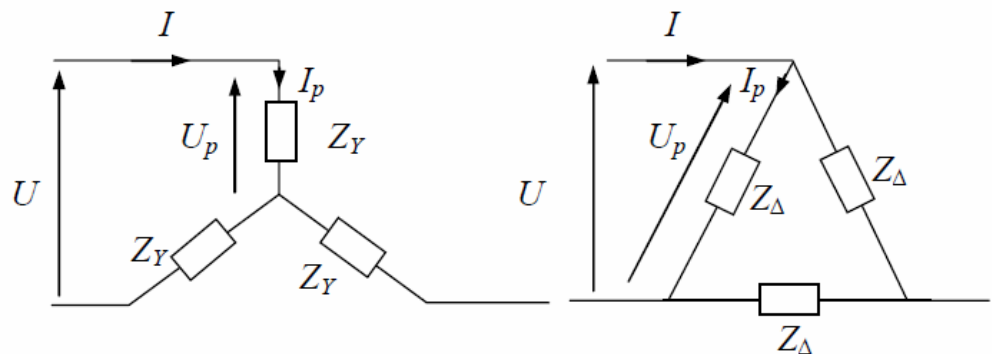
Mode de couplage	m_c	R_{fc}	$X_{\mu c}$	R_{sc}	X_{sc}
Etoile-étoile	$\frac{U_{20}}{U_1}$	$\frac{U_1^2}{P_{10}} = \frac{3V_1^2}{P_{10}}$	$\frac{U_1^2}{Q_{10}} = \frac{3V_1^2}{Q_{10}}$	$\frac{P_{1cc}}{3I_2^2} = \frac{P_{1cc}}{3J_2^2}$	$\frac{Q_{1cc}}{3I_2^2} = \frac{Q_{1cc}}{3J_2^2}$
Etoile-triangle	$\frac{\sqrt{3}U_{20}}{U_1}$	$\frac{U_1^2}{P_{10}} = \frac{3V_1^2}{P_{10}}$	$\frac{U_1^2}{Q_{10}} = \frac{3V_1^2}{Q_{10}}$	$\frac{P_{1cc}}{I_2^2} = \frac{P_{1cc}}{3J_2^2}$	$\frac{Q_{1cc}}{I_2^2} = \frac{Q_{1cc}}{3J_2^2}$
Triangle-triangle	$\frac{U_{20}}{U_1}$	$\frac{3U_1^2}{P_{10}} = \frac{3V_1^2}{P_{10}}$	$\frac{3U_1^2}{Q_{10}} = \frac{3V_1^2}{Q_{10}}$	$\frac{P_{1cc}}{I_2^2} = \frac{P_{1cc}}{3J_2^2}$	$\frac{Q_{1cc}}{I_2^2} = \frac{Q_{1cc}}{3J_2^2}$
Triangle-étoile	$\frac{U_{20}}{\sqrt{3}U_1}$	$\frac{3U_1^2}{P_{10}} = \frac{3V_1^2}{P_{10}}$	$\frac{3U_1^2}{Q_{10}} = \frac{3V_1^2}{Q_{10}}$	$\frac{P_{1cc}}{3I_2^2} = \frac{P_{1cc}}{3J_2^2}$	$\frac{Q_{1cc}}{3I_2^2} = \frac{Q_{1cc}}{3J_2^2}$

Tableau des paramètres par colonne suivant le mode de couplage

4-4-3 Détermination des paramètres du transformateur triphasé par phase:

a) Transformation des impédances:

Transformation des impédances



Couplage en étoile : $S_Y = 3U_p I_p$ avec $I_p = \frac{U_p}{Z_Y}$ et $U_p = \frac{U}{\sqrt{3}}$, ce qui

$$S_Y = \frac{U^2}{Z_Y}$$

implique

Couplage en triangle : $S_{\Delta} = 3U_p I_p$ avec $I_p = \frac{U_p}{Z_{\Delta}}$ et $U_p = U$, ce qui

$$S_{\Delta} = \frac{3U^2}{Z_{\Delta}}$$

implique

$$S_{\Delta} = S_Y \Rightarrow Z_{\Delta} = 3Z_Y$$

Si on pose que

C'est pour cette raison qu'il faut convertir les modes de couplages étoile et triangle en une seule mode de couplage "étoile-étoile ou triangle-triangle".

b) Exemple:

Prenant l'exemple d'un transformateur triphasé couplé en triangle-étoile. Il faut exprimer tous les paramètres du transformateur par phase ou par enroulement :

$$m_a = \frac{U_{20}}{\sqrt{3} U_1} \frac{\sqrt{3}}{1} = \frac{U_{20}}{U_1} ;$$

- Le rapport de transformation par phase

$$R_{fa} = \frac{R_{fc}}{3} ;$$

- la résistance de fuite dans le fer par phase

$$X_{\mu a} = \frac{X_{\mu c}}{3} ;$$

- l'inductance de fuit par phase

$$X_{sa} = X_{sc} ;$$

- l'inductance ramené au secondaire

$$R_{sa} = R_{sc} ;$$

- la résistance ramenée au secondaire

b) Tableau récapitulatif pour différents couplages:

Mode de couplage	m_a	R_{fa}	$X_{\mu a}$	R_{sa}	X_{sa}
Etoile-étoile	$\frac{U_{20}}{U_1}$	$R_{fa} = R_{fc}$	$X_{\mu a} = X_{\mu c}$	$R_{sa} = R_{sc}$	$X_{sa} = X_{sc}$
Etoile-triangle	$\frac{U_{20}}{U_1}$	$R_{fa} = R_{fc}$	$X_{\mu a} = X_{\mu c}$	$R_{sa} = \frac{R_{sc}}{3}$	$X_{sa} = \frac{X_{sc}}{3}$
Triangle-triangle	$\frac{U_{20}}{U_1}$	$R_{fa} = \frac{R_{fc}}{3}$	$X_{\mu a} = \frac{X_{\mu c}}{3}$	$R_{sa} = \frac{R_{sc}}{3}$	$X_{sa} = \frac{X_{sc}}{3}$
Triangle-étoile	$\frac{U_{20}}{U_1}$	$R_{fa} = \frac{R_{fc}}{3}$	$X_{\mu a} = \frac{X_{\mu c}}{3}$	$R_{sa} = R_{sc}$	$X_{sa} = X_{sc}$

Tableau des paramètres convertis en mode de couplage étoile-étoile

Nomenclature :

1ère lettre (majuscule) couplage primaire	Y	couplage étoile
	D	couplage triangle
	Z	couplage zig-zag (nécessite des enroulements à point milieu)
2ème lettre (minuscule) couplage secondaire	y, d ou z	idem
3ème lettre	N ou n	neutre sorti
Indice horaire	0, 1, 2, ..., 11	retard de la BT sur la HT exprimé en multiple de 30°

Exemple : un indice horaire de 11 correspond à un retard de $11 \times 30^\circ = 330^\circ$

Caractéristiques :

Couplage	Rapport de transformation
Yy	$m = \frac{n_2}{n_1}$
Yd	$m = \frac{\sqrt{3} n_2}{3 n_1}$
Yz	$m = \frac{\sqrt{3} n_2}{2 n_1}$
Dy	$m = \sqrt{3} \frac{n_2}{n_1}$
Dd	$m = \frac{n_2}{n_1}$

4-5 Classification des transformateurs:

- Petits transformateurs

Ils ont des puissances de moins de 1Kva en général en monophasé.

- Transformateurs spécialisés

Ils ont des puissances de 1 à 25 kVA soit en monophasé soit en triphasé.

- Transformateurs de distribution

Les transformateurs sur poteaux de 25-50-100 kVA.

Les transformateurs dans des postes de distribution 100 à 2 000 kVA.

▪ **Transformateurs pour le transport et l'interconnexion**

Ils ont des puissances de 2 000 kVA à 1350 MVA.

▪ **Transformateurs spéciaux**

Ce sont les transformateurs pour les postes de soudure à l'arc, les fours à induction, les transformateurs de mesure etc...

4-5-1 Technologie de construction:

On distingue essentiellement deux technologies : Les transformateurs à diélectrique liquide (ou immergés) et les transformateurs dits "secs".

o **Les transformateurs à diélectrique liquide :**

Le circuit magnétique et les enroulements sont immergés dans un diélectrique liquide qui assure isolation et évacuation des pertes calorifiques du transformateur. Ils sont utilisés pour :

- Les postes non surveillés car ils ne nécessitent pas d'entretien
- Les ambiances sévères si le revêtement de la cuve est adapté

Par contre, l'emploi de ces transformateurs posent le problème d'éventuelles pollutions à la suite de fuites de diélectrique (on utilise donc un bac de rétention) et sont dangereux en cas d'incendie (fumées toxiques).

o **Les transformateurs secs :**

Le circuit magnétique est isolé dans une matière isolante sèche. Le refroidissement est assuré par l'air ambiant. Ils sont utilisés dans des locaux où les conditions de poussière, d'humidité et de température sont maîtrisées. Ils sont notamment utilisés pour les grands bâtiments car ils présentent peu de risque en cas d'incendie.

4-5-2 Caractéristiques, symboles et utilisation:

Les différentes fonctions du transformateur de puissance amènent à définir un certain nombre de grandeurs dimensionnant. On peut citer



- ✓ La tension assignée au primaire et secondaire (en volt ou Kv).
- ✓ La puissance apparente (en VA ou Kva).
- ✓ La fréquence de fonctionnement (en France 50 Hz).

Sur la plaque signalétique d'un transformateur, on peut encore trouver la chute de tension en charge, le couplage des enroulements, la classe de température, les courants primaires et secondaires, etc...

4-5-2 La plaque signalétique (lecture et décodage).

C'est la plaque qui permet d'indiquer les principales caractéristiques et branchements du transformateur, plus particulièrement : les valeurs assignées de la puissance, des tensions primaires et secondaires, la fréquence d'emploi, les courants primaire et secondaire et le couplage des enroulements, la tension de court-circuit en %.

L'indication de couplage des enroulements permet d'effectuer le branchement en cas de mise en parallèle de plusieurs transformateurs.

			
by Schneider Electric		Tel. +33 (0)3 87 70 57 72	
Minera		SN:	
THREEPHASE TRANSFORMER 50 Hz complying ref. <input type="text"/>			
according to IEC 60076-1		year 2009	
1250 kVA		Nr 427784-01	
Insulation level kV 60-20		Impedance 6.25 %	
conn. Dyn11			
high voltage		low voltage	
pos 1	<input type="text" value="5775"/> V		windings material <input type="text" value="COPPER"/>
pos 2	<input type="text" value="5638"/> V		cooling <input type="text" value="ONAN"/>
pos 3	<input type="text" value="5500"/> V	<input type="text" value="400"/> V	del. weight <input type="text" value="650"/> kg
pos 4	<input type="text" value="5363"/> V		untanking weight <input type="text" value="1975"/> kg
pos 5	<input type="text" value="5225"/> V		total weight <input type="text" value="3535"/> kg
currents	<input type="text" value="131.2"/> A	<input type="text" value="1804.2"/> A	maxi ambient <input type="text" value="47"/> C
		dielectric <input type="text" value="OL"/>	
PRESSURE -25°C ⇒ -18 mbar / PRESSURE 100°C ⇒ 32mbar			
016-427784 (anglais)		www.francetransfo.com - Made In France	

4-5-3 Symboles des transformateurs:

Symboles		Désignation
Forme 1	Forme 2	
		Transformateur à deux enroulements
		Transformateur à deux enroulements avec indicateurs des polarités instantanées des tensions
		Transformateur à trois enroulements
		Autotransformateur
		Inductance
		Transformateur de courant

Symboles		Désignation
Forme 1	Forme 2	
		Transformateur triphasé à prises multiples avec commutateur de prises pour manœuvre en charge, couplage étoile - triangle
		Transformateur triphasé couplage étoile zig-zag neutre sorti au secondaire

EXEMPLES DE TRANSFORMATEUR À ENROULEMENTS SÉPARÉS

Symboles		Désignation
Forme 1	Forme 2	
		Transformateur monophasé à deux enroulements avec écran
		Transformateur à prise médiane sur un enroulement
		Transformateur à couplage réglable
		Transformateur triphasé, couplage étoile-triangle
		Transformateur triphasé à quatre prises (non compris la prise principale) couplage étoile-étoile
		Groupe de trois transformateurs monophasés, couplage étoile-triangle

EXEMPLES D'AUTOTRANSFORMATEURS

Symboles		Désignation
Forme 1	Forme 2	
		Autotransformateur monophasé
		Autotransformateur triphasé, couplage étoile
		Autotransformateur monophasé à réglage progressif de la tension

TRANSFORMATEURS DE MESURE ET D'IMPULSION

		Transformateur de tension
		Transformateur de courant
		Transformateur de courant sans primaire bobiné avec 5 passages du conducteur primaire
		Transformateur de courant à plusieurs primaires pour détection différentielle
		Transformateur d'impulsion avec indicateur de polarité instantanée des tensions

4-5-4 Couplage des transformateurs:

- Pour des raisons de continuité de service, ou de variations journalières ou saisonnières de consommation d'énergie, il est intéressant de pouvoir coupler deux ou plusieurs transformateurs en parallèle.

- Le rôle du transformateur est d'adapter le niveau de tension aux noeuds de connexion. Il adapte aussi les indices horaires. En effet, si les réseaux 400kV et 225kV ont les mêmes indices horaires, ce n'est absolument pas le cas des autres réseaux. En prenant les réseaux THT comme référence, le réseau 63kV des régions nord et est de la France a pour indice horaire 0 tandis que le réseau 63 kV des régions sud-est et sud-ouest a pour indice horaire 11. Cette diversité est encore plus grande si on s'intéresse aux réseaux HTA et BT.

a) Conditions de couplage:

✓ Puissance

La puissance totale disponible est la somme des puissances des transformateurs. Si les puissances des transformateurs sont différentes, la puissance du plus gros transformateur ne doit pas dépasser deux fois la puissance du plus petit.

✓ Réseau

Les transformateurs sont alimentés par le même réseau.

✓ Connexions et indices horaires

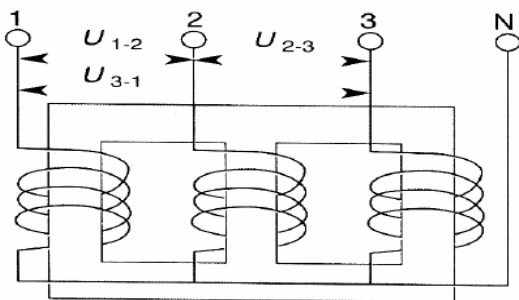
Mêmes longueurs de connexion surtout côté BT. Même indice horaire de couplage.

✓ Tensions

Tensions de court-circuit égales à 10 % près ; tensions secondaires très peu différentes selon la charge (0,4 %).

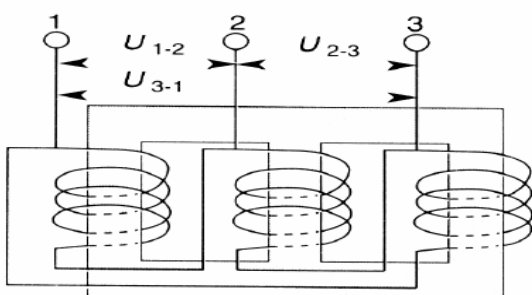
b) Couplage des enroulements:

Couplage étoile:



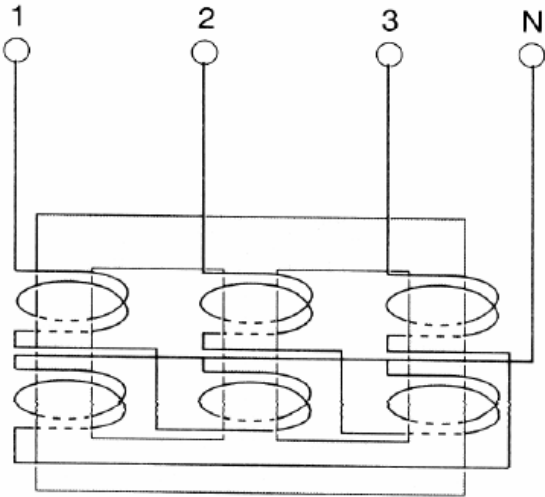
Il permet la sortie du point neutre, très utile en BT. Deux tensions sont disponibles : tension simple et tension composée.

Couplage triangle



Il nécessite plus de spires par colonne que l'enroulement étoile, il n'y a pas de neutre possible.

Couplage zig-zag



Chaque enroulement comprend deux demi bobines placées sur des noyaux différents ; les sorties de la deuxième demi bobine sont inversées. Les f.é.m. de chaque demi bobine sont déphasées de 120° . Avec le couplage zigzag, on obtient une meilleure répartition des tensions en cas de réseau BT déséquilibré

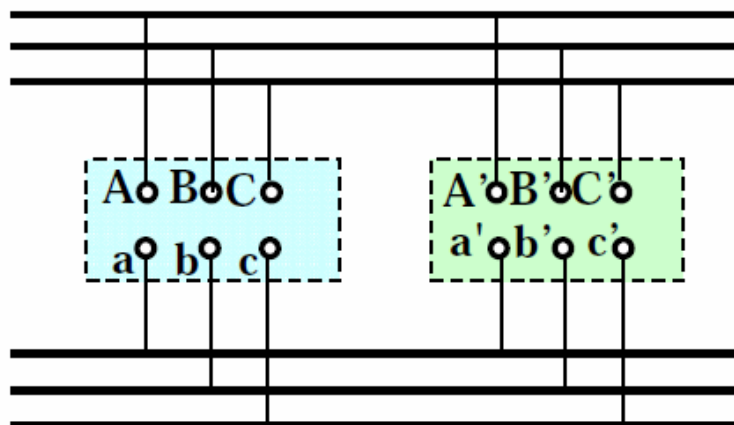
4-6 Marche en parallèle des transformateurs triphasés:

4-6-1 But:

La puissance transmise par une centrale au réseau évolue au cours du temps en fonction de la consommation. Un transformateur unique qui est capable de transmettre la pointe maximale de consommation serait en général utilisé très en dessous de son fonctionnement nominal, avec un rendement médiocre ou mauvais. On préfère disposer de plusieurs transformateurs de moindre puissance fonctionnant en parallèle de telle sorte qu'ils soient toujours au voisinage de leurs conditions nominales de marche.

4-6-2 Conditions de couplage en parallèle:

Des transformateurs sont en parallèle lorsque leurs primaires sont alimentés par un même réseau et leurs secondaires connectés à une même ligne ou débitent dans une même charge.

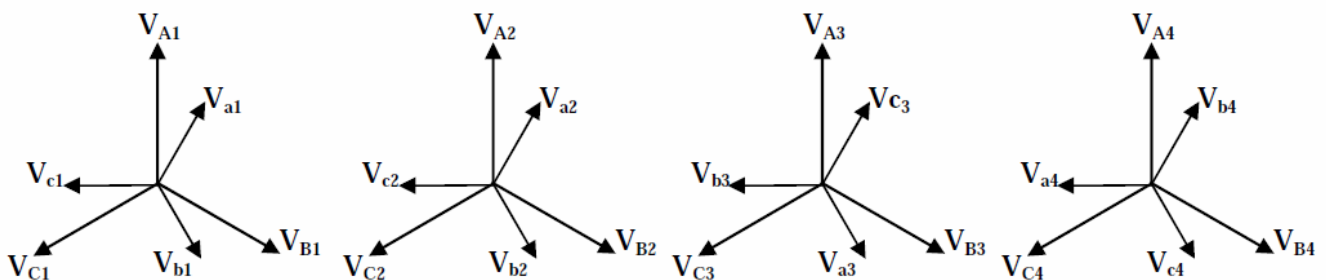
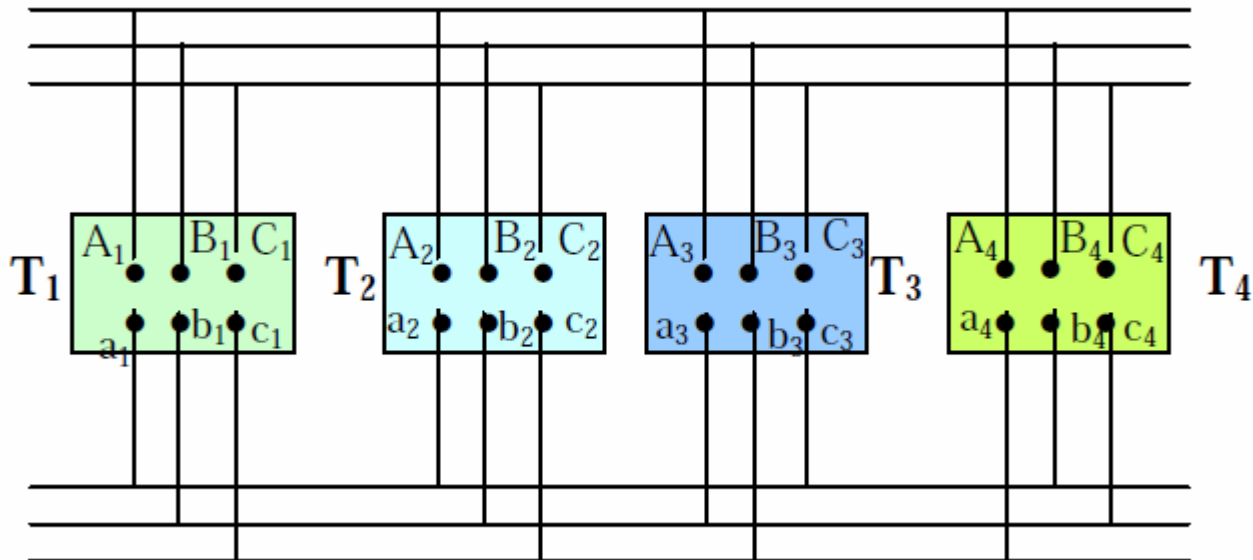


Pour cela il faut que:

- _ Les transformateurs soient alimentés sous la même tension.
- _ Les rapports de transformations à vide soient identiques.
- _ Les tensions de court-circuit égales à 10 % près.
- _ Mêmes indice horaire de couplage ou indices compatibles.

4-6-3 Groupes d'indices horaires

En pratique, on peut aisément modifier l'indice horaire d'un transformateur en effectuant une permutation circulaire des lettres affectées aux bornes : toute permutation correspond à une augmentation ou à une diminution de 4 de la valeur de l'indice horaire. on pourra donc coupler en parallèle sans difficulté des transformateurs dont les indices diffèrent de ± 4 .



Pour toutes ces raisons on définit quatre groupes de transformateurs suivant les valeurs des indices: deux transformateurs d'un même groupe (et de même rapport) peuvent aisément marcher en parallèle.

Groupe	Indices	Couplages
I	0 , 4 , 8	Yy Dd Dz
II	2 , 6 , 10	Yy Dd Dz
III	1 , 5	Dy Yz Yd
IV	7 , 11	Dy Yz Yd

Nota : Les indices 9 et 3 n'existent pas

4-6-4 Les couplages des transformateurs et les indices horaires:

GROUPES	NOTATION UTE	NOTATION VDE	SYMBOLE IEC	DIAGRAMME VECTORIEL	SCHEMA DES CONNEXIONS
G ₁ DEPHASAGE NUL (0°)	G 11	A ₁	Dd 0		
	G 12 NORMALISÉ	A ₂	Yyo		
	G 13	A ₃	Dz 0		
G ₂ DEPHASAGE 180°	G 21	B ₁	Dd 6		
	G 22	B ₂	Yy 6		
	G 23	B ₃	Dz 6		
G ₃ DEPHASAGE 330°	G 31 NORMALISE	D ₁	Dy 11		
	G 32	D ₂	Yd 11		
	G 33 NORMALISE	D ₃	Yz 11		

GROUPES	NOTATION UTE	NOTATION VDE	SYMBOLE IEC	DIAGRAMME VECTORIEL	SCHÉMA DES CONNEXIONS
G ₄ DEPHASAGE 150°	G 41	C ₁	Dy 5		
	G 42	C ₂	Yd 5		
	G 43	C ₃	Yz 5		
DEPHASAGE 30°			Dy 1		
			Yd 1		
			Yz 1		

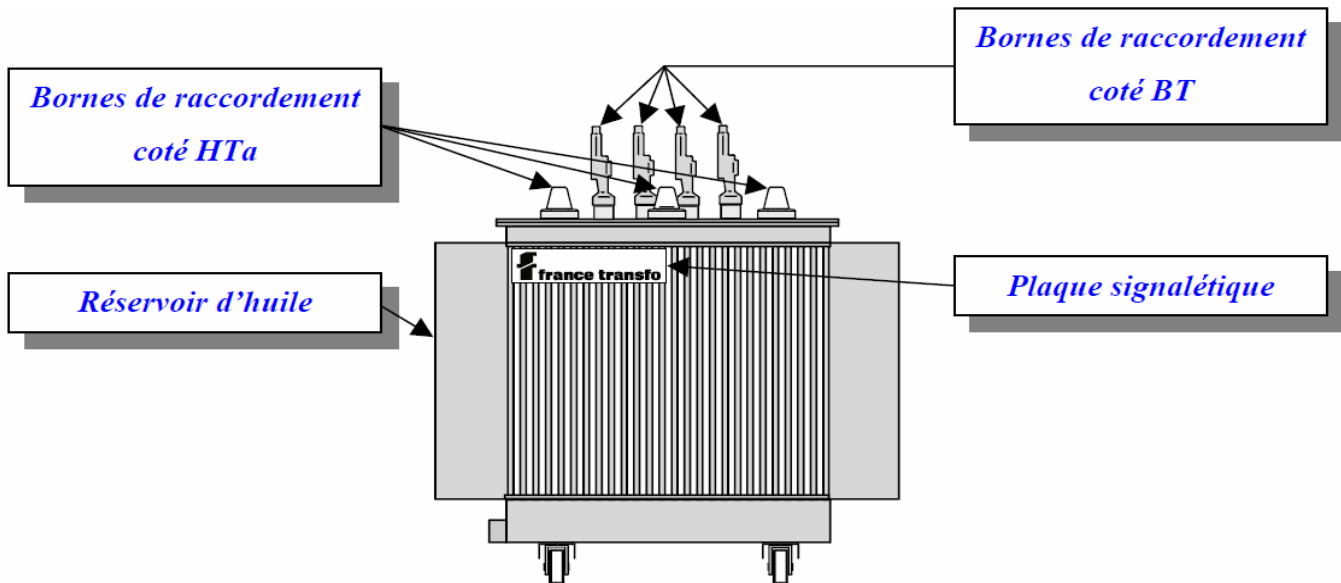
4-7 Les transformateurs de distribution:

Ils permettent de transformer les tensions alternatives triphasées du domaine haute tension en tensions alternatives triphasées du domaine basse tension. Les transformateurs sont réversibles c'est-à-dire qu'ils peuvent abaisser les tensions alternatives ou les élever.

4-7-1 Les transformateurs immergés:

Les transformateurs immergés baignent dans un liquide, généralement de l'huile minérale (dérivé pétrolier) ou de l'huile végétale, qui assure des fonctions d'isolement électrique et d'évacuation de la chaleur produite vers l'extérieur afin de refroidir le matériel. Des sondes thermiques sont incluses au sein des bobinages afin d'assurer la protection du transformateur en cas de

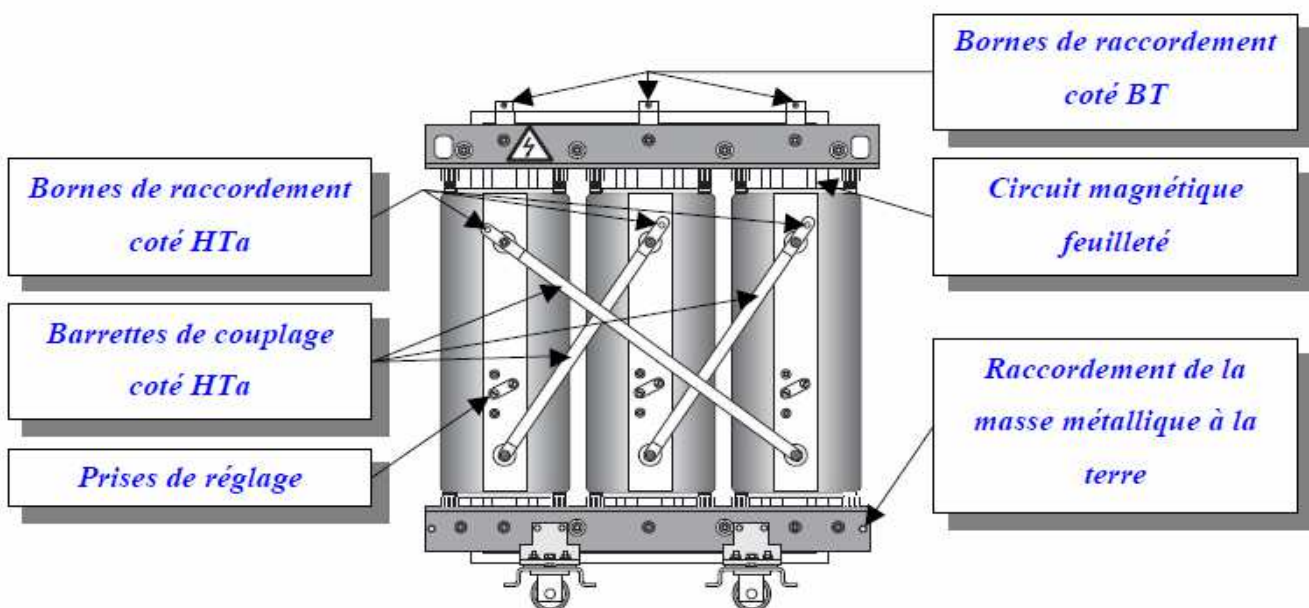
surcharge. Les principaux problèmes rencontrés sur les transformateurs immergés sont les fuites d'huile (pollution) et le fait que l'huile soit inflammable. Les transformateurs nus doivent être placés dans une cellule fermée afin d'interdire l'accès aux pièces nues sous tension.



Transformateur immergé (source Schneider Electric)

4-7-2 Transformateurs secs:

Les transformateurs secs n'ont pas de problème de fuite mais nécessitent un refroidissement efficace et une maintenance régulière. Comme leurs homologues immergés, ils doivent être montés dans des cellules interdisant l'accès aux parties sous tension. Des sondes de température permettent une surveillance thermique des enroulements entraînant la mise hors tension en cas de température trop élevée.



Transformateur sec sans enveloppe de protection IP00 (source Schneider Electric).

5-Protection des transformateurs de puissance:



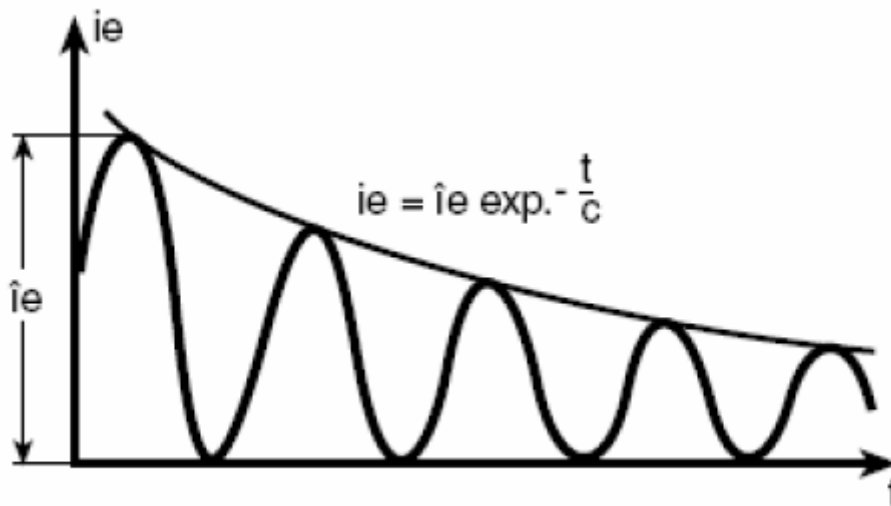
Interface entre la moyenne tension et la basse tension, le transformateur subit toutes perturbations, aussi bien des réseaux situés en amonts (coups de foudre, coupure de ligne, etc.) qu'en aval. Les variations anormales de la température ambiante ou de la charge peuvent provoquer un échauffement des enroulements susceptible de compromettre la durée de vie de l'appareil. Les systèmes de protection sont:

- * les appareils de protection contre les défauts situés en amonts, généralement sur le réseau du distributeur d'énergie (parafoudres et limiteurs de surtensions)
- * Les cellules de protection par fusible ou par disjoncteur contre les courts-circuits.
- * Les DGPT2 ou relais Bucholtz, appareils de protection spécifiques aux transformateurs immergés. Ils ont pour mission non seulement de signaler toute anomalie, mais aussi de donner l'alarme et de provoquer le déclenchement dès qu'ils détectent un dégagement gazeux ou une élévation de température anormale du diélectrique.
- * Les sondes PTC placées entre le circuit magnétique et les enroulements BT des transformateurs secs enrobés. Elles détectent des seuils de température pour donner l'alarme et provoquer le déclenchement.

