



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°:27

**INSTALLATION ET
DEPANNAGE DE MOTEURS
ET DE GENERATRICES A
COURANT ALTERNATIF**

SECTEUR : ELECTROTECHNIQUE

SPECIALITE : EMI

NIVEAU : TECHNICIEN

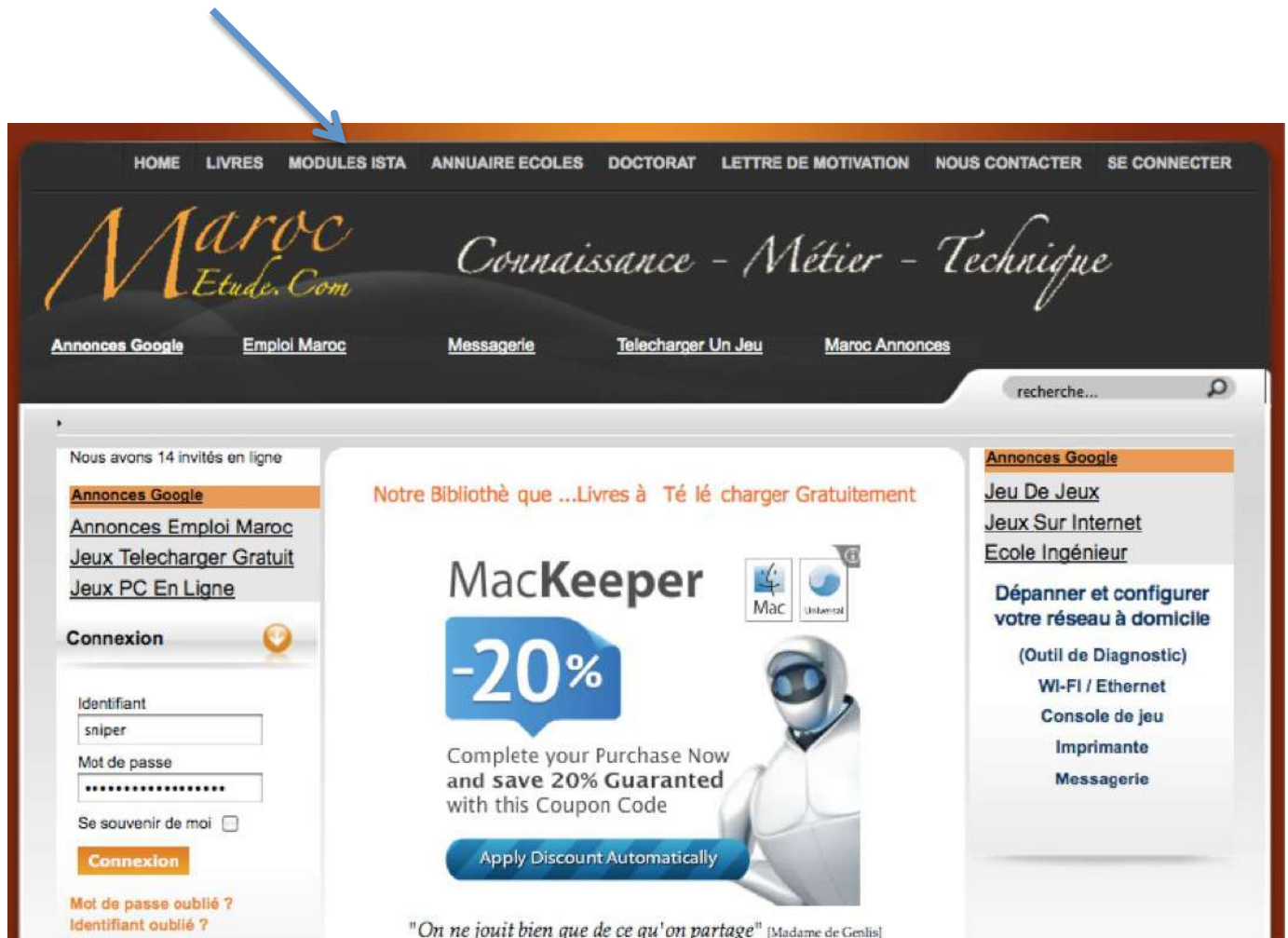
ANNEE 2007

PORTAIL DE LA FORMATION PROFESSIONNELLE AU MAROC

Télécharger tous les modules de toutes les filières de l'OFPPT sur le site dédié à la formation professionnelle au Maroc : www.marocetude.com

Pour cela visiter notre site www.marocetude.com et choisissez la rubrique :

MODULES ISTA



The screenshot shows the homepage of MarocEtude.Com. The top navigation bar includes links: HOME, LIVRES, **MODULES ISTA**, ANNUAIRE ECOLES, DOCTORAT, LETTRE DE MOTIVATION, NOUS CONTACTER, and SE CONNECTER. A blue arrow points to the 'MODULES ISTA' link. Below the navigation bar is the site logo 'Maroc Etude.Com' and the tagline 'Connaissance - Métier - Technique'. A secondary navigation bar contains links: Annonces Google, Emploi Maroc, Messagerie, Télécharger Un Jeu, and Maroc Annonces. The main content area features a large advertisement for MacKeeper with a '-20%' discount. On the left sidebar, there is a 'Connexion' section with fields for 'Identifiant' (containing 'sniper') and 'Mot de passe', a 'Se souvenir de moi' checkbox, and a 'Connexion' button. Below this are links for 'Mot de passe oublié ?' and 'Identifiant oublié ?'. The right sidebar contains a search bar and a list of links under 'Annonces Google': Jeu De Jeux, Jeux Sur Internet, Ecole Ingénieur, Dépanner et configurer votre réseau à domicile (with sub-links for Outil de Diagnostic, Wi-Fi / Ethernet, Console de jeu, Imprimante, and Messagerie).

Document élaboré par :

Nom et prénom

EFP

DR

Mme ELKORNO NAIMA

CDC - GE

Révision linguistique

-
-
-

Validation

-
-
-

SOMMAIRE

RESUME THEORIQUE	7
I. Champs magnétiques tournants.....	8
I.1. Construction d'une machine tournante.....	8
I.2. Enroulement tournant parcouru par un courant continu	8
I.3. Enroulement monophasé fixe parcouru par un courant sinusoïdal	11
I.4. Enroulement triphasé fixe parcouru par un courant sinusoïdal	13
II. Alternateurs: principe, constitution, f.e.m.....	14
II.1. Principe de fonctionnement.....	14
II.1.1. Constitution	14
II.1.2. F.é.m. induite	14
II.2. Description des alternateurs industriels.....	16
II.2.1. Alternateurs à pôles lisses	17
II.2.2. Alternateurs à pôles saillants	19
II.3. F.é.m. à vide	20
II.4. Plaque signalétique	22
II.5. Système d'excitation d'une machine synchrone.....	22
II.6. Exercice	23
III. Alternateur autonome.....	24
III.1. Diagramme de fonctionnement.....	24
III.2. Eude expérimentale de l'alternateur :	26
III.3. Courbes de fonctionnement.....	29
III.4. Pertes et Rendement.....	31
III.5. Exercices	32
IV. Couplage des machines synchrones à un réseau.....	38
IV.1. Conditions d'un bon couplage	38
IV.2. Fonctionnement en alternateur.....	40
IV.3. Fonctionnement en Moteur.....	44
V. Moteurs asynchrones, constitution, principe de fonctionnement	48
V.1. Constitution	48
V.2. Fonctionnement	50
V.2.1. Marche à vide.....	50
V.2.2. Marche en charge	52
V.2.3. Considérations mécaniques.....	55
V.3. Essais du moteur asynchrone	61
V.4. Exercices.....	62
VI. appareillages de commande et de protection:.....	66
VI.1. Appareillage de commande	66
VI.2. Commande d'un contacteur.....	69
VI.3. Les éléments de protection des actionneurs électriques	71
VII. Problèmes industriels	75
VII.1. Problèmes de démarrage	75
VII.2. démarrage des moteurs à cage.....	76
VII.3. démarrage des moteurs à bagues.....	79
VII.4. Démarrage semi-automatique des moteurs asynchrones triphasés.....	79
VII.4.1. Démarrage direct.....	79
VII.4.2. Démarrage étoile triangle	82

VII.4.3.	Démarrage par élimination de résistances statoriques.....	86
VII.4.4.	Démarrage par autotransformateur	90
VII.4.5.	Démarrage par élimination de résistances rotoriques	94
VII.5.	Freinage des moteurs asynchrones triphasés	98
VII.5.1.	Freinage par électro-frein	98
VII.5.2.	Freinage par contre-courant	98
VII.5.3.	Freinage par injection de courant continu.....	100
VIII.	Les différents types de moteurs à double vitesse et leurs systèmes de commande.....	102
VIII.1.	Moteur asynchrone triphasé à deux vitesses par couplage des enroulements du stator	102
VIII.2.	Moteur asynchrone triphasé à deux vitesses par enroulements indépendants	107
IX.	Fonctionnement des Moteurs asynchrones monophasés :	109
X.	Entretien et dépannage des machines a courant alternatif.....	113
X.1.	Entretien.....	113
X.2.	Dépannage.....	113
X.2.1.	Types de défaillances	113
X.2.2.	Préparation de l'intervention	113
X.2.3.	Analyse de l'état réel de l'équipement.....	115
X.2.4.	Diagnostic	116
X.2.5.	Remplacement des composants défectueux.....	120
	GUIDE DE TRAVAUX PRATIQUES	123
	TP1 - démarrage direct d'un moteur asynchrone triphasé à cage	124
	TP2 - Démarrage étoile-triangle d'un moteur asynchrone triphasé à cage ..	128
	TP3 - démarrage par élimination de résistances statoriques d'un moteur asynchrone triphasé à cage	132
	TP4 - démarrage par auto - transformateur d'un moteur asynchrone triphasé à cage	136
	TP5 - démarrage par élimination des résistances rotoriques d'un moteur asynchrone triphasé à rotor bobine	138
	TP6 - freinage par injection de courant continu d'un moteur asynchrone triphasé	142
	TP7 - essais d'un moteur asynchrone triphasé	144
	EVALUATION DE FIN DE MODULE	149

**MODULE 27 : INSTALLATION ET DEPANNAGE DE MOTEURS ET DE
GENERATRICES A COURANT ALTERNATIF**

Code :

Durée : 75 h

OBJECTIF OPÉRATIONNEL

COMPORTEMENT ATTENDU

*Pour démontrer sa compétence le stagiaire doit
**installer et dépanner des moteurs et des génératrices à
courant alternatif et leurs dispositifs de commande**
selon les conditions, les critères et les précisions qui suivent.*

CONDITIONS D’EVALUATION

- A partir :
 - de directives ;
 - de schémas et de plans;
 - d’une panne provoquée.
- A l’aide :
 - des manuels techniques ;
 - de l’équipements, du matériel et de l’outillage.

CRITERES GENERAUX DE PERFORMANCE

- Respect des règles de santé et de sécurité au travail.
- Respect des normes en vigueur.
- Qualité des travaux.

OBJECTIF OPERATIONNEL

PRECISIONS SUR LE COMPORTEMENT ATTENDU

CRITERES PARTICULIERS DE PERFORMANCE

- | | |
|---|---|
| A) <i>Interpréter les directives, les plans et les manuels techniques.</i> | <ul style="list-style-type: none"> - <i>Identification exacte des symboles.</i> - <i>Repérage de l'information pertinente dans les manuels techniques.</i> |
| B) <i>Planifier l'installation.</i> | <ul style="list-style-type: none"> - <i>Détermination exacte des étapes de réalisation de l'installation.</i> - <i>Choix juste de l'équipement, de l'outillage et du matériel.</i> |
| C) <i>Installer des moteurs, des génératrices à c.a. et leurs dispositifs de commande.</i> | <ul style="list-style-type: none"> - <i>Installation conforme au plan.</i> - <i>Raccordement correct.</i> - <i>Fixation solide.</i> |
| D) <i>Vérifier le fonctionnement.</i> | <ul style="list-style-type: none"> - <i>Respect des étapes de vérification.</i> - <i>Fonctionnement correct.</i> |
| E) <i>Poser un diagnostic.</i> | <ul style="list-style-type: none"> - <i>Justesse du diagnostic.</i> - <i>Choix judicieux des correctifs à apporter</i> |
| F) <i>Dépanner des moteurs, des génératrices à c.a. et leurs dispositifs de commande.</i> | <ul style="list-style-type: none"> - <i>Choix approprié du composant de remplacement.</i> - <i>Démontage correct</i> - <i>Montage correct.</i> - <i>Fonctionnement correct.</i> |
| G) <i>Ranger et nettoyer.</i> | <ul style="list-style-type: none"> - <i>Rangement approprié et propreté des lieux.</i> |
| H) <i>Consigner les interventions.</i> | <ul style="list-style-type: none"> - <i>Pertinence des informations présentées.</i> |

PRESENTATION DU MODULE

L'objectif de module est de faire acquérir les connaissances relatives aux divers types de moteurs et de génératrices à courant alternatif, à l'interprétation des dispositifs de commande, au diagnostic de fonctionnement ainsi qu'au remplacement de composants défectueux. Il vise à rendre le stagiaire apte à installer et à dépanner des moteurs et des génératrices à courant alternatif et leurs dispositifs de commande.

La durée du module est 75 heures dont 21 heures de théorie, 50 Heures de pratiques et 4 heures d'évaluation.

**MODULE 27: INSTALLATION ET DEPANNAGE DE MOTEURS ET DE
GENERATRICES A COURANT ALTERNATIF**

RESUME THEORIQUE

I. Champs magnétiques tournants

I.1. Construction d'une machine tournante

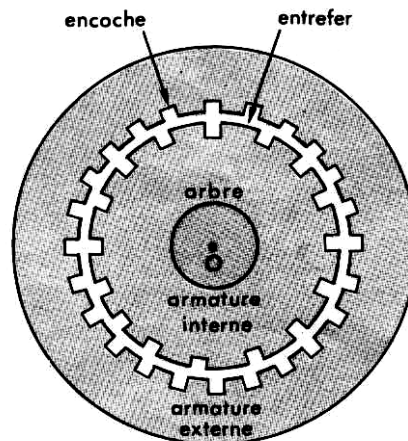
Une machine tournante comporte:

- un circuit magnétique
- deux enroulements

Le circuit magnétique (fig. 1-1) est constitué de deux armatures ferromagnétiques, cylindriques, de même axe O, séparées par un entrefer étroit.

L'armature interne (ou centrale), solidaire d'un arbre, peut tourner autour de l'axe O; selon les machines, elle est massive ou feuilletée; dans le second cas, les tôles sont perpendiculaires à l'axe.

L'armature externe, toujours feuilletée, a l'allure d'un manchon coaxial au cylindre interne.



Circuit magnétique d'une machine tournante
Fig. 1-1

Les deux surfaces limitant l'entrefer sont munies d'encoches régulièrement réparties. Dans ces encoches sont disposés des conducteurs qui forment les deux enroulements (ou bobinages).

L'armature interne et l'armature externe, chacune munie de son enroulement, constituent respectivement le **rotor** et le **stator** de la machine.

I.2. Enroulement tournant parcouru par un courant continu

L'enroulement est constitué de spires disposées dans les encoches rotoriques (fig. 1-2). Chaque encoche est remplie d'un paquet de conducteurs dits **conducteurs actifs**; un tel paquet est appelé **faisceau**.

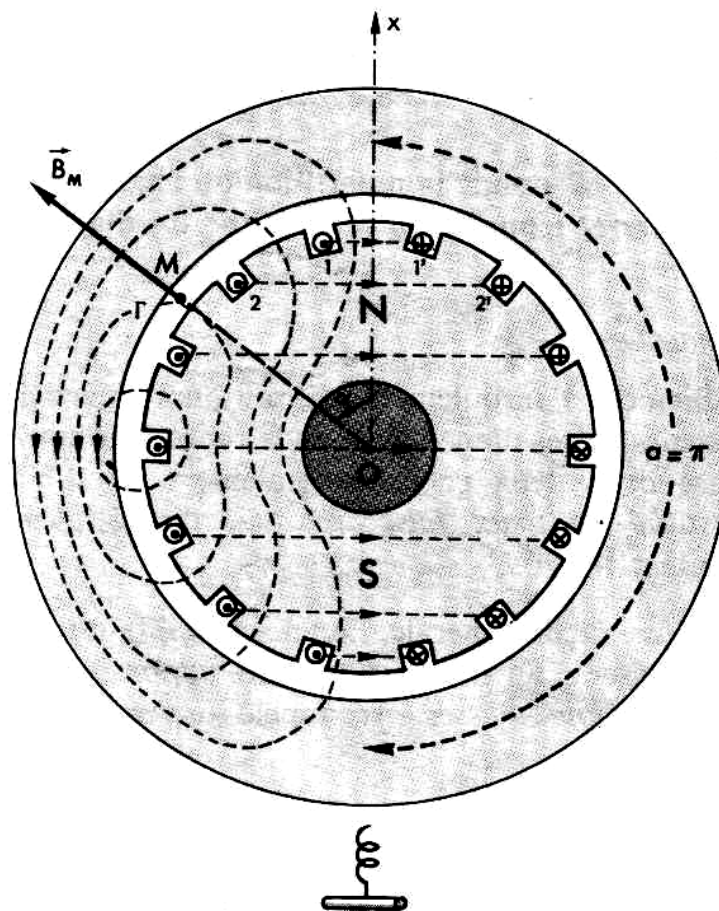
L'enroulement est assimilable à un **solénoïde** d'axe Ox perpendiculaire à l'axe de rotation.

