



**OFPPT**

**ROYAUME DU MAROC**

**مكتب التكوين المهني وإنعاش الشغل**

**Office de la Formation Professionnelle et de la Promotion du Travail**

**DIRECTION RECHERCHE ET INGENIERIE DE FORMATION**

**RESUME THEORIQUE  
&  
GUIDE DE TRAVAUX PRATIQUES**

**MODULE N°:16**

**INSTALLATION ET  
ENTRETIEN DES MACHINES A  
COURANT ALTERNATIF**

**SECTEUR : ELECTROTECHNIQUE**

**SPECIALITE : MMOAMPA**

**NIVEAU : TECHNICIEN SPECIALISE**

**ANNEE 2007**

**Document élaboré par :**

**Nom et prénom**

**EFP**

**DR**

Mme ELKORNO NAIMA

CDC - GE

**Révision linguistique**

- 
- 
- 

**Validation**

- 
- 
-

## SOMMAIRE

RESUME THEORIQUE .....	8
I. Les transformateurs : .....	9
I.1. définitions : .....	9
I.2. Symboles .....	10
I.3. Constitution .....	10
I.4. Théorie élémentaire .....	11
I.5. Fonctionnement du transformateur parfait .....	15
I.5.1. Définitions et équations du transformateur parfait.....	15
I.5.2. Diagramme de fonctionnement et bilan de puissances.....	17
I.5.3. Intérêt et limite de la théorie du transformateur parfait.....	17
I.6. Modèle du transformateur réel .....	20
I.6.1. Prise en compte du courant magnétisant $I_0$ :.....	20
I.6.2. prise en compte des résistances et de la topographie réelle du champ 21	
I.6.3. L'approximation de Kapp : .....	22
I.6.4. Chute de tension en charge : .....	24
I.6.5. Pertes et rendement : .....	26
I.6.6. Rendement du transformateur .....	27
I.7. Etude expérimentale du transformateur .....	29
I.7.1. Essai à vide sous tension nominale .....	29
I.7.2. Essai en court-circuit à courant secondaire nominal sous tension primaire réduite .....	30
I.7.3. Essai en charge : .....	31
I.8. Exercices : .....	32
I.9. Transformateur triphasé .....	36
I.9.1. Types de transformateurs triphasés.....	36
I.9.2. Fonctionnement en régime équilibré .....	37
I.9.3. Fonctionnement en régime déséquilibré .....	43
I.9.4. Indice horaire .....	48
I.9.5. Couplage en parallèle de deux transformateurs.....	50
I.9.6. Dispositifs de refroidissement d'un transformateur .....	51
I.9.7. exercice.....	52
II. Les moteurs asynchrones triphasés.....	53
II.1. Interprétation des différents schémas électriques et des différentes commandes : .....	53
II.1.1. Normalisation des symboles et classification des différents schémas électriques.....	53
II.1.2. Organes et appareillages de commande : .....	62
II.1.3. Marquage des bornes de l'appareil .....	65
II.1.4. Commande d'un contacteur .....	71
II.2. Les éléments de protection des actionneurs électriques.....	74
II.3. Les mesures de protection .....	77
II.4. Analyse de fonctionnement des moteurs asynchrones triphasés : .....	78
II.4.1. Constitution : .....	78
II.4.2. Principe de fonctionnement.....	80
II.4.3. Grandeurs caractéristiques : .....	81

II.4.4.	Couplage au réseau et inversion du sens de rotation : .....	82
II.4.5.	Le bilan énergétique.....	83
II.4.6.	Exercice .....	86
II.5.	Démarrage semi-automatique des moteurs asynchrones triphasés .....	88
II.5.1.	Démarrage direct .....	88
II.5.2.	Démarrage étoile triangle .....	92
II.5.3.	Démarrage par élimination de résistances statoriques .....	96
II.5.4.	Démarrage par autotransformateur.....	100
II.5.5.	Démarrage par élimination de résistances rotoriques.....	104
II.6.	Les différents types de moteurs à double vitesse et leurs systèmes de commande .....	108
II.6.1.	Moteur asynchrone triphasé à deux vitesses par couplage des enroulements du stator.....	108
II.6.2.	Moteur asynchrone triphasé à deux vitesses par enroulements indépendants.....	113
II.7.	Freinage des moteurs asynchrones triphasés.....	115
II.7.1.	Freinage par électro-frein .....	115
II.7.2.	Freinage par contre-courant.....	116
II.7.3.	Freinage par injection de courant continu .....	118
III.	Les moteurs synchrones triphasés.....	119
IV.	Fonctionnement des Moteurs asynchrones monophasés : .....	121
V.	Les procédures de vérification des moteurs asynchrones.....	124
V.1.	Vérification électrique .....	124
V.2.	Vérifications mécaniques .....	126
V.3.	Diagnostic .....	129
	<b>GUIDE DE TRAVAUX PRATIQUES.....</b>	<b>131</b>
	TP1 - Transformateur monophasé.....	132
	TP2 - Transformateur triphasé – couplages du primaire et du secondaire ..	137
	TP3 - démarrage direct d'un moteur asynchrone triphasé à cage .....	138
	TP4 - Démarrage étoile-triangle d'un moteur asynchrone triphasé à cage ..	142
	TP5 - démarrage par élimination de résistances statoriques d'un moteur asynchrone triphasé à cage.....	147
	TP6 - démarrage par auto - transformateur d'un moteur asynchrone triphasé à cage.....	151
	TP7 - démarrage par élimination des résistances rotoriques d'un moteur asynchrone triphasé à rotor bobine .....	153
	TP8 - freinage par injection de courant continu d'un moteur asynchrone triphasé.....	157
	TP9 - essais d'un moteur asynchrone triphasé.....	159
	<b>EVALUATION DE FIN DE MODULE .....</b>	<b>164</b>

**MODULE 16: INSTALLATION ET ENTRETIEN DES MACHINES A  
COURANT ALTERNATIF**

Code :

Durée : 90 h

**OBJECTIF OPÉRATIONNEL DE PREMIER NIVEAU  
DE COMPORTEMENT**

**COMPORTEMENT ATTENDU**

*Pour démontrer sa compétence le stagiaire doit  
**Installer et entretenir des moteurs à courant alternatif et leurs  
dispositifs de commande ainsi que les transformateurs.**  
Selon les conditions, les critères et les précisions qui suivent.*

**CONDITIONS D'ÉVALUATION**

- A partir :
  - de directives ;
  - du schéma d'un dispositif de commande ;
  - d'un problème de fonctionnement provoqué
- A l'aide :
  - des manuels techniques ;
  - d'un moteur à courant alternatif et de son circuit de commande ;
  - de l'équipement, de l'outillage et du matériel appropriés.

**CRITERES GENERAUX DE PERFORMANCE**

- *Respect des règles de santé et de sécurité au travail*
- *Respect des normes en vigueur*
- *Utilisation appropriée des outils et des instruments de mesure*
- *Respect des techniques de travail*

**OBJECTIF OPERATIONNEL DE PREMIER NIVEAU  
DE COMPORTEMENT**

**PRECISIONS SUR LE  
COMPORTEMENT ATTENDU**

**CRITERES PARTICULIERS DE  
PERFORMANCE**

- |   |  |
|---|--|
| <b>A)</b> Analyser le fonctionnement d'un transformateur monophasé et triphasé  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Analyse correcte des paramètres de fonctionnement</li> <li>- Exploitation correcte des différentes caractéristiques</li> </ul>  |
| <b>B)</b> Interpréter les différents schémas électriques et distinguer les différentes commandes                                    | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Interprétation correcte des symboles utilisés en électrotechnique</li> <li>- Interprétation correcte des schémas électriques</li> <li>- Analyse fonctionnelle des appareils et organes de commande</li> </ul> |
| <b>C)</b> Différencier et raccorder les éléments de protection des actionneurs électriques  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Analyse fonctionnelle des différents appareils de protection</li> </ul>   |
| <b>D)</b> Interpréter et connaître les caractéristiques essentielles du moteur électrique   | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Interprétation correcte des différentes caractéristiques de couple et de vitesse en fonction de la charge pour les différents types de moteur</li> </ul>  |
| <b>E)</b> Analyser et câbler les circuits de commande et de puissance d'un moteur asynchrone triphasé à cage et du moteur synchrone | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Analyse fonctionnelle du fonctionnement du moteur asynchrone triphasé à cage et de ses différents démarrages</li> </ul>   |
| <b>F)</b> Analyser et câbler les circuits de commande et de puissance d'un moteur monophasé   | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Analyse fonctionnelle du fonctionnement du moteur asynchrone monophasé et de ses différents éléments de démarrage</li> </ul>  |
| <b>G)</b> Analyser et câbler les circuits de commande et de puissance d'un moteur triphasé à bagues                                 | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Analyse fonctionnelle du fonctionnement du moteur asynchrone triphasé à bagues et de ses différents démarrages</li> </ul>   |
| <b>H)</b> Distinguer les différents types de moteurs à double vitesse et leurs systèmes de commande                                 | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Analyse fonctionnelle du fonctionnement du moteur à double vitesse et de son raccordement</li> </ul>  |

- |   |   |
|---|---|
| <p>I) Etudier et réaliser des systèmes de freinage des moteurs à courant alternatif</p>       | <p>- Analyse fonctionnelle des différents types de freinage</p>   |
| <p>J) Enumérer les perturbations les plus fréquentes sur les moteurs à courant alternatif</p> | <ul style="list-style-type: none"><li>- Vérification minutieuse et complète de l'équipement</li><li>- Justesse du diagnostic</li><li>- Choix judicieux des correctifs à apporter</li><li>- Mise en marche appropriée et sécuritaire de l'équipement</li></ul> |

## **PRESENTATION DU MODULE**

*L'objectif de module est de faire acquérir les connaissances relatives aux divers types de moteurs à courant alternatif, à l'interprétation des dispositifs de commande, au diagnostic de fonctionnement ainsi qu'au remplacement de composants défectueux. Il vise aussi à donner au stagiaire les connaissances nécessaires sur la construction et les caractéristiques des transformateurs monophasés et triphasés. Il vise donc à rendre le stagiaire apte à installer et entretenir des machines à courant alternatif.*

**MODULE 16: INSTALLATION ET ENTRETIEN DES MACHINES  
A COURANT ALTERNATIF**

**RESUME THEORIQUE**

## I. Les transformateurs :

### I.1. définitions :

Un tel appareil représente un **quadripôle**, c'est-à-dire un circuit muni de quatre bornes (ou pôles) (fig. 1-1) :

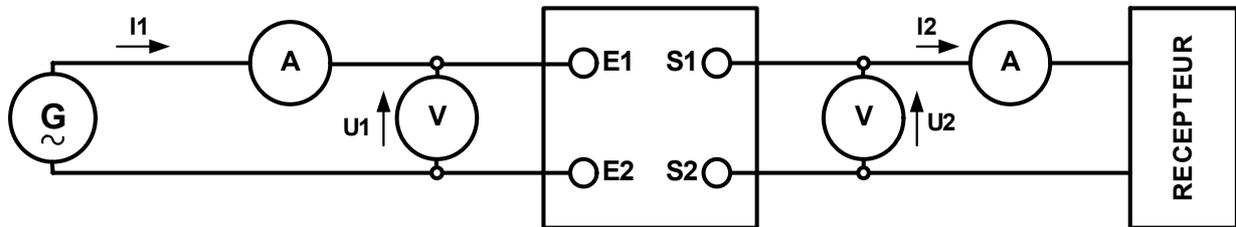


Fig. 1-1

- une première paire de bornes,  $E_1$  et  $E_2$ , constitue **l'entrée** ;
- une seconde paire de bornes,  $S_1$  et  $S_2$ , constitue **la sortie**.

Le transformateur **reçoit** de la puissance, entre ses bornes d'entrée, de la part du générateur qui l'alimente. C'est le côté primaire de l'appareil. Il **restitue** presque intégralement cette puissance au récepteur (dit charge du transformateur) branché entre ses bornes de sortie. C'est le côté secondaire. Autrement dit, son **rendement** est excellent.

Si  $I_1$  et  $I_2$  sont des valeurs efficaces des courants sinusoïdaux circulant, d'une part entre  $E_1$  et  $E_2$  et d'autre part entre  $S_1$  et  $S_2$ , on a sensiblement :

$$U_1 \cdot I_1 = U_2 \cdot I_2$$

Si  $U_1 > U_2 \Rightarrow I_1 < I_2$  , le transformateur est alors :

- élévateur de tension,
- abaisseur de courant.

Si  $U_1 < U_2 \Rightarrow I_1 > I_2$  , le transformateur est alors :

- abaisseur de tension,
- élévateur de courant.

Comme tout appareil électrique, chaque transformateur est spécialement calculé pour fonctionner :

- sous une tension primaire  $U_{1n}$ ,
- en absorbant un courant voisin d'une valeur  $I_{1n}$ .

Les valeurs  $U_{1n}$  et  $I_{1n}$  sont appelées les **valeurs nominales** et leur produit  $S_n = U_{1n} \cdot I_{1n}$  est la **puissance apparente nominale** de l'appareil.

La **plaque signalétique**, fixée sur le transformateur, indique, en particulier, les valeurs de  $S_n$ ,  $U_{1n}$  et  $U_{2n}$  (la valeur de la tension secondaire nominale).

## I.2. Symboles

Pour les schémas on utilise les représentations symboliques sur la fig. 1-2. Pour les transformateurs triphasés il est nécessaire d'indiquer le type de couplage au primaire et au secondaire.

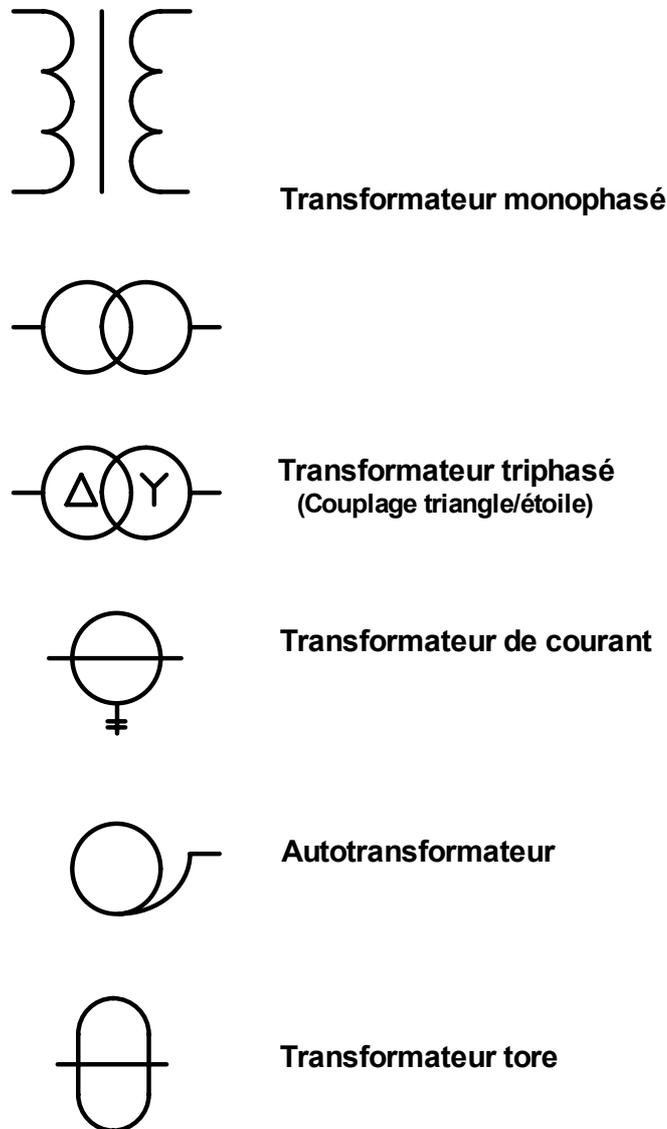


Fig. 1-2

## I.3. Constitution

Un transformateur monophasé (fig. 1-3) est constitué de deux enroulements non liés électriquement, mais enlaçant un même circuit magnétique, c'est-à-dire couplés magnétiquement entre eux.

Le circuit magnétique est un ensemble fermé comportant souvent deux noyaux (ou colonnes) et deux culasses (ou traverses) réunissant les noyaux.

Le circuit magnétique est le siège d'un champ magnétique sinusoïdal, ce qui entraîne des pertes magnétiques (exprimées en watts), par courant de Foucault et celles dues à l'hystérésis.

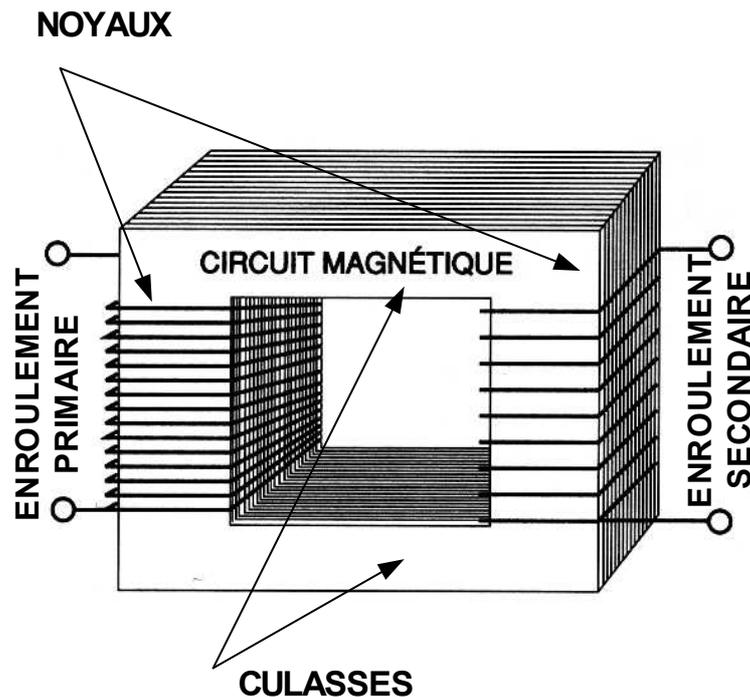


Fig. 1-3

Les enroulements sont repartis sur les noyaux : le **primaire** est relié aux bornes d'entrée et se comporte comme un récepteur ; le **secondaire** est relié aux bornes de sortie et se comporte comme un générateur.

Etant donné que le transformateur est le siège de deux types de pertes : magnétiques dans les tôles du circuit magnétique et par effet Joule dans le cuivre des enroulements, cette puissance électrique consommée et non restituée à la charge apparaît sous forme de chaleur au sein du transformateur. Cette chaleur doit être entièrement évacuée vers l'extérieur pour empêcher la détérioration des isolants. Il faut prévoir un dispositif de refroidissement.

#### **1.4. Théorie élémentaire**

Il faut préciser d'abord que toutes les grandeurs relatives au primaire sont affectées de l'indice 1 (nombre de spires  $N_1$ , ...) et au secondaire sont affectées de l'indice 2 (nombre de spire  $N_2$ , ...).

- Conventions de signes et hypothèses simplificatrices :

Afin de mettre en évidence les différents sens le transformateur est représenté (fig. 1-4) avec les enroulements primaire et secondaire disposés sur un seul noyau et séparés l'un de l'autre (ce qui ne correspond pas à la réalité technologique). Le sens positif choisi pour exprimer le champ magnétique  $B$  dans les tôles est celui lorsque les lignes de champ, dans la colonne gauche, seront dirigées vers le haut.

A l'aide de la règle du tire-bouchon, on déduit du choix précédent les sens positifs des courants primaire  $i_1$  et secondaire  $i_2$ .

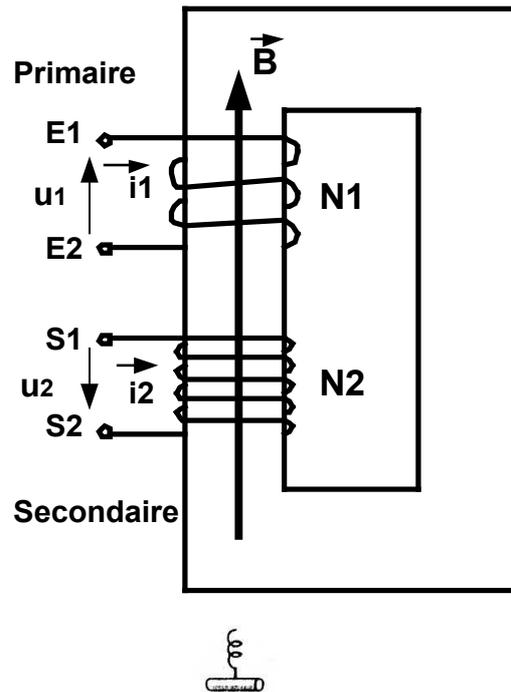


Fig. 1-4

On adopte enfin les sens positifs des tensions primaire  $u_1$  (fonctionne en récepteur) et  $u_2$  (fonctionne en générateur).

On suppose que les résistances  $R_1$  et  $R_2$  du primaire et du secondaire sont suffisamment faibles pour avoir les chutes de tension  $i_1.R_1$  et  $i_2.R_2$  négligeables devant les tensions  $u_1$  et  $u_2$  ( $R_1 = R_2 = 0$ ).

On suppose que le champ magnétique  $B$ , créé par les courants  $i_1$  et  $i_2$ , est constitué de lignes de champ parfaitement canalisées par les tôles, c'est-à-dire traversant les  $N_1$  spires du primaire et les  $N_2$  spires du secondaire.

Si le flux à travers chacune des spires est représenté par  $\Phi$ , on a le flux total à travers le primaire est  $\Phi_1 = N_1 \cdot \Phi$  et à travers le secondaire  $\Phi_2 = N_2 \cdot \Phi$ .

- Constance du champ magnétique et équilibre des f.m.m.

Prenons la tension sinusoïdale appliquée entre les bornes du primaire :

$$u_1 = U_1 \sqrt{2} \cos \omega t$$

Puisque la résistance est nulle, la loi d'Ohm s'écrit le long de l'enroulement primaire (fig. 1-5) :

$$u_1 = - e_1$$

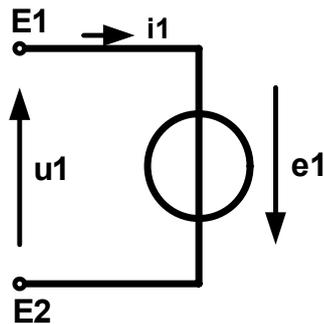


Fig. 1-5

$e_1$  étant la f.é.m. induite dans les spires du primaire par le champ magnétique existant dans les tôles. Mais :

$$e_1 = - d\Phi_1/dt = -d(N_1 \cdot \Phi)/dt = - N_1 \cdot d\Phi/dt$$

Donc :

$$u_1 = U_1 \sqrt{2} \cos \omega t = N_1 \cdot d\Phi/dt$$

$$d\Phi/dt = (U_1 / N_1) \cdot \sqrt{2} \cos \omega t$$

D'où :

$$\Phi = (U_1 / \omega \cdot N_1) \sqrt{2} \cos (\omega t - \pi/2)$$

Si l'aire de la section du noyau est  $s$ , on a  $\Phi = b \cdot s$ , d'où :

$$b = (U_1 / \omega \cdot s \cdot N_1) \sqrt{2} \cos (\omega t - \pi/2)$$

Le champ magnétique dans les tôles est **sinusoïdal** avec **la même pulsation**  $\omega$  que la tension primaire  $u_1$  et **son déphasage** par rapport  $u_1$  est de  $-\pi/2$  (quadrature en arrière).

**Son amplitude** (valeur maximale) a pour expression :

$$B_m = (U_1 / \omega \cdot s \cdot N_1) \cdot \sqrt{2}$$

Pour un transformateur donné (c'est-à-dire  $N_1$  et  $s$  fixés) les trois caractéristiques du champ  $b$  ne dépendent que de la tension  $u_1$  appliquée au primaire.

Si l'appareil est toujours alimenté par le même réseau, **le champ magnétique garde la même expression quel que soit le récepteur branché au secondaire**. C'est ce qu'on appelle la **constance du champ magnétique**.

Le champ magnétique  $b$  est créé par le courant  $i_1$  circulant dans les  $N_1$  spires du primaire et le courant  $i_2$  circulant dans les  $N_2$  spires du secondaire, autrement dit par la force magnétomotrice (f.m.m.) totale

$$N_1 \cdot i_1 + N_2 \cdot i_2$$

Comme le champ  $b$  reste toujours le même quel que soit le courant  $i_2$  débité, il en est de même de la grandeur qui le provoque. Pour une tension primaire  $u_1$  donnée la **force magnétomotrice totale**  $N_1 \cdot i_1 + N_2 \cdot i_2$  **garde toujours la même expression**.

Considérons les deux fonctionnements de l'appareil :

- Transformateur à vide ( $i_2 = 0$ )

Il absorbe au primaire un courant très faible (fig. 1-6a), appelé **courant à vide**,  $i_0$ . La f.m.m. donnant naissance au champ se réduit à  $N_1 \cdot i_0$ .

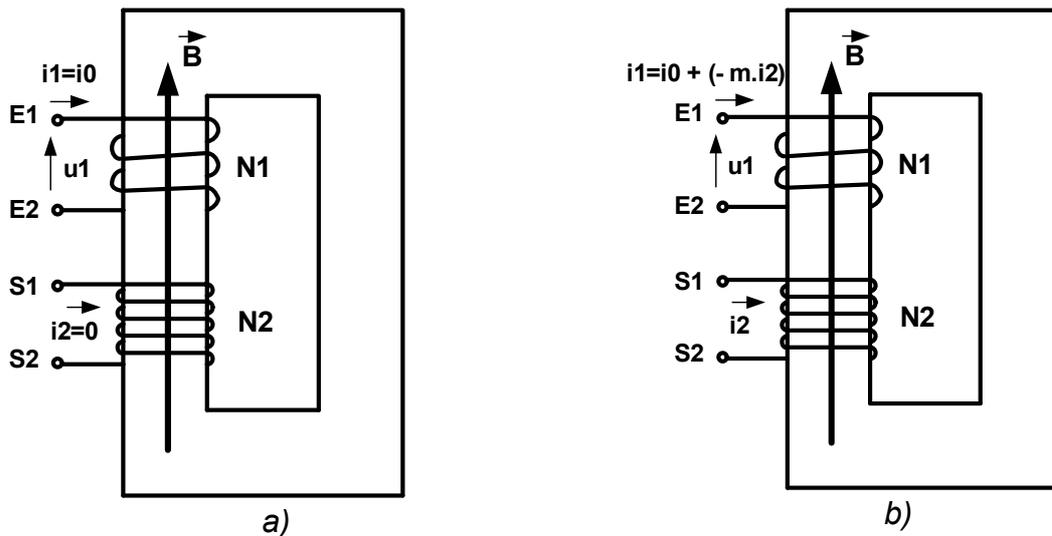


Fig. 1-6

- *Transformateur en charge*

La f.m.m. donnant naissance au champ (fig. 1-6b) a l'expression  $N_1.i_1 + N_2.i_2$ . Comme ce champ est le même que dans le fonctionnement à vide, on a :

$$\begin{aligned} N_1.i_1 + N_2.i_2 &= N_1.i_0 \\ N_1.i_1 &= N_1.i_0 - N_2.i_2 \end{aligned}$$

D'où :

$$i_1 = i_0 + (-m.i_2), \quad \text{avec } m = N_2/N_1$$

Lorsqu'on passe du fonctionnement à vide au fonctionnement en charge, le primaire appelle un courant supplémentaire  $(-m.i_2)$  : ce courant, dit **courant de travail**, circule dans les  $N_1$  spires du primaire et crée aussi une f.m.m. qui annule exactement la f.m.m. du secondaire.

$$N_1.(-m.i_2) + N_2.i_2 = 0, \quad \text{puisque } m = N_2/N_1$$

Par la suite, seule la f.m.m.  $N_1.i_0$  donne naissance au champ : c'est la raison pour laquelle le courant à vide  $i_0$  est souvent appelé **courant magnétisant**.

**En charge, le courant  $i_1$  absorbé au primaire est la somme de deux composantes :**

- le courant magnétisant  $i_0$  qui crée le champ magnétique dans les tôles ;
- le courant de travail  $(-m.i_2)$  proportionnel au courant débité dans le récepteur.

Le courant à vide  $i_0$  comporte (fig. 1-7) :

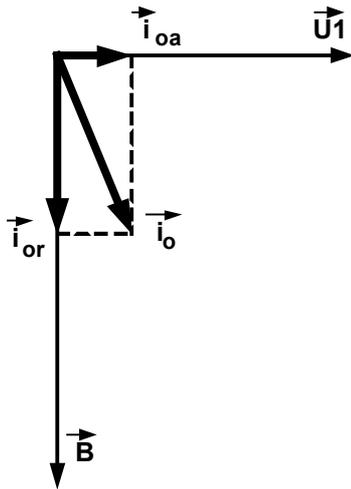


Fig. 1-7

- une composante active  $i_{0a}$  (en phase avec  $u_1$ ) due aux pertes magnétiques dans les tôles et, par suite, d'autant plus faible que ces tôles sont de meilleure qualité ;
- une composante réactive  $i_{0r}$  (en quadrature en arrière par rapport à  $u_1$ ) qui correspond au champ  $b$  et qui est d'autant plus faible que les entrefers du circuit magnétique sont réduits.

Dans la plupart des transformateurs industriels le courant  $i_0$  a une valeur efficace  $I_0$  très inférieure à la valeur nominale  $I_{1n}$  du courant primaire ; en conséquence, sauf pour le fonctionnement à vide, on peut négliger  $i_0$  devant  $i_1$  et écrire :

$$i_1 = -m.i_2$$

C'est à dire

$$N_1.i_1 + N_2.i_2 = 0$$

On dit que :

**Les f.m.m. du primaire et du secondaire s'équilibrent pratiquement.**

### **1.5. Fonctionnement du transformateur parfait**

Le transformateur parfait est un appareil idéal (c'est-à-dire qui n'existe pas en toute rigueur) pour lequel :

- Les résistances  $R_1$  et  $R_2$  des deux enroulements sont nulles ;
- Les lignes de champ enlacent toutes les spires des deux enroulements ;
- Le courant à vide  $i_0$  est nul.

#### **1.5.1. Définitions et équations du transformateur parfait**

Le fonctionnement d'un tel transformateur est régi par trois équations (fig. 1-8) :

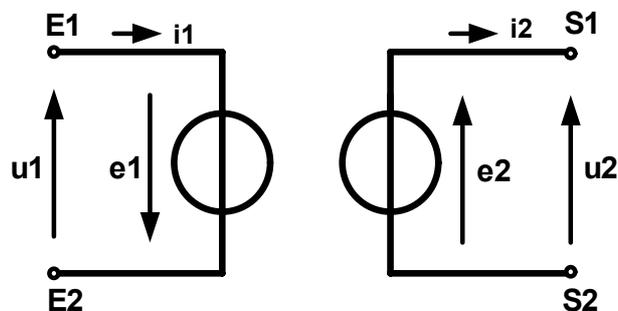


Fig. 1-8

- La loi d'Ohm au primaire

$$u_1 = N_1 \cdot d\Phi/dt$$

- La loi d'Ohm au secondaire

Le champ magnétique  $b$  induit dans les  $N_2$  spires du secondaire la f.é.m.

$e_2 = - d\Phi_2/dt$  ; mais la convention adoptée pour le secondaire étant générateur, la loi d'Ohm s'écrit :

$$u_2 = e_2.$$

$$u_2 = - N_2 \cdot d\Phi/dt$$

- La relation entre les courants

$$i_1 = - m \cdot i_2$$

On déduit des équations ci-dessus le rapport :

$$u_2/u_1 = -N_2/N_1 = -m$$

Mais étant donné que la tension  $u_1$  est sinusoïdale :

- La tension secondaire étant égale à  $u_2 = -m \cdot u_1$ , elle est aussi sinusoïdale.
- Si le récepteur est **linéaire**, le courant  $i_2$  dû à la tension  $u_2$  est sinusoïdal.
- Comme  $i_1 = -m \cdot i_2$ , le courant primaire est aussi sinusoïdal.

Les quatre grandeurs  $u_1$ ,  $i_1$ ,  $u_2$  et  $i_2$  sont toutes sinusoïdales : on peut introduire leurs vecteurs de Fresnel (fig. 1-9).

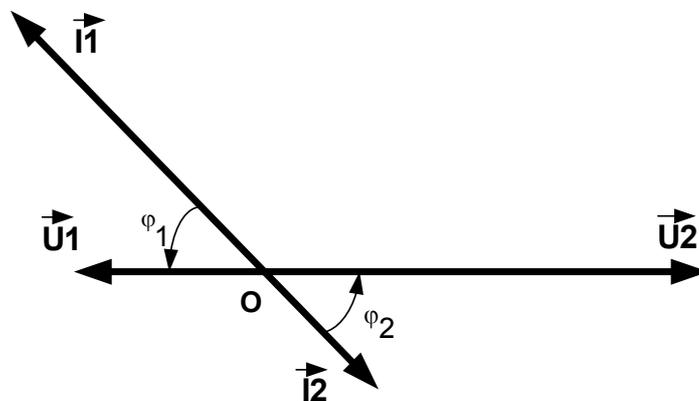


Fig. 1-9

Les tensions  $u_1$  et  $u_2$  sont en opposition de phase et ont des valeurs efficaces  $U_1$  et  $U_2$  telles que  $U_2/U_1 = m$ .

Pour un transformateur parfait le rapport  $U_2/U_1$  est une constante indépendante des courants : c'est son rapport de transformation, il est égal au rapport des nombres de spires.

Les courants  $i_1$  et  $i_2$  sont en opposition de phase et ont des valeurs efficaces  $I_1$  et  $I_2$  telles que  $I_2/I_1 = 1/m$ .

Si  $N_2 > N_1$ , c'est-à-dire si  $m > 1$ , on a  $U_2 > U_1$  et  $I_2 < I_1$ , le transformateur est élévateur de tension et abaisseur de courant.

Si  $N_2 < N_1$ , c'est-à-dire si  $m < 1$ , on a  $U_2 < U_1$  et  $I_2 > I_1$ , le transformateur est abaisseur de tension et élévateur de courant.

### **I.5.2. Diagramme de fonctionnement et bilan de puissances**

Un transformateur parfait de rapport  $m$  est soumis à une tension sinusoïdale  $u_1$  connue et débite dans un récepteur connu.

De la tension  $u_1$  on déduit la tension secondaire  $u_2 = -m u_1$ .

Le récepteur étant connu, on détermine à partir de  $u_2$  le courant secondaire  $i_2$ .

Du courant  $i_2$  on déduit le courant primaire  $i_1 = -m \cdot i_2$ .

Il est possible de construire les vecteurs de Fresnel des quatre grandeurs  $u_1$ ,  $i_1$ ,  $u_2$  et  $i_2$ . Le récepteur impose le déphasage  $\varphi_2$  de  $u_2$  par rapport à  $i_2$ . On constate que le déphasage  $\varphi_1$  de  $u_1$  par rapport à  $i_1$  est égal à l'angle  $\varphi_2$ .

**Le facteur de puissance  $\cos \varphi_1$  entre les bornes du primaire est égal au facteur de puissance  $\cos \varphi_2$  du récepteur alimenté par le secondaire.**

Les puissances active et réactive absorbées au primaire sont :

$$P_1 = U_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1 \quad \text{et} \quad Q_1 = U_1 \cdot I_1 \cdot \sin \varphi_1$$

Il est facile de transformer  $P_1$  et  $Q_1$  et d'introduire les puissances active et réactive,  $P_2$  et  $Q_2$ , fournies à la charge :

$$P_1 = (U_2/m) \cdot m \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_2 = U_2 \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_2 = P_2$$

$$Q_1 = (U_2/m) \cdot m \cdot I_2 \cdot \sin \varphi_2 = U_2 \cdot I_2 \cdot \sin \varphi_2 = Q_2$$

Les puissances active et réactive absorbées sont intégralement transmises au récepteur alimenté par le secondaire du transformateur.

**Le transformateur parfait ne présente aucune perte : son rendement est égal à 100%.**

### **I.5.3. Intérêt et limite de la théorie du transformateur parfait**

Pour démontrer l'utilité de la théorie du transformateur parfait il faut comparer par des études expérimentales le fonctionnement d'un transformateur réel aux prévisions de l'appareil parfait.

#### **a) Fonctionnement à vide**

A l'aide d'un dispositif (par exemple, un autotransformateur) on fait varier la tension primaire (fig. 1-10)  $U_1$  de 0 à  $U_n$ . Pour chaque valeur on détermine :

- la puissance absorbée  $P_0$  ;
- le courant primaire  $I_0$  ;
- la tension secondaire  $U_{20}$ .

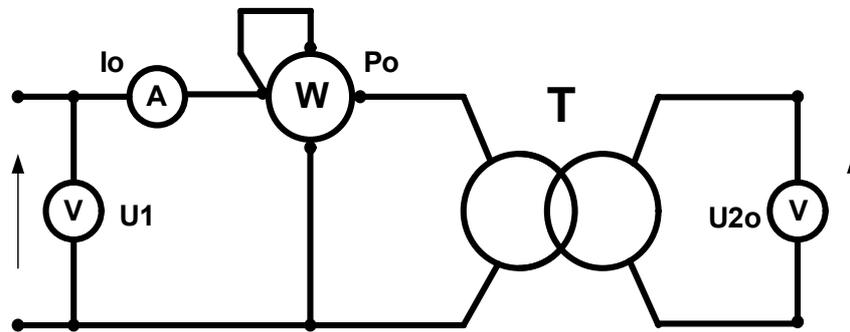


Fig. 1-10

Si on compare le fonctionnement d'un transformateur réel aux prévisions obtenues en supposant l'appareil parfait on peut conclure :

- A vide un transformateur réel délivre la même tension secondaire que s'il était parfait, donc le rapport  $U_{20}/U_1 = N_2/N_1 = m$ .
- A vide un transformateur réel absorbe un courant qui ne vaut que quelques pour cent du courant primaire nominal. Le courant de magnétisation  $I_0$  est très faible par rapport au courant nominal  $I_{1n}$ .
- A vide un transformateur réel consomme une puissance dont la valeur relative n'excède pas quelques pour cent. La puissance  $P_0$  représente les pertes à vide.

#### b) Fonctionnement en charge

Le primaire étant soumis à une tension nominale le transformateur est chargé progressivement (par exemple, à l'aide d'un rhéostat) afin d'obtenir différentes valeurs du courant secondaire  $I_2$  et on mesure (fig. 1-11) :

- le courant primaire  $I_1$  ;
- la tension secondaire  $U_2$  ;
- la puissance primaire  $P_1$ .

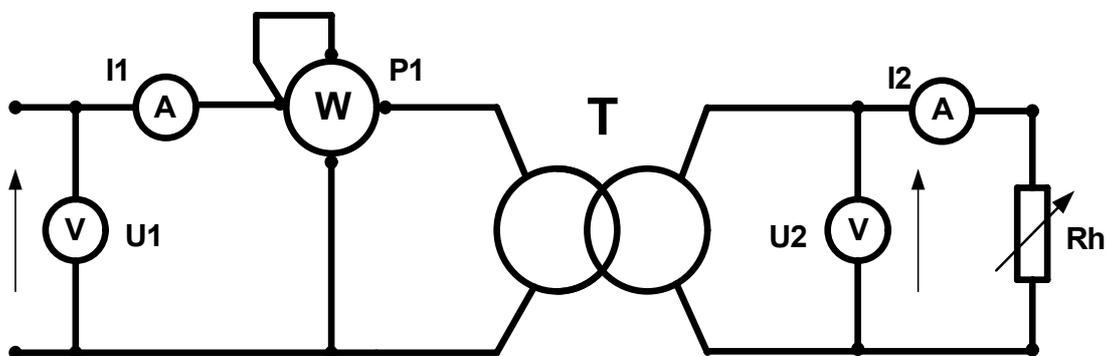


Fig. 1-11

Les résultats obtenus montrent :

- En charge un transformateur réel délivre une tension secondaire qui décroît légèrement lorsque le courant secondaire augmente.
- En charge un transformateur réel est parcouru, comme un transformateur parfait, par des courants  $I_1$  et  $I_2$ , tel que  $I_1 = m \cdot I_2$  (sauf aux faibles charges).
- Contrairement au cas du transformateur parfait les pertes existent et croissent avec le courant  $I_2$ . Le rendement du transformateur  $\eta = P_2 / P_1$  reste bon, mais inférieur à 100%

### Exercice

La plaque signalétique d'un transformateur monophasé parfait porte les indications suivantes :

$$U_{1n} = 220 \text{ V} ; U_2 = 24 \text{ V} ; f = 50 \text{ Hz} ; S_n = 60 \text{ VA}$$

La section utile du circuit magnétique est 2 cm x 3 cm. Sachant que le champ magnétique a une amplitude de 1,6 T, calculer :

- Le nombre de spires de chacun des enroulements (la tension secondaire correspondante à  $U_{1n}$  étant de 24 V) ;
- La valeur nominale du courant primaire et le courant secondaire correspondant ;
- Les puissances active et réactive absorbées par le primaire lorsque le secondaire débite dans un récepteur inductif dont le courant  $I_2 = 2 \text{ A}$  et le facteur de puissance est  $\cos \varphi = 0,8$ .

### Solution :

Le champ magnétique a pour amplitude :

$$B_m = U_1 \cdot \sqrt{2} / N_1 \cdot \omega \cdot s \quad \Rightarrow \quad N_1 = U_1 \cdot \sqrt{2} / B_m \cdot \omega \cdot s ; \omega = 2\pi \cdot f$$

$$N_1 = 220 \cdot \sqrt{2} / 1,6 \cdot 2\pi \cdot 50 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 10^{-4} = 1032 \text{ spires}$$

$$N_1 = \mathbf{1030 \text{ spires}}$$

Le nombre de spires  $N_2$  de l'enroulement secondaire est tel que

$$N_2 / N_1 = U_2 / U_1 \quad \Rightarrow \quad N_2 = N_1 \cdot U_2 / U_1$$

$$N_2 = 1032 \cdot 24 / 220 = 113 \text{ spires}$$

$$N_2 = \mathbf{113 \text{ spires}}$$

La plaque signalétique indique les valeurs nominales  $U_{1n}$  et  $S_n$  de la tension primaire et de la puissance apparente. On en déduit la valeur nominale du courant primaire :

$$I_{1n} = S_n / U_{1n} \quad \Rightarrow \quad I_{1n} = 60 / 220 = 0,273 \text{ A}$$

$$I_{1n} = \mathbf{270 \text{ mA}}$$

Quant au courant secondaire, il est tel que

$$I_2 = I_1 / m = I_1 \cdot N_1 / N_2 \quad \Rightarrow \quad I_2 = 0,273 \cdot 220 / 24 = 2,5 \text{ A}$$

$$I_2 = \mathbf{2,5 \text{ A}}$$

Le transformateur étant parfait, la puissance active absorbée par le primaire est égale à celle délivrée par le secondaire, soit

$$P_1 = P_2 = U_2 \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_2 \quad \Rightarrow \quad P_1 = 24 \cdot 2 \cdot 0,8 = 38,4 \text{ W}$$

$$P_1 = 38,4 \text{ W}$$

Il est de même pour la puissance réactive :

$$Q_1 = Q_2 = U_2 \cdot I_2 \cdot \sin \varphi_2 \Rightarrow Q_1 = 24 \cdot 2 \cdot 0,6 = 28,8 \text{ var}$$

$$Q_1 = 28,8 \text{ var}$$

**Le transformateur parfait constitue une bonne << première approximation >>**  
Mais si l'on désire améliorer la précision il faut tenir compte des phénomènes négligés

## **I.6. Modèle du transformateur réel**

### **I.6.1. Prise en compte du courant magnétisant $I_0$ :**

On a  $i_1 = i_0 + (-m \cdot i_2)$ ,

#### **a) Fonctionnement à vide :**

$i_2 = 0$  donc  $i_1 = i_0$

le transformateur est équivalent à une bobine à noyau ferromagnétique qui a pour modèle un dipôle constitué d'une résistance  $R_m$  en parallèle avec une réactance  $X_m$  (fig. 1-12)

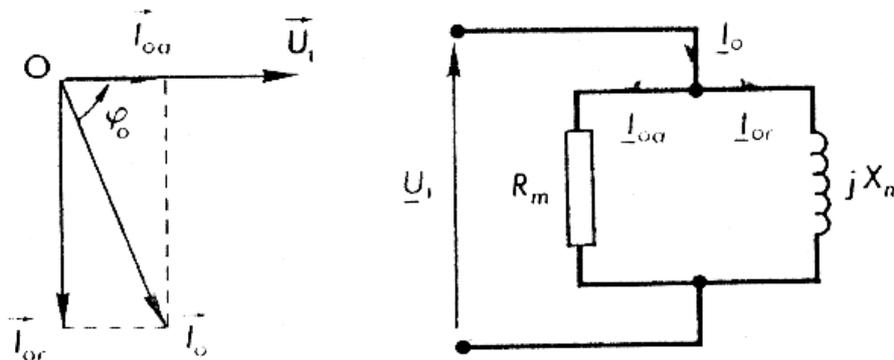


Fig. 1-12

- $R_m$  correspond à la composante active  $I_{0a}$

$$R_m = U_1 / I_{0a} = U_1^2 / P_0$$

$P_0 = U_1 I_{0a} = U_1 I_0 \cos \varphi_0 =$  puissance active consommée à vide

Cette puissance est égale aux pertes magnétiques car la résistance  $R_1$  du primaire est toujours négligée jusqu'ici.

- $X_m$  correspond à la composante réactive  $I_{0r}$

$$X_m = U_1 / I_{0r} = U_1^2 / Q_0$$

$Q_0 = U_1 I_{0r} = U_1 I_0 \sin \varphi_0 =$  puissance réactive consommée à vide

**b) Fonctionnement en charge :**

$$i_1 = i_0 + (-m.i_2)$$

Au courant  $i_0$  s'ajoute désormais le courant de travail ( $-mi_2$ ), or ce courant peut être considéré comme absorbé au primaire d'un transformateur parfait de rapport  $m$  dont le secondaire débite le courant  $i_2$

On en déduit le modèle suivant (Fig. 1-13 )

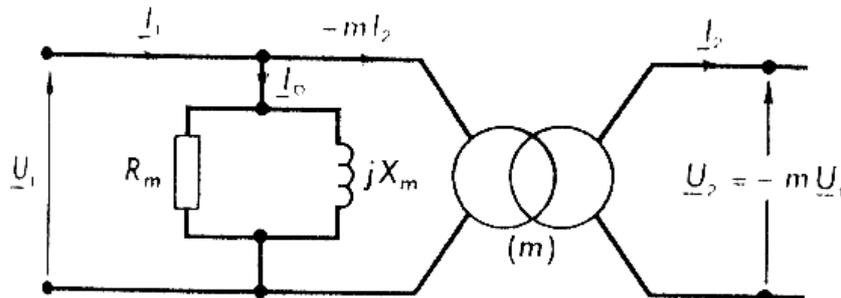


Fig. 1-13

Pour les tensions on a toujours  $U_2 / U_1 = -m$

**Donc tenir compte du courant  $i_0$  revient à brancher entre les bornes du primaire d'un transformateur parfait l'impédance  $R_m/jX_m$  dite impédance magnétique.**

**1.6.2. prise en compte des résistances et de la topographie réelle du champ**

**a) Les fuites magnétiques du transformateur :**

Un phénomène est négligé jusqu'ici appelé fuites magnétiques. En effet on a :

Le flux total embrassé par les  $N_1$  spires du primaire est :  $\Phi_1 = N_1 \Phi + L_1 i_1$

Le flux total embrassé par les  $N_2$  spires du secondaire est  $\Phi_2 = N_2 \Phi + L_2 i_2$

Avec  $L_1 i_1$  le flux de fuite au primaire et  $L_1$  inductance de fuite du primaire et  $L_2 i_2$  le flux de fuite au secondaire et  $L_2$  inductance de fuite du secondaire

**b) Modèle complet du transformateur réel :**

En tenant comptes des flux de fuite et des résistances, la loi d'ohm devient au primaire :

$$U_1 = R_1 i_1 + d\Phi_1/dt = R_1 i_1 + d(N_1 \Phi + L_1 i_1)/dt = R_1 i_1 + L_1 di_1/dt + N_1 d\Phi/dt \\ = R_1 i_1 + L_1 di_1/dt + u'_1$$

avec  $u'_1 = N_1 d\Phi/dt$

l'expression de  $u_1$  montre que le primaire du transformateur réel se comporte comme

- Le primaire d'un transformateur parfait de  $N_1$  spires soumis à la tension  $u'_1$
- En série avec la résistance  $R_1$  et l'inductance  $L_1$  parcourues par  $i_1$

Donc le modèle complet du transformateur réel est le suivant (Fig. 1-14):  
(la loi d'ohm au secondaire est exprimée de la même manière qu'au primaire) :

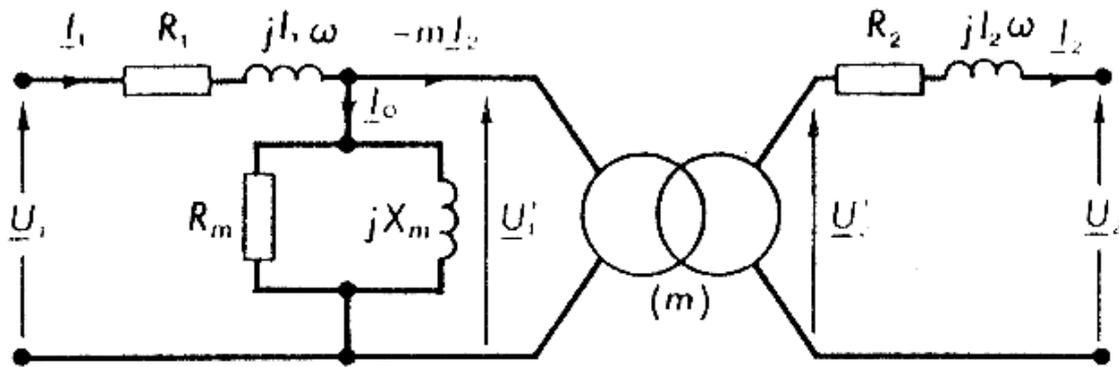


Fig. 1-14

### 1.6.3. L'approximation de Kapp :

#### a) Simplification du modèle complet :

**L'approximation de Kapp** consiste à négliger le courant  $i_0$  devant  $i_1$  sauf aux faibles charges donc désormais on écrit :

$$i_1 = -mi_2$$

Ne pas tenir compte de  $i_0$  revient dans le modèle complet à débrancher l'impédance magnétisante  $R_m/X_m$  donc le schéma devient (Fig. 1-15)

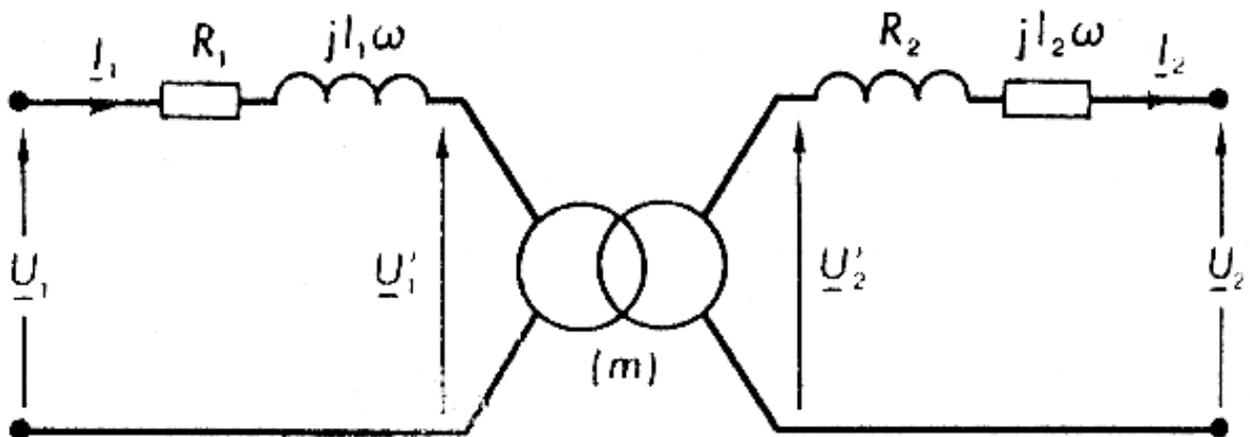


Fig. 1-15

**b) Schéma équivalent du transformateur ramené au secondaire :**

Il est possible de faire passer l'impédance  $R_1 + jL_1\omega$  du primaire au secondaire ( on multiplie par  $m^2$ ). Le secondaire comporte alors ( Fig 1-16) :

- La résistance  $R_s = m^2R_1 + R_2$  dite résistance totale ramenée au secondaire;
- La réactance  $X_s = (m^2 L_1 + L_2) \omega$  dite réactance totale ramenée au secondaire;

Au primaire du transformateur parfait il n'y a plus aucune impédance :  $\underline{U}_1$  est appliquée directement sur l'enroulement du primaire si bien qu'au secondaire de ce transformateur apparaît la tension  $-m \underline{U}_1$

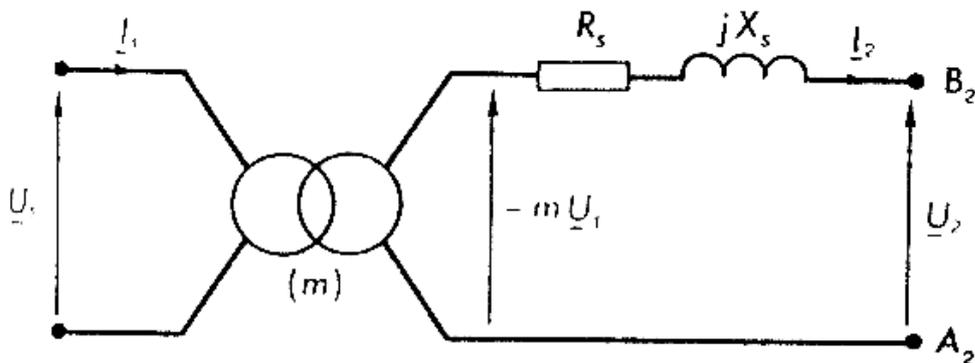


Fig. 1-16

Donc vu des bornes du secondaire, le transformateur réel (dans l'approximation de Kapp) est équivalent à un générateur ayant pour

- f.é.m :  $-m \underline{U}_1$
- impédance :  $\underline{Z}_s = R_s + jX_s$

C'est le modèle de Kapp du transformateur réel ( Fig 1-17) :

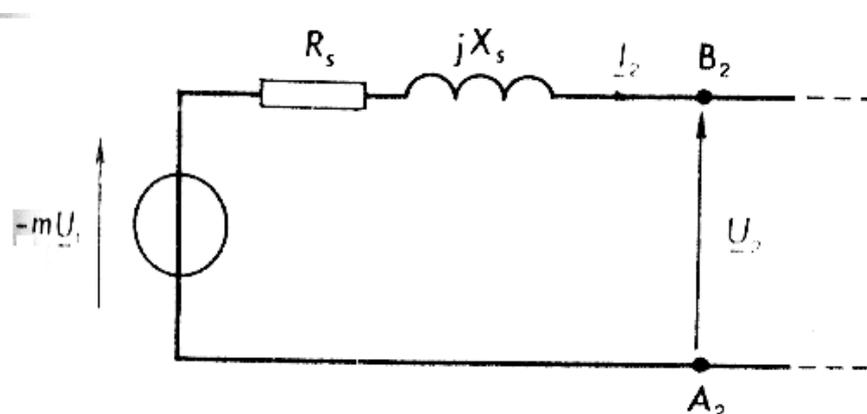


Fig. 1-17

**c) Diagramme de fonctionnement :**

Sur la figure 1-18 a on lit :

$$-m \underline{U}_1 = \underline{U}_2 + R_s \underline{I}_2 + j X_s \underline{I}_2$$

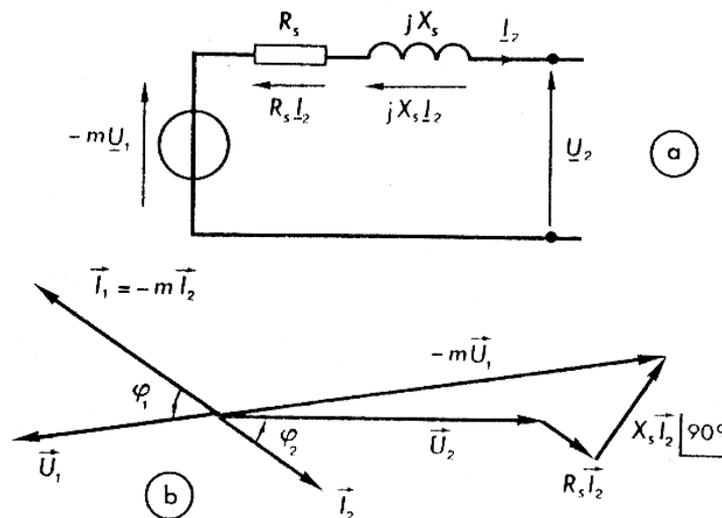


Fig. 1-18

De cette relation complexe on déduit le diagramme de fonctionnement du transformateur (Fig;1-18 b)

**1.6.4. Chute de tension en charge :**

**a) Définition :**

- Lorsque  $I_2 = 0$  la tension  $U_2$  notée alors  $U_{20}$ , a pour expression

$$U_2 = U_{20} = m.U_1$$

- Lorsque  $I_2 \neq 0$   $U_2 \neq U_{20}$

Par définition la chute de tension est :

$$\Delta U_2 = U_{20} - U_2 = m.U_1 - U_2$$

Cette chute de tension dépend du courant  $I_2$  et du facteur de puissance  $\cos \varphi_2$  de la charge: en général, on considère la valeur  $\Delta U_2$  pour le courant nominal  $I_{2n}$  et un facteur de puissance  $\cos \varphi_2$  précisé.