5-1 Protections communes à toutes les technologies (protection contre les défauts externes):

a) Surintensités:

Quel que soit le type de transformateur, le calibrage des fusibles ou le réglage des déclencheurs des protections doit tenir compte des surintensités importantes qui apparaissent lors de la mise sous tension du transformateur. Elles peuvent dépasser 10 fois son intensité nominale. Ce courant s'amortit suivant une loi exponentielle dont la constante de temps (c) dépend de la résistance de l'enroulement et de la charge au secondaire (courbe ci-dessous)



Courant d'enclenchement à vide d'un transformateur immergé.

pour le choix des protection, se référer au cour sur la distribution électrique vu précédemment .

b) Protection "masse cuve"

Cette composition est recommandée par la NFC 13-200 dès que la puissance du transformateur atteint 5 MVA, qu'elle que soit la technologie de transformateur utilisée. La mise à la masse de la cuve d'un transformateur par l'intermédiaire d'un relais indirect d'intensité signale tout défaut interne à la masse et permet la mise hors tension du transformateur.

5-2 Protections spécifiques à chaque technologie (Protections contre les défauts internes):

a) Transformateurs immergés: DGPT (Détection Gaz, Pression, Température) ou Relais Bucholtz

Ces dispositifs de protection sont prévus par la réglementation en vigueur et en particulier par les textes suivants:

Art 432 de la NFC 13-100.

Art 551.2.1 de la NFC 13-200.

Cette protection est exigée par les transformateurs immergés dans un

diélectrique liquide dont la puissance est supérieure à 630 Kva. Elle doit être assurée par un détecteur d'émission de bulles gazeuses à 1, 2 ou 3 contacts suivant le cas:

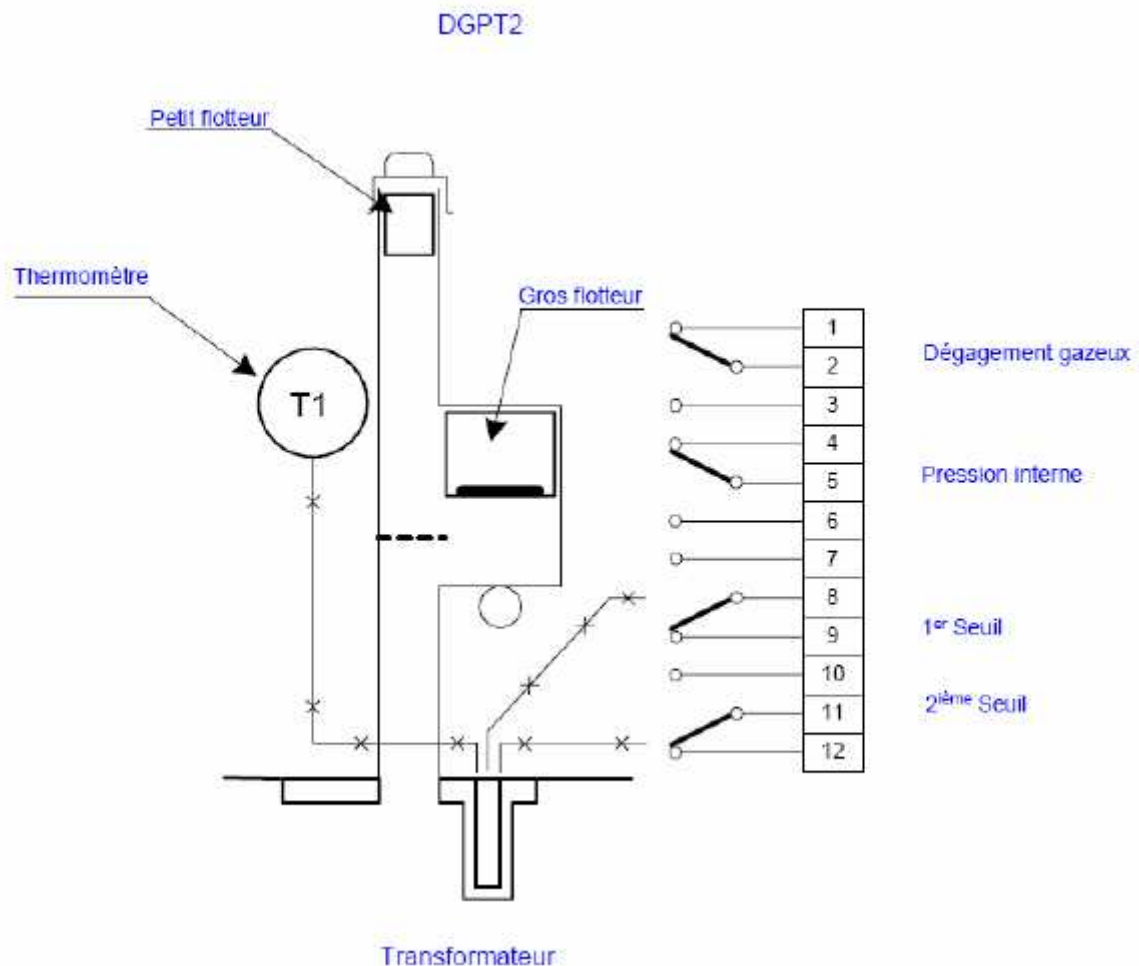
- 630KVA – 5MVA : à un contact ou type 1 à deux contacts
- 5MVA – 20MVA : type 2 à deux contacts
- sup à 20MVA : type 3 à deux contacts

Pour les dispositifs à deux contacts, le 1^{er} est utilisé en signalisation (alerte du personnel) , le 2^{ème} pour la mise hors tension des dispositifs suivant (DGPT , DMCR ou Bucholtz) ont sensiblement les mêmes fonctions.



Le DGPT (Détection Gaz Pression Température)

Les DGPT (1ou 2) est un appareil monté soit sur des transformateurs à remplissage total (ERT ou ERI) avec ou sans réservoir tampon de diélectrique, soit sur des transformateurs de type respirant avec conservateur, quelque soit le type de montage utilisé le fonctionnement est rigoureusement identique.



Le bloc relais DGPT détecte les anomalies au sein du diélectrique liquide des :
baisse ou émission de gaz, élévation de pression et de température.

Les informations fournies par ce relais sous formes de contacts seront exploitées selon le cas de 2 façons:

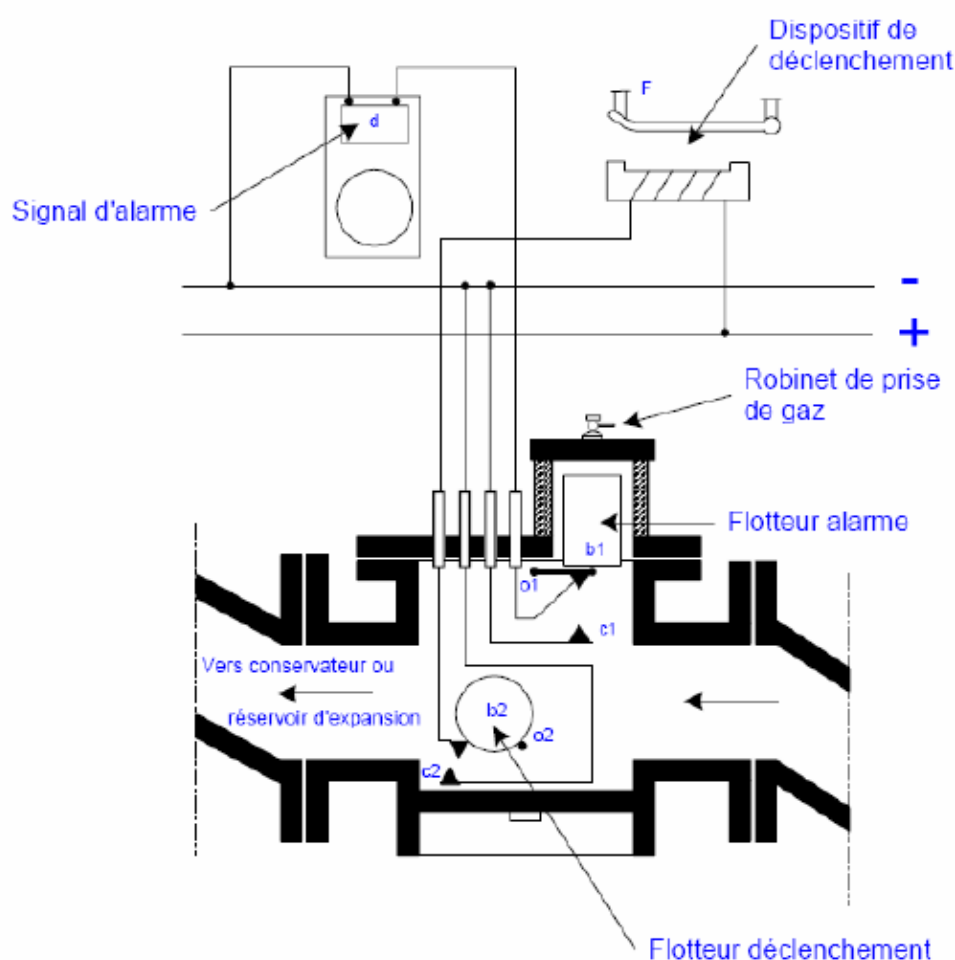
- Déclenchement : ordre d'ouverture à la cellule de protection (QM ou DM1) du transformateur, assurant la mise hors tension du transformateur.
- Alarme: lorsque la mise hors tension du transformateur n'est pas obligatoire.

Cette protection repose donc sur:

- La détection des dégagements gazeux, car un incident interne provoque toujours un dégagement gazeux plus ou moins important dû à la décomposition des isolants (liquides ou solides) sous l'action de l'arc électrique. Ce contact peut être exploité en alarme ou en déclenchement.
- La détection d'une anomalie d'étanchéité par la signalisation des baisses de niveau du diélectrique avec:
 - visualisation par flotteur1
 - Action électrique par flotteur 2 en cas d'une baisse importante de niveau.

- La détection d'une pression excessive dans la cuve du transformateur à l'aide d'un pressostat à contact électrique préréglé en usine à 0,2 bars conformément à la NFC 13-200. Ce contact sera exploité uniquement en déclenchement.
- La détection d'une température anormale au sein du diélectrique. En plus d'une visualisation de la température par thermomètre à cadran, deux thermostats (1 seul sur DGPT1) indépendants et réglables assurent, l'un l'alarme (réglage normal à 90°C) et l'autre de déclenchement (réglage normal à 100°C). Dans le cas du DGPT1, le contact en alarme, le contact du thermostat 2 est à utiliser en déclenchement.

5-3 Le relais Bucholtz :



Le corps du relais (voir figure ci-dessus) renferme deux flotteurs b1 et b2 qui peuvent pivoter respectivement autour des axes o1 et o2 et commander ainsi les contacts à mercure c1 et c2. Ces deux contacts ferment (ou ouvrent sur demande) chacun un circuit.

Le circuit du contact c1 actionne un signal d'alarme. Le circuit du contact c2 actionne le dispositif de déclenchement. Le relais "Bucholtz" protège toujours le transformateur en cas de fuite du diélectrique à condition toutefois qu'elle se manifeste au-dessous du relais.

- Cas d'avaries peu graves

Lors d'une avarie de faible importance, le dégagement de bulles de gaz provenant du transformateur est recueilli par le "Bucholtz". Le niveau d'huile s'abaisse dans le corps du relais d'où une rotation du flotteur b1 autour de son axe O1 et, pour un volume de gaz déterminé, la fermeture du contact c1. Le fonctionnement du signal d'alarme "d" se produit ainsi dans un temps diminuant avec l'importance et la vitesse du dégagement gazeux et, par conséquent, avec la gravité du défaut. Le flotteur b2 baignant toujours dans l'huile n'est pas sollicité par ce phénomène.



- Cas d'une avarie grave

Un dégagement gazeux violent, résultant de défauts graves à l'intérieur du transformateur provoque un mouvement d'huile du transformateur vers le conservateur qui fait basculer le flotteur b2, produisant ainsi la fermeture du contact c2 dont l'action sur le circuit de la bobine de déclenchement ordonne l'ouverture des disjoncteurs. Cette action des deux contacts, fonction de dégagement gazeux accompagnant un défaut, permet donc la détection rapide de toute avarie susceptible de se produire dans un transformateur ou autre appareil électrique immergé. En vue de signaler

De manière certaine la présence d'un défaut grave, on peut avantageusement relier le contact de déclenchement simultanément aux deux circuits d'alarme et de déclenchement.

- Cas d'un niveau d'huile insuffisant

Si le niveau d'huile diminue progressivement, le flotteur b1 fonctionne le premier en donnant une alarme, puis le flotteur b2 bascule à son tour, provoquant le déclenchement des disjoncteurs.

5-4 Le DMCR (Dispositif de Mesure et Contrôle de Régime):

Il assure les mêmes fonctions que les dispositifs précédents; il délivre 4 informations TOR (contacts inverseurs):

- ✓ Pression interne de la cuve du transformateur
- ✓ 1^{er} seuil de température pour alarme
- ✓ 2^{ème} seuil de température pour déclenchement
- ✓ Baisse du niveau de liquide

Le contrôle du niveau d'huile ou dégagement gazeux est effectué par un interrupteur magnétique qui comporte un contact à ouverture et un contact à fermeture. En position normale de fonctionnement, c'est-à-dire avec le flotteur en position haute, le contact à fermeture est collé (sécurité positive car position "travail" en fonctionnement sans défaut). Ce dispositif permet également d'identifier immédiatement une ampoule "reed" (interrupteur magnétique) qui serait éventuellement cassée.

Le gros flotteur annulaire comporte un aimant embarqué, et coulisse le long du doigt de gant. De ce fait, le champ magnétique assez fort dégagé par l'aimant constitue un écran aux autres champs magnétiques extérieurs et évite ainsi au relais DMCR un déclenchement intempestif

b) Transformateurs secs : (Protection thermique par CTP)

La protection du transformateur sec enrobé contre tout échauffement nuisible peut être assuré par un contrôle de température des enroulements.

Des sondes PTC sont installées dans la partie active du transformateur à raison d'une sonde alarme 1 (150°C) et d'une sonde alarme 2 (160°C) par phase, reliées à un convertisseur électronique Z. Celui-ci délivre des informations de type TOR pour chaque seuil

6-Transformateurs spéciaux:

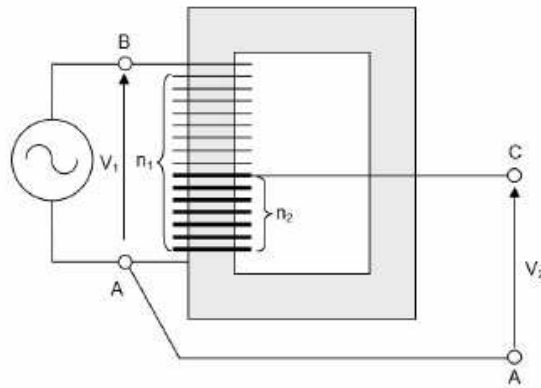
Dans les applications industrielles, on rencontre un grand nombre de transformateurs de construction spéciale. La plupart possèdent les propriétés de base que nous avons étudiées dans le chapitre précédent :

- La tension induite dans un enroulement est proportionnelle au nombre de spires ;
- Lorsque le transformateur est en charge, les ampères-tours du primaire sont égaux aux ampères-tours du secondaire ;
- Le courant absorbé à vide (courant d'excitation absorbé en permanence) est négligeable par rapport à la valeur du courant de pleine charge du primaire.

6-1 Autotransformateur:

On appelle autotransformateur, un transformateur composé d'un enroulement unique monté sur un circuit magnétique. Pour un autotransformateur abaisseur, par exemple, la haute tension est appliquée à l'enroulement complet et la

basse tension est obtenue entre une extrémité de l'enroulement et une prise intermédiaire.



Autotransformateur

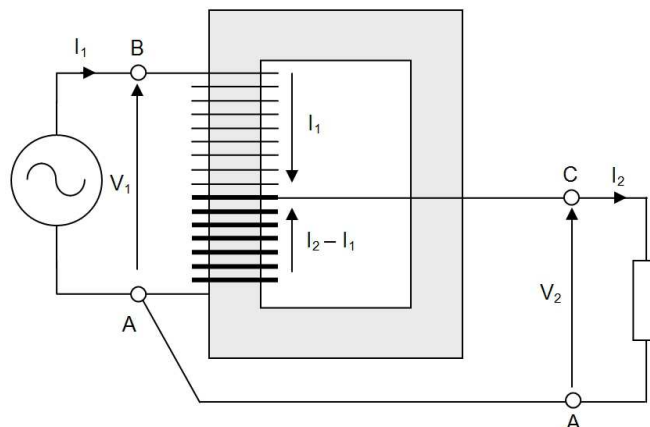
Soit un autotransformateur (Figure ci-dessus) composé d'un enroulement AB de n_1 spires monté sur un circuit magnétique. L'enroulement est raccordé à une source de tension constante V_1 . Le courant d'excitation crée un flux et, comme dans tout transformateur, ce flux demeure constant tant que V_1 est constante.

Supposons que l'on sorte une prise C entre les extrémités A et B de l'enroulement, et que n_2 spires soient comprises entre les bornes A et C. Comme la tension induite est proportionnelle au nombre de spires, la tension entre ces bornes est :

$$V_2 = \frac{n_2}{n_1} V_1$$

Cette relation est la même que celle obtenue avec un transformateur conventionnel à deux enroulements ayant n_1 et n_2 spires respectivement au primaire et au secondaire. Cependant, comme les enroulements primaire AB et secondaire charge entre les bornes A et C, le courant I_2 provoque la circulation d'un courant I_1 au primaire (voir figure ci-dessous).

6-2 Transformateur spéciaux:



Tensions et courants dans un autotransformateur

La section BC de l'enroulement est traversée par le courant I_1 . D'après la loi des noeuds appliquée en A, la section CA est traversée par une intensité ($I_2 - I_1$).

De plus, la force magnéto-motrice créée par I_1 doit être égale et opposée à celle produite par ($I_2 - I_1$). On a donc :

$$I_1(n_1 - n_2) = (I_2 - I_1)n_2$$

Soit :

$$n_1 I_1 = n_2 I_2$$

Enfin, si l'on suppose que les pertes fer et le courant magnétisant sont négligeables, la puissance apparente absorbée par la charge doit être égale à celle fournie par la source. Par conséquent, $V_1 I_1 = V_2 I_2$.

On constate que ces équations sont identiques à celles obtenues avec un transformateur conventionnel ayant un rapport de transformation n_2/n_1

Cependant, dans un autotransformateur, l'enroulement secondaire fait partie de l'enroulement primaire. Il s'ensuit qu'un autotransformateur est plus petit, moins lourd et moins coûteux qu'un transformateur conventionnel de même puissance.

Cette économie devient particulièrement importante lorsque le rapport de transformation se situe entre 0,5 et 2. Par contre, l'absence d'isolation entre la haute tension et la basse tension constitue un inconvénient parfois prohibitif.

Les autotransformateurs servent au démarrage à tension réduite des moteurs, à la régulation de la tension des lignes de distribution et, en général, à la transformation de tensions de valeurs assez rapprochées.

Un transformateur à deux enroulements peut être monté en autotransformateur : il suffit de relier le secondaire en série avec le primaire. Selon le mode de connexion, la tension secondaire peut s'ajouter à la tension primaire ou se soustraire de celle-ci. Lorsqu'on utilise des transformateurs conventionnels comme autotransformateurs, il est important d'appliquer les règles suivantes :

- Le courant dans un enroulement ne doit pas dépasser la valeur nominale
- la tension aux bornes d'un enroulement ne doit pas être supérieure à la valeur nominale ;
- si le courant nominal circule dans un enroulement, le courant nominal circule automatiquement dans l'autre (égalité des ampères-tours dans les deux enroulements) ;
- si la tension nominale apparaît aux bornes d'un enroulement, la tension nominale correspondante apparaît automatiquement aux bornes de l'autre.

6-3 Autotransformateur variable:

Lorsque l'on a besoin d'une tension variable de 0 à 220 V ou plus, on a souvent recours à un autotransformateur ayant une prise mobile (Figure ci-dessous). Le transformateur comprend un enroulement d'une seule couche de fil bobiné sur un noyau magnétique toroïdal et un balai en graphite mobile que l'on peut déplacer au moyen d'un bouton de réglage. Le balai glisse sur les spires, et à mesure que le point de contact se déplace, la tension V_2 augmente proportionnellement au nombre de spires parcourues. Si la source de tension V_1 est connectée sur une prise fixe englobant 85 % des spires, on peut faire varier la tension V_2 de 0 à de la tension V_1 . Ainsi, par exemple, si $V_1 = 220\text{V}$, V_2 pourra varier entre 0 et 250 V. On préfère l'autotransformateur au rhéostat car, pour une position donnée du curseur, la tension V_2 varie beaucoup moins avec la charge, et les pertes Joule sont bien moindres.

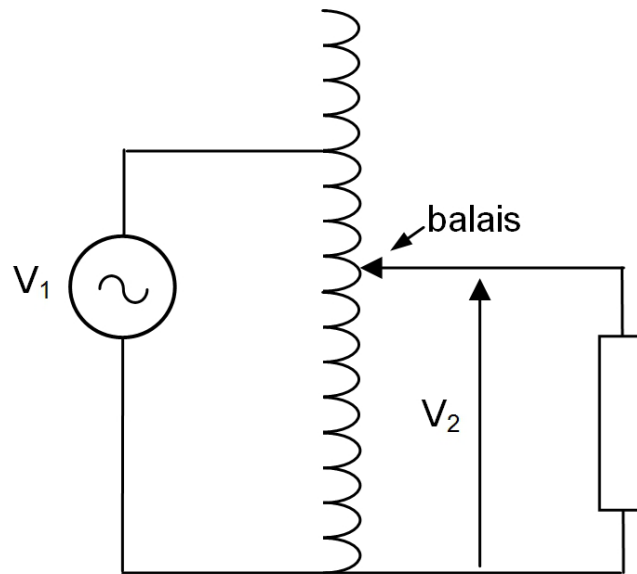


Schéma de principe d'un autotransformateur variable



Autotransformateurs variables

6-4 Les équations:

$$\bar{I}_1 = \bar{I}_{10} \text{ et } \bar{I}_2 = 0$$

6-4-1 A vide :

$$\bar{V}_1 = jn_1 \omega \bar{\phi} \text{ et } \bar{V}_{20} = jn_2 \omega \bar{\phi}, \text{ ce qui implique } \frac{\bar{V}_{20}}{\bar{V}_1} = \frac{n_2}{n_1}$$

6-4-2 En charge:

Abaisseur:
$$(n_1 - n_2)\bar{I}_1 + n_2(\bar{I}_1 - \bar{I}_2) = n_1\bar{I}_1 - n_2\bar{I}_2$$

Elévateur:
$$n_1(\bar{I}_1 - \bar{I}_2) + (n_2 - n_1)\bar{I}_2 = n_1\bar{I}_1 - n_2\bar{I}_2$$

Avec l'hypothèse de Kapp on aura
$$n_1\bar{I}_1 = n_2\bar{I}_2$$

6-5 Avantages et inconvénients

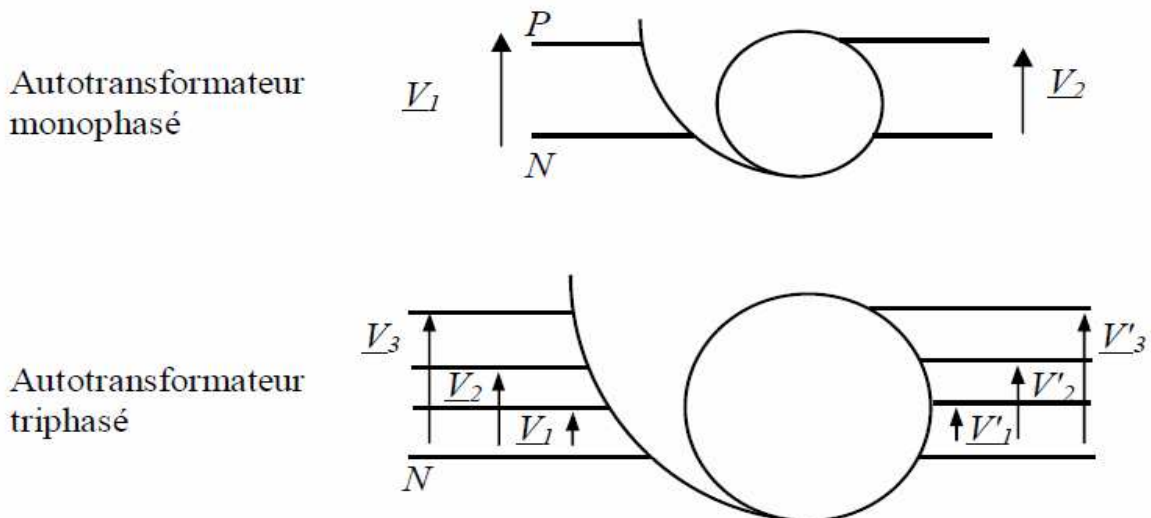
Avantage :

- Consommation d'énergie réduite, puisque le courant à vide est presque en quadrature avec la tension.
- Réduction des pertes joules, de la chute ohmique et inductive.
- Rendement optimal du transformateur.

Inconvénients :

- Pas d'isolement galvanique entre l'entrée et la sortie.
- En triphasé, il impose le couplage étoile-étoile.

6-6 Symboles:



6-7 Transformateur série TI:

Un transformateur série ou transformateur courant, tel que l'enroulement secondaire est fermé sur un galvanomètre permettant la lecture direct d'un courant secondaire I_2 d'intensité réduite, proportionnelle au courant

primaire
$$I_2 = K_A I_1 \text{ avec } K_A \ll 1$$

Les équations aux ampères-tours $n_1 \bar{I}_1 + n_2 \bar{I}_2 = n_1 \bar{I}_{10} \approx 0$, puisque $R=0$ "la réluctance" très faible et $n_2 \gg n_1$.

Il est très dangereux d'ouvrir le circuit secondaire d'un transformateur de courant, car une tension très élevée apparaît entre les deux bornes.

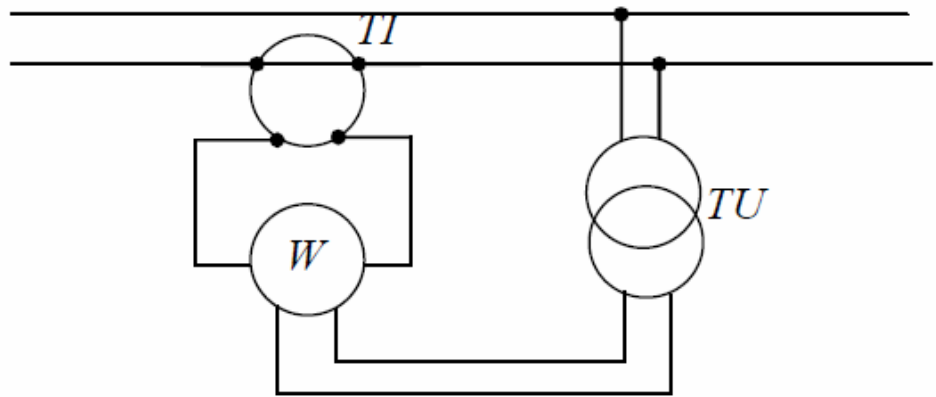
6-8 Transformateur de tension TU

Le primaire est alimenté par la tension à mesurer, le secondaire est fermé sur un voltmètre, ou sur un circuit tension d'un wattmètre avec

$$V_2 = K_V V_1 \text{ et } K_V \ll 1.$$

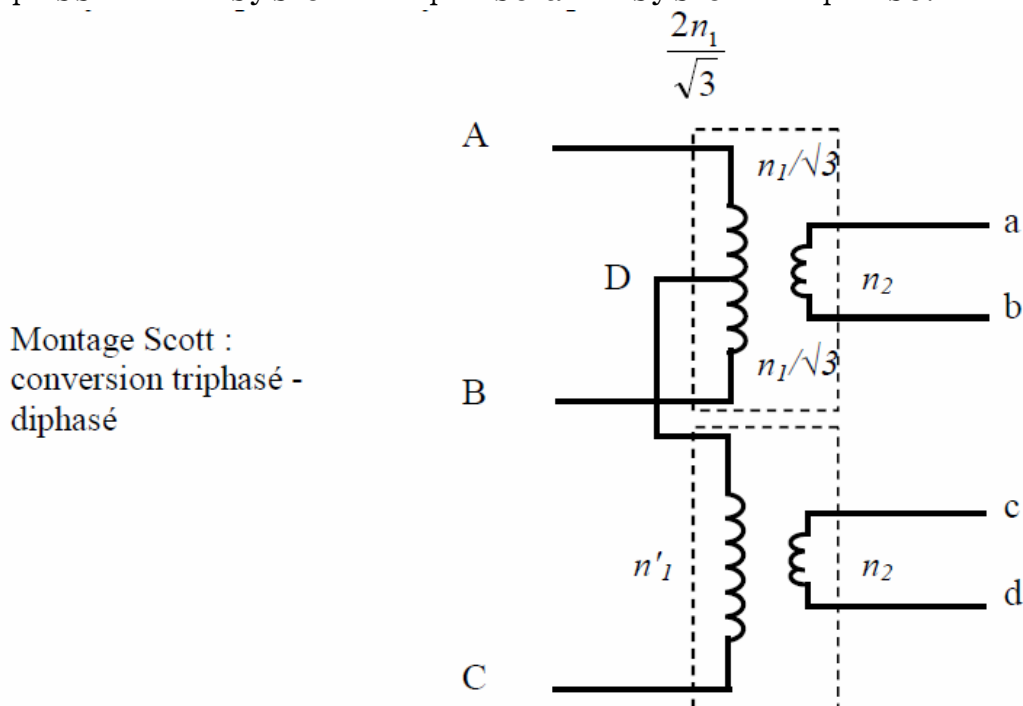
Voici un exemple d'utilisation des transformateurs courant et tension.

Exemple d'utilisation

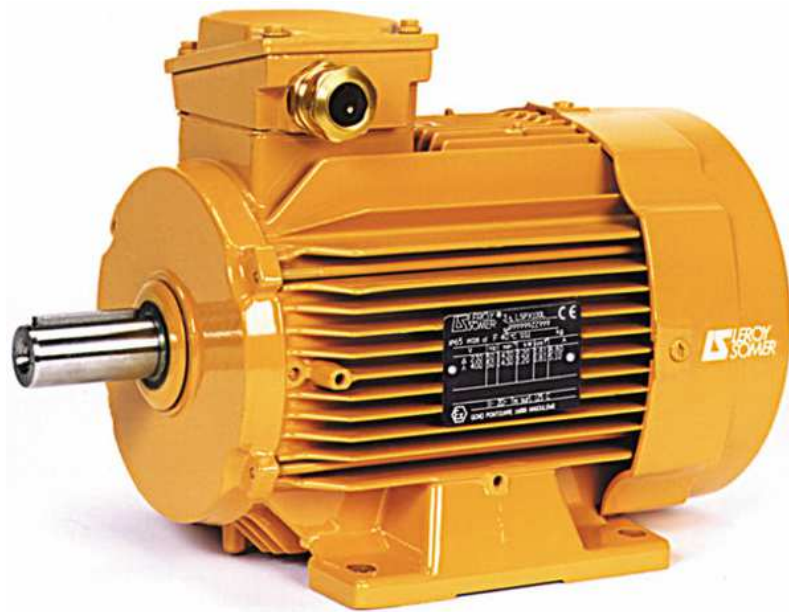


6-9 Transformateur modifiant le nombre de phases

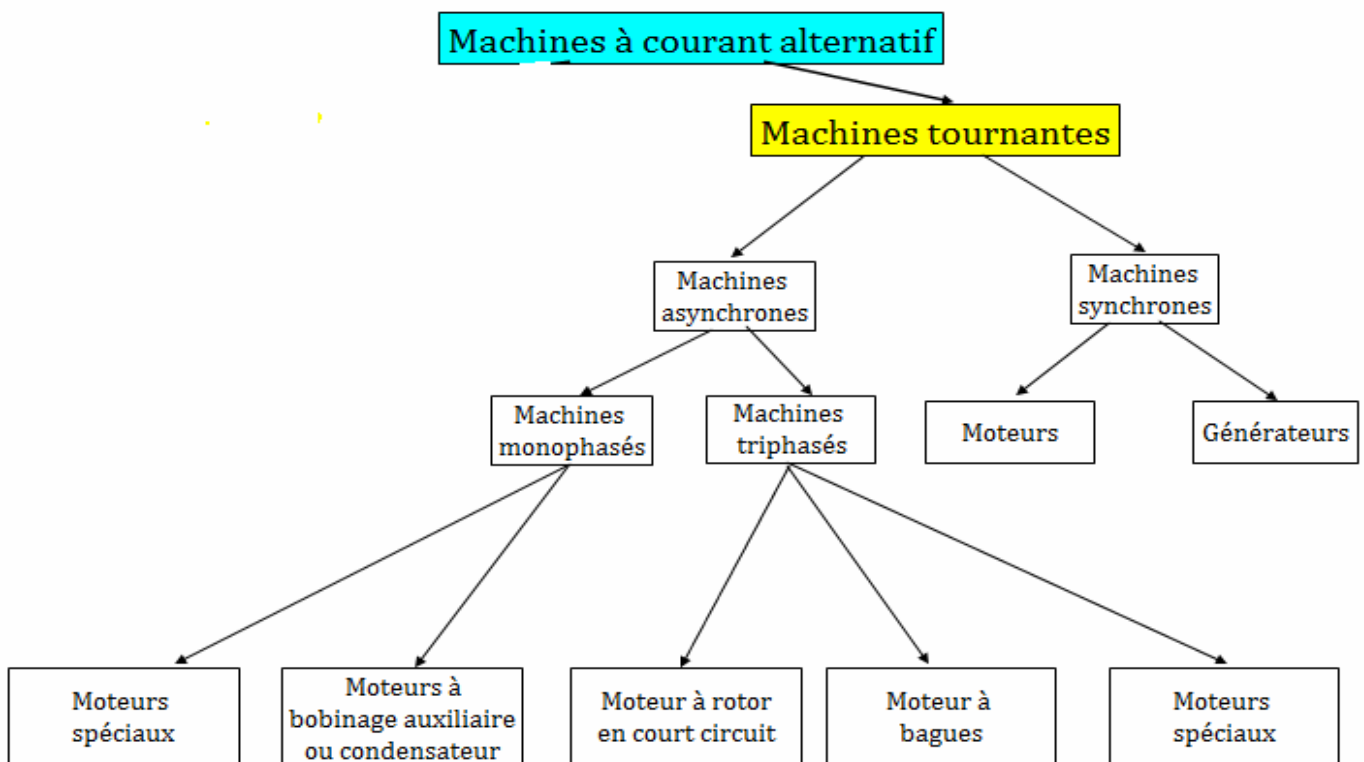
Il s'agit de passer d'un système triphasé à un système diphasé.