Pour un enroulement, dit bipolaire (présentant un pôle Nord et un pôle Sud), l'angle dont il faut tourner pour passer d'un pôle au suivant (pas polaire) est égal à π .

Considérons un point M de l'entrefer d'abscisse angulaire α , comptée à partir de l'axe Ox. L'excitation H en M et par suite $B = \mu_0 H$, voient leurs valeurs varier avec l'angle α .

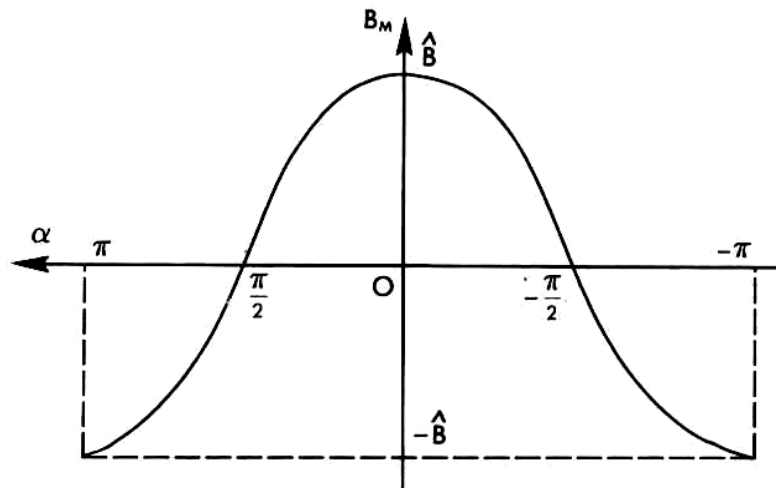
D'une façon générale, si B_M est la mesure du champ magnétique en M on peut compter le graphe de la fonction $B_M(\alpha)$ à une sinusoïde

$$B_M = B_{\max} \cos \alpha$$



Lignes de champ magnétique d'une machine tournante
Fig. 1-2

B_M n'est pas une fonction du temps, mais de l'angle α . L'ensemble des mesures des différents vecteurs B le long de l'entrefer constitue une **onde de champ magnétique** (fig. 1-3).



Onde de champ magnétique

Fig. 1-3

Il est possible de produire sur la périphérie d'une armature cylindrique un champ magnétique à $2p$ pôles, c'est-à-dire présentant p pôles Nord et p pôles Sud. Le pas polaire a est alors

$$a = 2\pi / 2p = \pi / p$$

Par exemple: pour une machine tétrapolaire (fig. 1-4), 2 pôles Nord et 2 pôles Sud, le pas polaire vaut $a = 2\pi / 4 = \pi/2$.

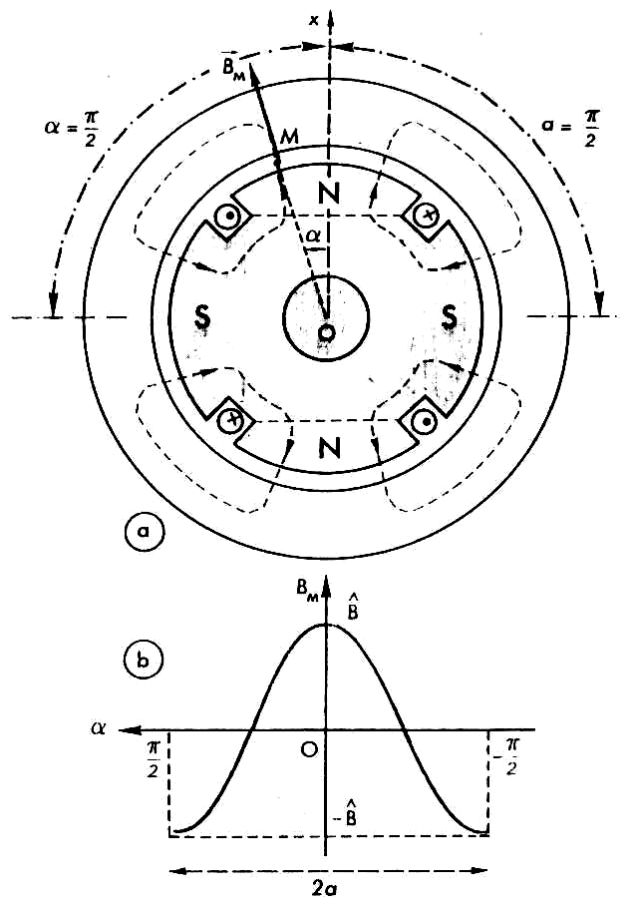


Fig. 1-4 Enroulement tétrapolaire

L'onde de champ magnétique a la même période que le bobinage, c'est-à-dire l'angle $2\alpha = \pi$; en adoptant comme axe d'origine des angles α , l'axe d'un pôle Nord, l'onde de champ a pour expression

$$B_M = B_{\max} \cos 2\alpha$$

Toutes les considérations précédentes peuvent être généralisées à un enroulement donnant naissance à $2p$ pôles. Un tel enroulement comporte en série p bobines d'ouverture π/p , chacune d'elle se déduisant de la précédente par une rotation d'angle $2\pi/p$. Le pas polaire est alors $a = \pi/p$ et l'onde de champ magnétique a pour l'expression

$$B_M = B_{\max} \cos p\alpha$$

Pour un enroulement bipolaire : si l'enroulement tourne, dans le sens positif, à une vitesse angulaire constante Ω (en rad/s), elle entraîne avec elle le champ qu'elle produit: on parle de **champ magnétique tournant**.

Il en résulte que le champ en M est une fonction du temps t et de l'angle θ . Si on pose $\omega = \Omega$, à un instant donné B_M est une fonction sinusoïdale de θ , admettant 2π comme période

$$B_M = B_{\max} \cos (\omega t - \theta)$$

Mais $\omega = 2\pi f$ et $\Omega = 2\pi n$, donc

$$f = n, \quad \text{où } f - \text{la fréquence, en Hz, de la fonction du temps}$$

$$n - \text{la fréquence de rotation, en tr/s}$$

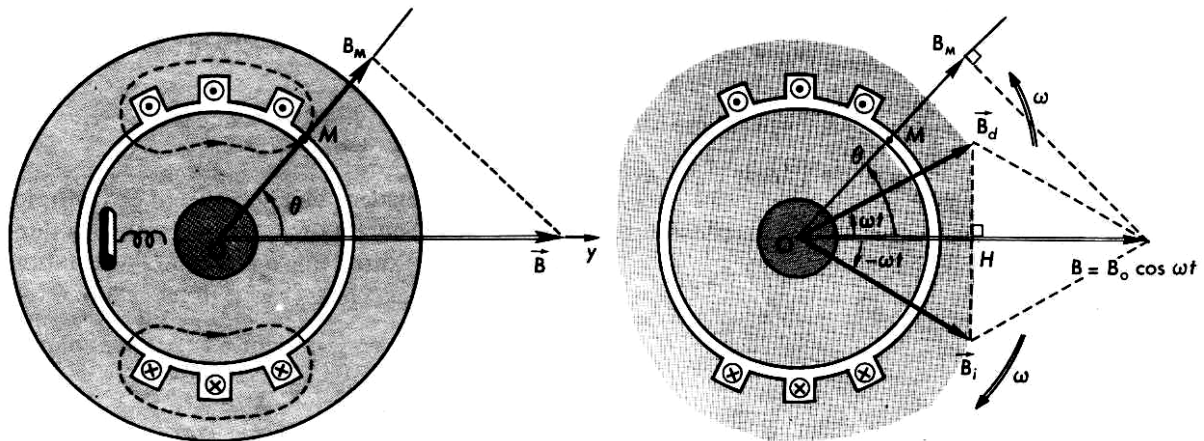
I.3. Enroulement monophasé fixe parcouru par un courant sinusoïdal

- Le champ est une fonction sinusoïdale du temps

Si l'enroulement bipolaire est disposé sur le stator (fig. 1-5a), l'onde de champ magnétique a la même expression que pour le cas précédent (simplement α remplacé par θ).

$$B_M = B_{\max} \cos \theta$$

avec $B_{\max} = k N i$, si N est le nombre de spires de l'enroulement.



a) Vecteur du champ magnétique

b) Champs direct et inverse

Champ magnétique d'un enroulement fixe monophasé

Fig. 1-5

Si le courant i est sinusoïdal, de pulsation ω ,

$$i = I\sqrt{2} \cos \omega t$$

B_{max} devient une fonction sinusoïdale du temps:

$$B_{max} = k N I\sqrt{2} \cos \omega t = B_0 \cos \omega t, \quad \text{avec } B_0 = k N I\sqrt{2}$$

En un point M quelconque de l'entrefer le champ magnétique a pour l'expression

$$B_M = (B_0 \cos \theta) \cos \omega t$$

Ce champ est une fonction sinusoïdale du temps de même pulsation ω que le courant i , dont l'amplitude, $B_0 \cos \theta$, varie avec la position du point M .

- Les champs direct et inverse

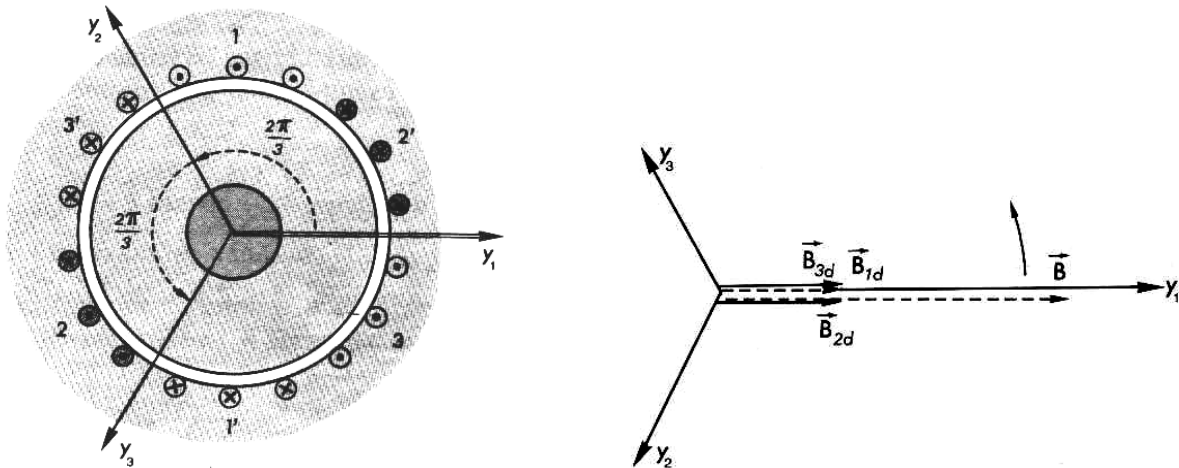
A tout instant, le vecteur B peut être considéré comme la somme de deux vecteurs B_d et B_i (fig. 1-5b), de normes constantes $B_0/2$, faisant respectivement avec l'axe Oy les angles ωt et $-\omega t$.

Ainsi l'onde de champ magnétique le long de l'entrefer peut être considérée comme la somme de **deux ondes progressives**: l'onde directe et l'onde inverse qui tournent dans le sens opposé.

Dans la plupart des machines à courant sinusoïdal, la présence simultanée de deux champs, tournant dans des sens opposés, pose des problèmes et réduit les performances: il faut faire disparaître l'un des deux champs. On y parvient en remplaçant l'enroulement monophasé par un enroulement triphasé.

I.4. Enroulement triphasé fixe parcouru par un courant sinusoïdal

Un enroulement triphasé est l'ensemble de **trois bobinages monophasés identiques** et régulièrement décalés le long de l'entrefer; ces bobinages sont les phases de l'enroulement triphasé (fig. 1-6a).



a) Enroulement triphasé

b) Vecteurs des champs des trois enroulements

Champ magnétique tournant d'un enroulement fixe triphasé

Fig. 1-6

Pour une machine bipolaire :
Faisons passer les courants

$$\begin{aligned} i_1 &= I\sqrt{2} \cos \omega t \\ i_2 &= I\sqrt{2} \cos (\omega t - 2\pi/3) \\ i_3 &= I\sqrt{2} \cos (\omega t - 4\pi/3) \end{aligned}$$

Lorsque le temps s'écoule les vecteurs des champs directs B_{d1} , B_{d2} , B_{d3} , tournant dans le sens positif à la vitesse ω , restent colinéaires (fig. 1-6b) et l'on a constamment $B = 3 B_{d1}$.

Les vecteurs B_{i1} , B_{i2} , B_{i3} , tournant dans le sens négatif à la vitesse ω , ont une **résultante toujours égale à zéro**.

L'enroulement triphasé, parcouru par un système triphasé de courants, crée un champ magnétique dont la répartition le long de l'entrefer constitue une **onde progressive représentée par le vecteur tournant B**.

Les propriétés du champ tournant :

La fréquence de rotation n (en tr/s) du champ est égale à la fréquence f (en Hz) des courants i_1 , i_2 et i_3 .

L'axe du champ coïncide avec l'axe d'une phase chaque fois que le courant est maximal dans cette phase.

Pour inverser le sens de rotation du champ il suffit d'invertir l'alimentation de deux phases.

II. Alternateurs: principe, constitution, f.e.m.

II.1. Principe de fonctionnement

II.1.1. Constitution

➤ Machine bipolaire

Un alternateur élémentaire comporte:

- un **rotor**, tournant à la vitesse angulaire Ω , muni d'un enroulement parcouru par un courant continu J (dit courant inducteur ou d'excitation);
- un **stator** présentant deux encoches diamétralement opposées dans lesquelles on a disposé une bobine de $N/2$ spires (chaque encoche contient $N/2$ conducteurs, si bien que le nombre total de conducteurs actifs est égal à N).

L'inducteur crée dans la machine un champ magnétique à 2 pôles qu'il entraîne avec lui dans sa rotation:

$$B_M = B_{\max} \cos (\omega t - \theta)$$

II.1.2. F.é.m. induite

Les conducteurs situés dans les encoches de l'induit coupent les lignes de champ (fig. 2-1a), donc sont le siège de f.é.m. induite.

$$B l v = l r \Omega B = l r \Omega B_{\max} \cos (\omega t - \theta)$$

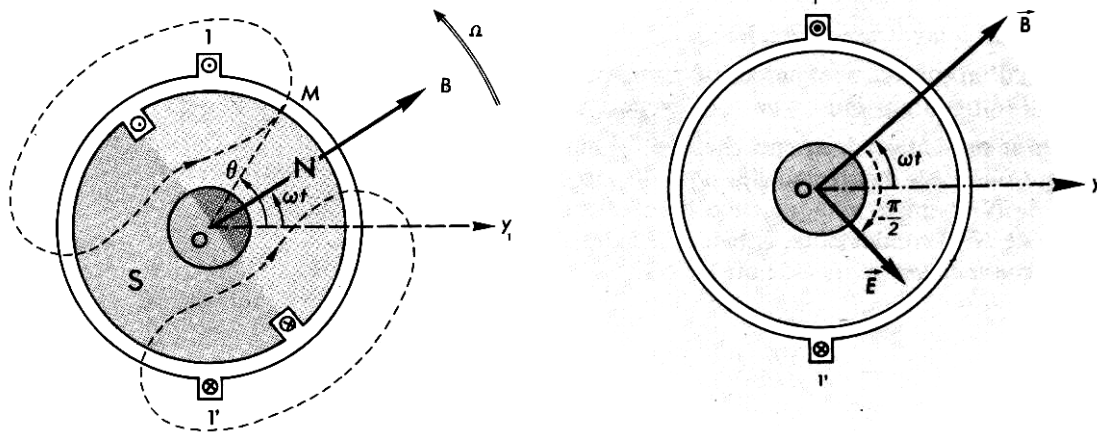
avec: $v = r \Omega$, r = rayon de l'entrefer; l = longueur des conducteurs situés dans le champ.