La chute de tension  $\Delta U_2$ , exprimée en volts, n'a guère de signification en elle-même. Par exemple, une chute de tension de 4 V prend une importance très différente selon que le transformateur présente une valeur  $U_{2n}$  égale à 220 V ou à 20 kV.

Ainsi, on introduit le plus souvent, exprimée en pourcentage, la chute de tension relative :

$$\varepsilon\% = (m.U_1 - U_2) / U_{2n} \cdot 100 = (\Delta U_2 / U_{2n}) \cdot 100$$

**b) Expression de la chute de tension  $\Delta U_2$  :**

Pour faire apparaître la chute de tension on prend la construction de Fresnel ( Fig. 1-19)

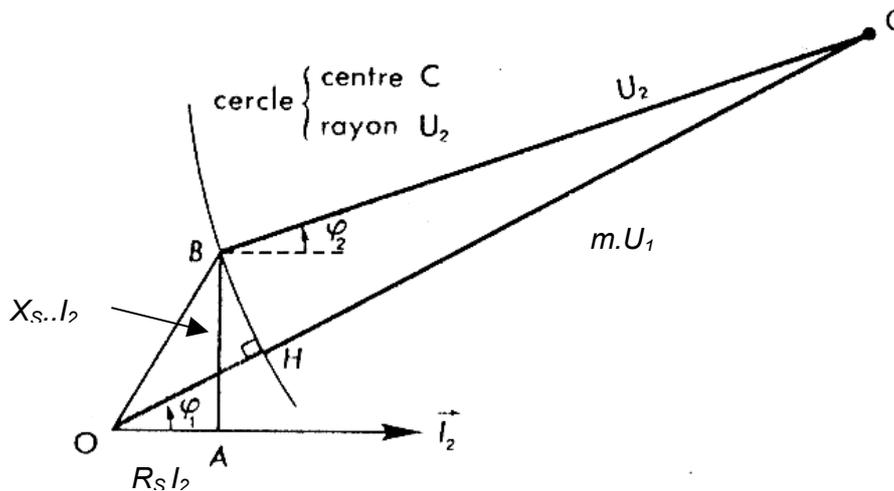


Fig. 1-19

$$\Delta U_2 = U_{20} - U_2 = m.U_1 - U_2 = OC - BC$$

Construisons l'arc du cercle de centre C et de rayon BC, cet arc coupe OC en H tel que :

$$OH = OC - BC = m.U_1 - U_2 = \Delta U_2$$

D'après l'approximation de Kapp le triangle OAB est de très petites dimensions devant OC et BC : autrement dit C est très éloigné de OAB.

Il en résulte que

- OBH est assimilable à un triangle rectangle en H
- Les vecteurs  $\vec{OC}$  et  $\vec{BC}$  sont presque parallèles si bien que  $\vec{OC}$  fait pratiquement  $\varphi_2$  avec  $I_2$

On en déduit que :

$$\begin{aligned} \Delta U_2 &= \text{projection sur } \vec{OC} \text{ du vecteur } \vec{OB} \text{ ( } \vec{OA} + \vec{AB} \text{)} \\ &= \text{projection sur } \vec{OC} \text{ ( } \vec{OA} \text{ )} + \text{projection sur } \vec{OC} \text{ ( } \vec{AB} \text{ )} \end{aligned}$$

Donc d'après ces approximations et d'après la figure suivante : ( Fig. 1-120)

Il vient :

$$\Delta U_2 = R_s I_2 \cos \varphi_2 + X_s I_2 \sin \varphi_2$$

Dans ce cas la tension au secondaire est:

$$U_2 = m \cdot U_1 - \Delta U_2 = m \cdot U_1 - (R_s I_2 \cos \varphi_2 + X_s I_2 \sin \varphi_2)$$

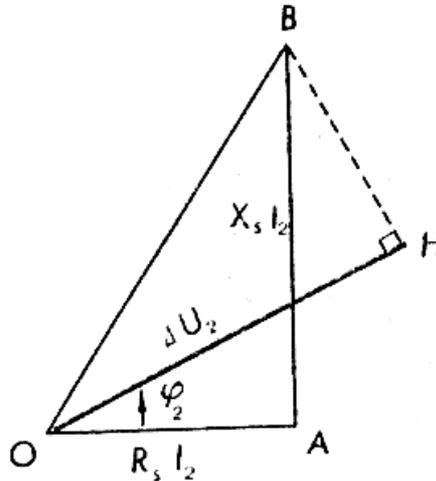


Fig. 1-20

### 1.6.5. Pertes et rendement :

Les pertes dans un transformateur sont de deux types :

- les pertes magnétiques  $P_{mag}$  dans les tôles ;
- les pertes par effet Joule  $P_J$  dans les enroulements.

Les pertes, qui sont exprimées en watts, n'ont de signification que par rapport à la puissance apparente nominale  $S_n$  de l'appareil. En effet, des pertes de 200 W, par exemple, n'ont pas la même importance selon que le transformateur présente une valeur de  $S_n$  égale à 5 kVA ou à 100 kVA. Ainsi, comme pour la chute de tension, on introduit les valeurs relatives :

$$p_{mag} \% = (P_{mag} / S_n) \cdot 100 \quad p_J \% = (P_J / S_n) \cdot 100$$

#### • Pertes magnétiques

Pour un transformateur donné, la fréquence de fonctionnement étant généralement de 50 Hz, les pertes magnétiques ne dépendent que de l'amplitude  $\hat{B}_m$  du champ magnétique et sont sensiblement proportionnelles à son carré  $\hat{B}_m^2$ .

Etant donné que l'amplitude  $\hat{B}_m$  est proportionnelle à la tension  $U_1$  :

$$\hat{B}_m = U_1 \cdot \sqrt{2} / N_1 \cdot \omega \cdot s$$

Les pertes magnétiques  $P_{mag}$  sont proportionnelles à  $U_1^2$

$U_1$  est, le plus souvent, une constante :

**Les pertes magnétiques  $P_{mag}$  sont constantes, c'est-à-dire indépendantes du courant de charge  $I_2$ .**

En particulier, sous une même tension primaire, les pertes magnétiques sont les mêmes à vide et en charge

Pour les réduire, il faut :

- adopter une valeur de  $B_m$  limitée (entre 1,4 et 1,6 T) ;
- utiliser des tôles ferromagnétiques de bonne qualité (à cristaux orientés ; 0,5 W/kg).

- **Pertes par effet Joule**

Elles sont dues aux résistances  $R_1$  et  $R_2$  du primaire et du secondaire, donc :

$$P_J = R_1 \cdot I_1^2 + R_2 \cdot I_2^2$$

Si on introduit le rapport  $I_1 = m \cdot I_2$

$$P_J = (m^2 \cdot R_1 + R_2) \cdot I_2^2 = R_s \cdot I_2^2$$

**Les pertes par effet Joule sont proportionnelles au carré du courant de la charge  $I_2$ .**

Pour les réduire, il faut réaliser des enroulements de résistances aussi faibles que possible, c'est-à-dire utiliser des conducteurs de section suffisante. Mais on est limité dans cette voie par l'encombrement, si bien que les pertes par effet Joule ont une valeur relative  $p_J$

- de l'ordre de 10% pour les appareils de faible puissance ;
- ne dépassant pas 0,5 % pour les grosses unités.

### **1.6.6. Rendement du transformateur**

En charge, un transformateur reçoit du réseau qui alimente son primaire, la puissance :

$$P_1 = U_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1$$

et fournit au récepteur connecté à son secondaire la puissance :

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

Son rendement est donc :

$$\eta = P_2 / P_1 = U_2 \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_2 / U_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1$$

La différence entre  $P_1$  et  $P_2$  représente les pertes du transformateur et on a :

$$P_1 = P_2 + P_{mag} + (m^2 \cdot R_1 + R_2) \cdot I_2^2 = P_2 + P_{mag} + R_s \cdot I_2^2$$

On peut donc déduire une autre expression du rendement, équivalente à la première :

$$\eta = P_2 / [P_2 + P_{mag} + R_s I_2^2]$$

$$\eta = U_2 \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_2 / [U_2 \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_2 + P_{mag} + R_s \cdot I_2^2]$$

- Graphe de  $I_2 \rightarrow \eta$  à  $U_1 = \text{Cte}$  et  $\cos\varphi_2 = \text{Cte}$

La tension  $U_1$  étant imposée par le réseau d'alimentation et  $\cos\varphi_2$  étant connu, le rendement  $\eta$  est une fonction du courant  $I_2$  (fig. 1-21).

- Lorsque  $I_2 = 0$  (fonctionnement à vide), les pertes magnétiques sont différentes de zéro :  $P_{\text{mag}} \neq 0$ , d'où :

$$\eta = 0 / P_{\text{mag}} = 0$$

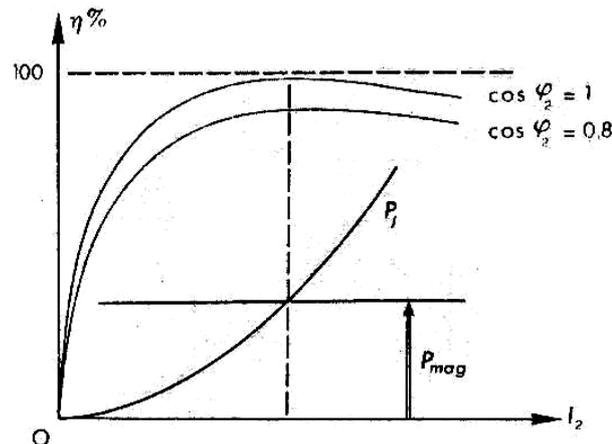


Fig. 1-21

- Lorsque  $I_2$  augmente  $\eta$  croît, passe par une valeur maximale  $\eta_{\text{max}}$ , puis décroît. Le maximum du rendement (à condition que  $\cos\varphi_2$  reste peu différent de 1) est toujours proche de 100%. Il est :
  - de l'ordre de 95% lorsque  $S_n$  est voisin de 10 kVA ;
  - supérieur à 99% pour des grosses unités.

Pour déterminer la valeur de  $I_2$  correspondante à  $\eta_{\text{max}}$  il faut supposer que  $U_2$  reste sensiblement constant lorsque  $I_2$  augmente (puisque la chute de tension ne dépasse pas quelque pour cent). L'expression de  $\eta$  peut être transformée comme suit :

$$\eta = U_2 \cdot \cos\varphi_2 / [U_2 \cdot \cos\varphi_2 + (P_{\text{mag}} / I_2) + R_s I_2]$$

**Le rendement est maximal lorsque les pertes variables (par effet Joule) sont égales aux pertes constantes (magnétiques).**

Lorsqu'un transformateur doit fonctionner toujours à la même charge, il est construit de telle sorte que cette charge soit son courant nominal  $I_{2n}$  et le rendement maximal correspond à  $I_{2n}$  ( $P_{\text{mag}} = R_s I_{2n}^2$ ).

Par contre de nombreux transformateurs, branchés en permanence au primaire, ont des charges très variables. Dans ce cas, les pertes magnétiques ont lieu 24 heures sur 24 et les pertes par effet Joule, à pleine charge, n'ont lieu que quelques heures par jour. On construit l'appareil de telle sorte que ses pertes magnétiques soient particulièrement réduites (inférieurs aux pertes par effet Joule nominales  $R_s I_{2n}^2$ ).

## 1.7. Etude expérimentale du transformateur

### 1.7.1. Essai à vide sous tension nominale

#### a) Montage :

Dans un essai à vide, les courants, et par conséquent les pertes Joule, sont faibles. On mesure les tensions primaire et secondaire à l'aide de voltmètres, le courant primaire et la puissance absorbée au primaire (Fig. 1-22).

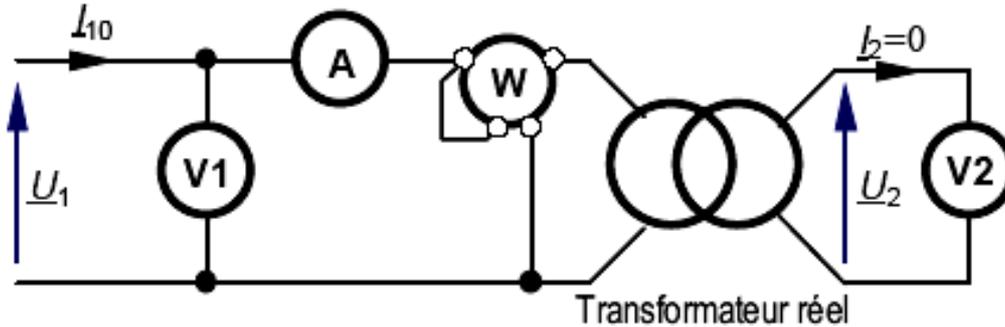


Fig. 1-22 essai à vide d'un transformateur.

On essaie d'avoir le régime nominal pour relever les grandeurs suivantes :

- Tension primaire  $U_1 = U_{1n}$  ;
- Tension secondaire  $U_2 = U_{20}$
- Courant primaire à vide  $I_{10}$  qui n'est autre que le courant magnétisant ;
- La puissance primaire  $P_{10}$

#### b) Détermination de m

Puisque le transformateur est à vide, le courant primaire  $I_0$  est très faible donc la chute de tension dans le primaire est très faible par rapport à  $U_1$  (Fig. 1-23).

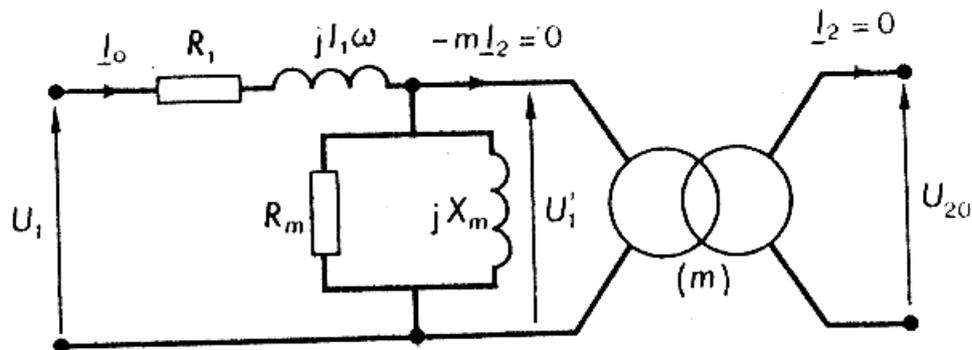


Fig. 1-23

Donc on peut écrire  $U_1 = U'_1$

(  $U'_1$  et  $U_{20}$  sont les tensions primaire et secondaire d'un transfo parfait)

D'où

$$m = U_{20}/U'_1 = U_{20}/U_{10}$$

c) **Détermination des pertes magnétiques :**

A vide la puissance consommée  $P_{10}$  est égale à la somme des pertes joules dans le primaire et des pertes magnétiques

$$P_{10} = R_1 I_0^2 + P_{mag}$$

Comme  $I_0$  est très faible donc  $R_1 I_0^2$  est très faible devant  $P_{mag}$

Donc on écrit

$$P_{10} = P_{mag}$$

**1.7.2. Essai en court-circuit à courant secondaire nominal sous tension primaire réduite**

a) **Montage :**

Dans un essai avec secondaire en court circuit, il faut limiter la tension primaire pour avoir au secondaire un courant de court circuit égal au courant nominal.

Pour amener le courant secondaire à la valeur nominale, la tension primaire est réglée avec un autotransformateur. On mesure la tension primaire, les courants primaire et secondaire et la puissance absorbée au primaire (Figure 1.24).

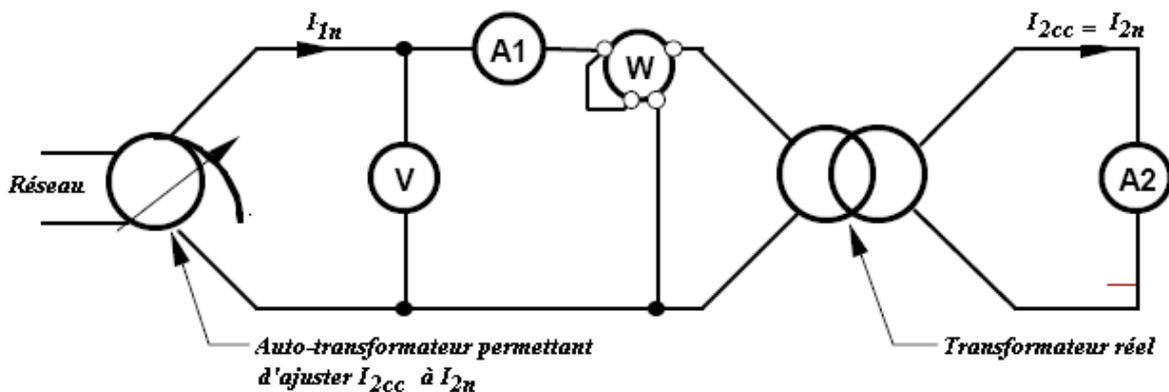


Fig. 1-24 : essai en court-circuit d'un transformateur.

On relève les grandeurs suivantes :

- Tension primaire  $U_{1cc}$
- Courant primaire  $I_{1cc}$  essentiellement pour contrôler le courant dans le wattmètre et éviter de dépasser le calibre courant de cet appareil ;
- Courant secondaire  $I_{2cc} = I_{2n}$
- La puissance primaire  $P_{1cc}$

**b) Détermination de la résistance ramenée au secondaire  $R_s$**

Puisque l'on se place au régime nominal de courant, les pertes mesurées en court circuit sont les pertes Joule nominales, appelées aussi pertes cuivre car elles concernent uniquement la dissipation de puissance dans les conducteurs électriques.

En effet comme  $U_{1cc} \ll U_{1n}$  les pertes magnétiques qui sont proportionnelles à  $U_1^2$  sont ici très réduites, donc en court circuit  $P_{mag} \ll P_j$

D'où

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

Et

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

**c) Détermination de la réactance ramenée au secondaire  $X_s$**

Vu du secondaire, le transformateur se réduit à la représentation de la Figure 1-25.a On en déduit la réactance ramenée au secondaire :

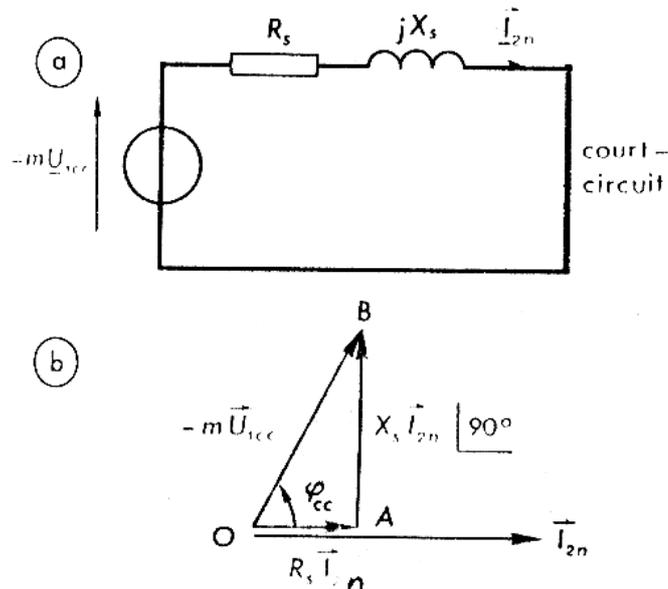


Fig. 1-25

En effet d'après le diagramme vectoriel (figure 1-25.b) on a :

$$(m \cdot U_{1cc})^2 = (R_s \cdot I_{2n})^2 + (X_s \cdot I_{2n})^2$$

$$D'où X_s = \sqrt{\left(\frac{mU_{1cc}}{I_{2n}}\right)^2 - R_s^2}$$

**1.7.3. Essai en charge :**

La connaissance des éléments du modèle du transformateur permet d'établir les paramètres de fonctionnement qui facilitent l'exploitation de l'appareil en milieu industriel.

**Prédétermination de la chute de tension en charge**

Dans le dimensionnement d'un transformateur, la tension à vide est l'élément déterminant pour dimensionner le circuit magnétique. Mais la réalité industrielle nécessite de connaître la tension en charge, donc de connaître la chute de tension  $\Delta U_2$ .

$$\Delta U_2 = R_s I_2 \cos \varphi_2 + X_s I_2 \sin \varphi_2$$

En conclusion la chute de tension que l'on observe en charge peut être déterminée par la connaissance de la charge ( $\varphi_2$ ), des éléments  $R_s$  et  $X_s$  déterminés lors de l'essai en court-circuit

Donc on détermine  $U_2$  pour la charge donnée

**Prédétermination du rendement**

En reprenant les résultats du rendement :

$$\eta = U_2 \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_2 / [U_2 \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_2 + P_{mag} + R_s \cdot I_2^2]$$

$U_2$  étant déterminée et les pertes  $P_{mag}$  étant obtenues par l'essai à vide, donc on détermine le rendement

**Conclusion**

Les deux seuls essais, l'essai à vide et l'essai en court-circuit simples à mettre en œuvre suffisent à déterminer la tension secondaire en charge et le rendement du transformateur.

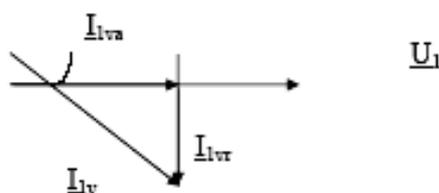
**1.8. Exercices :****a) Exercice résolu :**

L'étude d'un transformateur monophasé 1500 V, 225 V, 50 Hz de puissance apparente  $S = 44 \text{ kVA}$ , a donné les résultats suivants :

- Essai en continu au primaire :  $U_1 = 2,5 \text{ V}$  ;  $I_1 = 10 \text{ A}$ .
- Essai à vide :  $U_1 = 1500 \text{ V}$  ;  $I_{1v} = 2 \text{ A}$  ;  $U_{2v} = 225 \text{ V}$  ;  $P_{1v} = 300 \text{ W}$ .
- Essai en court - circuit :  $U_{1CC} = 22,5 \text{ V}$  ;  $I_{1CC} = 22,5 \text{ A}$  ;  $P_{1CC} = 225 \text{ W}$ .

1) Déterminer le rapport de transformation :

$$m = \frac{U_{2v}}{U_1} = \frac{225}{1500} = 0,15.$$



2)

a) Calculer la composante active lors de l'essai à vide :

Lors de l'essai à vide, le courant  $I_{1v}$  est déphasé par rapport à  $U_1$  :  
On remarque que  $U_1$  et  $I_{1va}$  sont en phase donc  $P_{1v} = U_1 \cdot I_{1va}$  d'où

$$I_{1va} = \frac{P_{1v}}{U_1} = \frac{300}{1500} = 0,2A$$

b) Vérifier que l'on peut négliger les pertes par effet Joule lors de l'essai à vide :

Lorsqu'on mesure la puissance à vide, on mesure :

$$P_{1v} = P_f + R_1 \cdot I_{1v}^2$$

On calcule  $R_1$  en utilisant l'essai en continu au primaire :

$$U_1 = R_1 \cdot I_1 \text{ soit :}$$

$$R_1 = \frac{U_1}{I_1} = \frac{2,5}{10} = 0,25\Omega$$

d'où les pertes par effet Joule à vide :

$$P_{Jv} = R_1 \cdot I_{1v}^2 = 0,25 \times 2^2 = 1W$$

D'où :

$$P_f = P_{1v} - P_{Jv} = 300 - 1 = 299W$$

Ce qui montre bien que les pertes par effet Joule lors de l'essai à vide sont négligeables.

c) Montrer que les pertes dans le fer sont négligeables dans l'essai en court - circuit, en admettant qu'elles sont proportionnelles au carré de la tension primaire.

En admettant que les pertes fer sont proportionnelles au carré de la tension primaire, on peut écrire :

$$P_f = k \cdot U_1^2$$

On détermine la constante  $k$  en utilisant l'essai à vide :

$$k = \frac{P_f}{U_1^2} = \frac{300}{1500^2} = 1,33 \cdot 10^{-4}$$

On peut ainsi calculer les pertes dans le fer lorsque la tension du primaire vaut 22,5 V ( essai en court -circuit ) :

$$P_{f_{cc}} = k \cdot U_{1CC} = 1,33 \cdot 10^{-4} \times 22,5 = 3 \text{ mW}$$

La puissance mesurée lors de l'essai en court - circuit correspond à :

$$P_{1CC} = P_{JCC} + P_{f_{cc}}$$

soit :

$$P_{JCC} = P_{1CC} - P_{f_{cc}} = 225 - 3 \cdot 10^{-3} = 224,997 \text{ W}$$

Ce qui montre bien que les pertes dans de fer lors de l'essai en court - circuit sont négligeables.

3) Calculer les éléments  $R_S$  et  $X_S$  des enroulements ramenés au secondaire.

$$R_S = m^2 \frac{P_{1CC}}{I_{1CC}^2} = 0,15^2 \cdot \frac{225}{22,5^2} = 10 \text{ m}\Omega$$

$$Z_S = m^2 \cdot \frac{U_{1CC}}{I_{1CC}} = 0,15^2 \times \frac{22,5}{22,5} = 22,5 \text{ m}\Omega$$

d'où

$$X_S = \sqrt{Z_S^2 - R_S^2} = \sqrt{22,5 \cdot 10^{-3}^2 - 10 \cdot 10^{-3}^2} = 20,15 \text{ m}\Omega$$

4) Le transformateur alimenté au primaire sous une tension  $U_1 = 1500 \text{ V}$  débite un courant constant d'intensité  $I = 200 \text{ A}$ , quelle que soit la charge.

a) Déterminer la valeur de  $\varphi_2$  déphasage entre courant et tension secondaire, pour que la chute de tension soit nulle.

$$\Delta U_2 = R_S \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_2 + X_S \cdot I_2 \cdot \sin \varphi_2 = 0$$

soit :

$$R_S \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_2 = -X_S \cdot I_2 \cdot \sin \varphi_2$$

ce qui fait :

$$\frac{\sin \varphi_2}{\cos \varphi_2} = \tan \varphi_2 = -\frac{X_S}{R_S} = -\frac{20,15 \cdot 10^{-3}}{10 \cdot 10^{-3}} = 2,01$$

d'où

$$\varphi_2 = -\arctan(2,01) = -63,6^\circ$$

Ce qui correspond à une charge globalement capacitive.

b) Calculer la chute de tension relative pour  $\cos \varphi_2 = 0,8$  ( inductif )

$$\Delta U_2 = R_S \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_2 + X_S \cdot I_2 \cdot \sin \varphi_2$$

soit :

$$\Delta U_2 = (10 \cdot 10^{-3} \times 200 \times 0,8) + (20,15 \cdot 10^{-3} \times 200 \times 0,6) = 4V$$

- 5) Déterminer le rendement du transformateur quand il débite 200 A avec un facteur de puissance  $\cos \varphi_2 = 0,8$  (charge inductive), le primaire étant alimenté sous 1500 V.

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + P_f + P_J} = \frac{U_2 \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_2}{U_2 \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_2 + P_f + R_S \cdot I_2^2}$$

Pour déterminer la tension  $U_2$ , on utilise la relation

$$\Delta U_2 = U_{2V} - U_2 \Leftrightarrow U_2 = U_{2V} - \Delta U_2 = 225 - 4 = 221V$$

d'où :

$$\eta = \frac{221 \times 200 \times 0,8}{221 \times 200 \times 0,8 + 300 + 10 \cdot 10^{-3} \times 200^2} = 0,98$$

Le rendement de ce transformateur est de 98 %.

#### b) Exercice :

Le primaire d'un transformateur monophasé est alimenté par une tension sinusoïdale de valeur efficace  $U_1 = 2200 V$  et de fréquence  $f = 50 Hz$ .

Les essais suivants ont été réalisés :

Essai à vide :  $U_{10} = 2200 V - U_{20} = 220 V ; I_{10} = 1 A ; P_{10} = 550 W$

Essai en court-circuit :  $U_{1cc} = 150 V ; I_{2cc} = 100 A ; P_{1cc} = 750 W$

- Calculer le rapport de transformation.
- Calculer le facteur de puissance à vide.
- Donner le modèle équivalent du transformateur vu des bornes du secondaire.
- Calculer les grandeurs  $R_s$ ,  $X_s$  et de l'impédance  $Z_s$  correspondante.

Pour une charge nominale, on a relevé la valeur efficace de la tension au  $U_{1N} = 2200 V$ . La valeur efficace de l'intensité du courant au secondaire est  $I_{2N} = 100 A$  sur une charge inductive avec un  $\cos \varphi_{2N} = 0,8$ .

- A l'aide de la formule approchée, déterminer la chute de tension au secondaire.
- Calculer les puissances active et réactive au secondaire du transformateur.
- Calculer le rendement du transformateur.

## I.9. Transformateur triphasé

### I.9.1. Types de transformateurs triphasés

Dans les réseaux triphasés il existe deux possibilités pour les transformateurs : ensemble de trois transformateurs monophasés identiques et transformateur triphasé compact.

#### a) Ensemble de trois transformateurs monophasés identiques

On connecte un transformateur monophasé sur chacune des phases. Cette solution est parfois utilisée en T.H. dans les puissances élevées (figure 1-26)

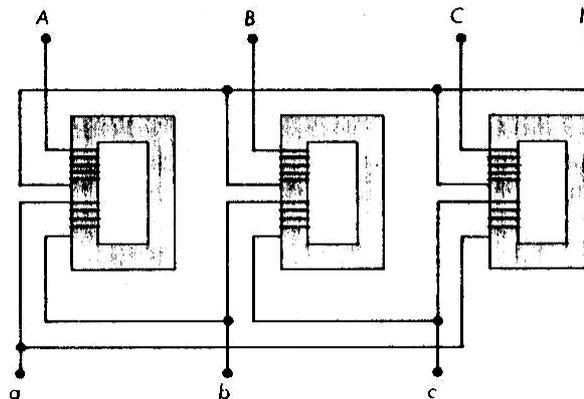


Fig. 1-26

#### b) Transformateur triphasé compact

C'est un appareil unique dont la carcasse magnétique comporte trois noyaux (ou colonnes C) ayant des axes parallèles et situés dans un même plan, réunis par deux culasses (ou traverses T) (fig. 1-27).

L'ensemble est réalisé en tôles à cristaux orientés. Pour réduire l'influence des entrefers, on retrouve les mêmes solutions technologiques qu'en monophasé.

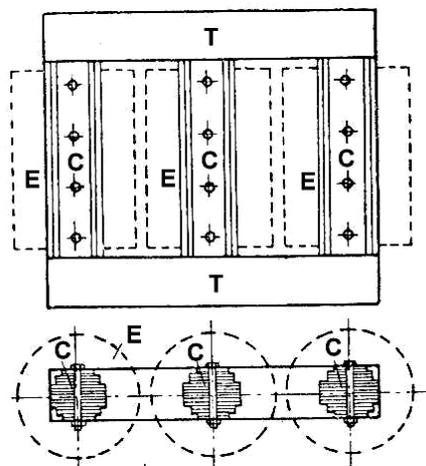


Fig. 1-27

Le plus souvent chaque noyau est entouré par une phase du primaire et une phase du secondaire

Les transformateurs à trois noyaux sont dits à **flux liés** : en effet, le flux de chacune des colonnes ne dépend pas que des deux f.m.m. disposées sur la colonne correspondante. Par intermédiaire des traverses, il est dû aux six courants circulant dans les enroulements.

Dans le cas des puissances élevées le circuit magnétique peut comporter cinq noyaux : les trois noyaux sont bobinés et les deux noyaux extrêmes servent de retour aux flux magnétiques. On dit qu'il s'agit d'un transformateur de type **cuirassé**. Comme pour un ensemble de trois transformateurs monophasés, les trois flux sont indépendants (c'est-à-dire libres) ce qui présente un intérêt dans certains régimes de fonctionnement. Cependant cette disposition est surtout destinée à réduire la hauteur des colonnes pour permettre un transport plus facile de l'appareil.

En résumé, les transformateurs triphasés sont classés en deux catégories :

- à flux libres / trois transformateurs monophasés  
/ transformateur à cinq colonnes
- à flux liés / transformateur à trois colonnes

Les deux types d'appareils ont le même fonctionnement en régime équilibré et des fonctionnements différents en régime déséquilibré.

### **I.9.2. Fonctionnement en régime équilibré**

Soit un transformateur triphasé (à flux libres ou liés) dont les enroulements présentent par phase,  $N_1$  spires au primaire et  $N_2$  spires au secondaire, et des couplages quelconques (étoile ou triangle).

Si on applique respectivement aux bornes des phases du primaire les tensions équilibrées :

$$v_1 = V_1 \cdot \sqrt{2} \cdot \cos \omega t$$

$$v'_1 = V_1 \cdot \sqrt{2} \cdot \cos (\omega t - 2\pi/3)$$

$$v''_1 = V_1 \cdot \sqrt{2} \cdot \cos (\omega t - 4\pi/3)$$

#### **a) Fonctionnement à vide**

Dans les trois colonnes bobinées les flux  $\Phi$ ,  $\Phi'$ ,  $\Phi''$  sont tels que (fig. 1-28) :

$$v_1 = N_1 \cdot d\Phi/dt$$

$$v'_1 = N_1 \cdot d\Phi'/dt$$

$$v''_1 = N_1 \cdot d\Phi''/dt$$

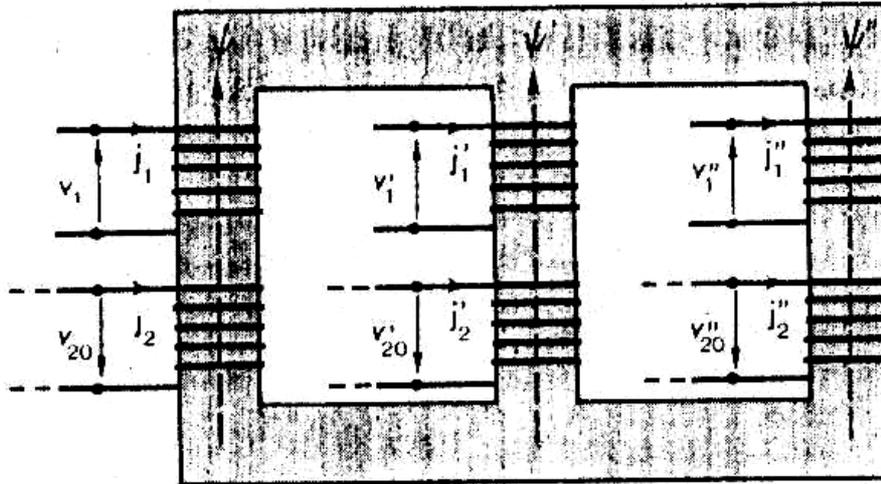


Fig. 1-28

Ces flux ont pour expressions :

$$\begin{aligned}\Phi &= (V_1 / N_1 \cdot \omega) \cdot \sqrt{2} \cdot \sin \omega t \\ \Phi' &= (V_1 / N_1 \cdot \omega) \cdot \sqrt{2} \cdot \sin (\omega t - 2\pi/3) \\ \Phi'' &= (V_1 / N_1 \cdot \omega) \cdot \sqrt{2} \cdot \sin (\omega t - 4\pi/3)\end{aligned}$$

Ils sont sinusoïdaux et équilibrés et leur somme est nulle. Si l'appareil est à cinq noyaux les flux dans les colonnes non bobinées sont nuls. Ces colonnes n'interviennent pas dans le fonctionnement équilibré.

Les flux  $\Phi$ ,  $\Phi'$  et  $\Phi''$  induisent dans les trois phases du secondaire des f.é.m. sinusoïdales et équilibrées  $e_2$ ,  $e_2'$  et  $e_2''$ . Les tensions correspondantes à vide  $v_{20}$ ,  $v_{20}'$  et  $v_{20}''$  respectivement proportionnelles à  $v_1$ ,  $v_1'$  et  $v_1''$  sont sinusoïdales et équilibrées.

### b) Fonctionnement en charge

Si on ferme les trois phases du secondaire sur trois récepteurs identiques d'un récepteur triphasé on aura les courants dans les trois phases secondaires  $j_2$ ,  $j_2'$  et  $j_2''$ , respectivement un appel des courants dans les trois phases primaires  $j_1$ ,  $j_1'$  et  $j_1''$ .

Etant donné que les flux  $\Phi$ ,  $\Phi'$  et  $\Phi''$  restent les mêmes que dans le fonctionnement à vide pour chaque colonne on peut écrire :

$$\begin{aligned}N_1 \cdot j_1 + N_2 \cdot j_2 &= N_1 \cdot j_0 \\ j_1 &= j_0 + (-m \cdot j_2)\end{aligned}$$

Chaque colonne fonctionne comme un transformateur monophasé parfait de rapport  $m$  (figure 1-29) puisque

$$v_{20} / v_1 = -m \quad \text{et} \quad j_2 / j_1 = -m$$

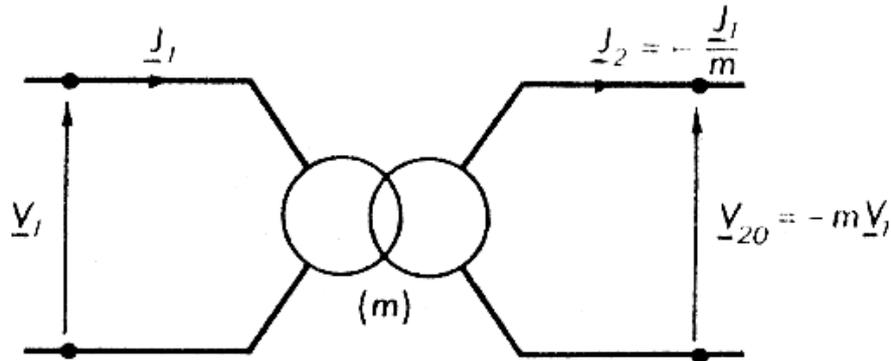


Fig. 1-29

Et on retrouve pour chacune des colonnes le même modèle de Kapp qu'en monophasé (figure 1-30). On a porté les grandeurs correspondant à la première colonne

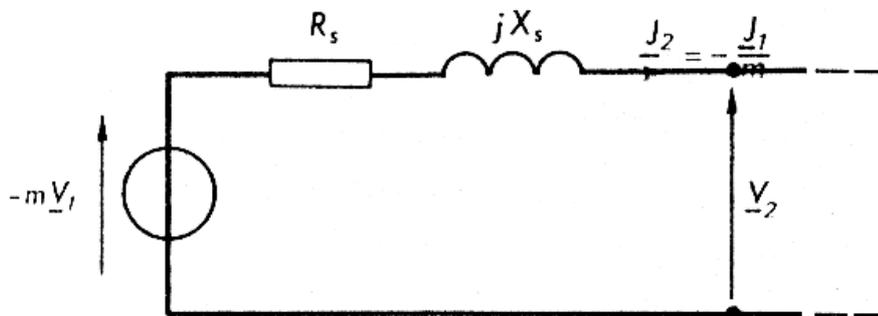


Fig1-30

En régime équilibré toute la théorie du transformateur monophasé est applicable à condition de raisonner « phase à phase », c'est-à-dire « une phase du primaire – la phase correspondante du secondaire ».

### c) Couplage du primaire et du secondaire

Dans les paragraphes précédents les tensions sont prises aux bornes des phases, les courants circulent dans les phases.

La théorie est ainsi valable quels que soient les couplages du primaire et du secondaire. Par contre lorsqu'on s'intéresse aux grandeurs relatives à la ligne d'alimentation, il est nécessaire de considérer les deux couplages possibles.

#### 1. Couplage « Etoile »

Les courants  $i_1, i'_1, i''_1$  (valeur efficace  $I_1$ ) qui circulent dans les fils de phase de la ligne (fig. 1-31) sont les mêmes que les courants  $j_1, j'_1, j''_1$  (valeur efficace  $J_1$ ) qui circulent dans les phases du transformateur :

$$I_1 = J_1$$

Les tensions  $v_1, v'_1, v''_1$  (valeur efficace  $V_1$ ) constituent les tensions simples de la ligne (puisque le centre de l'étoile est au potentiel zéro). Les tensions entre deux fils de phase de cette ligne ont pour valeur efficace :

$$U_1 = V_1\sqrt{3}$$

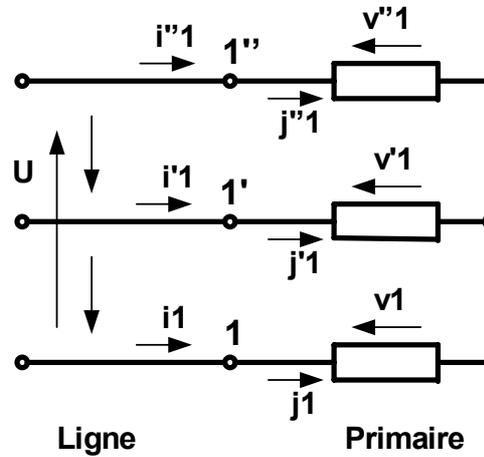


Fig. 1-31

## 2. Couplage « Triangle »

Les courants  $i_1, i'_1, i''_1$  (valeur efficace  $I_1$ ) qui circulent dans les fils de phase de la ligne (fig. 1-32) ne sont plus les mêmes que les courants  $j_1, j'_1, j''_1$  (valeur efficace  $J_1$ ) qui circulent dans les phases du transformateur, les valeurs  $J_1$  et  $I_1$  sont telles que :

$$I_1 = J_1\sqrt{3}$$

Les tensions  $v_1, v'_1, v''_1$  (valeur efficace  $V_1$ ) aux bornes des phases de l'enroulement primaire ne sont plus les tensions simples de la ligne mais les tensions composées de cette ligne autrement dit les tensions entre deux fils de phase de cette ligne. Les valeurs efficaces  $V_1$  et  $U_1$  sont égales.

$$U_1 = V_1$$

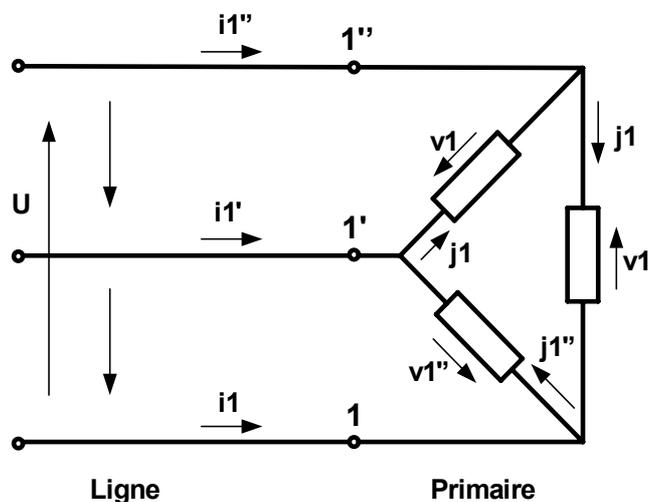


Fig. 1-32

### 3. Conséquences

- Rapport de transformation industriel  $m_i$

Dans la théorie précédente on a considéré le rapport de transformation phase à phase :

$$m = N_2 / N_1 = V_{20} / V_1$$

Dans l'industrie on utilise surtout le rapport de transformation faisant intervenir la tension  $U_{20}$  entre deux fils de phase de la ligne secondaire (dans le fonctionnement à vide) et la tension  $U_1$  entre deux fils de phase de la ligne primaire.

$$m_i = U_{20} / U_1$$

Ce rapport  $m_i$  prend, en fonction de  $m$ , des valeurs différentes selon le couplage du primaire et du secondaire.

Couplage	$U_{20}$	$U_1$	$m_i$
Y - y	$V_{20} \cdot \sqrt{3}$	$V_1 \cdot \sqrt{3}$	$m$
D - d	$V_{20}$	$V_1$	$m$
Y - d	$V_{20}$	$V_1 \cdot \sqrt{3}$	$m / \sqrt{3}$
D - y	$V_{20} \cdot \sqrt{3}$	$V_1$	$m \cdot \sqrt{3}$

D'autre part il est facile à vérifier que, quels que soient les couplages du primaire et du secondaire, on a :

$$I_2 / I_1 = 1 / m_i$$

L'avantage du rapport  $m_i$  est qu'il ne fait intervenir que des grandeurs (tensions et courants) directement mesurables quel que soit le couplage du transformateur.

#### Remarque importante :

- Chaque mode de couplage est indiquée par une lettre : Y – étoile ; D- triangle ; Z – zigzag. Les majuscules sont attribuées pour le couplage du primaire et les minuscules (y, d et z) pour le couplage du secondaire.
- Le repérage des bornes est effectué aussi par des lettres : A, B, C – côté HT et a, b, c – côté BT. S'il y a un neutre, on l'indique respectivement par la lettre N ou n.

- Intérêt du couplage « Etoile »

Si  $U_1$  est la tension entre deux fils de phase de la ligne d'alimentation du primaire, la tension aux bornes de chaque enroulement de phase du primaire est :

$$\begin{aligned} \Rightarrow U_1 & \text{ avec le couplage « Triangle »} \\ \Rightarrow U_1 / \sqrt{3} & \text{ avec le couplage « Etoile »} \end{aligned}$$

La tension que doit supporter chaque enroulement de phase est plus faible avec le couplage « Etoile », si bien que l'isolement des bobinages est plus facile à réaliser. Le couplage « Etoile » est plus économique que le couplage « Triangle », spécialement en HT.

D'autre part, au secondaire, le couplage « Etoile » permet de sortir le neutre : cette propriété est indispensable pour les transformateurs de distribution alimentant des lignes à quatre fils 220V / 380V.

#### 4. Valeurs nominales

Elles sont définies phase à phase comme en monophasé :

$$V_{2n} = m \cdot V_{1n} \quad J_{1n} = m \cdot J_{2n} \quad S = 3 \cdot V_{1n} \cdot J_{1n} = 3 \cdot V_{2n} \cdot J_{2n}$$

En fait on considère surtout les valeurs nominales des grandeurs relatives à la ligne (directement mesurables) et quel que soit le couplage on a :

$$U_{2n} = m_i \cdot U_{1n} \quad I_{1n} = m_i \cdot I_{2n} \quad S = \sqrt{3} \cdot U_{1n} \cdot I_{1n} = \sqrt{3} \cdot U_{2n} \cdot I_{2n}$$

Comme en monophasé :

- $U_2$  prend à vide sa valeur nominale ( $U_{20} = U_{2n}$ ), si  $U_1 = U_{1n}$
- $I_1$  prend sa valeur nominale ( $I_1 = I_{1n}$ ), lorsque  $I_2 = I_{2n}$

#### d) Etude expérimentale et prédétermination du fonctionnement en charge :

Les prédéterminations du fonctionnement en charge se font de la même manière qu'en monophasé sauf qu'ici les puissances consommées à vide et en court-circuit concernent les trois phases de l'appareil.