7-Moteurs asynchrones:



7-1 Classification des moteurs:



7-1-1 Moteurs à courant alternatif (c.a.)

Ces moteurs comprennent les types triphasés et monophasés.

Les moteurs à induction triphasés c.a. sont de loin les plus utilisés à des fins industrielles et commerciales. Ils se divisent en deux catégories :

- moteurs à cage d'écureuil
- moteurs à rotor bobiné

Les moteurs synchrones triphasés sont très couramment employés dans un large éventail d'applications industrielles ou encore lorsqu'une vitesse exacte est nécessaire.

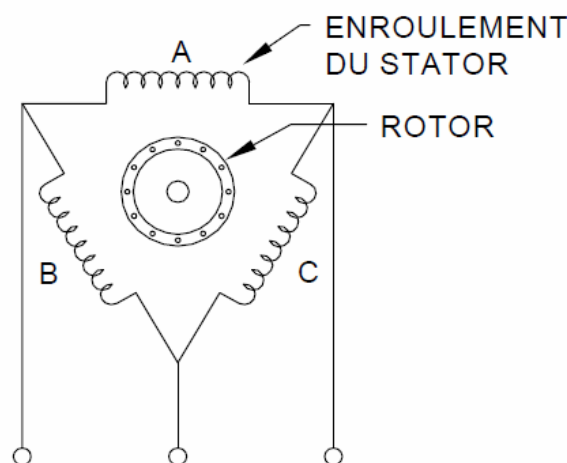
Les moteurs à induction monophasés sont utilisés lorsque le courant triphasé n'est pas disponible : on les trouve en général dans les domaines résidentiel, commercial et agricole. Ils sont courants également dans les cas où la puissance nécessaire est inférieure à 1 HP. Les principales sous-catégories de ces moteurs comprennent :

- moteurs à enroulement auxiliaire de démarrage
- moteurs à condensateur de marche
- moteurs à démarrage par condensateur
- moteurs à condensateurs de démarrage et de marche
- moteurs à bague de déphasage
- moteurs universels

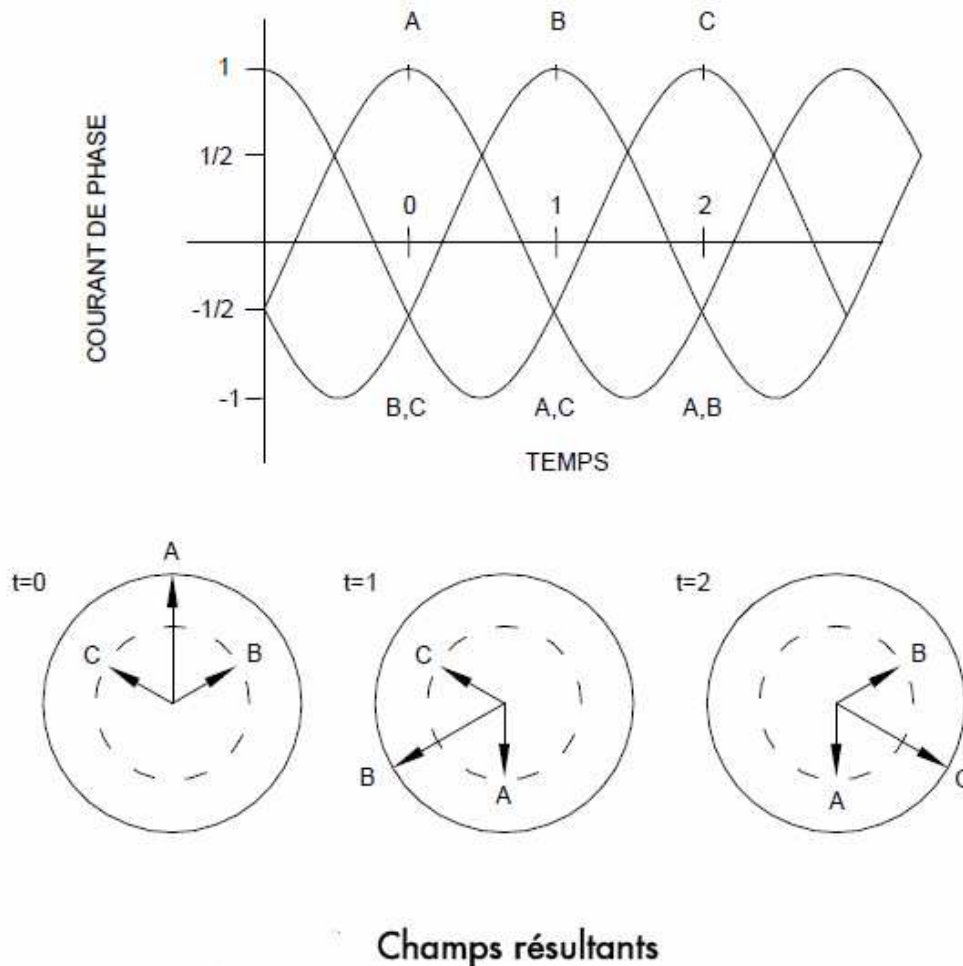
Même si les moteurs universels fonctionnent la plupart du temps en courant c.a., ils peuvent être alimentés aussi bien en c.a. qu'en c.c. On les trouve le plus souvent dans les outils ou les appareils électroménagers.

Tous les moteurs fonctionnant en c.a. ont en commun l'existence d'un champ magnétique tournant produit par les enroulements du stator.

Dans le cas des moteurs triphasés, on peut illustrer ce concept par le dessin de trois bobines réparties également autour du rotor. Chaque bobine est reliée à l'une des trois phases d'une alimentation électrique triphasée (Figure suivante).



Développement d'un champ magnétique tournant



Le courant traversant chaque bobine varie de façon sinusoïdale avec le temps et il est déphasé de 120° par rapport au courant des autres bobines. Ainsi, le courant dans la bobine B est en retard d'un tiers de période par rapport à celui de la bobine A, et le courant dans la bobine C en retard d'un tiers de période par rapport à celui de la bobine B (Figure ci dessus).

Le rotor voit le champ magnétique tournant net engendré par les trois bobines et se met à tourner en développant ainsi un couple sur l'arbre de transmission du moteur. Ce champ tourne soit dans le sens horaire, soit dans le sens antihoraire, en fonction de l'ordre des phases raccordées au moteur.

L'inversion du sens de rotation d'un moteur triphasé s'obtient tout simplement en changeant l'ordre de raccordement de deux des trois conducteurs d'alimentation

La vitesse de rotation du champ tournant dépend du nombre de pôles magnétiques dans le stator : c'est la vitesse synchrone.

$$\text{Vitesse synchrone} = \frac{120 \times \text{fréquence}}{\text{Nombre de pôles}}$$

Dans les moteurs c.a., le nombre de pôles magnétiques (ou simplement pôles) est le principal facteur conceptuel agissant sur la vitesse.

7-1-2 Moteurs à induction triphasés:

Le rotor d'un moteur à induction ne tourne pas à la vitesse synchrone, c'est-à-dire à la vitesse du champ magnétique du stator, mais il existe un léger décalage temporel entre les deux vitesses. Ce décalage, nommé "glissement", s'exprime en pourcentage de la vitesse synchrone. Le glissement du moteur est le résultat de l'interaction entre le champ magnétique du stator et le champ magnétique créé par les courants induits circulant dans le rotor. Les barres du rotor coupent les lignes de force magnétiques et produisent ainsi un couple moteur.

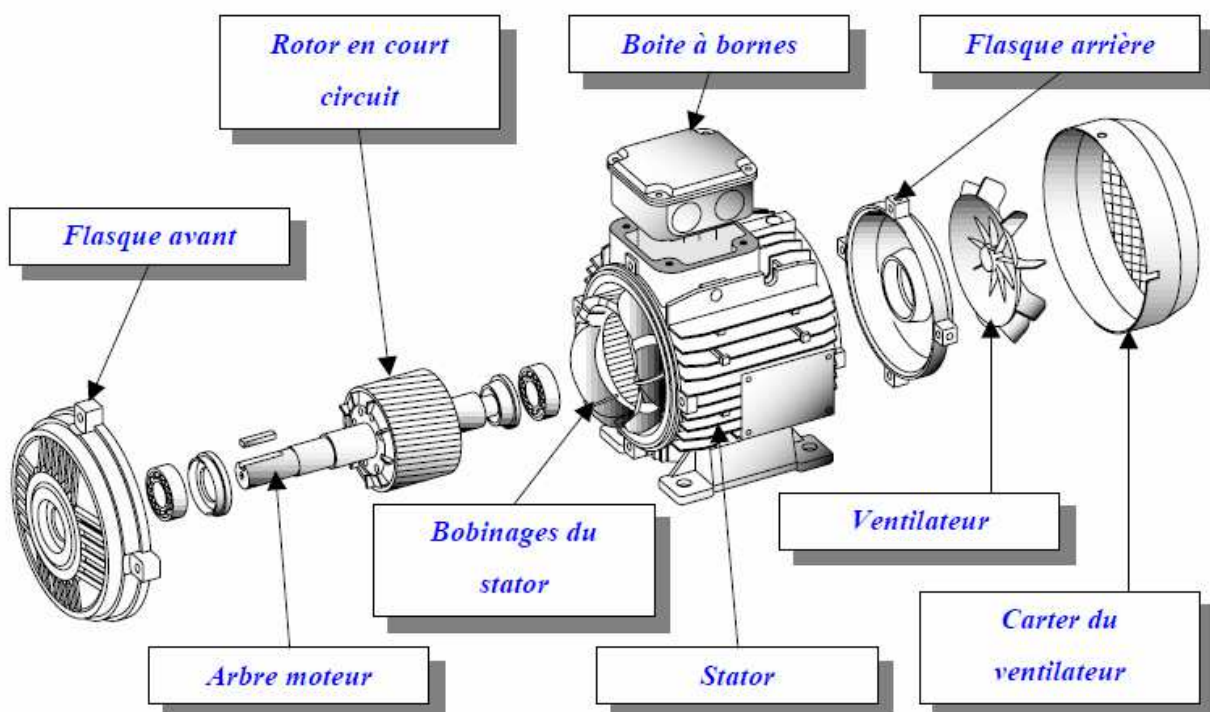
Quand le moteur ralentit (c.-à-d. lorsque le glissement augmente) sous l'action de la charge ajoutée, le couple engendré augmente.

$$\text{Glissement} = \frac{\text{Vitesse synchrone} - \text{vitesse de fonctionnement}}{\text{Vitesse synchrone}} \times 100$$

Les moteurs à induction triphasés sont très robustes et très fiables; c'est d'ailleurs le type de moteurs le plus couramment utilisé.

Malheureusement, leur facteur de puissance a tendance à diminuer dans le cas de charges réduites. Ceci est attribuable au fait que le courant fourni sert uniquement à entretenir le champ magnétique.

7-1-3 Moteurs à cage d'écureuil:



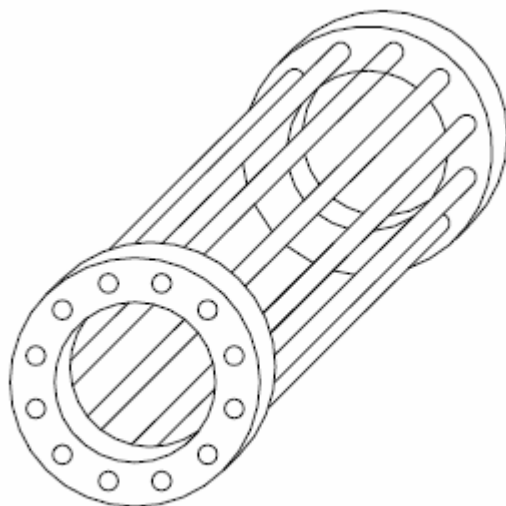
Vue éclatée d'un moteur asynchrone triphasé à rotor en court circuit (illustration Schneider Electric).

Le rotor d'un moteur à cage d'écureuil est composé de barres conductrices parallèles à l'arbre et court-circuitées par des anneaux protecteurs qui

supportent leurs extrémités (voir la Figure suivante).

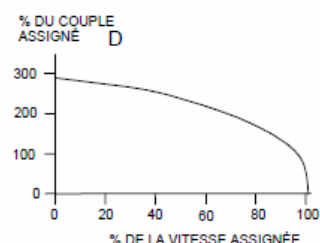
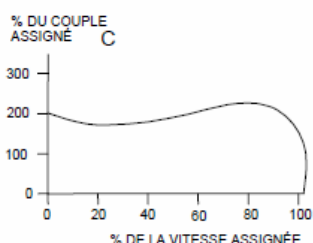
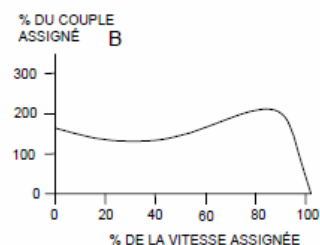
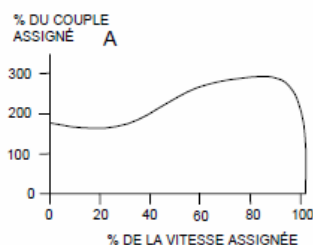
La dimension, la forme et la résistance des barres ont une influence déterminante sur les caractéristiques couple-vitesse.

Un bris dans une barre du rotor ou à un point de raccordement avec un anneau protecteur peut avoir de sérieuses conséquences, notamment des vibrations haute fréquence, ou même provoquer la défaillance du moteur.



Cage d'écurieil

Afin de faciliter le choix des moteurs, la NEMA (National Electrical Manufacturers Association) désigne par les lettres A, B, C et D les caractéristiques de construction couple-vitesse standard des moteurs à cage d'écurieil de 200 HP et moins



Graphiques couple-vitesse des moteurs de type A, B, C, D

Les moteurs de type B sont les plus courants et conviennent à la plupart des applications.

Les moteurs de type A ne sont généralement plus spécifiés à l'heure actuelle en raison de leur courant de démarrage élevé.

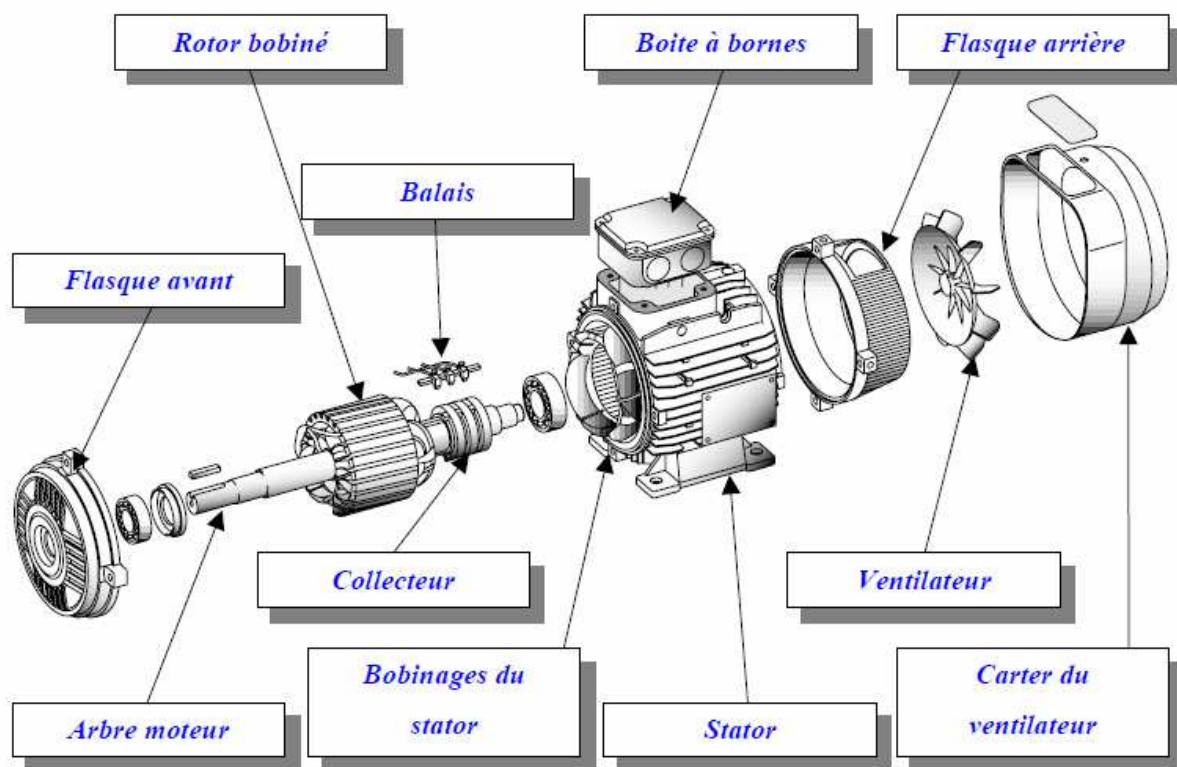
On leur préférera des moteurs de type B. On désigne également les types de moteurs comme étant à usage général, déterminé ou spécial.

On appelle "moteur à usage général" tout moteur qui est construit suivant des caractéristiques normalisées comme celles spécifiées dans la norme NEMA Standards Publication

On appelle "moteur à usage déterminé" tout moteur construit suivant des normes spécifiques et ayant des caractéristiques normalisées de fonctionnement ou une construction mécanique permettant son utilisation dans des conditions particulières, telles que celles spécifiées dans la norme NEMA Standards Publication.

On appelle "moteur à usage spécial" tout moteur autre qu'un moteur à usage général ou à usage déterminé, de caractéristiques de fonctionnement spéciales ou de construction mécanique spéciale, ou des deux, prévu pour un usage particulier. Les moteurs de plus de 500 HP sont habituellement considérés comme des moteurs à usage spécial plutôt que comme des moteurs à usage général, et sont construits pour l'application particulière.

7-1-4 Moteurs à induction à rotor bobiné:

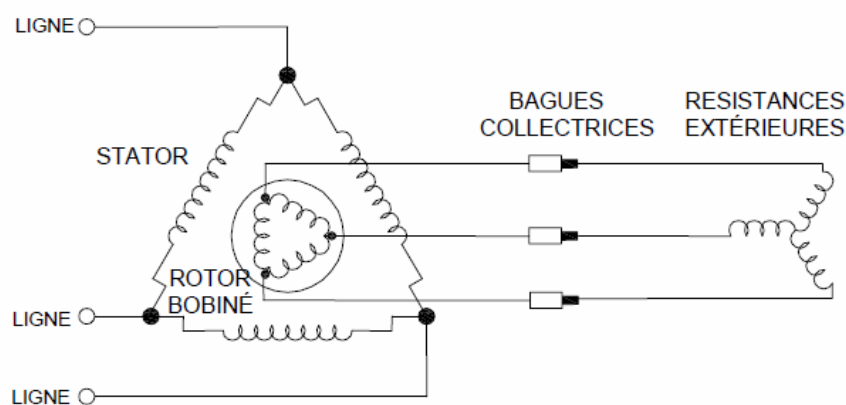


Vue éclatée d'un moteur asynchrone triphasé à rotor bobiné (illustration Schneider Electric).

Le moteur à induction à rotor bobiné fonctionne selon les mêmes principes que le moteur à cage d'écureuil, mais son rotor est de construction différente. Plutôt que d'être doté de barres en court-circuit, le rotor est constitué d'enroulements aboutissant à des bagues collectrices sur l'arbre.

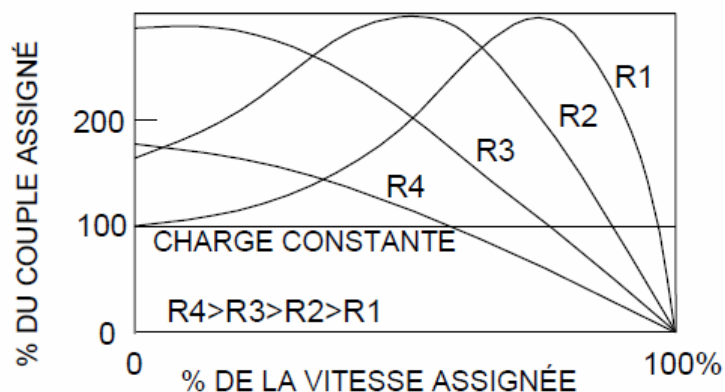
On fait appel à ce type de moteur dans des cas spécifiques nécessitant un couple de démarrage élevé. Le raccordement au rotor d'une résistance extérieure par le biais des bagues collectrices permet une variation des caractéristiques couple-vitesse du moteur (Figure ci-dessous). Après le démarrage, les bagues collectrices sont court-circuitées.

La mise en court-circuit des raccordements externes entraîne un fonctionnement similaire à celui des moteurs à cage d'écureuil.



Moteur à induction à rotor bobiné

On peut faire varier la gamme de vitesse d'environ en ajoutant une résistance externe au circuit du rotor. Cette variation se fera toutefois au détriment de l'efficacité électrique, à moins de recourir à un circuit de récupération de l'énergie de glissement.



Graphique couple-vitesse des moteurs à rotor bobiné pour diverses valeurs de résistances externes

Le couple maximal que peut développer un moteur à rotor bobiné est déterminé par la construction de son rotor, alors que la vitesse à laquelle ce couple est développé dépend de la résistance externe reliée au rotor. Chaque modèle de moteur à rotor bobiné présente une gamme de courbes couple-vitesse correspondant aux diverses valeurs de la résistance externe reliée au rotor.

a) Détermination du couplage:

A partir de les indications données par la plaque signalétique et le réseau d'alimentation l'utilisateur doit coupler adéquatement les enroulements du stator soit en triangle soit en étoile.

* LEROY-SOMER		MOT. 3 ~ LS 80 L T			
IP 55 I cl.F		N° 734570 BJ 002 kg 9			
40°C S1					
V	Hz	min ⁻¹	kW	cos φ	A
Δ 220	50	2780	0,75	0,86	3,3
○ Y 380					1,9
Δ 230	50	2800	0,75	0,83	3,3
Y 400					1,9
Δ 240	50	2825	0,75	0,80	3,3
Y 415	**				1,9

MOTEURS LEROY-SOMER

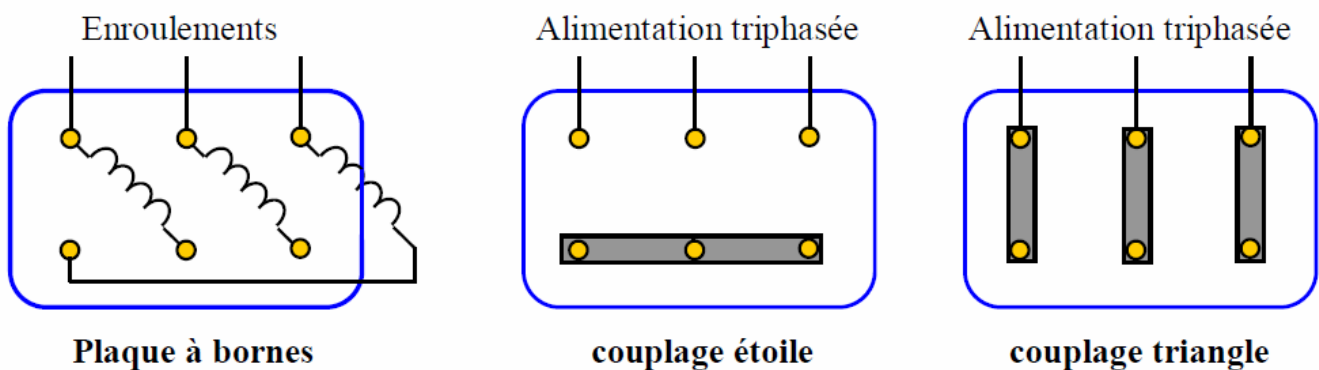
Plaque signalétique

- ✓ Si la plus petite tension de la plaque signalétique du moteur correspond à la tension entre phases du réseau on adopte le couplage Δ.
- ✓ Si la plus grande tension de la plaque signalétique du moteur correspond à la tension entre phase du réseau on adopte le couplage Y.

Réseau d'alimentation		Plaque signalétique		Couplage
230V	400V	230V	400V	Y
230V	400V	400V	690V	Δ
Tension simple	Tension composée	Tension d'un enroulement	Tension entre deux enroulements	

b) Couplages des enroulements sur plaque à bornes:

On utilise des barrettes pour assurer le couplage choisi des enroulements sur la plaque à bornes du moteur.



7-1-5 Moteurs à induction monophasés:

Lorsqu'un moteur à induction monophasé marche, il engendre un champ magnétique tournant. Mais avant que le rotor commence à tourner, le stator ne génère qu'un champ stationnaire pulsatoire.

Pour produire un champ tournant, et, par conséquent, un couple de démarrage, on place un enroulement de démarrage auxiliaire à angle droit de l'enroulement principal du stator de telle sorte que les courants qui les parcourent soient déphasés de 90° (1/4 de période). Le champ magnétique est alors décalé de 90° par rapport à l'alignement du champ initial et le rotor de 90° par rapport à l'alignement du champ initial et le rotor tend à s'aligner avec les pôles magnétiques, créant ainsi un couple de démarrage.

L'emplacement physique de l'enroulement de démarrage et sa polarité par rapport à l'enroulement principal font que le moteur tourne en permanence dans le même sens après avoir été démarré. Une fois le moteur en marche, l'enroulement auxiliaire est souvent débranché du circuit à l'aide d'un interrupteur centrifuge.

Un enroulement de démarrage défectueux va se traduire par un faible bourdonnement du moteur que l'on pourra démarrer dans un sens ou dans l'autre en lui imprimant à la main et avec précaution une légère rotation.

On utilise les moteurs à induction monophasés là où l'on ne dispose pas d'un réseau électrique triphasé et, en général, dans la gamme de puissances allant de moins d'un HP à 10 HP.

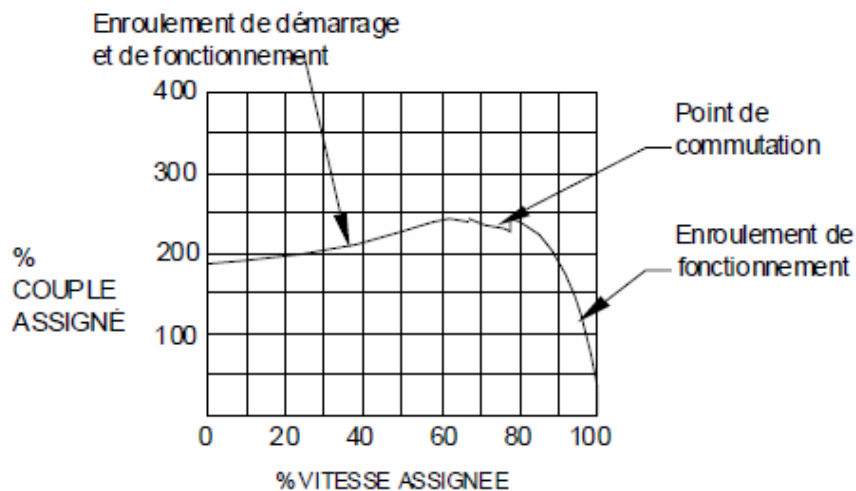
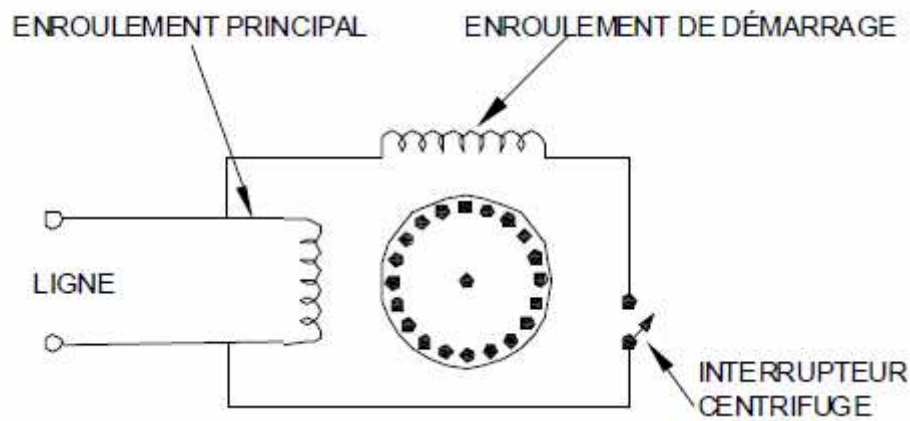
Des moteurs monophasés de plus de 10 HP existe et on les utilise avec des dispositifs électroniques de puissance pour limiter les courants de démarrage qui seraient sans cela très élevés.

Tableau : Moteurs à induction monophasés c.a.

Type de moteur	Couple de démarrage	Rendement	Domaines d'emploi
A bague de déphasage	peu élevé	peu élevé	Ventilateurs à entraînement direct
A enroulement auxiliaire de démarrage	peu élevé	moyen	Ventilateurs à entraînement direct, pompes centrifuges, compresseurs d'air et de réfrigération
	moyen	moyen	Ventilateurs à courroie, compresseurs d'air et de réfrigération, gros électroménager
À démarrage par condensateur	moyen	moyen	Ventilateurs à courroie, compresseurs, pompes centrifuges, appareils industriels, agricoles, gros électroménager, électroménagers commerciaux, équipements de bureau
	élevé	moyen	Pompes volumétriques, compresseurs d'air et de réfrigération
À condensateur de démarrage et de marche	moyen	élevé	Ventilateurs à courroie, pompes centrifuges
	élevé	élevé	Pompes volumétriques, compresseurs d'air et de réfrigération, appareils industriels, agricoles, gros électroménager, électroménagers commerciaux, équipements de bureau
À condensateur permanent	peu élevé	élevé	Ventilateurs à entraînement direct, compresseurs de réfrigération, équipements de bureau

7-1-6 Moteurs à enroulement auxiliaire de démarrage:

Les moteurs à enroulement auxiliaire de démarrage utilisent un enroulement de démarrage dont le rapport résistance/réactance diffère de celui de l'enroulement principal afin de produire le déphasage nécessaire au démarrage du moteur (Figure ci-dessous).



Moteur à enroulement auxiliaire de démarrage

Le déphasage n'atteint pas les 90° souhaités, et les champs magnétiques ne sont pas égaux. Il en résulte un couple de démarrage plus faible que dans le cas des autres moteurs.

Le couple de démarrage d'un moteur à enroulement auxiliaire de démarrage est néanmoins suffisant dans de nombreux cas tels que les ventilateurs de compteurs frigorifiques et certains outils électriques (par ex. perceuse à colonne). Ces moteurs sont bon marché à produire, ce qui explique qu'ils soient en vogue pour les produits de fabricants d'origine. Leur puissance assignée s'élève jusqu'à environ 1/2 HP.