Les f.é.m. induites correspondantes à chaque faisceau ont pour expressions:

$$\begin{aligned} & N/2 l r \Omega B_{\max} \cos (\omega t - \pi/2) \\ & - N/2 l r \Omega B_{\max} \cos (\omega t + \pi/2) = N/2 l r \Omega B_{\max} \cos (\omega t - \pi/2) \end{aligned}$$

La f.é.m. totale a pour expression:

$$e = N l r \Omega B_{\max} \cos (\omega t - \pi/2)$$



a) Champ magnétique tournant

b) Force électromagnétique (f.é.m.) induite
Fig. 2-1

La pulsation ω de e est égale à la vitesse angulaire Ω du rotor et

$$\Rightarrow \omega = 2 \pi f$$

$$\Rightarrow \Omega = 2 \pi n$$

$$\text{d'où: } f = n$$

La valeur efficace E de e est sous la forme:

$$E = (1/\sqrt{2}) N I r \Omega B_{\max} = (1/\sqrt{2}) N I r 2 \pi n B_{\max}$$

$$E = \pi \sqrt{2} N I r n B_{\max}$$

Le vecteur f.é.m. E est en quadrature arrière par rapport au vecteur tournant B qui lui donne naissance. (fig. 2-1b),

Pour un enroulement triphasé (trois bobines identiques, régulièrement décalées de $2\pi/3$, numérotées dans le sens de rotation du champ, couplées en étoile) le champ induit trois f.é.m. sinusoïdales e_1, e_2, e_3 , de même pulsation $\omega = \Omega = 2 \pi n$, de même valeur efficace $E = \pi \sqrt{2} N I r n B_{\max}$, telles que:

$$e_1 = E \sqrt{2} \cos (\omega t - \pi/2) = E \sqrt{2} \sin \omega t$$

$$e_2 = E \sqrt{2} \sin (\omega t - 2\pi/3)$$

$$e_3 = E \sqrt{2} \sin (\omega t - 4\pi/3)$$

Dans le cas d'une machine bipolaire la fréquence f (en Hz) des f.é.m. induites est égale à la fréquence de rotation n (en tr/s). Pour que $f = 50$ Hz il faut que $n = 50$ tr/s soit $n = 3000$ tr/min. Cette vitesse est réalisable si l'alternateur est entraîné par une turbine à vapeur, mais beaucoup trop élevée pour une turbine hydraulique. Il faut donc construire des alternateurs dont les f.é.m. sont en 50 Hz alors que le rotor

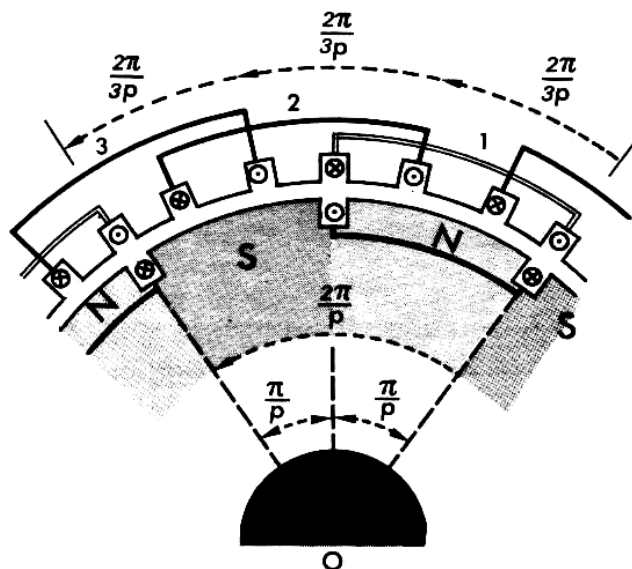
tourne à une fréquence très inférieure à 3000 tr/min: c'est l'origine des alternateurs multipolaires.

➤ Machine multipolaire.

L'inducteur comporte p bobines connectées en série, il crée le long de l'entrefer une onde de champ magnétique présentant p pôles Nord et p pôles Sud.

L'enroulement triphasé statorique présente le même nombre de pôles, c'est-à-dire que chaque phase comporte p bobines (donc $2p$ faisceaux) d'ouverture égale à π/p , se déduisant les unes des autres par des rotations d'angle $2\pi/p$. D'autre part, chaque phase est décalée de la précédente de l'angle $2\pi/3p$ (fig. 2-2).

Pour une même valeur de n les f.é.m. induites varient p fois plus vite, autrement dit leur fréquence est $f = p n$. Mais à la fin les machines multipolaires les f.é.m. induites possèdent les mêmes expressions que pour les machines bipolaires.



Alternateur élémentaire triphasé (multipolaire)
Fig. 2-2

II.2. Description des alternateurs industriels

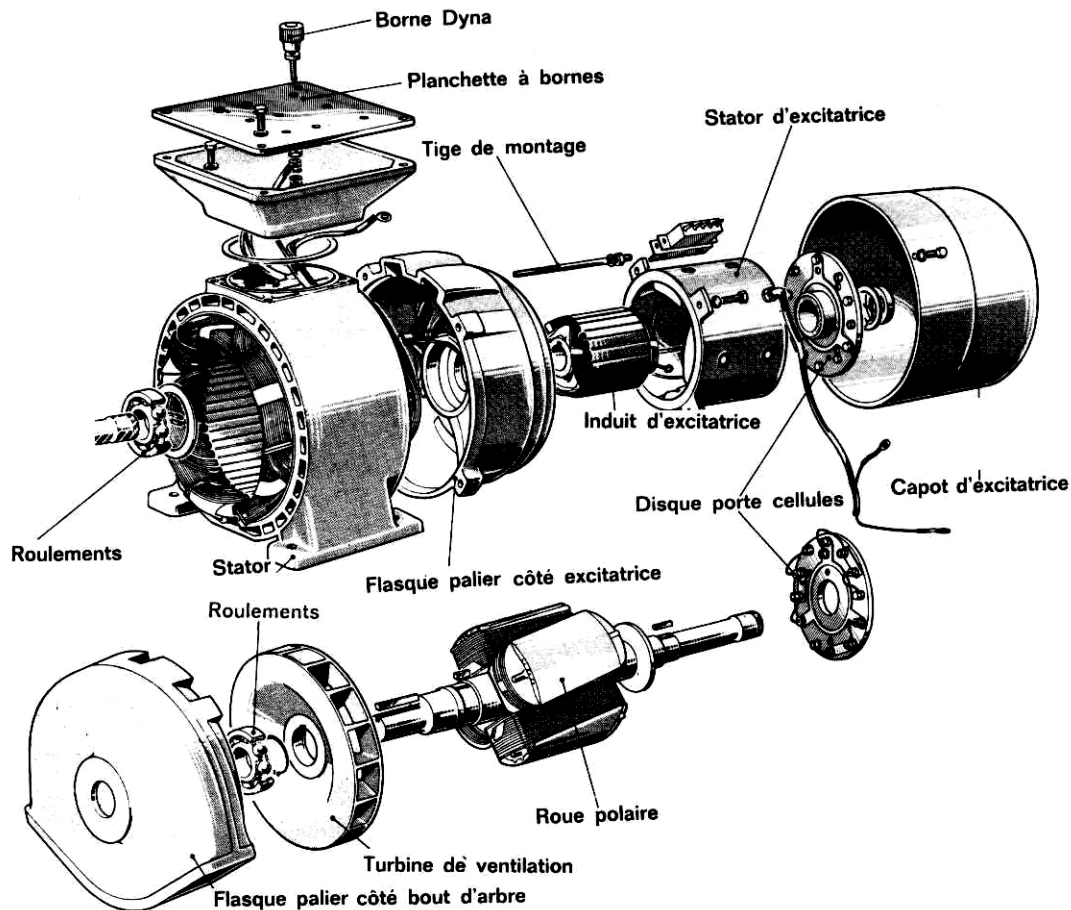
Sur la fig.2-3 on peut voir les parties d'un alternateur d'expérimentation.

La fréquence f (en Hz) des grandeurs électriques statoriques et la fréquence de rotation n (en tr/s) de l'inducteur sont liées par la relation

$$f = p n$$

Pour $f = 50$ Hz le rotor doit tourner à la fréquence $n_s = 50 / p$ (en tr/s), soit en tr/min

$$n_s = 3000 / p \text{ (tr/min)}$$



Alternateur d'expérimentation (Moteurs Leroy)
Fig. 2-3

n_s est appelé **fréquence de synchronisme** de l'alternateur.

Le nombre de paire de pôles p dépend donc de la vitesse du moteur d'entraînement; selon cette vitesse on classe les alternateurs en deux grandes catégories.

II.2.1. Alternateurs à pôles lisses

Lorsque le moteur est une turbine à vapeur, la fréquence de rotation est nécessairement élevée, supérieure à 1000 tr/min, ce qui laisse deux cas possibles:

- $p = 1 \quad \Rightarrow \quad n_s = 3000 \text{ tr/min}$
- $p = 2 \quad \Rightarrow \quad n_s = 1500 \text{ tr/min.}$

Les alternateurs entraînés par une turbine à vapeur ont (en France):

- 2 pôles lorsque $S_n \leq 660 \text{ MVA}$,
- 4 pôles lorsque $S_n > 660 \text{ MVA}$.

Rotor : La fréquence de rotation élevée exige que, pour réduire les effets centrifuges à la périphérie du rotor, le diamètre de l'entrefer soit limité; d'autre part, le champ magnétique étant fixe par rapport au rotor, celui-ci n'a pas besoin d'être feuilleté.

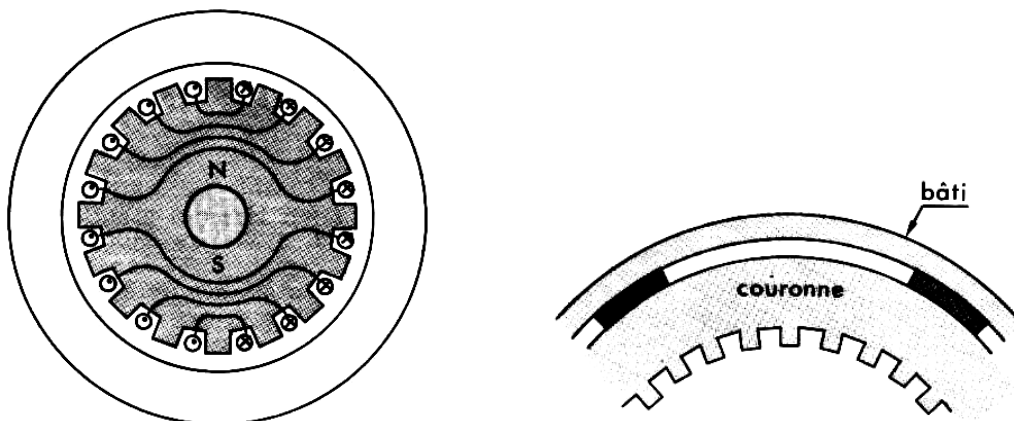
En conséquence le rotor se présente comme un cylindre d'acier massif solidaire de l'arbre, dont le diamètre est de l'ordre du mètre; sur la surface cylindrique, des encoches ont été fraisées, parallèlement à l'axe, afin de recevoir l'enroulement inducteur.

L'alternateur est alors dit à **pôles lisses** ou à entrefer constant (fig. 2-4a).

Le diamètre étant réduit il faut, pour obtenir des f.é.m. induites notables dans l'enroulement statorique, donner à la longueur axiale de la machine une valeur importante: dans les alternateurs de grande puissance, elle est comprise entre 15 et 20 mètres, ce qui pose des problèmes délicats.

Malgré le diamètre relativement réduit du rotor, les conducteurs de l'inducteur sont soumis à des accélérations radiales considérables. En conséquence, les conducteurs sont maintenus par des clavettes en bronze fermant les encoches; toutes ces clavettes, court-circuitées aux deux extrémités du rotor, constituent une sorte d'enroulement dit "en cage d'écureuil" (indépendant de l'enroulement inducteur) et appelé **amortisseurs**.

Stator. Le stator est la partie **fixe** du circuit magnétique; soumis à un champ tournant, il est le siège de courants de Foucault et du phénomène d'hystérésis: par suite il est constitué d'un empilage de tôles d'acier au silicium, perpendiculaires à l'axe de la machine, ayant la forme de couronnes.



a) Rotor

b) Stator

Alternateur à pôles lisses

Fig. 2-4

Sur sa surface cylindrique interne le stator porte des encoches, parallèle à l'axe, régulièrement distribuées, dans lesquelles sont logés les conducteurs de l'enroulement d'induit (fig. 2-4b). Les couronnes du stator, avec leurs encoches, sont découpées à la presse dans les tôles ferromagnétiques.

Lorsque la puissance de l'alternateur est élevée les couronnes statoriques, au lieu d'être découpées d'un seul morceau dans des tôles ordinaires, sont constituées de plusieurs portions identiques en tôles à cristaux orientés: la direction privilégiée de l'acier est disposée suivant le rayon moyen de la portion considérée.

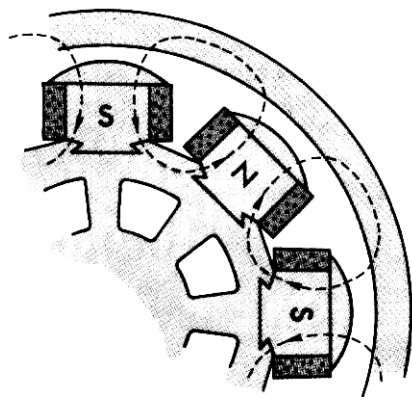
L'alternateur à pôles lisses, entraîné par une turbine à vapeur, équipe les centrales thermiques, classiques (fuel ou charbon) et nucléaire. Il s'agit de machines de très grande puissance:

II.2.2. Alternateurs à pôles saillants

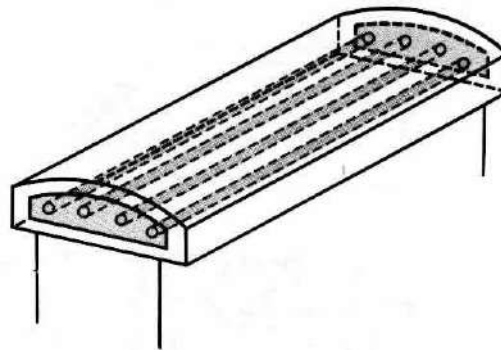
Rotor. Lorsque la turbine est hydraulique, sa fréquence de rotation est toujours très inférieure à 1000 tr/min; or, cette fréquence est la fréquence de synchronisme n_s de l'alternateur; celui-ci doit donc présenter un nombre de pôles d'autant plus grand que n_s est plus faible devant 3000 tr/min:

$$n_s = 3000 / p \quad \Rightarrow \quad p = 3000 / n_s \quad (n_s \text{ en tr/min})$$

Dès que le nombre de pôles est supérieur à quatre le rotor est constitué d'un volant portant à sa périphérie $2p$ électro-aimants de polarités successives Nord et Sud (d'où le nom de pôles saillants) (fig. 2-5a).



a) Rotor



b) Amortisseur

Alternateur à pôles saillants

Fig. 2-5

Avec cette disposition le nombre de pôles peut être élevé (plusieurs dizaines); mais le diamètre de l'ensemble (appelé roue polaire) augmente avec $2p$ et peut atteindre 7 à 8 mètres lorsque $2p$ est de l'ordre de 40 à 60.

Comme pour les alternateurs précédents le rotor étant fixe par rapport au champ, peut être massif; cependant par suite de leur passage devant les encoches du stator, les épanouissements polaires (et parfois même les noyaux polaires) sont feuilletés.

Les alternateurs à pôles saillants possèdent également des amortisseurs (fig. 2-5b): ils sont constitués de barres conductrices placées à la périphérie des épanouissements polaires et réunies par des portions d'anneau conducteurs sur les faces latérales (ou même réunies par un anneau complet sur chacune des faces).

Stator. Il est théoriquement identique à celui des alternateurs à pôles lisses mais son diamètre est très supérieur.

Les alternateurs à pôles saillants équipent les centrales hydrauliques: leur technologie, leur vitesse et leur puissance dépendent de la hauteur et du débit de la chute d'eau.

Remarque: Tout alternateur industriel, que son rotor soit à pôles lisses ou à pôles saillants, est nécessairement équipé d'un dispositif spécial appelé **système d'excitation** dont le rôle est de débiter le courant continu I dans l'enroulement rotorique.

II.3. F.é.m. à vide

On a déterminé que la f.é.m. induite dans la 1^{ère} phase a pour expression :

$$e = E \sqrt{2} \cos(\omega t - \pi/2) = E \sqrt{2} \sin \omega t$$

avec: $E = \pi \sqrt{2} N l r n B_{\max}$ et $\omega = p\Omega$

Il est préférable d'utiliser le flux embrassé par chacune des spires Φ et non l'induction du champ magnétique B .

Pour une machine bipolaire

Chaque phase comportant $N/2$ spires le flux sinusoïdal Φ_a pour amplitude :

$$\Phi_{\max} = (2 \sqrt{2} / N \omega) E = (2 \sqrt{2} / N \omega) (\pi \sqrt{2} N l r n B_{\max}) = 2 l r B_{\max}$$

Pour chaque machine donnée (l et r fixés) $\Phi_{\max}$ et $B_{\max}$ sont proportionnels. Le flux $\Phi_{\max}$ est dû à l'ensemble des lignes de champ issues d'un pôle de l'inducteur et traversant l'entrefer : on l'appelle **flux utile par pôle**.