- L'essai à vide détermine les pertes magnétiques  $P_{mag} = P_0$  ainsi que le rapport de transformation  $m_i = U_{20} / U_1$  et par suite le rapport de transformation phase à phase  $m$ , le couplage des deux enroulements étant connu.
- L'essai en court circuit fournit
  - Les pertes joules pour le courant secondaire nominal  $P_{Jn} = P_{cc}$
  - Permet de calculer la résistance totale  $R_s$  ramenée dans chaque phase du secondaire

$$R_s = P_{cc} / 3 J_{2n}^2$$

- Permet de calculer la réactance totale  $X_s$  ramenée dans chaque phase du secondaire

$$X_s = \sqrt{\left(\frac{m V_{1cc}}{J_{2n}}\right)^2 - R_s^2}$$

On déduit de ces deux essais :

- La chute de tension aux bornes de chaque phase du secondaire

$$\Delta V_2 = R_s J_2 \cos \varphi_2 + X_s J_2 \sin \varphi_2$$

et par suite la chute de tension entre deux fils de phase de la ligne secondaire suivant le couplage existant.

- Le rendement du transformateur

$$\text{On a } \eta = \frac{P_2}{P_2 + P_{mag} + P_J}$$

$p_J$  étant proportionnel à  $J^2_2$  ( $P_J = 3.R_s J^2_2$ ) et aussi à proportionnel à  $I_2$  quel que soit le couplage; et comme  $P_J = P_{cc}$  pour  $I_2 = I_{2n}$ , on a :

$$P_J = P_{cc} \cdot (I_2/I_{2n})^2$$

Quel que soit le couplage, on a

$$\eta = \frac{\sqrt{3} \cdot U_2 \cdot I_2 \cdot \cos\varphi_2}{\sqrt{3} \cdot I_2 \cdot U_2 \cdot \cos\varphi_2 + P_0 + P_{cc} \cdot \left(\frac{I_2}{I_{2n}}\right)^2}$$

### **I.9.3. Fonctionnement en régime déséquilibré**

#### **a) Position du problème**

Dans certains cas le transformateur triphasé, soumis au primaire à trois tensions équilibrées, débite au secondaire trois courants déséquilibrés. Ce fonctionnement ne poserait aucun problème si le primaire et le secondaire étaient dans la même situation vis-à-vis du neutre :

- Tous les deux sans neutre sorti ;
- Tous les deux avec neutre sorti et relié au neutre de la ligne correspondante.

Or le cas le plus fréquent du transformateur en régime déséquilibré est celui des appareils abaisseurs de tension entre le réseau M.T et le réseau B.T. Le réseau M.T ne comporte jamais de fil neutre alors que, sur le réseau B.T, l'indépendance des usagers monophasés exige la présence d'un fil neutre (d'ailleurs mis à la terre).

Lors de la réalisation d'un réseau de distribution, les divers abonnés monophasés sont répartis sur les trois phases de façon à équilibrer, en moyenne, la charge du transformateur M.T / B.T.

En conséquence, le problème du déséquilibre se pose essentiellement lorsqu'un incident se produit sur le réseau de distribution : court-circuit (franc ou non) entre fil de phase de la ligne et la terre ou entre deux fils de phase de la ligne.

Pour étudier quel couplage il convient d'adopter au primaire et au secondaire on considère un transformateur dont :

- le primaire est alimenté par une ligne à trois fils (les tensions correspondantes équilibrées) ;
- le secondaire a son neutre sorti

et le transformateur est dans les conditions limites suivantes :

- la phase du secondaire bobinée sur la première colonne est chargée (courant débité  $j_2$ ) ;
- les deux autres phases du secondaire sont à vide.

Il s'agit du déséquilibre le plus défavorable pour l'appareil.

**b) Fonctionnement des montages « Triangle – Etoile » Dy et « Etoile – Etoile » Yy**

Le couplage « Etoile » permet de sortir le neutre et de le connecter au fil neutre du réseau de distribution.

Dans un transformateur dont les enroulements primaire et secondaire présentent respectivement un couplage « Triangle – Etoile » (fig. 1-33) le courant  $j_2$  appelle, dans la phase correspondante du primaire, un courant  $j_1$  qui arrive par la borne 1 et s'en retourne par la borne 1' sans perturber les deux autres phases, non chargées, du primaire.

Si l'isolement du primaire est tel que chaque phase peut supporter la tension entre deux fils de ligne le couplage Dy est utilisable lorsqu'il y a un risque de déséquilibre.

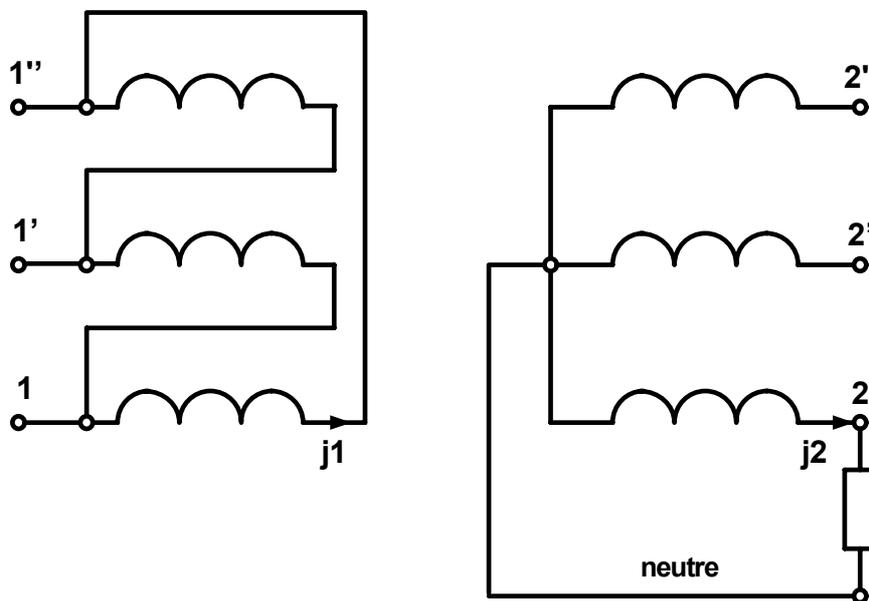


Fig. 1-33

Dans un transformateur dont les enroulements primaire et secondaire présentent respectivement un couplage « Etoile – Etoile » (fig. 1-34) le courant  $j_1$  appelé dans la phase 1 du primaire, s'en retourne nécessairement par les phases 1' et 1''. Or, au secondaire, les phases correspondantes 2' et 2'' ne sont parcourues par aucun courant. On n'a plus, sur chaque colonne, équilibre entre la f.m.m. du primaire et celle du secondaire. Le fonctionnement ne peut être satisfaisant.

Le courant  $j_2$ , induit dans la première phase du secondaire obéit à la **loi de Lenz** : l'appareil réagit de façon à réduire ce courant, c'est-à-dire à diminuer la tension  $v_2$  et par suite, au primaire, la tension  $v_1 - v_0$ .

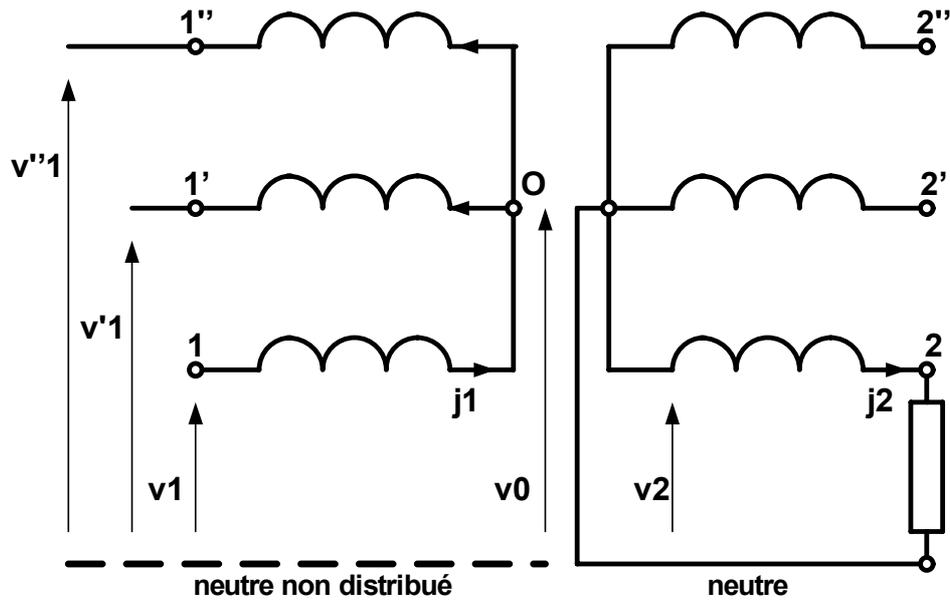


Fig. 1-34

Les f.é.m. induites dans les phases 1' et 1'' sont telles que le potentiel  $v_0$  du point O, au lieu d'être nul (comme en régime équilibré), devient presque égale à  $v_1$  (fig. 1-35).

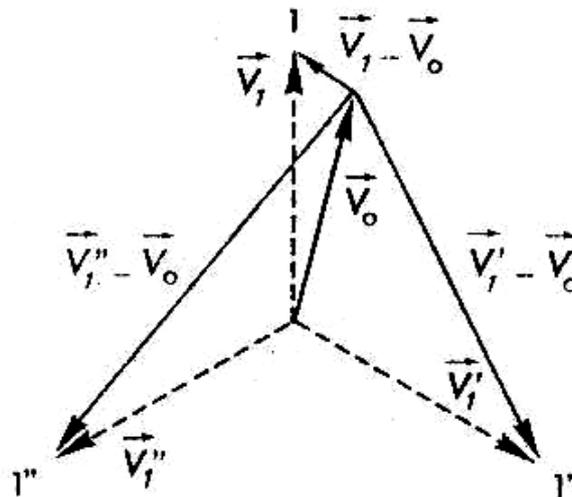


Fig. 1-35

Ainsi, le couplage Yy ne convient pas pour deux raisons :

- la chute de tension de la phase chargée est importante,  $v_2$  est très inférieure à la valeur qu'il aurait si la charge était équilibrée (de même valeur efficace que  $j_2$ ) ;
- les phases 1' et 1'' sont soumises à des tensions  $(v_1 - v_0)$  et  $(v''_1 - v_0)$ , pratiquement égales aux tensions composées de la ligne (alors qu'elles sont prévues pour fonctionner sous des tensions simples !).

c) Couplage « Etoile – Zigzag » Yz

Pour conserver au primaire l'avantage du couplage « Etoile » on a imaginé au secondaire un couplage dit en « Zigzag » qui permet de sortir un fil neutre et présente un fonctionnement satisfaisant en régime déséquilibré (fig. 1-36).

Sur chaque colonne on a disposé une phase du primaire ( $N_1$  spires) et deux bobines identiques ( $N_2$  spires chacune). Chaque **phase** du secondaire est obtenue en mettant en série deux de ces bobines prises en sens inverse et situées sur deux colonnes différentes.

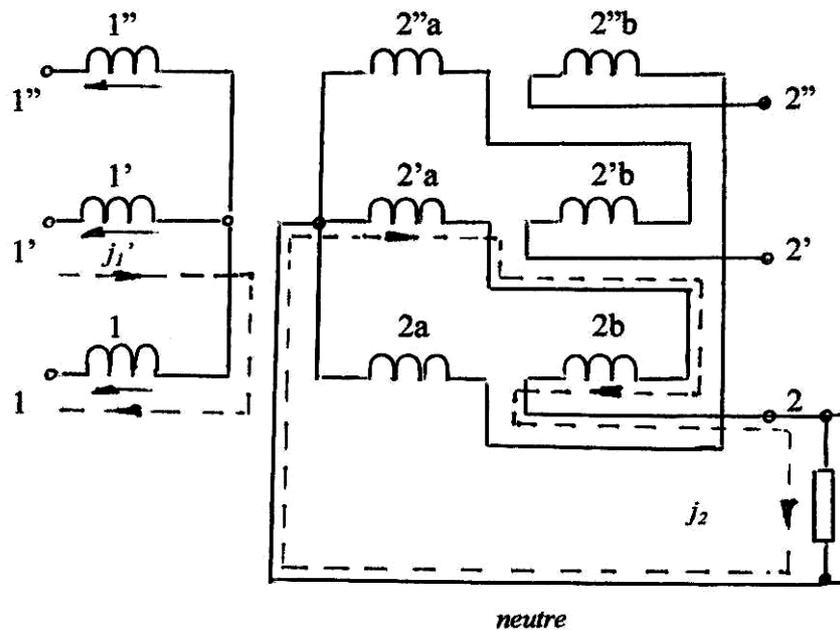


Fig. 1-36

Fonctionnement

- Marche à vide

Si on applique la loi d'Ohm générale entre la borne 2 et le neutre du secondaire, on obtient :

$$V_{20} = -V_{2b} + V_{2'a}$$

La tension  $v_{2b}$  étant en opposition de phase avec  $v_1$ , la tension  $(-v_{2b})$  est en phase avec  $v_1$  et la tension  $v_{2'a}$  est en opposition de phase avec  $v'_1$ .

De la construction de Fresnel des tensions on voit que son allure justifie le terme de zigzag (fig. 1-37).

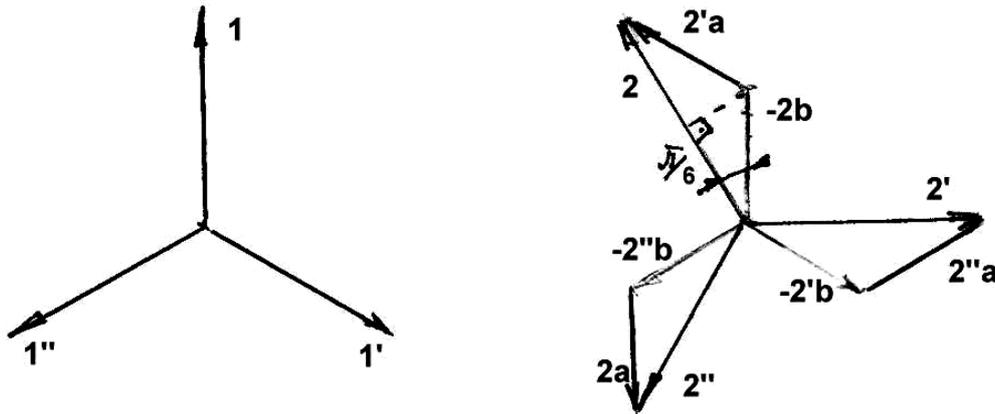


Fig. 1-37

Si  $V$  est la valeur efficace des tensions aux bornes des six bobines du secondaire on a :

- d'une part :  $V / V_1 = N_2 / N_1$  ;
- d'autre part (dans le triangle) :  $V_{20} = 2.V.\cos \pi/6 = V\sqrt{3}$

Par suite :  $m = V_{20} / V_1 = V.\sqrt{3} / V_1$  et  $m = (N_2 / N_1) . \sqrt{3}$

- Marche en charge

En régime équilibré, l'appareil fonctionne comme un transformateur Yy dont le rapport de transformation phase à phase serait égal à  $m$ .

En régime déséquilibré, le courant  $j_2$  crée sur la première et sur la deuxième colonne deux f.m.m. opposées. Il appelle au primaire un courant  $j'_1$  qui arrive par la borne 1' et s'en retourne par la borne 1 : les f.m.m. sur la première colonne d'une part et sur la seconde colonne d'autre part restent équilibrées si bien que le fonctionnement est satisfaisant.

Avantages : Le primaire est en « Etoile », ce qui est intéressant pour l'isolement Le secondaire a son neutre sorti, ce qui est indispensable pour alimenter un réseau de distribution.

Inconvénients : Si chaque phase du secondaire est constituée de deux bobines secondaires, prises dans le même sens sur la même colonne et connectées en série (les trois phase couplées en « Etoile »), le rapport de transformation serait :

$$m = 2.N_2 / N_1$$

Par suite, pour obtenir la même tension  $V_{20}$  avec un secondaire en « Zigzag » (comportant  $N_2$  spires par bobine) et avec un secondaire en « Etoile » (comportant  $N'_2$  spires par bobine), il faut que :

$$(N_2 / N_1) . \sqrt{3} = 2.N'_2 / N_1 \Rightarrow N_2 = 2.N'_2 / \sqrt{3}$$

Par rapport à un couplage Yy de même rapport de transformation  $m$ , le couplage Yz exige une majoration du nombre de spires secondaires dont la valeur relative est :

$$(N_2 - N'_2) / N'_2 = 2 / \sqrt{3} - 1 = 0,15 = 15\%$$

Le prix, mais aussi la chute de tension ainsi que les pertes par effet Joule augmentent.

### **I.9.4. Indice horaire**

Dans l'industrie les utilisateurs se préoccupent seulement des grandeurs (tensions et courants) extérieures, si bien qu'ils considèrent essentiellement les bornes du primaire et du secondaire. Elles sont désignées pour la haute tension par des lettres A, B, C et N (si le neutre est sorti) et pour la basse tension par des lettres a, b, c et n (éventuellement).

En plus, si le neutre est sorti, les lettres Y, y ou z indiquant le couplage sont affectées de l'indice n.

Si on considère la plaque à bornes normalisée (fig. 1-38) d'un transformateur triphasé (avec ou sans neutre sorti) :

- l'enroulement HT aboutit aux bornes A, B, C ;
- l'enroulement BT aboutit aux bornes a, b, c.

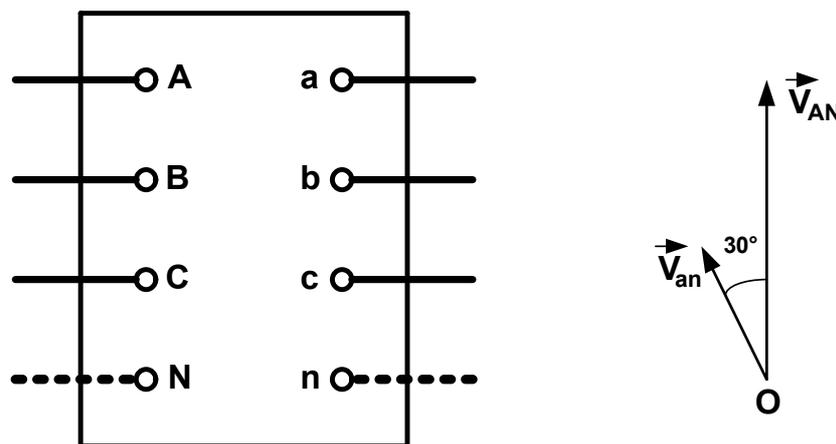


Fig. 1-38

En considérant tous les cas possibles il est facile de vérifier, à l'aide des vecteurs de Fresnel, que quels que soient les couplages du primaire et du secondaire le déphasage existant entre une tension primaire quelconque et la tension secondaire correspondante ( $V_{AN}$  et  $V_{an}$ , par exemple) est toujours un multiple de  $30^\circ$ .

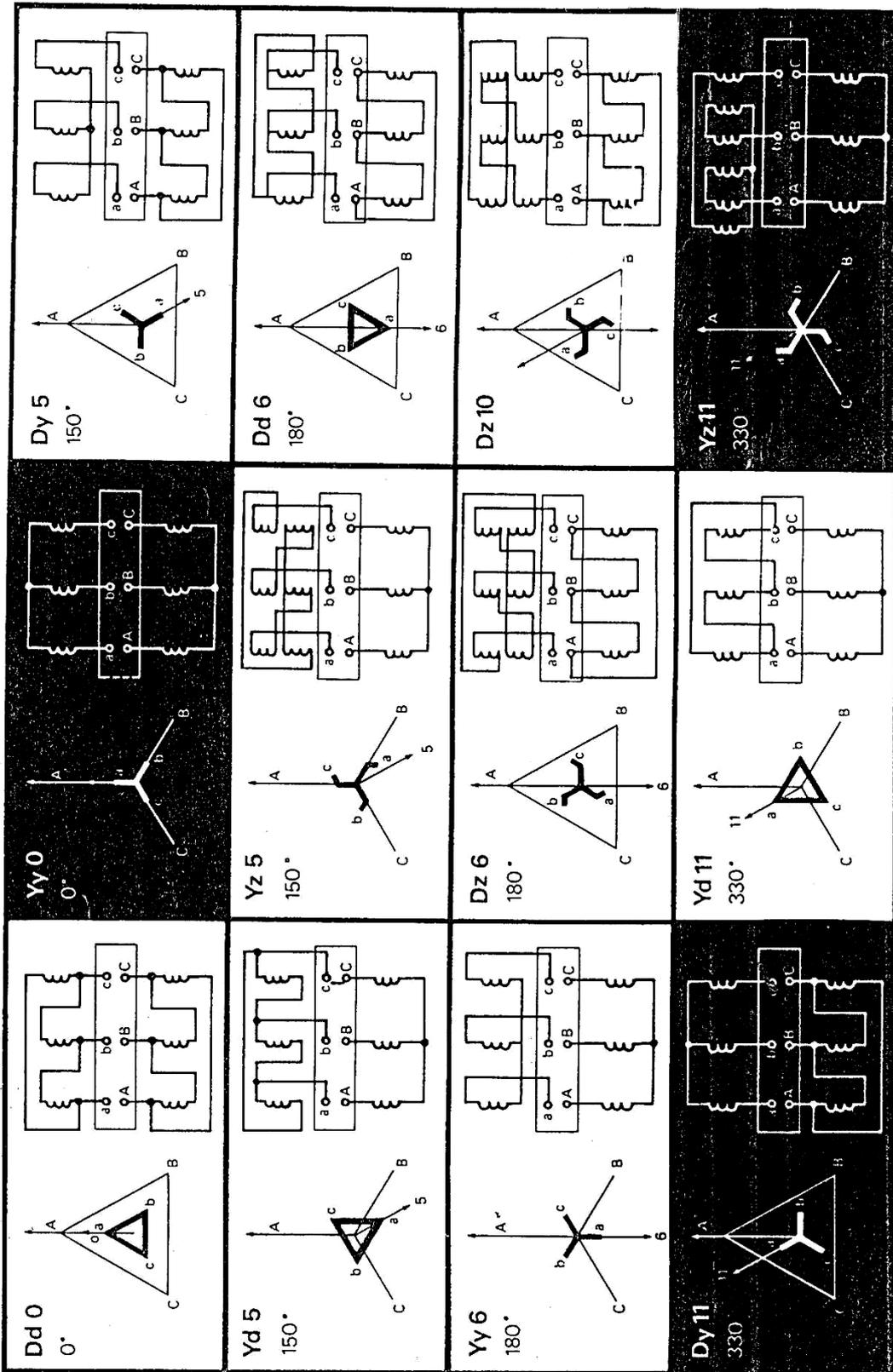
Par suite, si la tension  $V_{AN}$  est représentée par un vecteur vertical orienté vers le haut, la tension  $V_{an}$  est représentée par un vecteur plus court et l'ensemble évoque les aiguilles d'une horloge indiquant une heure entière

Ainsi, sur la figure 1-38 on lit 11 heures : on dit que l'indice horaire est 11.

Les couplages les plus utilisés sont (fig 1-39):

- Le couplage dY 11 utilisé comme éleveur de tension à la sortie des centrales électriques ;
- Le couplage Yy 0 employé comme abaisseur de tension entre un réseau H.T et un réseau M.T ;

Tableau des couplages usuels des transformateurs triphasés



D'après Merlin Gerin

Fig. 1-39

- Le couplage  $Dy_n 11$  utilisé en distribution lorsque les déséquilibres risquent d'être un peu importants ;
- Le couplage  $Yz_n 11$  adopté en distribution lorsque les déséquilibres peuvent être importants.

### 1.9.5. Couplage en parallèle de deux transformateurs

Lorsque deux transformateurs,  $T$  et  $T'$ , ont leurs primaires alimentés par le même réseau et leurs secondaires débitant dans la même installation, ils sont dits branchés en parallèle.

#### a) Transformateurs monophasés

Les conditions de branchement en parallèle de deux transformateurs monophasés (fig. 1-40) sont les suivantes :

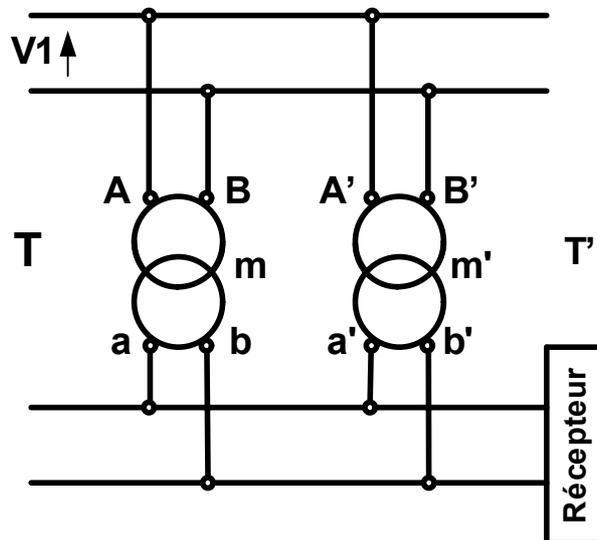


Fig. 1-40

- Les deux rapports de transformation doivent être égaux

Pendant le fonctionnement à vide le récepteur est déconnecté mais les deux secondaires restent branchés en parallèle. Pour qu'aucun courant parasite ne circule entre les appareils il est nécessaire que, avant la mise en parallèle des secondaires, la tension  $u_{20}$  entre les bornes  $a$  et  $b$  et la tension  $u'_{20}$  entre les bornes  $a'$  et  $b'$  soient égales :

$$U_{20} = m \cdot U_1 \quad U'_{20} = m' \cdot U_1 \quad \Rightarrow \quad m = m'$$

- Les bornes secondaires doivent être réunies de même polarité

Pour réunir les bornes secondaires de même polarité il suffit de suivre les indications de la plaque à bornes. Puisque, d'après les normes, les bornes en regard sur chaque plaque ( $A$  et  $a$  d'une part,  $B$  et  $b$  d'autre part pour le transformateur  $T$ ) ont la même polarité.

- Les deux transformateurs doivent avoir la même tension de court-circuit

Lorsqu'un usager charge l'ensemble des deux transformateurs il n'a aucun moyen de répartir la puissance entre les deux transformateurs : cette répartition dépend entièrement des valeurs des impédances totales  $Z_s$  et  $Z'_s$ , c'est-à-dire de la construction de  $T$  et  $T'$ .

Lorsque le transformateur  $T$  atteint sa charge nominale ( $I_2 = I_{2n}$ ) on a l'intérêt à ce que le transformateur  $T'$  atteigne simultanément sa charge nominale ( $I'_2 = I'_{2n}$ ), sinon le groupe est mal utilisé. Cela exige que  $Z_s \cdot I_{2n} = Z'_s \cdot I'_{2n}$ . Or en court-circuit :

$$m \cdot U_{1cc} = Z_s \cdot I_{2n} \quad \text{et} \quad m \cdot U'_{1cc} = Z'_s \cdot I'_{2n} \quad \Rightarrow \quad U_{1cc} = U'_{1cc}$$

Cette condition est difficile à réaliser avec des transformateurs de puissance très différents : ainsi il est déconseillé de brancher en parallèle deux transformateurs lorsque la puissance de l'un est supérieure à deux fois celle de l'autre.

### **b) Transformateurs triphasés**

On peut démontrer, comme en monophasé, que les deux transformateurs doivent présenter :

- le même rapport de transformation industriel  $m_i$  (faisant intervenir les tensions entre fils de phase) ;
- la même tension de court-circuit.

De plus il faut que :

- l'ordre de succession des phases soit identique ;
- le déphasage entre chaque tension du primaire et la tension correspondante du secondaire soit le même pour les deux appareils. Autrement dit, il faut que les deux transformateurs présentent le même indice horaire.

### **1.9.6. Dispositifs de refroidissement d'un transformateur**

Les enroulements présentent chacun une certaine résistance électrique : il en résulte des pertes par effet Joule. Dans le circuit magnétique on a aussi les pertes magnétiques.

Ces pertes constituent une puissance électrique consommée et non restituée à la charge : cette puissance apparaît sous forme de chaleur au sein du transformateur.

En fonctionnement, la température de l'appareil prend une valeur  $\Theta$  (par exemple  $80^\circ$ ) nettement supérieure à la température ambiante  $\Theta_0$  : l'écart ( $\Theta - \Theta_0$ ) est tel que la chaleur due aux pertes est entièrement évacuée vers l'extérieur du transformateur.

Pour que la température  $\Theta$  reste normalement inférieure à la température entraînant la détérioration des isolants, il faut prévoir un dispositif de refroidissement.

Si l'appareil est de faible puissance, il se refroidit dans l'air ambiant. Le plus souvent le transformateur est plongé dans une cuve d'huile (ou d'une substance synthétique non inflammable). Le liquide s'échauffe au contact du circuit magnétique et des enroulements puis va se refroidir le long des parois de la cuve ou dans un radiateur.

### **I.9.7. exercice**

Un transformateur de distribution Dy est tel que

$$S_n = 250 \text{ kVA} ; U_{1n} = 20 \text{ kV}$$

Il a donné aux essais les résultats suivants :

- à vide sous 20 kV  $U_{20} = 392 \text{ V}, P_0 = 650 \text{ W},$
- en court-circuit pour  $I_{2n}$   $U_{1cc} = 815 \text{ V}, P_{1cc} = 2,8 \text{ kW}.$

1. Calculer

- 1.1. le rapport de transformation phase à phase,
- 1.2. la valeur nominale du courant secondaire.

2. Sachant que la section utile des noyaux est de  $170 \text{ cm}^2$  et que  $B_{\max} = 1,6 \text{ T}$ , déterminer les nombres de spires par phase au primaire et au secondaire.

3.

3.1. Représenter le modèle monophasé (c'est-à-dire pour une colonne) du transformateur ramené au secondaire dans l'approximation de Kapp.

3.2. Calculer

- a) la résistance  $R_s$ ,
- b) la réactance  $X_s$ .

4. Le transformateur, alimenté sous 20 kV, débite 200 kW dans un circuit inductif de facteur de puissance  $\cos \varphi_2 = 0,9$ .

Calculer les valeurs correspondantes

- a) de la tension  $U_2$  et du courant débité  $I_2$ ,
- b) du rendement de l'appareil

## II. Les moteurs asynchrones triphasés

### II.1. Interprétation des différents schémas électriques et des différentes commandes :

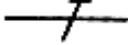
#### II.1.1. Normalisation des symboles et classification des différents schémas électriques

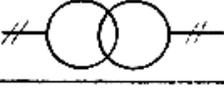
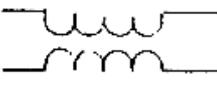
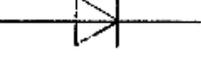
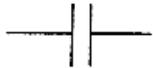
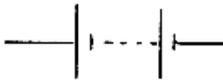
##### a) Normalisation des symboles :

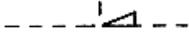
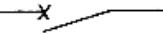
Les éléments qui composent le plan d'un dispositif de commande à courant alternatif sont représentés par des symboles normalisés et par des lettres repères.

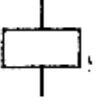
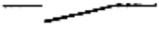
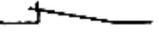
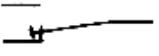
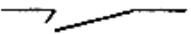
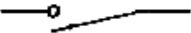
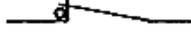
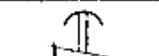
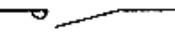
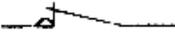
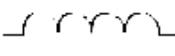
Les éléments les plus rencontrés dans un plan sont les suivants :

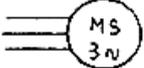
Lettre repère	Désignation	Symbole
L1 L2 L3	Potentiel phase	—
N	Potentiel neutre	—
PE	Conducteur de protection	—
L +	Potentiel positif	—
L -	Potentiel négatif	—
	Signal alternatif	~
	Signal continu	—

Lettre repère	Désignation	Symbole
PE	Conducteur de protection	
		
E	Terre	
-	Equipotentialité	

Lettre repère	Désignation		Symbole
T	Transformateur	Schéma unifilaire	
		Schéma développé et multifilaire	
V	Diode de redressement		
v	Convertisseur alternatif/continu (schéma fonctionnel)		
C	Condensateur		
G	Pile ou batterie (Le trait long correspond à la polarité positive et le trait court à la polarité négative)		

Lettre repère	Désignation	Symbole
	Fonction disjoncteur	X
	Fonction contacteur	D
	Fonction déclenchement automatique	■
	Fonction thermique	
	Fonction magnétique	
	Fonction magnétothermique	
	Fonction accrochage libéré	
	Fonction accrochage en prise	
F	Fusible	
Q	Disjoncteur	
K M	Contacteur	
K M	Discontacteur	
F	Relais thermique	
F	Relais magnétique	
F	Relais magnétothermique	
F	Contact à fermeture d'un relais thermique (contact à accrochage)	
F	Contact à ouverture d'un relais thermique (contact à accrochage)	

Lettre repère	Désignation	Symbole
K	Commande électromagnétique	
	Contact de commande à fermeture	
	Contact de commande à ouverture	
	Contact avec chevauchement	
	Contact de passage à l'action	
	Contact de passage au relâchement	
	Contact de passage à l'action et au relâchement	
	Contact à fermeture à position maintenue	
	Contact à ouverture à position maintenue	
	Contact à fermeture temporisé à la fermeture	
	Contact à fermeture temporisé à l'ouverture	
	Contact à ouverture temporisé à l'ouverture	
	Contact à ouverture temporisé à la fermeture	
	Contact de puissance à fermeture	
	Contact de puissance à ouverture	
Y	Organe de commande électro-aimant, électrovanne	

Lettre repère	Désignation	Symbole
	1 Sens de mouvement rectiligne	
	2 Sens de mouvement rectiligne	
	1 Sens de mouvement de rotation	
	2 Sens de mouvement de rotation	
	Couplage étoile	
	Couplage triangle	
M	Moteur symbole général	
M	Moteur asynchrone triphasé rotor en court-circuit	
M	Moteur asynchrone triphasé rotor bobiné	
M	Moteur asynchrone monophasé	
M	Moteur synchrone triphasé	
M	Moteur continu	
L	Enroulement séparé ou dérivation	
L	Enroulement série	
L	Enroulement de compensation	
Y	Frein serré	
• Y	Frein desserré	

Lettre repère	Désignation	Symbole
H	Lampe de signalisation	
H	Sonnerie	

**b) Classification des différents schémas électriques :**

Les schémas sont des représentations graphiques conventionnelles d'une installation, ou d'une partie d'installation, qui montrent les relations mutuelles des différentes parties de l'équipement et les moyens de liaison employés à cet effet. Les schémas électriques sont établis dans le but de décrire principalement les connexions électriques. Il en existe plusieurs types. Parmi les représentations on trouve :

**1. Représentation développée**

Elle est destinée à faire comprendre le fonctionnement d'une installation par des symboles, des connexions électriques et autres liaisons nécessaires.

**Exemples de schéma développé**

- Circuit de puissance (fig.2-1)

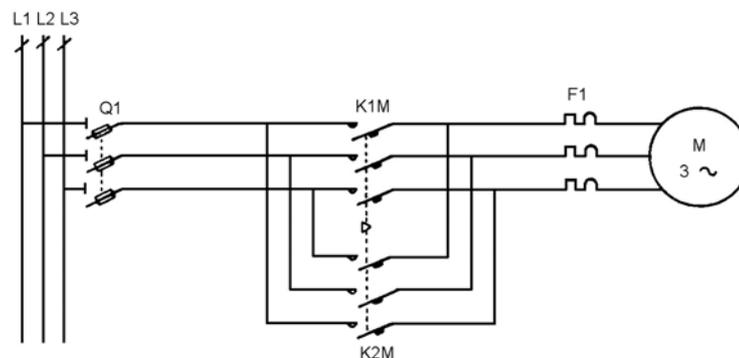


fig.2-1

- Circuit de commande (fig.2-2)

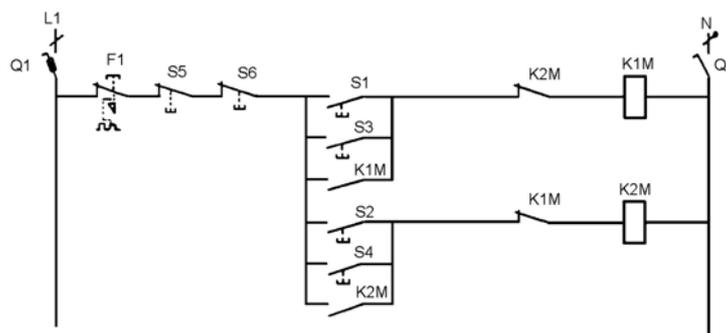


fig.2-2

Légende pour les deux schémas

- Q1 : fusible sectionneur
- F1 : relais de protection magnéto-thermique
- S1 : bouton poussoir marche avant : poste de travail N°1
- S3 : bouton poussoir marche avant : poste de travail N°2
- S2 : bouton poussoir marche arrière : poste de travail N°1
- S4 : bouton poussoir marche arrière : poste de travail N°2
- S5 : bouton poussoir arrêt : poste de travail N°1
- S6 : bouton poussoir arrêt : poste de travail N°2
- K1M : discontacteur marche avant
- K2M : discontacteur marche arrière.

## 2. Représentation rangée

**Exemple de schéma développé rangé** (fig.2-3)

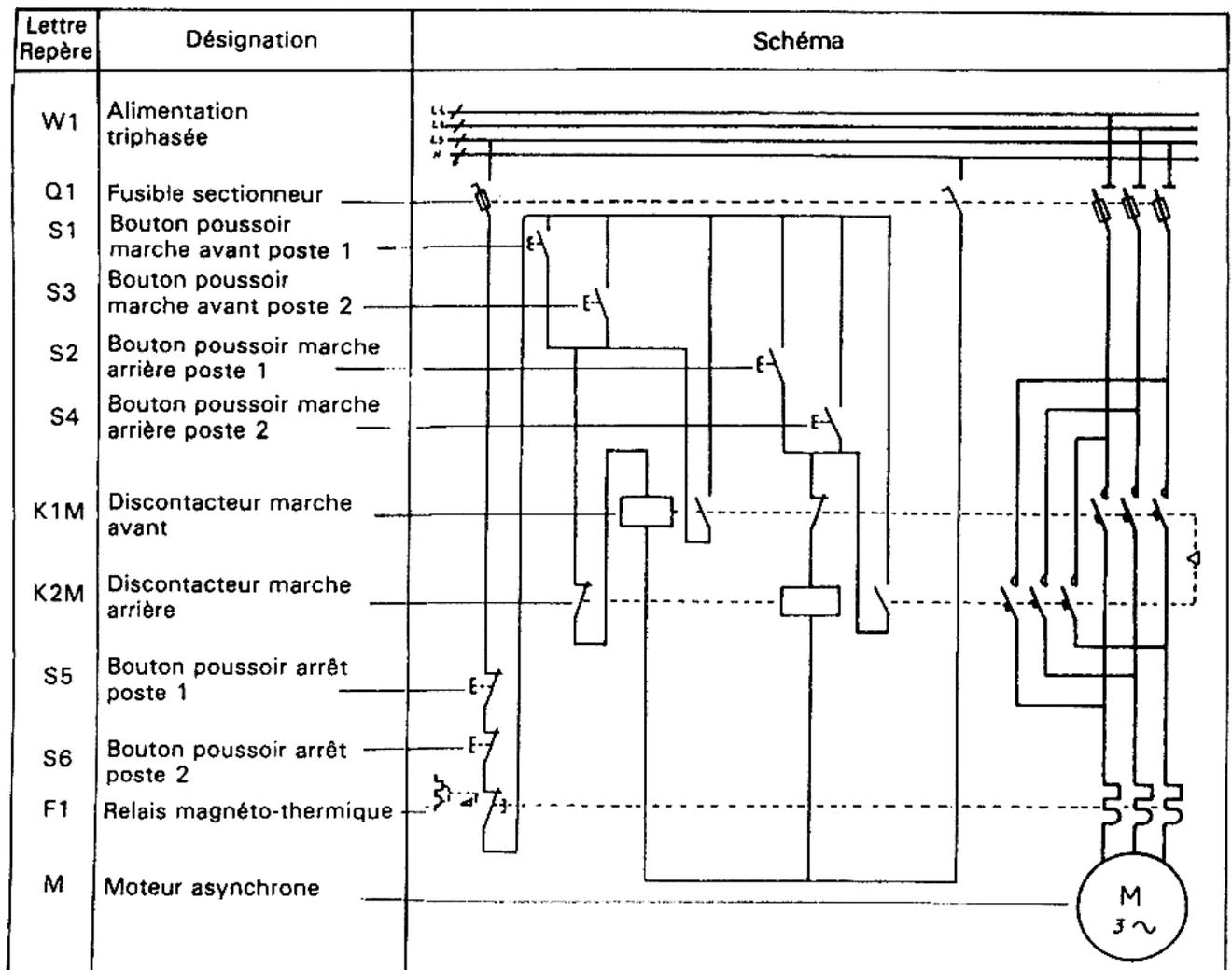


fig.2-3

## 3. La représentation multifilaire

Celle-ci exige un travail de dessin très important. En effet, chaque élément d'appareil, chaque borne, chaque bornier, chaque tableau, chaque boîtier, chaque boîte de dérivation est représenté en respectant le plus fidèlement possible son

emplacement réel. Chaque trait reliant deux éléments correspond à un conducteur ; son tracé est identique à la canalisation existante ou au passage du câble.

Pour faciliter la compréhension du schéma, il faut regrouper par faisceau les conducteurs parallèles en tenant compte de leur fonction dans le circuit (exemple : rassembler dans le même faisceau tous les conducteurs parallèles qui relient des organes de commande).

Le schéma multifilaire est le schéma de câblage par excellence ; chaque conducteur doit donc aboutir soit à une borne d'appareil, soit à un bornier, soit à une boîte de dérivation ; tout élément appartenant au circuit (depuis l'élément d'un appareil jusqu'au conducteur) doit être repéré en respectant la normalisation.

**Exemple d'un schéma multifilaire : (fig.2-4)**

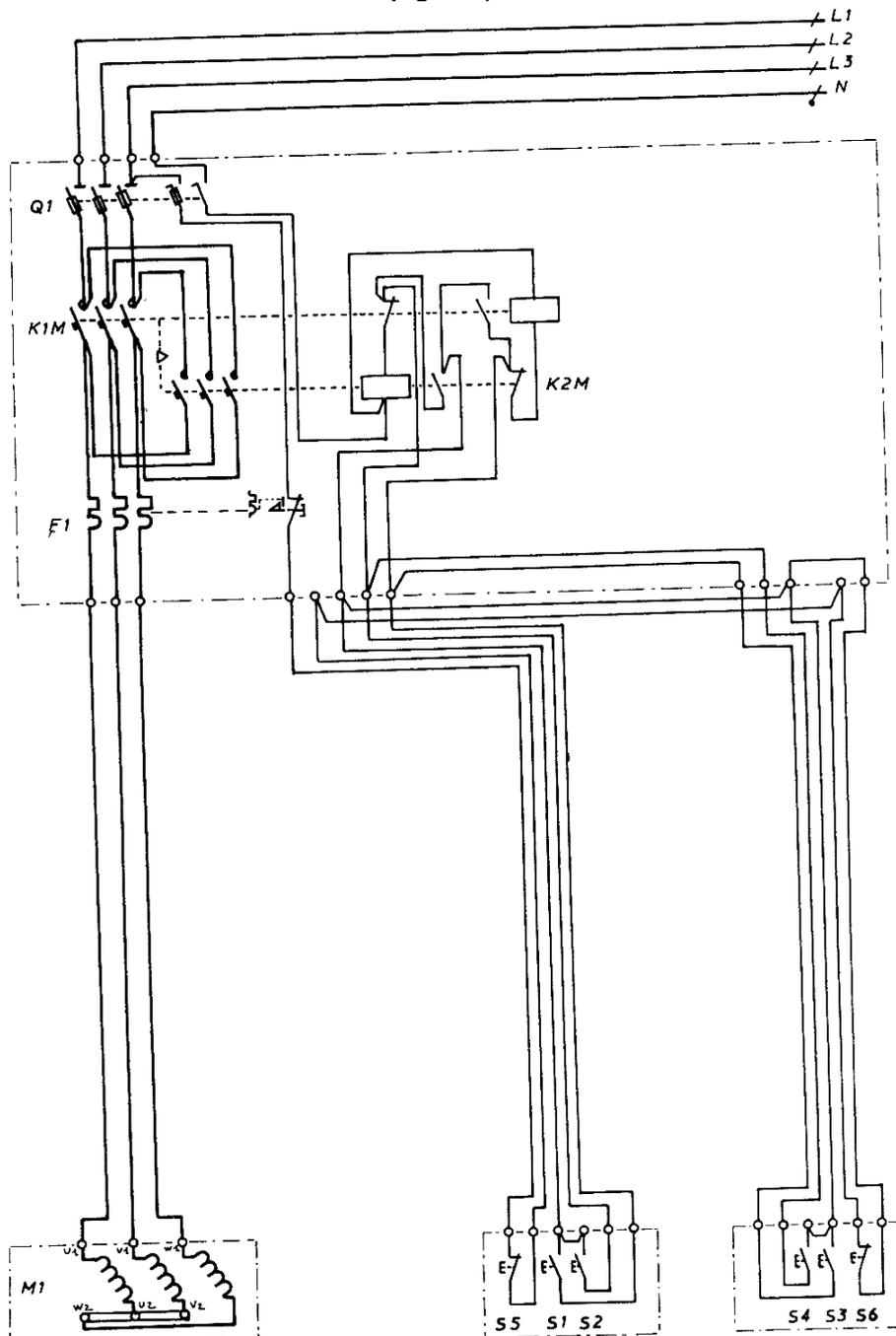


fig.2-4

### Légende

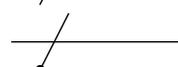
Q1	: fusible sectionneur
F1	: relais de protection magnéto-thermique
S1	: bouton poussoir marche avant : poste de travail N°1
S3	: bouton poussoir marche avant : poste de travail N°2
S2	: bouton poussoir marche arrière : poste de travail N°1
S4	: bouton poussoir marche arrière : poste de travail N°2
S5	: bouton poussoir arrêt : poste de travail N°1
S6	: bouton poussoir arrêt : poste de travail N°2
K1M	: discontacteur marche avant
K2M	: discontacteur marche arrière.
M1	: moteur asynchrone triphasé

#### 4. La représentation unifilaire

Elle représente le plus fidèlement possible la position réelle de tous les appareils qui composent le circuit mais :

- Les éléments identiques et appartenant au même appareil ne sont représentés que par un seul symbole ;
- Les bornes des appareils ne sont pas représentées ;
- Un trait unique remplace les conducteurs parallèles dans les conditions suivantes :
  - Soit qu'ils appartiennent à un système multiphasé,
  - Soit qu'ils assurent des fonctions électriques équivalentes,
  - Soit qu'ils suivent le même trajet,
  - Soit qu'ils appartiennent à la même canalisation ou au même câble.

Remarque : le nombre d'éléments d'un même appareil représenté par un seul symbole ainsi que le nombre de conducteurs remplacés par un trait doit être indiqué ; pour cela il faut inscrire auprès des symboles suivants la valeur de ce nombre

	Conducteur
	Neutre
	Conducteur et protection

Exemple d'un schéma unifilaire (schéma de puissance)  
(fig.2-5)

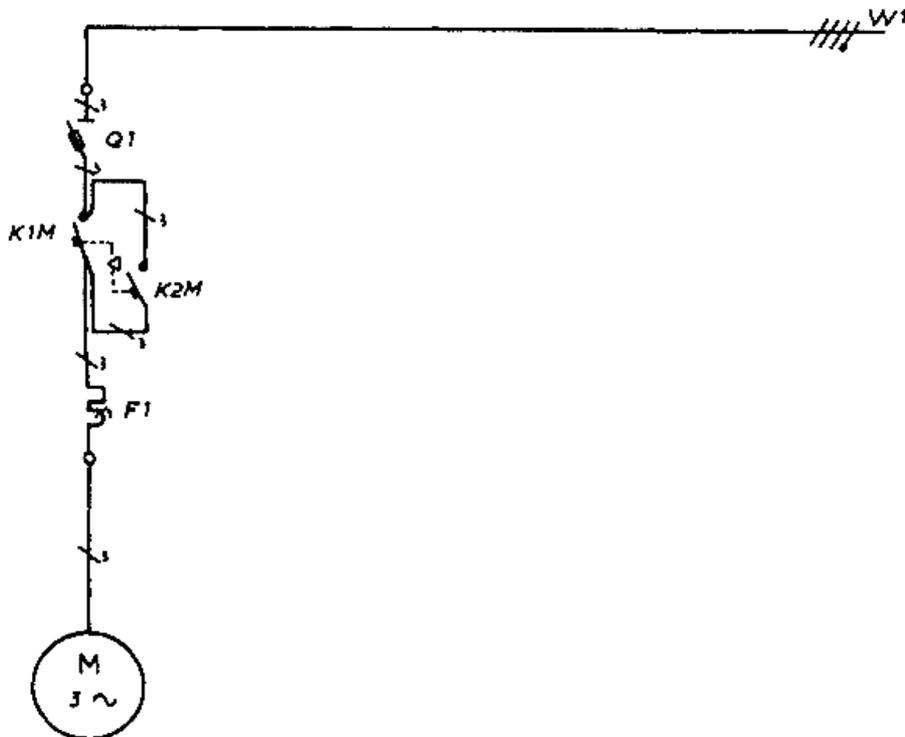


fig.2-5

Légende

- Q1 : fusible sectionneur
- F1 : relais de protection magnéto-thermique
- K1M : discontacteur marche avant
- K2M : discontacteur marche arrière.
- M1 : moteur asynchrone triphasé

### **II.1.2. Organes et appareillages de commande :**

- **Interrupteur :**

C'est un appareil qui permet la mise en fonctionnement ou l'arrêt d'une chaîne automatique. Il a deux états stables ( une position ouverte et une position fermée). De point de vue technologique, il est composé d'un ou de plusieurs pôles, d'une par ils fonctionnent toujours en même temps et d'autre part possèdent un grand pouvoir de coupure

- **Bouton poussoir**

Les boutons-poussoirs (fig-2.6) sont des interrupteurs avec force de rappel constante, actionnés par une pression du doigt. Lorsque la pression cesse, le bouton-poussoir retourne en position initiale (pour commandes par impulsion).

Les boutons-poussoirs avec accrochage restent dans la position « appuyée » après avoir été actionnés. Ce n'est qu'une deuxième pression qui permet de décrocher le bouton-poussoir pour le faire revenir dans la position de repos (pour commandes par contact permanent).

Les touches « coup de poing » avec leur grande surface permettent un actionnement simple et rapide, même avec des gants.

Les boutons-poussoirs lumineux sont munis d'une calotte transparente permettant d'obtenir un signal optique grâce à la lampe qui est montée à l'intérieur.

Les boutons d'arrêt d'urgence sont également équipés d'un système d'accrochage en position « actionnée ». Le décrochage s'effectue soit par rotation ou au moyen d'une clé.

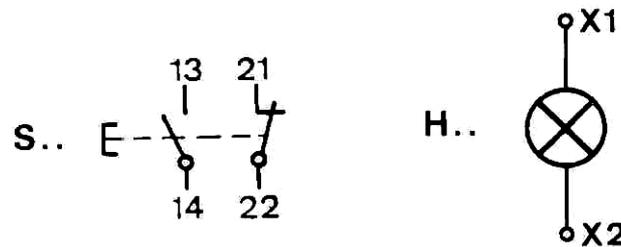


fig.2-6.Appareils de commande à bouton poussoir

- **Les contacteurs**

**Définition :**

Le contacteur (fig.2-7) est un appareil mécanique de connexion ayant une seule position de repos, commandé autrement qu'à la main, capable d'établir, de supporter et d'interrompre des courants dans les conditions normales du circuit, y compris les conditions de surcharge en service.

**Constitution :**

1. Un élément moteur (bobine de l'électro-aimant).
2. Des pôles ou contacts principaux instantanés.
3. Des contacts auxiliaires, instantanés ou/et temporisés n'acceptant que des courants de faible valeur.