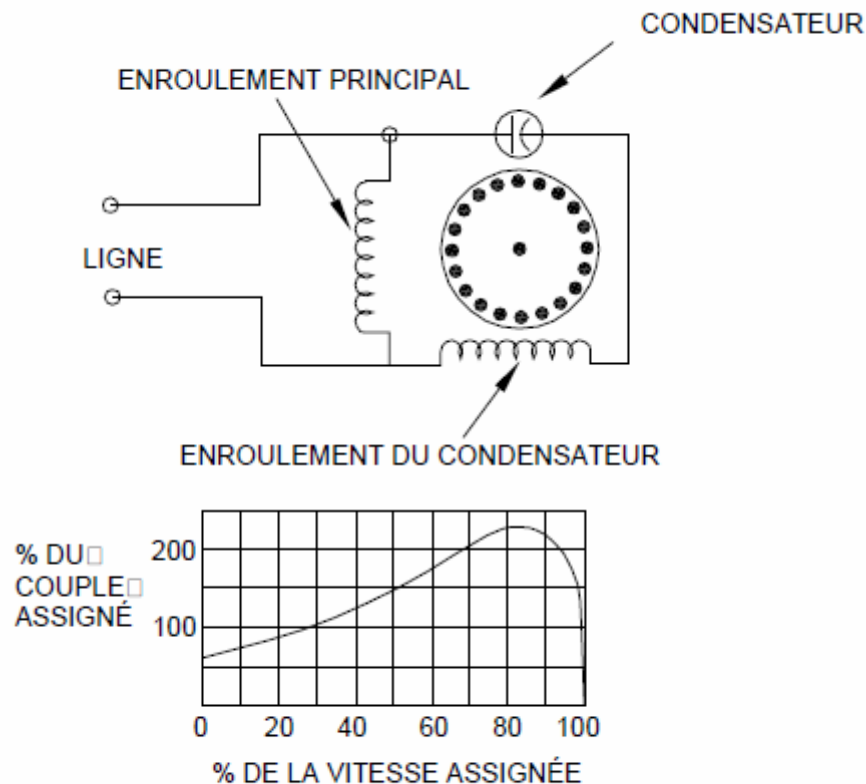
7-1-7 Moteurs à condensateurs:

De nombreux moteurs monophasés incluent un condensateur en série avec un des enroulements du stator afin d'optimiser le déphasage du champ au démarrage. Les courants capacitifs déphasent la tension en avant de 90°. En ajoutant des condensateurs, on obtient un déphasage du courant dans un enroulement par rapport à l'autre. Il en résulte un couple de démarrage plus élevé que ne peut en produire un moteur à enroulement auxiliaire de démarrage.

On utilise les moteurs à condensateur pour des applications nécessitant un couple de démarrage élevé, par exemple dans le cas des compresseurs ou des climatiseurs. Leur puissance assignée s'élève jusqu'à environ 10 HP.

Moteurs à condensateur de marche:

Les moteurs à condensateur de marche possèdent un condensateur raccordé en permanence en série à l'un des enroulements du stator afin d'assurer un équilibre acceptable entre un bon couple de démarrage et de bonnes caractéristiques de fonctionnement (Figure ci-dessous). Ces moteurs sont moins coûteux que les autres moteurs à condensateur qui comportent des systèmes à commutation de condensateurs.

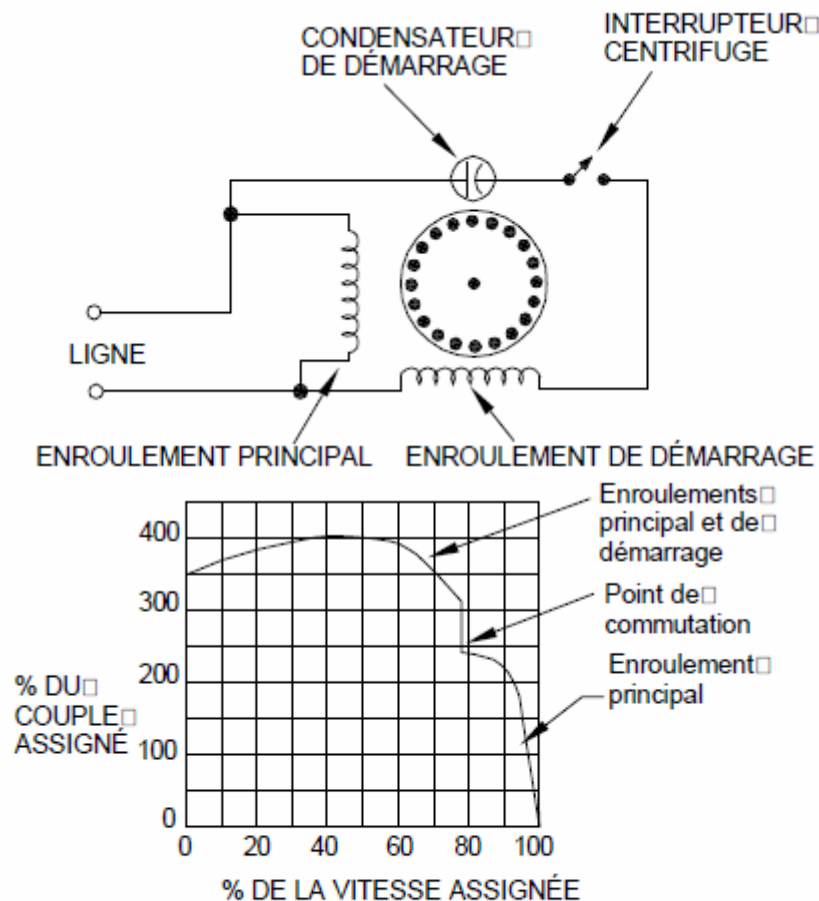


Moteurs à condensateur de marche

Ils présentent un couple de démarrage et des caractéristiques de fonctionnement meilleurs que les moteurs à enroulement auxiliaire de démarrage; on les appelle parfois moteurs à condensateur permanent (PSC). Les moteurs de ventilateurs des nouvelles chaudières sont quelques fois équipés de moteurs à condensateur de marche.

7-1-8 Moteurs à condensateur de démarrage:

Dans les moteurs à condensateur de démarrage, un condensateur est raccordé en série avec l'enroulement de démarrage et il est dimensionné de façon à optimiser le couple de démarrage (Figure ci-dessous).



Moteur à condensateur de démarrage

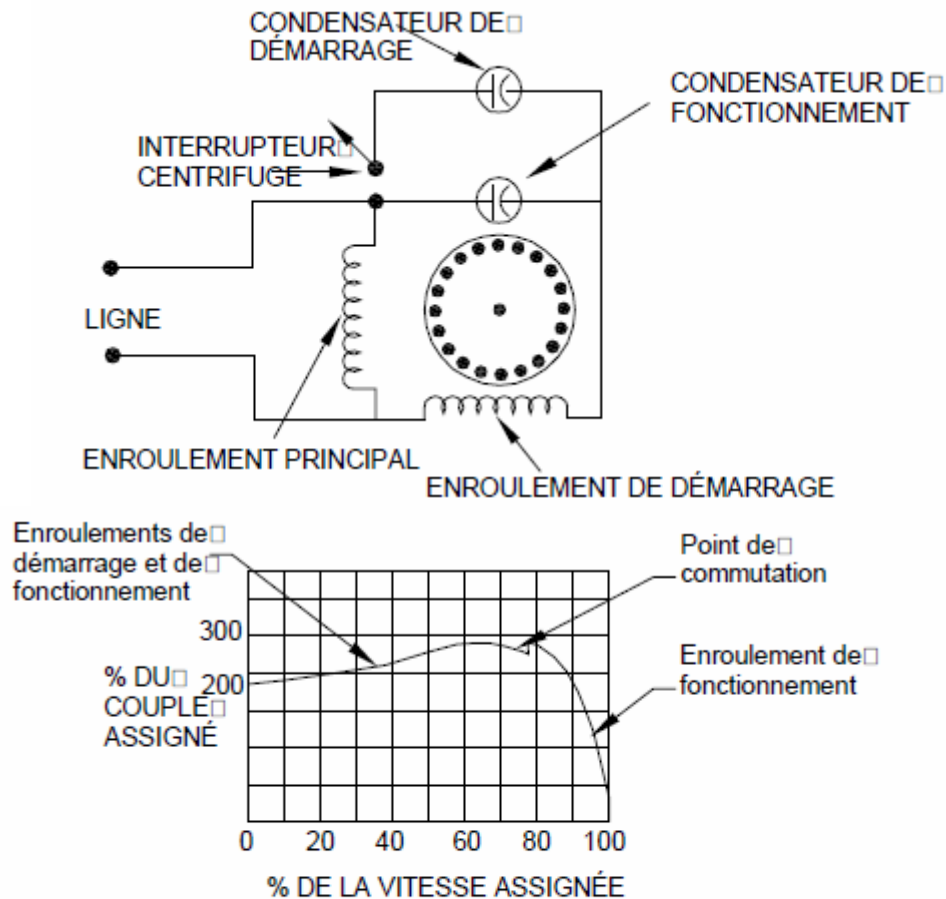
L'enroulement de démarrage est mis hors circuit par un interrupteur centrifuge ou un relais électronique lorsque le moteur a atteint sa vitesse de fonctionnement. Le couple de démarrage est plus élevé que dans les moteurs à condensateur de marche avec des caractéristiques de fonctionnement comparables à celles d'un moteur à enroulement auxiliaire de démarrage.

7-1-9 Moteurs à condensateurs de démarrage et de marche:

Ce type de moteur utilise un condensateur raccordé en série avec l'enroulement principal du stator, optimisé pour les caractéristiques de fonctionnement (Figure ci-dessous). Un second condensateur monté en série avec l'enroulement de démarrage optimise le couple de démarrage. Le condensateur de démarrage est mis hors circuit lorsque le moteur a atteint sa vitesse de fonctionnement.

Le condensateur peut parfois faire défaut et le moteur ne pourra démarrer. Une méthode simple consiste alors à retirer le condensateur et à le vérifier avec un ohmmètre (réf. 2). On emploiera, si c'est possible, l'échelle en ohms la plus élevée. Au contact des bornes du condensateur, la valeur en ohms devrait descendre rapidement, puis diminuer et remonter à nouveau :

cela signifie que le condensateur est en bon état. Mais si l'aiguille de l'ohmmètre indique immédiatement une valeur faible proche de zéro, le condensateur est en court-circuit; si la lecture se maintient à une valeur très élevée, le condensateur est à circuit ouvert. En le remplaçant par un nouveau condensateur de mêmes caractéristiques, cela devrait régler le problème. Aussi bien le couple de démarrage que les caractéristiques de fonctionnement sont optimisées.

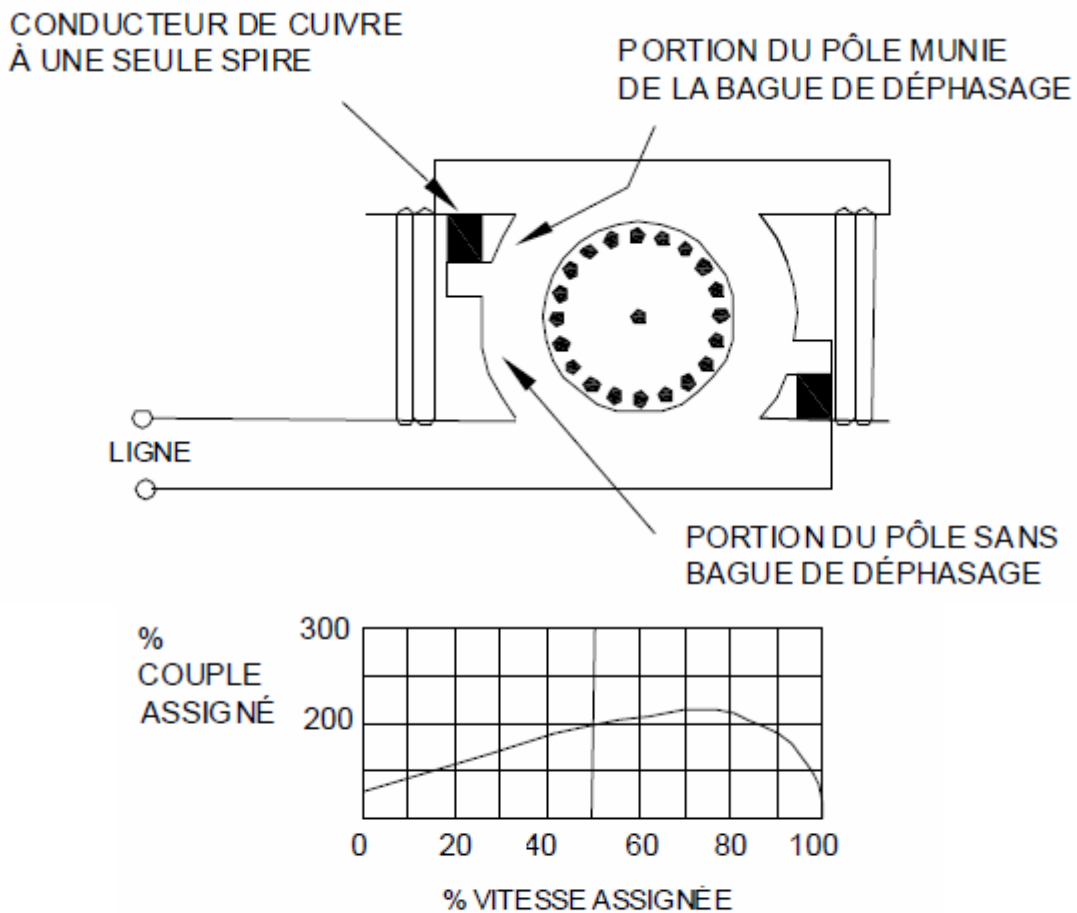


Moteur à condensateurs de démarrage et de marche

7-1-10 Moteurs à bague de déphasage:

Il s'agit du type de moteur monophasé le plus simple et son coût est très peu élevé (Figure ci-dessous).

Il développe un champ tournant en différant l'accumulation de flux magnétique dans une portion de chaque pôle saillant



Moteur à bague de déphasage

La bague de déphasage est un conducteur en cuivre qui entoure une portion du pôle d'une seule spire et l'isole du reste du pôle.

Le flux magnétique dans la portion sans bague de déphasage augmente avec l'intensité du courant circulant dans son enroulement. L'accroissement du champ magnétique dans la portion munie de la bague de déphasage est par contre retardé par le courant induit dans la bague de cuivre. Le champ magnétique balaie la face du pôle, de la portion non munie de la bague de déphasage à la portion qui en est munie, développant ainsi un couple dans la cage d'écureuil.

Afin d'optimiser le couple, le rotor possède une résistance relativement élevée. On a recours aux moteurs à bague de déphasage dans les cas où un couple peu élevé est suffisant : c'est le cas notamment des ventilateurs. Leur puissance est en général inférieure à $\frac{1}{4}$ HP.

Du fait de leur faible rendement, les moteurs à bague de déphasage devraient être utilisés uniquement dans les cas où le moteur est, ou bien très petit, ou bien tourne pendant de très courtes périodes de temps (par ex. le moteur d'un ventilateur de douche.

8-Les machines synchrones:

8-1 présentation:

La machine synchrone s'appelle alternateur (centrale électrique, groupe électrogène, voiture...). Elle transforme l'énergie mécanique en énergie électrique, sous forme de tensions alternatives. En sens inverse la machine porte le nom de moteur synchrone.

8-2 Constitution:

8-2-1 Principe:

Tout circuit électrique soumis à une variation de flux est le siège de f.é.m. induite, qui selon la loi de Lenz, s'écrit:

$$e = - \frac{d\phi}{dt}$$

e: f.é.m. en V

$d\phi$: variation de flux en Wb

dt: variation du temps en s

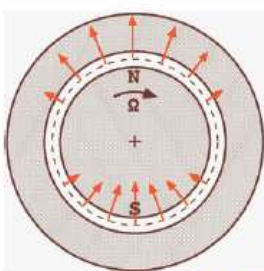
8-2-2 Rotor ou inducteur:

Il est constitué d'électroaimants alimentés en courant continu (ou d'aimants permanents) créant $2p$ pôles inducteurs, successivement Nord et Sud.

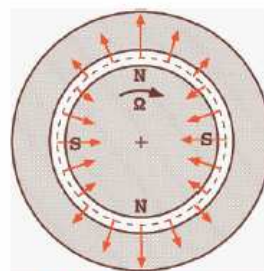
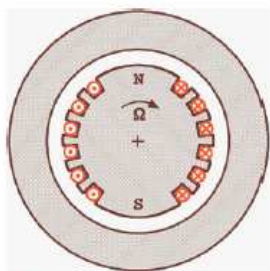
L'inducteur, mobile autour d'un axe, tourne à la fréquence de rotation n_s et crée un champ magnétique tournant à la vitesse de synchronisme.

Dans les alternateurs, il existe deux types de rotor:

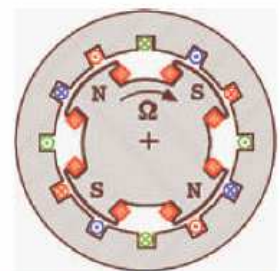
- les rotors à pôles lisses (centrales thermiques, nucléaires, TGV)
- les rotors à pôles saillants (ou roues polaires): centrales hydrauliques moins puissantes et moins vite que précédemment (groupes électrogènes).



bipolaire ($p = 1$) à pôles lisses



tétrapolaire ou quadripolaire ($p = 2$) à pôles saillants



8-2-3 Stator ou induit:

Les conducteurs de l'induit, placés dans des encoches autour de la carcasse de la machine, sont groupés en bobine.

Les enroulements du stator sont le siège de courants alternatifs monophasés ou triphasés. Il possède donc le même nombre de paires p de pôles.

Dans une machine synchrone triphasée bipolaire ($p=1$), le stator comporte 3

$$\frac{360}{3} = 120^\circ$$

bobines identiques régulièrement décalées de 120° .

Dans une machine synchrone triphasée multipolaire ($p > 1$), il y a p jeux de 3

$$\frac{360}{3p} = \frac{120}{p}$$

bobines identiques, décalées de $\frac{120}{p}$

8-2-4 Champ tournant:

Les courants alternatifs dans le stator créent un champ magnétique tournant à la pulsation:

$$\Omega_s = \frac{\omega}{p} \text{ ou } n_s = \frac{f}{p}$$

Ω_s : vitesse de rotation du champ tournant en rad.s^{-1}

ω : pulsation des courants alternatifs en rad.s^{-1} $\omega = 2.p.f$

n_s : vitesse de rotation du champ tournant en tr.s^{-1}

f : fréquence des courants alternatifs en Hz

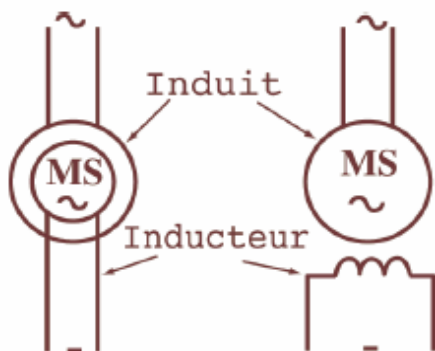
p : nombre de paires de pôles.

8-2-5 Synchronisme:

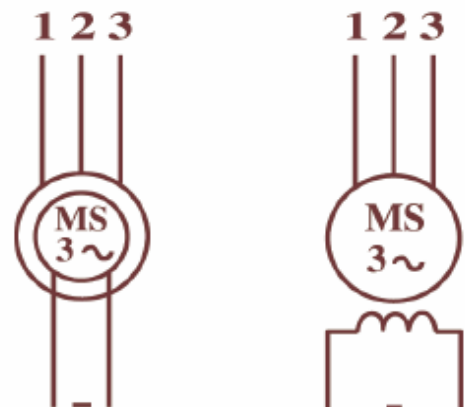
Le champ tournant du stator accroche le champ inducteur solidaire du rotor.

Le rotor ne peut donc tourner qu'à la vitesse de synchronisme.

8-2-6 Symbole:



Machine synchrone
monophasée



Machine synchrone
triphassée

8-3 F.E.M. induite:

Un enroulement de l'induit (stator) soumis au champ magnétique tournant de l'entrefer est le siège d'une f.é.m. $e(t)$ de valeur efficace E .

$$E = KN\phi f = KN\phi p n_s = K_1 \phi . n_s$$

E: f.é.m. induite (V)

K: coefficient de Kapp (caractéristique de la machine)

N: nombre de conducteurs d'une phase de la machine (1 spire = 2 conducteurs)

ϕ : flux maximum à travers un enroulement (Wb)

f: fréquence du courant statorique

p: nombre de paires de pôles

n_s : vitesse de rotation (tr.s⁻¹)

$K_1 = KNp$: constante globale (caractéristique du moteur)

A flux constant: $E = K_2 \cdot n_s$ avec $K_2 = K_1 \cdot \phi$

Les enroulements sont disposés dans le stator de telle façon que la f.é.m. e(t) soit le plus possible de forme sinusoïdale.

En triphasé, le stator comporte trois enroulements ou phases. On obtient trois

f.é.m. e₁(t), e₂(t) et e₃(t) de même valeur efficace E et déphasées de $\frac{2\pi}{3}$

Le coefficient de Kapp d'un alternateur triphasé est supérieur à celui d'un alternateur monophasé.

La presque totalité des alternateurs sont triphasés, car ceci permet d'obtenir davantage de puissance.

8-4 Fonctionnement de l'alternateur:

8-4-1 Excitation de l'alternateur:

Lorsque l'inducteur n'est pas constitué d'aimants permanents, on doit l'alimenter en courant continu.

1^{er} solution: alternateur à bagues et balais

Une source continue extérieure à la machine fournit l'énergie au rotor (par l'intermédiaire de balais frottant sur des bagues isolées).

2^{ème} solution: alternateur auto-excité

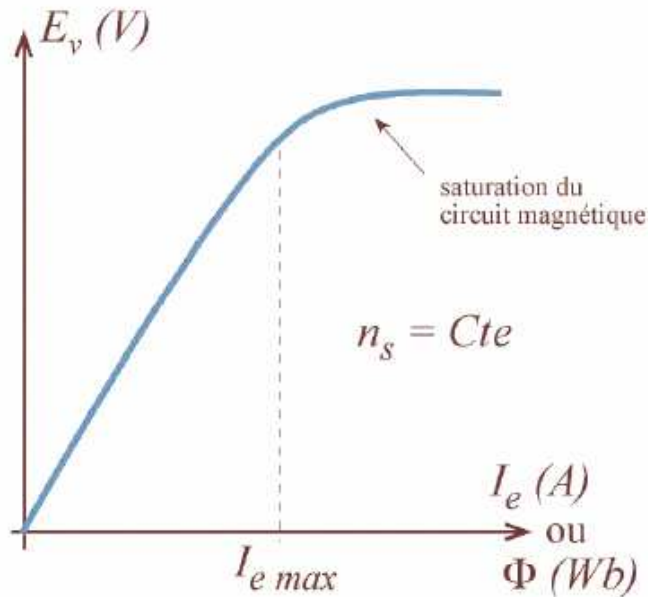
Un petit alternateur à induit tournant, solidaire du rotor, fournit des courants alternatifs qui, après redressement par un pont de diodes, alimente le rotor de l'alternateur principal.

Dans les 2 cas, il faut prévoir un rhéostat pour le réglage de l'intensité du courant d'excitation.

8-4-2 Etude à vide:

A vide $I = 0$, le rotor est entraînée à la fréquence de rotation n constante. On relève, en fonction du courant d'excitation i, les variations de la tension aux bornes d'un enroulement; à vide $V_0 = E$.

Courbe identique à la courbe d'aimantation du circuit magnétique:



- la zone utile de fonctionnement se situe au voisinage du coude de saturation A;

- un phénomène d'hystérésis dédouble la caractéristique.

Pour une valeur donnée du courant d'excitation i_e , si la fréquence de rotation n_s varie, la valeur efficace $E = \dots$.

Parfois le neutre de l'induit n'est pas sorti; on mesure alors la tension entre deux phases U_0 et on en déduit la valeur E

$$E = \frac{U_0}{\sqrt{3}}$$

- avec un couplage étoile

- avec un couplage triangle, chaque résistance du stator est soumise à une

tension composée $E = U_0$

8-4-3 Etude en charge:

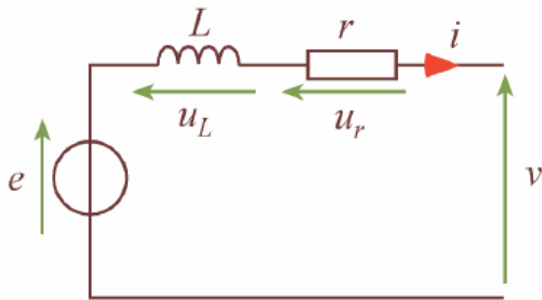
a) Réaction magnétique induit:

Le stator dont les enroulements sont maintenant traversés par des courants triphasés, crée un champ magnétique tournant à la fréquence de synchronisme n_s .

Si le circuit magnétique n'est pas saturé, ce champ s'ajoute vectoriellement, à chaque instant, à celui du rotor qui tourne à la même vitesse. Il en résulte une modification de la valeur du champ total et donc de celle du flux.

8-4-4 Modèle équivalent d'une phase de l'alternateur:

a) Schéma dans le cas de l'alternateur:



e : f.é.m. à vide (V)

v : tension aux bornes d'un enroulement de la machine (V)

r : résistance de l'enroulement (G)

 $X = L \cdot \omega$: réactance synchrone (G)

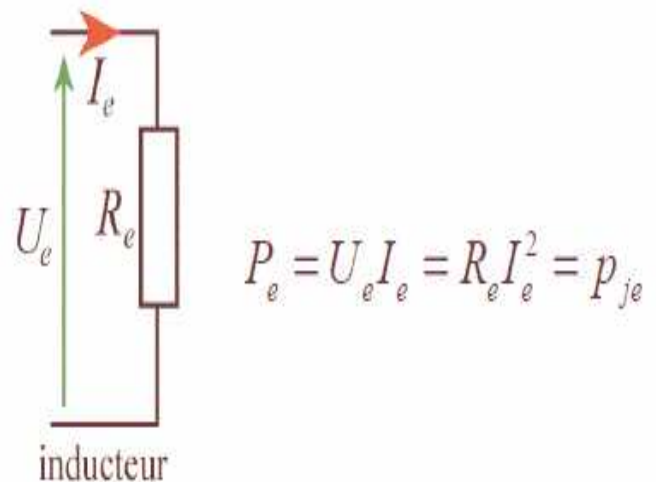
Le courant est orienté en « convention générateur ».

Remarque:

l'inducteur est équivalent à une résistance

Toute l'énergie absorbée à l'inducteur est perdue par effet joule :

L'inductance L du schéma tient compte de l'inductance réelle de l'enroulement et de la réaction magnétique d'induit.



b) Loi des mailles:

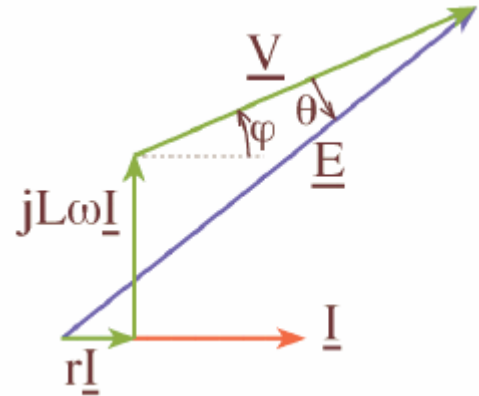
Loi des mailles avec les grandeurs instantanées : $e = v + u_L + u_r$ Loi des mailles avec les grandeurs vectorielles : $\vec{E} = \vec{V} + \vec{U}_L + \vec{U}_r$ avec: $\vec{V} (V, \varphi)$; $\vec{U}_L \left(L\omega I, +\frac{\pi}{2} \right)$; $\vec{U}_r (rI, 0)$ Loi des mailles avec les grandeurs complexes : $\underline{E} = \underline{V} + jL\omega \underline{I} + r \underline{I}$

c) Diagrammes de Fresnel:

Remarques :

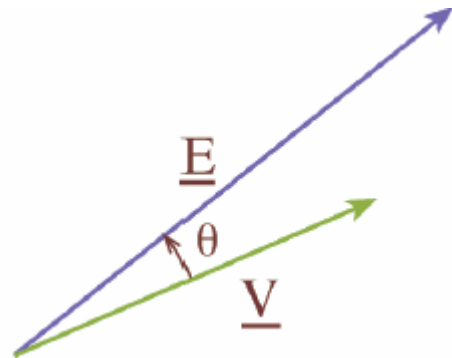
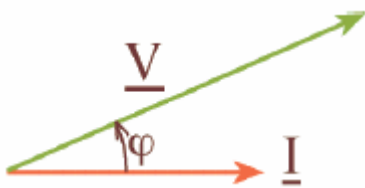
- très souvent $r.I$ est négligé ;
- en traçant le diagramme à l'échelle, il est possible d'en déduire certaines grandeurs;
- si la charge est résistive $\phi = 0$.

le diagramme ci-dessus est en fait le plus simple pour une machine à pôles lisses et non saturée.



Il peut être utile de connaître deux angles :

- le déphasage ϕ entre le courant et la tension. ϕ et I varient en fonction de la consommation ;
- le décalage interne θ entre V et E .

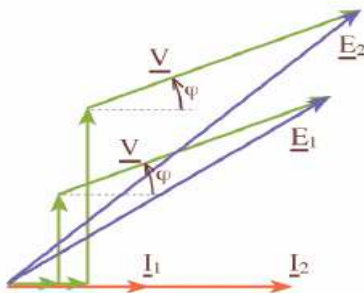


d) Diagramme d'un alternateur couplé au réseau:

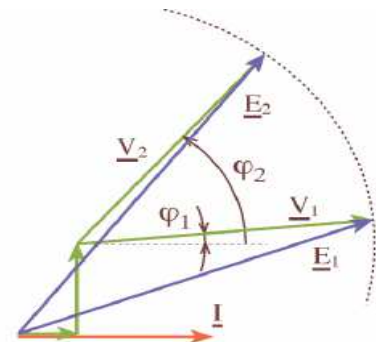
Pour un alternateur couplé au réseau, V est imposé à 220 V et f à 50 Hz.

Les grandeurs variables du réseau sont le courant I et le déphasage ϕ qui vont dépendre de la consommation.

Observons l'allure du diagramme de Fresnel pour la variation de ces deux grandeurs :



Diagrammes superposés pour deux valeurs du courant



Diagrammes superposés pour deux valeurs du déphasage

On constate que pour ces deux situations la f.é.m. E doit varier.

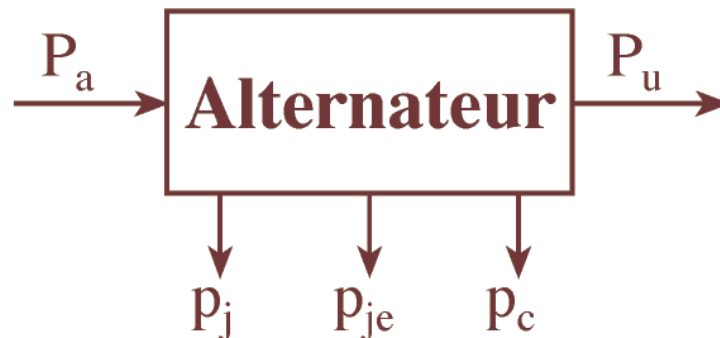
E est donnée par la relation : $E = K\Phi n_s$

On constate que le flux Φ est le seul terme pouvant être modifié par l'intermédiaire du courant d'excitation I_e .

Conséquence :

- en utilisation normale, un groupe électrogène doit fournir une tension dont la valeur efficace est la plus constante possible. La charge pouvant varier dans des proportions importantes, un dispositif électronique de régulation (asservissement), agissant sur l'intensité du courant d'excitation, est donc nécessaire.
- Si I_e devient trop grand, la machine risque de saturer, il n'est alors plus possible de contrôler E avec I_e . L'asservissement devient impossible. Il faut éviter la saturation.

8-4-5 Bilan des puissances d'un alternateur:



a) Puissance mécanique:

La turbine, ou le moteur à essence pour un groupe électrogène, entraîne l'arbre de l'alternateur avec un couple T_M . La puissance absorbée est mécanique.

$$P_{méca} = \Omega_S \cdot T_M = 2\pi n_S T_M$$

Ω_S : pulsation de rotation en rad.s^{-1}

n_S : vitesse en trs.s^{-1}

T_M : couple utile sur l'arbre en N.m

b) Puissance absorbée par le rotor

$P_e = U_e I_e$ Si l'alternateur est à excitation indépendante, il faut encore tenir compte de l'énergie électrique absorbée par l'excitation (rotor).

$P_{méca} = \Omega_S \cdot T_M$ Si l'alternateur est auto-excité, la puissance reçue par l'inducteur (excitation) est fournie par le système d'entraînement et se trouve donc incluse dans le terme

c) Puissance absorbée totale:

$$P_a = \Omega_s \cdot T_M + U_e I_e$$

Alternateur à excitation indépendante :

$$P_a = \Omega_s \cdot T_M$$

Alternateur auto-excité :

$$P_a = \Omega_s \cdot T_M$$

Alternateur à excitation à aimants permanents :

d) Puissance utile:

La charge reliée à l'alternateur absorbe un courant de valeur efficace I et présente un facteur de puissance $\cos \varphi$

Monophasée
$$P_U = VI \cos \varphi$$

Triphasée
$$P_U = \sqrt{3} UI \cos \varphi$$

e) Pertes:

Pertes par effet joule dans l'inducteur :
$$p_{je} = U_e I_e = R_e I_e^2$$

Pertes par effet joule dans l'induit :

$$p_{ji} = r I^2 \text{ (monophasée)} \quad p_{ji} = \frac{3}{2} R I^2 \text{ (triphasee)}$$

Où R est la résistance vue entre deux bornes de l'alternateur.