Dans le cas d'une machine multipolaire la pulsation $\omega = p\Omega = p(2\pi n)$. On doit écrire :

$$\Phi_{\max} = (2 \sqrt{2} / N \omega) E = 2/p l r B_{\max}$$

Désormais il est facile d'exprimer la valeur efficace E des f.é.m. induites en fonction de $\Phi_{\max}$, quel que soit le nombre de pôles :

$$E = \pi \sqrt{2} \cdot N \cdot (pn) \cdot \Phi_{\max}, \text{ mais } f = pn$$

$$E = \pi \sqrt{2} \cdot N \cdot f \cdot \Phi$$

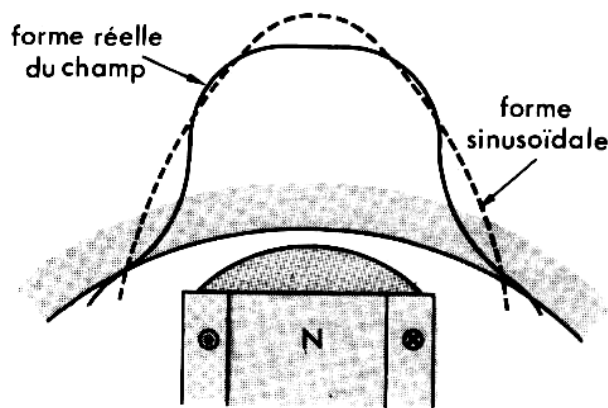
Dans tous les raisonnements chaque bobine était supposée répartie dans une seule paire d'encoches ; on parle d'enroulement massé. Cet enroulement massé présente un inconvénient grave – la place disponible le long de l'entrefer est mal utilisée. En réalité les spires de chaque bobine sont disposées dans plusieurs paires d'encoches régulièrement décalées. L'enroulement est dit réparti.

L'enroulement réparti présente aussi un inconvénient : les f.é.m. induites dans les différentes paires d'encoches d'une même bobine ne sont pas exactement en phase. La f.é.m. induite résultante dans un enroulement réparti est plus faible que dans un enroulement massé.

$$E_{\text{reparti}} = k_b E_{\text{massé}}$$

Le coefficient k_b est inférieur à 1 et il est appelé **facteur de bobinage**.

Dans toutes les hypothèses on suppose que la forme de l'onde de champ magnétique dans l'entrefer est sinusoïdale. La réalité est proche dans les alternateurs à pôles lisses, mais ce n'est pas le cas dans les alternateurs à pôles saillants : l'onde de champ a une répartition qui s'écarte d'une sinusoïde (on atténue le phénomène en augmentant l'entrefer en face des cornes des épanouissements polaires) (fig. 2-6).



Répartition de l'onde dans l'entrefer d'un alternateur à pôles saillants
Fig. 2-6

Les f.é.m. induites dans les phases ne sont plus exactement sinusoïdales. L'expression de E peut se mettre sous la forme :

$$E = k_f (\pi/\sqrt{2} k_b N f \Phi_{\max})$$

k_f est un facteur correctif dit **facteur de forme** de l'alternateur; sa valeur est légèrement supérieure à 1.

En conclusion, l'expression définitive de E s'écrit :

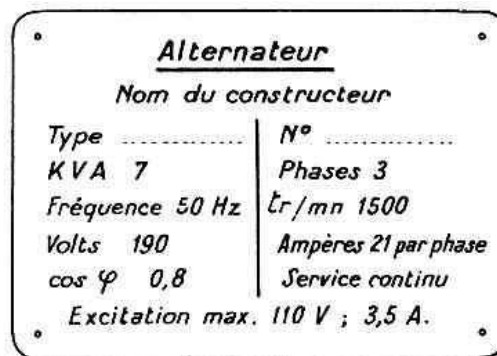
$$E = \pi/\sqrt{2} \cdot k_f \cdot k_b \cdot N \cdot f \cdot \Phi_{\max}$$

Le produit $k = \pi/\sqrt{2} k_f k_b$ est le **facteur de Kapp** de la machine : il est toujours voisin de $\pi/\sqrt{2} = 2,22$ (puisque $k_b < 1$ et $k_f > 1$).

II.4. Plaque signalétique

Elle porte le nom du constructeur et le numéro d'ordre de fabrication, puis des indications techniques (fig.2-7) :

- Nombre de phases
- Puissance apparente utile
- Service
- Tension entre bornes
- Courant débité
- Facteur de puissance
- Vitesse de rotation
- Conditions d'excitation (tension et intensité maximale) ;



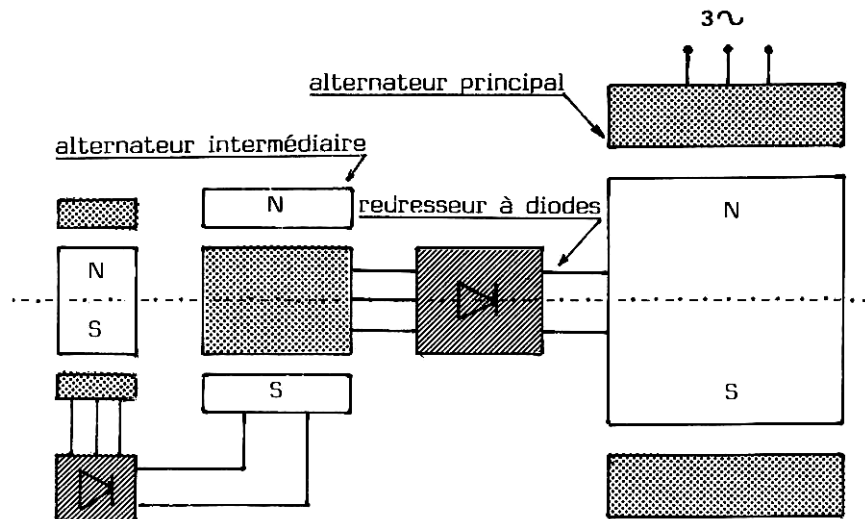
Plaque signalétique d'un alternateur
Fig.2-7

II.5. Système d'excitation d'une machine synchrone

Excitation statique. Jusqu'à une époque récente, le courant continu nécessaire à l'excitation du rotor de l'alternateur était fourni par une génératrice à courant continu montée en bout d'arbre. Le courant continu était transmis au rotor par deux bagues en bronze, le réglage de l'intensité de ce courant étant obtenu par le réglage du courant de l'inducteur de la génératrice. Ce procédé présente les inconvénients suivants :

- La dynamo, en raison de son collecteur, est une machine qui réclame un certain entretien ; de plus, en raison des étincelles du collecteur, on augmente les risques d'explosions ;
- Le contact entre les balais fixes et les bagues tournantes est une source d'inconvénients et de pannes.

Les alternateurs modernes utilisent, pour leur excitation, un système dit « à diodes tournantes » (fig. 2-8).



Excitation « à diodes tournantes »

Fig. 2-8

L'excitation de l'alternateur principal est assurée par un alternateur intermédiaire auquel on adjoint un redresseur à diodes. Cet alternateur a une disposition inversée, le stator étant l'inducteur alors que le rotor est l'induit, ainsi ce dernier (avec son redresseur) peut-il alimenter directement le rotor de l'alternateur principal.

L'alimentation en courant continu du stator de l'alternateur intermédiaire est assurée par un alternateur d'excitation muni d'un redresseur à diodes. Cet alternateur dont la disposition est classique (induit fixe et inducteur tournant) a comme rotor un aimant permanent. C'est au niveau de cet alternateur qu'interviennent les dispositifs de régulation.

II.6. Exercice

On considère un alternateur triphasé à 4 pôles lisses dont l'enroulement statorique, monté en étoile, est à bobines séparées logées dans 36 encoches. Le rayon moyen de l'entrefer est de 115 mm et la longueur des conducteurs actifs de 160 mm, k_b (le facteur de bobinage) = 0,96.

- Sachant que chaque encoche contient 5 conducteurs, calculer le flux utile par pôle $\Phi_{\max}$ lorsque la tension composée à vide U_0 vaut 220 V.
- En déduire l'amplitude $B_{\max}$ de l'onde de champ magnétique le long de l'entrefer.
- En admettant que la f.m.m. du rotor soit entièrement utilisée à créer le champ dans l'entrefer (d'épaisseur 1 mm), calculer le nombre total de spires N' de l'enroulement inducteur. (On obtient $U_0 = 220$ V lorsque $J = 9$ A).

Solution :

L'enroulement statorique étant monté en étoile, la f.é.m. induite dans chaque phase a pour valeur efficace

$$E = 220 / \sqrt{3} \text{ V}$$

Lorsque $U_0 = 220$ V.

Or l'expression littérale de E s'écrit

$$E = \pi / \sqrt{2} k_b N f \Phi_{\max}$$

Chacune des phases étant répartie dans 12 encoches, on a $N = 12 \times 5 = 60$ conducteurs; d'où:

$$\begin{aligned}\Phi_{\max} &= E \sqrt{2} / \pi k_b N f \\ \Phi_{\max} &= 220 \sqrt{2} / \sqrt{3} \times \pi \times 0,96 \times 60 \times 50 = 19,9 \cdot 10^{-3} \text{ Wb} \\ \Phi &\approx 20 \text{ mWb}\end{aligned}$$

Le flux utile par pôle $\Phi_{\max}$ a pour expression

$$\Phi_{\max} = 2/p l r B_{\max}$$

donc $B_{\max} = p/2 \times \Phi/l r$

Pour la machine considérée on a $p = 2$; d'où

$$B = 2/2 \times 19,9 \cdot 10^{-3} / 0,16 \cdot 0,115 = 1,08 \text{ T}$$

$$B \approx 1,1 \text{ T}$$

Une ligne de champ qui traverse l'entrefer dans des régions voisines de l'axe d'un pôle Nord et de l'axe du pôle Sud correspondant, enlace $N'/2$ spires de l'inducteur (car cet inducteur est à 4 pôles). Si l'on ne tient pas compte que des deux traversées de l'entrefer, le théorème d'Ampère s'écrit :

$$N'/2 J = 2 H e' \quad , \quad \text{où } e' = \text{épaisseur de l'entrefer}$$

$$N' = [4 (B_{\max} / \mu_0) e'] / J \Rightarrow N' = 4 \times 1,08 \times 10^{-3} / 4 \times 10^{-7} \times 9 = 382$$

$$N' = 380 \text{ spires}$$

III. Alternateur autonome

Un alternateur présente un fonctionnement dit autonome lorsqu'il est le seul à fournir de l'énergie électrique à un réseau ou à un récepteur.

C'est par exemple le cas d'un alternateur alimentant l'installation électrique d'un chantier ou en secours une installation prioritaire (hôpital, central téléphonique, etc.).

Les applications de l'alternateur autonome sont limitées mais en principe chaque alternateur peut être supposé autonome jusqu'à ce qu'il ne soit pas branché dans un réseau et la théorie est applicable dans tous les cas.

III.1. Diagramme de fonctionnement

a) Réaction de l'induit

Comme dans le cas d'une génératrice à courant continu, quand un alternateur débite, le courant de l'enroulement induit crée un champ qui vient perturber le champ de l'inducteur. C'est pour cette raison que ce phénomène est appelé réaction de l'induit.

Donc, si on exprime ce phénomène par une équation électrique adoptant la **convention générateur** pour chaque phase statorique de résistance R , on aura :

$$e_c = e - L_c \frac{di}{dt} \quad , \quad \begin{array}{l} e_c - \text{f.é.m. en charge} \\ e - \text{f.é.m. à vide} \\ L_c - \text{inductance cyclique du stator (qui détermine la} \\ \quad \text{réaction de l'induit)} \end{array}$$

ou encore $v = e_c - Ri = e - L_c \frac{di}{dt} - Ri$
donc

$$e = v + Ri + L_c \frac{di}{dt}$$

b) Diagramme de Behn-eschenburg

D'après la relation précédente on peut faire la représentation de Fresnel (fig.3-1b), Représentant les différents termes de la relation

$$e = v + Ri + L_c \frac{di}{dt}$$

$$\vec{E} = \vec{V} + R\vec{I} + X\vec{I}$$

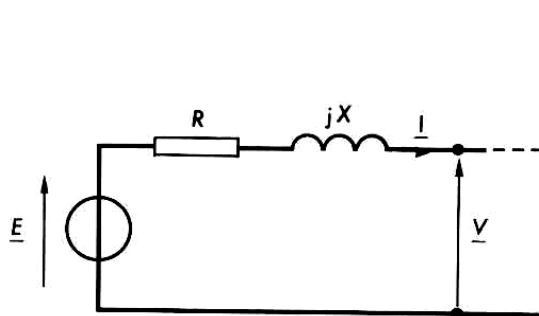
Avec $X = L_c \omega$ la réactance synchrone

φ est imposé par la charge ($\cos \varphi$ est son facteur de puissance)

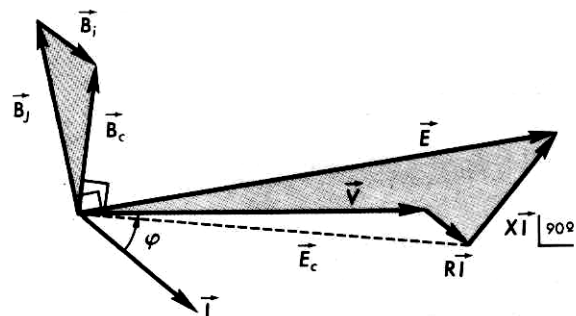
c) Modèle de Behn-eschenburg

chaque phase du stator se comporte comme un générateur de Thévenin de f.é.m. E et d'impédance $Z = R + jX$ (fig.3-1a):

$$\vec{E} = \vec{V} + R\vec{I} + X\vec{I}$$



a) Circuit électrique ;



b) Diagramme de Fresnel

Modèle de Behn-Eschenburg d'une génératrice synchrone
Fig.3-1

Cette représentation simplifiée, qui s'appelle le modèle de Behn – Eschenburg, a été faite sous condition que le circuit magnétique ne soit pas saturé. Dans ce cas le flux magnétique est proportionnel à l'induction du champ B et respectivement au courant J . Il permet d'étudier le fonctionnement en charge à partir de la f.é.m. à vide.

III.2. Eude expérimentale de l'alternateur :

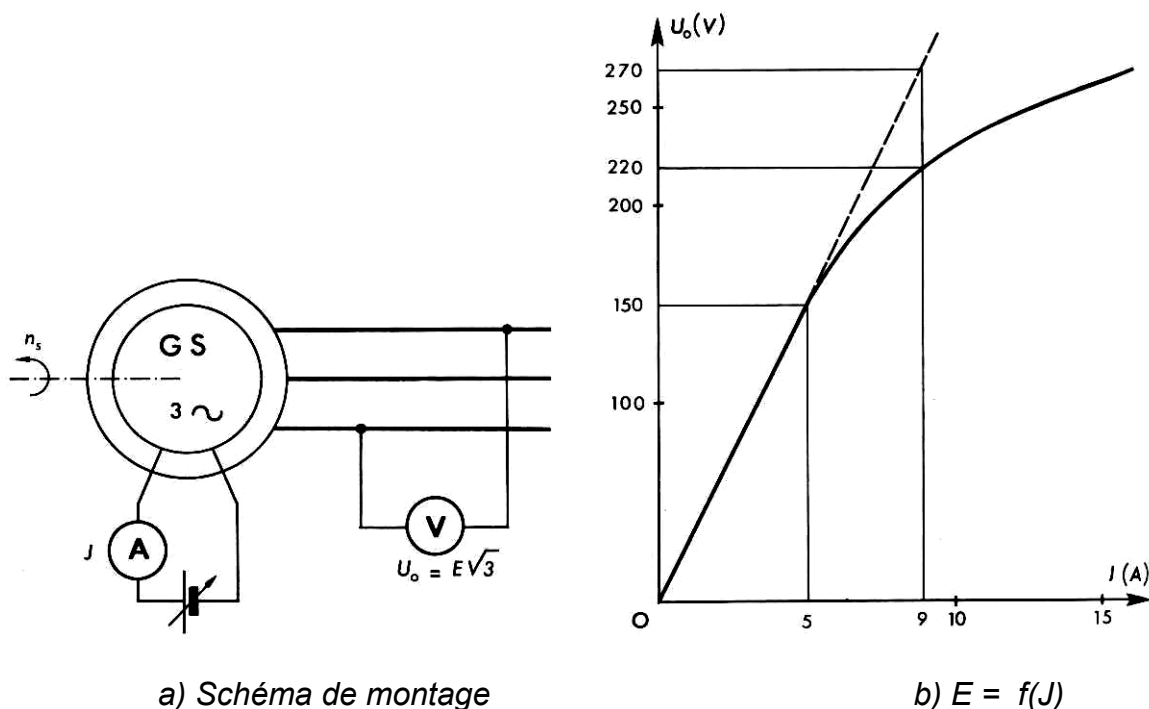
a) Fonctionnement à vide

Le stator d'un alternateur est pratiquement toujours couplé en étoile. C'est pourquoi on présente les grandeurs électriques suivantes :

- Les tensions simples par V ;
- Les tensions composées par U ;
- Les courants de phase (donc par fil de ligne) par I ;
- Le courant inducteur par J .