L'alimentation de la bobine peut se faire en courant alternatif ou en courant continu :

- **En courant alternatif**

L'électro-aimant du contacteur, alimenté en courant alternatif, comporte un circuit magnétique feuilleté de manière à réduire les pertes par courant de Foucault qui prennent naissance sous l'effet du flux alternatif.

Lorsque l'électro-aimant est ouvert la réductance du circuit magnétique est élevée, la réactance de sa bobine est faible ; il en résulte un appel de courant supérieur au courant permanent en service.

Cette pointe d'intensité, peut atteindre 6 à 10 fois celle à circuit fermé.

- **En courant continu**

L'électro-aimant du contacteur, alimenté en courant continu, comporte un circuit magnétique exécuté en acier massif supportant la bobine magnétisante dont le flux est suffisant pour créer un couple électromagnétique supérieur au couple mécanique résistant du contacteur au repos.

La puissance en W absorbée par la bobine dépend du calibre du contacteur : la résistance d'économie mise en série avec la bobine par un contact auxiliaire ramène cette puissance environ au tiers de cette valeur.

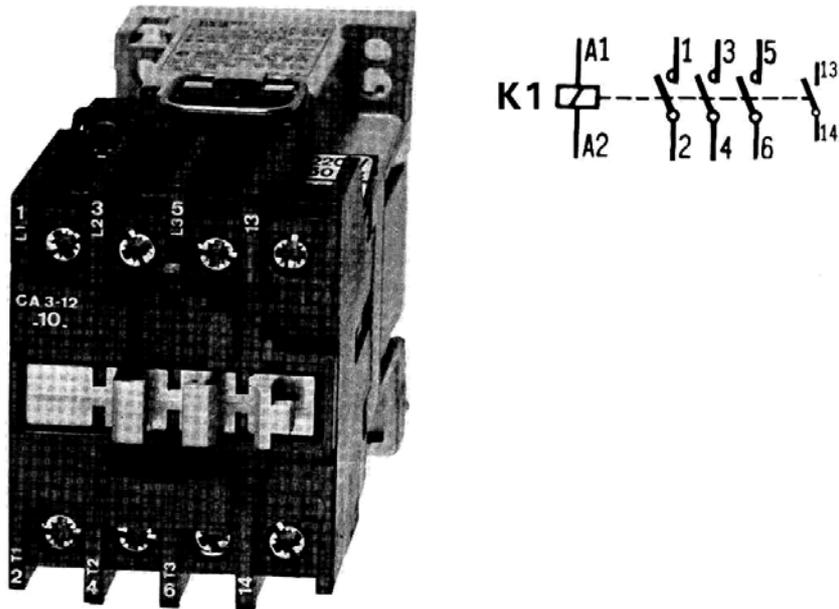


fig.2-7

• **Relais auxiliaires**

Relais auxiliaires (fig 2-8) sont des contacteurs dont le bloc de contacts est prévu pour le couplage auxiliaires (circuits de commande, de signalisation et de verrouillage).



fig.2-8

- **Relais temporisés**

Les relais temporisés (fig2-9) sont des appareils de commande permettant de retarder un certain temps la transmission des ordres qu'ils ont reçus. Le mécanisme de temporisation peut varier d'un modèle à l'autre. Il existe en effet des relais temporisés mécaniques, pneumatiques et électroniques. Les relais temporisés sont par exemple utilisés sur les contacteurs « étoile-triangle » pour engendrer la commutation d'étoile en triangle après un certain temps.

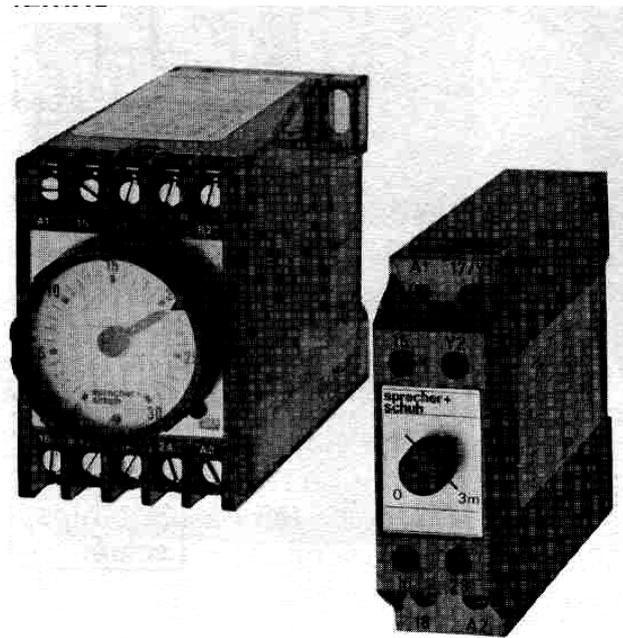


fig.2-9

### **II.1.3. Marquage des bornes de l'appareil**

L'identification des bornes permet de fournir des informations sur la fonction réelle de l'élément.

#### *Principe de marquage*

Suivant la fonction de l'appareil considéré, il faut utiliser une notation numérique ou alphanumérique.

- Appareil de protection d'un circuit principal :

Le marquage des bornes est numérique.

Chaque borne d'entrée est affectée d'un chiffre impair différent et chaque borne de sortie correspondante est désignée par le chiffre pair immédiatement supérieur.

Exemples : (fig2-10)



fig.2-10

- Appareil de coupure d'un circuit principal :  
Le marquage des bornes est numérique.  
Chaque borne d'entrée est affectée d'un chiffre impair différent et chaque borne de sortie correspondante est désignée par le chiffre pair immédiatement supérieur.

Exemples : (fig2-11)

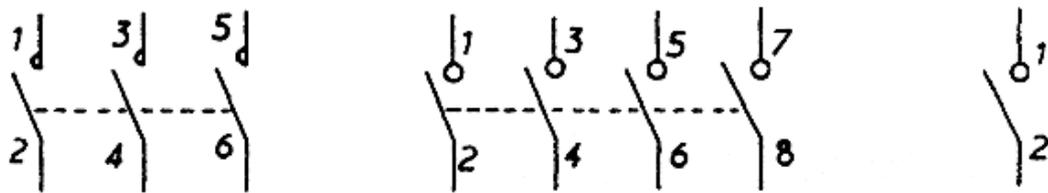


fig.2-11

- Appareil récepteur d'un circuit principal :

a) Appareil à deux bornes

Le marquage des bornes est numérique.

Chaque borne d'entrée est affectée d'un chiffre impair différent et chaque borne de sortie correspondante est désignée par le chiffre pair immédiatement supérieur.

Exemples : (fig2-12)

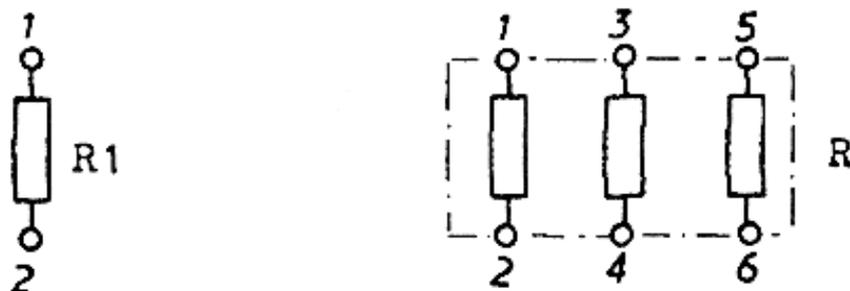


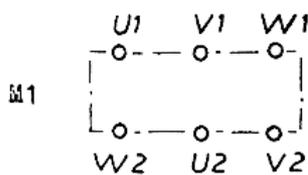
fig.2-12

b) Appareil triphasé

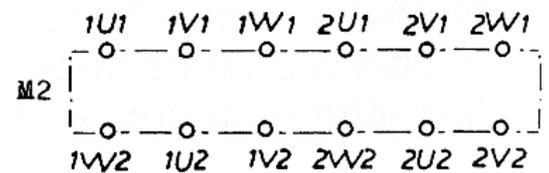
Le marquage des bornes est alphanumérique et composé de :

- un chiffre: c'est le numéro d'ordre de l'élément qui peut être supprimé s'il n'y a aucune ambiguïté.
- une lettre: U pour le conducteur de phase L 1  
V pour le conducteur de phase L 2  
W pour le conducteur de phase L 3  
N pour le conducteur de neutre  
PE pour le conducteur de protection  
E pour le conducteur terre
- un chiffre: 1 pour l'entrée de l'élément  
2 pour la sortie de l'élément

Exemples : (fig2-13)



Moteur à trois enroulements, le numéro d'ordre est supprimé



Moteur à six enroulements, le numéro d'ordre est obligatoire

fig.2-13

- Appareil de protection d'un circuit auxiliaire

Le marquage des bornes est numérique et composé :

- d'un numéro d'ordre qui peut être supprimé s'il n'y a pas d'ambiguïté.
- d'un chiffre impair pour la borne d'entrée et du chiffre pair immédiatement supérieur pour la borne de sortie.

Exemples: (fig2-14)

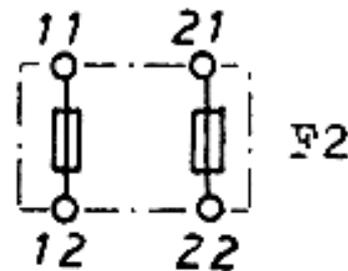
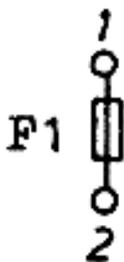


fig.2-14

- Appareil de commande d'un circuit auxiliaire

Le marquage des bornes est numérique et composé :

- d'un numéro d'ordre
- d'un chiffre qui dépend de la fonction de l'élément et de la borne considérée.

Exemples :

- a) Contact à ouverture : (fig2-15)

le chiffre 1 est affecté à la borne d'entrée,  
le chiffre 2 à la borne de sortie.

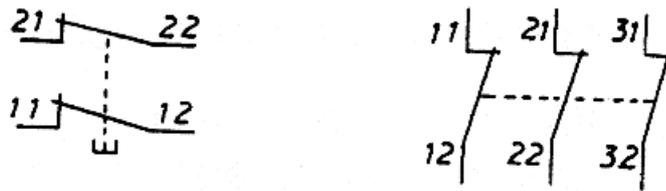


fig.2-15

- b) Contact à fermeture : (fig2-16)

le chiffre 3 est affecté à la borne d'entrée,  
le chiffre 4 à la borne de sortie.

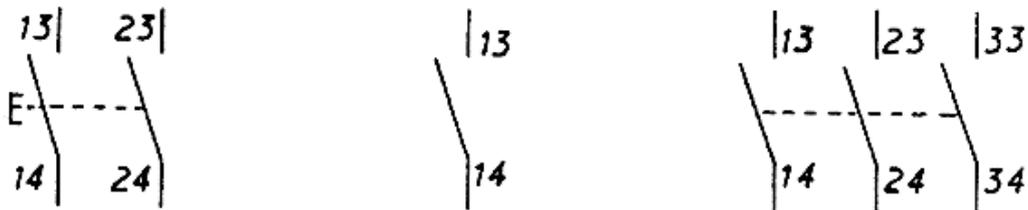


fig.2-16

- c) Contact bi-directionnel : (fig2-17)

le chiffre 1 est affecté à la borne commune,  
le chiffre 2 au contact repos,  
le chiffre 4 au contact travail.

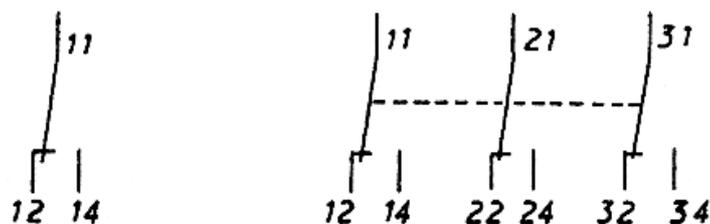
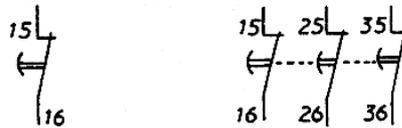


fig.2-17

d) Contact à fonction spéciale( fig 2-18)

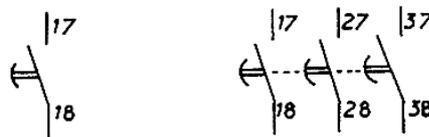
– Contact à ouverture :

le chiffre 5 est affecté à la borne d'entrée,  
le chiffre 6 à la borne de sortie.



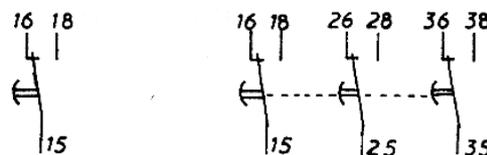
– Contact à fermeture :

le chiffre 7 est affecté à la borne d'entrée,  
le chiffre 8 à la borne de sortie.



– Contact bi-directionnel :

le chiffre 5 est affecté à la borne commune,  
le chiffre 6 au contact repos,  
le chiffre 8 au contact travail.



– Contact d'un appareil de protection

C'est un contact à fonction spéciale dont les chiffres ont été définis précédemment.

Par contre, le numéro d'ordre est imposé :

le chiffre 9 pour le premier contact,  
le chiffre 0 pour le deuxième contact.

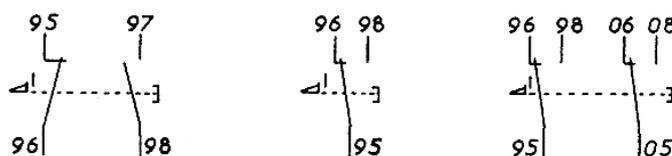


fig.2-18

- Appareils récepteurs d'un circuit auxiliaire

a) Bobines

Le marquage des bornes est alphanumérique.

- Bobine à un seul enroulement: la borne d'entrée est repérée par A 1, la borne de sortie par A2.
- Bobine à deux enroulements séparés: les bornes d'entrées sont repérées par A 1 et B 1, les bornes de sortie respectivement par A 2 et B 2.
- Bobine à deux enroulements avec un point commun : les bornes d'entrées sont repérées par A 1 et B 1, la borne commune par A 2 ou B 2.

Exemples (fig.2-19)

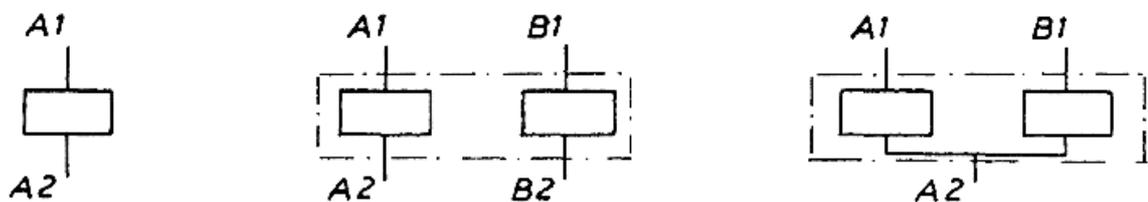


fig.2-19

b) Récepteurs quelconques d'un circuit auxiliaire

Le marquage des bornes est numérique et composé :

- d'un numéro d'ordre qui n'est pas obligatoire
- d'un chiffre impair pour la borne d'entrée et du chiffre pair immédiatement supérieur pour la borne de sortie.

Exemples (fig.2-20)

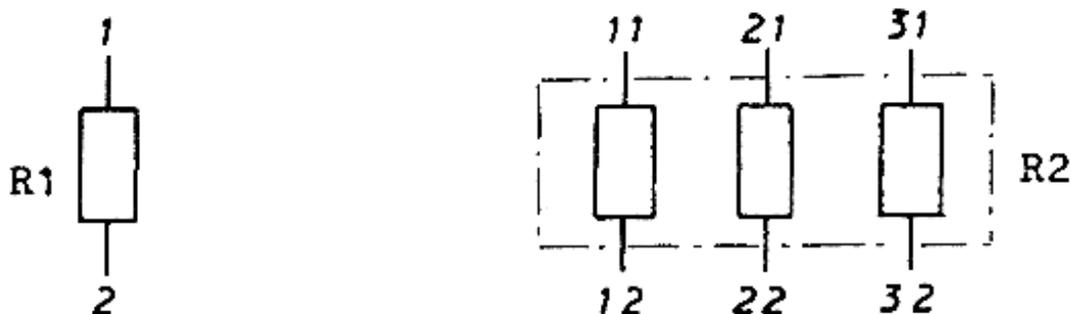


fig.2-20

Exemple d'un marquage de bornes (fig.2-21)

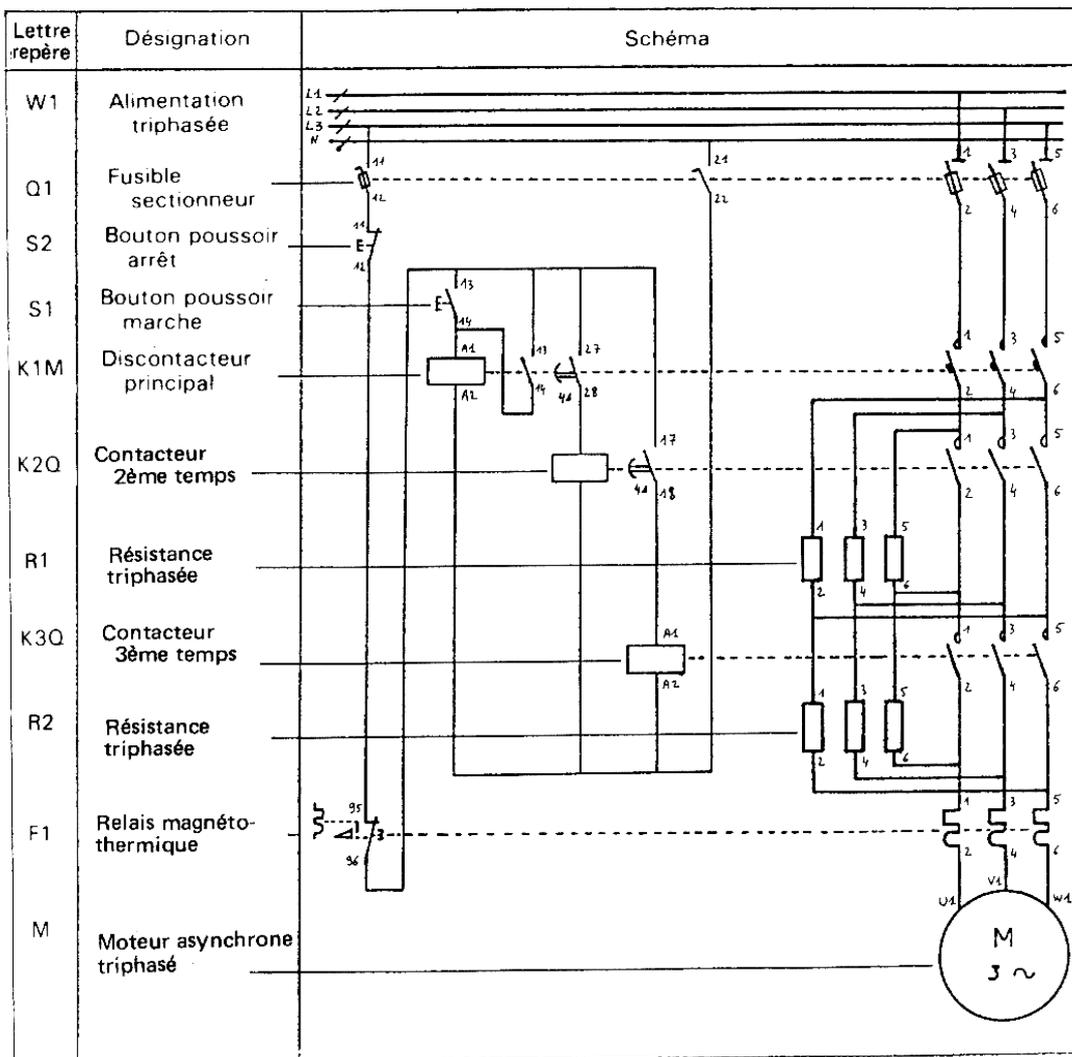


fig.2-21

## II.1.4. Commande d'un contacteur

### a) Commande manuelle

Elle permet de mettre en ou hors service un récepteur de puissance alimenté par plusieurs potentiels en utilisant un interrupteur à un pôle.

Schéma développé rangé du circuit de commande  
Source d'alimentation alternative (fig.2-22)

Lettre repère	Désignation	Schéma
W1	Phase L1	
Q1	Interrupteur	
K1M	Contacteur	
W2	Neutre	

fig.2-22

Fonctionnement

Lorsque l'interrupteur est ouvert, la bobine du contacteur K1M n'est pas excitée. Si l'on ferme l'interrupteur, celle-ci s'excite.

Remarque :

Ce montage est très peu utilisé.

b) Commande semi-automatique par boutons poussoirs marche – arrêt

a) Source d'alimentation alternative

Schéma développé du circuit de commande (fig.2-23)

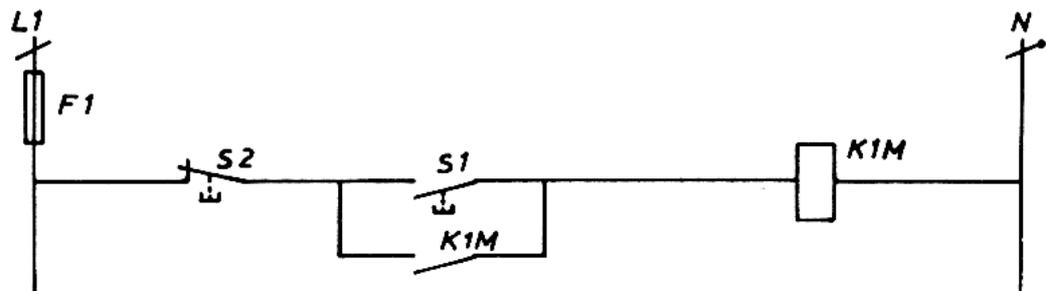


fig.2-23

Légende :

F 1 : fusible de protection du circuit de commande

S 1 : bouton poussoir marche

S 2 : bouton poussoir arrêt

K 1M : contacteur

Fonctionnement

Une action sur le bouton poussoir marche (S 1) excite la bobine K1M ; ses contacts changent d'état. Le bouton poussoir S1 se trouve court-circuité et son relâchement n'a plus aucune influence sur le fonctionnement. Pour désexciter la bobine, il faut appuyer sur le bouton poussoir arrêt (S2).

Remarque :

Les contacts de puissance ne sont pas représentés car ils sont situés dans le schéma de puissance.

b) Source d'alimentation continue

Schéma développé rangé du circuit de commande(fig.2-24)

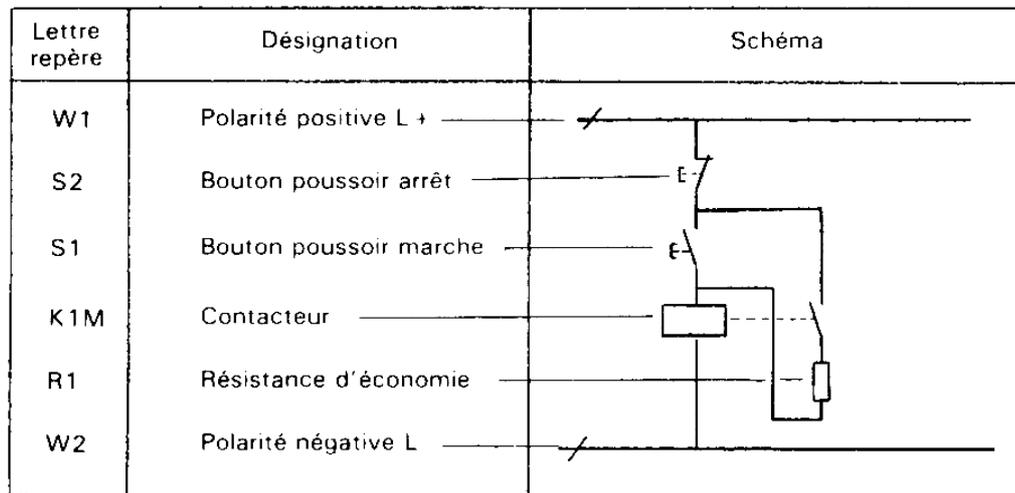


fig.2-24

Fonctionnement

Une action sur le bouton poussoir S1 provoque l'excitation de la bobine du contacteur K1M. Son contact d'auto-alimentation se ferme et met en service la résistance d'économie de façon à limiter le courant absorbé du circuit de commande.

Une action sur le bouton poussoir S2 entraîne la désexcitation de la bobine ce qui provoque l'arrêt.

Remarques :

- C'est un fonctionnement en arrêt prioritaire car si l'on appuie sur les deux boutons poussoirs en même temps, la bobine K1M n'est pas alimentée.
- Les contacts de puissance de K1M ne sont pas représentés puisqu'ils sont situés dans le circuit de puissance de l'installation.

c) Commande automatique par détecteurexemple

Un contacteur est alimenté si la pression est supérieure à 4 bar et s'il n'y a pas débit d'eau.

Schéma développé rangé du circuit de commande(fig.2-25)

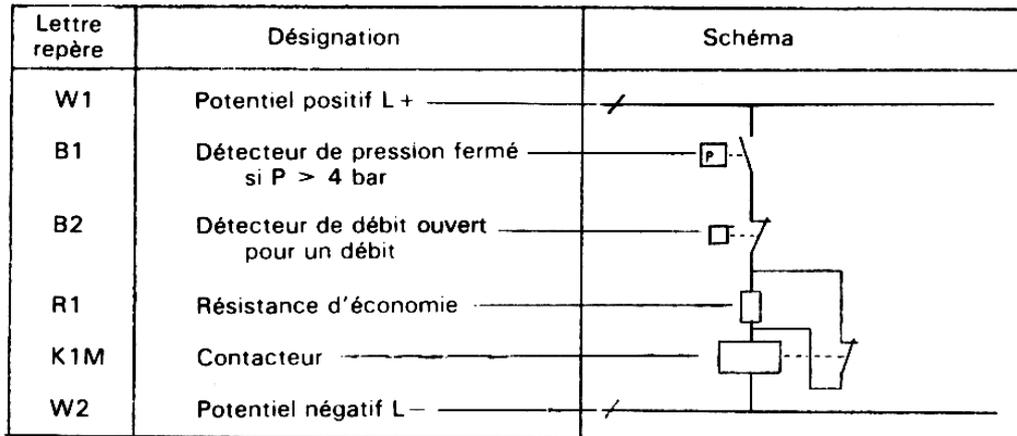


fig.2-25

Fonctionnement :

Lorsque les contacts des détecteurs B1 et B2 sont fermés, la bobine K1M est alimentée. Dès qu'un contact de détecteur s'ouvre, la bobine se désexcite.

Remarque :

Pour que le contacteur fonctionne, il faut conditions (pression supérieure à 4 bar et absence de débit d'eau) ; les deux détecteurs doivent donc être branchés en série.

**II.2. Les éléments de protection des actionneurs électriques**

Chaque réseau doit être protégé :

- Contre les courts-circuits.
- Contre les surcharges.

En effet ces défauts entraînent toujours une augmentation anormale du courant qui, non limitée, peut devenir dangereuse pour les installations.

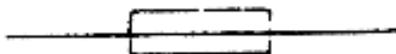
**a) Fusible (fig.2-26)**

fig.2-26

C'est un appareil composé d'un fil conducteur qui, grâce à sa fusion, ouvre le circuit lorsque l'intensité du courant dépasse la valeur maximale supportée par ce fil. Ce matériel est à remplacer après chaque fonctionnement.

Il est toujours placé :

- Sur la polarité positive dans le cas d'une alimentation continue ; (en général un deuxième fusible est installé sur la polarité négative de façon à pouvoir isoler la batterie d'accumulateur de l'installation en cas de besoin).
- Sur chaque phase dans le cas d'une alimentation alternative.

Le neutre ne doit jamais être protégé; en effet sur un réseau triphasé déséquilibré, la coupure du neutre entraînerait :

- l'élévation du potentiel du neutre coupé par rapport à la terre
- Le déséquilibre des tensions entre chaque phase et le neutre coupé (la phase la moins chargée serait sur-alimentée, la phase la plus chargée sous-alimentée). Cela serait très dangereux pour le matériel.

Lorsque l'on utilise un transformateur BT/TBT, il ne faut prévoir qu'une protection sur son primaire mais, en aucun cas sur son primaire et sur son secondaire (il est inutile de multiplier les protections d'un même circuit). Si un défaut apparaît sur l'installation alimentée par ce transformateur, il se répercute sur son primaire et la protection fonctionne.

La protection par fusible est installée :

- Dans tous les circuits de commande.
- dans tous les circuits de puissance
  - lorsqu'ils ne possèdent pas de moteurs
  - Lorsqu'ils possèdent un moteur protégé par un relais de protection.

En effet, un fusible n'est pas une protection sûre contre les surcharges de courte ou de longue durée

En triphasé, si un fusible fond par vieillissement, le moteur n'est plus alimenté que par deux phases, ce qui est très dangereux pour celui-ci.

Remarques :

Il existe plusieurs types de fusibles qui sont :

- les fusibles g, g 1, g f qui supportent jusqu'à 1,1 fois le courant nominal indiqué par le constructeur.
- les fusibles A D (accompagnement disjoncteur) qui supportent jusqu'à 2,7 fois le courant nominal indiqué par le constructeur.
- les fusibles A M (accompagnement moteur) qui supportent jusqu'à 7 fois le courant nominal indiqué par le constructeur.

On utilise toujours des fusibles à haut pouvoir de coupure (HPC).

### b) Le disjoncteur (fig.2-27)

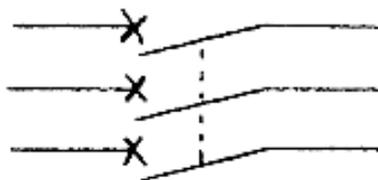


fig.2-27

C'est un appareil à commande manuelle ou automatique dont un des rôles est de protéger l'installation contre les surcharges et les courts-circuits.

Il est composé :

- de plusieurs contacts à grand pouvoir de coupure.
- d'un déclencheur thermique (bilame).
- d'un déclencheur électromagnétique (bobine à noyau plongeur ou à armature).

Son fonctionnement est simple; l'ouverture automatique de ses contacts à grand pouvoir de coupure se réalise :

- par action du déclencheur thermique en cas de surcharge.
- par action du déclencheur électromagnétique en cas de court-circuit.

C'est une protection valable pour tous les circuits de commande et de puissance mais l'inconvénient majeur réside dans son prix de revient qui est élevé.

### c) Discontacteur (fig.2-28)

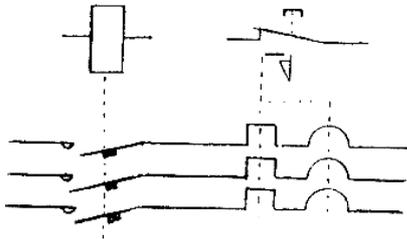


fig.2-28

C'est un ensemble d'appareil regroupant :

- Un contacteur
- Un relais de protection thermique ou électromagnétique ou magnétothermique.

Un relais thermique est un déclencheur comprenant une bilame par potentiel protégé et un contact auxiliaire à ouverture.

Un relais électromagnétique est un déclencheur composé d'une bobine à noyau plongeur ou à armature par potentiel protégé et d'un contact auxiliaire à ouverture.

Un relais magnétothermique regroupe un déclencheur thermique, un déclencheur électromagnétique et un contact auxiliaire à ouverture.

Remarque :

Certains relais possèdent un deuxième contact auxiliaire à fermeture qui sert à la signalisation de leur état.

Raccordement et fonctionnement du discontacteur

Il faut raccorder en série :

- dans le circuit de commande, la bobine du contacteur et le contact auxiliaire à ouverture du relais de protection utilisé.
- dans le circuit de puissance, les contacts de puissance du contacteur et le déclencheur du relais de protection utilisé.

La détection d'une surcharge et (ou) d'un court-circuit (suivant le relais utilisé) est réalisée par le déclencheur du relais de protection ; celui-ci ouvre son contact auxiliaire (à ouverture) ce qui provoque la désexcitation de la bobine du contacteur et l'ouverture de ses contacts de puissance. Le circuit de puissance est donc protégé.

*Remarques :*

Le contact auxiliaire à ouverture (et éventuellement celui à fermeture) du relais de protection est à accrochage mécanique.

En cas de fonctionnement du détecteur, ce contact s'ouvre et reste dans cet état tant que l'on n'a pas "réarmé" manuellement le relais de protection.

La protection par discontacteur n'est utilisée que dans les circuits de puissance de moteur; elle remplace avantageusement (du point de vue prix de revient) un disjoncteur.

### **II.3. Les mesures de protection**

L'intervention sur les systèmes industriels doit prendre les mesures préventives nécessaires afin de réduire les risques d'électrisation, d'accidents et d'incendies et de se protéger contre l'imprévisible.

Parmi les mesures de protection, on trouve :

- Lorsqu'on remarque une anomalie dans l'installation ou le matériel, l'intervenant doit mettre hors tension l'installation et doit disposer d'un voltmètre lui permettant de s'assurer de l'absence de tension et des moyens de mise en court circuit et à la terre des conducteurs et pièces nues après mise hors tension :
  - La mise hors tension d'une installation ou d'un matériel doit être signalée par une pancarte accrochée sur le dispositif de coupure, suivie d'un cadenas en position d'ouverture du sectionneur (condamnation) et un enlèvement des fusibles.
  - Chaque intervenant doit posséder son propre cadenas avec clé personnelle.
- Pour les travaux sous tension :

Les travaux sous tension ne peuvent être qu'exceptionnels et ne doivent être entrepris que par du personnel habilité et instruit des mesures à prendre.

#### **Les mesures de protection individuelle et collective**

- Protections individuelles
  - Les gants dont l'utilisation est obligatoire pour les interventions BT et les manœuvres des appareils de commande HT.
  - Le casque isolant, obligatoire pour tous les travaux sous tension, sur les chantiers de construction et dans tous les bâtiments comportant des systèmes à haute pression (centrales thermiques par exemple).
  - Les chaussures de travail comportant une semelle isolante ou les bottes isolantes spéciales pour les manœuvres HT.

- Les lunettes obligatoires pour toutes les manœuvres d'appareils de sectionnement en BT et HT, les travaux sous tension et chaque fois qu'il y a un risque d'arc électrique ou de projection de matières.
- Les ceintures de sécurité pour les travaux en hauteur.
- Les vêtements isolants spéciaux pour les travaux sous tension.

*Protections collectives*

- Les tabourets ou tapis indispensables pour les manœuvres d'appareils de sectionnement HT.
- Les écrans et grillages de protection en matériaux isolants pour créer un environnement protégé.
- Les outils isolés conforme à la norme NF C 18-400.
- Les fanions, rubans de couleur et les pancartes destinées à baliser la zone de travail et la zone protégée.

## **II.4. Analyse de fonctionnement des moteurs asynchrones triphasés :**

### **II.4.1. Constitution :**

Le moteur asynchrone ou moteur à induction comporte deux parties essentielles: le stator et le rotor.

- **Stator**

Il constitue la partie fixe du moteur dans laquelle se trouvent les enroulements générateurs du champ tournant:

Sur le plan électrique le stator possède autant d'enroulements que de phases d'alimentation, soit trois pour le moteur triphasé. Ces enroulements réalisent une ou plusieurs paires de pôles et peuvent être couplés, soit en étoile, soit en triangle.

Sur le plan magnétique le stator est constitué par un empilage de tôles d'acier doux au silicium formant une couronne. Cette couronne, maintenue et protégée par une carcasse massive en acier ou en aluminium, présente des encoches où sont placés les conducteurs des enroulements.

- **Rotor**

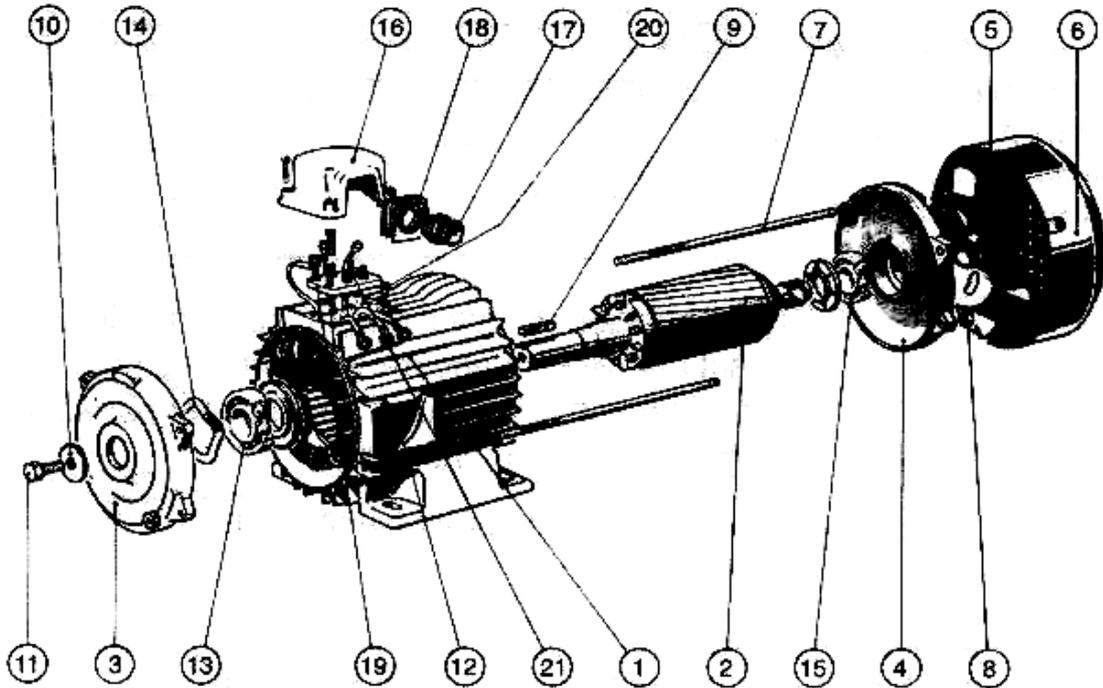
Cet organe mobile, soumis aux effets du champ tournant, est constitué :

- pour le moteur à rotor en court-circuit ou à cage d'écureuil, d'un enroulement fermé sur lui-même,
- pour le moteur à rotor bobiné, de trois enroulements couplés en étoile pouvant être mis en court-circuit par l'intermédiaire de bagues et de balais et d'un dispositif extérieur de mise en court-circuit.

Ces enroulements, sièges des courants induits par la rotation du champ statorique, comportent autant de paires de pôles que le stator.

Le rotor a la forme d'un cylindre réalisé par un empilage de tôles d'acier au silicium. À sa périphérie, ce cylindre comporte les encoches destinées à recevoir les conducteurs des enroulements.

- Une image éclatée d'un moteur asynchrone à cage : (fig.2-29)



1	Cartier et stator	12	Plaque signalétique
2	Rotor	13	Roulement côté accouplement
3	Flasque côté accouplement	14	Rondelle élastique
4	Flasque côté ventilateur	15	Roulement côté ventilateur
5	Ventilateur	16	Boîte à bornes
6	Capot de ventilateur	17	Presse-étoupe
7	Tige d'assemblage	18	Plaque support presse-étoupe
8	Écrou de tige d'assemblage	19	Planchette à bornes
9	Clavette de bout d'arbre	20	Vis borne de masse
10	Rondelle de bout d'arbre	21	Barrettes de connexion
11	Vis de serrage rondelle		

fig.2-29

- Une image éclatée d'un moteur asynchrone à baques : (fig.2-30)

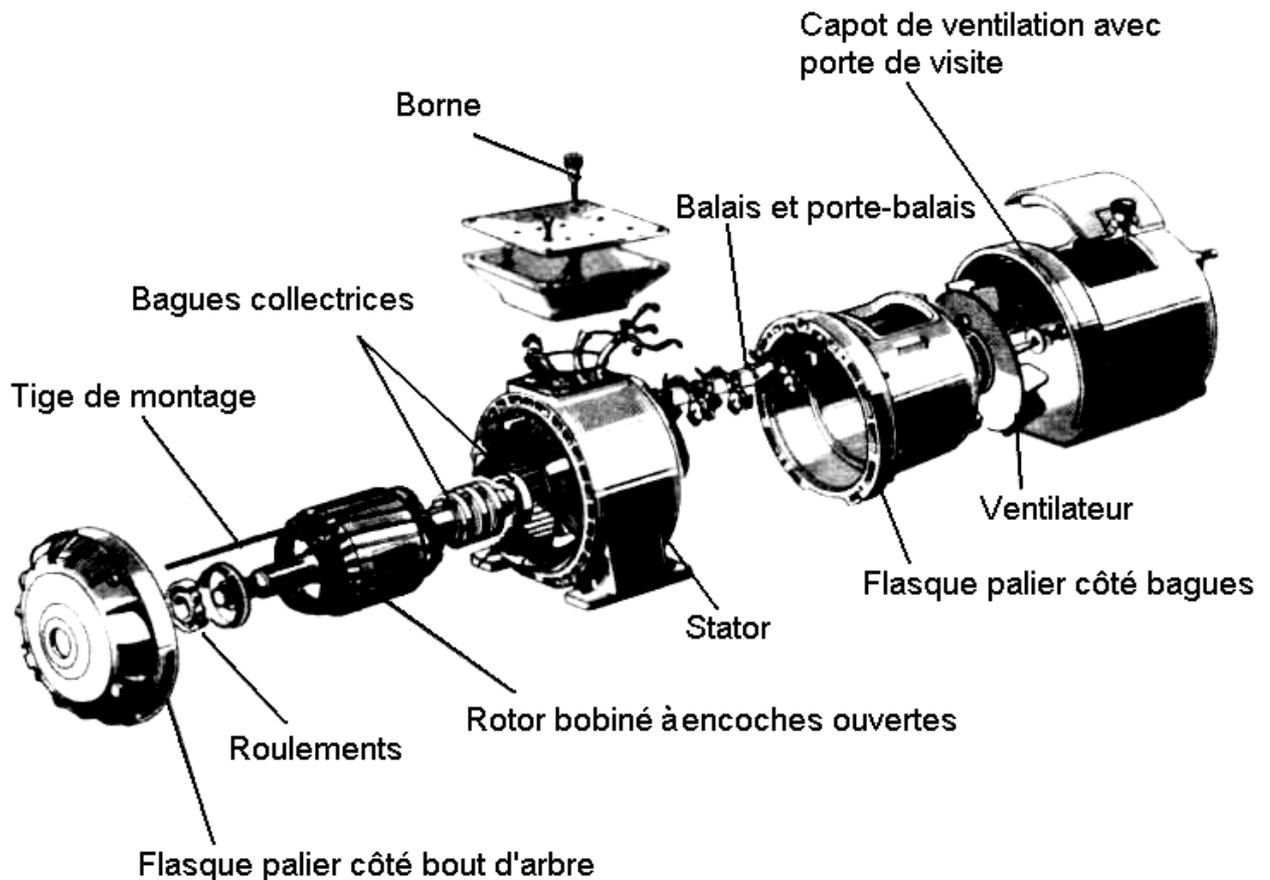


fig.2-30

### II.4.2. Principe de fonctionnement

On considère un moteur triphasé dont les enroulements statoriques réalisent  $p$  paires de pôles.

Dès la mise sous tension du moteur, un champ tournant prend naissance dans les enroulements statoriques ; les courants induits dans le rotor sont ainsi soumis à la force électromagnétique de la place.

L'ensemble de ces forces crée un couple moteur qui entraîne le rotor en rotation.

Le rotor tourne dans le même sens que le champ tournant, mais sa vitesse (ou fréquence de rotation) est nécessairement inférieure à celle du champ tournant (fig.2-31)).

En effet, si les deux fréquences de rotation étaient égales, il n'y aurait plus création de courants induits dans le rotor et donc plus de couple moteur. Ceci découle de la loi de Lenz qui énonce que l'effet s'oppose toujours à la cause qui lui donne naissance.

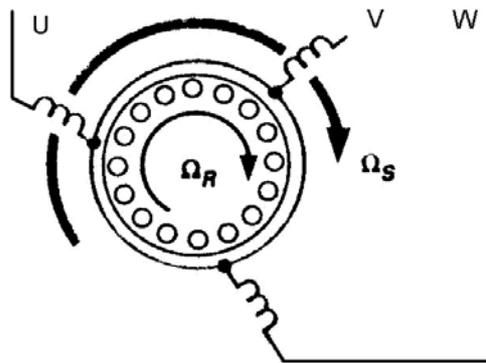


Fig.2-31

### **II.4.3. Grandeurs caractéristiques :**

#### **a) Fréquence de rotation du champ tournant ou fréquence de synchronisme, $n_s$ :**

Elle est fonction du nombre de paires de pôles des enroulements statoriques et de la fréquence du réseau d'alimentation, soit :

$$n_s = \frac{60 \times f}{p}$$

- $n_s$  : en tours par minute.
- $f$  : en hertz.
- $p$  : nombre de paires de pôles.

Vitesse angulaire de synchronisme :

A la fréquence de rotation  $n_s$  correspond la vitesse angulaire  $\Omega_s$  de synchronisme :

$$\Omega_s = 2 \times \pi \times n_s = \frac{2 \times \pi \times f}{p} = \frac{\omega}{p}$$

Avec :

- $\Omega_s$  : en radians par seconde (rad/s).
- $\omega$  (pulsation) =  $2\pi f = 100\pi$  pour  $f = 50$  Hz.
- $n_s$ : en tr/s.

#### **b) Fréquence de rotation du rotor. Glissement :**

La fréquence de rotation du rotor, en tr/min est inférieur à la fréquence de rotation du champ tournant, il en est de même pour sa vitesse angulaire  $\Omega$  :

$$n < n_s$$

$$\Omega < \Omega_s$$

Le rapport de l'écart de vitesse (ou de fréquence) de rotation à la vitesse (ou fréquence) de synchronisme et appelé glissement  $g$  :

$$g = \frac{\Omega_s - \Omega}{\Omega_s} = \frac{n_s - n}{n_s}$$

Le glissement s'exprime le plus souvent en pourcentage de la vitesse de synchronisme.

En fonctionnement normal le glissement du moteur asynchrone est de l'ordre de 2 à 6 %.

De l'expression du glissement on peut déduire :

- Celles de la fréquence de rotation du rotor :

$$n = n_s \cdot (1 - g) \quad \text{tr/min}$$

- Et celle de sa vitesse angulaire :

$$\Omega = \Omega_s \cdot (1 - g) \quad \text{rad/s}$$

#### **II.4.4. Couplage au réseau et inversion du sens de rotation :**

##### **a) Couplage au réseau**

Le couplage étoile ou triangle des enroulements statoriques du moteur asynchrone triphasé s'effectue en fonction des caractéristiques :

- Du réseau ;
- Du Moteur.

Ainsi un moteur asynchrone triphasé peut être couplé :

- En triangle si ses enroulements peuvent supporter la tension composée du réseau.
- En étoile dans le cas contraire.

Sur la plaque signalétique du moteur sont indiquées deux tensions; la valeur la plus faible correspond à la tension supportée par les enroulements.

##### **b) Inversion du sens de rotation :**

Pour inverser le sens de rotation du moteur il suffit d'inverser celui du champ tournant ; cela s'obtient en intervertissant l'alimentation de deux des trois phases (fig.2-32)

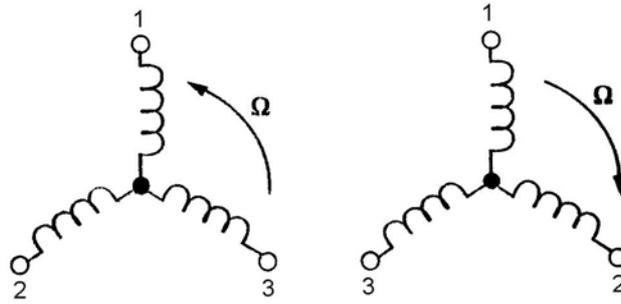
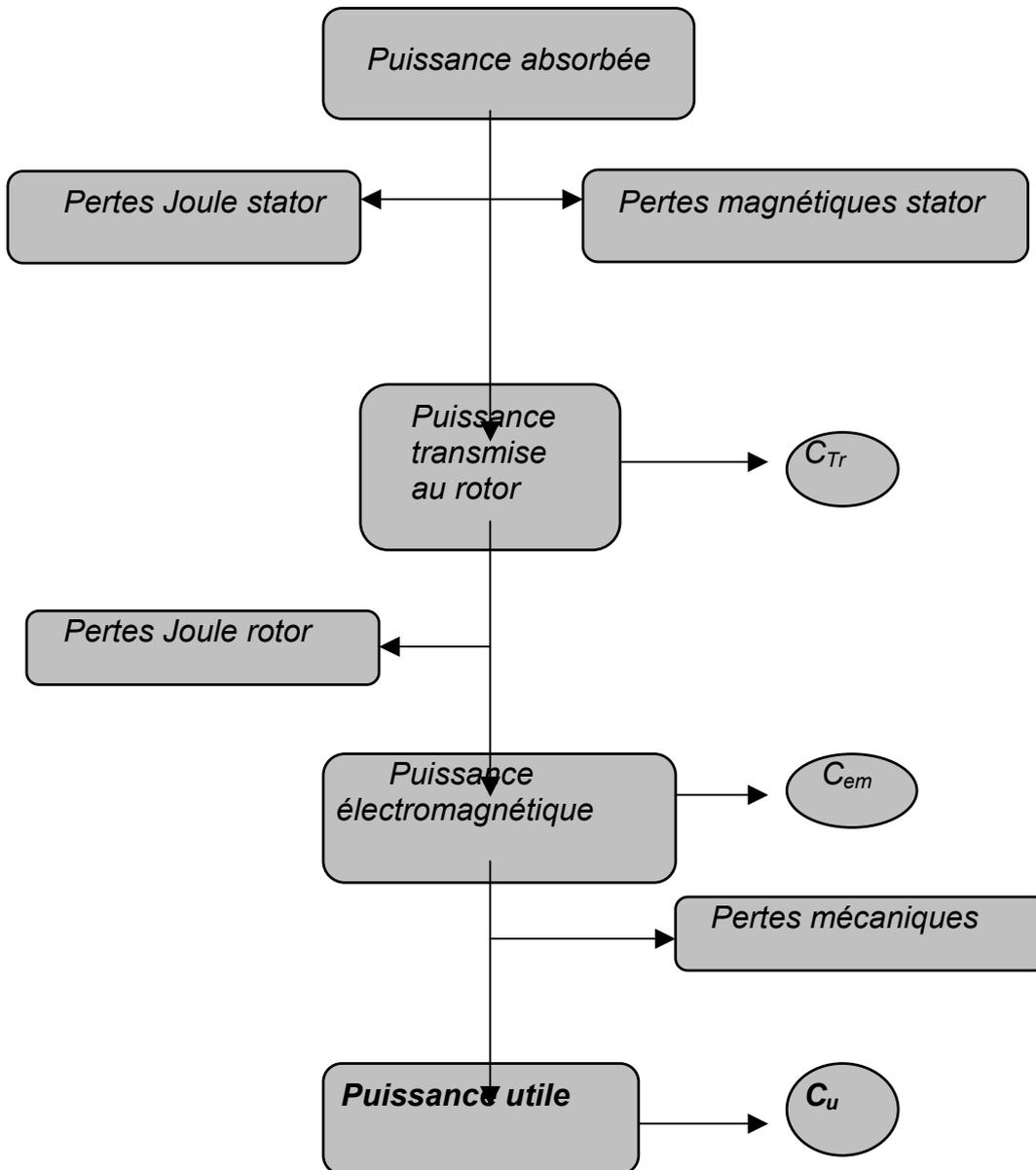


Fig.2-32

### II.4.5. Le bilan énergétique

Le bilan énergétique d'un moteur asynchrone triphasé est représenté par la figure suivante :



On y distingue :

$$P_a = \sqrt{3} \times U \times I \times \cos \varphi \quad , \quad W$$

- La puissance transmise au rotor  $P_{Tr}$  qui est égale à la puissance absorbée diminuée des pertes :

- Par effet Joule,  $p_{js}$  dans les enroulements statoriques :

$$p_{js} = 3 R I^2 \text{ pour le couplage étoile.} \quad R \text{ est la résistance d'un enroulement}$$

$$p_{js} = R I^2 \text{ pour le couplage triangle.}$$

- Magnétique  $p_{fs}$  dans le fer :

$$P_{Tr} = P_a - (p_{js} + p_{fs})$$

à cette puissance correspond le couple transmis  $C_{Tr}$  :

$$C_{Tr} = \frac{P_{Tr}}{\Omega_s}$$

- La puissance électromagnétique  $P_{em}$ , qui prend en compte les pertes Joule  $P_{jr}$  dans le rotor :

$$P_{em} = P_{Tr} - p_{jr}$$

A cette puissance correspond le couple électromagnétique  $C_{em}$  :

$$C_{em} = \frac{P_{em}}{\Omega}$$

Remarque :

1. On considère comme négligeable les pertes magnétiques de rotor.
2. Couple transmis  $C_{Tr}$  et couple électromagnétique  $C_{em}$  sont égaux :

$$\frac{P_{Tr}}{\Omega_s} = \frac{P_{em}}{\Omega}$$

Seules différentes les vitesses angulaires  $\Omega_s$  et  $\Omega$  :

Or :

$$\Omega_s = \frac{\Omega}{1-g}$$

Ce qui entraîne :

$$P_{Tr} \times (1-g) = P_{em}$$

ou

$$P_{em} = P_{Tr} - g \times P_{Tr}$$

- Les pertes Joule rotorique  $p_{jR}$  sont donc :

$$p_{jR} = P_{Tr} \times g$$

- La puissance et le couple utiles :

$$P_u = P_{em} - p_{meca}$$

avec  $P_{meca}$  = pertes mécaniques.

$$T_u = \frac{P_u}{\Omega}$$

, N/m

- Le rendement :

$$\eta = \frac{P_u}{P_a}$$

avec  $P_u = P_a - p_{is} - p_{fs} - p_{jR} - p_{meca}$ .