Pertes par effet joule:

$$p_j = r I^2 + R_e I_e^2 \text{ (monophasée)}$$

$$p_j = \frac{3}{2} R I^2 + R_e I_e^2 \text{ (triphasee)}$$

Pertes dites « collectives » p_c : pertes mécaniques et pertes fer qui ne dépendent pas de la charge.

Remarque :

- o comme les pertes mécaniques et les pertes fer dépendent de la fréquence et de la tension U, elles sont généralement constantes (50 Hz - 220V).

f) Rendement:

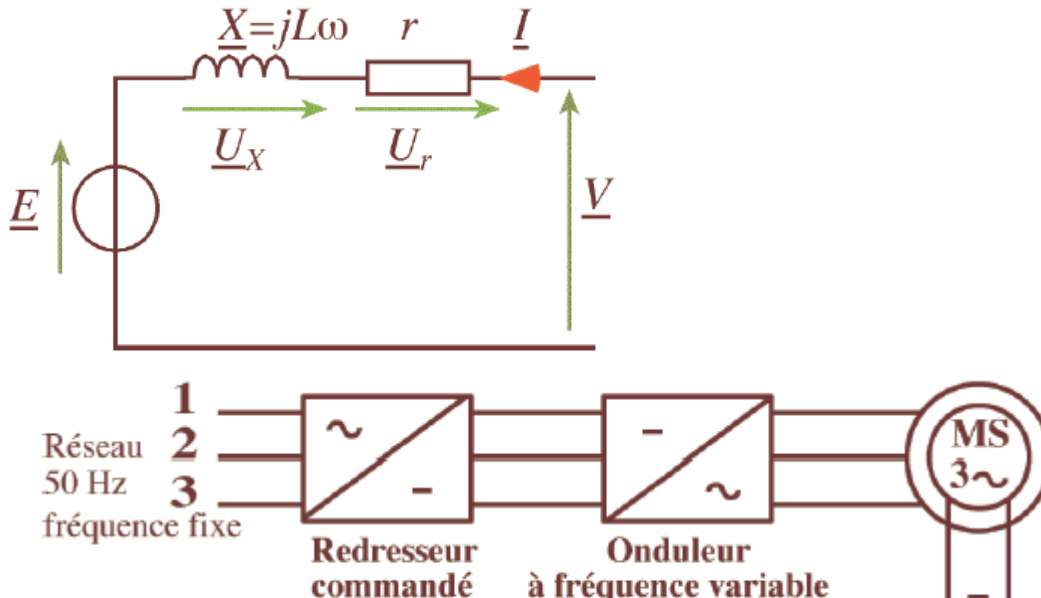
alternateur triphasé à excitation indépendante

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} = \frac{UI\sqrt{3} \cos \varphi}{2\pi \cdot n_s T_M + U_e I_e} \quad \text{ou} \quad \eta = \frac{P_u}{P_u + U_e I_e + \frac{3}{2} R I^2 + p_c}$$

alternateur monophasé à excitation indépendante

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} = \frac{VI \cos \varphi}{2\pi n_s T_M + U_e I_e} \quad \text{ou} \quad \eta = \frac{P_u}{P_u + U_e I_e + rI^2 + p_c}$$

8-5 Moteur synchrone:



- loi des mailles : $\vec{V} = \vec{E} + \vec{U}_x + \vec{U}_r$;
- le courant est en convention récepteur ;
- il faut inverser le bilan des puissances de l'alternateur.

$$P_a = \sqrt{3}UI \cos \varphi + U_e I_e \quad \text{et} \quad P_u = T_u \Omega_s$$

Pour varier la vitesse d'un moteur synchrone, il faut varier la fréquence des courants statoriques.

a) Avantages:

La machine synchrone est plus facile à réaliser et plus robuste que le moteur à courant continu. Son rendement est proche de 99%. On peut régler son facteur de puissance $\cos \varphi$ en modifiant le courant d'excitation I_e .

b) Inconvénients:

Un moteur auxiliaire de démarrage est souvent nécessaire. Il faut une excitation, c'est-à-dire une deuxième source d'énergie. Si le couple résistant dépasse une certaine limite, le moteur décroche et s'arrête.

9-Régime transitoire des moteurs asynchrones:

Problème de démarrage des moteurs asynchrones:

Le branchement du moteur au réseau électrique peut se réaliser par :

- ✓ **Démarrage direct** : Si le courant de démarrage n'entraîne pas la détérioration des enroulements du moteur ou l'installation accompagnant. Utilisé pour les moteurs faibles puissances.
- ✓ **Utilisation d'un procédé de démarrage** s'il y a risque de détérioration des enroulements du moteur ou l'installation accompagnant

9-1 Démarrage direct:

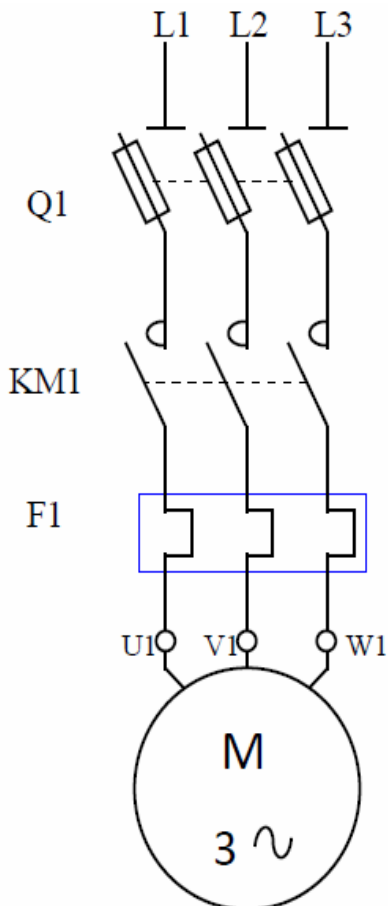
9-1-1 Principe:

Dans ce procédé de démarrage, le moteur asynchrone est branché directement au réseau d'alimentation le démarrage s'effectue en un seul temps. Le courant de démarrage peut atteindre 4 à 8 fois le courant nominal du moteur. Le couple de décollage est important, peut atteindre 1,5 fois le couple nominale.

9-1-2 Démarrage semi-automatique à un seul sens de marche

On veut démarrer un moteur asynchrone triphasé dans un sens de marche avec un bouton poussoir S_1 et l'arrêter par l'arrêter avec un bouton poussoir S_0 .

a) Circuit de puissance:



L1, L2, L3 : alimentation triphasée

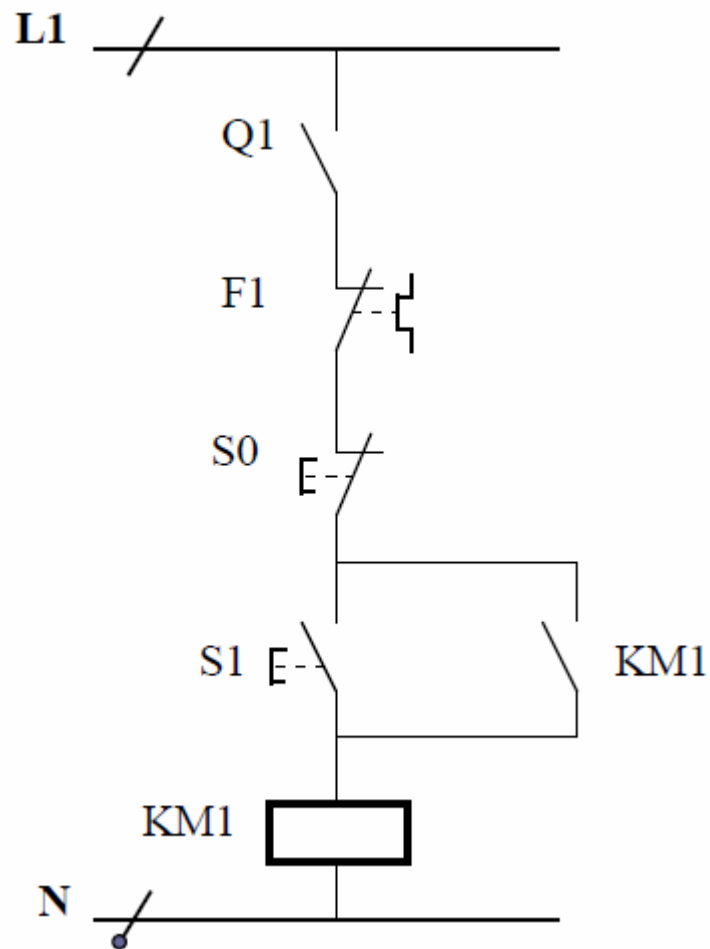
Q1 : sectionneur fusible

KM1 : contacteur principal 1

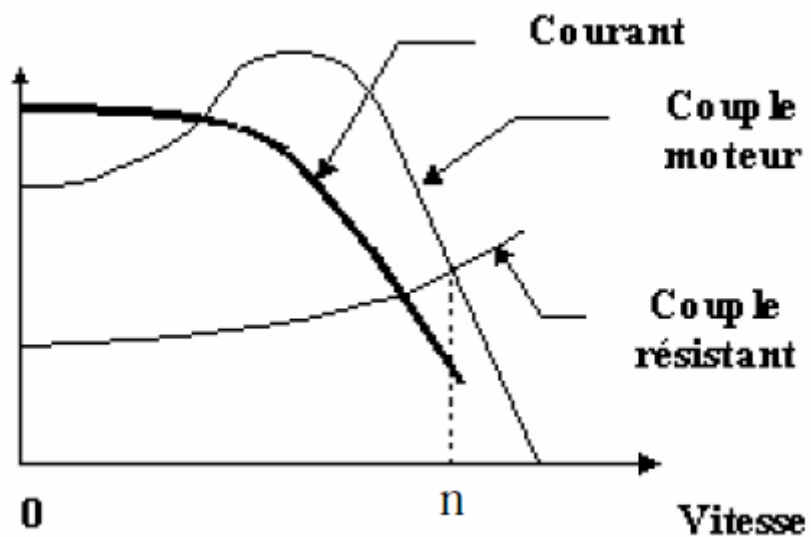
F1 : relais thermique

M : moteur triphasé

b) Circuit de commande:



c) La caractéristique mécanique:



➤ Avantages du démarrage direct :

- simplicité de l'appareillage,
- démarrage rapide,
- coût faible,
- Le couple de démarrage doit être élevé.

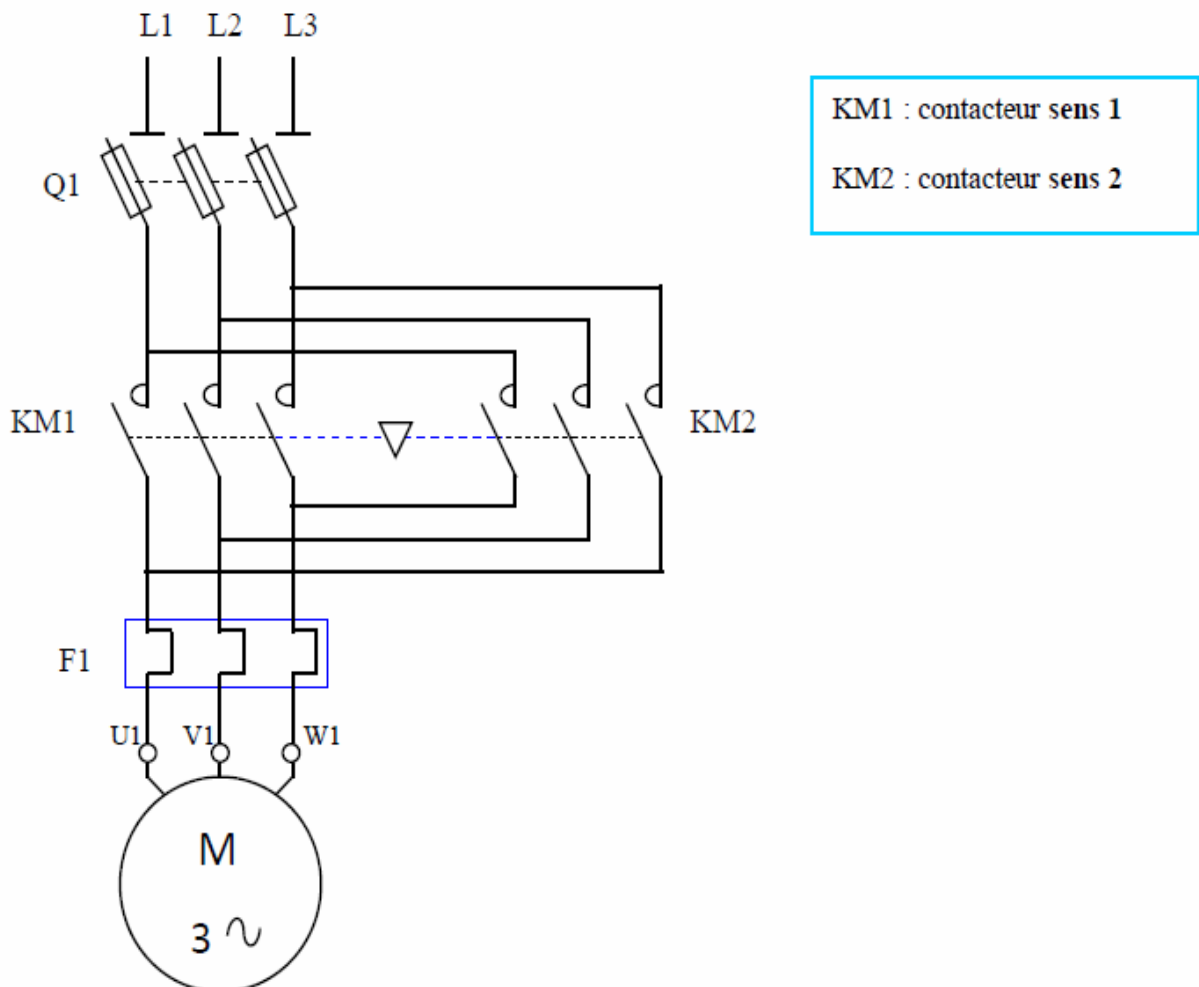
➤ Inconvénients du démarrage direct :

- Courant de démarrage élevé : 5 à 7 I_n ,
- La puissance du moteur doit être faible par rapport à la puissance du réseau. (Chute de tension trop importante).
- Démarrage brutal (problèmes mécaniques et humains),

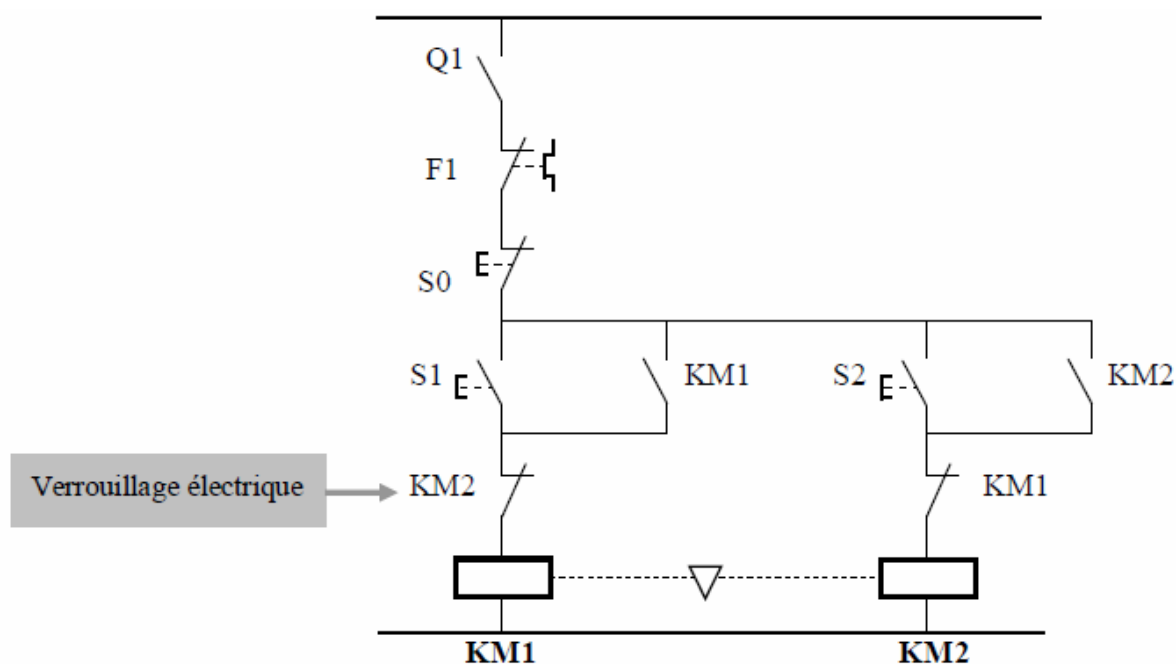
9-1-3 Démarrage direct semi-automatique à deux sens de marche:

On veut démarrer un moteur asynchrone triphasé dans deux sens de rotation, par un bouton poussoir S_1 pour le sens 1, par un bouton poussoir S_2 pour le sens 2 et un bouton poussoir S_0 pour l'arrêt.

a) Circuit de puissance:



b) Circuit de commande:

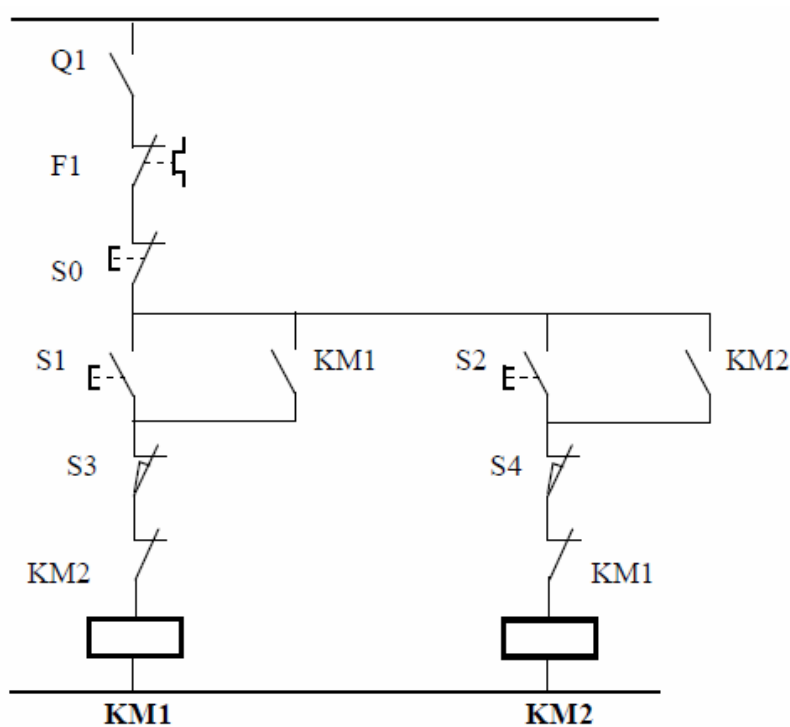


9-1-4 Démarrage direct semi-automatique à deux sens de marche avec butées de fin de course:

On veut démarrer un moteur asynchrone triphasé dans deux sens de rotation par l'action de deux boutons poussoirs, S1 pour le sens 1, S2 pour le sens 2. Chaque sens est arrêté par une butée de fin de course, respectivement S3 pour le sens 1 et S4 pour le sens 2. Un bouton poussoir S0 arrête le moteur à n'importe quel instant.

a) Circuit de puissance : Même circuit de puissance de la figure ci-dessus.

b) Circuit de commande:

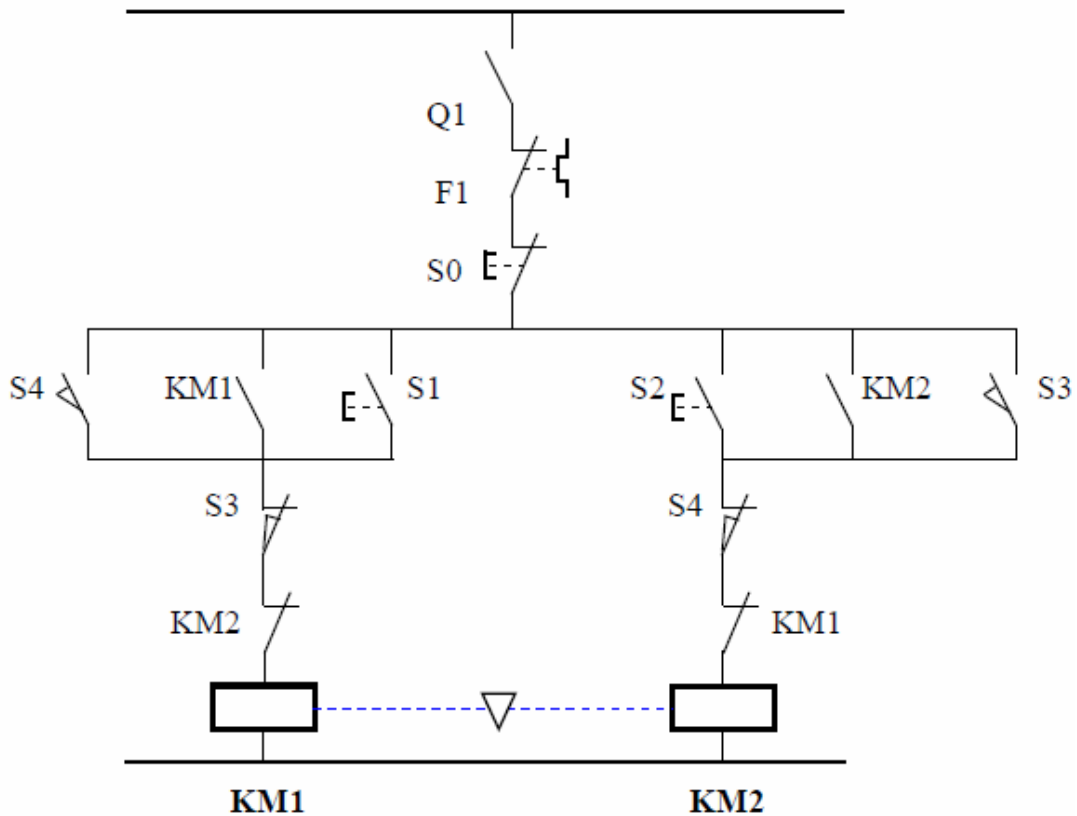


9-1-5 Démarrage direct semi-automatique à deux sens de marche avec butées de fin de course et inversion de sens de rotation

Dans ce cas de démarrage, la butée S3 ou S4, une fois actionnée, elle change le sens de marche du moteur.

a) **Circuit de puissance** : Même circuit de puissance de la figure ci-dessus.

b) **Circuit de commande**:



9-2 Limitation du courant de démarrage

Contrairement au démarrage direct, le démarrage des moteurs moyennes et fortes puissances nécessite l'utilisation de procédés de limitation de courant de démarrage tout en maintenant les performances mécaniques de l'ensemble « moteur-machine entraînée ». Il existe deux types d'actions :

- **Action sur le stator** : Consiste à réduire la tension aux bornes des enroulements statoriques.

On peut réaliser le démarrage par :

- Couplage étoile-triangle,
- Elimination des résistances statoriques,
- Utilisation d'un autotransformateur.

Ce type d'action est utilisé pour les moteurs moyennes puissances.

- **Action sur le rotor** : Consiste à augmenter la résistance rotorique au démarrage.

On peut réaliser le démarrage par :

- o Elimination des résistances rotoriques,
- o Utilisation des moteurs à cages multiples ...

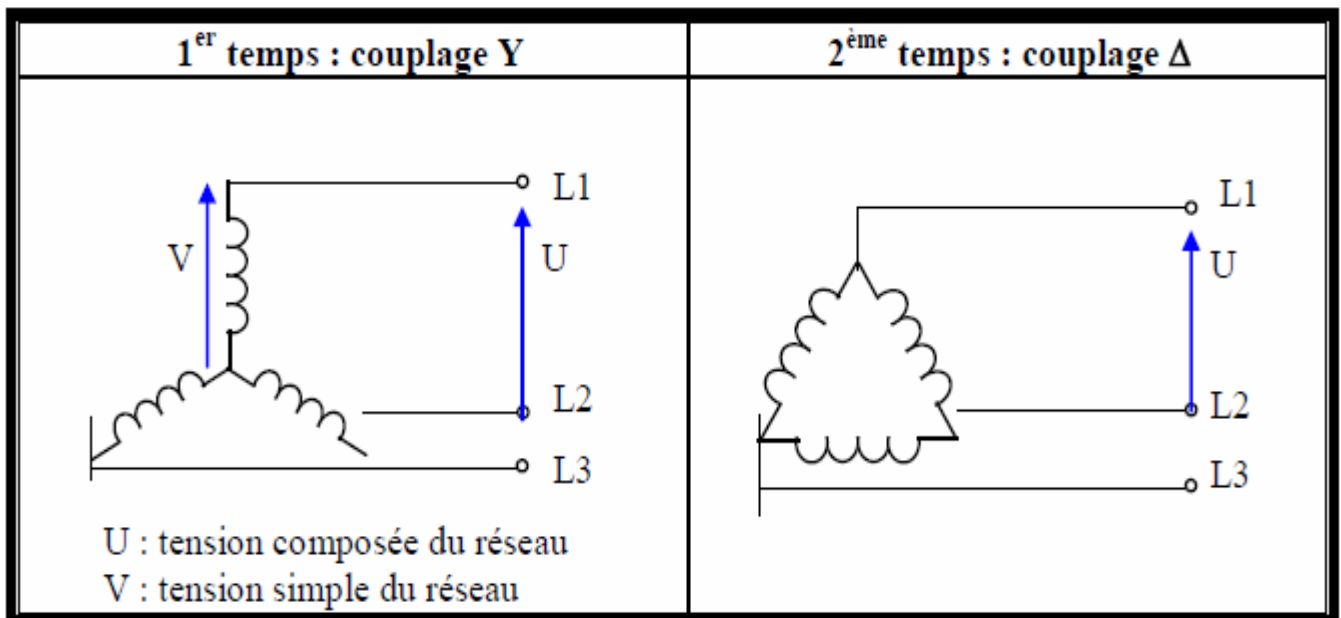
Ce procédé de démarrage est accompagné en plus de la réduction du courant de démarrage, d'une augmentation du couple de démarrage. Ce type de démarrage est utilisé pour les moteurs fortes puissances.

9-2-1 Démarrage étoile-triangle :

a) Principe :

Le démarrage s'effectue en deux temps :

- **1er temps** : chaque enroulement du stator est alimenté sous une tension réduite en utilisant le couplage Y. Il est le temps nécessaire pour que la vitesse du moteur atteigne environ 80% de sa vitesse nominale.
- **2ème temps** : chaque enroulement du stator est alimenté par sa tension nominale changeant le couplage au triangle.

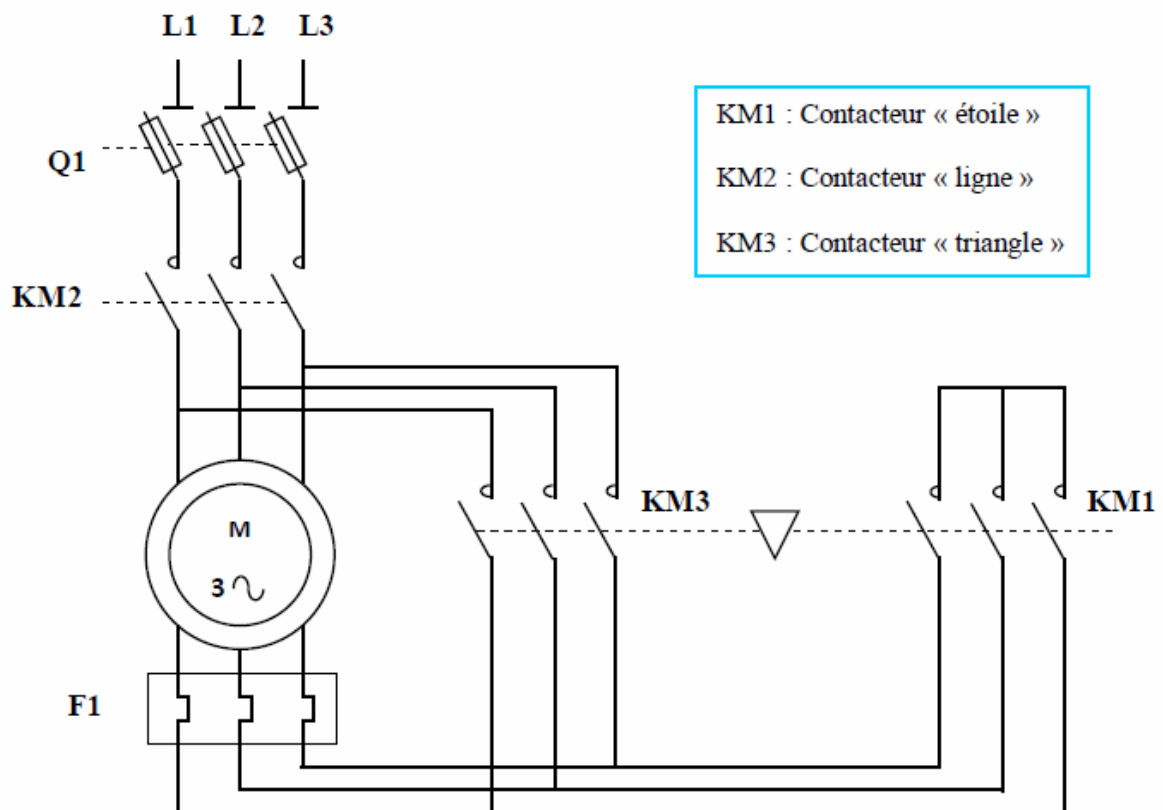


Ce type de démarrage est utilisé pour les moteurs à couplage Δ lors de leur fonctionnement normal.

a) Démarrage étoile-triangle semi-automatique à un sens de marche :

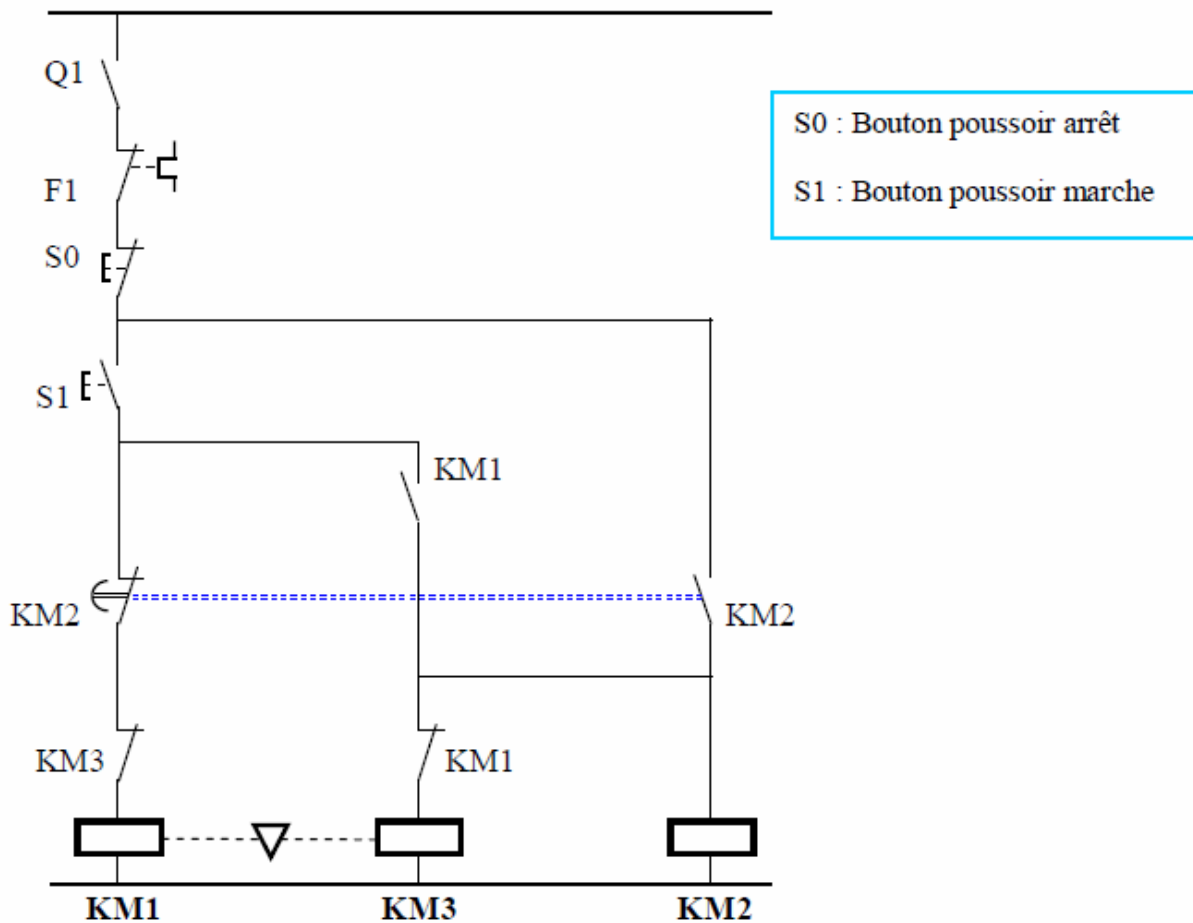
On veut démarrer un moteur asynchrone triphasé en étoile-triangle dans un sens de rotation par un bouton poussoir S1 et arrêter par un bouton poussoir S0.