L'alternateur étant entraîné par un moteur auxiliaire à la fréquence de rotation n_s et l'enroulement statorique étant ouvert (fig.3-2a), on fait croître le courant inducteur J et on mesure les valeurs correspondantes de la tension entre bornes de phase $U_0 = E\sqrt{3}$ (pour un couplage « étoile »).

On appelle caractéristique à vide d'un alternateur le graphe de la fonction $E = f(J)$. (fig.3-2b).



Caractéristique à vide d'un alternateur
Fig. 3-2

La caractéristique à vide comporte deux parties. Lorsque le courant inducteur J est suffisamment faible, E est proportionnel à J : le circuit magnétique n'est pas saturé. Si le courant J continue d'augmenter, E augmente moins vite : le circuit commence à se saturer.

En général, le point de fonctionnement $U_0 = U_n$ se trouve dans le « coude » de la courbe de magnétisation, c'est-à-dire le circuit magnétique est déjà saturé.

Intérêt :

- Il permet de construire la caractéristique à vide $E = f(J)$,
- La puissance à vide P_0 est égale à la somme :

$$P_0 = P_{\text{mag}} + P_{\text{mec}}$$

On peut ainsi construire le graphe des pertes à vide $P_0 = f(J)$ (fig.3-3),

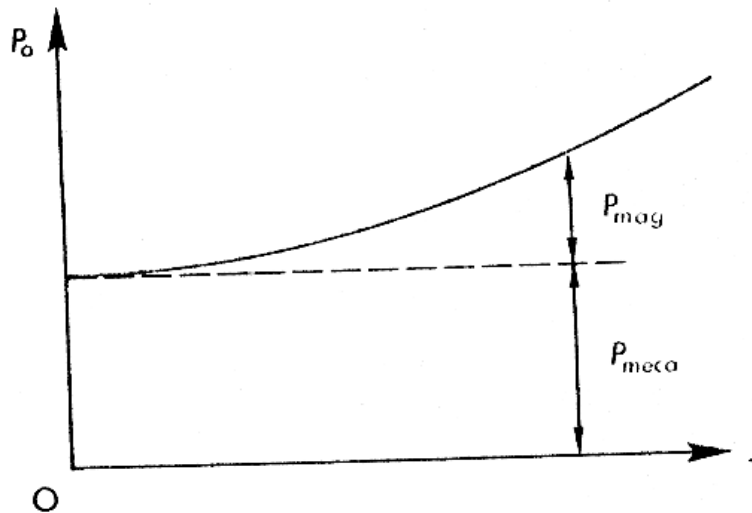


Fig. 3-3

b) Fonctionnement en court-circuit :

Montage et mesure : (fig.3-4),

Les trois phases sont court-circuitées et un ampèremètre permet de mesurer le courant I dans l'une d'elles.

On mesure le courant I correspondant (que nous noterons I_{cc}) et la puissance P_{cc} fournie par le moteur d'entraînement.

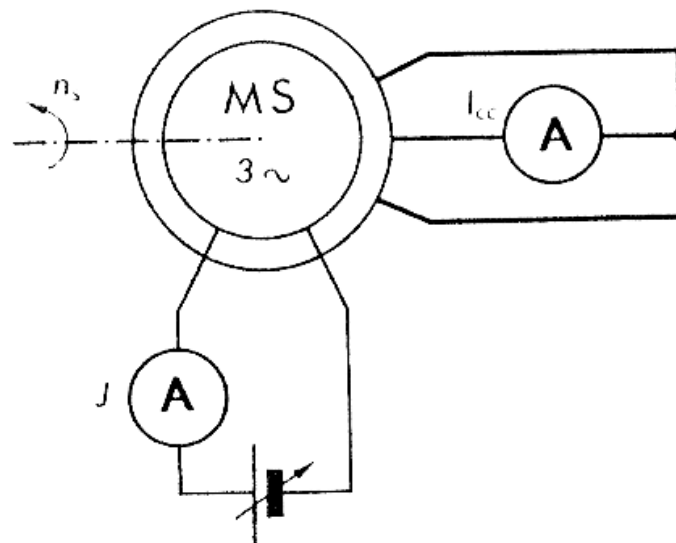


Fig. 3-4

Intérêt :

- Dans l'essai en court-circuit, les pertes magnétiques sont très faibles devant celles dues à l'effet Joule: la puissance P_{cc} fournie sur l'arbre est égale à

$$P_{cc} = P_{méca} + 3 R I_{cc}^2$$

$$\text{Donc } R = (P_{cc} - P_{méca}) / 3. I_{cc}^2$$

- En court-circuit, la théorie de Behn-Eschenburg est applicable. Le modèle de l'alternateur (fig. 3-5a) donne alors

$$\vec{E} = R \vec{I}_{cc} + X \vec{I}_{cc} \quad (V = 0)$$

Le diagramme vectoriel correspondant se réduit au triangle OAB (fig. 3-5.b)

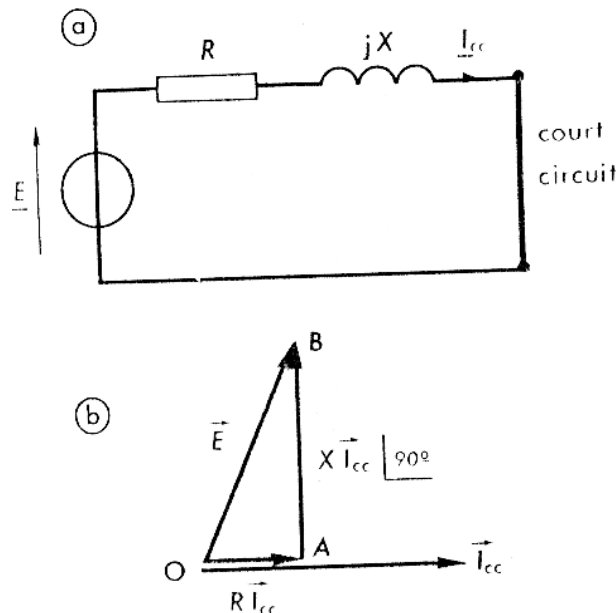


Fig. 3-5

On peut donc écrire :

$$E^2 = (R I_{cc})^2 + (X I_{cc})^2 \quad \text{donc} \quad E = \sqrt{R^2 + X^2} \times I_{cc} = Z \times I_{cc}$$

E et I_{cc} sont proportionnels: comme E est proportionnel à J (absence de saturation), on en déduit que le courant de court-circuit I_{cc} est proportionnel à J .

La caractéristique de court-circuit $J = f(I_{cc})$ est en effet une droite passant par l'origine (fig.3-6).

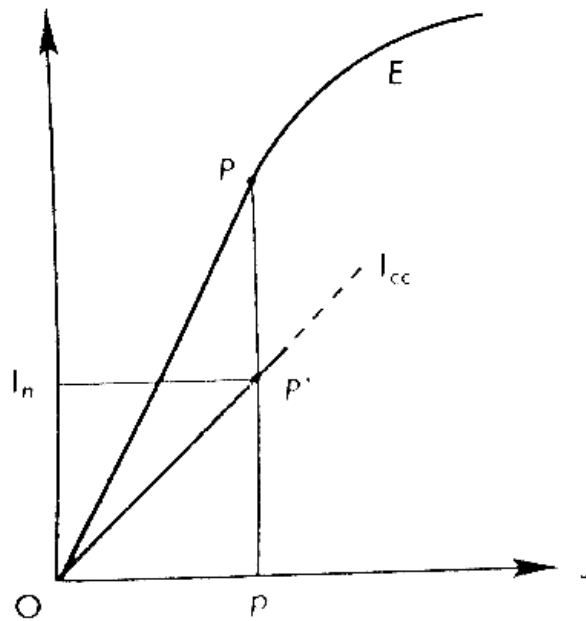


Fig. 3-6

Sur un même système d'axes on construit caractéristique à vide $E = f(J)$ et la caractéristique de court-circuit $J = f(I_{cc})$

Si on fait le rapport des ordonnées de deux points ayant la même abscisse, on obtient :

$$\frac{pP}{pP'} = \frac{E}{I_{cc}} = Z \quad \text{et on aura } X = \sqrt{Z^2 - R^2}$$

L'essai en court-circuit permet donc de connaître l'impédance synchrone

III.3. Courbes de fonctionnement

La vitesse d'entraînement d'un alternateur étant constante (vitesse de synchronisme), la tension V (par phase) est fonction de trois paramètres :

$V = f(I, J, \varphi)$. Pour simplifier les études on ne fait varier que l'un de ces trois paramètres à la fois.

Dans la pratique, on se limite généralement à la représentation de deux familles de courbes :

- $V = f(I)$ à $J = \text{Cte}$ et $\cos \varphi = \text{Cte}$, ce sont les caractéristiques externes;
- $J = f(I)$ à $V = \text{Cte}$ et $\cos \varphi = \text{Cte}$, ce sont les courbes de réglage.

a) Caractéristiques externes

Pour relever les caractéristiques l'on dispose des deux méthodes : directe et indirecte. La méthode directe est utilisable seulement pour les alternateurs de faible puissance qui peuvent être mis en état de marche et faits débiter dans différentes

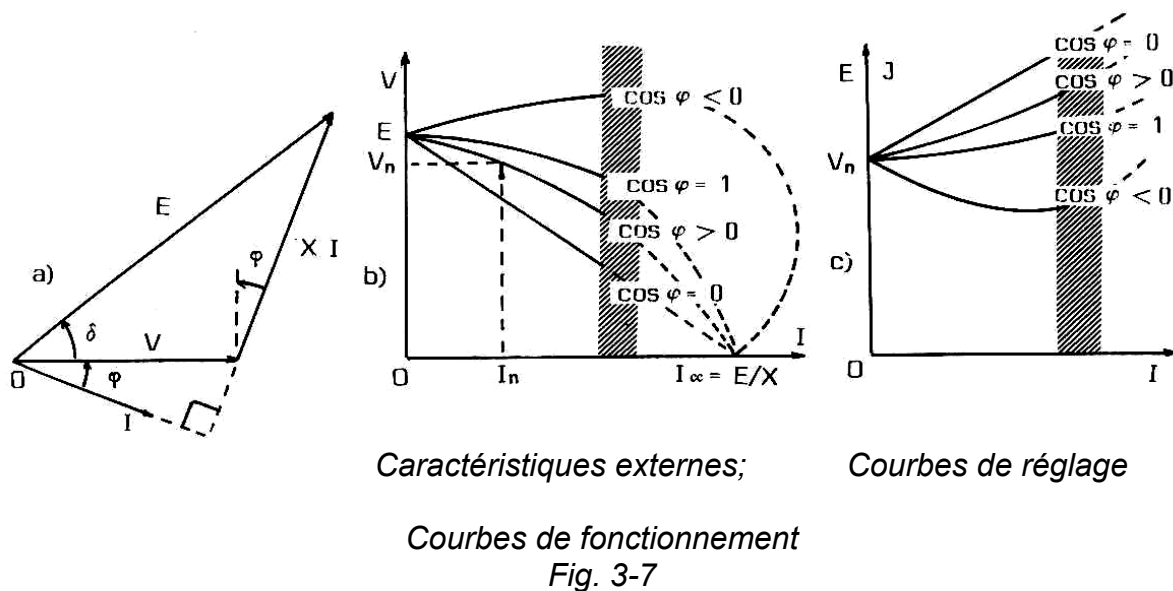
charges. Pour les alternateurs de grande puissance on utilise la méthode indirecte qui utilise les diagrammes vectoriels et les essais à vide et en court-circuit.

Pour représenter la relation $f(V, I)$ pour une valeur de φ donnée, on peut utiliser le diagramme simplifié d'un alternateur (fig.3-7a), ce qui donne :

$$E^2 = V^2 + (X I)^2 + 2 V X I \sin \varphi$$

On en déduit les résultats suivants:

- Pour $\cos \varphi = 1$, la courbe est une ellipse dont les axes coïncident avec les axes de coordonnées.
- Pour $\cos \varphi = 0$, la courbe est une droite qui coupe l'axe des intensités au point $I = E / X$.
- Pour les déphasage du courant en arrière sur la tension, les courbes sont des arcs d'ellipses compris entre les courbes précédentes (fig.3-7b) tandis que pour des déphasages en avant, les arcs d'ellipses sont extérieurs. Dans ce deuxième cas, on peut observer un phénomène de surtension ($V > E$);



Caractéristiques externes;

Courbes de réglage

Courbes de fonctionnement
Fig. 3-7

b) Courbes de réglage

Pour des charges résistives ou inductives, la tension V décroît lorsque I augmente (la réaction d'induit démagnétisante), pour des charges très capacitives (peu fréquentes dans la pratique) la tension V croît avec I (la réaction d'induit magnétisante).

Tout débit sur un circuit inductif oblige le distributeur, pour garder la valeur de la tension V constante, à augmenter le courant d'excitation J de l'alternateur. La mise en service d'une batterie de condensateurs, au contraire, l'oblige à réduire l'excitation (fig.3-7c).

III.4. Pertes et Rendement

Le rendement est le rapport de la puissance utile P_u fournie par l'alternateur au circuit d'utilisation à la puissance absorbée P_a :

$$\eta = P_u / P_a$$

On distingue deux méthodes de détermination : directe et indirecte. La méthode directe a pour avantage qu'elle donne le rendement vrai, mais en revanche comme inconvénients, d'une part de nécessiter des essais en charge et d'autre part d'avoir à mesurer une puissance mécanique.

La méthode indirecte est basée sur le calcul des pertes. Bien qu'approchée, elle est plus facile et plus utilisée.

Si p représente les pertes totales de l'alternateur, on a $P_a = P_u + p$, donc :

$$\eta = P_u / (P_u + p)$$

Comme pour les autres machines on peut classer les pertes en deux catégories :

- Les pertes constantes : les pertes mécaniques, les pertes fer
 - Les pertes variables : les pertes par effet Joule et les pertes par excitation;
- Les pertes mécaniques sont dues au frottement de l'arbre sur les paliers et à la résistance de l'air au mouvement du rotor et ne dépendent que de la vitesse de rotation qui est invariable (égale à la vitesse de synchronisme n_s).
 - Les pertes fer sont dues au hystérésis et au courant de Foucault et ne dépendent que de la fréquence et de l'induction maximale dans l'entrefer. Pour un alternateur débitant sur un circuit à tension constante ces deux grandeurs sont aussi constantes.
 - Les pertes Joule dans l'induit. Si R désigne la résistance d'une phase, on a :

$$P_J = 3 R I^2$$

L'expression du rendement est la suivante :

$$\eta = \frac{\sqrt{3} U I \cos\varphi}{\sqrt{3} U I \cos\varphi + P_{mag} + P_{mec} + 3 R I^2 + P_{ex}}$$

si on ne prend pas compte des de la puissance P_{ex} on obtient le rendement de l'alternateur seul

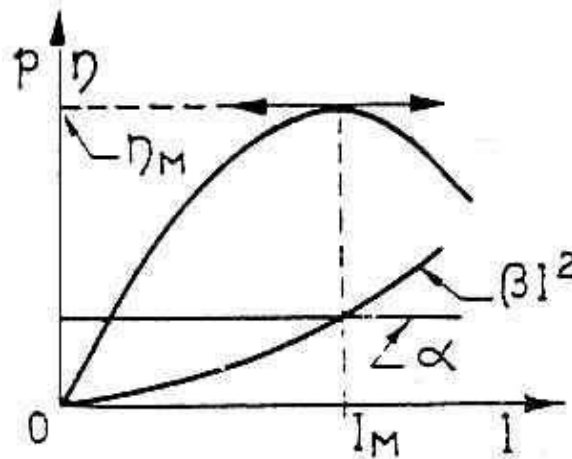
$$\eta = \frac{\sqrt{3} U I \cos\varphi}{\sqrt{3} U I \cos\varphi + P_{mag} + P_{mec} + 3 R I^2}$$

Si α et βI^2 désignent respectivement les pertes constantes et les pertes variables avec la charge, on a :

$$\eta = 3 V I \cos \varphi / (3 V I \cos \varphi + \alpha + \beta I^2)$$

On arrive à la même conclusion que pour les autres types de machines (fig. 3-8):

Le rendement d'un alternateur est maximal quand les pertes constantes sont égales aux pertes variables avec la charge.



3-8

III.5. Exercices

Un alternateur triphasé de 5 kVA, tétrapolaire présente une tension nominale de 220 V-50 Hz entre fils de phase. .

- A vide, pour $n = n_s$, on a relevé le tableau suivant :

J (A)	0	1	2	2,3	4	5,8	6,8
E (V)	0	35	70	80	120	147	155
P₀ (W)	150	165	210	225	320	400	430

(P₀ présente la puissance fournie sur l'arbre)

- En court-circuit, pour $n = n_s$, il faut un courant d'excitation $J = 2,3$ A pour obtenir $I_{cc} = I_n$. La puissance P_{cc} fournie sur l'arbre vaut alors 560 W.