Le rapport de la puissance électromagnétique à la puissance transmise au rotor est appelé rendement du rotor.

$$\eta_r = \frac{P_{em}}{P_{Tr}} = \frac{P_{Tr} \times (1-g)}{P_{Tr}}$$

soit :

$$\eta_r = 1-g$$

### **II.4.6. Exercice**

**A -**

*Un moteur asynchrone à bagues présente les caractéristiques suivantes*

*95 kW; 220 / 380 V; 50 Hz; 8 pôles*

*1) Sachant qu'il est alimenté par une ligne triphasé en 380 V, quel doit être le couplage de l'enroulement statorique?*

*2) Calculer la fréquence de synchronisme en tr/mn.*

*3) En marche normale, le glissement vaut 2,45%. En déduire la fréquence de rotation  $n$  correspondante.*

*4) Quelle est alors la valeur du couple utile?*

*5) Le moteur étant très puissant, on peut négliger ses pertes statoriques et mécaniques. Pour le régime nominal, calculer :*

*a) la puissance électrique absorbée  $P_a$ ;*

*b) les pertes rotoriques par effet Joule;*

*c) la valeur efficace des courants rotoriques si la résistance mesurée entre deux bagues est de  $0,064 \Omega$ ;*

*d) le courant absorbé au stator si le facteur de puissance est de 0,83.*

*6) On alimente désormais le moteur avec une ligne en 220 V.*

*a) quel doit être le couplage du stator?*

*b) Pour le régime nominal, calculer la valeur efficace des courants :*

- dans la ligne;*
- dans les phases du stator;*
- dans les phases du rotor.*

*c) le champ magnétique  $B_0$  est-il modifié par rapport aux questions précédentes?*

**Solution :**

- 1) Chaque phase statorique ne pouvant supporter que 220 V, l'enroulement du stator doit être

**couplé en étoile.**

- 2) La fréquence de synchronisme est

$$n_s = 3000 / p \Rightarrow n_s = 3000 / 4 = 750 \text{ tr/mn}$$

$$n_s = 750 \text{ tr/mn}$$

- 3) La fréquence de rotation  $n$  est telle que

$$g = (n_s - n) / n_s \Rightarrow n_s - n = g n_s \Rightarrow n = n_s (1 - g)$$

$$n = 750 (1 - 2,45/100) = 731,6$$

$$n \approx 732 \text{ tr/mn}$$

- 4) En marche normale, le couple utile vaut

$$T_u = P_u / 2\pi n \Rightarrow T_u = 95 \cdot 10^3 / 2 \cdot 3,14 \cdot (732/60) = 1\,240 \text{ Nm}$$

$$T_u = 1\,240 \text{ Nm}$$

- 5)

- a) Les seules pertes prises en compte étant les pertes par effet Joule dans le rotor, le rendement du moteur est  $\eta = 1 - g$ . On en déduit la puissance électrique absorbée

$$P_a = P_u / (1 - g) \Rightarrow P_a = 95 \cdot 10^3 / (1 - 0,0245) = 97\,385 \text{ W}$$

$$P_a = 97,4 \text{ kW}$$

- b) La puissance dissipée dans le rotor a pour valeur

$$= g P_{tr} \Rightarrow P_{Jr} = 2,45 \cdot 10^{-2} \cdot 97\,385 = 2\,386 \text{ W}$$

$$P_{Jr} = 2,4 \text{ kW}$$

- c) Chaque phase rotorique a pour résistance  $R_2 = 0,06 / 2 = 0,03 \Omega$   
Elle est parcourue par le courant  $J_2$  tel que

$$P_{Jr} = 3 R_2 J_2^2 \Rightarrow J_2 = \sqrt{P_{Jr} / 3 R_2} \Rightarrow J_2 = \sqrt{2400 / 3 \cdot 0,03}$$

$$J_2 = 158 \text{ A}$$

- d) Le courant absorbé par une phase du stator, étant le même que dans un fil de ligne, a pour valeur

$$I = J_1 = P_a / \sqrt{3} U \cos \varphi \Rightarrow J_1 = 97\,385 / \sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,83 = 178,3 \text{ A}$$

$$J_1 = 178 \text{ A}$$

- 6) a) Chaque phase statorique pouvant supporter la tension entre 2 fils de ligne, l'enroulement du stator doit être

**couplé en triangle.**

b) Les phases statoriques sont alimentées sous 220 V comme dans le cas précédent : le moteur fonctionne donc rigoureusement de la même façon, pour les deux modes de couplage.

Lorsque  $n = 732 \text{ tr/mn}$ , on a encore  $T_u = 1\,240 \text{ Nm}$  et  $P_a = 97\,385 \text{ W}$ .

Le courant dans les fils de ligne a pour valeur

$$I = P_a / \sqrt{3} U \cos \varphi \quad \Rightarrow \quad I = 97\,385 / \sqrt{3} \cdot 220 \cdot 0,83 = 307,9 \text{ A}$$
$$\mathbf{I = 308 \text{ A}}$$

Chaque phase statorique absorbe le courant

$$J_1 = I / \sqrt{3} \quad \Rightarrow \quad J_1 = 307,9 / \sqrt{3} = 177,8 \text{ A}$$
$$\mathbf{J_1 = 178 \text{ A}}$$

C'est évidemment le même que dans le cas précédent.

Le fonctionnement du rotor n'a pas changé; on a toujours

$$\mathbf{J_2 = 158 \text{ A}}$$

c) Les f.é.m. induites dans les phases statoriques ont toujours pour valeur efficace 220 V : le champ magnétique qui leur donne naissance est donc le même que précédemment.

**B-**

Un moteur asynchrone tétrapolaire porte l'indication 220 – 380 V; alimenté sous 380 V il absorbe

- à vide : 5,2 A et  $P_v = 390 \text{ W}$
- en charge : 7,5 A et  $P_a = 4070 \text{ W}$ .

La résistance entre deux bornes de phase du stator est de  $2,2 \Omega$ . En admettant que les pertes mécaniques et les pertes magnétiques sont égales, calculer le rendement du moteur lorsque sa fréquence de rotation est de  $1\,430 \text{ tr/mn}$ .

## **II.5. Démarrage semi-automatique des moteurs asynchrones triphasés**

On utilise, à la place des interrupteurs ou commutateurs, des contacteurs commandés par boutons poussoirs.

### **II.5.1. Démarrage direct**

#### **a) Démarrage direct un sens de rotation**

Commande de deux endroits différents d'un moteur possédant un seul sens de rotation.

Schéma fonctionnel de l'ensemble (fig 2-33)

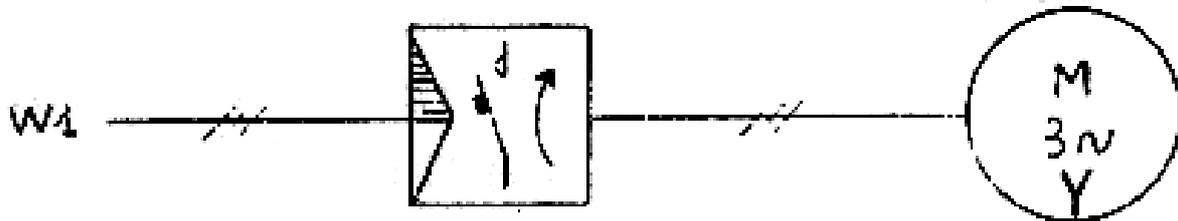


Figure 2-33

Démarrage direct, semi-automatique par discontacteur, d'un moteur couplé en étoile à un seul sens de rotation.

Schéma développé rangé des circuits de commande et de puissance (fig 2-34)

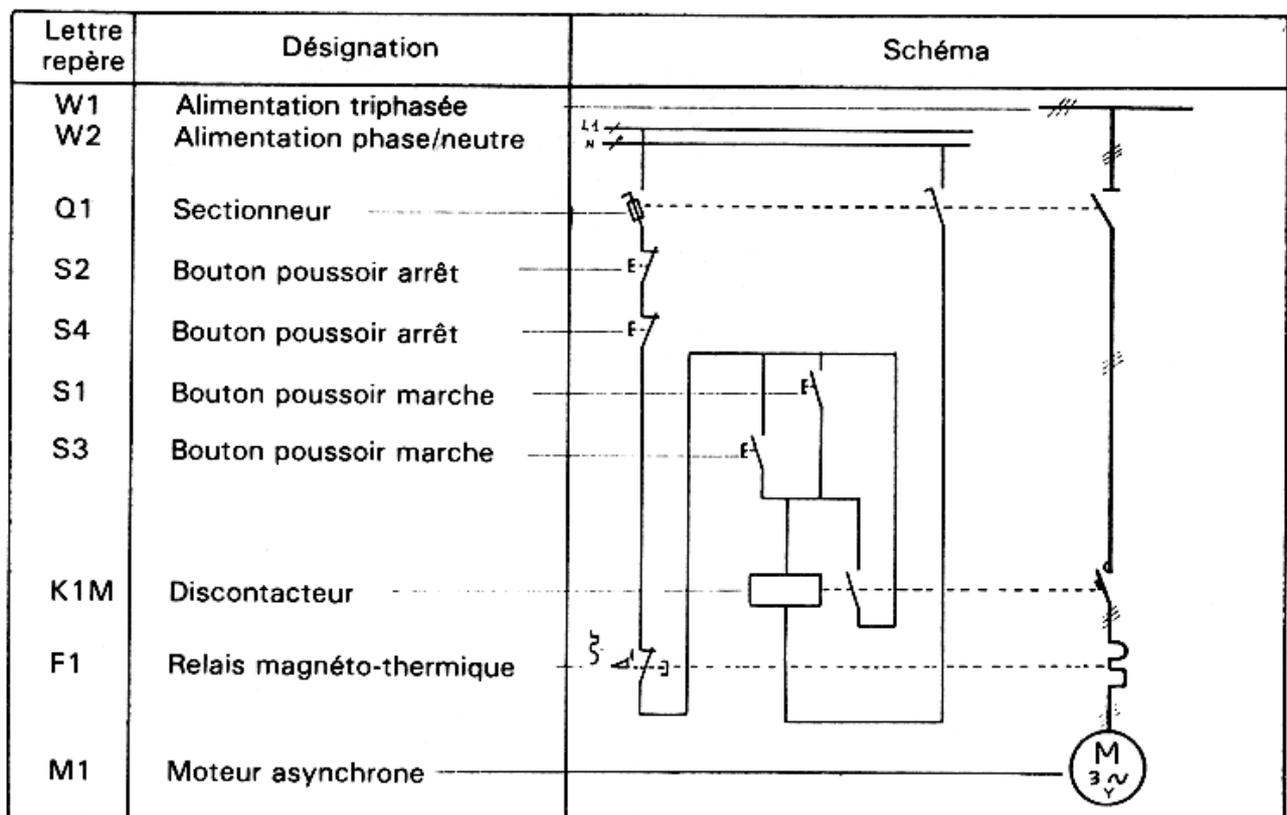


Figure 2-34

Fonctionnement :

Une action sur les boutons poussoirs S1 ou S3 excite la bobine K1M qui s'auto-alimente et démarre le moteur.

Une action sur les boutons poussoirs S2 ou S4 ou un fonctionnement du relais magnéto-thermique désexcite la bobine K1M. Ses contacts de puissance s'étant ouverts, le moteur s'arrête.

### b) Démarrage direct deux sens de rotation

Commande d'un moteur possédant deux sens de rotation.

Schéma fonctionnel de l'ensemble (fig 2-35)



Figure 2-35

Démarrage direct, semi-automatique par discontacteur, d'un moteur couplé en triangle à deux sens de rotation.

Schéma développé du circuit de puissance (fig 2-36)

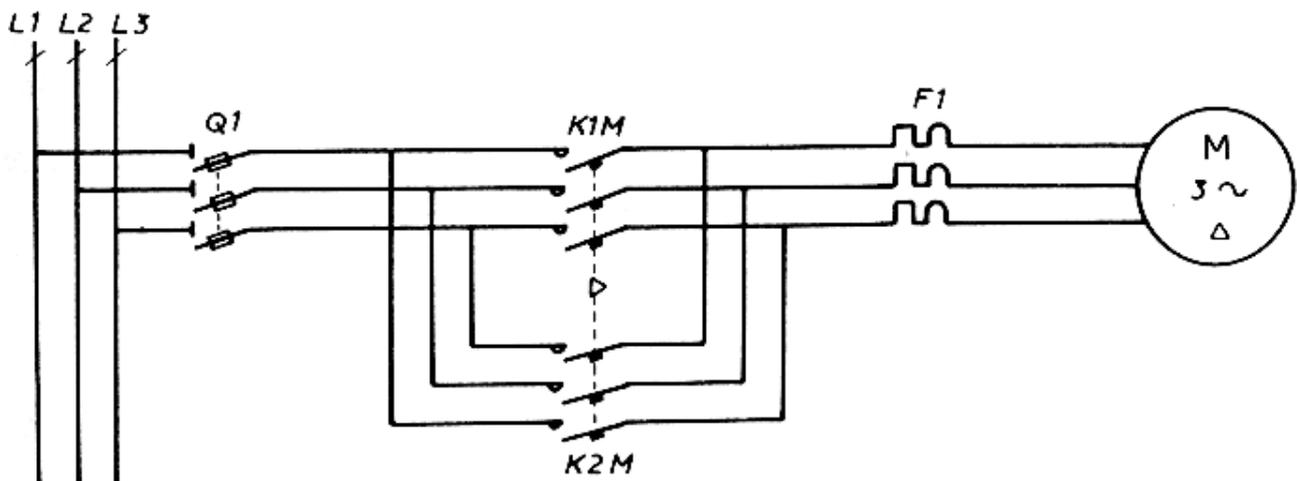


Figure 2-36

Schéma développé du circuit de commande (fig 2-37)

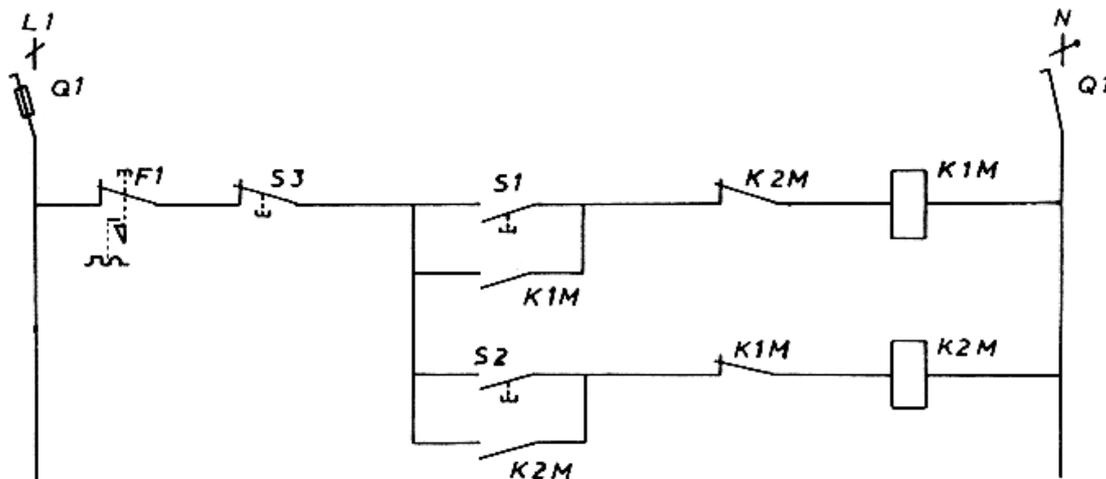


Figure 2-37

Légende :

- Q1 : Sectionneur
- F1 : Relais magnéto-thermique
- S1 : Boutons poussoir marche avant
- S2 : Bouton poussoir marche arrière
- S3 : Bouton poussoir arrêt
- K1M : Discontacteur marche avant
- K2M : Discontacteur marche arrière
- M : Moteur asynchrone triphasé

*Fonctionnement*

Une action sur le bouton poussoir S1 excite la bobine K1M ce qui provoque :

- Son auto-alimentation
- Le verrouillage du contacteur K2M
- L'alimentation du moteur et son démarrage dans un sens de rotation.

Un fonctionnement du relais magnéto-thermique ou une action sur le bouton poussoir S3 entraîne la désexcitation de la bobine K2M et l'arrêt du moteur.

Une action sur le bouton poussoir S2 excite la bobine K2M ce qui provoque :

- Son auto-alimentation
- Le verrouillage du contacteur K1M
- L'alimentation du moteur et son démarrage dans l'autre sens de rotation.

Une action sur le bouton poussoir arrêt (S3) ou un fonctionnement du relais magnéto-thermique (F1) coupe l'alimentation de la bobine K2M ; le moteur s'arrête.

*Remarque*

Il faut absolument un verrouillage électrique et mécanique des discontacteurs K1M et K2M pour éviter les courts-circuits dans le circuit de puissance.

Pendant le démarrage d'un moteur, le courant absorbé est très important ; celui-ci est limité par différents procédés de démarrage qui agissent :

- Soit sur la tension d'alimentation (cas du moteur à cage d'écurueil) ;
- Soit sur une augmentation de la résistance du rotor (cas du moteur à rotor bobiné).

### **II.5.2. Démarrage étoile triangle**

#### Généralités

Ce démarrage consiste à changer le couplage des enroulements du stator pour limiter l'appel de courant.

Le démarrage du moteur s'effectue en deux temps :

- 1<sup>er</sup> temps : chaque enroulement du stator est alimenté sous une tension réduite (couplage étoile).
- 2<sup>ème</sup> : chaque enroulement du stator est alimenté sous sa tension nominale (couplage triangle).

#### Conditions technologiques

- Le moteur asynchrone triphasé est du type rotor en court-circuit ou rotor à cage d'écurueil.
- Chaque enroulement du stator doit supporter, en fonctionnement normal, la tension entre phases de la source d'alimentation.

#### Exemple :

Moteur 380/660 V pour un réseau 220/380V et moteur 220/380V pour un réseau 110/220V.

#### Avantages de ce procédé

L'installation ne met pas en œuvre beaucoup de matériel.

Le courant de démarrage est assez faible (de l'ordre de 1,5 à 3 fois le courant nominal).

#### Inconvénients de ce procédé

- Le couple au démarrage est très faible (de l'ordre de 0,2 à 0,5 fois le couple nominal) ce qui n'admet aucune charge importante lors de la mise en route du moteur.
- La nécessité de couper l'alimentation du moteur lors du changement de couplage entraîne des phénomènes transitoires perturbateurs.
- Le couplage des enroulements du stator en triangle est imposé en marche normale.
- Le démarrage est assez long (de l'ordre de 3 à 6 secondes).

#### Utilisation de ce procédé

Il est employé pour des moteurs qui n'entraînent pas leur charge au démarrage ; exemple : machines-outils.

a) Démarrage étoile triangle un sens de rotation

Démarrage étoile triangle d'un moteur asynchrone triphasé à un sens de rotation, commandé par bouton poussoir.

Schéma fonctionnel de l'ensemble (fig 2-38)

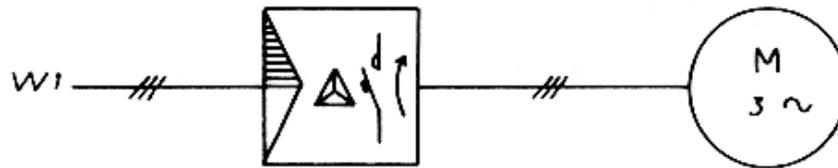


Figure 2-38

Démarrage semi-automatique étoile triangle d'un moteur à un seul sens de rotation; commandé par discontacteur.

Schéma développé du circuit de puissance (fig 2-39)

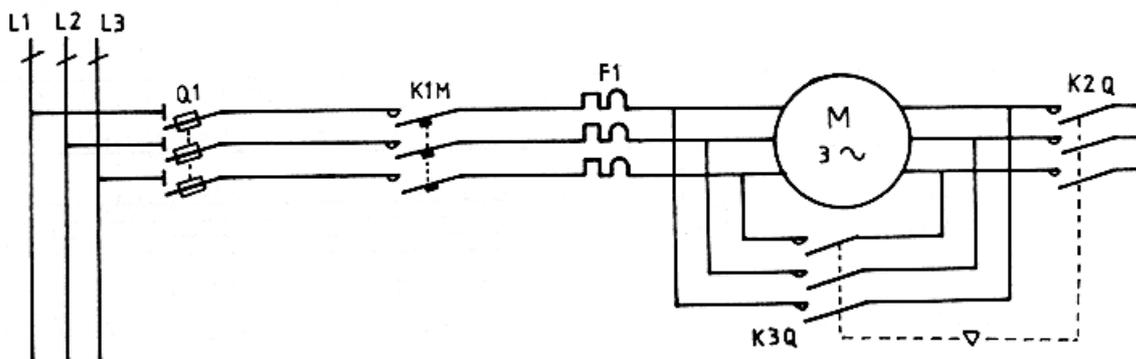


Figure 2-39

Schéma développé du circuit de commande (fig 2-40)

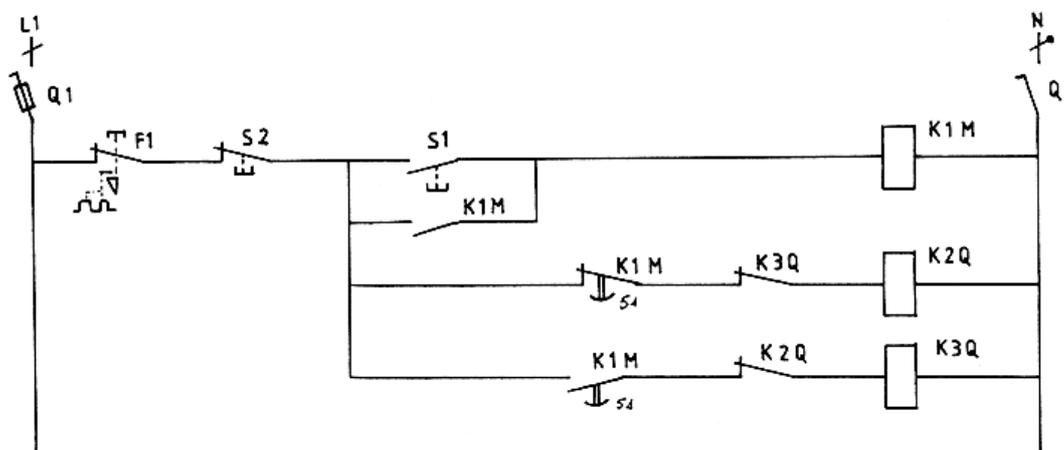


Figure 2-40

Légende :

Q1 : fusible sectionneur

F1 : relais magné-thermique

S1 : bouton poussoir marche

S2 : bouton poussoir arrêt

K1M : discontacteur principal

K2Q : contacteur étoile

K3Q : contacteur triangle

M :moteur asynchrone triphasé

## Fonctionnement du montage

Une action sur le bouton poussoir S1 excite la bobine K1M qui :

- S'auto-alimente
- Excite la bobine K2Q (couplage étoile)
- Alimente le moteur ; celui-ci démarre en couplage étoile.

Cinq secondes après, les contacts temporisés du discontacteur K1M changent d'état ce qui provoque :

- La désexcitation de la bobine K2Q
- L'excitation de la bobine K3Q

le moteur passe en couplage triangle; son démarrage est alors terminé.

Un fonctionnement du relais magnéto-thermique (F1) ou une action sur le bouton poussoir arrêt coupe l'alimentation de toutes les bobines ce qui arrête le moteur.

Remarque

Il faut verrouiller mécaniquement et électriquement les contacteurs K2Q et K3Q pour éviter les courts-circuits entre les phases du circuit de puissance.

**b) Démarrage étoile triangle deux sens de rotation**

Démarrage étoile triangle d'un moteur asynchrone triphasé à deux sens de rotation et commandé par bouton poussoir.

Schéma fonctionnel de l'ensemble (fig 2-41)

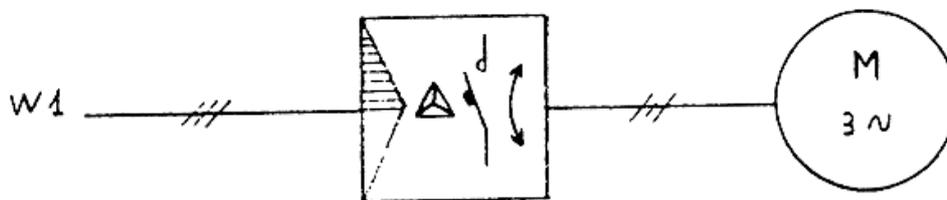
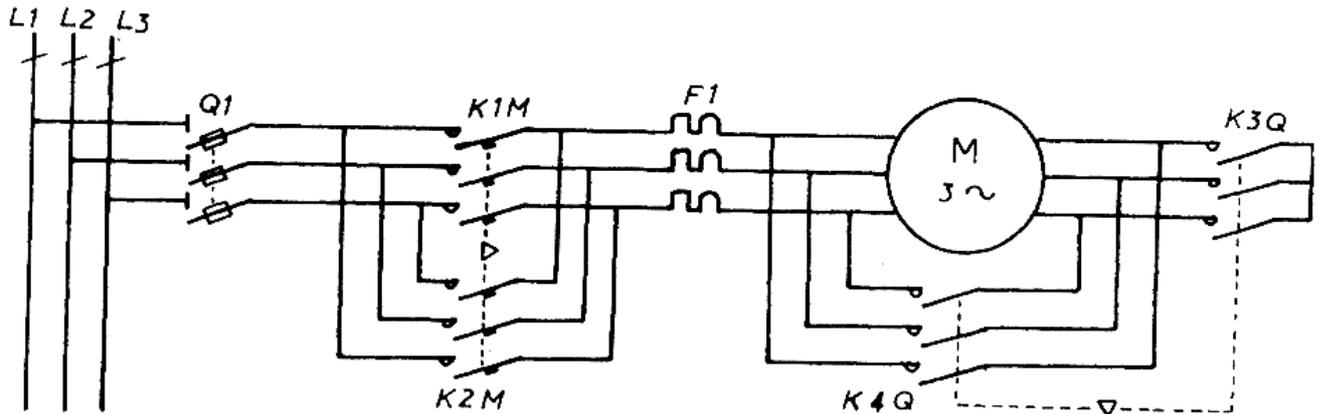


Figure 2-41

schéma développé du circuit de puissance (fig 2-42)



**Légende :**

Q1 : fusible sectionneur  
F1 : relais magnéto-thermique  
S1 : bouton poussoir marche avant  
S2 : bouton poussoir marche arrière  
S3 : bouton poussoir arrêt

K1M : discontacteur marche avant  
K2M : discontacteur marche arrière  
K3Q : contacteur étoile  
K4Q : contacteur triangle  
K5T : relais temporisé  
M : moteur asynchrone triphasé

Figure 2-42

Schéma développé du circuit de commande (fig 2-43)

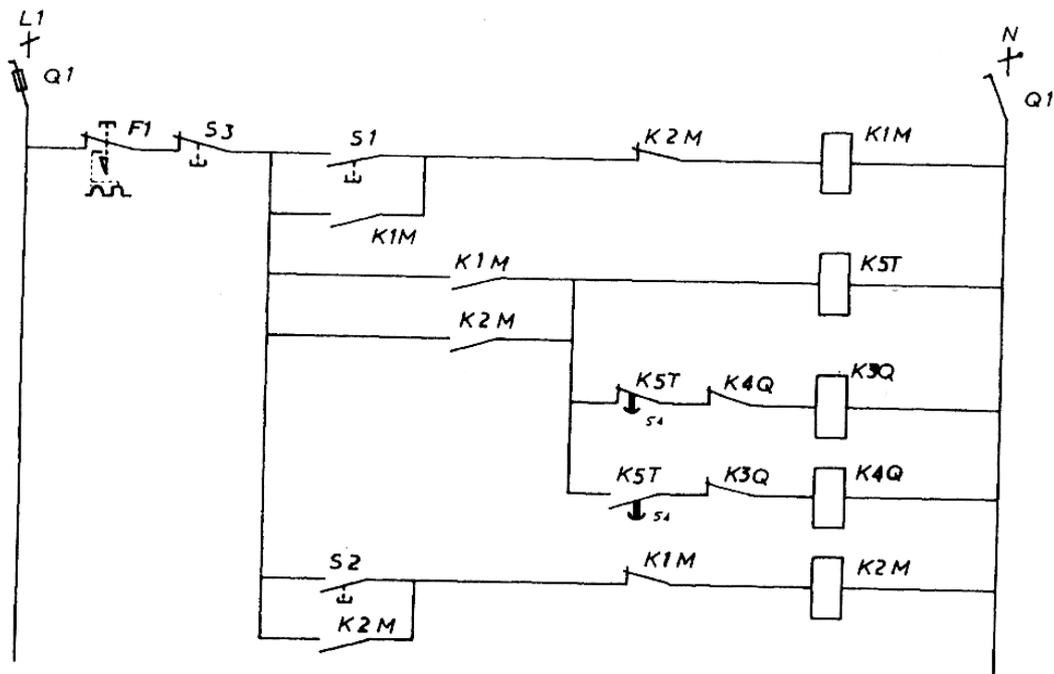


Figure 2-43

Fonctionnement :

Une action sur le bouton poussoir S1 excite la bobine K 1 M ce qui provoque :

- son auto-alimentation
- l'excitation des bobines K 5T et K 3Q
- le démarrage du moteur en couplage étoile

Cinq secondes après, les contacts du relais K 5T changent d'état ce qui entraîne :

- la désexcitation de la bobine K 3Q .
- l'excitation de la bobine K 4Q.

Le couplage du moteur passe de l'étoile en triangle; le démarrage est terminé.

Une action sur le bouton poussoir arrêt (S3) ou un fonctionnement du relais magnéto-thermique F 1 désexcite toutes les bobines et le moteur s'arrête.

Une action sur le bouton poussoir 82 excite la bobine K 2M ce qui provoque le même cycle décrit précédemment avec une inversion du sens de rotation du moteur (en effet il y a inversion de deux phases dans le circuit de puissance).

Remarque :

Il faut verrouiller électriquement et mécaniquement les contacteurs K 1M et K 2M ainsi que K 3Q et K 4Q pour éviter les courts-circuits.

### **II.5.3. Démarrage par élimination de résistances statoriques**

#### Généralités

Ce démarrage s'effectue en deux temps minimum.

- 1<sup>er</sup> temps : les enroulements du stator sont alimentés à travers des résistances (donc sous tension réduite).
- 2<sup>ème</sup> temps : les enroulements du stator sont alimentés directement sous leur tension nominale.

#### Remarque

La suppression des résistances peut s'exécuter en plusieurs fois ce qui ajoute autant de temps supplémentaire au démarrage du moteur.

#### Conditions technologiques

Le moteur asynchrone triphasé doit être du type rotor en court-circuit ou rotor à cage d'écureuil.

#### Avantages de ce procédé

- En augmentant le nombre de temps de démarrage, il est possible de régler toutes les valeurs caractéristiques telles que courants et couple au démarrage.
- Il n'y a aucune coupure d'alimentation du moteur pendant le démarrage.
- L'utilisateur a le choix de coupler les enroulements du stator en étoile ou en triangle.

Inconvénient de ce procédé

- Le courant de démarrage est important dans le cas d'un démarrage en deux temps (de l'ordre de 4 à 5 fois le courant nominal).
- Le couple au démarrage est en moyen (de l'ordre de 0,6 à 0,8 fois le couple nominal).
- Le temps de démarrage est assez long (de l'ordre de 6 à 10 secondes)

Utilisation de ce procédé

Il est employé pour des machines à forte inertie qui ne démarrent pas avec leur charge maximale.

Exemple : ventilateurs, pompes, turbines, broyeurs.

**a) Démarrage par élimination de résistances statoriques un sens de rotation**

Démarrage par élimination de résistances statoriques, d'un moteur asynchrone triphasé à un seul sens de rotation.

Schéma fonctionnel de l'ensemble (fig 2-44)

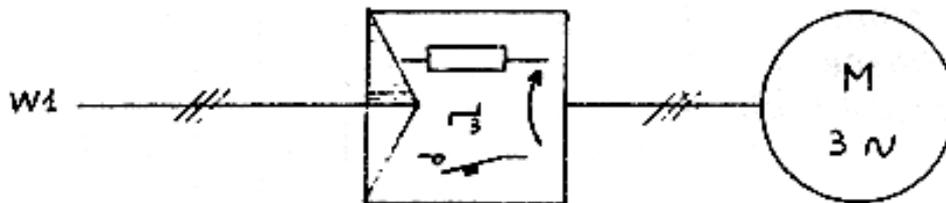


Figure 2-44

Démarrage semi-automatique en trois temps par élimination de résistances d'un moteur asynchrone triphasé à un seul sens de rotation.

Schéma développé du circuit de puissance (fig 2-45)

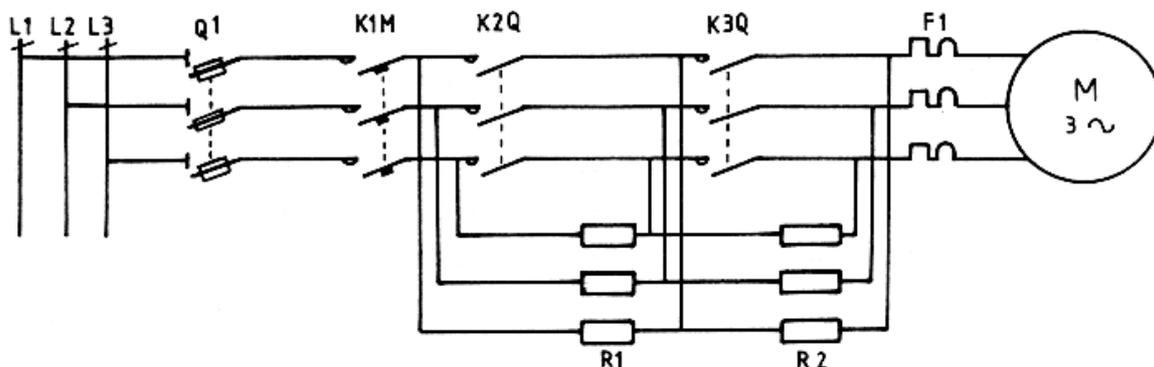


Figure 2-45

Schéma développé du circuit de commande (fig 2-46)

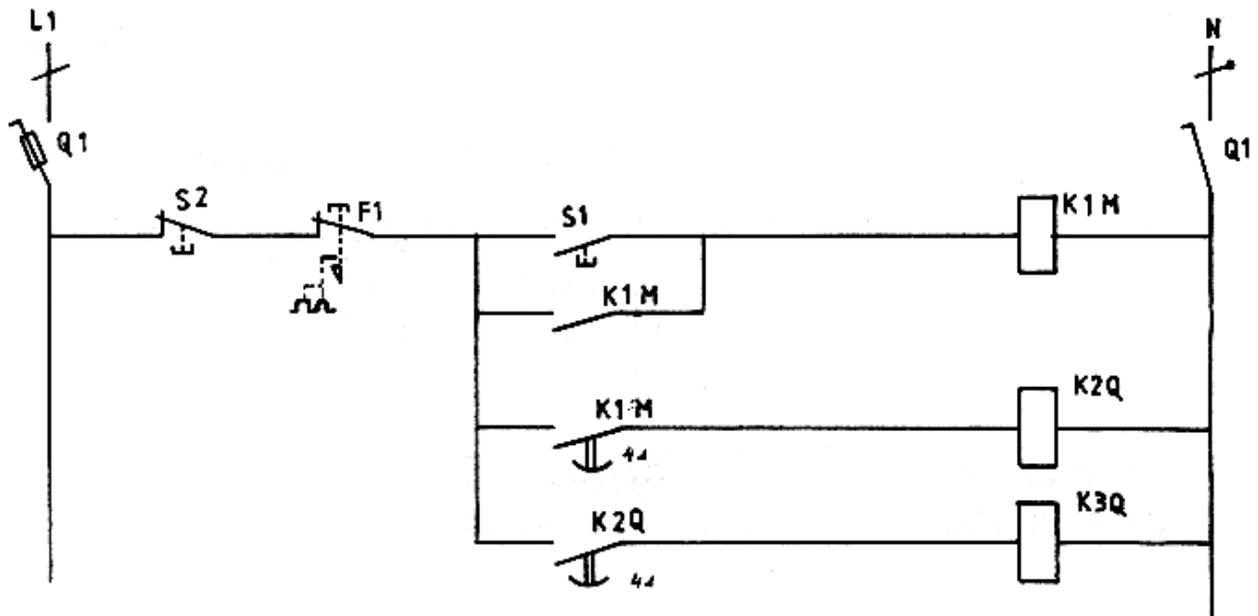


Figure 2-46

Légende :

- Q1 : fusible sectionneur\*
- F1 : relais magnéto-thermique
- S1 : bouton poussoir marche
- S2 : bouton poussoir arrêt
- K1M : discontacteur principal
- K2Q : contacteur 2<sup>e</sup> temps
- K3Q : contacteur 3<sup>e</sup> temps
- R1, R2 : résistance triphasée
- M : moteur asynchrone triphasé

*Fonctionnement du montage*

Une impulsion sur le bouton poussoir S1 excite la bobine K1M qui :

- S'auto-alimente
- Met sous tension le moteur à travers deux jeux de résistances triphasées. Au bout de 4 secondes, le contact temporisé de K1M se ferme et excite la bobine K2Q ; celle-ci ferme ses contacts de puissance qui court-circuitent la résistance triphasée R1 (2<sup>ème</sup> temps).

Après 4 secondes, le contact temporisé de K2Q se ferme et excite la bobine K3Q ; ses contacts de puissance changent d'état et court-circuitent la résistance triphasée R2 (3<sup>e</sup> temps).

Le moteur est alors alimenté sous sa tension nominale et le démarrage est terminé.

Une action sur le bouton poussoir arrêt (S2) ou un fonctionnement du relais magnéto-thermique coupe l'alimentation de toutes les bobines ; le moteur s'arrête.

Note : Les contacteurs possèdent des contacts temporisés.

**b) Démarrage par élimination de résistances statoriques deux sens de rotation**

Démarrage par élimination de résistances statoriques, en 2 temps d'un moteur asynchrone triphasé à deux sens de rotation.

Schéma fonctionnel de l'ensemble (fig 2-47)

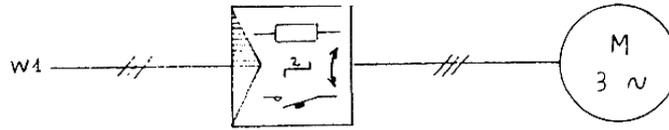


Figure 2-47

Schéma développé du circuit de puissance (fig 2-48)

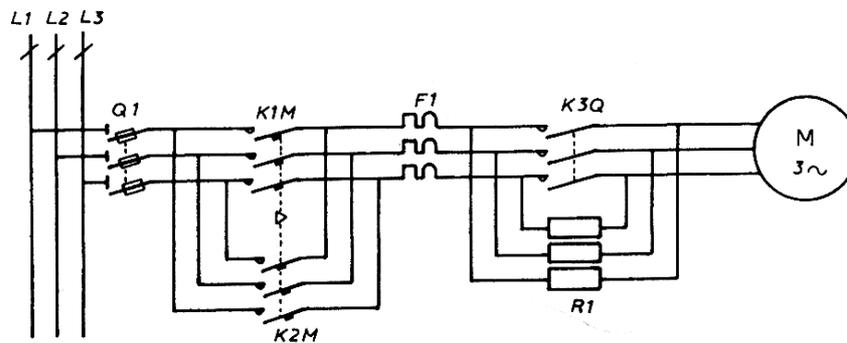
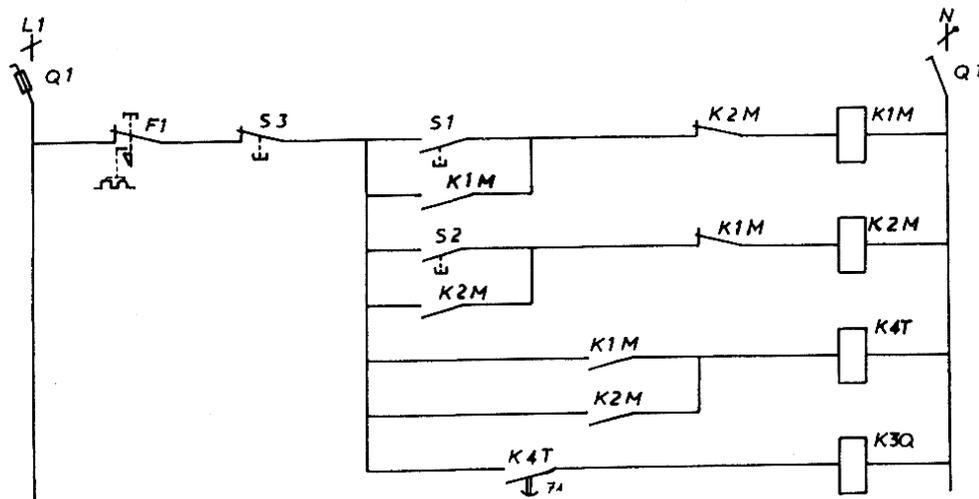


Figure 2-48

Schéma développé du circuit de commande (fig 2-49)



**Légende :**

Q1 : fusible sectionneur  
F1 : relais magnéto-thermique  
S1 : bouton poussoir marche avant  
S2 : bouton poussoir marche arrière  
S3 : bouton poussoir arrêt

K1M : discontacteur marche avant  
K2M : discontacteur marche arrière  
K3Q : contacteur deuxième temps  
K4T : relais temporisé  
R1 : résistance triphasée  
M : moteur asynchrone triphasé

Figure 2-49

## Fonctionnement

Suivant le sens de rotation désiré on provoque :

- soit une action sur le bouton poussoir marche avant (S 1) ; Celui-ci excite la bobine K 1 M qui :
  - s'auto-alimente
  - excite la bobine K4T
  - alimente le moteur à travers une résistance triphasée R 1.

Au bout de sept secondes, le contact temporisé de K 4T se ferme et excite la bobine K 3Q ce qui provoque le shuntage de la résistance R 1. Le moteur est alimenté sous sa tension nominale.

- soit une action sur le bouton poussoir marche arrière (S 2) ; celui-ci excite la bobine K 2M qui a le même effet que K 1M (elle croise simplement deux phases au niveau de l'alimentation du moteur, ce qui le fait tourner dans le sens contraire).

Une action sur le bouton poussoir S3 ou un fonctionnement du relais magnéto-thermique ouvre le circuit de commande ce qui entraîne la coupure du circuit de puissance et l'arrêt du moteur.

Remarque :

Il faut un verrouillage mécanique et électrique entre les discontacteurs K 1M et K 2M pour éviter les courts-circuits entre phases.

### **II.5.4. Démarrage par autotransformateur**

#### Généralité

Ce démarrage qui consiste à utiliser un autotransformateur s'exécute en trois temps :

- 1<sup>er</sup> temps : le moteur est alimenté sous une tension très réduite délivrée par l'autotransformateur.
- 2<sup>eme</sup> temps : le moteur est alimenté sous une tension réduite à travers une partie des enroulements de l'autotransformateur
- 3<sup>eme</sup> temps : le moteur est alimenté sous sa tension nominale.

#### Conditions technologiques

Le moteur asynchrone doit être du type rotor en court-circuit ou rotor à cage d'écureuil.

#### Avantages de ce procédé

- Le courant de démarrage est assez faible (de l'ordre de 2 à 4 fois le courant nominal).
- Il est possible de faire varier les valeurs caractéristiques telles que couple et courant au démarrage en modifiant le rapport de transformation de l'autotransformateur.
- Il n'y a pas de coupure d'alimentation pendant le démarrage. Le choix du couplage des enroulements stator est possible.

*Inconvénient de ce procédé*

- Le couple au démarrage est moyen (de l'ordre de 0,4 à 0,8 fois le couple nominal).
- Le prix revient de l'autotransformateur est élevé.
- Le temps de démarrage est assez long (de l'ordre de 7 à 10 secondes).

*Utilisation de ce procédé*

Ce démarrage est employé sur des machines de fortes puissances et à forte inertie (exemple : pompes centrifuges).

**a) Démarrage par autotransformateur un sens de rotation**

Démarrage semi-automatique en trois temps par autotransformateur d'un moteur asynchrone triphasé à un seul sens de rotation.

Schéma fonctionnel de l'ensemble (fig 2-50)



Figure 2-50

Schéma développé du circuit de puissance (fig 2-51)

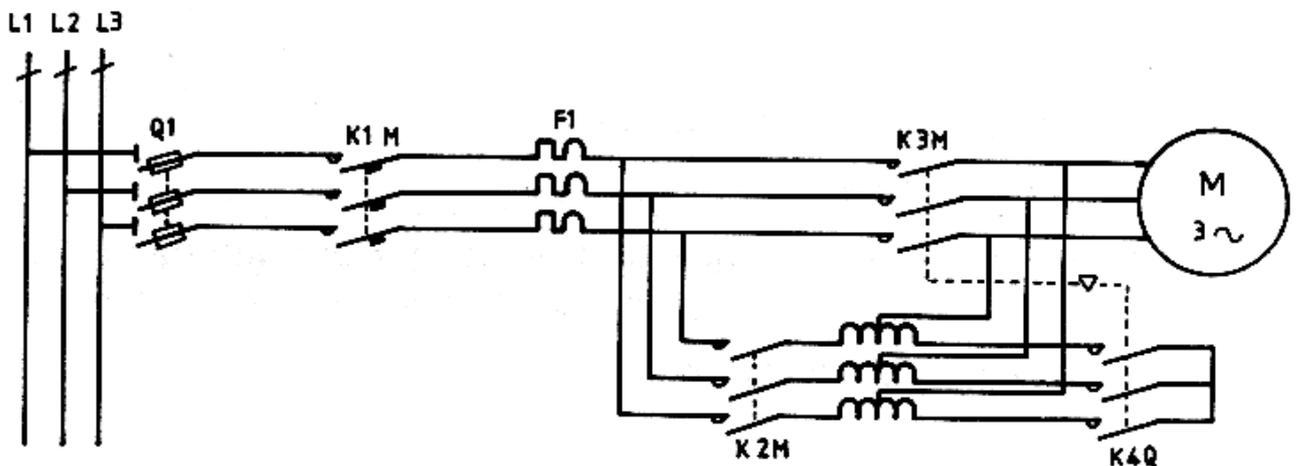


Figure 2-51

Schéma développé du circuit de commande (fig 2-52)



b) Démarrage par autotransformateur deux sens de rotation (fig 2-53)

Schéma développé du circuit de puissance

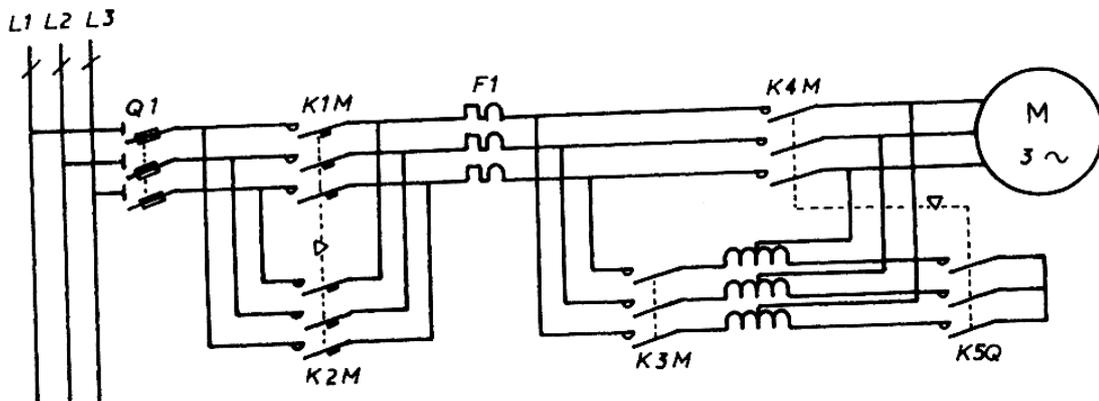
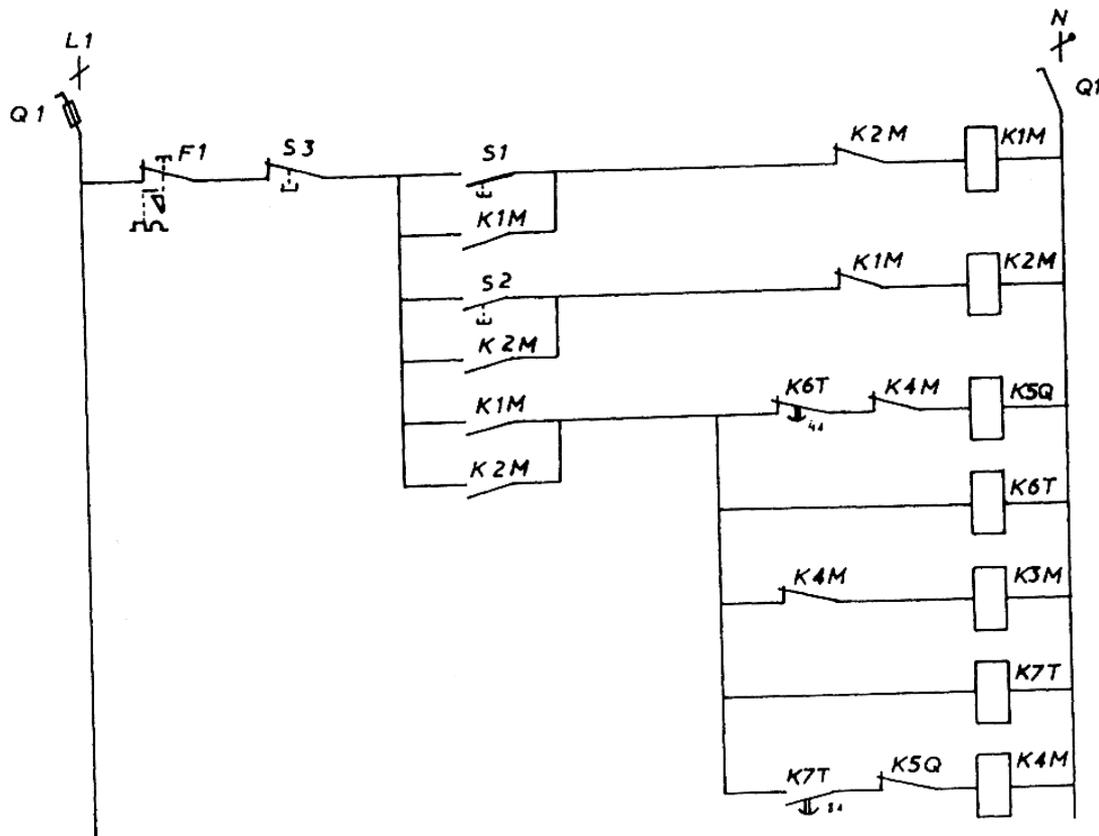


Schéma développé du circuit de commande



**Légende :**

- Q1 : fusible sectionneur
- F1 : relais magnéto-thermique
- S1 : bouton poussoir marche avant
- S2 : bouton poussoir marche arrière
- S3 : bouton poussoir arrêt
- K1M : discontacteur marche avant

- K2M : discontacteur marche arrière
- K3M : contacteur autotransformateur
- K4M : contacteur troisième temps
- K5Q : contacteur étoile
- K6T : relais temporisé 4 s
- K7T : relais temporisé 8 s
- M : moteur asynchrone triphasé

Figure 2-53

### Fonctionnement

Une action sur le bouton poussoir S 1 excite la bobine K 1M qui :

- s'auto-alimente.
- excite les bobines K5Q, K6T, K3M, K7T.
- alimente le moteur par l'intermédiaire de l'autotransformateur couplé en étoile. Au bout de quatre secondes, le contact du relais K 6T s'ouvre et désexcite la bobine K 5Q; le moteur est alimenté à travers une partie des enroulements de l'autotransformateur.