a1) Circuit de puissance:

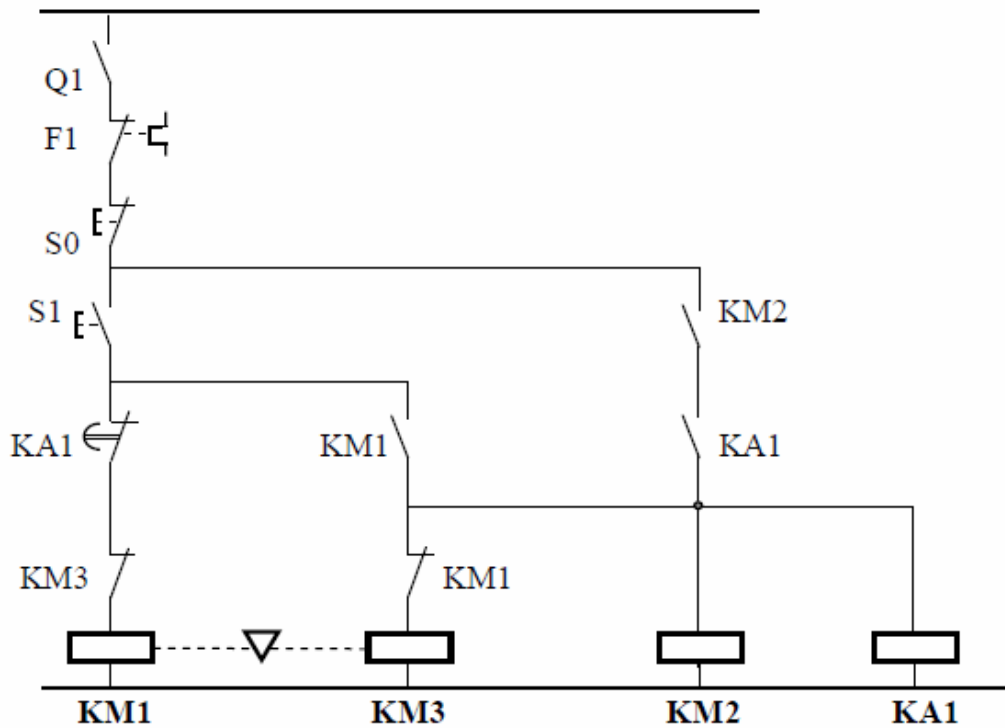


a2) Circuit de commande:

Solution1 :



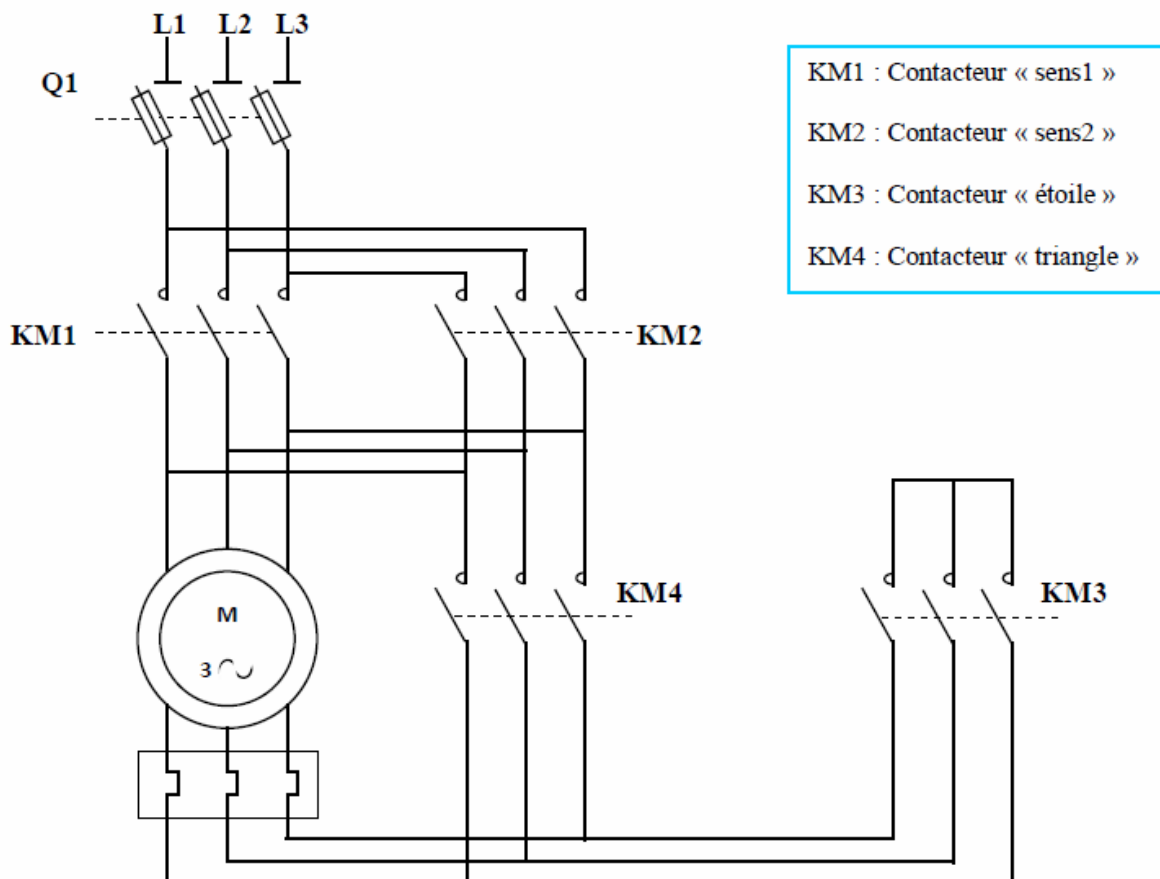
Solution2: En utilisant un contacteur auxiliaire (KA1)



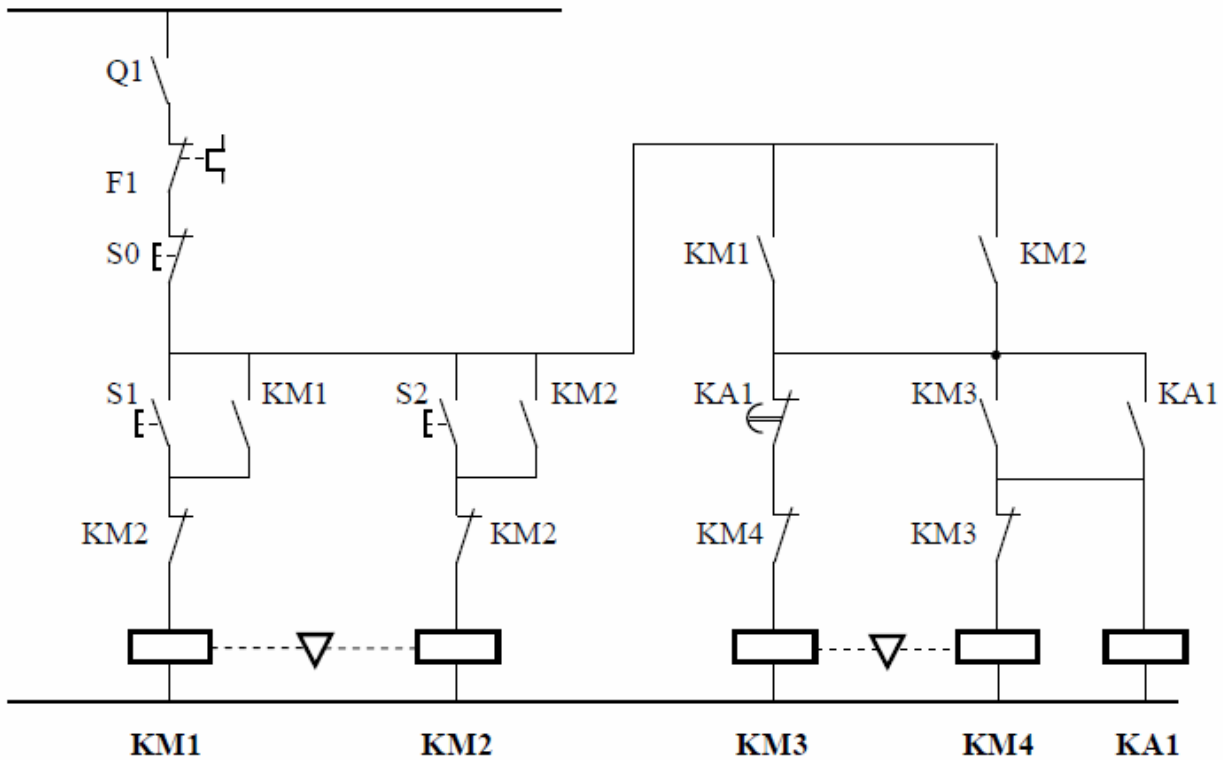
KA1: contacteur auxiliaire qui possède un contact temporisé retardé à l'ouverture.

b) Démarrage étoile-triangle semi-automatique à deux sens de marche:

b1) Circuit de puissance:



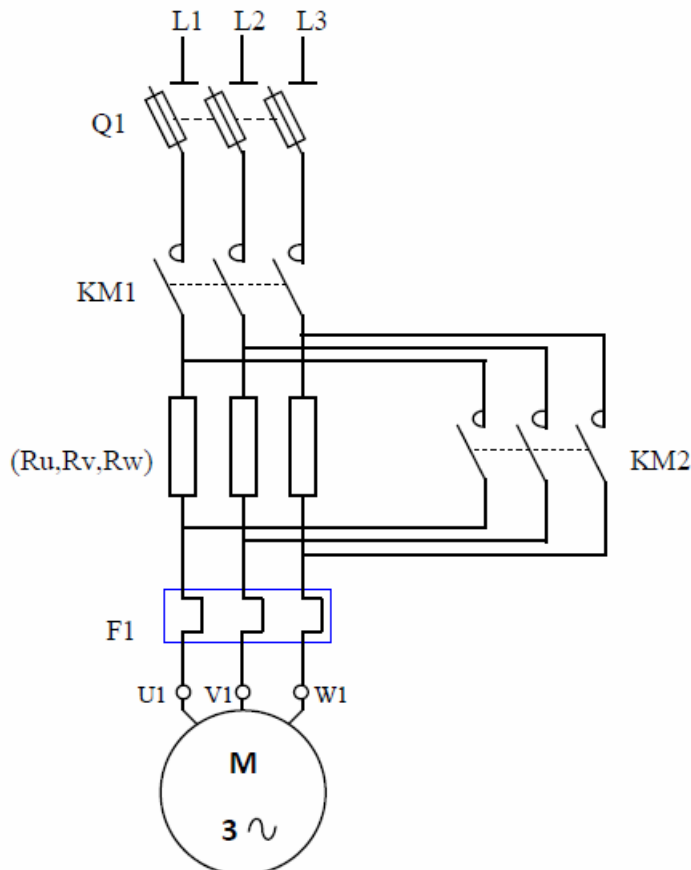
b2) Circuit de commande:



9-3 Démarrage par élimination de résistances statoriques:

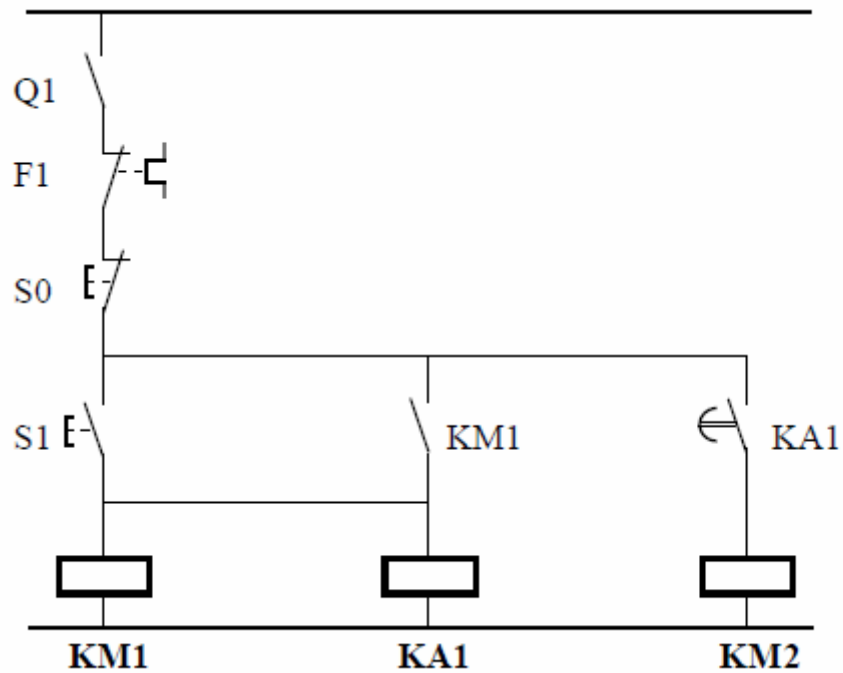
9-3-1 Démarrage par élimination de résistances statoriques à un seul sens de marche:

a) Circuit de puissance:



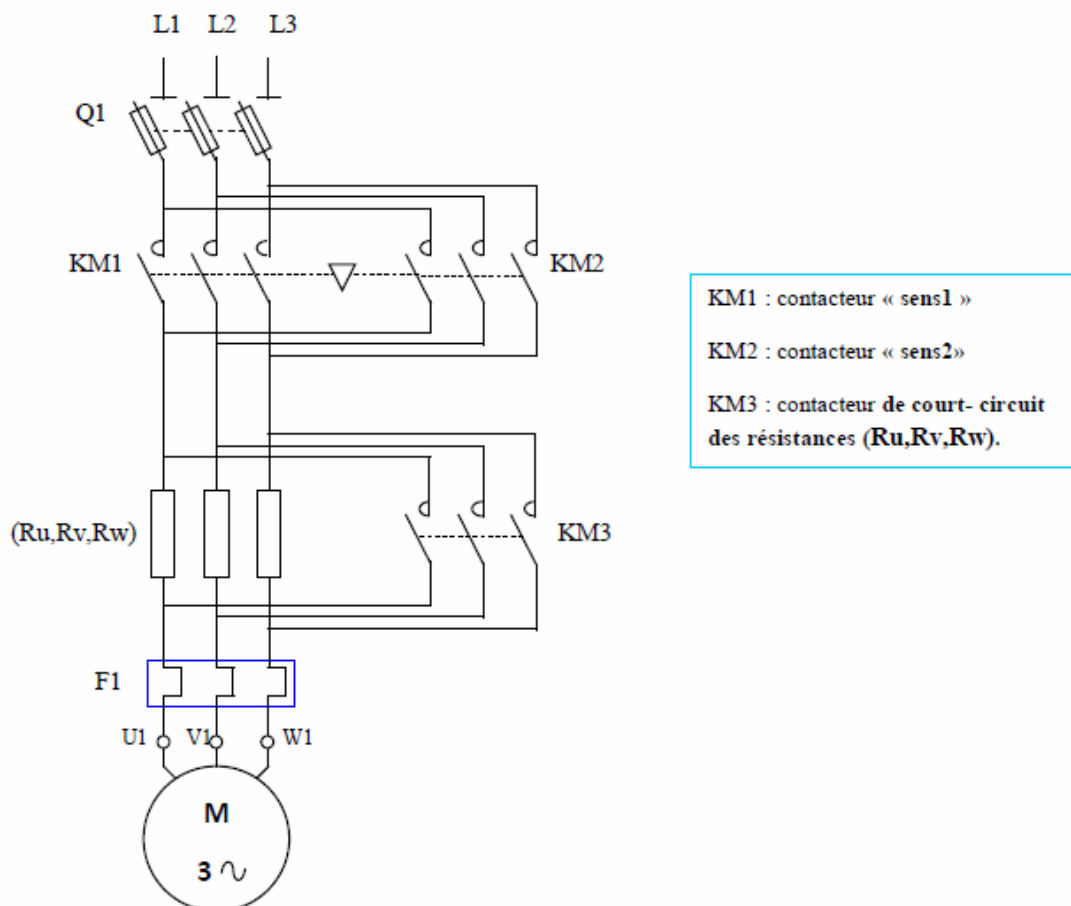
KM1 : contacteur « ligne »
 KM2 : contacteur de court-circuit des résistances (R_u, R_v, R_w).

b) Circuit de commande:

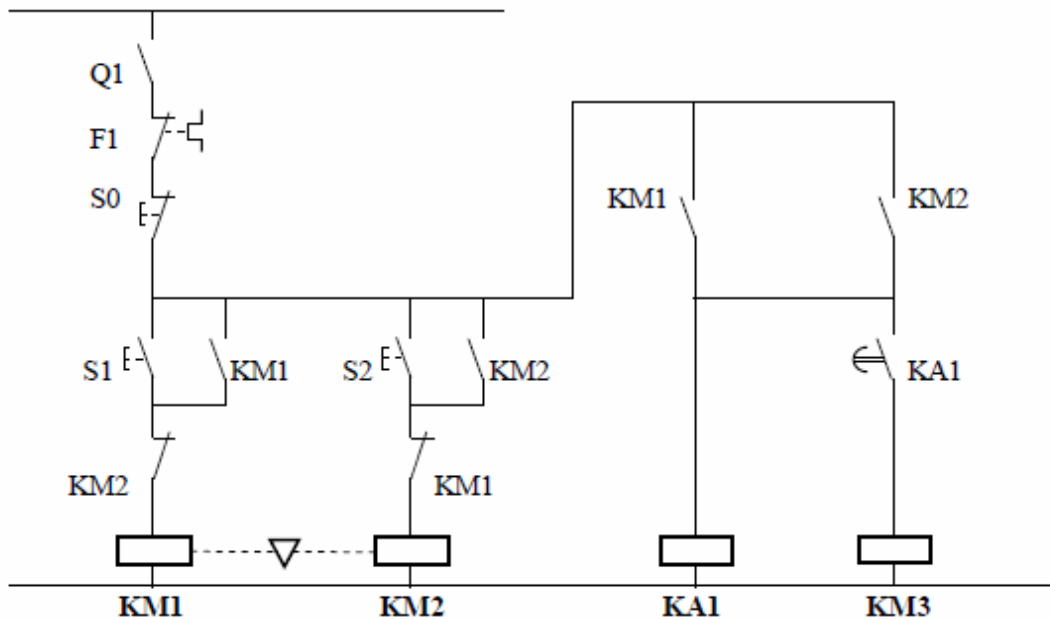


9-3-2 Démarrage par élimination de résistances statoriques à deux sens de marche:

a) Circuit de puissance:



b) Circuit de commande:



9-4 Démarrage par élimination de résistances rotoriques:

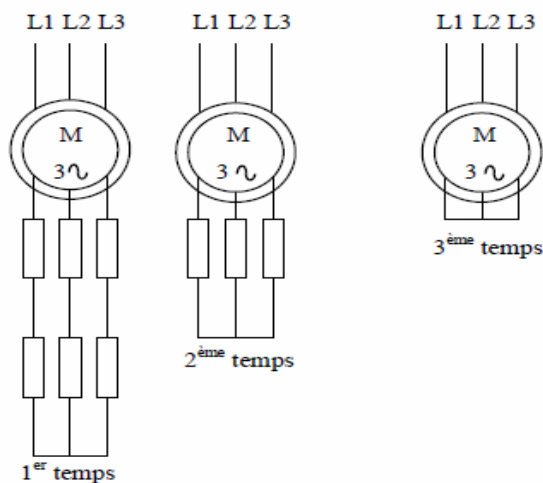
a) Principe:

Ce type de démarrage est utilisé pour les moteurs à rotor bobiné dont les enroulements sont couplés en Y, et les trois sorties sont soudés à des bagues fixées sur l'arbre du moteur auxquels on peut insérer des résistances à l'aide de balais frotteurs. Ce démarrage consiste à alimenter le stator du moteur par la tension nominale et éliminer les résistances rotoriques en plusieurs temps (3 temps au minimum).

1er temps : On insère la totalité des résistances dans les enroulements du rotor.

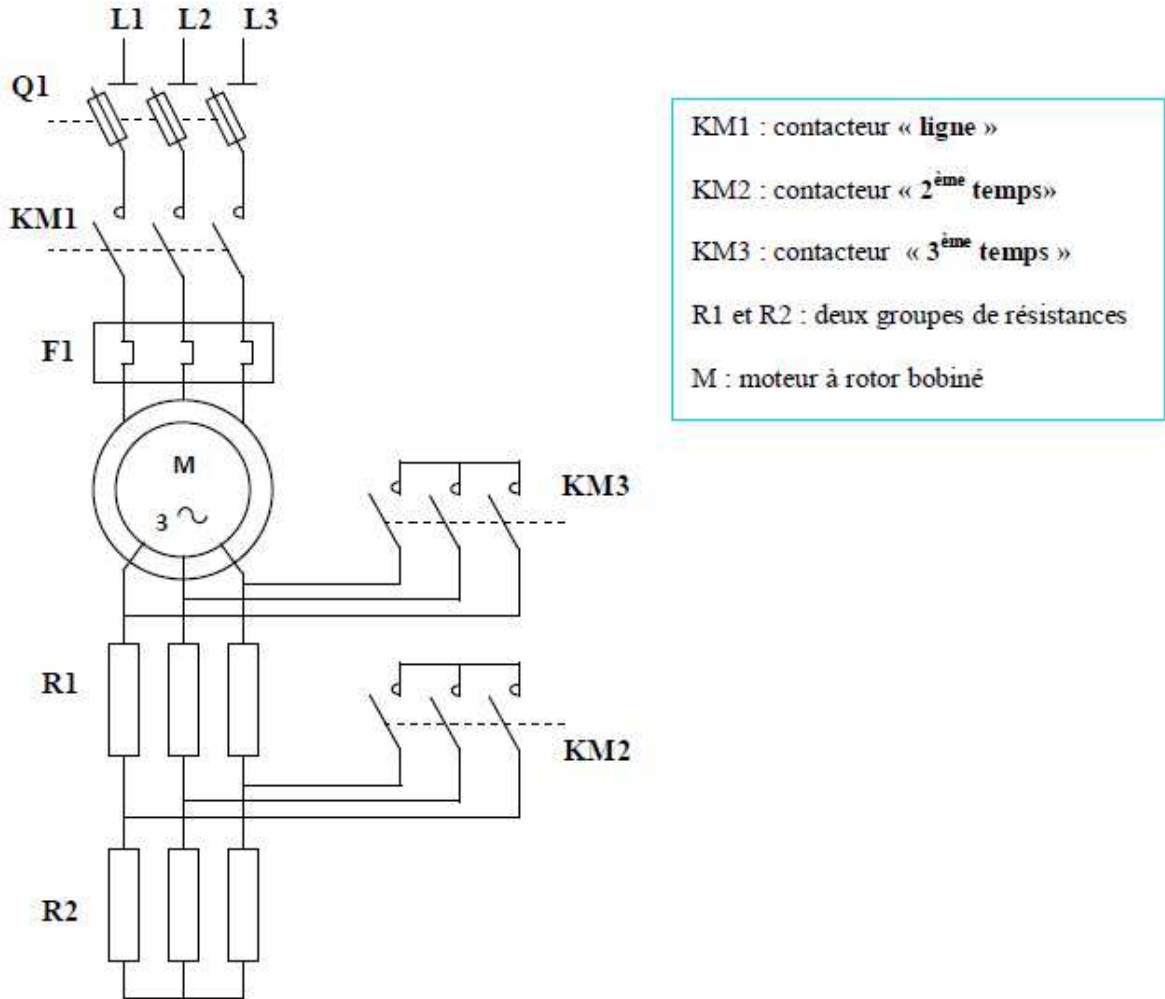
2ème temps : On diminue la résistance du circuit rotor en éliminant une partie des résistances insérées.

3ème temps : On élimine toutes les résistances rotoriques en court-circuitant les enroulements du rotor.



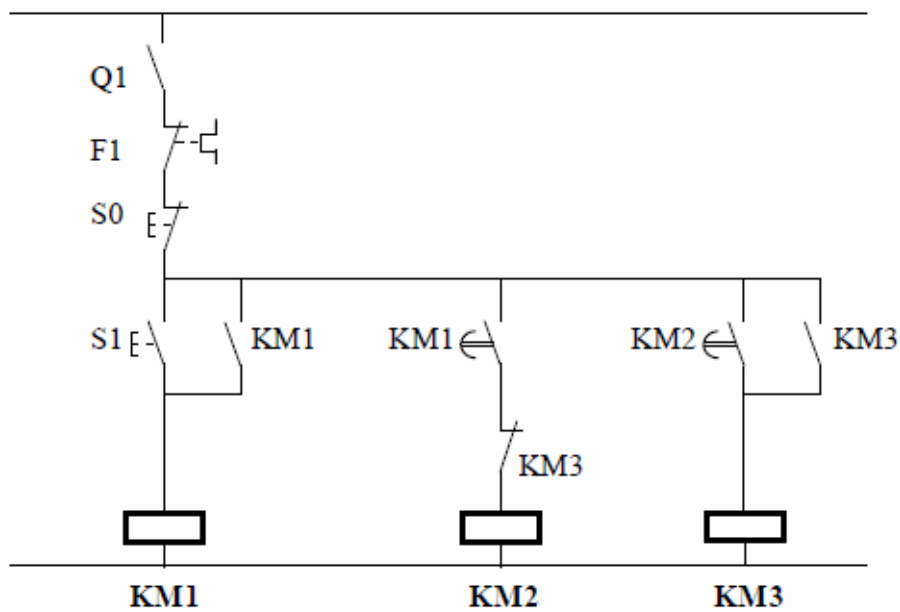
9-4-1 Démarrage par élimination de résistances rotoriques à un seul sens de marche:

a) Circuit de puissance:

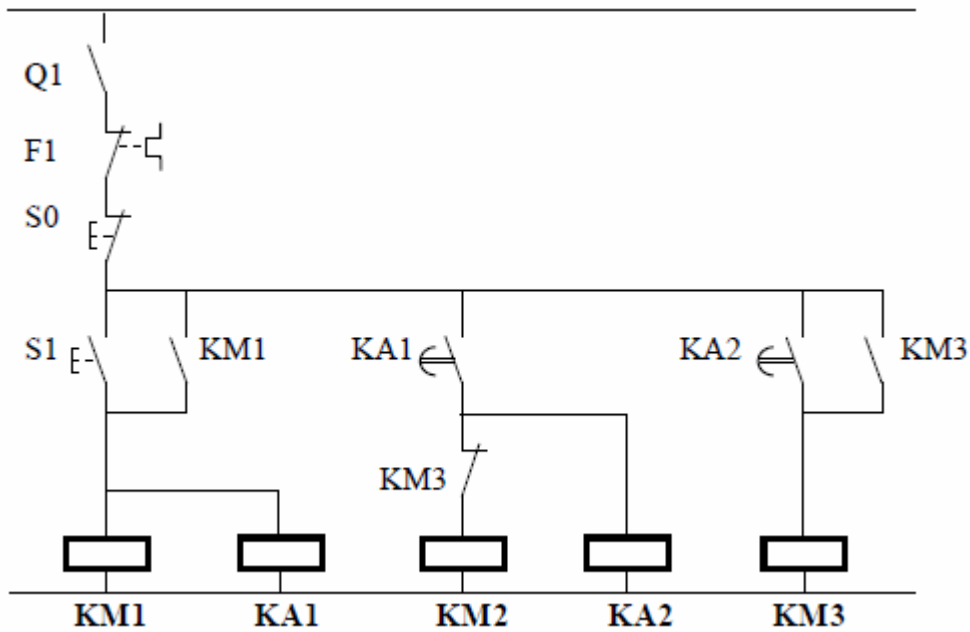


b) Circuit de commande:

Solution 1 :

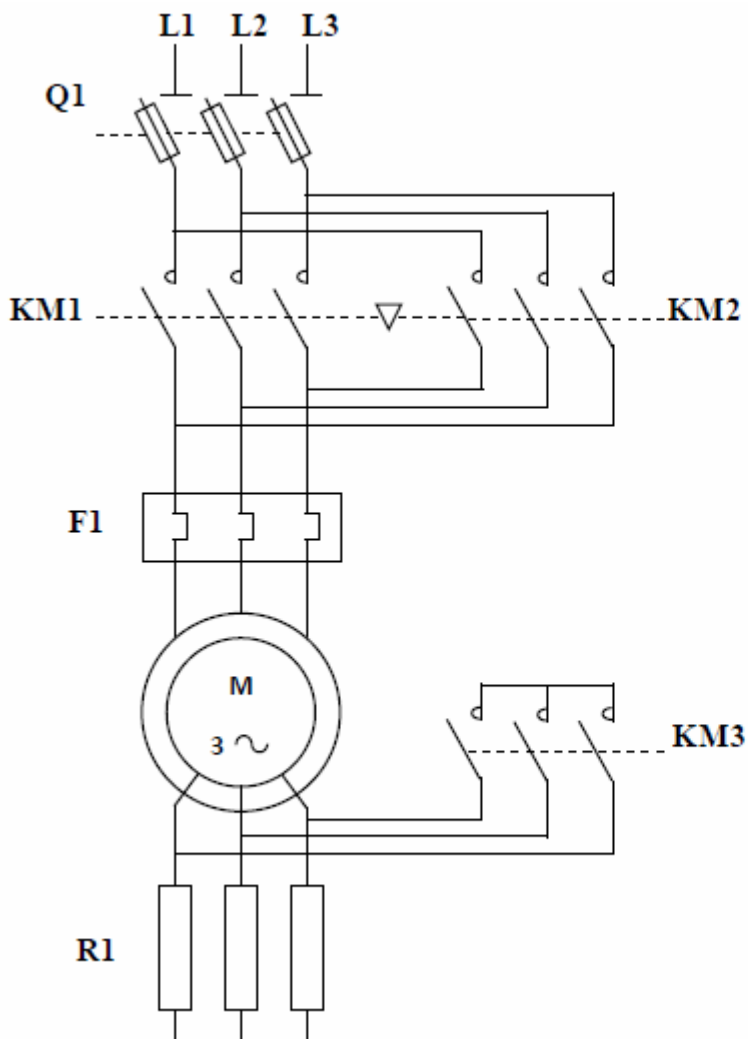


Solution 2 :



9-4-2 Démarrage par élimination de résistances rotoriques, deux sens de marche (démarrage en deux temps):

a) Circuit de puissance:



KM1 : contacteur « sens1 »

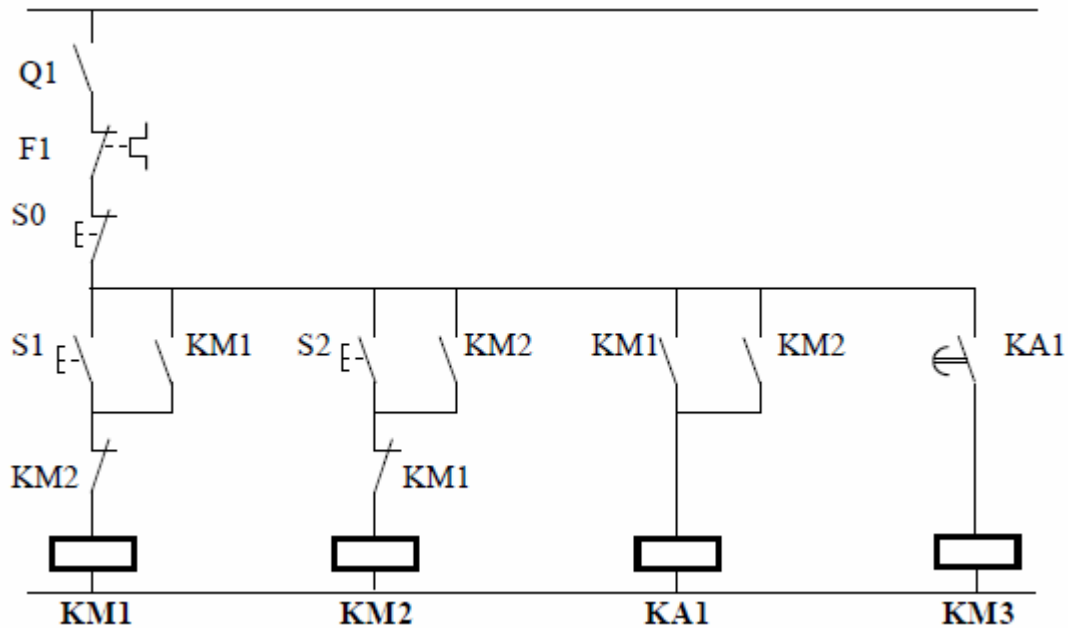
KM2 : contacteur « sens2 »

KM3 : contacteur « 2^{ème} temps »

R1 : un groupe de résistances

M : moteur à rotor bobiné

b) Circuit de commande:

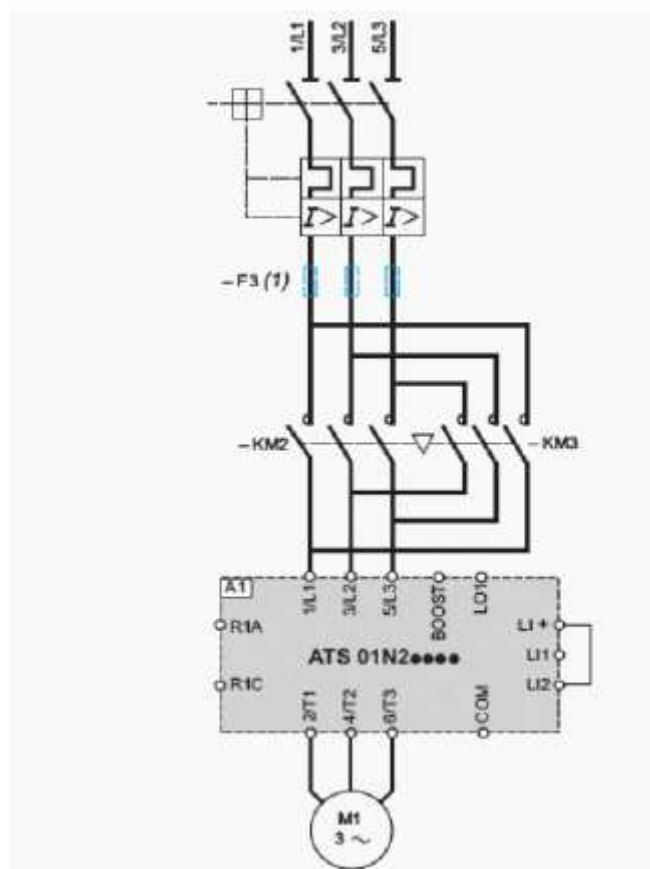


9-5 Démarreurs électroniques:

a) Fonction

Permettre le démarrage et éventuellement la variation de vitesse du moteur tout en le protégeant contre toute surintensité et emballement.

b) Exemple (démarrateur de type ATS)



9-6 Freinage des moteurs asynchrones:

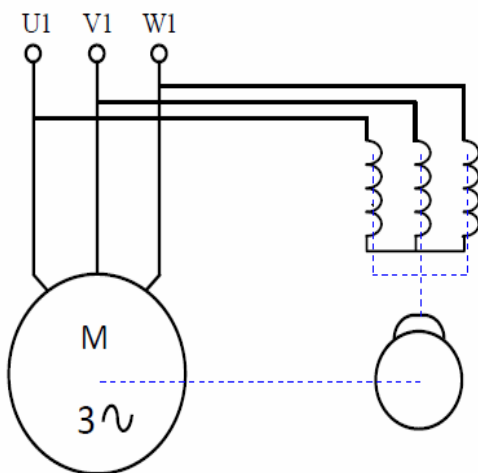
a) Introduction

Il existe plusieurs procédés de freinage pour moteurs asynchrones; il faut distinguer :

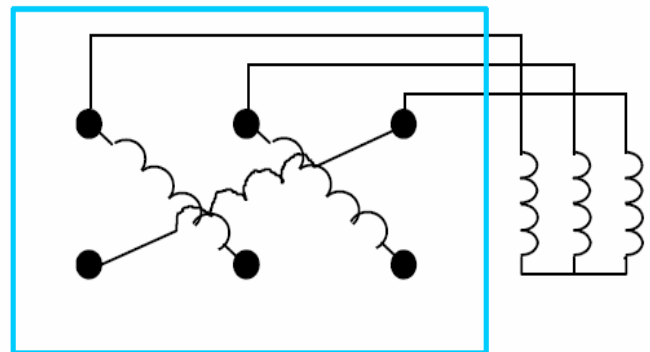
- Le freinage avec arrêt immédiat obtenu à l'aide de moteurs spéciaux (moteur frein),
- Le freinage par ralentissement applicable à tous les types de moteurs asynchrones.