(Dans les 2 essais, l'inducteur est alimenté par une source auxiliaire grâce à deux contacts glissants)

- 1) Calculer :
 - a) la fréquence de synchronisme.
 - b) Le courant nominal.
- 2) Pour que l'alternateur débite son courant nominal sous la tension $U = 220 \text{ V}$ dans une charge résistive, le courant d'excitation doit prendre la valeur $J = 5,8 \text{ A}$.
 - a) Calculer la valeur correspondante de la réactance synchrone.
 - b) Quelle tension U pouvait-on prévoir par la méthode de Behn-Eschenburg, à partir des essais à vide et en court-circuit ?
 - c) En déduire l'erreur relative sur la tension due à cette méthode.
- 3) Le courant inducteur restant égal à $5,8 \text{ A}$, déterminer graphiquement, pour $I = I_n$, la tension U si le déphasage φ prend les valeurs 30° et -30° .
(On adoptera pour X la valeur déterminée à la question 2.a)).
- 4)
 - Calculer le rendement de l'alternateur dans le 1^{er} cas du 3).
 - a) Pour quelle charge ce rendement serait-il maximal
 - si le déphasage reste égal à 30° ,
 - et si la tension est maintenue constante par action sur J ?
 Calculer la valeur du rendement maximal.

Solution :

- 1)
 - a) La fréquence de synchronisme est telle que :

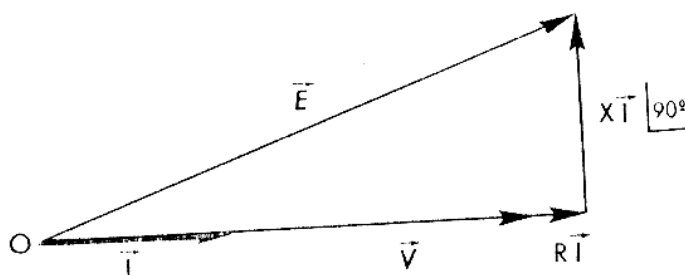
$$n_s = 3000 / p = 3000 / 2 = \mathbf{1500 \text{ tr / min}}$$

- b) Le courant de charge a pour valeur nominale

$$I_n \frac{S_n}{U_n \cdot \sqrt{3}} = \frac{5000}{220 \cdot \sqrt{3}} = 13,1 \text{ A}$$

$$\mathbf{I_n = 13,1 \text{ A}}$$

- 2)
 - a) Le déphasage φ entre I et V étant nul, le diagramme vectoriel se réduit à un triangle :



$$\text{Donc } (XI)^2 = E^2 - (V+RI)^2 \longrightarrow X = \sqrt{E^2 - (V+RI)^2} / I$$

$$\text{La f.e.m. } E \text{ est donnée par la caractéristique à vide } J = 5,8 \text{ A} \longrightarrow E = 147 \text{ V}$$

La résistance R peut être déterminée grâce à l'essai en court-circuit. En effet, la puissance fournie sur l'arbre est alors égale à la somme :

- des pertes mécaniques $P_{\text{méca}}$ (c'est la puissance de 150 W absorbée à vide sans excitation);
- des pertes par effet Joule $P_J = 3.R.I_{\text{cc}}^2$

$$P_{\text{cc}} = P_{\text{mec}} + 3.R.I_{\text{cc}}^2 \longrightarrow R = (P_{\text{cc}} - P_{\text{mec}}) / (3. I_{\text{cc}}^2) = (560 - 150) / (3.13,1^2)$$

$$R = 0,8 \Omega$$

La réactance synchrone correspondant au fonctionnement indiqué dans la question 2 vaut donc

$$X = \sqrt{147^2 - (127 + 0,8 \times 13,1)^2} / 13,1 = 3,97 \Omega$$

$$\mathbf{X = 4 \Omega}$$

b) En court circuit I_{cc} est proportionnel au courant d'excitation J , avec $J = 5,8 \text{ A}$ nous aurons

$$I_{\text{cc}} = 13,1 \times \frac{5,8}{2,3} = 33 \text{ A}$$

$$\text{L'impédance } Z \text{ est } Z = 147 / 33 = 4,45 \Omega$$

$$X = \sqrt{Z^2 - R^2}$$

$$X = \sqrt{4,45^2 - 0,8^2} = 4,4 \Omega$$

$$\text{Donc } E^2 = (XI)^2 + (V+RI)^2 \longrightarrow V + RI = \sqrt{E^2 - (XI)^2}$$

$$\text{Donc } V = \sqrt{147^2 - (4,4 \times 13,1)^2} - (0,8 \times 13,1) = 124,7 \text{ V}$$

$$\text{Et } U = 124,7 \times \sqrt{3} = \mathbf{216 \text{ V}}$$

c) La tension prédéterminée est légèrement inférieure à la tension mesurée. L'erreur relative est :

$$\frac{220 - 216}{220} = 2 \%$$

$$\mathbf{L'erreur relative = 2\%}$$

3)

Adoptons pour échelle $1 \text{ mm} \rightarrow 2 \text{ V}$, et construisons

- le vecteur $\vec{I}$ (pris comme origine des angles),
- le vecteur $\vec{OA} = R \vec{I}$ tel que

$$RI = 0,8 \times 13,1 = 10,5 \text{ V}; \quad (OA = 5,25 \text{ mm})$$

- le vecteur $\vec{AB}$ de norme

$$XI = 4 \times 13,1 = 52,4 \text{ V}; \quad (AB = 26,2 \text{ mm})$$

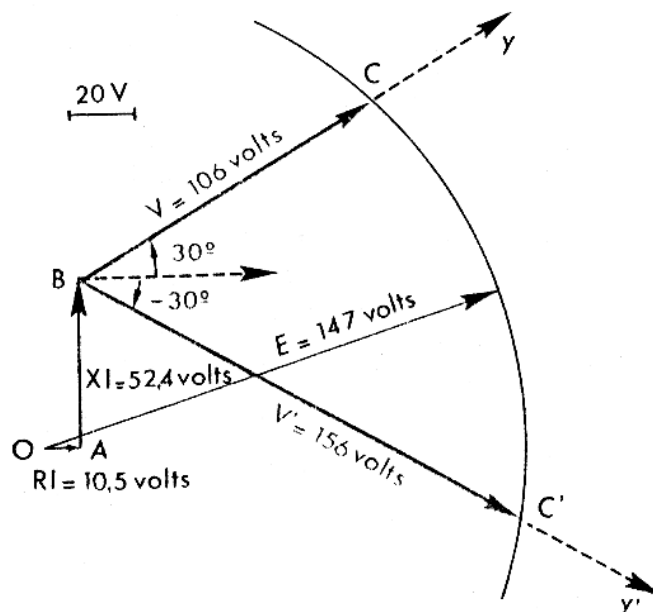
- l'axe $\vec{By}$ tel que $(\vec{I}, \vec{By}) = 30^\circ$
- l'axe $\vec{By'}$ tel que $(\vec{I}, \vec{By'}) = -30^\circ$

L'arc de cercle de centre O et de rayon $\frac{147}{2} = 73,5 \text{ mm}$

(représentant la f.é.m. $E = 147 \text{ V}$) coupe les axes $\vec{By}$ et $\vec{By'}$ en C et C', déterminant les vecteurs $\vec{BC} = \vec{V}$ et $\vec{BC'} = \vec{V'}$.

On mesure alors

- $BC = 53 \text{ mm} \Rightarrow V = 106 \text{ V}$ et $U = 106\sqrt{3} = 184 \text{ V}$
- $BC' = 78 \text{ mm} \Rightarrow V' = 156 \text{ V}$ et $U' = 156\sqrt{3} = 270 \text{ V}$



On peut regrouper les résultats dans le tableau suivant pour
 $J = 5,8 \text{ A}$ et $I = 13,1 \text{ A}$

$\varphi (^{\circ})$	30	0	- 30
$U \text{ (V)}$	184	220	270 V

4)

a)

Le rendement de l'alternateur seul peut se mettre sous la forme

$$\eta = \frac{\sqrt{3} UI \cos \varphi}{\sqrt{3} UI \cos \varphi + P_{\text{méca}} + P_{\text{mag}} + 3 RI^2}$$

Les pertes magnétiques sont fonction de la f.é.m. en charge
 $\vec{E}_c = \vec{V} + R \vec{I} \approx \vec{V}$ (en négligeant $R \vec{I}$) donc $E_c \approx 106 \text{ V}$

D'après l'étude à vide la puissance P_0 absorbée sur l'arbre a pour valeurs

- 225 W lorsque $E = 80 \text{ V}$
- 320 W lorsque $E = 120 \text{ V}$

Si on linéarise entre ces deux points la portion de la caractéristique $E \mapsto P_0$. On obtient pour $E_c = 106 \text{ V}$

$$P_0 = 225 + \frac{(320 - 225)}{120 - 80} (106 - 80) \approx 285 \text{ W}$$

Donc $P_0 = P_{\text{méca}} + P_{\text{mag}} = 285 \text{ W}$

On peut alors calculer le rendement de l'alternateur

$$\eta = \frac{\sqrt{3} \times 184 \times 13,1 \times \sqrt{3}/2}{\sqrt{3} \times 184 \times 13,1 \times \sqrt{3}/2 + 285 + 3 \times 0,8 \times 13,1^2}$$

$$\eta = \frac{3615}{3615 + 285 + 410} = 0,839$$

$$\eta = 83,9 \%$$

b)

Dans les hypothèses de la question, les pertes magnétiques qui ne dépendent que de $E_c \approx V$ sont des constantes : le rendement est maximal quand les pertes par effet Joule sont égales aux pertes constantes ($P_0 = P_{méca} + P_{mag}$) :

$$3RI^2 = P_0 \Rightarrow I = \sqrt{\frac{P_0}{3R}} \Rightarrow I = \sqrt{\frac{285}{3 \times 0,8}} = 10,9 \text{ A}$$

Le rendement est maximal lorsque le courant débité vaut

$$I = 10,9 \text{ A}$$

La valeur maximale du rendement est

$$\eta = \frac{\sqrt{3} \times 184 \times 10,9 \times \sqrt{3}/2}{\sqrt{3} \times 184 \times 10,9 \times \sqrt{3}/2 + 570} = 0,841$$

$$\eta_{\max} = 84,1 \%$$

IV. Couplage des machines synchrones à un réseau

L'alternateur autonome est un cas particulier de fonctionnement. Les alternateurs de grande puissance (supérieure à 50 kVA) des centrales électriques sont tous interconnectés, c'est-à-dire couplés sur le même réseau de distribution. Ils reçoivent tous les jours, d'un organisme central appelé « dispatching », un programme qui prévoit et fixe pour les différentes heures l'énergie à fournir sur le Réseau National.

D'autre part, le rendement d'un alternateur est maximal aux environs de sa charge nominale. Dans ces conditions, pour obtenir le meilleur rendement global de la centrale, il faut mettre de nouvelles unités en service dans les périodes chargées de la journée et les mettre hors service durant les périodes creuses.

IV.1. Conditions d'un bon couplage

Pour que le couplage n'entraîne, au moment de la fermeture de l'interrupteur tripolaire disposé entre l'alternateur et le réseau, aucun échange brutal de courant et par suite aucun choc mécanique sur le rotor, il faut que (fig. 4-1a) :

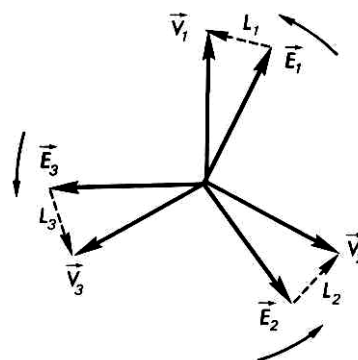
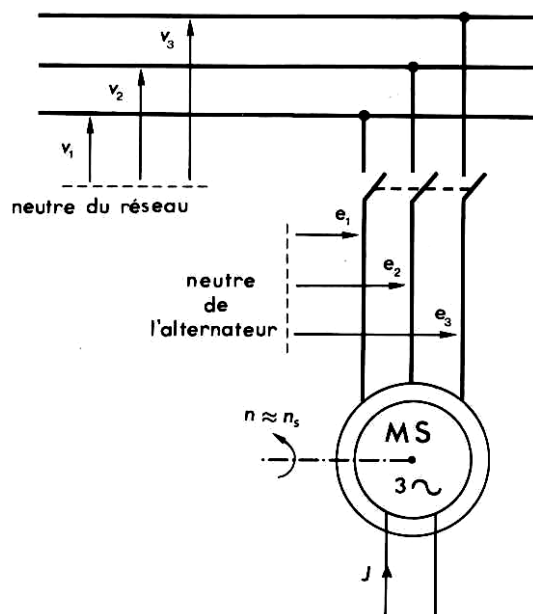
- les 3 f.é.m. à vide e_1 , e_2 et e_3 de l'alternateur,
- les 3 tensions simples v_1 , v_2 et v_3 du réseau,

soient respectivement égales (les neutres de l'alternateur et du réseau sont supposés reliés entre eux, par exemple par « mise à la terre »).

Pour qu'il en soit ainsi, deux premières conditions doivent être satisfaites :

- Egalité des fréquences;
- Egalité des valeurs efficaces.

- 1) En agissant sur la turbine qui entraîne l'alternateur on amène la fréquence de rotation n à une valeur aussi voisine possible de $n_s = 3000 / p$ (en tr/mn).



a) Schéma électrique;

b) Diagramme de Fresnel

Fig. 4-1-Couplage d'un alternateur sur le réseau

- 2) En agissant sur le courant inducteur J on obtient l'égalité de la valeur efficace E des f.é.m. et de la valeur efficace V des tensions.

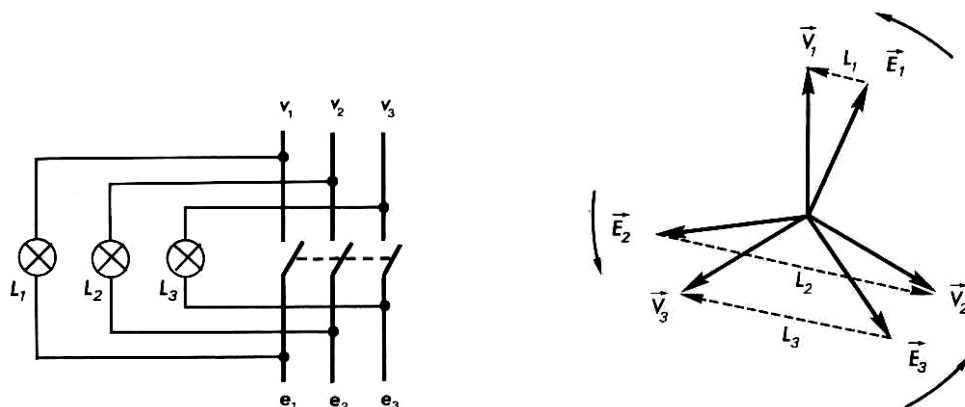
Supposons que le double réglage précédent est réalisé. Les six vecteurs de même norme tourneraient exactement à la même vitesse (fig. 4-1b) si l'on avait rigoureusement $n = n_s$. En fait, même si le réglage est fait avec précision, les vecteurs E_1, E_2, E_3 tournent lentement mais inévitablement par rapport aux vecteurs V_1, V_2, V_3 . On ne peut pas réaliser en permanence l'égalité. En conséquence il faut effectuer le couplage **au moment où**

$$\vec{E}_1 = \vec{V}_1, \quad \vec{E}_2 = \vec{V}_2, \quad \vec{E}_3 = \vec{V}_3$$

C'est-à-dire à l'instant où l'étoile des f.é.m. coïncide avec celle des tensions.

Réalisation du couplage

Pour repérer l'instant où l'interrupteur tripolaire doit être fermé on peut connecter à ses bornes trois lampes L_1, L_2 et L_3 (fig. 4-2a).



a) Schéma électrique;
Réalisation du couplage

b) Diagramme de Fresnel

Fig. 4-2

Si la succession des phases est la même (succession supposée directe dans le cas de la fig. 4-1b) pour les f.é.m. e_1, e_2, e_3 d'une part et pour les tensions v_1, v_2, v_3 d'autre part, les 3 lampes battent simultanément : soumises aux tensions représentées par les vecteurs en pointilles (fig. 4-1b). Elles s'éteignent et passent par leur éclairement maximal en même temps. (Ces lampes doivent supporter 2 fois la tension simple). A l'instant où les lampes sont éteintes, la condition d'égalité recherchée est réalisée.

Si la succession des phases n'est pas la même pour les f.é.m. et les tensions simples, par exemple si on a la succession directe pour v_1, v_2, v_3 et la succession inverse pour e_1, e_2, e_3 , les lampes s'allument et s'éteignent **successivement** : quand la lampe L_1 est éteinte, L_2 et L_3 sont allumées (fig. 4-2b). Il suffit alors de croiser deux fils entre l'alternateur et l'interrupteur pour revenir au cas précédent.