Après quatre secondes, le relais K 7T ferme son contact temporisé ; il excite la bobine K 4M ce qui provoque :

- L'alimentation du moteur sous sa tension nominale.
- La désexcitation de la bobine K3M qui coupe l'alimentation de l'autotransformateur .

Une action sur le bouton poussoir arrêt ou un fonctionnement du relais magnéto-thermique entraîne la désexcitation de toutes les bobines et l'arrêt du moteur.

Une action sur le bouton poussoir S2 excite la bobine K 2M qui provoque le même cycle décrit précédemment mais le moteur tourne dans le sens contraire car il y a eu inversion de deux phases dans le circuit de puissance.

Remarque :

Il faut un verrouillage mécanique et électrique pour les discontacteurs K 1M et K 2M et pour les contacteurs K 4M et K 5Q afin d'éviter les courts-circuits entre phases.

## **II.5.5. Démarrage par élimination de résistances rotoriques**

### Généralités

Ce démarrage qui consiste à alimenter directement les enroulements du stator sous leur tension nominale et à coupler les enroulements du rotor en étoile, s'exécute en plusieurs temps :

- 1<sup>er</sup> temps : On limite le courant dans les enroulements du rotor en insérant dans ce circuit des résistances.
- 2<sup>ème</sup> temps : On diminue la résistance du circuit rotor en éliminant une partie des résistances.
- dernier temps : On supprime toutes les résistances rotoriques ce qui nous donne un rotor en court-circuit (couplage étoile).

Remarque

La suppression des résistances peut s'exécuter en plusieurs fois ce qui ajoute, autant de temps supplémentaires, au démarrage du moteur.

### Conditions technologiques

Le moteur asynchrone triphasé doit être du type rotor bobiné avec les sorties reliées à des bagues.

## Avantages de ce procédé

- En augmentant le nombre de temps de démarrage, il est possible de régler les valeurs caractéristiques telles que courant et couple au démarrage.
- Le courant de démarrage est faible ( de l'ordre de 2 à 2,5 fois le courant nominal).
- Le couple au démarrage est important (de l'ordre de 1 à 2,5 fois le couple nominal).
- Il n'y a pas de coupure d'alimentation pendant le démarrage.
- Le choix du couplage en étoile ou triangle des enroulements du stator est possible.

## Inconvénient de ce procédé

- Le moteur a un prix de revient élevé (rotor bobiné avec sorties reliées à l'extérieur).
- Le temps de démarrage est assez long (de l'ordre de 3 à 10 secondes).

## Utilisations de ce procédé

Il est employé pour des machines démarrant en charge ou à forte inertie.

a) Démarrage par élimination de résistances rotoriques un seul sens de rotation

Démarrage en trois temps d'un moteur asynchrone triphasé à rotor bobiné avec un seul sens de rotation.

Schéma fonctionnel de l'ensemble (fig 2-54)

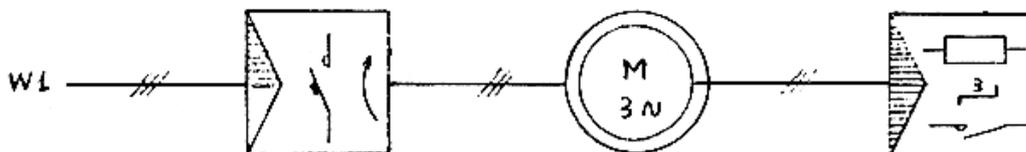


Figure 2-54

Schéma développé du circuit de commande (fig 2-55)

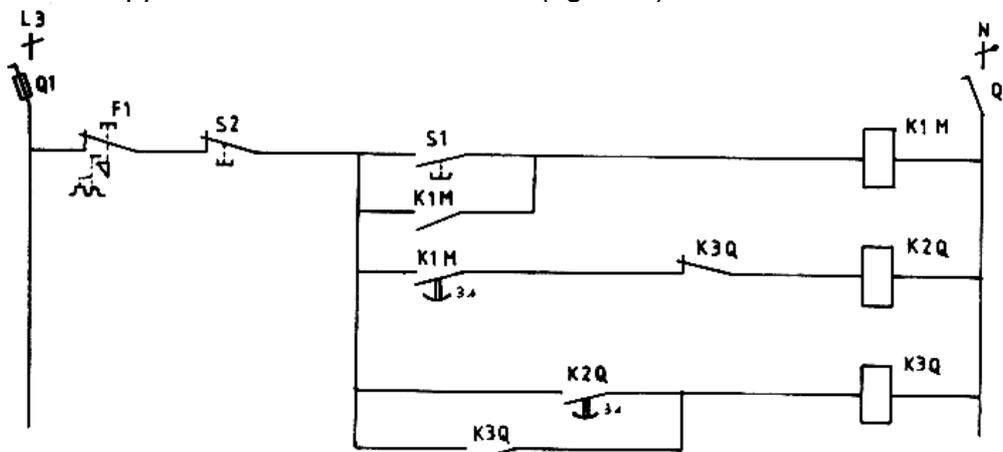


Figure 2-55

Schéma développé un circuit de puissance (fig 2-56)

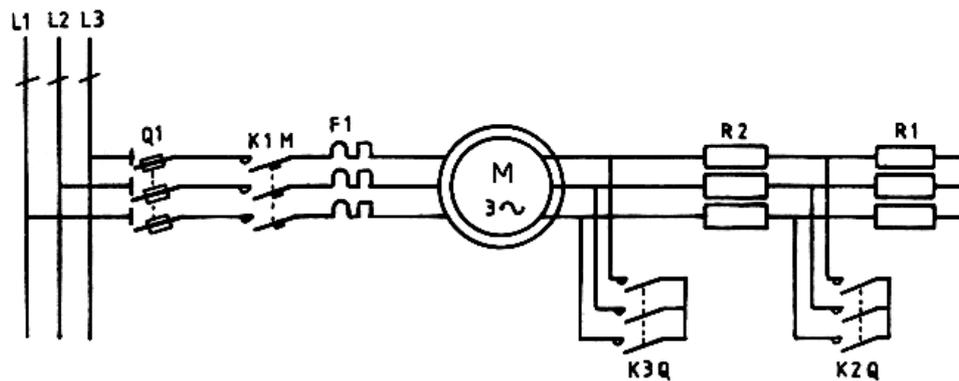


Figure 2-56

Légende :

- Q1 : fusible sectionneur
- F1 : relais magnéto-thermique
- S1 : bouton poussoir marche
- S2 : bouton poussoir arrêt
- K1M : discontacteur principal
- K2M : contacteur 2e temps
- K3M : contacteur 3e temps
- R1 : résistance triphasée
- R2 : résistance triphasée
- M : moteur asynchrone triphasé

Fonctionnement

Une action sur le bouton poussoir S1 excite la bobine K1M qui :

- S'auto-alimente
- Alimente le moteur qui démarre avec l'insertion des deux résistances triphasées dans son circuit rotor.

Au bout de trois secondes, le contact temporisé K1M se ferme et excite la bobine du contacteur K2Q ce qui provoque le shuntage de la résistance triphasée R1 (2<sup>ème</sup> temps).

Après trois secondes, le contact temporisé de K2Q se ferme ce qui entraîne l'excitation de la bobine K3Q ; cela provoque :

- le shuntage de la résistance triphasée R2 (3<sup>ème</sup> temps).
- la désexcitation de la bobine K3M.

Le démarrage est terminé ; le moteur tourne à sa vitesse nominale avec son rotor en court-circuit.

Une action sur le bouton poussoir S2 ou un fonctionnement du relais magnéto-thermique coupe l'alimentation du circuit de commande et le moteur s'arrête.

**b) Démarrage par élimination de résistances rotoriques deux sens de rotation**  
(fig 2-57)

Schéma développé du circuit de puissance

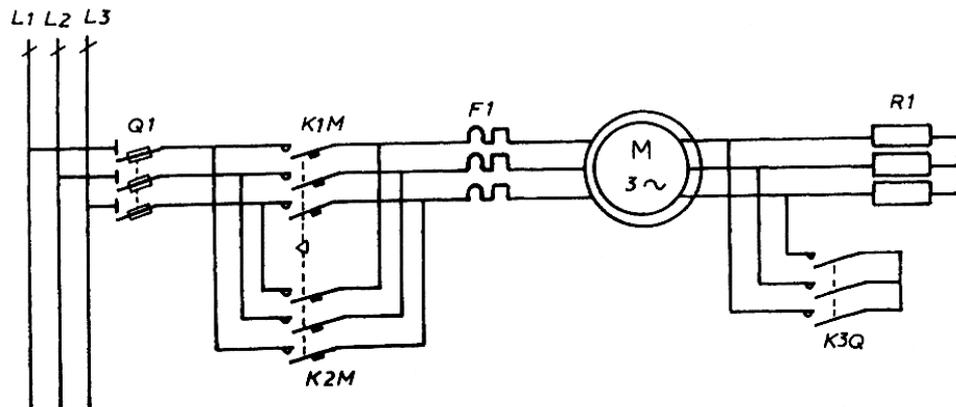
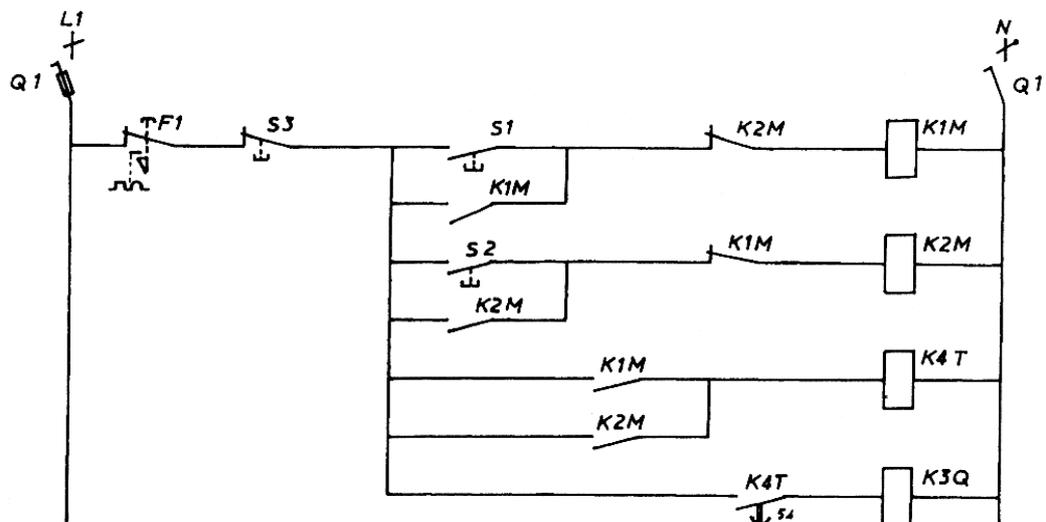


Schéma développé du circuit de commande



**Légende :**

- Q1 : fusible sectionneur
- S1 : bouton poussoir marche avant
- S2 : bouton poussoir marche arrière
- S3 : bouton poussoir arrêt
- K1M : discontacteur marche avant
- K2M : discontacteur marche arrière
- K3Q : contacteur deuxième temps
- K4T : relais temporisé
- R1 : résistance triphasée
- F1 : relais magnéto-thermique
- M : moteur asynchrone avec rotor bobiné

Figure 2-57

## Fonctionnement

Une impulsion sur le bouton poussoir S1 excite la bobine K1M qui :

- s'auto-alimente.
- alimente le stator du moteur qui démarre avec la résistance triphasée R1 dans le circuit du rotor (1<sup>er</sup> temps).
- alimente la bobine du relais K4T.

Au bout de cinq secondes, le contact du relais K4T se ferme et alimente la bobine K 3Q; la résistance triphasée R1 est shuntée (2<sup>ème</sup> temps). Le démarrage du moteur est alors terminé.

Une action sur le bouton poussoir arrêt (S3) ou un fonctionnement du relais magnéto-thermique désexcite toutes les bobines et le moteur s'arrête.

Une action sur le bouton poussoir S2 excite la bobine K 2M qui nous donne le même cycle décrit précédemment mais le moteur tourne dans le sens contraire car il y a eu inversion de deux phases du circuit de puissance.

## **II.6. Les différents types de moteurs à double vitesse et leurs systèmes de commande**

### **II.6.1. Moteur asynchrone triphasé à deux vitesses par couplage des enroulements du stator**

#### Généralités

La vitesse d'un moteur asynchrone triphasé peut être choisie en faisant varier le nombre de pôles du stator sous les conditions suivantes :

- le moteur asynchrone est du type rotor à cage d'écureuil.
- chaque enroulement du stator possède deux demi-bobines.

Le nombre de paires de pôles est modifié en couplant différemment les demi-bobines du stator. Ces couplages, dont le nombre est limité, ne peuvent donner que deux vitesses fixes qui possèdent un rapport de deux. La grande vitesse sera le double de la petite vitesse.

#### **a) Couplage triangle série-étoile parallèle**

C'est le couplage le plus utilisé.

Les bobines sont raccordées à la plaque à bornes du moteur suivant le schéma ci-dessous. (fig 2-58)

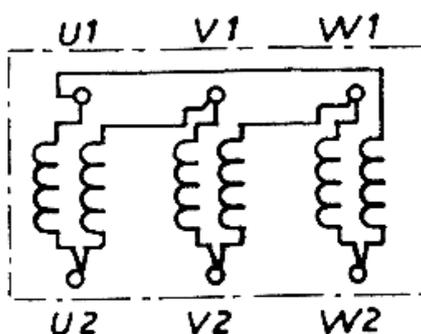


Figure 2-58

La plaque à bornes comporte six bornes.

**Caractéristiques**

- le couple utile est sensiblement constant quelle que soit la vitesse choisie.
- la puissance mécanique en grande vitesse est donc le double de celle en petite vitesse.
- le courant de démarrage est plus faible en petite vitesse qu'en grande vitesse.

**Remarques :**

En cas de sélection de la grande vitesse, il est souhaitable de démarrer en petite vitesse et de passer automatiquement à la vitesse supérieure, ceci pour éviter un courant de démarrage trop important.

Dans le cas d'un passage automatique de petite vitesse en grande vitesse ou inversement, l'alimentation du moteur est coupée ce qui entraîne des phénomènes transitoires perturbateurs.

Plaque à bornes (fig 2-59)

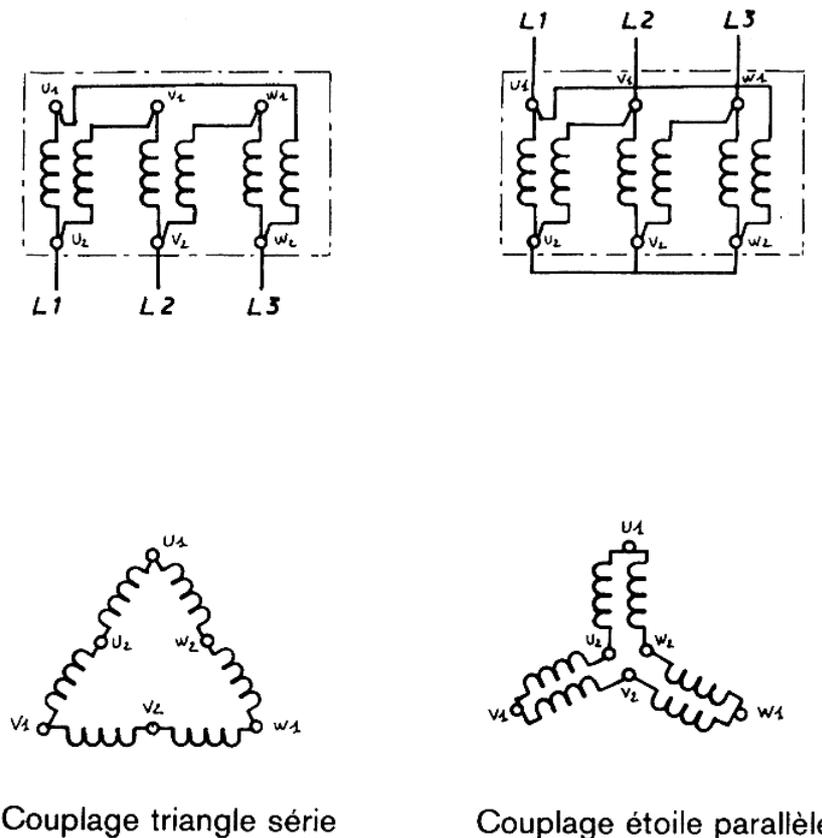


Figure 2-59

Il faut faire très attention à l'ordre de succession des phases car, en cas d'inversion lors d'un passage de petite vitesse en grande vitesse, il y aurait un changement du sens de rotation du moteur.

**Couplage des enroulements**

La petite vitesse s'obtient en couplant les demi-bobines du stator en triangle série.

La grande vitesse s'obtient en couplant les demi-bobines du stator en étoile parallèle.

**Exemple :** Moteur asynchrone triphasé à deux vitesses (par couplage des enroulements triangle série-étoile parallèle) possédant un sens de rotation.  
(fig 2-60)

Schéma développé du circuit de puissance

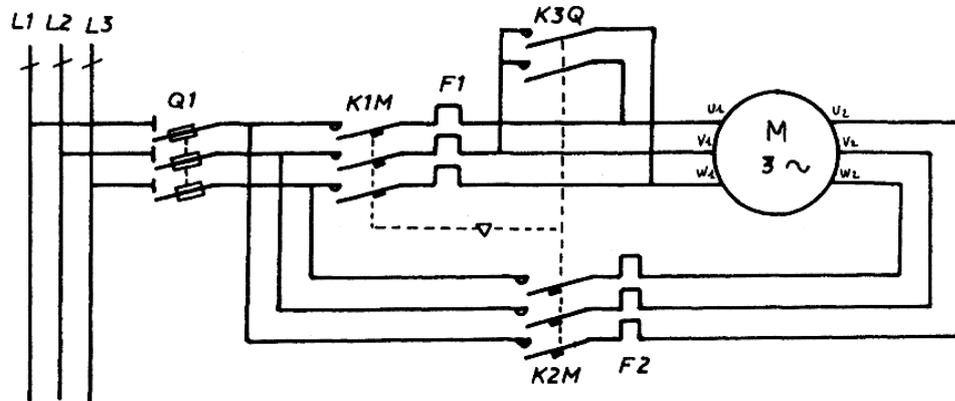
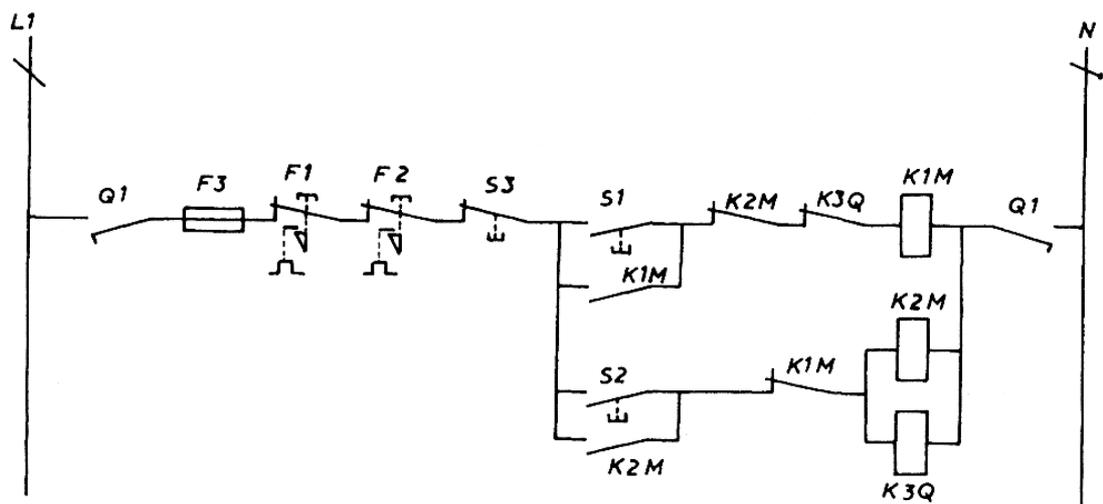


Schéma développé du circuit de commande



**Légende :**

- Q1 : fusible sectionneur
- F1 : relais thermique protection petite vitesse
- F2 : relais thermique protection grande vitesse
- F3 : protection du circuit de commande
- S1 : bouton poussoir petite vitesse
- S2 : bouton poussoir grande vitesse
- S3 : bouton poussoir arrêt
- K1M : discontacteur petite vitesse
- K2M : discontacteur grande vitesse
- K3Q : contacteur couplage grande vitesse
- M : moteur asynchrone triphasé deux vitesses

Figure 2-60

### Fonctionnement

Le moteur étant à l'arrêt, nous avons deux possibilités :

- une action sur le bouton poussoir petite vitesse (S1) provoque l'excitation de la bobine K1M qui s'auto-alimente ; ses contacts de puissance se ferment et le moteur démarre en petite vitesse.
- une action sur le bouton poussoir grande vitesse (S2) provoque l'excitation des bobines K2M et K3Q qui s'auto-alimentent. Leurs contacts de puissance se ferment et le moteur démarre en grande vitesse.

L'arrêt de la rotation du moteur est obtenu :

- soit par une action sur le bouton poussoir arrêt (S3)
- soit par le fonctionnement du relais thermique F 1 (petite vitesse)
- soit par le fonctionnement du relais thermique F 2 (grande vitesse).

Les contacteurs K1M, K2M et K3Q possèdent des verrouillages mécanique et électrique pour éviter les courts-circuits dans le circuit de puissance (fermeture simultanée de K1M et K3Q).

Pour passer de la petite vitesse en grande vitesse, ou inversement, il faut obligatoirement appuyer sur le bouton poussoir arrêt.

#### **b) Couplage étoile série- étoile parallèle**

##### Caractéristiques

- le couple utile en grande vitesse est de l'ordre de quatre fois plus grand qu'en petite vitesse.
- la puissance en grande vitesse est donc de l'ordre de six fois plus grande qu'en petite vitesse.
- le courant de démarrage en petite vitesse est faible.

##### Remarques :

En cas de sélection de la grande vitesse, il est souhaitable de démarrer en petite vitesse, avec passage automatique en grande vitesse, si le couple moteur est suffisant.

Le passage automatique de petite vitesse en grande vitesse ou inversement entraîne une coupure d'alimentation du moteur ce qui provoque des phénomènes transitoires perturbateurs.

##### Couplage des enroulements

La petite vitesse s'obtient en couplant les demi-bobines en étoile série.

La grande vitesse s'obtient en couplant les demi-bobines en étoile parallèle.

Plaque à bornes (fig 2-61)

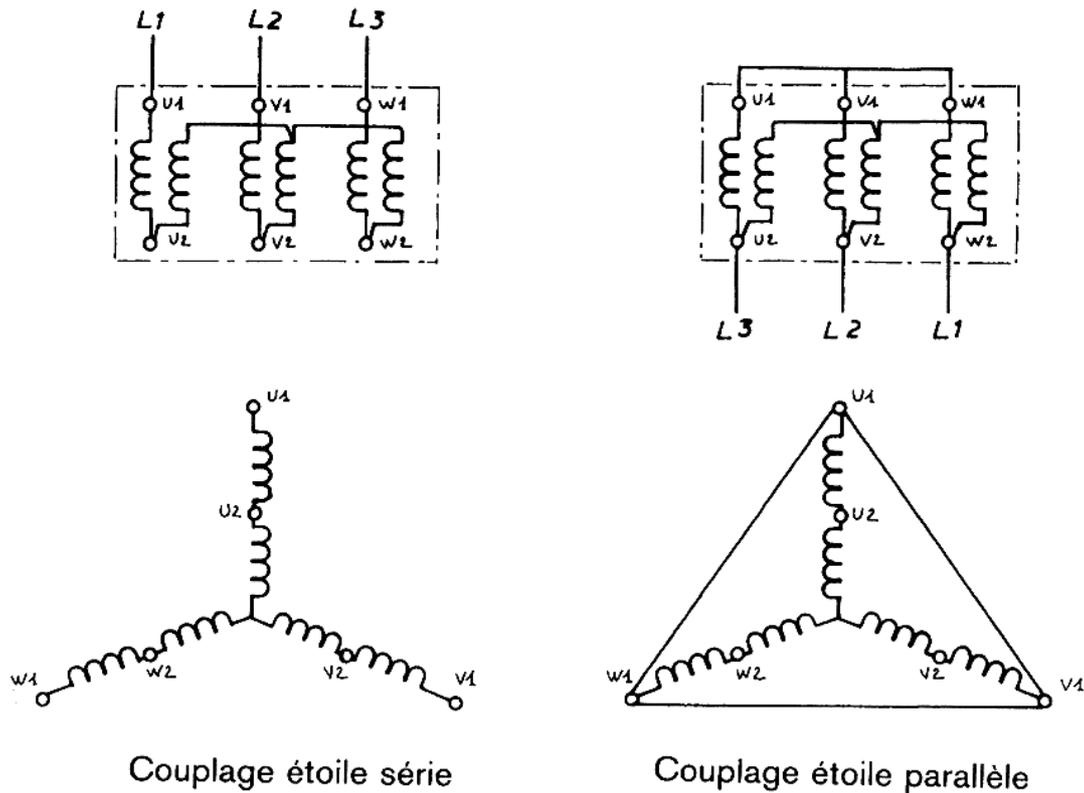


Figure 2-61

**Exemple de schéma (fig 2-62)**

Moteur asynchrone triphasé à deux vitesses (par couplage des enroulements étoile série- étoile parallèle) possédant deux sens de rotation.

Le moteur démarre toujours en petite vitesse; il passe ensuite automatiquement en grande vitesse dix secondes après le démarrage.

Schéma développé rangé des circuits de commande et de puissance

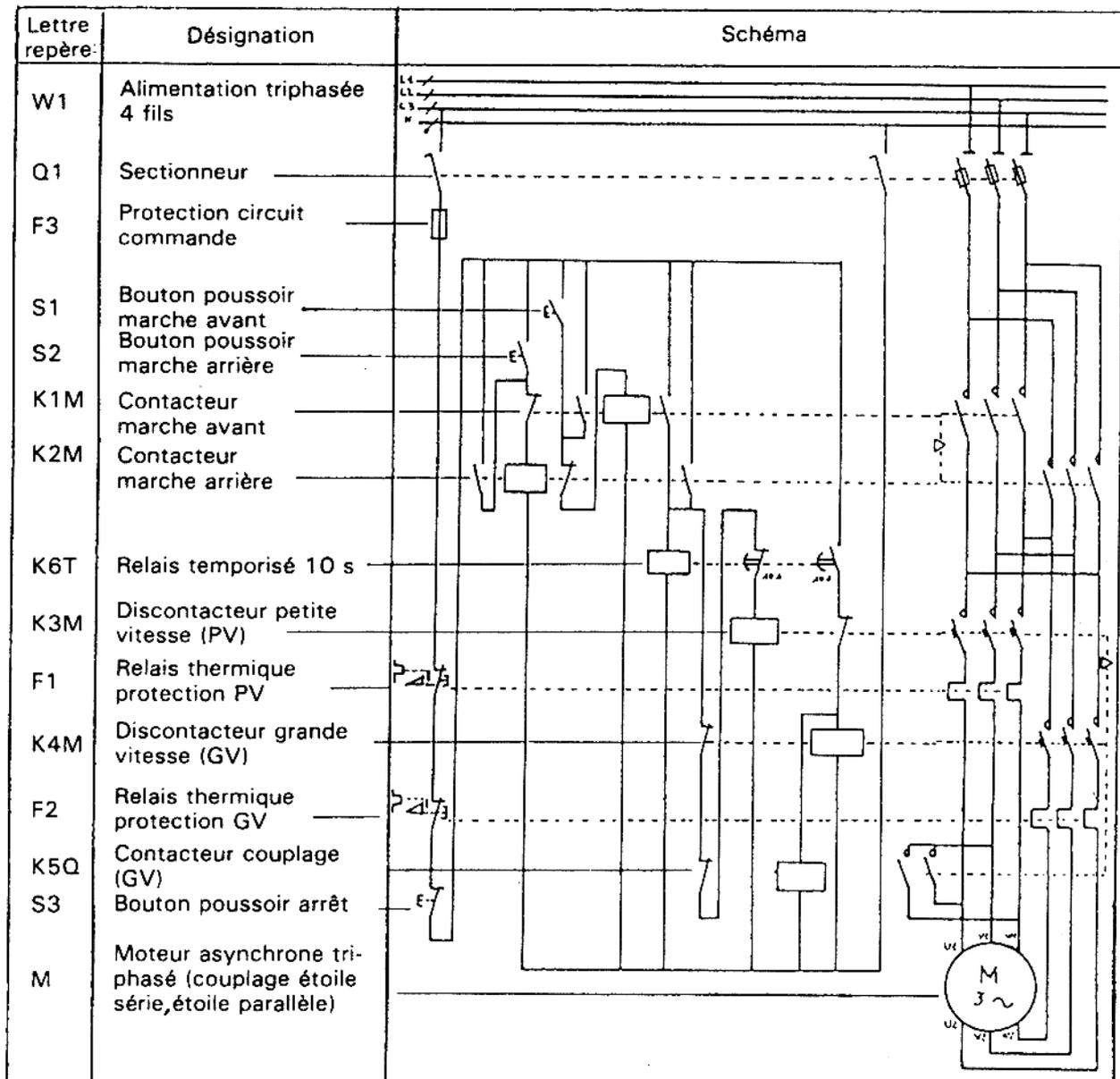


Figure 2-62

**II.6.2. Moteur asynchrone triphasé à deux vitesses par enroulements indépendants**

Le moteur asynchrone triphasé comporte sur le stator, deux groupes d'enroulements indépendants l'un de l'autre. Pour obtenir deux vitesses de rotation différentes, il faut choisir soit le premier soit le deuxième groupe d'enroulements.

Le rapport de vitesse entre ces deux groupes d'enroulements peut être quelconque et dépend de la construction des enroulements (nombre de spires...).

Ces moteurs possèdent les mêmes caractéristiques que les moteurs asynchrones triphasés à cage d'écuruil.

Plaque à bornes du moteur (fig 2-63)

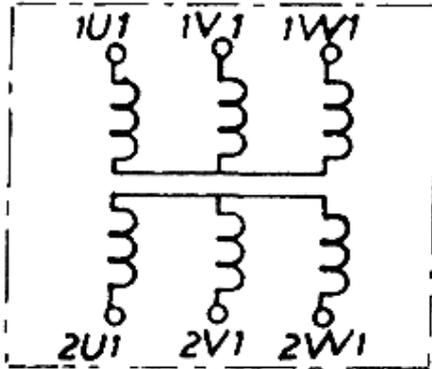


Figure 2-63

La plaque à bornes de ce moteur comporte six bornes. Le couplage des deux groupes d'enroulements du stator est effectué par le constructeur qui utilise le couplage étoile.

L'alimentation des bornes 1U1, 1V1, 1W1, donne la première vitesse de rotation.

L'alimentation des bornes 2U1, 2V1, 2W1, donne la deuxième vitesse de rotation.

**Exemple :** (fig 2-64)

Moteur asynchrone triphasé à enroulements indépendants possédant deux vitesses de rotation ainsi que deux sens de rotation.

La commande de ce moteur se réalise par boutons poussoirs.

**Fonctionnement de l'ensemble**

Suivant la vitesse et le sens de rotation désirés, on sélectionne le bouton poussoir correspondant; une action sur celui-ci provoque l'excitation de la bobine du contacteur concerné qui :

- s'auto-alimente
- verrouille les autres contacteurs
- ferme ses contacts de puissance; le moteur démarre.

Pour changer de vitesse ou de sens de rotation, il faut obligatoirement appuyer sur le bouton poussoir arrêt (S5).

Les enroulements du moteur sont protégés par deux relais thermiques :

- le premier protège les enroulements correspondants à la première vitesse.
- le deuxième protège les enroulements correspondants à la deuxième vitesse.

Tous les contacteurs sont verrouillés entre eux d'une façon mécanique et électrique pour éviter les courts-circuits.

Schéma développé rangé des circuits

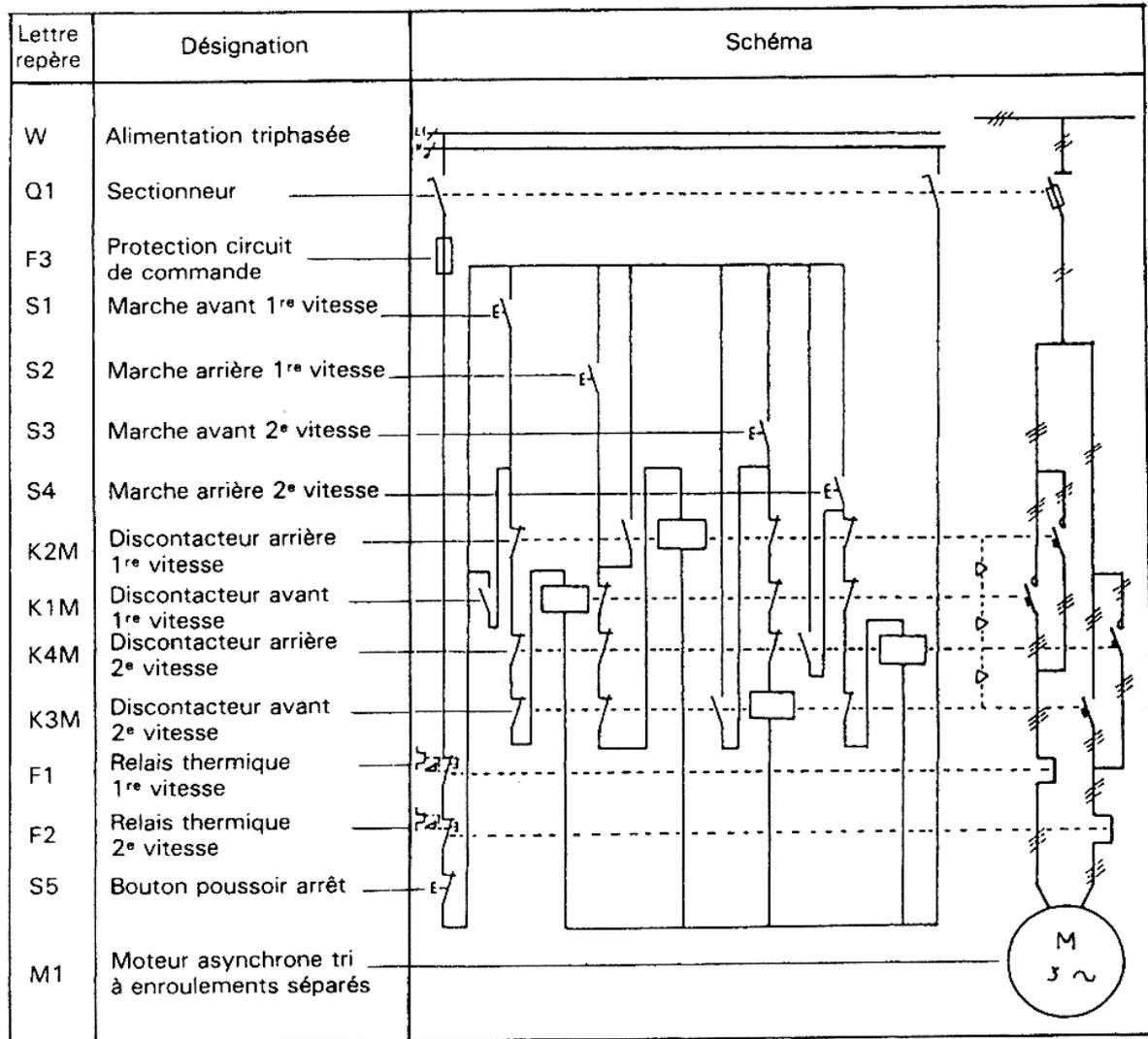


Figure 2-64

## II.7. Freinage des moteurs asynchrones triphasés

### II.7.1. Freinage par électro-frein

Un électro-frein est un dispositif composé :

- d'un électro-aimant qui actionne deux mâchoires.
- d'un disque situé entre ces deux mâchoires et solidaire de l'arbre moteur.

#### Fonctionnement

A l'arrêt l'électro-aimant est désexcité et les mâchoires serrent le disque.

Dès l'alimentation du moteur, l'électro-aimant s'excite ce qui provoque le desserrage des mâchoires sur le disque.

A l'arrêt du moteur (coupure de l'alimentation) l'électro-aimant se désexcite et les mâchoires resserrent le disque. Le moteur est alors freiné.

*Inconvénient de ce système*

*Le freinage est brusque.*

*Remarque :*

*En cas de coupure d'alimentation du moteur, celui-ci se trouve automatiquement freiné.*

## **II.7.2. Freinage par contre-courant**

*Principe*

*Pour obtenir le freinage du moteur, il faut croiser deux phases de son alimentation triphasée (inversion du sens de rotation du moteur) ; celui-ci a tendance à tourner en sens contraire de son propre couple ce qui le freine énergiquement.*

*Remarque :*

*L'alimentation du moteur doit être coupée avant qu'il ne redémarre dans le sens inverse; pour cela, on utilise :*

- *soit un contact centrifuge (coupure lorsque la vitesse de rotation est nulle).*
- *soit un contact temporisé (coupure après un temps de mise sous tension de quelques secondes ce qui ne permet pas le freinage jusqu'à l'arrêt complet du moteur).*
- *soit un relais de mesure de courant statorique (coupure lorsque le courant est inférieur à une valeur minimale).*

*Inconvénients*

- *Le courant dans les enroulements du stator augmente lors du freinage; pour le limiter, on peut insérer dans son circuit des résistances.*
- *Le dégagement de chaleur dû à l'augmentation du courant dans le rotor est important.*

**Exemple** pour moteur asynchrone triphasé à cage d'écureuil.

Schéma développé du circuit de puissance (fig 2-65)

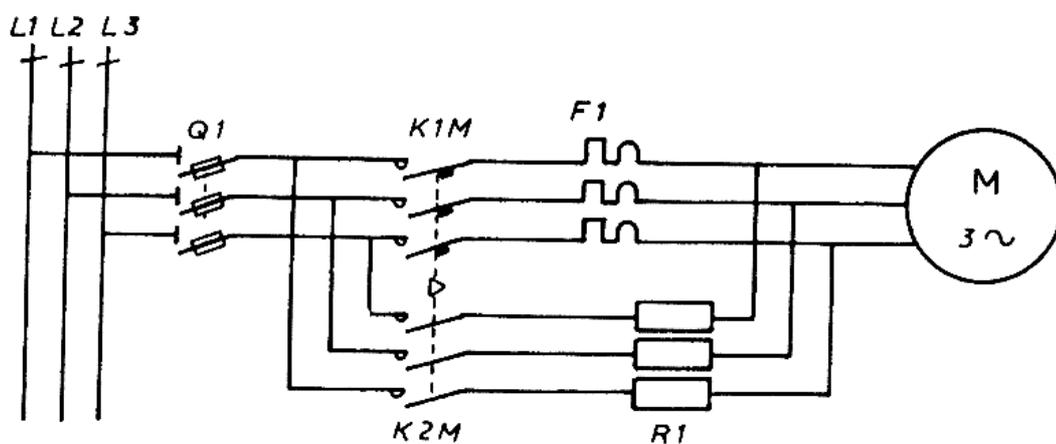
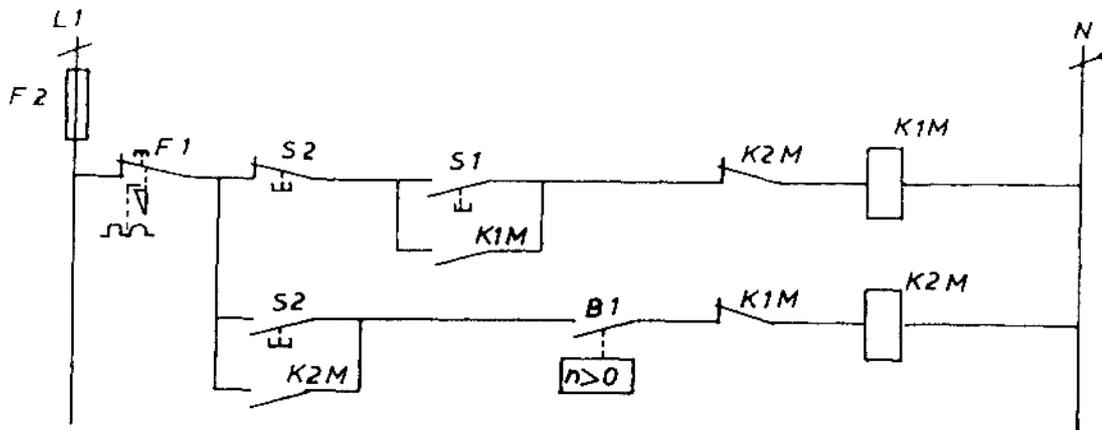


Figure 2-65

Schéma développé du circuit de commande (fig 2-66)



#### Légende :

- Q1 : sectionneur
- F1 : protection magnéto-thermique
- F2 : protection du circuit commande
- S1 : bouton poussoir marche
- S2 : bouton poussoir arrêt à 2 contacts (fermeture et ouverture)
- B1 : capteur de vitesse de rotation fermé lorsque cette vitesse est supérieure à zéro
- K1M : discontacteur principal
- K2M : contacteur de freinage
- R1 : résistance statorique de freinage
- M : moteur asynchrone triphasé avec contact centrifuge

Figure 2-66

#### Fonctionnement

Une action sur le bouton poussoir S1 excite la bobine du contacteur K1M ce qui provoque l'alimentation du moteur.

Dès que le moteur commence sa rotation, le contact du capteur de vitesse se ferme et prépare le freinage du moteur.

Une action sur le bouton poussoir S2 entraîne la désexcitation de la bobine K1M (coupure de l'alimentation du moteur) et l'excitation de la bobine du contacteur K2M ; le moteur est réalimenté avec une inversion de deux phases et se trouve donc freiné. Lorsque sa vitesse de rotation est nulle, le capteur B1 ouvre son contact, la bobine K2M se désexcite et empêche la rotation du moteur en sens Inverse.

#### Remarques :

- Il faut absolument un verrouillage électrique et mécanique entre les deux contacteurs afin d'éviter les courts-circuits.
- Lors du freinage, le moteur n'est pas protégé par le relais magnéto-thermique.
- Si le relais magnéto-thermique fonctionne, le moteur n'est pas freiné.

### II.7.3. Freinage par injection de courant continu

#### Principe

Pour freiner un moteur, on injecte dans les enroulements du stator un courant continu; celui-ci crée un champ magnétique fixe qui freine le rotor.

Remarques :

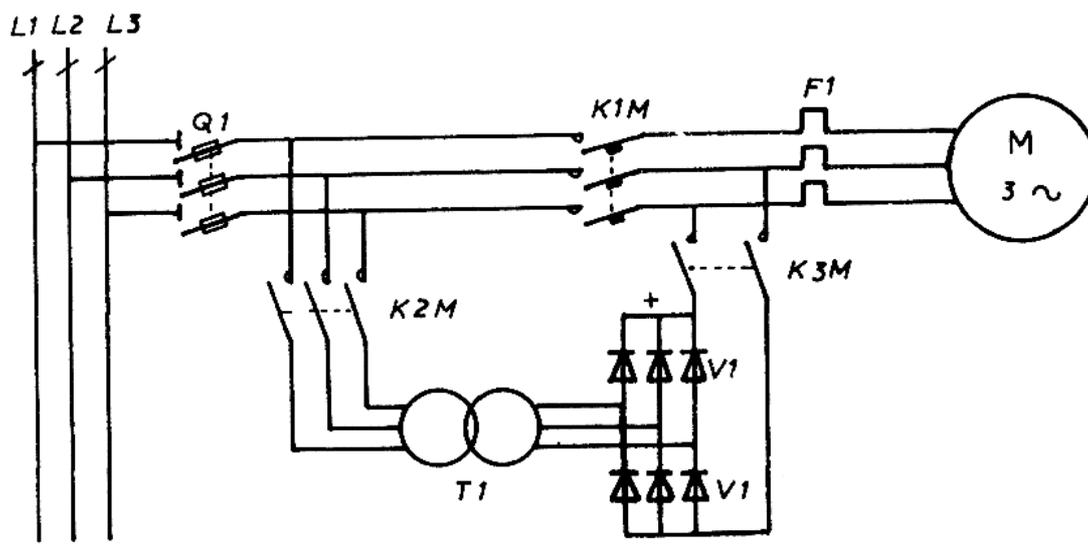
-Il n'y a aucun risque d'inversion du sens de rotation du moteur après son arrêt complet.

-Le couple de freinage peut être réglé en faisant varier la tension continue qui est, en général, de l'ordre de 0,03 à 0,1 fois la tension nominale du moteur.

Le courant continu, nécessaire pour un freinage efficace, est de l'ordre de 1,2 à 2 fois le courant nominal du moteur.

**Exemple :** pour Moteur asynchrone triphasé à cage d'écureuil.

Schéma développé du circuit de puissance (fig 2-67)



#### Légende :

- Q1 : fusible sectionneur
- F1 : relais thermique
- S1 : bouton poussoir marche
- S2 : bouton poussoir arrêt
- B1 : contact centrifuge fermé lorsque la vitesse est supérieure à zéro
- T1 : transformateur triphasé 400/24 V
- V1 : six diodes de redressement
- K1M : discontacteur d'alimentation
- K2M : contacteur de freinage (alternatif)
- K3M : contacteur de freinage (continu)
- M : moteur asynchrone triphasé

Figure 2-67

Schéma développé du circuit de commande (fig 2-68)

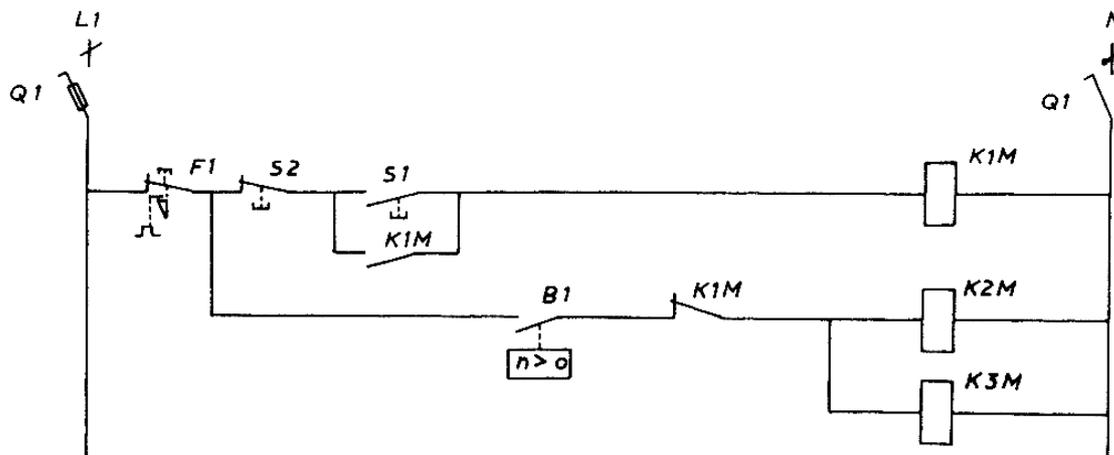


Figure 2-68

#### Fonctionnement

Une action sur le bouton poussoir marche (S 1) provoque l'excitation de la bobine K1M qui :

- s'auto-alimente
- ouvre le circuit de commande des contacteurs de freinage.

Le moteur démarre et le contact centrifuge se ferme.

Une action sur le bouton poussoir arrêt (S2) désexcite la bobine K 1M ce qui entraîne:

- la coupure de l'alimentation du moteur
- l'excitation des bobines K2M et K3M.

La fermeture des contacts de K 2M met sous tension le transformateur triphasé qui abaisse la tension d'alimentation à une valeur de 24 V. Celle-ci est redressée à travers un pont de diodes triphasé.

La fermeture des contacts de K3M, permet d'injecter cette tension sur deux enroulements du moteur qui est freiné.

Lorsque celui-ci est arrêté, le contact centrifuge s'ouvre et désexcite les bobines des contacteurs de freinage K 2M et K 3M.

#### Remarque :

Si l'on appuie d'une façon continue sur le bouton poussoir (S 2), le moteur se trouve freiné.

### III. Les moteurs synchrones triphasés

#### a) Fonctionnement des moteurs synchrones triphasés :

##### principe :

- Soit une aiguille aimantée libre autour d'un axe.
- soit un aimant permanent tournant autour du même axe, cet aimant étant équivalent, du point de vue de ses effets à un champ tournant.

L'aiguille aimantée est soumise à un couple moteur qui l'anime d'un mouvement de rotation de fréquence rigoureusement égale, donc synchrone, à celui de l'aimant représentatif du champ tournant (figure 3-1).

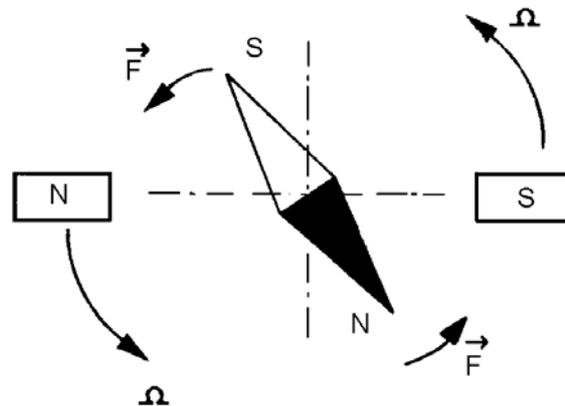


Figure 3-1

Pratiquement, le moteur synchrone est un alternateur entraîné en rotation jusqu'à la fréquence de synchronisme puis couplé au réseau et chargé mécaniquement.

- Ses enroulements statoriques génèrent un champ tournant.
- l'enroulement induit rotorique, alimenté en continu est analogue un aimant permanent tournant à la même fréquence de rotation que la fréquence de synchronisme du champ tournant.

Le moteur synchrone ne possède pas de couple de démarrage : Il n'engendre un couple moteur que lorsque son rotor est amené à la vitesse de synchronisme.

#### **b) Caractéristiques spécifiques :**

Les deux caractéristiques importantes du moteur synchrone :

- Constance de sa fréquence de rotation (égale à la fréquence du synchronisme).
- Capacité à produire de l'énergie réactive.

C'est ce qui détermine son emploi en compensateur synchrone, car il permet au même titre que les batteries de condensateur, de relever le facteur de puissance des installations industrielles.

#### **c) Inversion du sens de Marche :**

L'inversion du sens de rotation du moteur synchrone triphasé se réalise en inversant le champ magnétique tournant c'est à dire en croisant deux phases au niveau des enroulements du stator.