9-6-1 Utilisation d'un moteur Frein action sur le rotor:

Ce sont des moteurs comportant un dispositif de freinage mécanique (mâchoires, disques, etc.) commandé par un électro-aimant. Il en existe deux types : A appel de courant : nécessite une alimentation électrique indépendante de celle du moteur. A manque de courant : le frein est actionné mécaniquement (système de ressorts au repos), il est souvent utilisé pour des raisons de sécurité : lorsque le moteur n'est pas alimenté (arrêt normal ou arrêt d'urgence) le freinage est réalisé. L'électroaimant est alimenté en triphasé, branché en parallèle sur les enroulements statoriques.



Symbole



Plaque à bornes

Remarque :

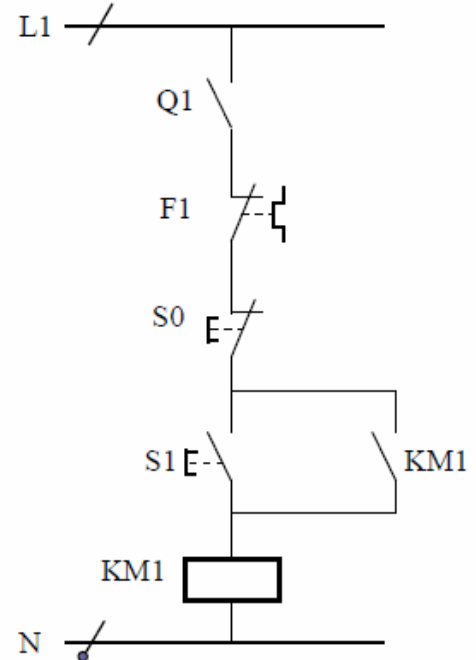
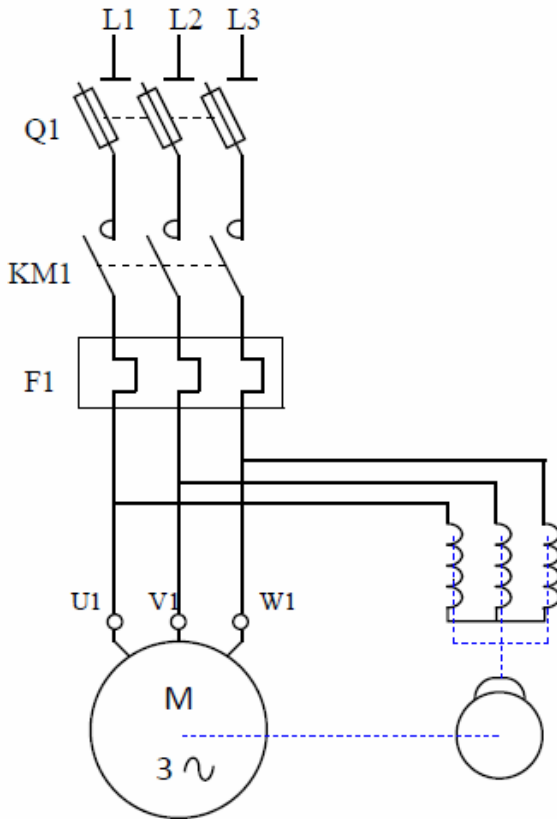
On obtient avec ce dispositif un freinage brutal avec un maintien en position (blocage). Il existe des moteurs frein avec un électroaimant alimenté en courant redresser par l'intermédiaire d'un pont de diodes.

a) Schémas des circuits de puissance et de commande:

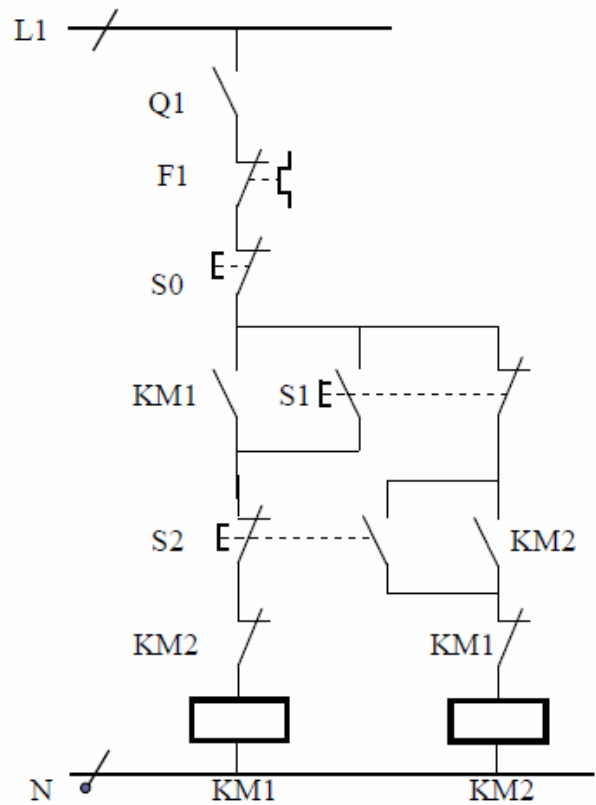
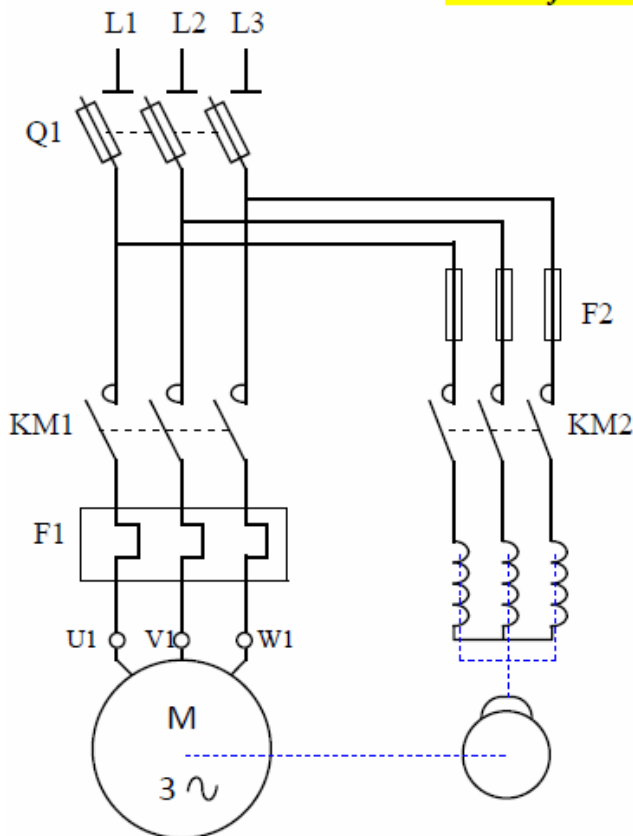
Circuit de puissance

Circuit de commande

Moteur frein à manque de courant



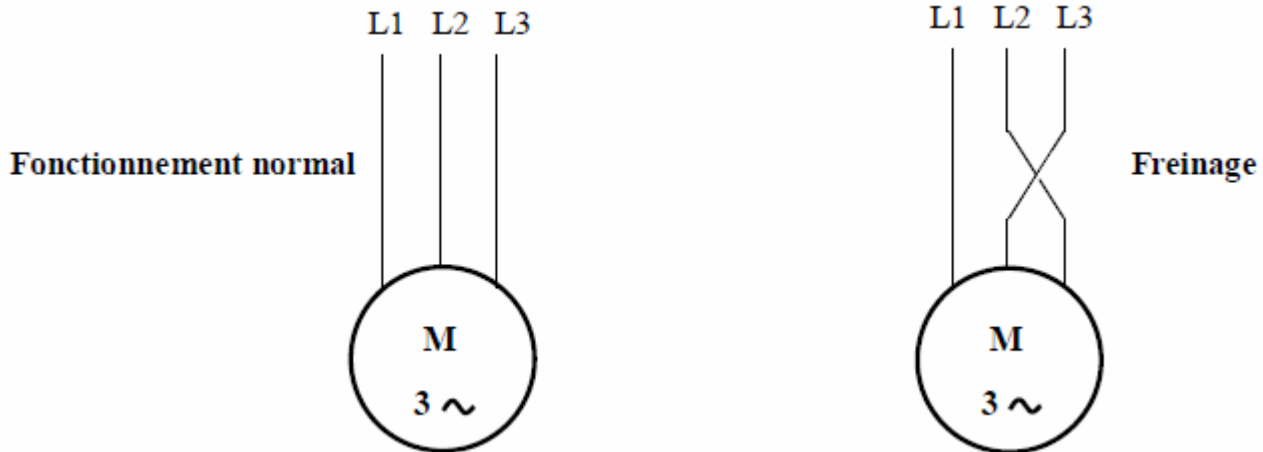
Moteur frein à appel de courant



9-6-2 Freinage par contre courant action sur le stator:

a) Principe

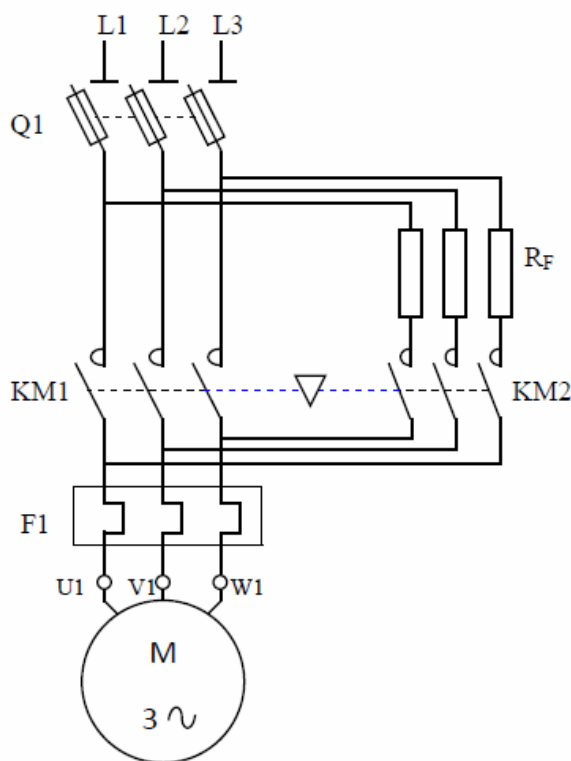
Après avoir coupé l'alimentation, pour arrêter plus rapidement le rotor, on inverse 2 phases pour l'inversion du champ tournant donc ralentissement du rotor.



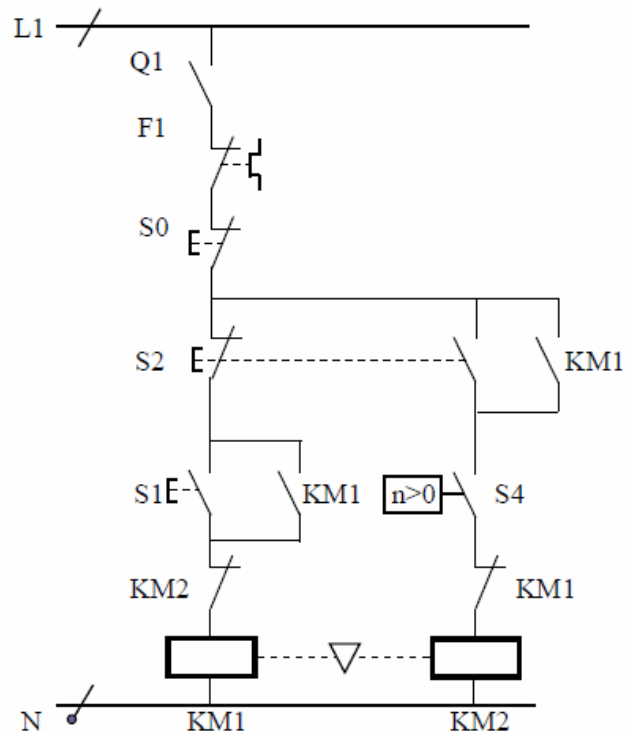
b) Remarques :

- C'est un mode de freinage très efficace. Le ralentissement est violent.
- Ce freinage doit être interrompu dès l'arrêt du rotor sinon risque de redémarrer dans le sens inverse.
- Il n'y a pas de blocage.

c) Schémas de puissance et de commande dans le cas d'un moteur en court-circuit:



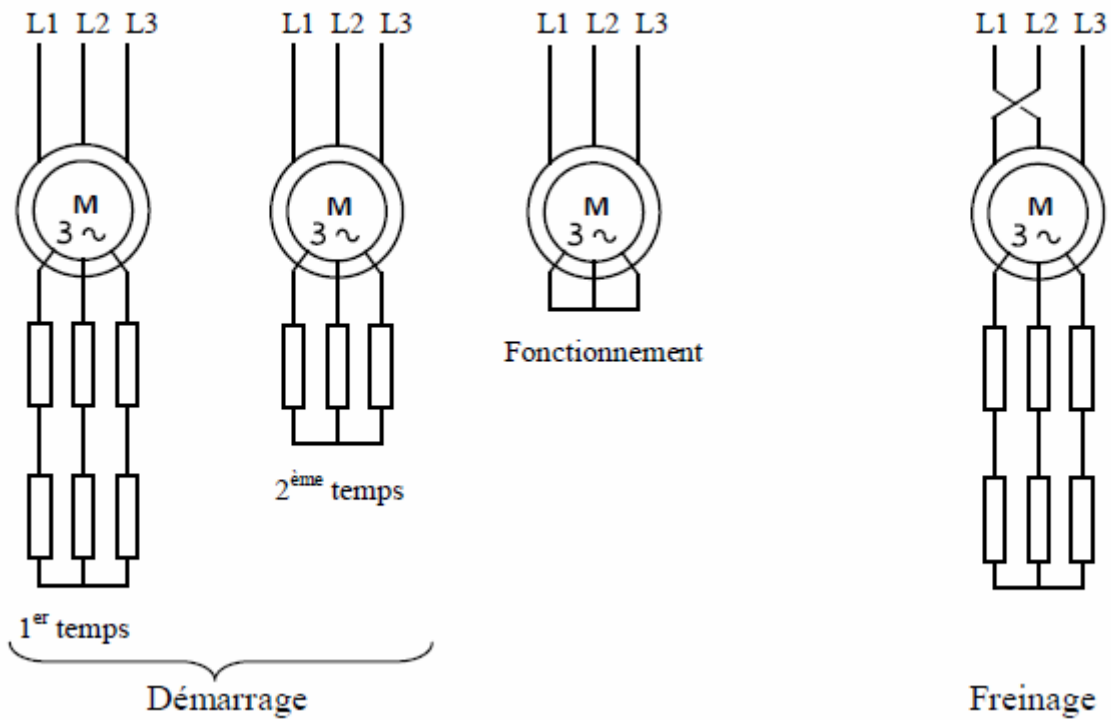
R_F : groupe de résistances de freinage permettant de limiter le courant de freinage



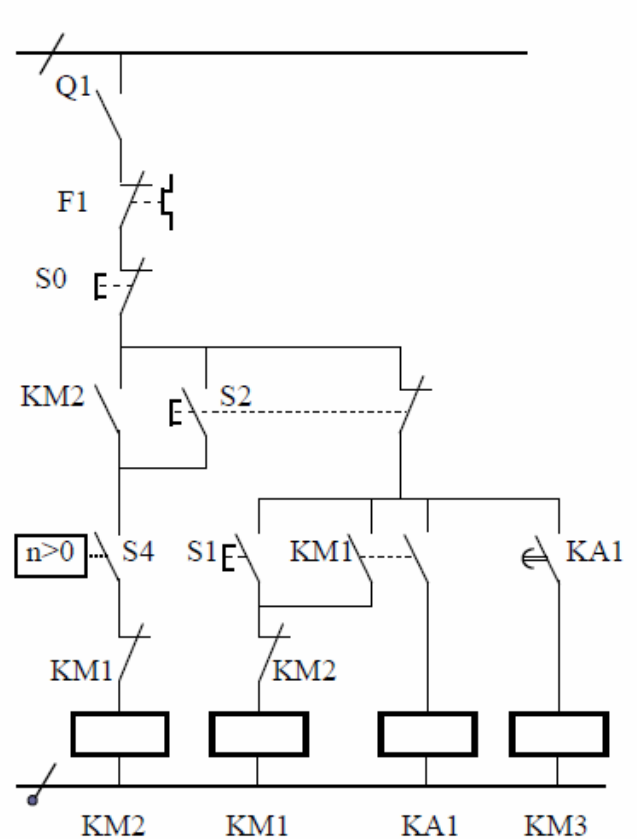
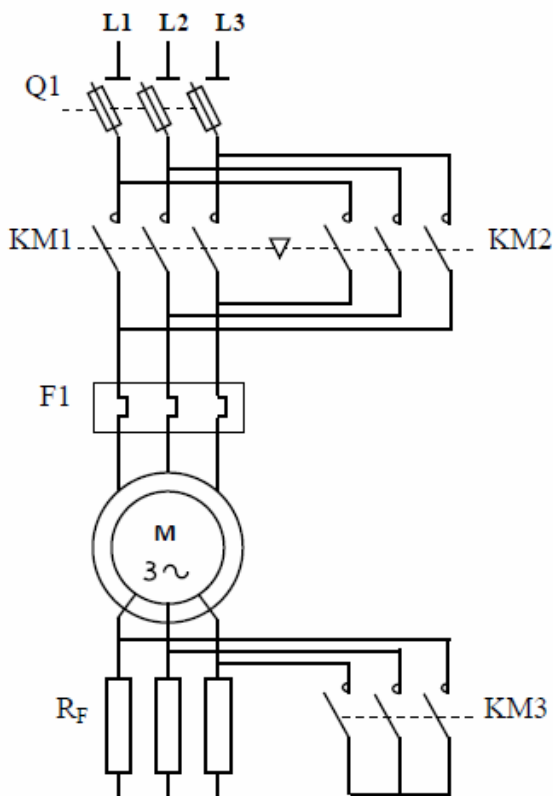
S4 : se ferme lorsque le moteur se met en rotation ($n > 0$) et s'ouvre pour $n = 0$.

9-6-3 Schémas de puissance et de commande dans le cas d'un moteur à bagues:
 Tout comme pour le démarrage, les résistances rotoriques sont mises en service, durant le freinage, afin de limiter le courant absorbé par le moteur.

a) Schéma de principe:



b) Schémas des circuits de puissance et de commande:



9-6-4 Freinage par injection de courant continu:

a) Principe:

On déconnecte les enroulements du stator, puis on les alimente avec une source de tension redressée. Le champ tournant est remplacé ainsi par un champ fixe (créé par la source de tension redressée) qui provoque le ralentissement du rotor.

b) Remarque:

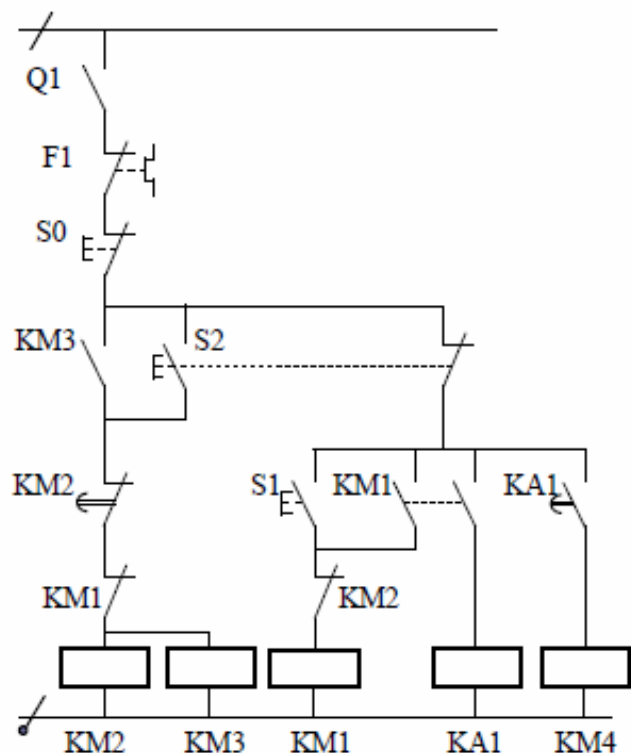
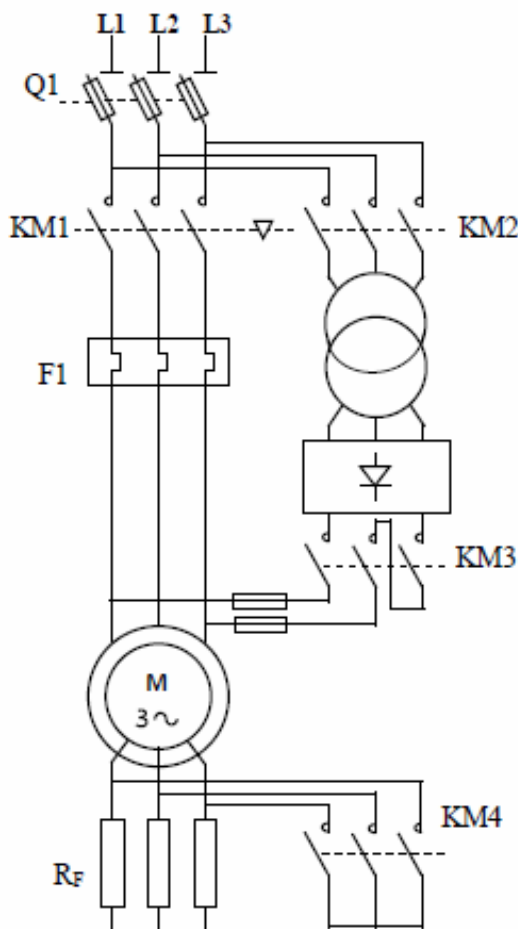
- Il n'y a toujours pas de blocage.
- Le courant de freinage est de l'ordre de $1,3 I_n$. La valeur moyenne de la tension redressée dépasse rarement 20V pour ne pas provoquer d'échauffement excessif.
- Les résistances rotoriques sont remises en service.

c) Critique:

Avantage : pas de risque de démarrage dans l'autre sens.

Inconvénient : il faut couper le courant dans le stator pour éviter l'échauffement.

d) Schémas des circuits de puissance et de commande:



d) Tableau récapitulatif:

Résumé des caractéristiques moteur et procédé de démarrage (source télémécanique)					
	Moteurs à rotor à cage (rotor en court circuit)				Rotor bobiné à bagues
Nom du démarrage	Direct	Étoile Triangle Y / Δ	Statorique	Démarreur statique (éventuellement ralentisseur)	Rotorique
I de démarrage	4 à 8 I_n	1,3 à 2,6 I_n	1 à 1,5 I_n	1 à 1,5 I_n	1 à 1,5 I_n
Couple de démarrage	0,6 à 1,5 C_n	0,2 à 0,5 C_n	0,6 à 0,85 C_n	0,5 à 1,5 C_n	1 à 2 C_n
Avantages	Moteur bon marché démarrage simple. bon couple.	Moteur bon marché Démarrage assez simple.	Moteur bon marché démarrage pouvant être progressif selon le nombre de résistances.	Moteur bon marché démarrage très progressif. Possibilité de supprimer le thermique. possibilité de ralentir. câblage rapide.	Démarrage pouvant être progressif selon le nombre de résistances. Très bon couple.
Inconvénients	Pointe d'intensité. Départ violent.	Couple de départ faible. Le moteur doit être adapté Y/ Δ (400/690)	Nécessite des résistances. Couple de départ faible.	Démarreur statique cher.	Moteur cher. Nécessite des résistances.
Temps de démarrage	2 à 3 secondes	3 à 7 secondes	7 à 12 secondes	2 à 200 secondes	2 à 5 secondes
Applications	Machines de faibles puissances < à 5 Kw	Machines démarrant à vide. Machines à bois, Ventilateurs, pompes...	Machines à forte inertie mais peu de couple au départ. Gros ventilateurs	Quand les produits entraînés sont fragiles. ou la mécanique ne doit pas être sollicitée. Ascenseur, tapis roulants...	Machines à fort couple à l'arrêt. Ponts roulants, grues de levage, concasseurs...

10- Maintenance préventive des moteurs :

10-1 Contrôle en fonctionnement :

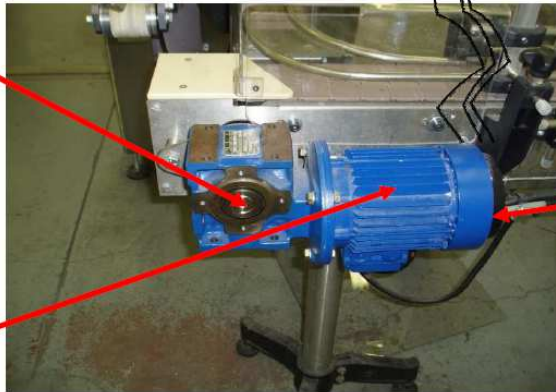
Type de contrôle : Contrôle sensoriel (la vue, l'odorat, ouïe, le toucher)



Est-ce que l'arbre du moteur tourne?





Est-ce qu'il y a une odeur de brûlé?

Est-ce que le ventilateur tourne?



Est-ce que le moteur ne chauffe pas?

Est-ce que le moteur fait du bruit?

Contrôle visuel 	Contrôler que: ✓ le moteur tourne ✓ le ventilateur fonctionne
Contrôle olfactif 	Contrôler que le moteur ne chauffe pas
Contrôle auditif 	Contrôler qu'il n'y a pas de bruits anormaux
Contrôle tactile 	Vérifier que le moteur ne chauffe pas, la main doit pouvoir rester en contact ($T^{\circ} = 60^{\circ}\text{C max}$)

10-2 Contrôle avant démontage :

a) Contrôles mécaniques:

Type de contrôle : Contrôle mécanique

Outillage: comparateur + marbre

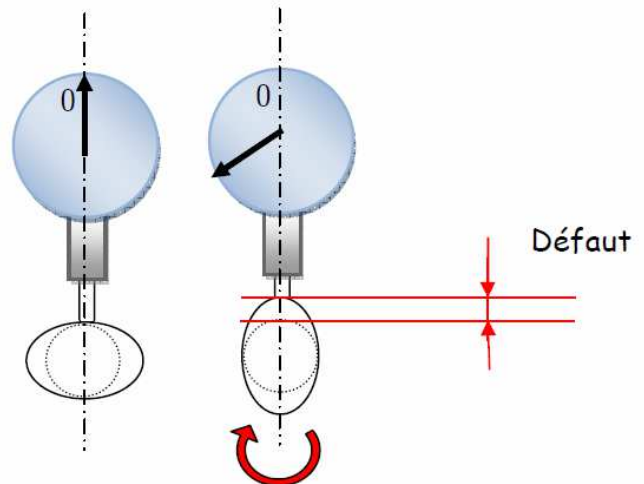


Méthode n°1 :

A l'aide du montage ci-contre, on va contrôler la déformation de l'arbre moteur.

- _ placer le comparateur perpendiculairement à l'arbre moteur.
- _ Faire appuyer le palper sur l'arbre
- _ Régler les aiguilles sur 0.

Faire tourner l'arbre lentement et noter les valeurs extrêmes



Valeur attendue: déformation maxi 1/10 mm sur un tour de l'arbre



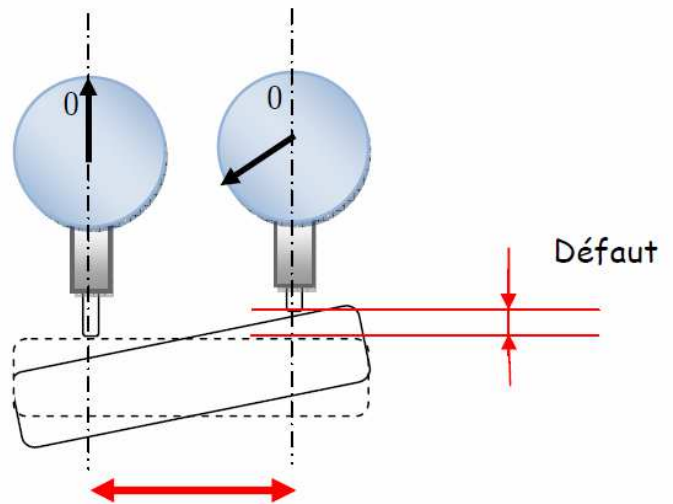
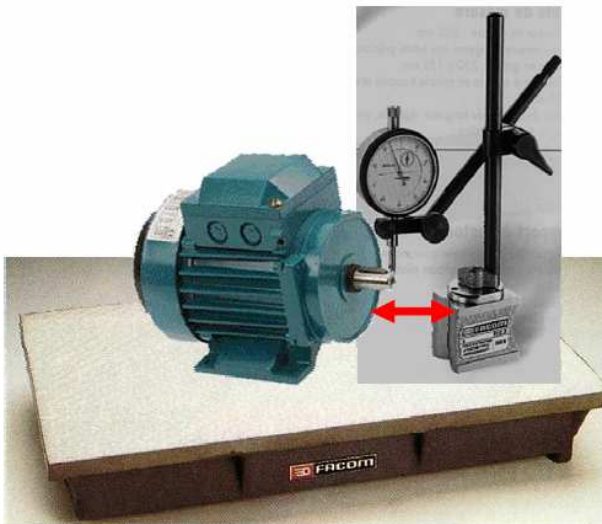
Le problème provient d'une déformation éventuelle de l'arbre

Méthode n°2 :

A l'aide du montage ci-contre, on va contrôler la déformation de l'arbre moteur.

- _ placer le comparateur perpendiculairement à l'arbre moteur.
- _ Faire appuyer le palper sur l'arbre
- _ Régler les aiguilles sur 0.