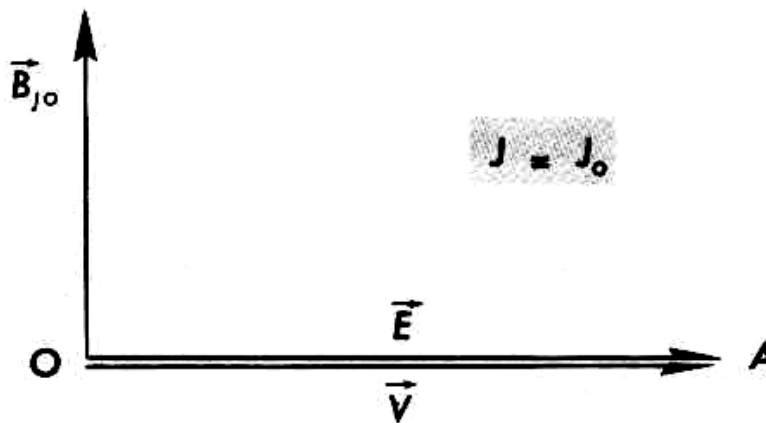
Lorsque les 3 lampes battent simultanément, on augmente la période de battement en agissant sur la turbine et quand la durée de chaque extinction est de quelques secondes, on ferme l'interrupteur au moment d'une extinction : **la machine synchrone est couplée sur le réseau**, elle ne reçoit ni ne fournit aucune puissance.

Dans une centrale le repérage des bornes de l'alternateur et du réseau est fait une fois pour toute. On obtient le quasi-synchronisme à l'aide d'un appareil appelé synchronoscope et le couplage s'effectue automatiquement.

IV.2. Fonctionnement en alternateur

a) Fonctionnement à vide

Après le couplage la machine synchrone n'échange aucune puissance avec le réseau. Si on néglige les pertes constantes le couple exercé sur l'arbre par la turbine est nul. Le diagramme de Behn – Eschenburg a l'allure représentée sur la fig. 4-3



Marche à vide
Fig. 4-3

Le champ magnétique B_0 est dû uniquement au courant inducteur J ; le courant inducteur a une valeur J_0 telle que $E = V$ (généralement la tension V du réseau est égale à la tension nominale de l'alternateur V_n).

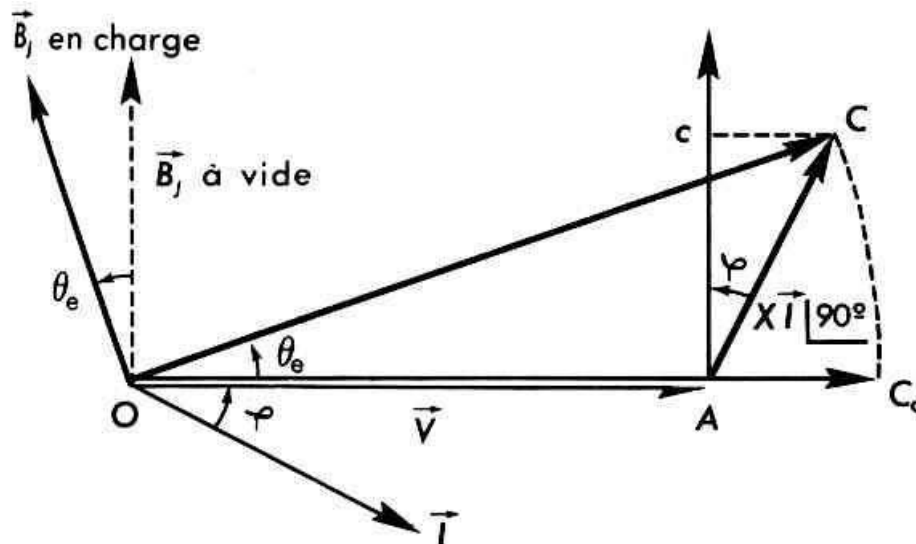
Lorsque J varie, la f.é.m. E cesse d'être égale à la tension V et un courant prend naissance dans chaque phase statorique; si on néglige les pertes par effet Joule dans le stator et si on suppose que le couple moteur exercé par la turbine est encore nul, la puissance électrique $P = 3 V I \cos \varphi$ fournie par l'alternateur au réseau est toujours égale à zéro :

$$P = 3 V I \cos \varphi = 0 \quad \Rightarrow \quad \cos \varphi = 0 \quad \Rightarrow \quad \varphi = \pm \pi/2$$

Donc les courants statoriques sont **purement réactifs**.

b) Fonctionnement en charge

Le courant d'excitation, étant fixé à une valeur J , on augmente l'admission du moteur d'entraînement, le rotor tendant à accélérer, il en résulte un décalage θ_e en avant du champ rotorique B_J par rapport au champ résultant initial B_0 . (fig. 4-4).



Fonctionnement en charge

Fig. 4-4

Quand une machine synchrone fonctionne en génératrice (fournie de l'énergie active) E est en avance sur V (dans le sens tournant du champ).

Pour modifier le fonctionnement d'un alternateur relié à un réseau, on peut agir sur deux grandeurs :

- l'ouverture de la vanne d'admission de la turbine;
- le courant inducteur J .

Il en résulte que, si l'on ne fait varier que l'une de ces deux grandeurs, l'alternateur présente deux régimes de fonctionnement possibles.

- **Fonctionnement à $J = C^{te}$ (risque de décrochage)**

Au fur et à mesure que l'on ouvre la vanne d'admission, le couple T_{mot} appliqué par la turbine augmente : l'angle de décalage θ , (donné par l'équation $T = T_{max} \sin p\theta = T_{mot}$) croît également : le vecteur E fait avec le vecteur V un angle $\theta_e = p\theta$ de plus en plus grand (fig. 4-5).

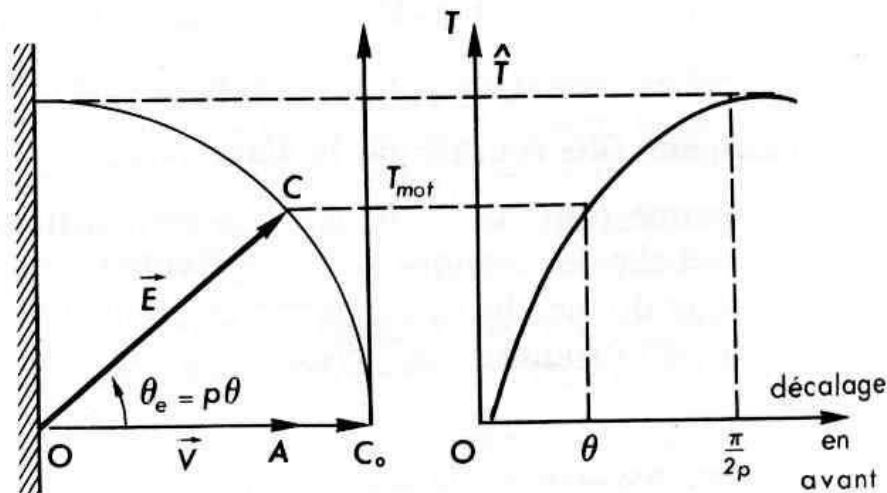
Fonctionnement à $J = C^{te}$

Fig. 4-5

Si le couple moteur T_{mot} devient supérieur à T_{max} le décalage augmente, le couple électromagnétique résistant diminue et le groupe « turbine – alternateur » accélère; il s'écarte de synchronisme. Le couple résistant moyen s'annule et la turbine s'emballe : c'est le **phénomène de décrochage**.

Cet incident risque d'autant moins de se produire que le rapport

$$S = \frac{T_{max}}{T} \quad \text{appelé facteur de stabilité } s, \text{ soit plus grand.}$$

Or T_{max} est proportionnelle à E , s est une fonction croissante J

Pour une puissance donnée, la stabilité du groupe « turbine – alternateur » augmente avec le courant inducteur J .

- **Fonctionnement à $P = C^{te}$: courbes en V**

Si le couple électromagnétique T égal au couple moteur T_{mot} reste constant, il en est de même de la puissance électrique $P = T (2\pi n_s)$. Par suite, la valeur du vecteur $E = OC$ change de façon à ce que le point C se déplace sur une droite parallèle à V , dite **droite d'équipuissance** (fig. 4-6).

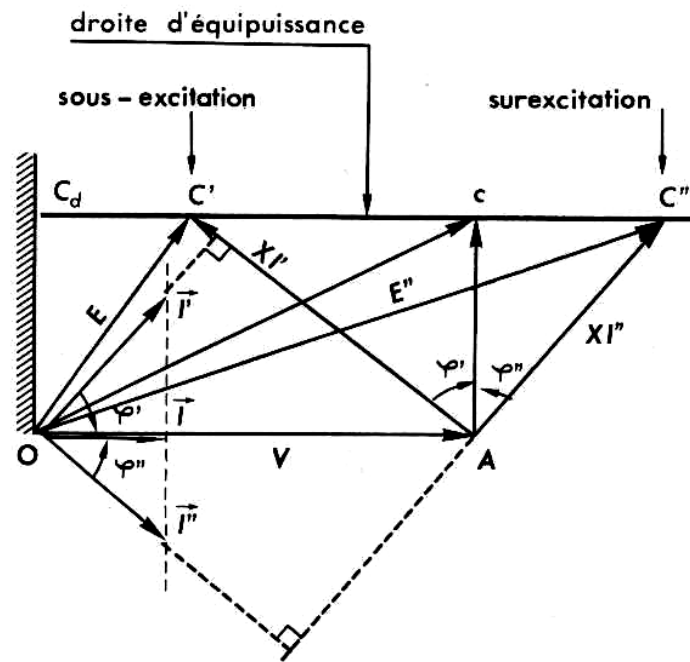
La stabilité exige que C se trouve à droite de C_d appelé **point de décrochage** : à chaque valeur de la puissance P correspond une valeur minimale J_d de J telle que :

$$\text{pour } J = J_d \Rightarrow E = OC_d.$$

Lorsque J augmente depuis J_d la valeur efficace I des courants statoriques décroît passe par un minimum qui correspond à J_m (le point c)

Puisque $P = C^{te}$, la composante active de I est une constante. Le diagramme montre que :

- * pour $J < J_m$ (**sous-excitation**) $\Rightarrow \varphi < 0$ (I est déphasé en avant de V);
- * pour $J = J_m$ (**excitation optimale**) $\Rightarrow \varphi = 0$ (I est en phase avec V);
- * pour $J > J_m$ (**surexcitation**) $\Rightarrow \varphi > 0$ (I est déphasé en arrière de V).



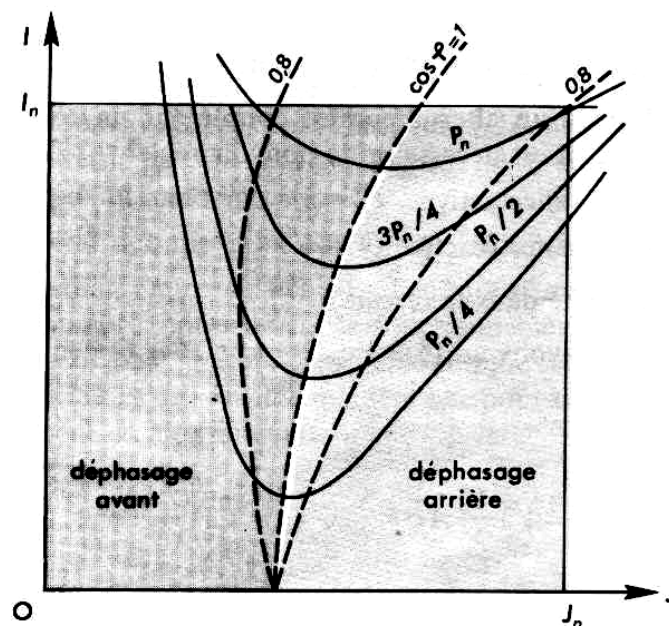
Fonctionnement à $P = C^{te}$
Fig. 4-6

En conséquence, alors que l'alternateur **fournit** toujours la puissance active $P = \sqrt{3} U I \cos \varphi$ au réseau, il n'en est pas de même de la puissance réactive $Q = \sqrt{3} U I \sin \varphi$.

* En **surexcitation** ($J > J_m$) $\Rightarrow$: l'alternateur fournit au réseau de la puissance réactive Q ;

* En **sous-excitation** ($J < J_m$) $\Rightarrow$: l'alternateur demande au réseau la puissance réactive Q .

Les courbes représentant la fonction $I = f(J)$ avec $P = C^{te}$ portent le nom de courbes en V de Mordey (fig. 4-7).



Courbes en V
Fig. 4-7

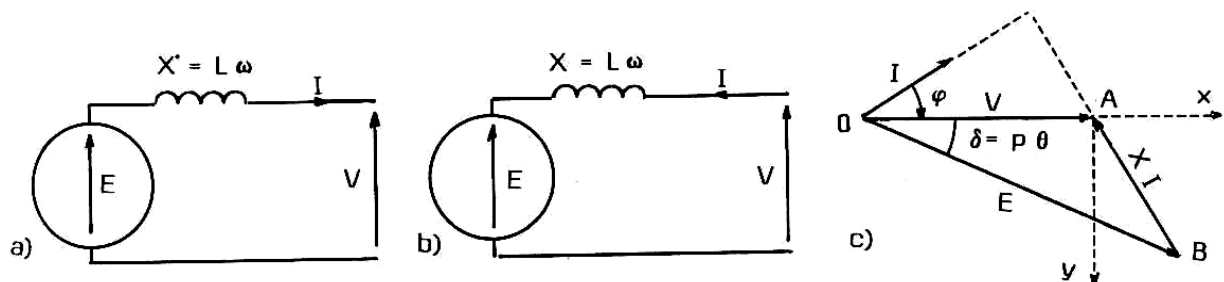
Pour une puissance donnée, on aurait intérêt à choisir la valeur minimale de I (ce qui entraînerait des pertes par effet Joule minimales); en fait, pour améliorer la stabilité, on **surexcite légèrement** les alternateurs (jusqu'à ce que $\cos \varphi$ soit voisin de 0,9 par exemple).

IV.3. Fonctionnement en Moteur

Diagramme de Behn –Eschenburg

Pour représenter ce diagramme on a deux possibilités :

- soit d'utiliser les conventions d'un générateur (fig. 4-8a). Dans ce cas le diagramme vectoriel est le même que celui d'un alternateur. Toutefois, comme on raisonne en puissance fournie, la puissance fournie est alors négative pour le fonctionnement en moteur.
- soit d'utiliser les conventions d'un récepteur (fig. 4-8b). Dans ce cas on passe du diagramme précédent au nouveau diagramme (fig. 4-8c) en changeant I en $-I$. Ce nouveau diagramme, qu'on utilisera pour le fonctionnement en moteur a l'avantage de raisonner en puissance absorbée, le rotor est décalé en arrière de l'angle θ_e par rapport au champ.



Fonctionnement d'une machine synchrone en moteur
Fig. 4-8

Fonctionnement

Ici de même le diagramme de Behn – Eschenburg permet de prévoir approximativement le fonctionnement parce que, si le moteur reste couplé au même réseau, l'état de saturation est toujours le même et la réactance X peut être considérée comme constante.

On retrouve les deux régimes de fonctionnement comme pour l'alternateur :

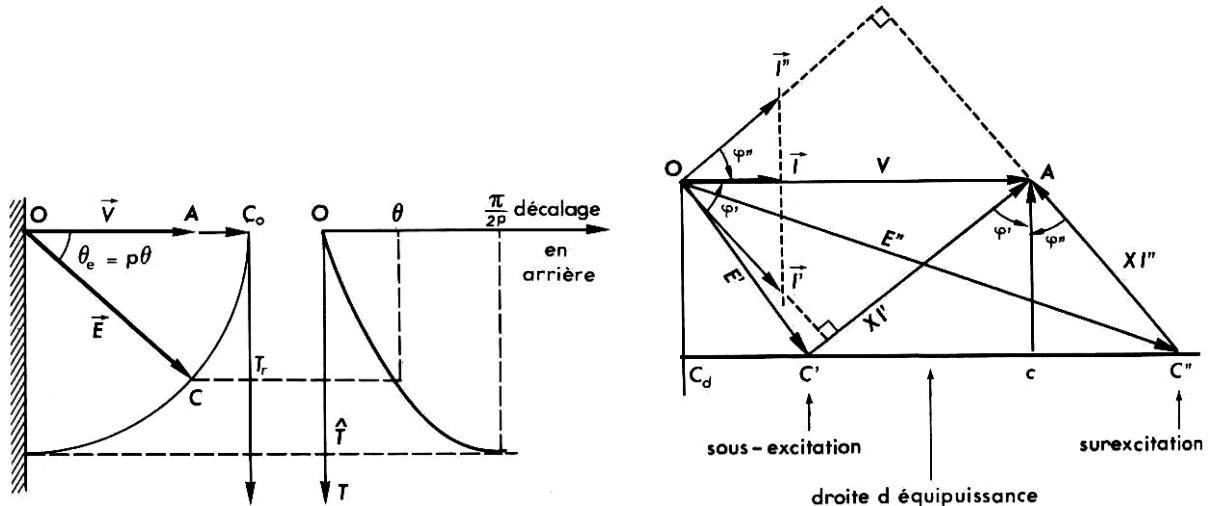
a) à $J = C^{te}$ (risque de décrochage)

Si le couple résistant T_r exercé sur l'arbre augmente, le rotor se décale de plus en plus en arrière par rapport au champ tournant : l'angle de décalage se fixe à la valeur θ . Dans le diagramme le vecteur E , qui fait avec le vecteur V l'angle $\theta_e = p\theta$, pivote autour du point O (fig. 4-9a) dans le sens négatif.