#### **d) Démarrage des Moteurs synchrones triphasés :**

Pour accrocher au réseau un moteur synchrone à l'arrêt il est indispensable de l'amener en voisinage de la vitesse de synchronisme :

- soit à l'aide d'un moteur auxiliaire de lancement, l'accrochage au réseau s'effectuant comme pour un alternateur.
- Soit en le démarrant en mode asynchrone, grâce aux amortisseurs, mais sous une tension réduite (autotransformateur abaisseur). Pendant cette phase de démarrage le circuit inducteur est mis en court-circuit.

Lorsque la vitesse se stabilise, à proximité de la vitesse synchrone, on alimente l'inducteur et le moteur est accroché.

#### IV. Fonctionnement des Moteurs asynchrones monophasés :

##### a) Principe de fonctionnement :

Un courant alternatif sinusoïdal monophasé parcourant un bobinage crée un champ magnétique alternatif qui peut être considéré comme la somme de deux champs tournants symétriques.

Si l'on place une aiguille aimantée en face de la bobine parcourue par un courant alternatif monophasé. Elle reste immobile, étant sollicitée par les deux champs tournants. Le couple moteur au repos est nul (figure 4 -1).

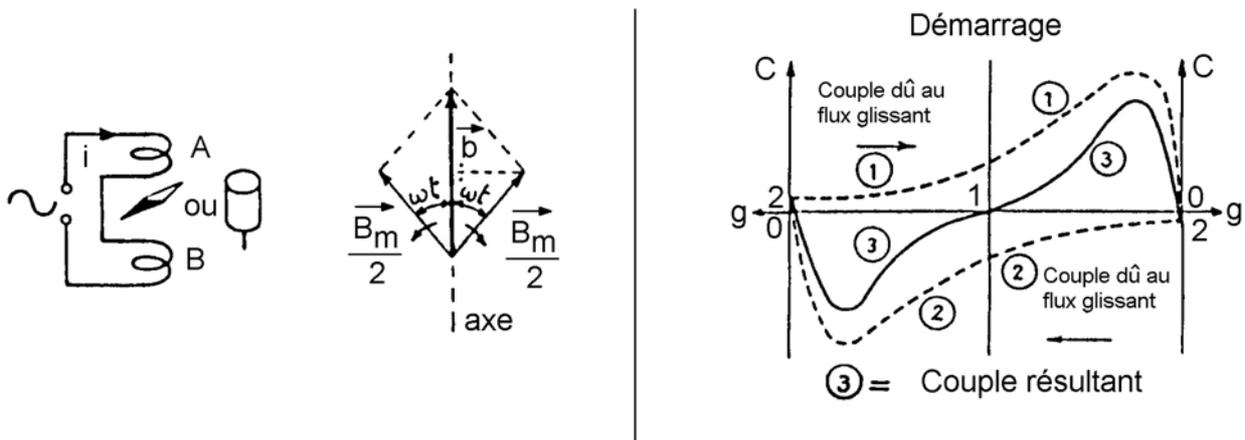


Figure 4 -1

Si l'on lance l'aiguille dans un sens, elle continue à tourner, le champ qui tourne dans le même sens que l'aiguille aimantée exerce alors un couple supérieur à l'autre. Il y a production d'un couple moteur.

**b) Démarrage des Moteurs asynchrones monophasés :****➤ Par lancement :**

Après la mise sous tension, on peut lancer le moteur à la main dans un sens ou dans l'autre. Le couple moteur résultant des deux couples inverses entretient la rotation dans le sens du lancement.

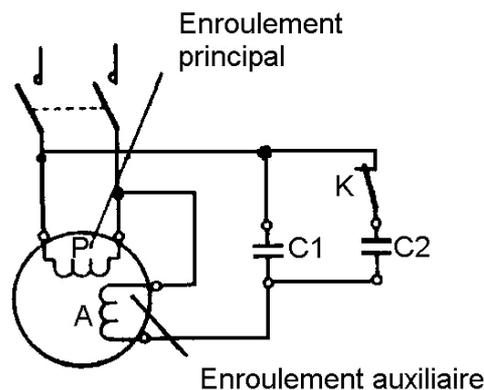
**➤ Par phase auxiliaire :**

On transforme le moteur monophasé en un moteur diphasé par l'adjonction d'un enroulement auxiliaire.

Cet enroulement auxiliaire est parcouru par un courant déphasé par rapport au courant qui circule dans l'enroulement principal.

Le déphasage entre les deux courants est réalisé par une capacité placée en série avec l'enroulement auxiliaire appelée condensateur de démarrage, ce condensateur est mis hors circuit, lorsque le moteur est à sa vitesse nominale.

Un condensateur appelé de marche peut être conservé en marche nominale et servir au relèvement du facteur de puissance du moteur. (figure 4 - 2).



C2 – condensateur qui permet d'améliorer le couple de démarrage, à la mise sous tension. Ce condensateur est mis hors circuit, lorsque le moteur est à sa vitesse nominale

Figure 4 -2

**c) Démarrage et démarreur :**

Démarrage semi-automatique par condensateur avec élimination de l'enroulement auxiliaire par un contact temporisé .

Démarrage semi-automatique par condensateur (voir figure 4 -3).

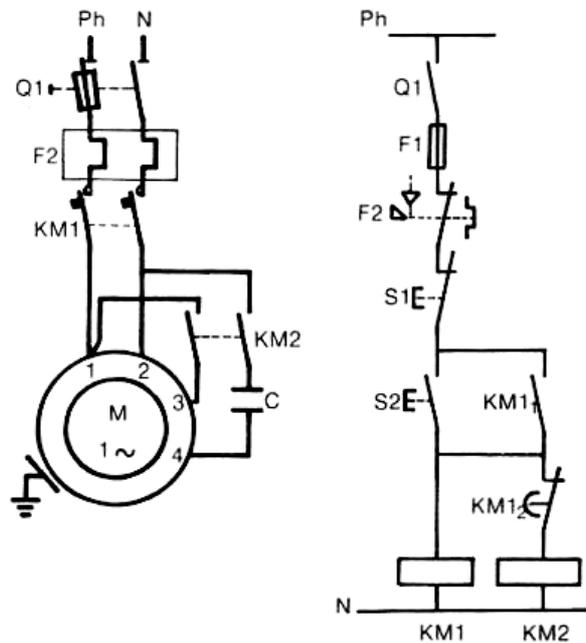


Figure 4 -3

1.2. :bornes enroulement principal.

3.4. :bornes enroulement auxiliaire

**d) Inversion du sens de rotation :**

Pour inverser le sens de rotation des Moteurs monophasés, on doit intervertir les bornes de l'enroulement principal ou de l'enroulement auxiliaire.

**e) Caractéristiques spécifiques :**

- **le couple de démarrage est nul :**

(voir figure 4-4).

Il est nécessaire d'utiliser des artifices de démarrage tels que : enroulement auxiliaire ou spire de déphasage.

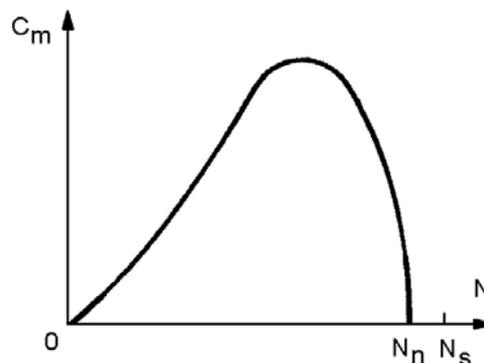


Figure 4-4

- **La vitesse** : comme en triphasé, elle dépend de la fréquence du réseau et du nombre de pôles.

$$n_s = \frac{60 \times f}{p}$$

Le glissement :  $g = \frac{n_s - n'}{n_s}$ , est plus élevé qu'en triphasé.

- **Tension d'alimentation** : (voir figure 4-5).

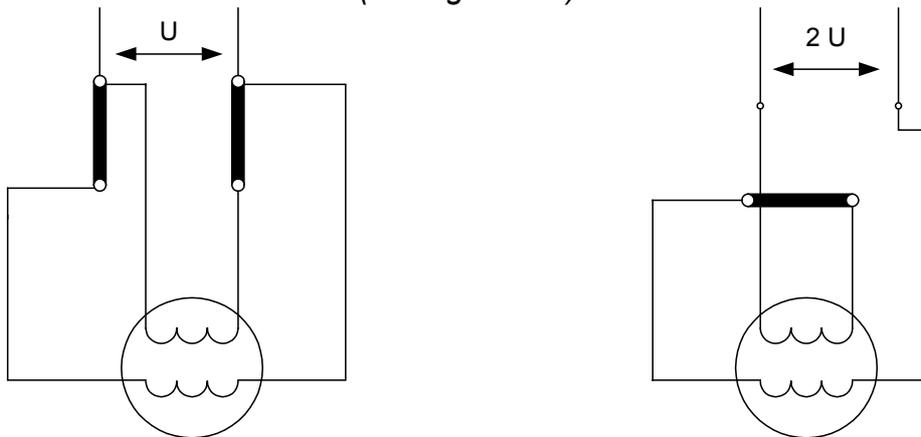


Figure 4-5

L'enroulement est réalisé en deux parties pouvant être couplés en série ou en parallèle pour une utilisation sous la tension  $U$  et la tension  $2U$ .

**Exemple :**

Enroulement en parallèle : 110V.

Enroulement en série 220V.

## V. Les procédures de vérification des moteurs asynchrones

### V.1. Vérification électrique

**Exemple :** Vérifications électriques des moteurs asynchrones triphasés à cage.

- Rupture du circuit stator

Pour découvrir la rupture, il faut «sonner» chaque phase du moteur séparément. Pour cela on débranche le moteur, on enlève les barrettes de la plaque à bornes, on repère les entrées et sorties de chaque phase, soit à l'aide d'un ohmmètre, soit à l'aide d'une source auxiliaire et un voltmètre. Si le voltmètre dévie la phase est bonne, s'il reste au zéro la phase est rompue (on peut aussi au lieu d'un voltmètre employer une lampe) (voir figure 5-1)

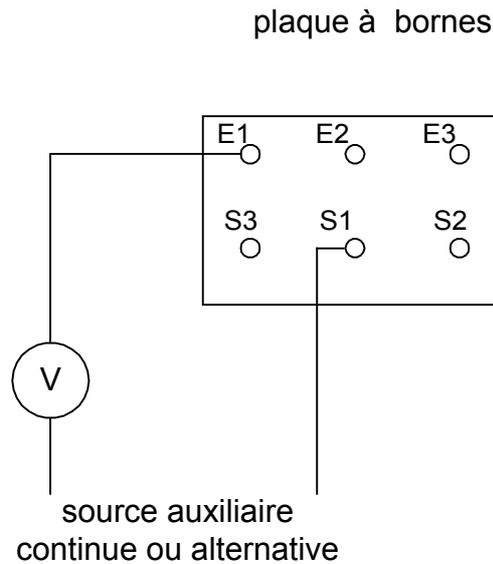


Figure 5-1

- Court-circuit entre phases du stator

*Il faut vérifier l'isolement entre phases. On débranche le moteur et on enlève les barrettes de la plaque à bornes.*

*En fermant le circuit d'un voltmètre par les entrées des phases l'aiguille doit rester au zéro. Si le voltmètre dévie, les deux phases touchées sont en court-circuit. (voir figure 5-2)*

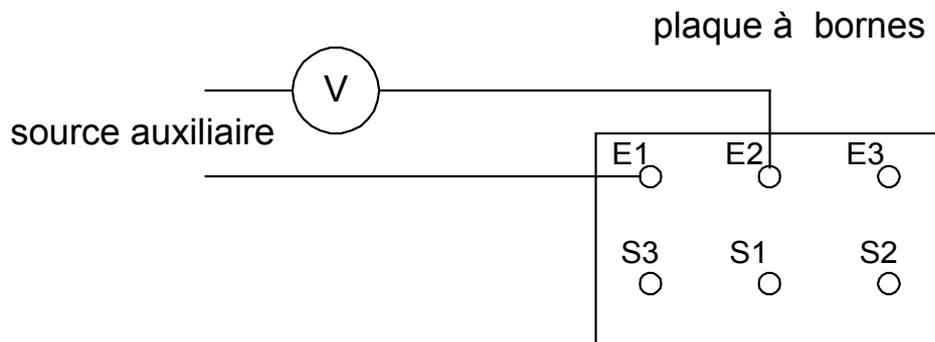


Figure 5-2

*Après  $E_1 E_2$ , on passe à  $E_1 E_3$  et ensuite  $E_2 E_3$ .*

- Bobinage du stator à la masse

*On débranche le moteur et on enlève les barrettes, on ferme le circuit du voltmètre par une phase et un boulon de la carcasse. Si le voltmètre dévie, la phase essayée est à la masse. (voir figure 5-3)*

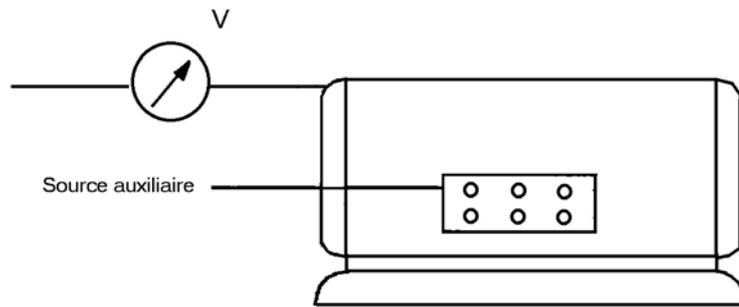


Figure 5-3

Pour déterminer le point de contact phase –masse, on suit la méthode suivante :

Avec une source à fort courant (batteries de voiture 12V par exemple), on alimente entre les enroulements et le fer, le circuit se ferme par le défaut. Le point avarie chauffe et fume et peut aussi être facilement cédé.

On peut aussi prendre comme source le réseau alternatif avec un transformateur de tension comprise entre 0 et 25 V. (voir figure 5-4)

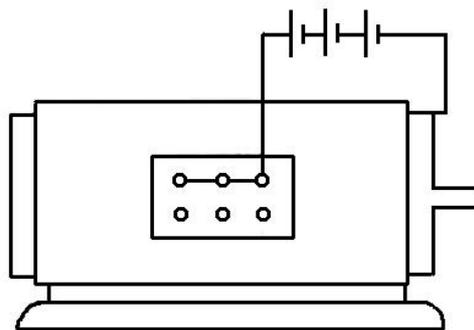


Figure 5-4

## V.2. Vérifications mécaniques

Avant de faire des vérifications d'ordre électrique, il faut vérifier les parties mécaniques, car souvent la cause de la panne est une défaillance d'un organe mécanique (paliers en mauvais état, rotor calé, entrefer inégal, frottement du rotor dans le stator, rotor déséquilibré, écrous desserrées, bagues de prise de courant usé ou mal propres, etc...)

- Vérifications des roulements et des coussinets
  - En essayant de faire tourner l'arbre de la machine à la main, si la rotation est difficile alors les roulements sont très serrés.
  - On fait bouger verticalement à la main l'arbre de la machine. S'il bouge, alors soit que le roulement ou l'arbre est usé. (voir figure 5-5)

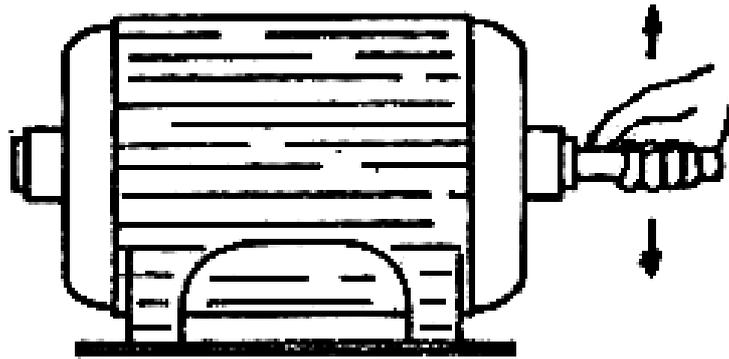


Figure 5-5

- Vérifications des paliers

Si on considère que les roulements sont en bon état et qu'on constate les anomalies telle que : rotor calé, frottement du rotor dans le stator, bruit ou sifflement pendant la marche de la machine, ce sont les paliers qui sont défectueux.

- Vérification du ventilateur :

Lors de la mise en marche de la machine, cette anomalie entraîne un bruit du côté capot de ventilation ce qui rend l'anomalie facile à déceler.

- Vérifications des liaisons mécaniques

Une liaison mécanique défectueuse peut amener au freinage de la machine. Prenons comme exemple : les tiges de montage ne sont pas bien serrées. Pour éviter des liaisons défectueuses, on doit faire un montage correct de la machine tout en serrant convenablement les écrous et les boulons d'assemblage des pièces mécaniques constituant la machine.

- Vérifications de la vitesse

La prise de vitesse peut se faire :

- Directement, par accès au bout de l'arbre;
  - Indirectement, sans possibilités de lier le dispositif de mesure à l'arbre de la machine.
- a) Pour la méthode directe on utilise généralement des tachymètres à main du type : mécanique, magnétique ou numérique.
  - b) Pour la méthode indirecte de la mesure de vitesse on utilise par exemple le dispositif à barrière photo-électrique.

**Les vérifications électriques du dispositif de commande :**

Exemple : Cas d'un équipement électromécanique (voir figure 5-6)

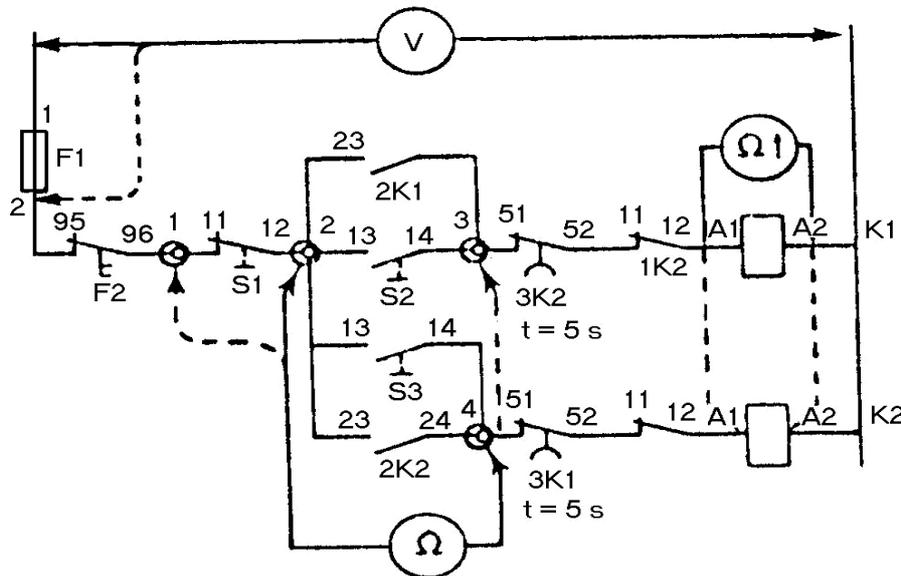


Figure 5-6

a) Hypothèses de pannes

- (1) Absence de tension d'alimentation ;
- (2) Coupure d'une bobine ;
- (3) Mauvais contact dans les capteurs ou contacts auxiliaires ;
- (4) Coupure d'une liaison électrique.

b) Vérifications à effectuer

Installation sous tension

- (1) Mesure de la tension à l'arrivée et après les fusibles (V).

Installation hors tension

- (2) Mesure de la résistance des bobines à l'ohmmètre ( $\Omega$ ) ;
- (3) et (4) Vérification de la continuité des circuits en utilisant les pointes-tests .

Vérifications du circuit de puissance : exemple : l'état des fusibles on utilise la lampe témoin. (voir figure 5-7)

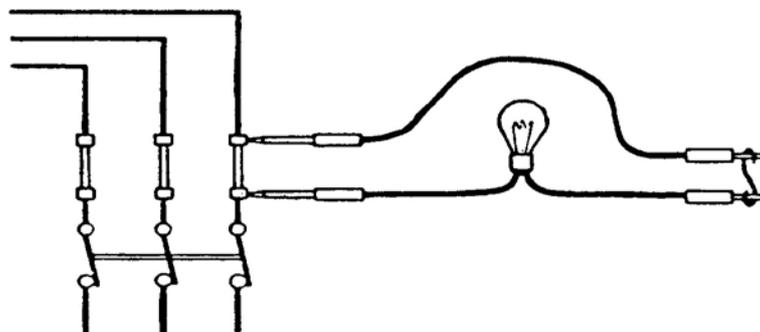


Figure 5-7

### **V.3. Diagnostic**

Le diagnostic est une phase importante de la maintenance corrective. De sa pertinence et de sa rapidité dépend l'efficacité de l'intervention entreprise.

- la détection qui décèle au moyen d'une surveillance accrue, continue ou non, l'apparition d'une défaillance ou l'existence d'un élément défaillant,
- la localisation qui conduit à rechercher précisément l' (les) élément (s) par (les) la défaillance se manifeste.

Le diagnostic permet de confirmer, de compléter ou de modifier les hypothèses faites sur l'origine et la cause des défaillances et de préciser les opérations de maintenance corrective nécessaires.

Les outils du diagnostic sont nombreux et diversifiés mais tous guident la réflexion de l'agent de maintenance suivant un cheminement logique et structuré.

La conduite d'un diagnostic nécessite un grand nombre d'informations saisies :

- auprès des utilisateurs du système,
- dans les documents des constructeurs,
- dans les documents du service technique,
- dans les documents des méthodes maintenance.

#### **Méthode générale de diagnostic**

##### ➤ INVENTAIRE DES HYPOTHESES

A partir de la défaillance d'un matériel dont :

- le mode de défaillance a été défini,
- et l'élément par lequel la défaillance se manifeste a été localisé,

le diagnostic doit identifier les causes probables de la défaillance.

La première démarche du diagnostic est d'envisager un certain nombre d'hypothèses qui sont autant de causes possibles.

L'efficacité du diagnostic doit conduire à hiérarchiser les hypothèses par rapport à deux grands critères :

- leur probabilité de se révéler vraies,
- la facilité de leur vérification.

##### ➤ VERIFICATION DES HYPOTHESES RETENUES

En les prenant dans l'ordre de leur classement chaque hypothèse doit être vérifiée suivant la méthode générale de la figure 5-8. L'enchaînement de ces vérifications jusqu'à la constatation d'un essai bon est représentatif de la méthode de diagnostic.

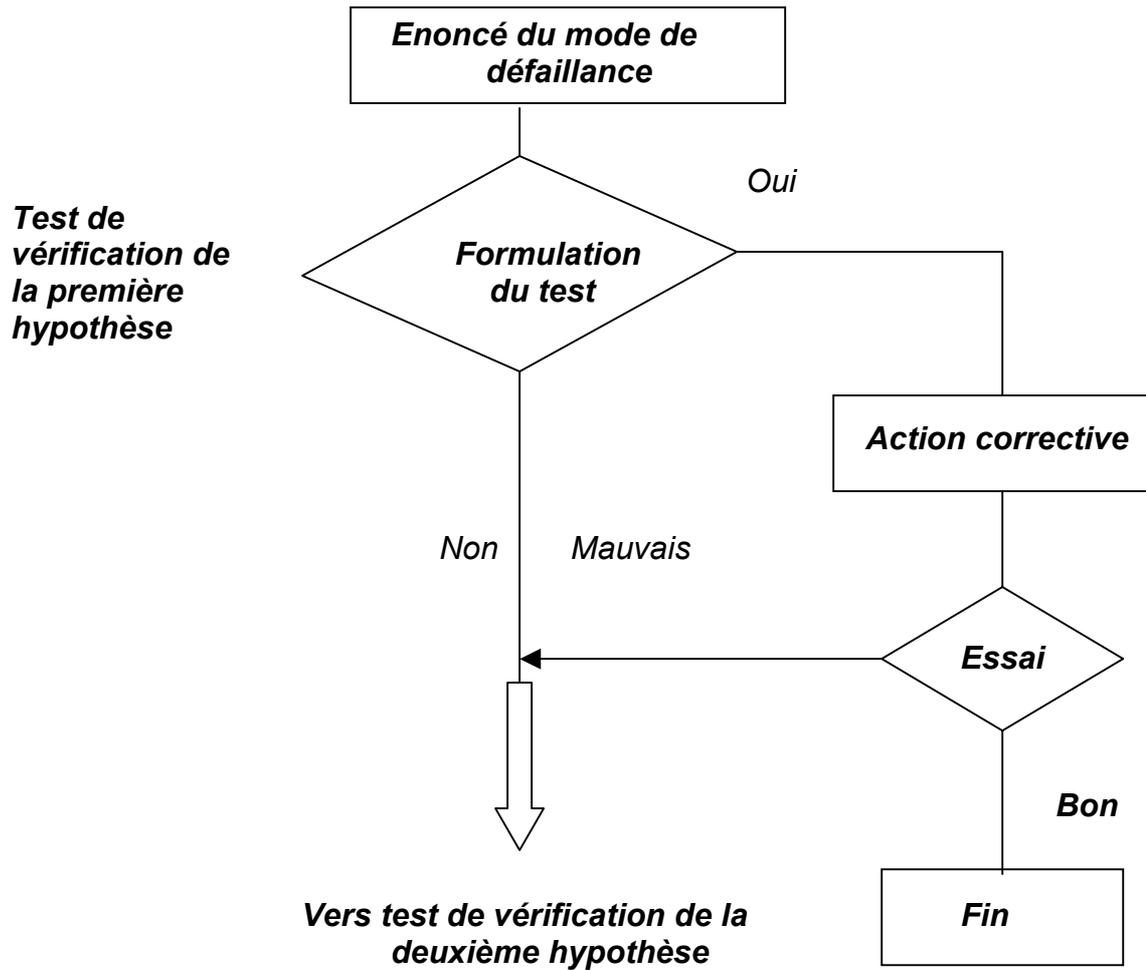


Figure 5-8 : Méthode de vérification d'une hypothèse.

***MODULE 16: INSTALLATION ET ENTRETIEN DES MACHINES A  
COURANT ALTERNATIF***

***GUIDE DE TRAVAUX PRATIQUES***

## TP1 - Transformateur monophasé

### 1. Objectif visé

Apprendre aux stagiaires les types et les moyens de mesure pour les essais des transformateurs monophasés.

### 2. Durée du TP

5 heures.

### 3. Equipements et matière d'œuvre par équipe

- Transformateur monophasé 220 V / 24 V ;
- Voltmètre CA ;
- Autotransformateur d'alimentation réglable ;
- Ampèremètre CA ;
- Wattmètre ;
- Conducteurs de branchement.

### 4. Déroulement du TP

#### A. Principes généraux

##### Essai à vide

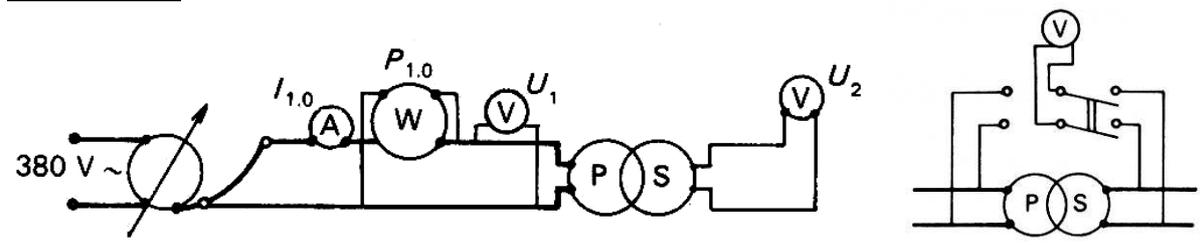


Fig. TP1-1

On mesure :

- $U_2$  pour  $U_1$  nominal à l'aide de deux voltmètres identiques ou successivement avec un seul voltmètre ;
- Au primaire :  $I_{1,0}$ ,  $P_{1,0}$ ,  $U_1$  ;
- Au secondaire :  $U_2$ .

Allure des courbes :

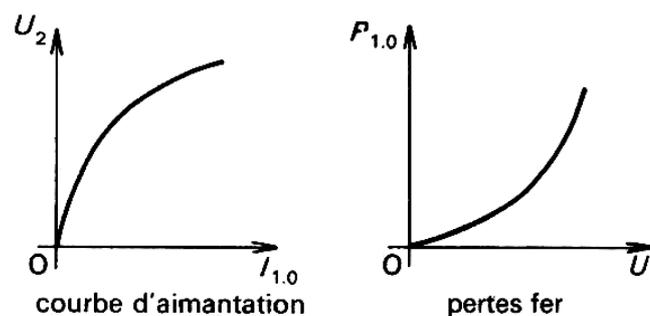


Fig. TP1-2

Essai en charge

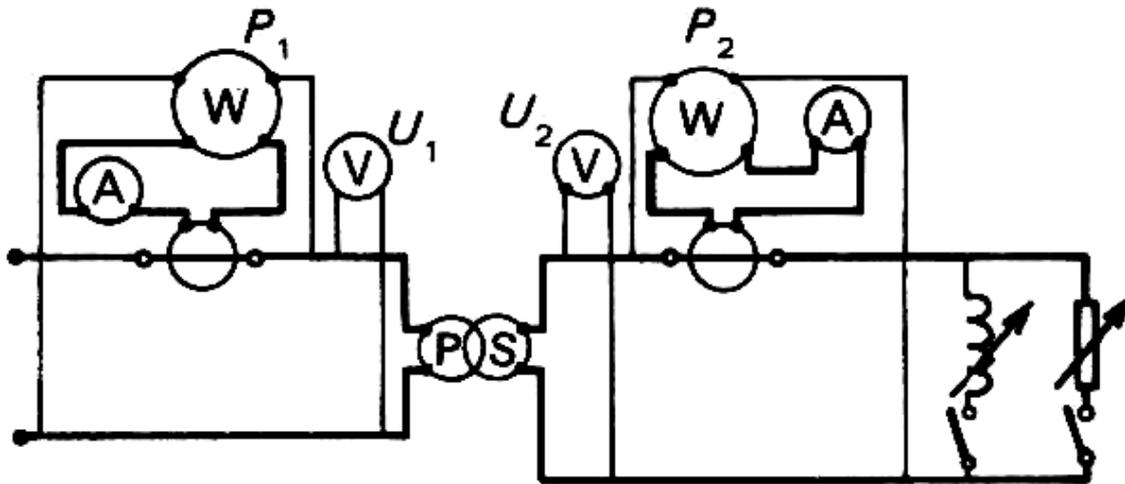


Fig. TP1-3

Déterminer par mesure directe :

- la chute de tension dans le transformateur  $\Delta U_2 = f(I_2)$  à  $\cos \varphi_2 = 1$  et à  $\cos \varphi_2 = 0,8$  inductif ;
- le rendement du transformateur pour diverses charges à  $\cos \varphi_2 = 1$  et à  $\cos \varphi_2 = 0,8$  inductif.

On mesure :  $U_1$ ,  $I_1$ ,  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $I_2$  et  $U_2$  pour diverses charges variant de 0 à 120%.

Allure des courbes  $U_2 = f(I_2)$  et  $\eta = f(P_2)$  pour  $\cos \varphi_2 = 1$  et  $\cos \varphi_2 = 0,8$  inductif :

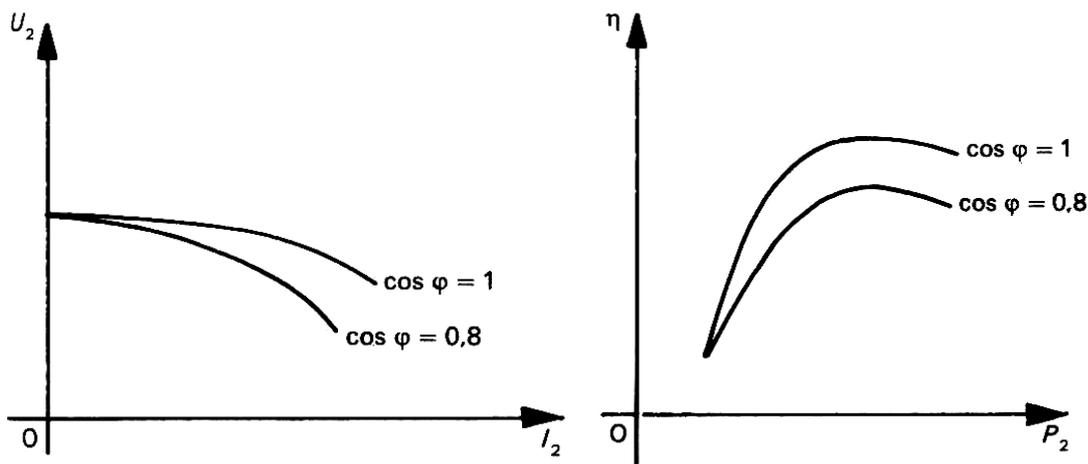


Fig. TP1-4

Chute de tension : C'est la différence entre la tension secondaire à vide  $U_{20}$  et la tension  $U_2$  en charge.

$$\Delta U_2 = m.U_1 - U_2 = U_{20} - U_2$$

Essai en court-circuit

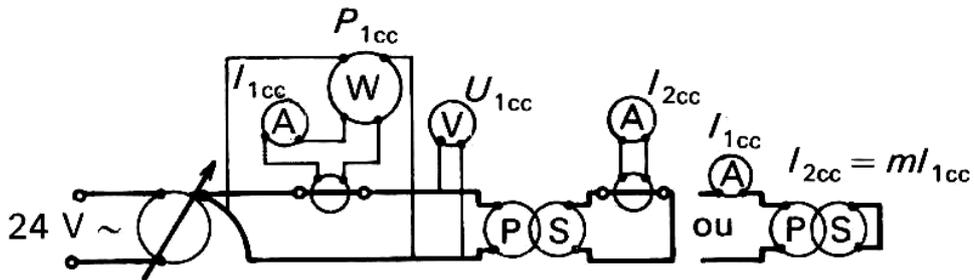


Fig. TP1-5

Il permet de tracer la courbe du courant de court-circuit  $I_{2cc}$  en fonction de la tension appliquée au primaire  $U_{1cc}$ .

Pour les gros transformateurs supérieurs à 1KVA :

$$U_{1cc} / U_{1n} \approx 5\%$$

Pour les petits et moyens transformateurs inférieurs à 1KVA :

$$U_{1cc} / U_{1n} \approx 10\%$$

Pour chaque valeur caractéristique de l'intensité de court-circuit, soit  $I_{2cc}$  égal à  $\frac{1}{4} I_2$ ,  $\frac{1}{2} I_2$ ,  $\frac{3}{4} I_2$  ou  $I_2$  on relève également la puissance absorbée au primaire  $P_{1cc}$ ; elle permet d'évaluer les pertes Joule dans les enroulements, car

$$P_{1cc} = R_1 \cdot I_{1cc}^2 + R_2 \cdot I_{2cc}^2 + \text{pertes fer}$$

Rendement par la méthode des pertes séparées

$$\eta = P_2 / (P_2 + \text{pertes}) = U_2 \cdot I_2 \cdot \cos \varphi / (U_2 \cdot I_2 \cdot \cos \varphi + \text{pertes})$$

**B. Essais pratiques**

Plaque signalétique du transformateur utilisé

$S = 70 \text{ VA}$  ; primaire 220 V ; secondaire 24 V ; fréquence 50 Hz

Essai à vide

Déterminer :

- le rapport de transformation  $m = U_2 / U_1$  ;
- la courbe d'alimentation  $U_2 = f(I_{10})$  ;
- les pertes à vide  $U_{1n} / 2$  et  $U_{1n}$

Tableau de relevés :

$U_1$ (V)	30	50	80	100	130	150	180	200	220
$U_2$ (V)									
$I_{10}$ (A)									

$P_{10}$ (W)									
--------------	--	--	--	--	--	--	--	--	--

Résultats et courbes :

- Rapport de transformation

$U_1$ (V)	30	50	80	100	130	150	180	200	220
$m$									

- Courbe d'aimantation  $U_{20} = f(I_{10})$
- Courbe de pertes fer  $P_{10} = f(I_{10})$

Essai en charge

Déterminer :

- La courbe  $U_2 = f(I_2)$  pour  $\cos \varphi_2 = 1$  et  $\cos \varphi_2 = 0,8$  inductif
- La courbe  $\eta = f(P_2)$  pour  $\cos \varphi_2 = 1$  et  $\cos \varphi_2 = 0,8$  inductif

Tableau de relevés :

$U_1$ (V)	$U_2$ (V)	$I_1$ (A)	$I_2$ (A)	$P_1$ (W)	$P_2$ (W)	$\cos \varphi_2 = P/S$	$\eta = P_2/P_1$

Application

- Déduire des résultats précédents la valeur du rendement du transformateur pour une valeur quelconque du courant  $I_2$  lorsqu'il débite sur un circuit à  $\cos \varphi_2 = 1$ . Mesurer les résistances des enroulements primaire  $R_1$  et secondaire  $R_2$  à l'aide d'un multimètre et d'un pont de Wheatstone.
- Tableau des résultats de mesure des résistances

Résistance	Multimètre	Pont de Wheatstone
$R_1$		
$R_2$		

- Calcul du rendement

$$\eta = P_2 / (P_2 + P_{j1} + P_{j2} + P_f)$$

où :

- pour une valeur choisie du courant secondaire  $I_2$  dans le tableau ci-dessus on détermine la valeur appropriée de la puissance  $P_2$  ;
- les pertes Joule sont calculées par des relations :  $P_{j1} = R_1 \cdot I_1^2$  et  $P_{j2} = R_2 \cdot I_2^2$  ;
- les pertes fer  $P_f = P_{10}$  sont mesurées en régime à vide ;
- comparer les résultats avec ceux obtenus en mesure.

## TP2 - Transformateur triphasé – couplages du primaire et du secondaire

### 1. Objectif visé

Apprendre aux stagiaires à reconnaître les différents couplages des enroulements pour le primaire et pour le secondaire.

### 2. Durée du TP

4 heures.

### 3. Equipements et matière d'œuvre par équipe

- Transformateur triphasé avec possibilité de différents branchements des enroulements) ;
- Voltmètre CA ;
- Autotransformateur triphasé d'alimentation réglable ;
- Ampèremètre CA ;
- Conducteurs de branchement.

### 4. Déroulement du TP

- Mesurer les tensions et les courants spécifiques pour les différents types de couplage :
  - Couplage « Etoile – Etoile » ;
  - Couplage « Triangle – Triangle » ;
  - Couplage « Etoile – Triangle » ;
  - Couplage « Triangle – Etoile ».

Tableau des résultats

Couplage	$U_{1n}$ (V)	$U_{2n}$ (V)	$I_{1n}$ (A)	$I_{2n}$ (A)
<b>Y - y</b>				
<b>D - d</b>				
<b>Y - d</b>				
<b>D - y</b>				

- Calculer la valeur de la puissance apparente à partir des valeurs mesurées des tensions et des courants pour tous les types de couplage. Conclusions.

Couplage	$S_1$ (VA)	$S_2$ (VA)
<b>Y - y</b>		
<b>D - d</b>		
<b>Y - d</b>		
<b>D - y</b>		

## TP3 - démarrage direct d'un moteur asynchrone triphasé à cage

### 1. Objectif visé

Pour les moteurs de faible puissance les courants de démarrage sont supportables par le réseau de distribution de l'énergie électrique. Les stagiaires peuvent apprendre les principes de base de constitution des circuits de puissance et de commande.

### 2. Durée du TP

6 heures.

### 3. Matériels (Equipements et matière d'œuvre) par équipe:

- Moteur asynchrone triphasé à cage
- Contacteurs tripolaires
- Relais de protection thermique
- Boutons-poussoir
- Conducteurs isolés 1,5 mm<sup>2</sup>
- Conducteurs isolés 2,5 mm<sup>2</sup>

### 4. Déroulement du TP

- Démarrage direct semi-automatique, un sens de marche

#### Schéma du circuit de puissance

L1, L2, L3 : arrivée du réseau triphasé

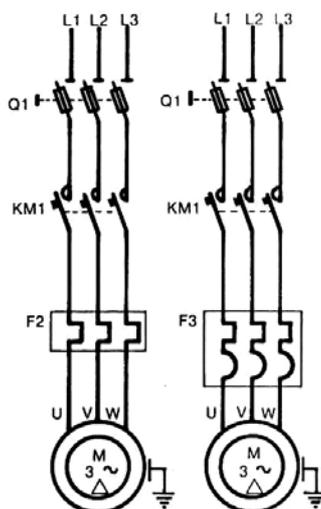
Q1 : sectionneur porte-fusibles tripolaire équipé avec 2 contacts à fermeture

KM1 : contacteur tripolaire

F2 : relais de protection thermique

F3 : relais de protection magnéto-thermique

M3 ~ Δ : moteur asynchrone triphasé à cage avec les enroulements statoriques couplés en triangle



**Schéma du circuit de commande**

*L1, L3 : arrivée du réseau triphasé*

*Q1 : sectionneur porte-fusibles tripolaire équipé avec 2 contacts à fermeture*

*KM1 : contacteur tripolaire*

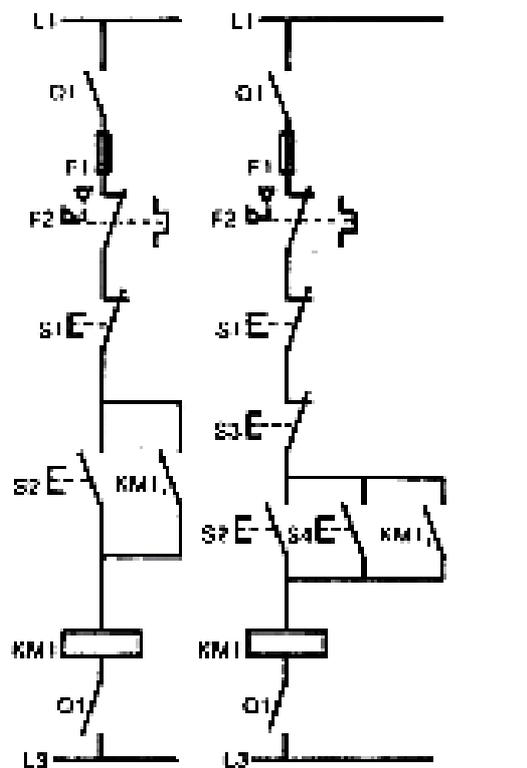
*F2 : relais de protection thermique*

*F1 : fusible*

*S1, S3 : boutons-poussoirs arrêt*

*S2, S4 : boutons-poussoirs marche*

*Le circuit de commande est protégé par le fusible F1 et isolé de toute alimentation par le sectionneur Q1.*



1 poste de commande

2 postes de commande

- **Démarrage direct semi-automatique, deux sens de marche**

**Schéma du circuit de puissance**

*L1, L2, L3 : arrivée du réseau triphasé*

*Q1 : sectionneur porte-fusibles tripolaire équipé avec 2 contacts à fermeture*

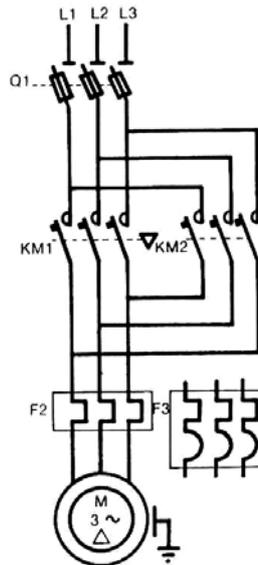
*KM1, KM2 : contacteurs tripolaires*

*F2 : relais de protection thermique*

*F3 : relais de protection magnéto-thermique*

*M3 ~ Δ : moteur asynchrone triphasé à cage avec les enroulements statoriques couplés en triangle*

*L'inversion du sens de marche est obtenue par le croisement de deux fils de phase: L1 et L3 sont inversés.*



**Schéma du circuit de commande**

L1, L3 : arrivée du réseau triphasé

Q1 : sectionneur porte-fusibles tripolaire équipé avec 2 contacts à fermeture

KM1, KM2 : contacteurs tripolaires

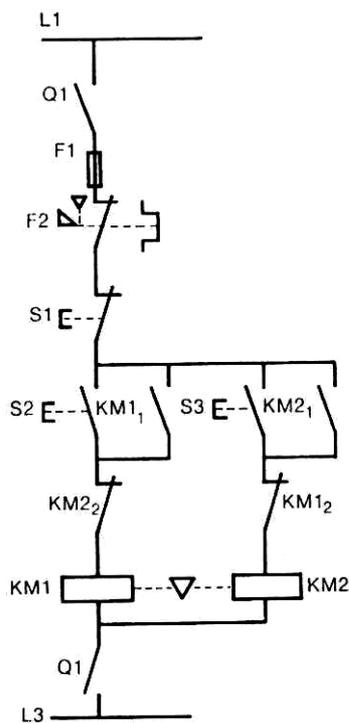
F2 : relais de protection thermique

F1 : fusible

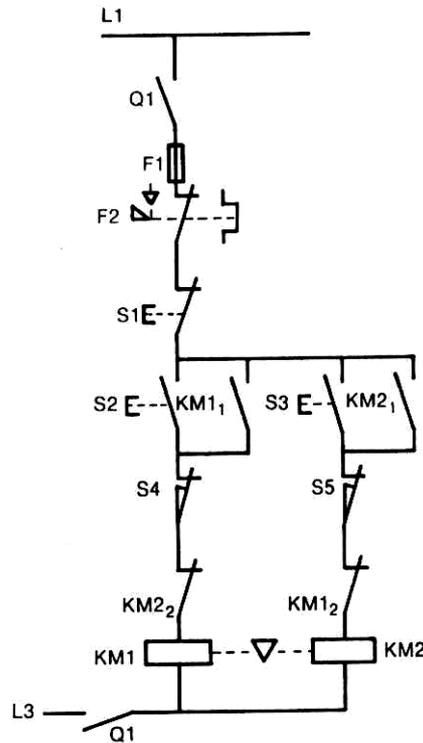
S1 : bouton-poussoir arrêt

S2, S3 : boutons-poussoirs marche

S4, S5 : interrupteurs de position, contact à ouverture



1 poste de commande



1 poste de commande et contacts de fin de course

*Le circuit avec un poste de commande est équipé avec trois boutons-poussoirs:*  
*S1 : bouton-poussoir "ARRET"*  
*S2 : bouton-poussoir "MARCHE AVANT"*  
*S3 : bouton-poussoir "MARCHE ARRIERE"*

*Les contacts à ouverture  $KM1_2$  et  $KM2_2$  assurent le verrouillage électrique des deux sens de marche.*

*Le circuit avec un poste de commande et des contacts de fin de course est utilisé si l'inversion du sens de marche du moteur se traduit par l'inversion du sens de déplacement d'un mobile (par exemple: déplacement vers la gauche ou la droite d'une table de machine-outil).*

*Il est nécessaire de prévoir des interrupteurs de position qui provoquent l'arrêt automatique du moteur dès qu'ils sont actionnés.*

*Ils se branchent toujours en série sur la bobine du contacteur à commander : si  $KM1$  est le contacteur de marche avant,  $S4$  est le fin de course avant et  $S5$  le fin de course arrière.*

## TP4 - Démarrage étoile-triangle d'un moteur asynchrone triphasé à cage

### 1. Objectif visé

Les stagiaires doivent apprendre les principes de base de constitution des circuits de puissance et de commande pour le procédé de démarrage étoile-triangle.

### 2. Durée du TP

6 heures

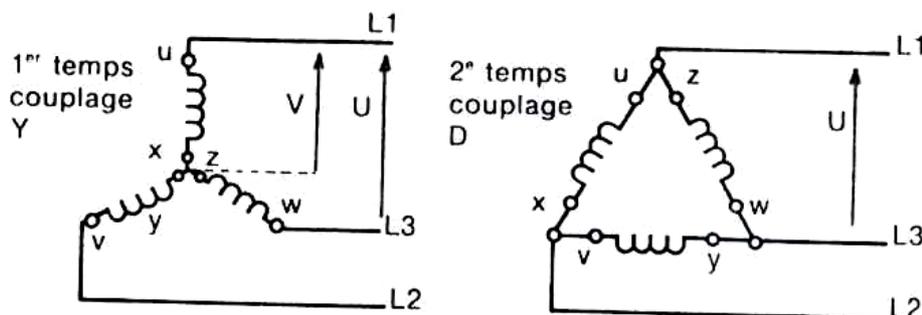
### 3. Matériels (Equipements et matière d'œuvre) par équipe:

- Moteur asynchrone triphasé à cage (380 V/ 660 V) pour le réseau 220V/380V
- Contacteurs tripolaires
- Blocs de contacts temporisés
- Blocs de contacts instantanés
- Relais de protection thermique
- Boutons-poussoir
- Conducteurs isolés 1,5 mm<sup>2</sup>
- Conducteurs isolés 2,5 mm<sup>2</sup>

### 4. Description du TP

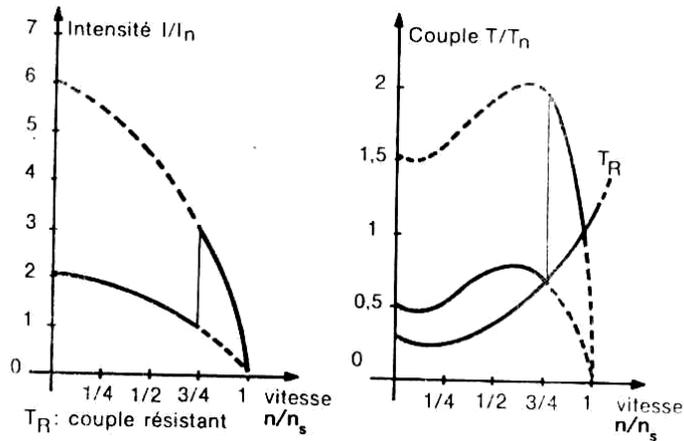
Ce procédé est basé sur le rapport des grandeurs entre la tension simple  $V$  et la tension composée d'un réseau triphasé de distribution  $U = V \sqrt{3}$ .

Dans un premier temps, la tension appliquée à chacun des enroulements du moteur couplé en ETOILE ( $Y$ ) est une **tension simple**. A l'issue de ce premier temps, au couplage ETOILE est substitué le couplage TRIANGLE ( $D$ ) dans lequel est appliquée à chacun des enroulements la **tension composée**.



Couplage dans le temps

La tension réduite dans le rapport  $\sqrt{3}$  qui est appliquée au moteur dans le premier temps du démarrage entraîne une réduction du tiers des grandeurs Couple et Intensité par rapport au démarrage direct.



a)  $I = f(n)$ ;                      b)  $T = f(n)$   
Caractéristiques techniques

## 5. Déroulement du TP

### • Démarrage semi-automatique, un sens de marche

#### Schéma du circuit de puissance

L1, L2, L3 : arrivée du réseau triphasé

Q1 : sectionneur porte-fusibles tripolaire équipé avec 2 contacts à fermeture

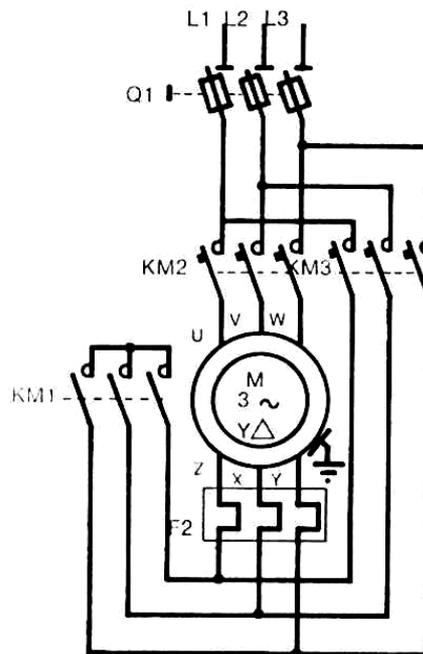
KM1 : contacteur tripolaire, couplage « étoile »

KM2 : contacteur tripolaire de ligne

KM3 : contacteur tripolaire, couplage « triangle »

F2 : relais de protection thermique

M3 ~  $\Delta$  : moteur asynchrone triphasé à cage 380 V/660 V si on a un réseau 220V/380 V



### Schéma du circuit de commande

L1, L3 : arrivée du réseau triphasé

Q1 : sectionneur porte-fusibles tripolaire équipé avec 2 contacts à fermeture

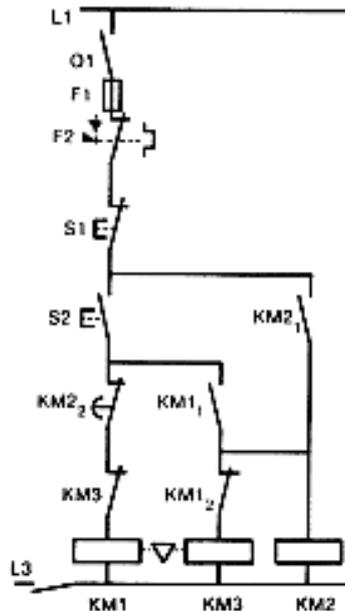
F2 : relais de protection thermique

F1 : fusible

S1 : boutons-poussoirs arrêt

S2 : boutons-poussoirs marche

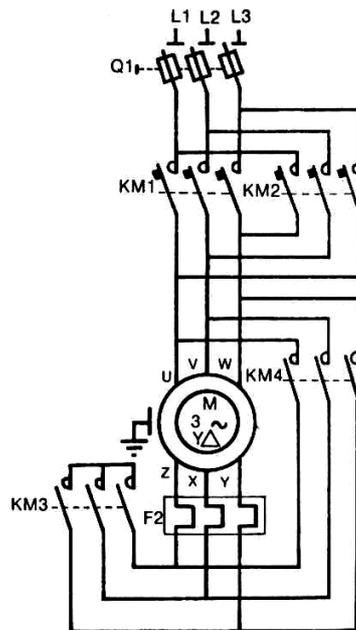
Le circuit de commande est protégé par le fusible F1 et isolé de toute alimentation par le sectionneur Q1.