Faire glisser le palper lentement sur l'arbre et noter les valeurs extrêmes



Valeur attendue: déformation maxi 1/10 mm sur un tour de l'arbre



Le problème provient d'un jeu éventuel dû à l'usure des roulements.

b) Contrôles sensoriels:

Type de contrôle : Contrôle sensoriel (la vue, l'odorat, ouïe, le toucher)



Est-ce que la grille du ventilateur est propre?



Est-ce que l'arbre du moteur tourne correctement?



Est-ce le moteur fait un bruit suspect?

Valeur attendue:

- la grille du moteur est propre
- L'arbre moteur tourne correctement
- Le moteur ne fait pas de bruit suspect

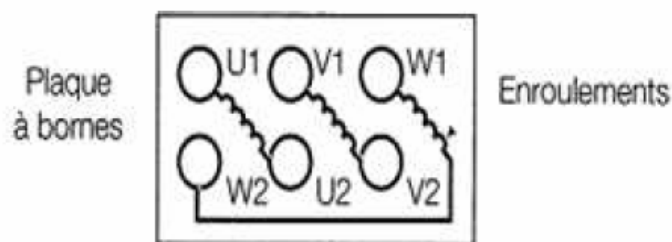
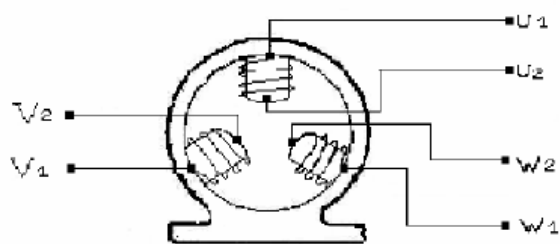
10-3 Contrôle électrique du moteur:

Pour contrôler électriquement un moteur asynchrone triphasé, il faut :

· Respecter les consignes de sécurité

a. Séparer l'alimentation électrique de la machine ;

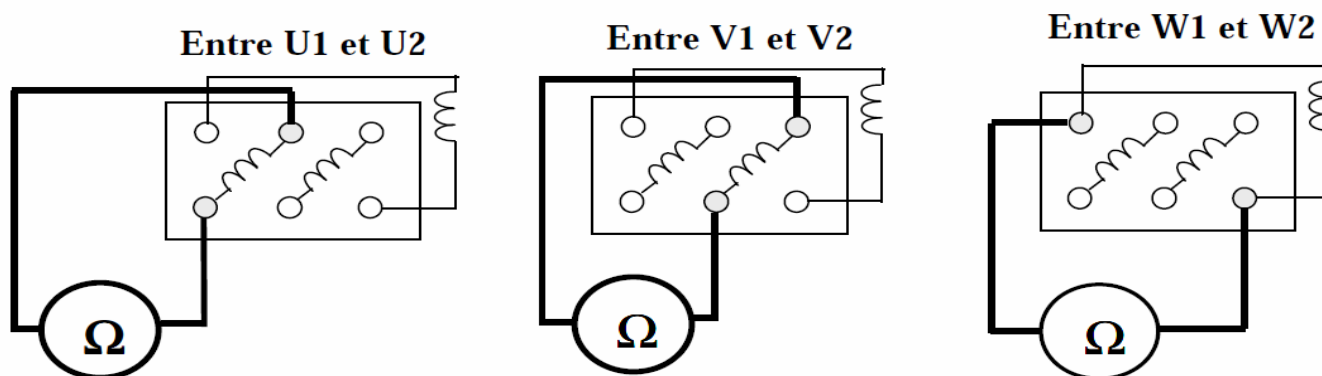
- b. Repérer et débrancher les fils d'alimentation (pour le sens de rotation) ;
- c. Repérer et enlever les barrettes de couplage.



Procéder à des contrôles électriques en 3 étapes :

a) Contrôle de continuité des bobinages:

Matériel utilisé : ohmmètre calibré sur une petite échelle (200W)



Résultats attendus :

résistance $\neq 0\Omega$,

Résistance $\neq \infty$,

Résistances identiques sur les 3 bobinages.

Une résistance nulle indique un court-circuit.

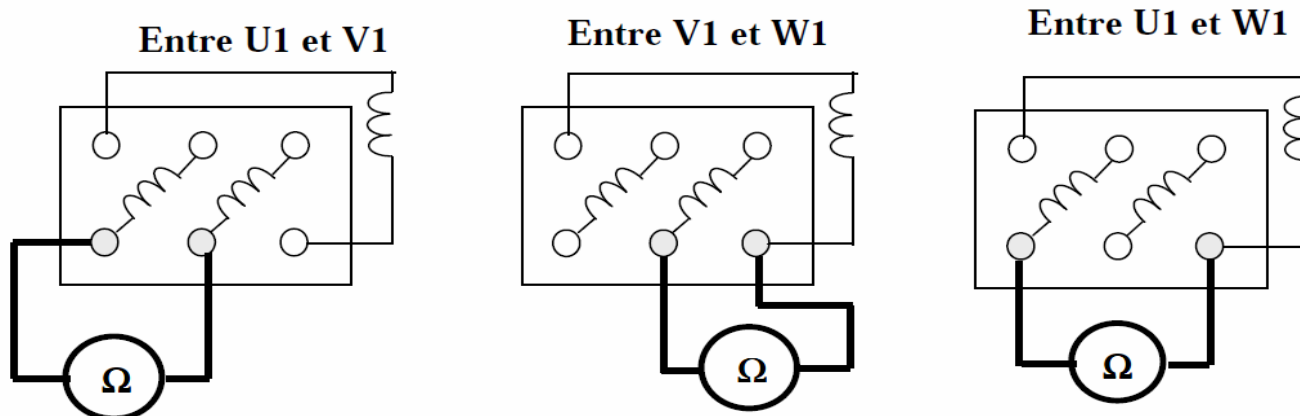
Une résistance infinie indique un bobinage coupé.

b) Contrôle d'isolement des bobinages entre eux:

Matériel utilisé : ohmmètre calibré sur une grande échelle (1 MW)

Résultats attendus : résistance très importante dépassant l'échelle (ici

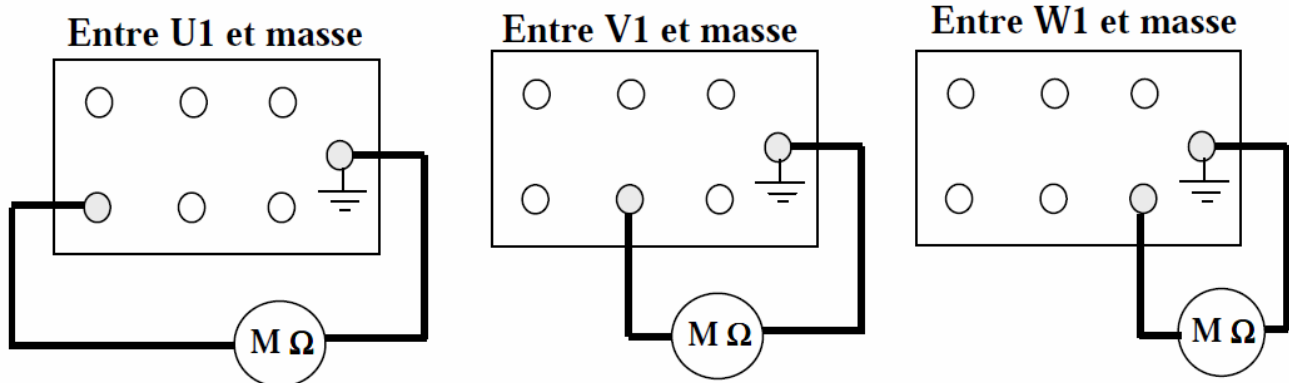
$R \geq 1 M\Omega$) pour les 3 mesures.



c) contrôle d'isolement entre les bobinages et la masse du moteur

_ S'assurer, à l'ohmmètre, que la borne de masse située à l'intérieur de la boîte à bornes est bien reliée à la masse du moteur : $R = 0 \Omega$ (attention à la peinture qui isole).

_ Matériel utilisé : mégohmmètre électronique ou à magnéto appelé aussi contrôleur d'isolement. Cet appareil délivre une tension de 500V obligatoire pour l'efficacité de la mesure.



Résultats attendus :

voir la fig. ci-contre ; une résistance très importante,

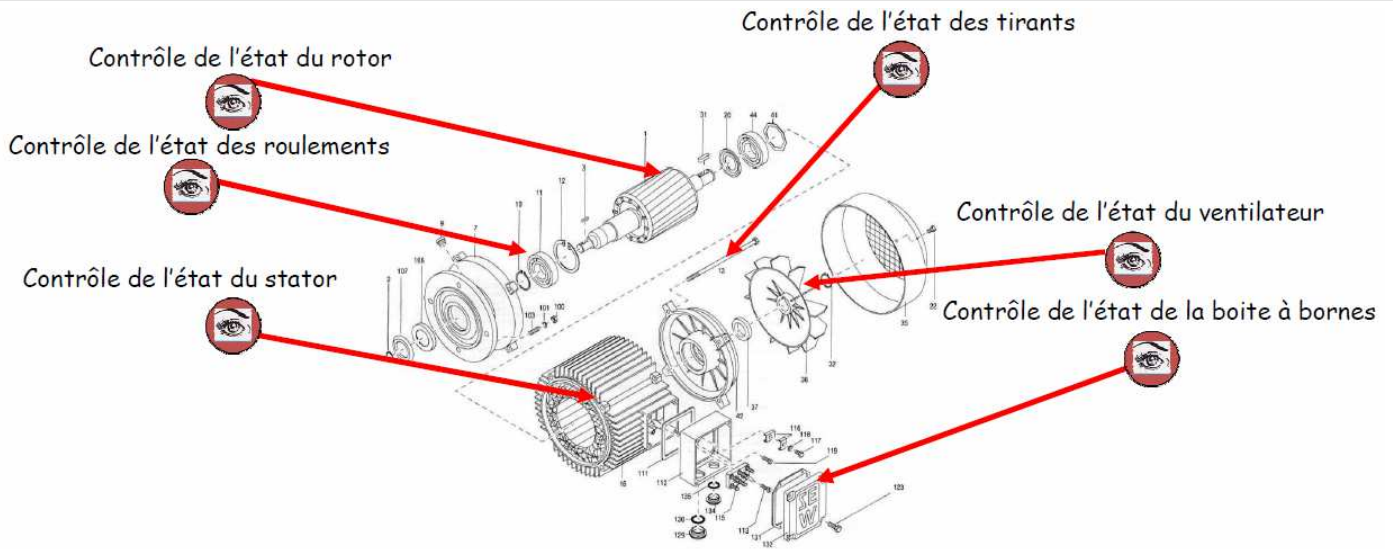
$\geq 5\ 000\Omega$ par volt, soit $1.9\ M\Omega$ pour un moteur branché en 380 V triphasé.

10-4 Contrôle après démontage :

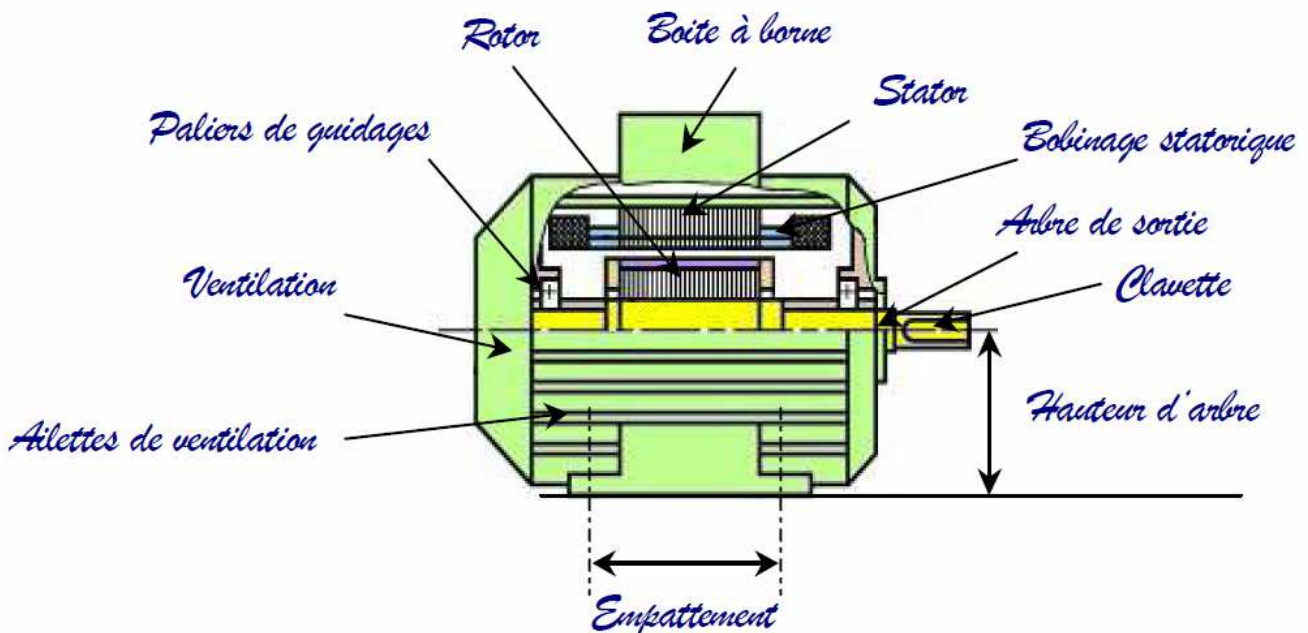
a) Contrôles sensoriels

Type de contrôle : Contrôle sensoriel (la vue, l'odorat, ouïe, le toucher)





Tous roulements démontés doivent être remplacés.



Valeur attendue: pas de trace de rupture, de frottement ou de détérioration
 10-5 Maintenance corrective:

Défaut	Causes possibles	Remède
Le moteur ne démarre pas	Alimentation coupée	Vérifier et corriger le raccordement
Le moteur ne démarre pas ou difficilement	Moteur prévu en démarrage triangle mais raccordé en étoile	Corriger le raccordement
Mauvais sens de rotation	Moteur mal raccordé	Inverser deux phases du réseau

Défaut	Causes possibles	Remède
Sous charge, vitesse fortement réduite	surcharge	Faire une mesure de puissance; si nécessaire installer un moteur plus grand ou réduire la charge
	Chute de tension	Augmenter la section du câble d'alimentation
Moteur trop chaud	Surcharge	Faire une mesure de puissance; si nécessaire installer un moteur plus grand ou réduire la charge
	Ventilation insuffisante	Dégager les couloirs de ventilation
	Température ambiante trop élevée	Respecter la plage de température autorisée
	Moteur branché en triangle et non en étoile	Corriger le raccordement
	Mauvais contact au niveau du câble d'alimentation (marche temporairement sur deux phases)	Supprimer le mauvais contact
Le moteur ronfle et absorbe beaucoup de courant	Le frein de déblocage pas (cas d'un moteur frein)	Débloquer le frein
	Bobinage défectueux Le rotor frotte	Ramener le moteur dans un établissement agréé pour réparation
Fusibles sautent ou disjonctent	Court-circuit dans les câbles d'alimentation	Éliminer le court-circuit
	Court-circuit dans le moteur	Faire éliminer le court-circuit dans un atelier agréé
	Câbles mal raccordés	Corriger le raccordement
	Défaut à la terre du moteur	Faire éliminer le court-circuit dans un atelier agréé

11- La maintenance préventive des transformateurs:

En amont des installations électriques, nous trouvons dans 95% des conceptions de distribution un ou plusieurs transformateurs. Les transformateurs de puissance assurent différentes fonctions, la principale est d'abaisser la tension du réseau de distribution HTA (1 à 50 kV) en basse tension. Ils peuvent également remplir d'autres fonctions comme : les transformateurs élévateurs, d'isolement, de démarrage (ou autotransformateurs), homopolaires...

Ces équipements sont de trois types :

- Type secs,
- Type Immergés hermétiques,
- Type immergés respirants.

Pour ces deux derniers types, l'ensemble des parties actives baigne dans un fluide diélectrique assurant plusieurs rôles :

- caloporteur,
- isolant électrique,
- vecteurs des composants de dégradation de l'appareil, ainsi en analysant le fluide, nous obtenons des informations sur :
 - o ses caractéristiques visant à répondre aux 2 rôles cités ci-dessus
 - o ET sur l'état des parties actives de l'appareil.



Les sinistres des transformateurs sont à l'origine de 50% des pertes d'exploitation dans l'industrie de production d'énergie, 10% dans l'industrie chimique, 7% dans les papeteries et 6% dans les entreprises commerciales¹.
Les pannes peuvent être d'origine électrique, électrodynamique, électromagnétique, diélectrique, thermique ou mécanique.

Une maintenance efficace des transformateurs est une des meilleures solutions pour :

- éviter le bris de machine pouvant engendrer un éventuel incendie ou une pollution pour les équipements contenant des PCB,
- planifier une intervention qui minimisera l'interruption de production en optimisant l'arrêt d'exploitation.

Ainsi il est recommandé d'effectuer plusieurs types de maintenance :

- SYSTEMATIQUE : contrôle visuel (propreté, corrosion, fuites), Nettoyage, Vérification des protections, des systèmes de ventilation, des régleurs, contrôles par thermographie infrarouge...

- ET PREVENTIVE comme les analyses d'huile qui permettent de vérifier les propriétés du fluide diélectrique et de détecter tout défaut naissant des parties actives (bobinage, circuit électrique, magnétique, régleur...) et des isolants cellulosesiques.

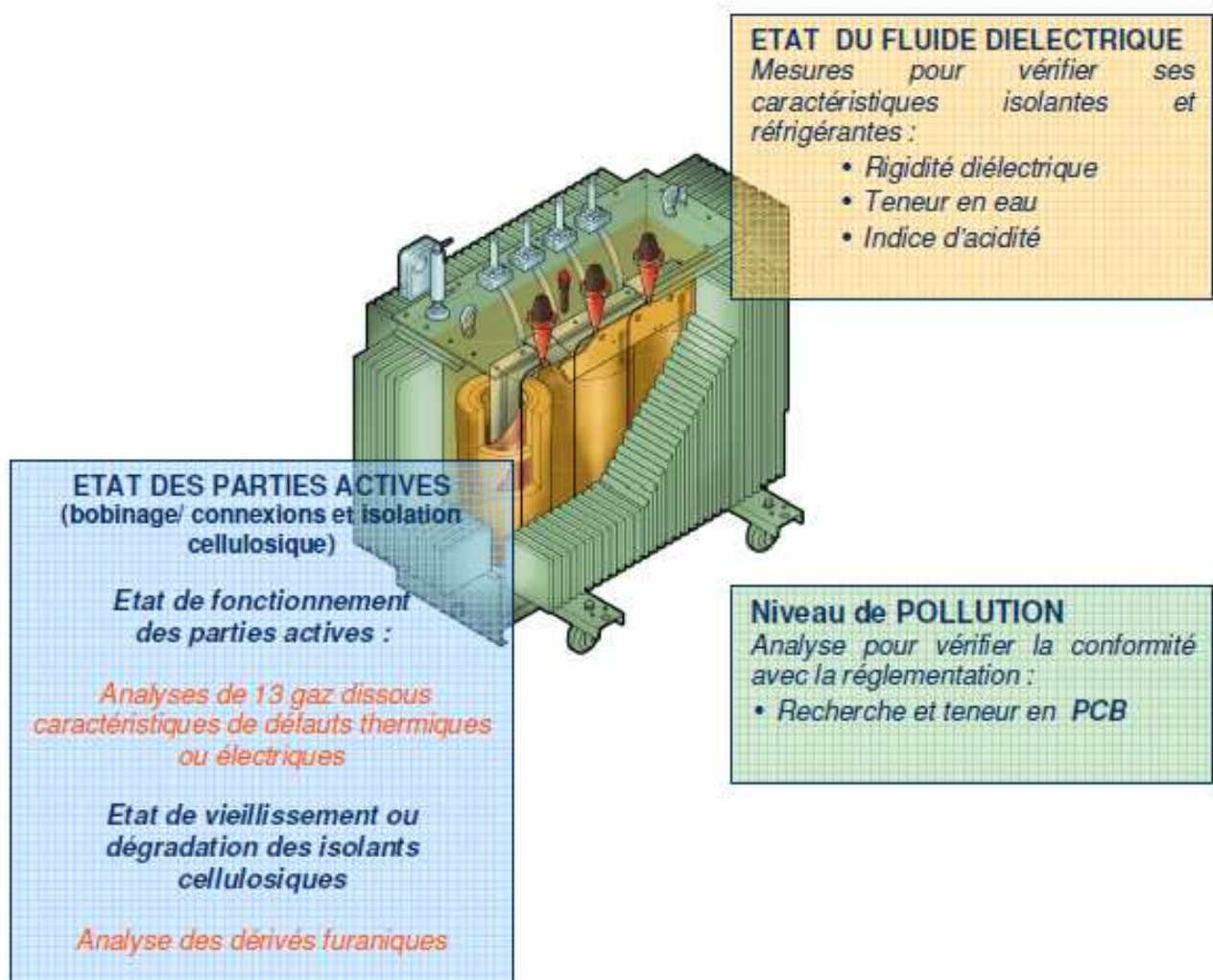
La connaissance de l'état de santé global de l'appareil apparaît également comme un outil de gestion prévisionnelle du parc permettant les programmations d'investissement sur la base de données factuelles.

11-1 Le diagnostic d'un transformateur:

Le transformateur est un équipement stratégique. Son diagnostic d'état est réalisé :

- sur un prélèvement du fluide diélectrique, de gaz ou de papier
- en interprétant les résultats des analyses physico-chimiques pertinemment choisies.

L'ensemble des analyses réalisables peuvent être classées en trois grandes familles comme illustré ci-dessous:



11-1-1 La chromatographie des gaz dissous:

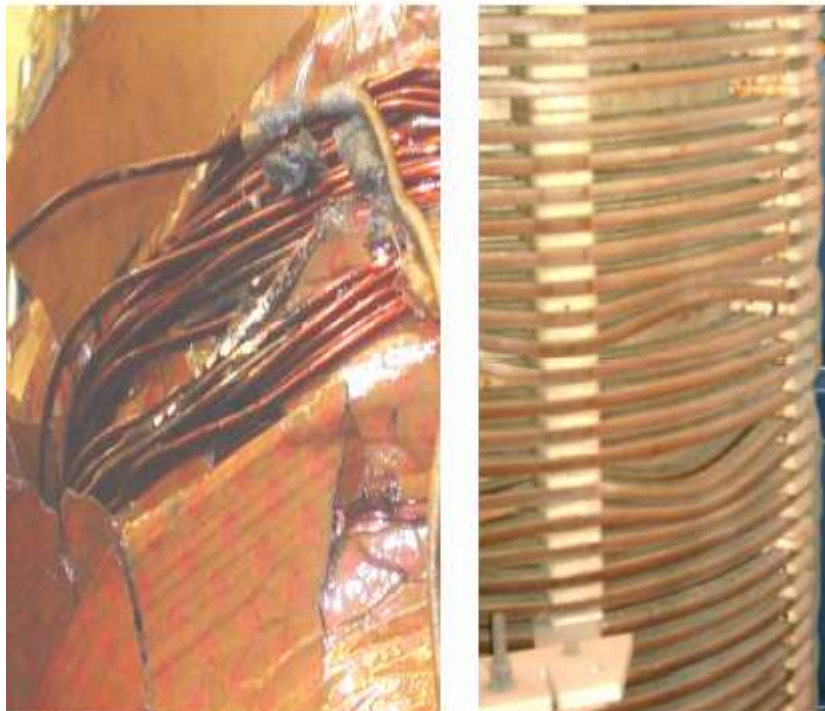
Elle seule permet de détecter précocement un dysfonctionnement des parties actives de l'appareil (défauts thermiques, défauts électriques).

Tout fonctionnement anormal (défaut thermique ou électrique) génère la production de gaz caractéristiques dissous dans le fluide diélectrique dans des proportions et concentrations connues comme anormales. Le fluide est considéré comme la mémoire des événements intervenus sur l'appareil. Ainsi, à partir d'un prélèvement du fluide, en analysant les 13 gaz caractéristiques, à partir de leurs concentrations, proportions respectives et vitesse de production, nous sommes capables d'interpréter le phénomène ou défaut à l'origine de leurs créations.

Point chaud sur une liaison traversée bobine



Arc électrique au sein du bobinage (avec effort électrodynamique) :



Point chaud sur un commutateur à vide



11-1-2 Les dérivés furaniques:

Lorsque les isolants cellulosiques se dégradent, il y a production de composés spécifiques nommés « dérivés furaniques » dissous dans l'huile.

Ainsi à partir d'un échantillon d'huile, il est possible d'avoir une information sur le niveau de dégradation des isolants.

Cette analyse permet de diagnostiquer la dégradation éventuelle de la matière cellulosique (en particulier les papiers de guipage des bobines). Nous sommes capables de distinguer :

- une dégradation homogène du papier liée à un vieillissement de l'appareil
- d'une dégradation localisée par défaut thermique.

Cette analyse est réalisée généralement sur les appareils de 20 ans et plus ou ceux pour lesquels, d'autres résultats d'analyses font présumer d'une dégradation.

11-1-2 Le degré de polymérisation:

Lorsque les isolants cellulosiques se dégradent, il y a décomposition de la cellulose par rupture des liaisons intramoléculaires qui se traduit par une baisse du degré de polymérisation.

Ainsi à partir d'un échantillon de papier, il est possible d'avoir une information sur le niveau de dégradation des isolants.

Cette analyse est généralement faite lors d'un décuivage étant données les contraintes inhérentes au prélèvement. La représentativité de l'échantillon prélevé constitue également une limite à l'interprétation.

En revanche, cette analyse est la mesure directe du niveau de dégradation.

Dégradation généralisée de l'isolation cellulosique



11-1-3 Le soufre corrosif:

La présence de composés soufrés corrosifs contenus dans certaines huiles isolantes, en contact avec les matériaux métalliques du transformateur, peut entraîner la détérioration de ces derniers à un niveau qui dépend de leur quantité, de la durée du contact et de la température.

La détection du soufre corrosif permet donc d'identifier cette source de défaillance de l'appareil.

L'analyse du soufre corrosif est réalisée suivant la norme CEI 62535 (2008).

Exemple de feuille de cuivre sans attaque Huile Non Corrosive (Couleur : orangée)



Exemple de feuille de cuivre attaquée par du soufre corrosif Huile Corrosive (Couleur : grisée)



11-1-4 La rigidité diélectrique:

Elle permet de vérifier si le fluide possède toujours de bonnes propriétés d'isolation (certains contaminants pouvant affecter cette propriété).

11-1-5 La teneur en eau:

Cette analyse permet de quantifier la concentration de l'eau dans le fluide due à la dégradation des composants internes (papiers, fluide lui-même) et aux influences extérieures (migration d'humidité atmosphérique).

11-1-6 L'indice acidité:

C'est le marqueur de la dégradation chimique du fluide et éventuellement de la matière cellulosique par vieillissement de type oxydation (accéléré par les catalyseurs spécifiques tels que le cuivre).

11-1-7 La tangente Delta:

Il s'agit d'une mesure très sensible aux contaminants polaires qui souillent le fluide par suite de la dégradation des composants internes (ex : particules, résidus de carbone conducteur, métaux, incompatibilité de certains matériaux), ou d'influences extérieures (migration de poussières etc..).

En ce qui concerne l'opportunité d'effectuer ce test pour contrôler la qualité du fluide des TI-TP, celui-ci ne sera réalisé qu'après avoir pris connaissance de la valeur de la rigidité diélectrique, celle-ci constituant un premier tri discriminatoire c'est-à-dire :

- Une rigidité trop faible conduit à un changement du fluide.
- Une rigidité correcte conduit à garder ce fluide.
- Une rigidité moyenne conduit à une décision de changer ou surveiller ou encore garder ce fluide seulement après examen de la tangente delta.

L'association rigidité - tangente delta nous paraît être un critère suffisant pour évaluer correctement la qualité du fluide pour ce type d'appareil.

11-1-8 La coloration et l'aspect:

La coloration peut traduire le phénomène d'oxydation du fluide (corrélable avec l'indice d'acidité) ou l'incompatibilité avec des matériaux.

11-1-9 Le comptage des particules:

Cette analyse consiste à quantifier par leur taille les particules dues à la dégradation des composants internes (papiers, métaux, etc...) et aux influences extérieures (migration des poussières).

11-1-10 La recherche des métaux:

Elle permet de quantifier les métaux et les composants inorganiques dus à la détérioration, la corrosion, la fusion des éléments internes ainsi qu'à des influences extérieures (migration des poussières, présence de composants siliconés, ..).

Remarque : Avant l'analyse des métaux proprement dite, nous conseillons de procéder à une filtration permettant d'observer au microscope le dépôt éventuel obtenu et ainsi de se faire une idée plus précise sur la présence de métaux, de fibres, poussières, d'éclats métalliques,...

11-1-11 Les dépôts et sédiments dans le fluide:

Cette analyse consiste à évaluer la masse des dépôts et sédiments par unité de volume du fluide (gravimétrie). Une filtration est pratiquée et le dépôt sur le filtre est observé au microscope.

11-1-12 La viscosité:

La viscosité peut être évaluée (soit viscosité cinématique, soit viscosité dynamique) pour caractériser l'évolution de cette propriété du fluide (par rapport au fluide neuf), celle-ci devant rester compatible avec le bon échange thermique de l'appareil.

11-1-13 La tension interfaciale:

Cette analyse permet d'évaluer principalement l'état d'oxydation du fluide (applicable essentiellement aux huiles). Ce n'est pas le meilleur test pour suivre l'oxydation du fluide car, à un certain niveau, la tension interfaciale n'évolue plus.

11-1-14 Le point éclair:

Cette analyse permet d'évaluer la présence de substances volatiles dans le fluide (pollution par substances volatiles ou création de substances volatiles par une dégradation du fluide)

11-1-15 Le dosage des additives:

Il s'agit d'additifs anti-oxydant en particulier dans une huile minérale

La recherche de PCB (ou d'Ugilec, de trichlorobenzènes,...) dans les huiles minérales

Cette analyse permet de quantifier la contamination éventuelle de l'huile par des PCB due à une manipulation, compléments non appropriés, une présence initiale (appareils anciens).




11-2 Recommandations de maintenance des transformateurs de Puissance:

Tableau de synthèse d'entretien:

Nature travaux et contrôle	Moyen	Périodicité
- <u>Visite d'inspection</u>		
. Détection des fuites, bruits anormaux, échauffements	Visuel ou auditif	Mensuelle
. Surveillance des niveaux	Visuel	Mensuelle
- <u>Entretien des radiateurs aéroréfrigérants et hydroréfrigérants</u>		
. Nettoyage des échangeurs	Air ou eau sous pression	Annuelle
. Nettoyage du faisceau	Mécanique ou chimique	Annuelle
. Moto ventilateur	Contrôle vibrations	Sur défaut
- <u>Entretien des traversées HT-MT-BT et Parafoudre</u>	Contrôle visuel	Annuelle
- <u>Entretien de l'armoire électrique des auxiliaires</u>	Contrôle visuel	Annuelle
- <u>Entretien des assécheurs d'air</u>	Remplacement Silicagel	Annuelle
- <u>Analyses de l'huile diélectrique</u>		
a) Physico-chimique	Prélèvement	Annuelle
b) Analyse des gaz dissous... (chromatographie)	Prélèvement puis transmission au laboratoire spécialisé	Annuelle
c) Détection du furfural et de ses dérivés	Prélèvement puis transmission au laboratoire	2 ans
- <u>Manœuvre du commutateur hors tension</u>	Manuel	Annuelle
- <u>Changeur de prises en charge</u>		
. Analyse d'huile		Annuelle
. Contrôle du fonctionnement et sécurités		Annuelle
. Révision complète du régleur avec échange des pièces	Constructeur	50 000 manœuvres ou 5 ans ;100 000 manœuvres si le circuit est filtré en permanence
- <u>Contrôle des connexions haute et basse tensions</u>	Thermographie	Annuelle
- <u>Protections transformateurs</u>		Annuelle
. Thermostats		Annuelle
. Buchholz		Annuelle
. Relais RS 2000 ou 2001		Annuelle

Nature travaux et contrôle	Moyen	Périodicité
<ul style="list-style-type: none">. Contrôle circulation d'huile. Niveau d'huile. Circuits de refroidissement. Colmatage filtre. Pompe régleur- <u>Autres travaux d'entretien</u><ul style="list-style-type: none">. Traitement d'huile. Changement d'huile. Peinture cuve et tuyauterie		<p>Annuelle</p> <p>Mensuel</p> <p>Annuelle</p> <p>Annuelle</p> <p>Annuelle</p> <p>Suivant analyse</p> <p>Suivant analyse</p> <p>Retouches annuelles</p>

BIBLIOGRAPHIE

- ✓ Guide de référence sur l'efficacité énergétique des moteurs 
- ✓ Cours de Physique appliquée – Génie Electrotechnique –
- ✓ Recommandations de maintenance des transformateurs de Puissance

- ✓ Transformateur de puissance 
- ✓ Cours électrotechnique niveau 3 les transformateurs 2010-2011