Au contacteur KM2 est associé un bloc temporisation disposant d'un contact à ouverture.

- **Démarrage semi-automatique, deux sens de marche**

### Schéma du circuit de puissance

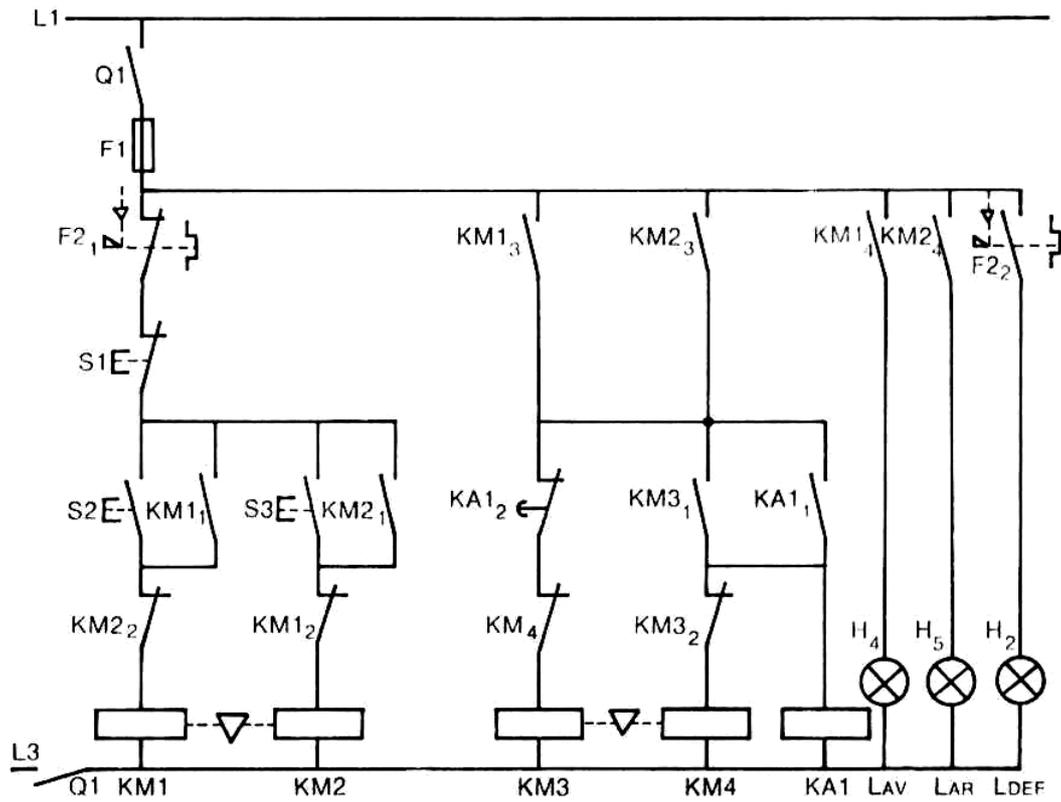


L'inversion du sens de marche est obtenue par le croisement de deux fils de phase: L1 et L3 sont inversés.

### Schéma du circuit de commande

H : lampes de signalisation :

- H4 : signalisation fonctionnement en marche avant
- H5 : signalisation fonctionnement en marche arrière
- H2 : signalisation présence de défaut (surcharge)
- KA1 : relais auxiliaire temporisé (ou contacteur sur lequel on met un bloc de contacts temporisés)



## TP5 - démarrage par élimination de résistances statoriques d'un moteur asynchrone triphasé à cage

### 1. Objectif visé

La tension réduite d'alimentation, nécessaire pour limiter l'intensité de décollage, est obtenue par insertion dans chacune des phases du stator d'une ou plusieurs résistances.

### 2. Durée du TP

6 heures.

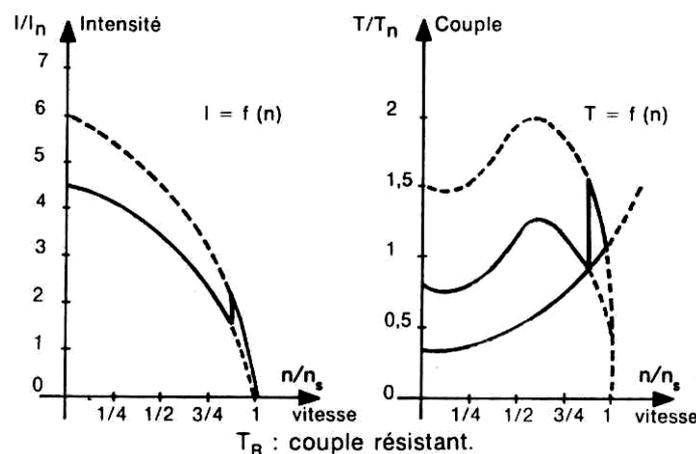
### 3. Matériels (Equipements et matière d'œuvre) par équipe:

- Moteur asynchrone triphasé à cage
- Contacteurs tripolaires
- Blocs de contacts temporisés
- Blocs de contacts instantanés
- Relais de protection thermique
- Boutons-poussoir
- Conducteurs isolés 1,5 mm<sup>2</sup>
- Conducteurs isolés 2,5 mm<sup>2</sup>

### 4. Description du TP

Le démarrage s'effectue en deux temps. C'est le mode de couplage des résistances avec les enroulements qui assure la diminution de l'intensité de démarrage. Quand le moteur a atteint environ les 80% de sa vitesse nominale, les résistances sont court-circuitées et le stator est alimenté par la pleine tension.

Les caractéristiques techniques sont déterminées par rapport au démarrage direct



a)  $I = f(n)$ ;

b)  $T = f(n)$

Caractéristiques techniques

## 5. Déroulement du TP

### • Démarrage semi-automatique, un sens de marche

#### Schéma du circuit de puissance

L1, L2, L3 : arrivée du réseau triphasé

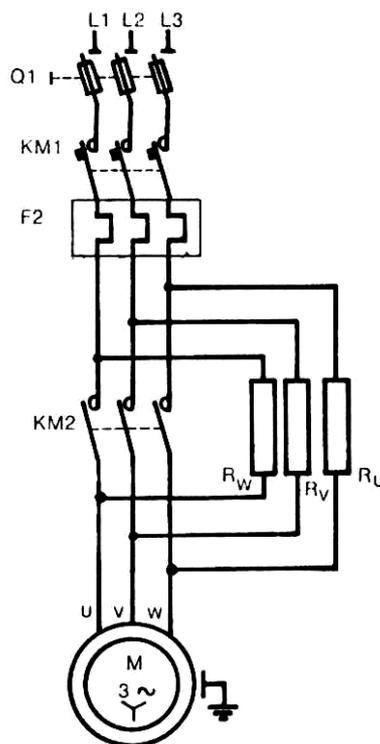
Q1 : sectionneur porte-fusibles tripolaire équipé avec 2 contacts à fermeture

KM1 : contacteur tripolaire de ligne,

KM2 : contacteur tripolaire court-circuitage des résistances

F2 : relais de protection thermique

M3 ~ Δ : moteur asynchrone triphasé à cage



Le circuit de puissance est protégé contre les courts-circuits par les fusibles du type aM intégrés au sectionneur tripolaire et contre les surintensités par le relais thermique dont le calibre est égal à  $I_n$ .

#### Schéma du circuit de commande

L1, L3 : arrivée du réseau triphasé

Q1 : sectionneur porte-fusibles tripolaire équipé avec 2 contacts à fermeture

KM1 : contacteur tripolaire de ligne

KM2 : contacteur tripolaire court-circuitage des résistances

KA1 : relais auxiliaire temporisé (ou contacteur sur lequel on met un bloc de contacts temporisés)

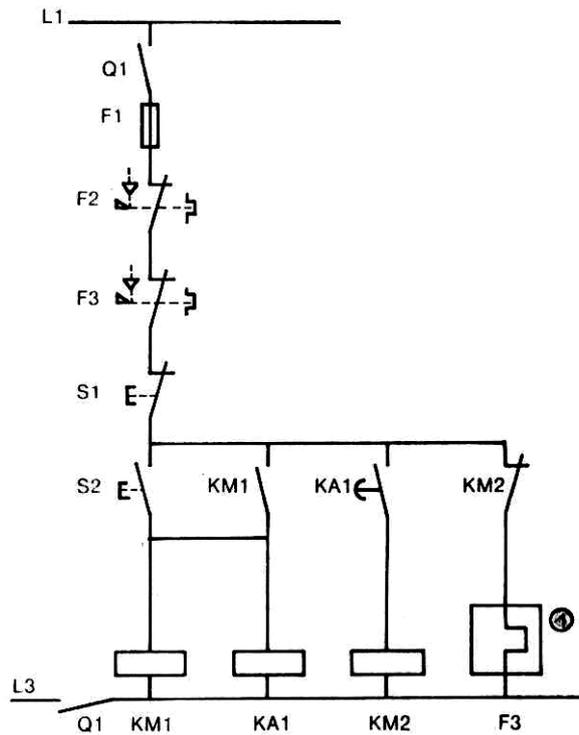
F2 : relais de protection thermique

F3 : relais de protection thermique (facultatif, pour la protection des résistances contre les démarrages trop fréquents ou incomplets)

F1 : fusible

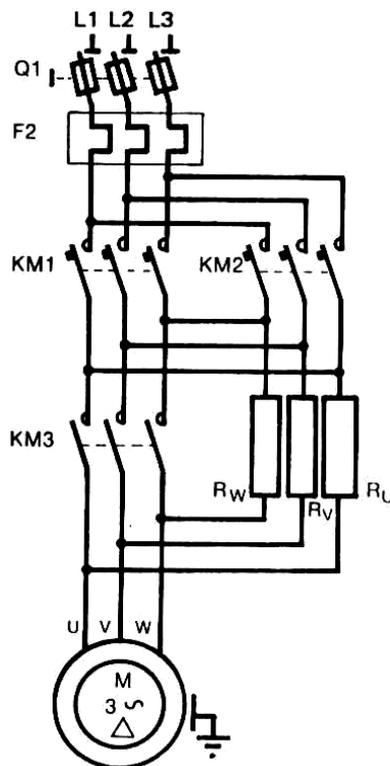
S1 : boutons-poussoirs arrêt

S2 : boutons-poussoirs marche



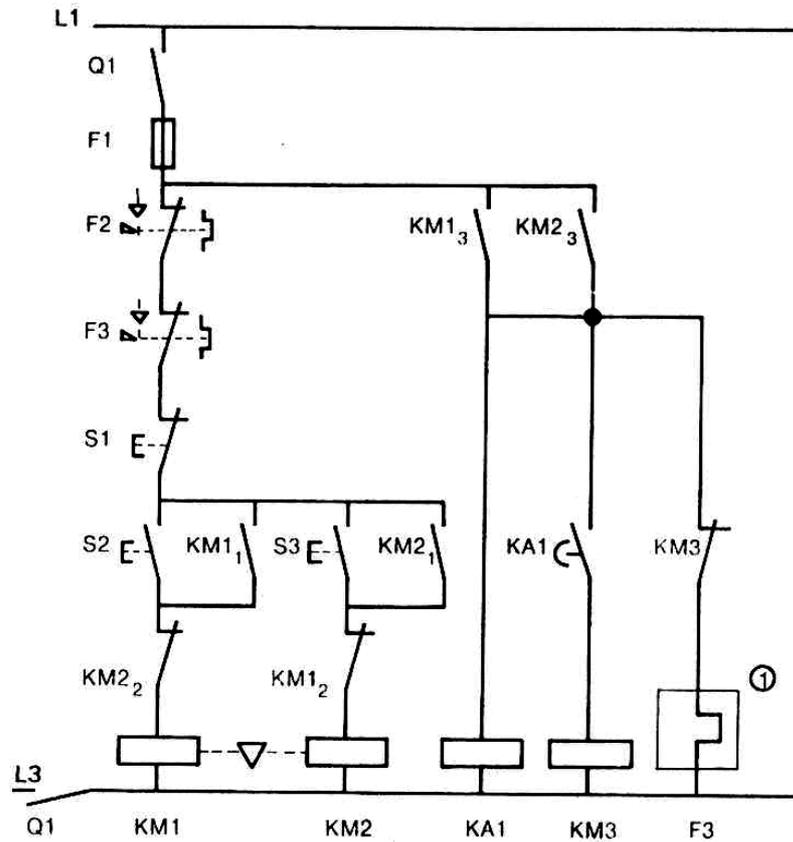
• Démarrage semi-automatique, deux sens de marche

Schéma du circuit de puissance



L'inversion du sens de marche est obtenue par le croisement de deux fils de phase: L1 et L3 sont inversés.

Schéma du circuit de commande



## TP6 - démarrage par auto - transformateur d'un moteur asynchrone triphasé à cage

### 1. Objectif visé

Un moteur, alimenté par un auto-transformateur n'est jamais séparé du réseau d'alimentation et tous les phénomènes transitoires sont supprimés.

### 2. Durée du TP

4 heures.

### 3. Matériels (Equipements et matière d'œuvre) par équipe:

- Moteur asynchrone triphasé à cage
- Auto-transformateur
- Contacteurs tripolaires
- Blocs de contacts temporisés
- Blocs de contacts instantanés
- Relais de protection magnéto-thermique
- Boutons-poussoir
- Conducteurs isolés 1,5 mm<sup>2</sup>
- Conducteurs isolés 2,5 mm<sup>2</sup>

### 4. Description du TP

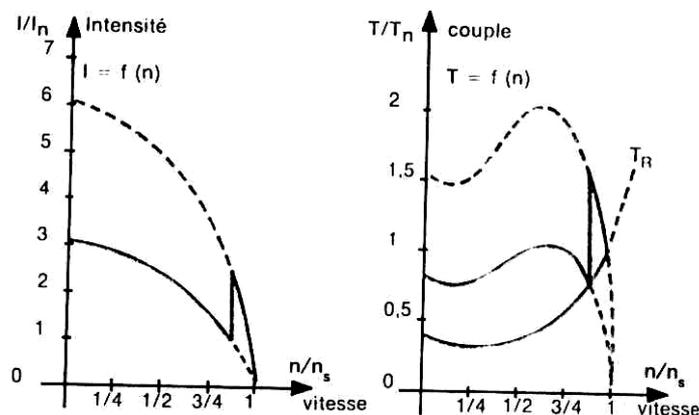
Dans ce procédé de démarrage se fait en trois temps :

Au cours du premier temps, le moteur est alimenté par la tension secondaire de l'auto - transformateur de rapport de transformation  $m < 1$ .

Dans le second temps, le moteur est alimenté par l'intermédiaire d'une portion des enroulements de l'auto – transformateur (chute de tension inductive).

Au dernier temps, l'auto – transformateur est totalement déconnecté, le moteur est alimenté sous pleine tension.

Les caractéristiques techniques sont déterminées par rapport au démarrage direct



a)  $I = f(n)$ ;

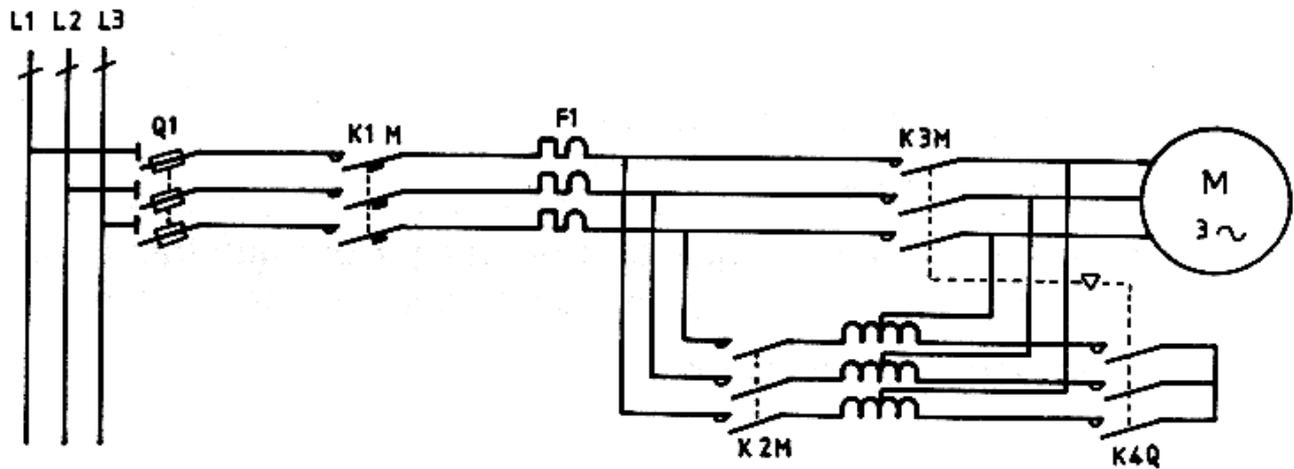
b)  $T = f(n)$

Caractéristiques techniques

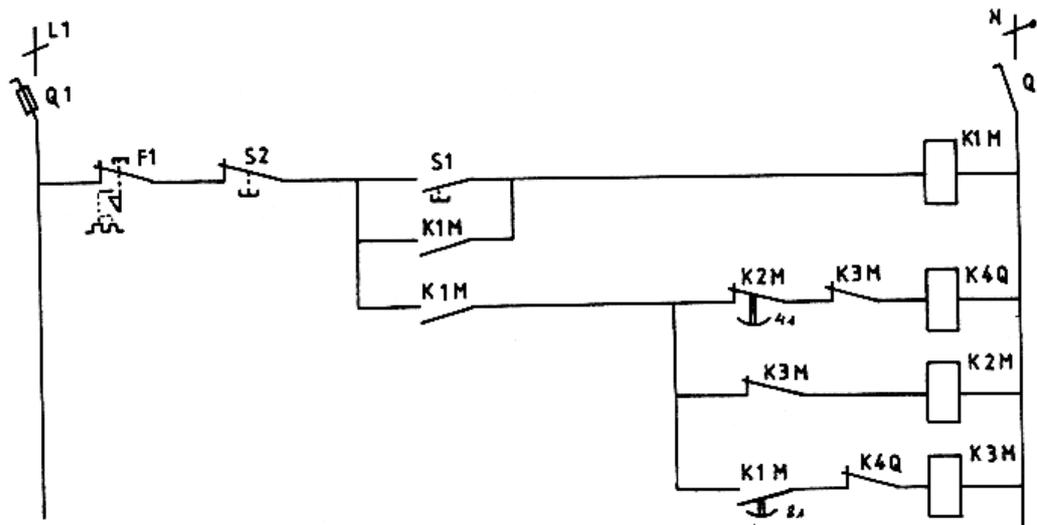
## 5. Déroulement du TP

### • Démarrage semi-automatique, un sens de marche

#### Schéma du circuit de puissance



#### Schéma développé du circuit de commande



#### Légende :

- Q1 : fusible sectionneur
- F1 : relais magnéto-thermique
- S1 : bouton poussoir marche
- S2 : bouton poussoir arrêt
- K1M : discontacteur principal
- K2M : contacteur autotransformateur
- K3M : contacteur 3<sup>e</sup> temps
- K4M : contacteur étoile
- T1 : Autotransformateur
- M : moteur asynchrone triphasé à cage

## TP7 - démarrage par élimination des résistances rotoriques d'un moteur asynchrone triphasé à rotor bobine

### 1. Objectifs visés

Utiliser le moteur à rotor bobiné avec les résistances de démarrage

### 2. Durée du TP

6 heures.

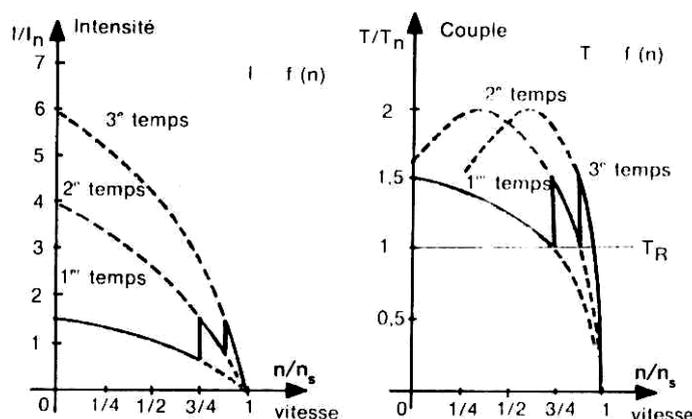
### 3. Matériels (Equipements et matière d'œuvre) par équipe:

- Moteur asynchrone triphasé à rotor bobiné
- Résistances de démarrage
- Contacteurs tripolaires
- Blocs de contacts temporisés
- Blocs de contacts instantanés
- Relais de protection thermique
- Boutons-poussoir
- Conducteurs isolés 1,5 mm<sup>2</sup>
- Conducteurs isolés 2,5 mm<sup>2</sup>

### 4. Description du TP

Le stator du moteur étant alimenté directement par le réseau (pleine tension), les résistances insérées en série dans le circuit rotorique sont progressivement éliminées (court – circuitage) au fur et à mesure de la montée en vitesse du moteur.

Les caractéristiques techniques sont rigoureusement définies par les valeurs successives de la résistance rotorique. Il est important de noter que pour un couple donné, la vitesse est d'autant plus faible que la résistance est élevée. Le courant varie sensiblement de la même façon que le couple.



Caractéristiques techniques

a)  $I = f(n)$ ; b)

$T = f(n)$

5. Déroulement du TP

- Démarrage semi-automatique, un sens de marche

**Schéma du circuit de puissance**

L1, L2, L3 : arrivée du réseau triphasé

Q1 : sectionneur porte-fusibles tripolaire équipé avec 2 contacts à fermeture

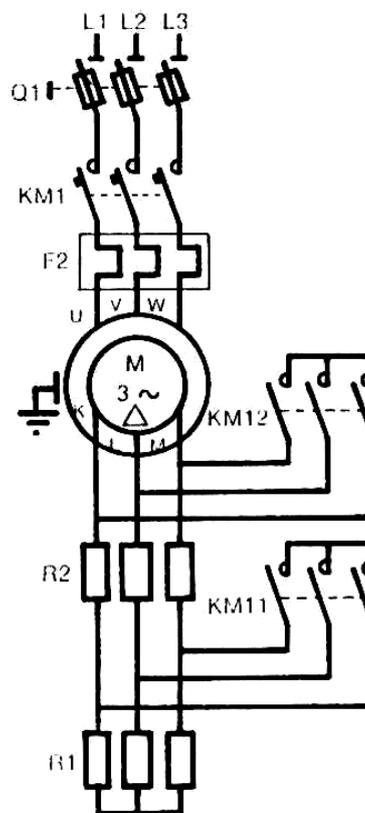
KM1 : contacteur tripolaire de ligne,

KM11 : contacteur tripolaire de fin de premier temps

KM12 : contacteur tripolaire de fin de second temps,

F2 : relais de protection thermique

M3 ~ Δ : moteur asynchrone triphasé à rotor bobiné

**Schéma du circuit de commande**

F3 : relais de protection thermique à un contact à ouverture (facultatif, assure la protection des résistances contre les démarrages trop fréquents ou incomplets)

KA1 : relais auxiliaire temporisé (ou contacteur sur lequel on met un bloc de contacts temporisés)

KA2 : relais auxiliaire temporisé (ou contacteur sur lequel on met un bloc de contacts temporisés)

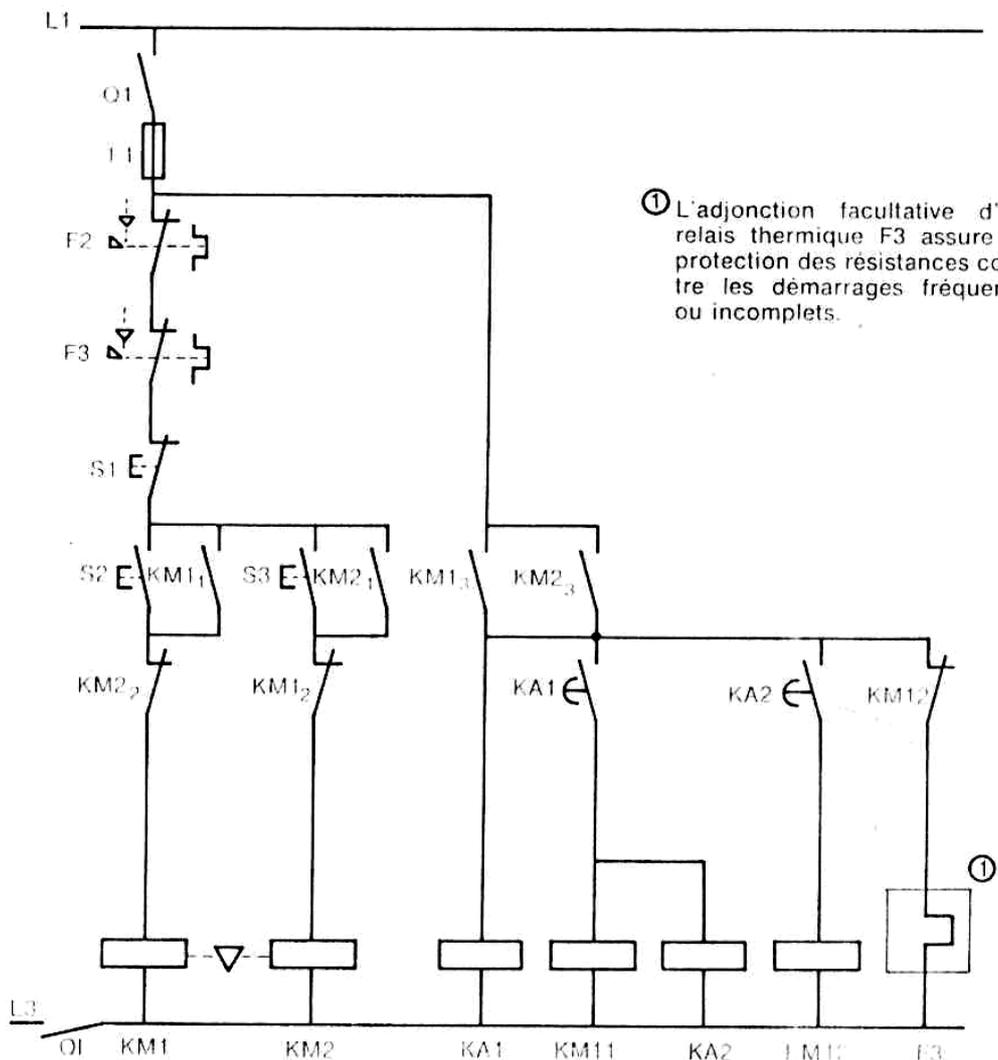
F1 : fusible

S1 : boutons-poussoirs arrêt

S2 : boutons-poussoirs marche



Schéma du circuit de commande



## TP8 - freinage par injection de courant continu d'un moteur asynchrone triphasé

### 1. Objectifs visés

Les stagiaires doivent apprendre à appliquer ce type de freinage

### 2. Durée du TP

6 heures.

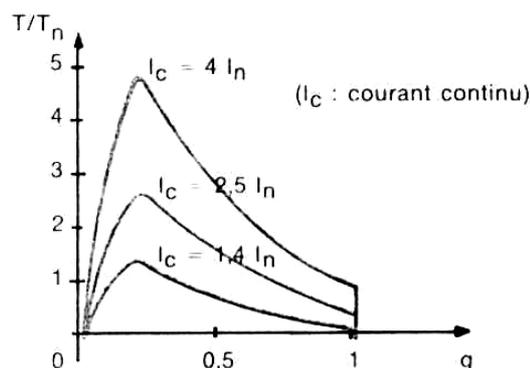
### 3. Matériels (Equipements et matière d'œuvre) par équipe:

- Moteur asynchrone triphasé à cage
- transformateur
- Contacteurs tripolaires
- Diodes de redressement
- Contact centrifuge
- Blocs de contacts instantanés
- Relais de protection thermique
- Boutons-poussoir
- Conducteurs isolés 1,5 mm<sup>2</sup>
- Conducteurs isolés 2,5 mm<sup>2</sup>

### 4. Description du TP

Ce procédé consiste, après avoir déconnecté le moteur du réseau d'alimentation, à brancher sur deux bornes du stator une source de courant continu très basse tension (20 à 24 V).

Ainsi, le moteur entraîné en sens inverse du sens par le couple de freinage tend à freiner le mouvement



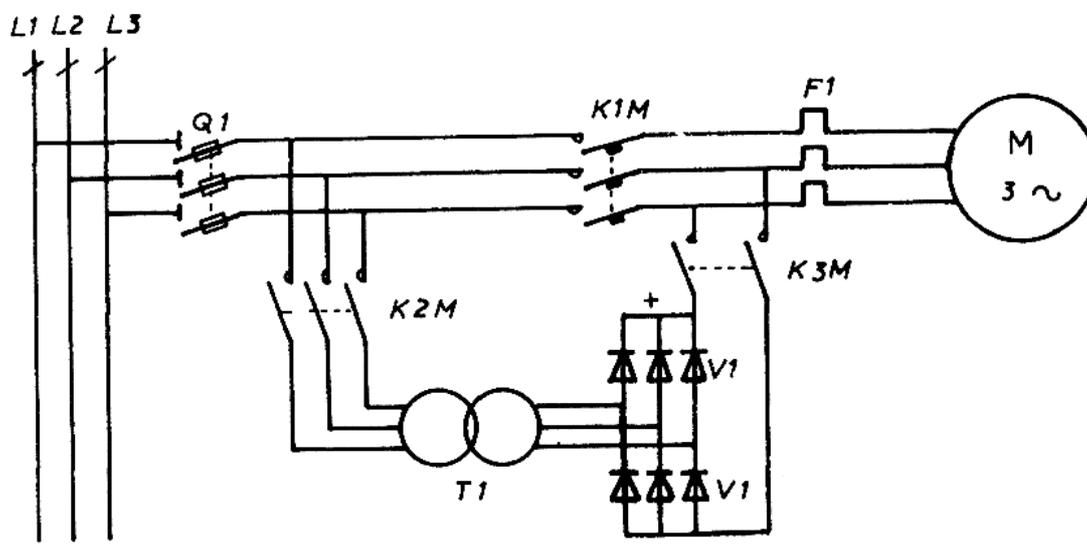
Couple de freinage

### 5. Déroulement du TP

Le réseau alimente un transformateur dont la tension secondaire réduite est redressée par un pont de diodes monophasé ou triphasé.

**Exemple :** pour Moteur asynchrone triphasé à cage d'écureuil.

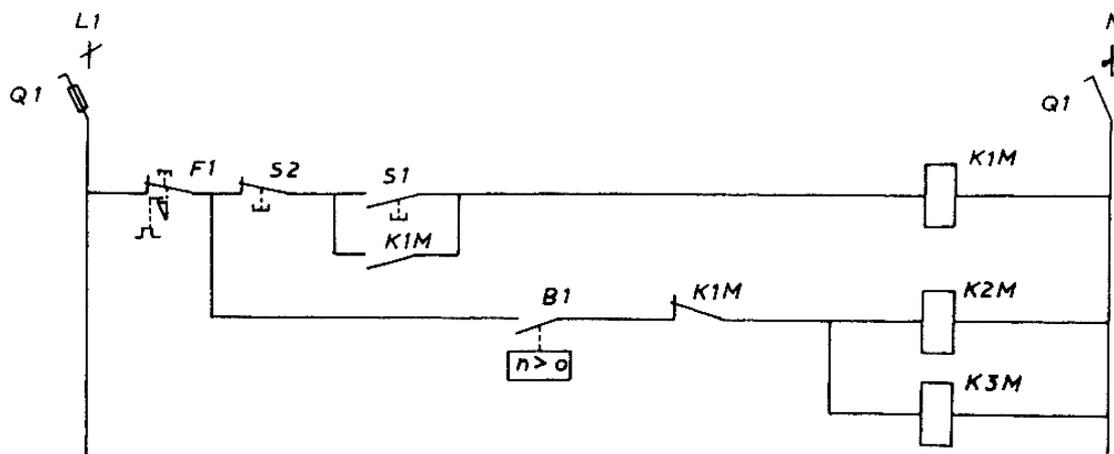
Schéma développé du circuit de puissance



**Légende :**

- Q1 : fusible sectionneur
- F1 : relais thermique
- S1 : bouton poussoir marche
- S2 : bouton poussoir arrêt
- B1 : contact centrifuge fermé lorsque la vitesse est supérieure à zéro
- T1 : transformateur triphasé 400/24 V
- V1 : six diodes de redressement
- K1M : discontacteur d'alimentation
- K2M : contacteur de freinage (alternatif)
- K3M : contacteur de freinage (continu)
- M : moteur asynchrone triphasé

Schéma développé du circuit de commande



## TP9 - essais d'un moteur asynchrone triphasé

### 1. Objectifs visés

Effectuer les essais à vide et en charge d'un moteur asynchrone triphasé afin de déterminer le rendement par la méthode des pertes séparées.

L'utilisation de plusieurs types d'appareils de mesure augmente l'aptitude des stagiaires dans le domaine de mesures électriques.

### 2. Durée du TP:

6 heures.

### 3. Matériel (Équipement et matière d'œuvre) par équipe:

- Moteur asynchrone triphasé à cage
- Wattmètre monophasé
- Ampèremètre
- Voltmètre
- Multimètre numérique
- Transformateur de courant (TC)
- Génératrice à courant continu à excitation shunt
- Rhéostat de charge
- Rhéostat d'excitation
- Tachymètre à main mécanique ou numérique
- Conducteur isolé 1,5 mm<sup>2</sup>
- Conducteur isolé 2,5 mm<sup>2</sup>

### 4. Description du TP

Les essais d'un moteur asynchrone triphasé à vide et en charge permettent de déterminer son rendement ou de vérifier le rendement indiqué sur la plaque signalétique.

Le bilan de puissance montre que

$$P_{\text{utile}} = P_{\text{absorbée}} - \text{pertes}$$

Ces pertes sont:

- les pertes magnétiques  $p_{fs}$  (hystérésis et courants de Foucault) dans le stator indépendantes de la charge, elles sont négligeables dans le rotor;
- les pertes mécaniques  $p_m$  qui sont principalement fonction de la vitesse;
- les pertes Joule dans le stator  $p_{Js} = 1,5 R I^2$ ;  $R$  résistance entre deux bornes du stator
- les pertes Joule dans le rotor: la puissance transmise ( $P_1 = P_a - p_{fs} - p_{Js}$ ) dans le rotor est le produit de la puissance transmise par le glissement:  $p_{Jr} = g \cdot P_1$

le rendement du moteur est égal

$$\eta = P_u / P_a = [P_a - (p_{Js} + p_c + p_{Jr})] / P_a$$

### 5. Déroulement du TP

- Essai à vide

Au début il faut mesurer la résistance des enroulements du stator à froid par une des méthodes: la méthode ampèrevoltmétrique (voir figure suivante) ou directement à l'aide d'un multimètre numérique (option: ohmmètre).

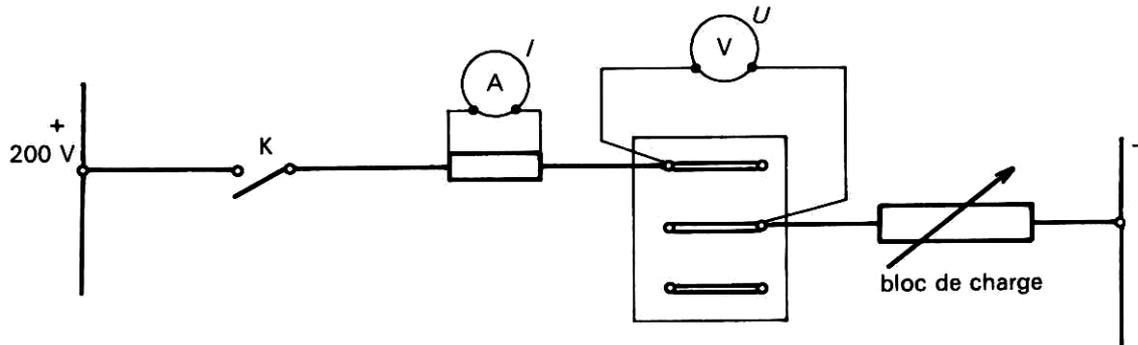


Schéma de mesure de la résistance des enroulements statoriques par la méthode ampèrevoltmétrique

Les résultats des mesures doivent être introduits dans le tableau ci-dessous:

$I$ (A)				
$U$ (V)				
$R_0$ ( $\Omega$ )				

Le schéma sur la figure suivante donne le montage pour l'essai à vide.

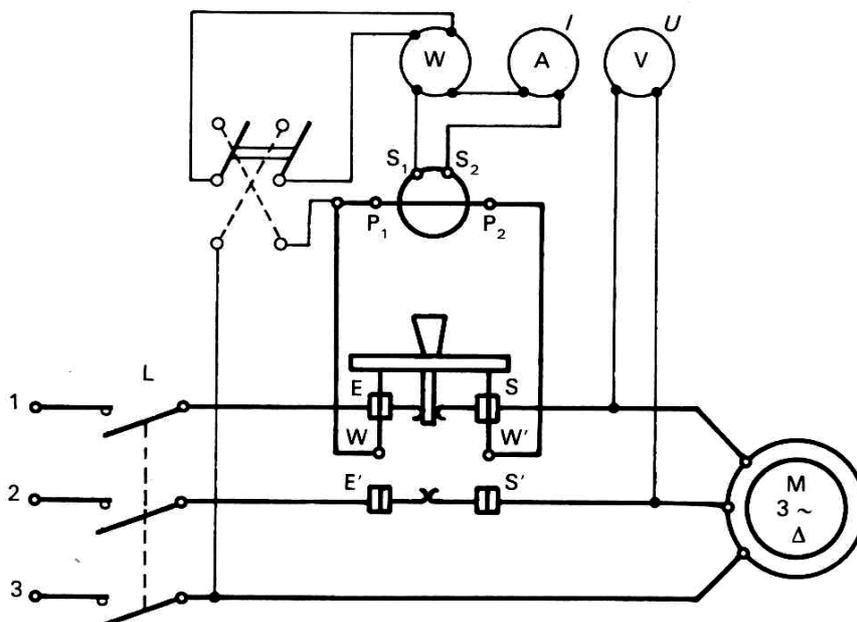


Schéma de montage pour l'essai à vide  
Les résultats et les calculs doivent être présentés dans le tableau suivant:

Mesures				Calculs				
$P_1$ (W)	$P_2$ (W)	$U$ (V)	$I$ (A)	$P_{a0}$ (W)	$S = \sqrt{3}.U.I$ (VA)	$\cos \varphi = P / S$	$p_{Js} = 1,5 R I_0^2$ (W)	$p_c = P_{a0} - p_{Js}$ (W)

• **Essai en charge**

Le schéma de montage est présenté sur la figure suivante. On peut utiliser aussi deux wattmètres et respectivement deux transformateurs de courant à la place du commutateur sur le schéma. Le formateur doit vérifier le travail des stagiaires après l'élaboration du schéma et après le montage pour effectuer les mesures.

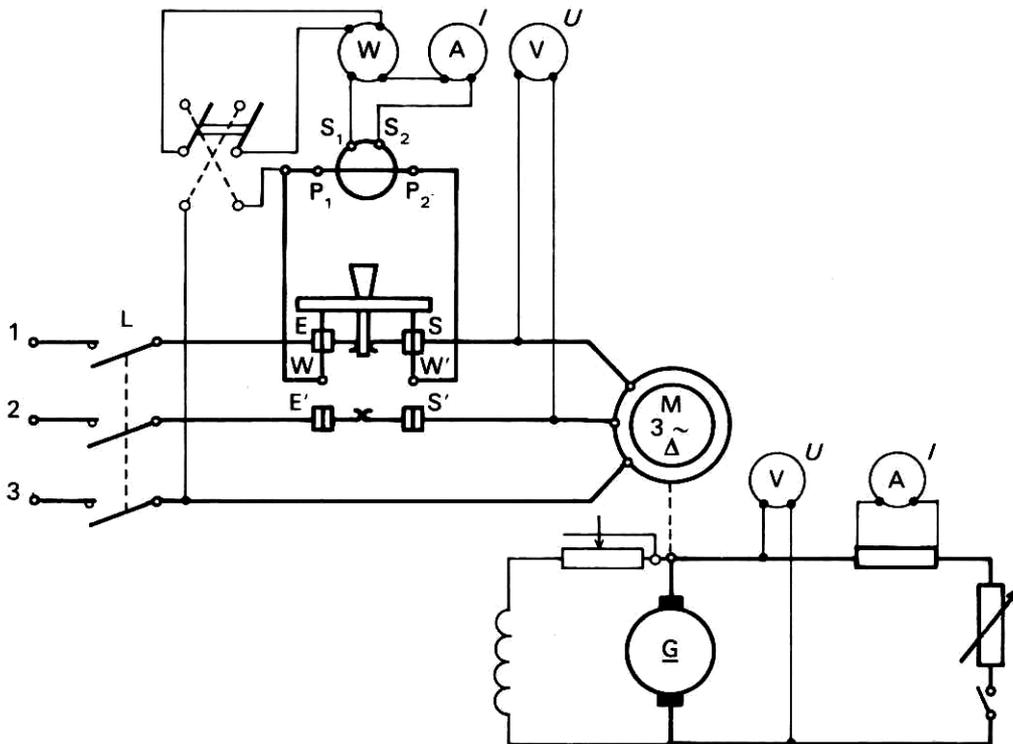


Schéma de montage pour l'essai en charge

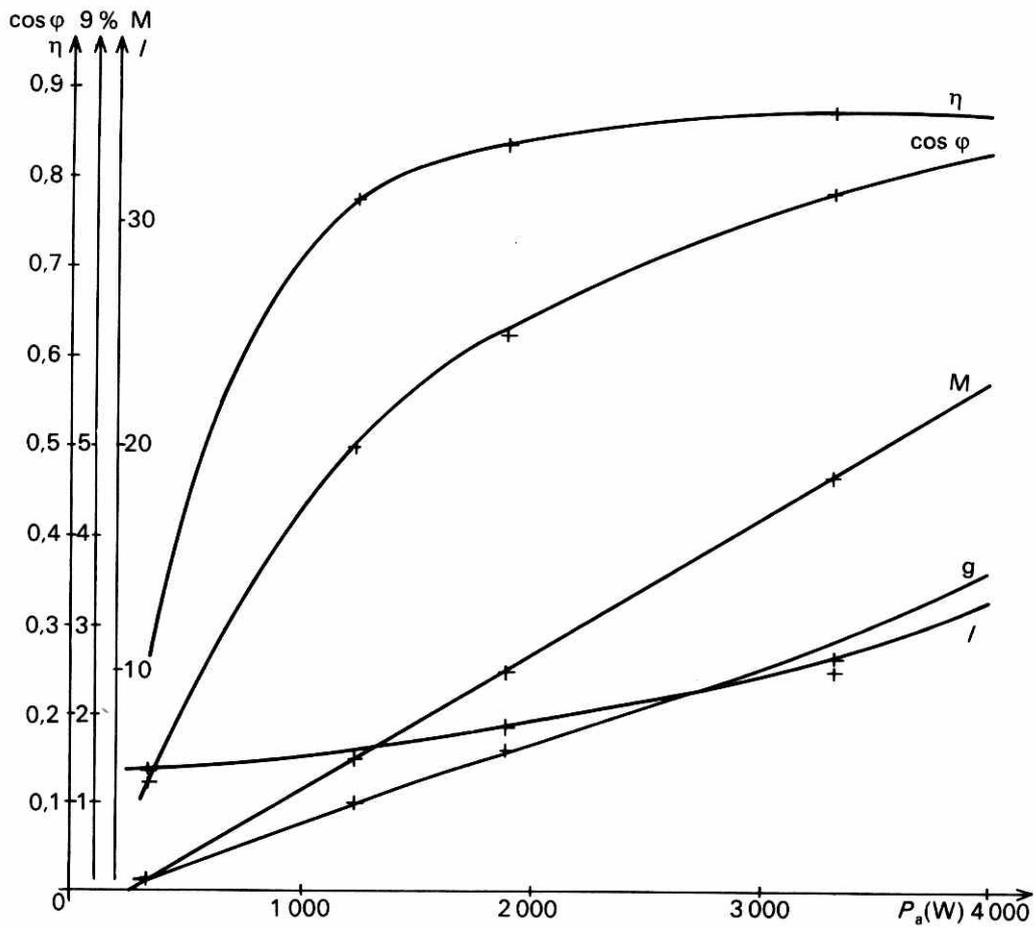
Les relevés et les résultats des calculs doivent être introduits dans les tableaux suivants:

Charges	$P_1$ (W)	$P_2$ (W)	$P$ (W)	$U$ (V)	$I$ (A)	$n'$ (tr / mn)
à vide						
1/2 charge nominale						
3/4 charge nominale						
4/4 charge nominale						
5/4 charge nominale						

$$P = P_1 + P_2 \quad (\text{somme algébrique})$$

Charges	$P_a$ (W)	$S = U.I. \sqrt{3}$ (VA)	$\cos \varphi =$ $P / S$	$g = (n - n')$ $/ n$	$p_{Js} =$ $1,5 R I^2$ (W)	$P_1 =$ $P_a - p_{Js}$ (W)
à vide						
1/2 charge nominale						
3/4 charge nominale						
4/4 charge nominale						
5/4 charge nominale						
Charges	$p_{jr} = g.P_1$ (W)	$p_c$ (W)	Somme des pertes (W)	$P_2 = P_a -$ pertes (W)	$T_u =$ $P_2 / \Omega'$ (mN)	$\eta =$ $P_2 / P_a$
à vide						
1/2 charge nominale						
3/4 charge nominale						
4/4 charge nominale						
5/4 charge nominale						

L'allure des courbes des fonctions  $g = f(P_a)$ ,  $I = f(P_a)$ ,  $\cos \varphi = f(P_a)$ ,  $M = f(P_a)$ ,  $\eta = f(P_a)$  est donnée sur la figure suivante



Courbes en charge

## EVALUATION DE FIN DE MODULE

### EPREUVE THEORIQUE

Durée : 4 heures

Barème : ... / 40

1) Pour le couplage Dd – 0 d'un transformateur :

1.1. Dessiner le schéma de branchement des enroulements primaire et secondaire. ... / 5

1.2. Dessiner le diagramme de Fresnel. ... / 5

2) Champ tournant d'un stator triphasé – principe, diagramme vectoriel.

... / 5

3) Avantages et inconvénients d'un moteur synchrone.

... / 5

4)

Un moteur asynchrone triphasé, dont le stator est monté en étoile, est alimenté par un réseau 380 V, 50 Hz. Chaque phase du stator a une résistance de 0,40  $\Omega$ .

On réalise un essai à vide :

- le moteur tourne pratiquement à 1500 tr /min , .
- la puissance absorbée est de 1150 W,
- le courant  $I_0$  dans un fil de ligne vaut 11,2 A.

Un essai en charge nominale sous la même tension 380 V, 50 Hz, a donné les résultats suivants :

- glissement: 4 % ,
- puissance absorbée : 18,1 kW,
- courant dans un fil de ligne; 32 A.

-

a)

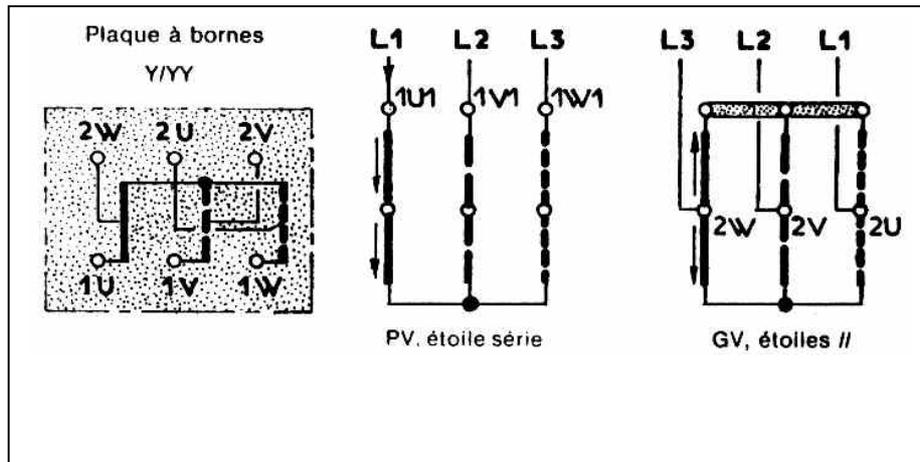
- 1) Calculer les pertes par effet Joule dans le stator lors de l'essai à vide. Que peut-on dire des pertes par effet Joule dans le rotor durant cet essai ?
- 2) Les pertes mécaniques valent 510 W ; en déduire les pertes magnétiques statoriques.

b) Pour le régime nominal, calculer

- 1) le facteur de puissance,
- 2) la fréquence de rotation (que peut-on en déduire pour les pertes magnétiques dans le rotor ? )
- 3) la fréquence des courants rotoriques,
- 4) les pertes par effet Joule dans le rotor et dans le stator,
- 5) la puissance utile,
- 6) le rendement du moteur,
- 7) le moment du couple utile.

5) Au quel type de moteur appartient les enroulements sur le schéma ? ... / 8

... / 6



6) Vérification des hypothèses pour le diagnostic d'une panne.

... / 6

### EPREUVE PRATIQUE

Durée : 6 heures

Barème : ... / 60

Démarrage par élimination des résistances statoriques (3 temps) :

1. Schémas des circuits de puissance et de commande ; .../12
2. Diagramme de fonctionnement. .../12
3. Avantages et inconvénients .../10
4. Montage et essais .../12
5. Panne et dépannage .../14

### **NOTE IMPORTANTE !**

Les sujets proposés pour l'évaluation en théorie et en pratique ne sont pas obligatoires. Ils représentent juste le niveau d'exigences pour le bon déroulement des épreuves.

Chaque formateur peut préparer ses propres sujets.

**Liste des références bibliographiques**

<b>Ouvrage</b>	<b>Auteur</b>	<b>Edition</b>
<i>Electrotechnique, tome III, Machines électriques – Machines synchrones et asynchrones, Commande électronique</i>	<i>Milsant F.</i>	<i>Ellipses, 1991</i>
<i>Les machines électriques</i>	<i>Lucas F., P.Charruault</i>	<i>Delagrave, 1987</i>
<i>Le Schéma en Electrotechnique</i>	<i>Pierre Boye, André Bianciotto</i>	<i>Delagrave, 1981</i>
<i>Cours de schémas (Automatisme – Electricité)</i>	<i>J. Montagnac</i>	<i>Dunod, 1989</i>
<i>Technologie d'Electricité générale et professionnelle, tome II</i>	<i>R. Merlet</i>	<i>Dunod, 1975</i>
<i>Technologie d'Electricité</i>	<i>R. Pustelnik, B. Deriquehem</i>	<i>Dunod, 1989</i>