Si T_r dépasse la valeur de T_{max} le décalage θ franchit la valeur $\pi/2p$: au-delà, T diminue si bien que le rotor ralentit; il s'écarte de synchronisme. Le couple moteur

moyen s'annule et le rotor s'immobilise : c'est le **phénomène de décrochage**. Il faut déconnecter le moteur du réseau triphasé.

La verticale passant par le point O constitue encore la limite des régimes stables : la stabilité augmente avec T_{max} , donc avec J.



Courbes de fonctionnement en moteur
Fig. 4-9

b) à $P = Cte$: courbes en V

Tout ce qui a été vu dans la marche en alternateur est transposable dans la marche en moteur.

Dans le diagramme les horizontales sont des droites d'équipuissance (mais elles sont situées « en dessous » du vecteur V et P est la puissance absorbée par le moteur).

Les courbes $I = f(J)$ ont encore l'allure de V :

- en sous-excitation $\Rightarrow \varphi > 0$: le moteur est un circuit **inductif** (courant en arrière de la tension);
- en surexcitation $\Rightarrow \varphi < 0$: le moteur est un circuit **capacitif** (courant en avant de la tension);

Intérêt industriel

a. Problèmes du démarrage

Pour faire démarrer un moteur synchrone, il n'est pas possible de connecter son stator sur un réseau triphasé alors que le rotor est immobile.

Le champ statorique, tournant à n_s , produirait sur le rotor un couple s'exerçant tantôt dans un sens tantôt dans l'autre, c'est-à-dire la valeur moyenne est nulle, le rotor ne se mettrait pas à tourner. D'autre part le courant absorbé par le stator serait très considérable et risquerait de griller l'enroulement.

En conséquence on peut opérer de la façon suivante : on court-circuite l'inducteur sur lui-même, on applique un système de tensions réduites sur le stator (par exemple à l'aide d'un transformateur triphasé). Le champ statorique obtenu induit des courants dans l'inducteur et dans les amortisseurs : d'après la loi de Lenz, il en résulte un couple sur le rotor, l'entraînant dans le sens du champ (il s'agit d'un fonctionnement analogue à celui d'un moteur asynchrone à cage).

Lorsque la fréquence de rotation n est voisine de n_s (ce qui est atteint si le moteur est à vide ou peu chargé), on fait passer le courant J dans l'inducteur : le rotor **s'accroche** alors au champ tournant et l'on a désormais $n = n_s$.

b. Avantages et inconvénients

La fréquence de rotation est rigoureusement constante : selon les applications, cette propriété est un avantage ou un inconvénient.

1) Avantages du moteur synchrone :

- Facteur de puissance réglable : on peut réaliser $\cos \varphi = 1$ ou même fournir de l'énergie réactive au réseau en agissant sur le courant J ;
- Rendement excellent (aucun type de moteur ne présente un rendement meilleur).

2) Inconvénients du moteur synchrone :

- Nécessité d'un **excitateur** débitant le courant inducteur J ;
- Démarrage en régime « asynchrone »;
- Risque de décrochage.

c. Applications

On trouve peu de moteurs synchrones dans l'industrie : cependant, dans le cas de très grande puissance et de fonctionnement ininterrompu, il est supérieur à toute autre solution.

Parmi les applications du moteur synchrone on trouve:

- Fonctionnement en compensateur synchrone

Un moteur synchrone, tournant à vide, absorbe un courant purement réactif si ses pertes sont négligeables (fig. 4-10)

En sous-excitation (I en retard par rapport à V) le moteur **absorbe** de la puissance réactive $Q = \sqrt{3} \cdot U \cdot I$

En surexcitation (I en avance par rapport à V) il **fournit** de la puissance réactive. En plus cette puissance réactive est réglable par l'intermédiaire du courant d'excitation J . Ainsi on peut améliorer le facteur de puissance d'un réseau. On dit alors que le moteur est un **compensateur synchrone**.

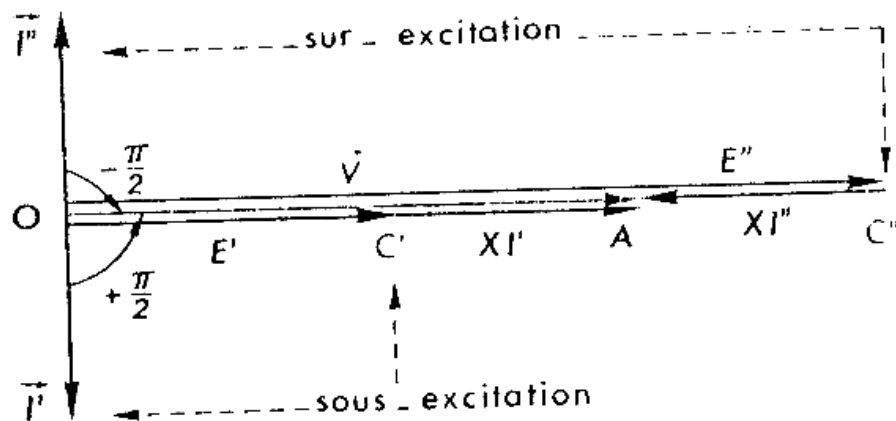


Fig. 4-10

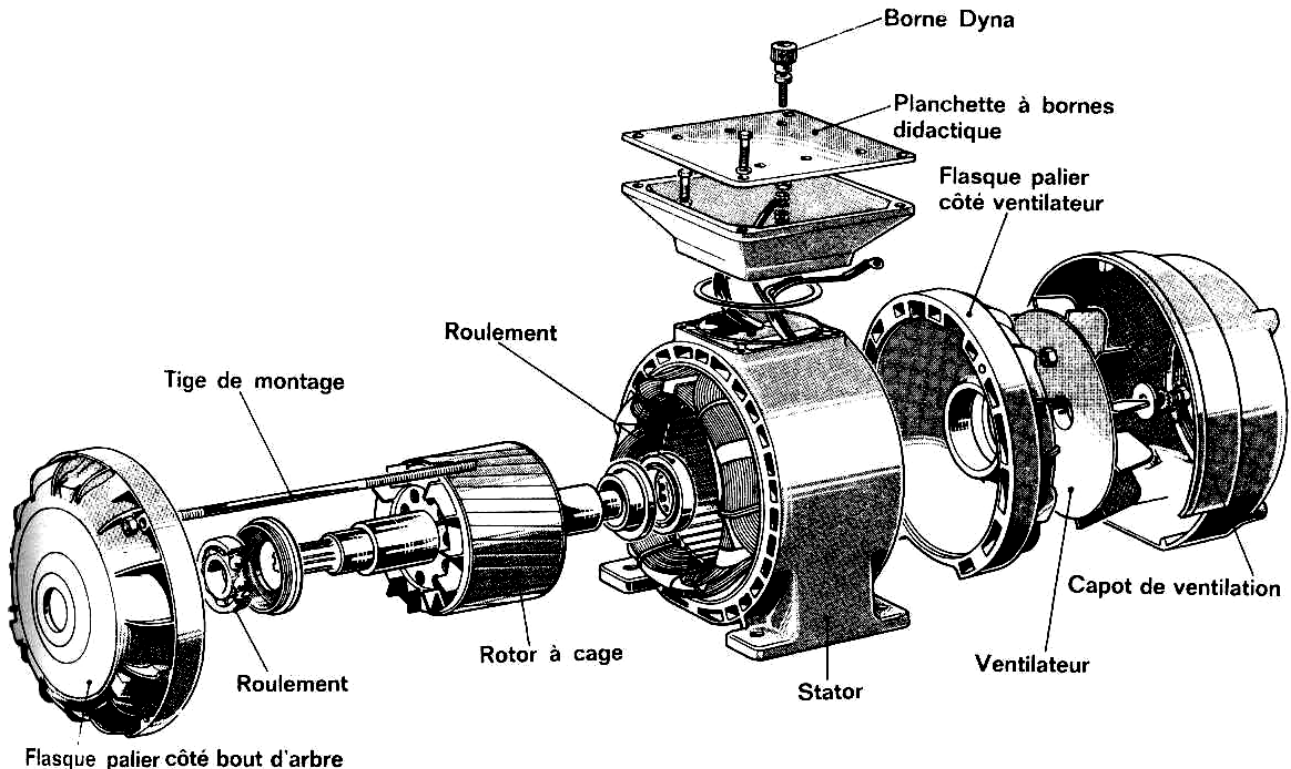
- Moteur synchrone auto-piloté

La propriété essentielle du moteur synchrone est que la fréquence de rotation n_s (en tr/s) est liée directement à la fréquence f des tensions statoriques ($n_s = f/p$).

Tant que f est restée fixe et égale à 50 Hz, le moteur synchrone, de vitesse rigoureusement constante, a vu ses applications limitées par suite de son manque de souplesse. Or, il existe des convertisseurs électroniques capables d'alimenter les moteurs synchrones en fréquence variable : tout en conservant les avantages indiscutables de ce moteur, on le rend capable de tourner à des vitesses très différentes. C'est le **moteur synchrone auto-piloté**

V. Moteurs asynchrones, constitution, principe de fonctionnement

V.1. Constitution



Moteur asynchrone triphasé (Moteurs Leroy)

Fig. 5– 1

Les moteurs asynchrones, encore appelés moteurs d'induction sont basés sur l'entraînement d'une masse métallique par l'action d'un champ tournant.

Ils comportent deux armatures coaxiales à champ tournant, l'une est fixe (c'est le stator) et l'autre est mobile (c'est le rotor).

Stator

Le stator est identique à celui d'un alternateur triphasé (fig. 5 – 1), mais on l'appelle également inducteur ou primaire car, c'est au champ tournant qu'il développe, que sont dus les courants induits du rotor, celui-ci se comportant un peu comme le secondaire d'un transformateur.

La représentation la plus simple est celle d'un stator triphasé à deux pôles (fig. 5 – 2a) sur lequel on a précisé les zones occupées par chacune des trois phases. Cet enroulement est alimenté en triphasé par l'intermédiaire de la plaque à bornes (fig. 5– 2b), ce qui permet, grâce à un jeu de barrettes, de l'alimenter en étoile ou en triangle.

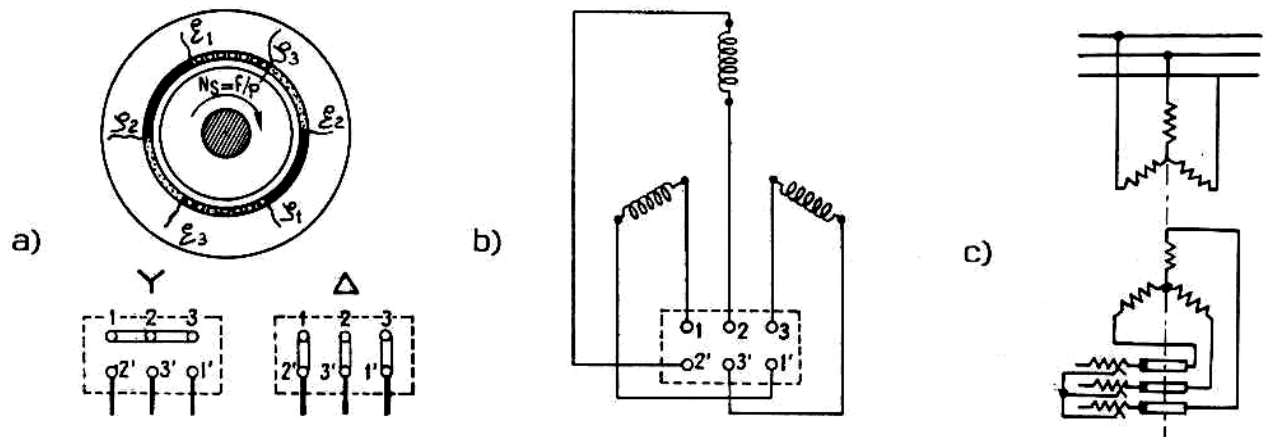


Schéma simplifié d'un moteur asynchrone triphasé
Fig. 5 - 2

Rotor

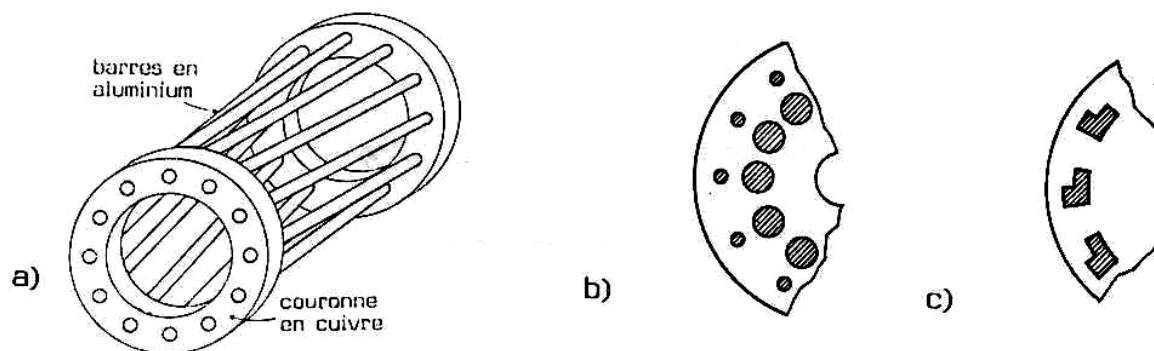
Le rotor n'est lié électriquement à aucune source d'énergie, ce qui simplifie beaucoup la construction. Le courant, dans ses enroulements, est uniquement induit par le champ tournant statorique, c'est pourquoi, l'enroulement rotorique est encore appelé induit ou secondaire. On distingue deux types de rotors :

Rotor à bagues

C'est un rotor à pôles lisses qui comporte dans ses rainures un enroulement identique à celui du stator. Les trois phases sont branchées en étoile (fig. 5- 2c), ce qui permet d'insérer un rhéostat dans leur circuit. Ce rhéostat, qui est mis en court-circuit en marche normale, permet d'assurer de meilleures conditions au démarrage. Le nombre de pôles du rotor est obligatoirement le même que celui du stator

Rotor à cage

L'enroulement est remplacé par des barres de cuivre ou d'aluminium, logées dans des encoches (fig. 5 - 3) et réunies à leurs extrémités par deux couronnes de cuivre ou d'aluminium. Ces cages comportent généralement des barreaux décalés (fig. 5 - 3a) afin de réduire les harmoniques d'encoches. Il en résulte une légère diminution de f.é.m. induite par le champ tournant statorique dans ces barreaux.



Rotor à cage
Fig. 5 - 3

Un tel rotor est très robuste. De plus, sa construction est particulièrement économique, la cage étant généralement réalisée avec de l'aluminium fondu que l'on coule dans les encoches préparées à l'avance. En effet, il n'est pas nécessaire d'isoler les barres de la masse du rotor, car les courants induits s'établissent surtout dans les barres.

Par comparaison avec les moteurs à bagues, les moteurs à cage ont l'avantage d'être robustes et de coût beaucoup plus faible. Malheureusement, il n'est pas possible de faire varier la résistance de leur rotor, ce qui rend défavorable les conditions de démarrage quand on les alimente à tension et à fréquence constantes.

On remédie à cet inconvénient en utilisant, soit des rotor à double cage (fig. 5 – 3b), soit des rotors à une seule cage, mais à barres dites en L à cause de leur profil (fig. 5 – 3c), soit des moteurs à encoches très profondes : barres en « lames de sabre ».

V.2. Fonctionnement

On considère un moteur asynchrone à rotor bobiné et on applique sur les phases statoriques les tensions sinusoïdales de fréquence f :

$$\begin{aligned} v_1 &= V_1 \sqrt{2} \cos \omega t \\ v'_1 &= V_1 \sqrt{2} \cos (\omega t - 2\pi/3) \\ v''_1 &= V_1 \sqrt{2} \cos (\omega t - 4\pi/3) \end{aligned} \quad , \quad \text{avec } \omega = 2\pi f$$

Comme à toute machine multipolaire ($2p$ pôles), on peut correspondre une machine bipolaire équivalente, on étudie donc la machine bipolaire et la conclusion sera générale.

V.2.1. Marche à vide

Aucun couple résistant n'est appliqué sur l'arbre du moteur ($T_r = 0$) et les pertes mécaniques $P_{méca}$ sont considérées comme négligeables.

- Fréquence de synchronisme

L'expérience montre que :

- le rotor tourne à fréquence constante,
- le stator est parcouru par un système triphasé de courants (j_0, j'_0, j''_0) de valeur efficace J_0 et de fréquence f .

Ces trois courants créent un champ magnétique B_0 tournant à la fréquence f .

Or, puisque T_r et $P_{méca}$ sont nuls et que le rotor tourne à vitesse constante, c'est qu'aucune force de Laplace ne s'exerce sur les conducteurs rotoriques (sinon le mouvement serait accéléré) : comme ces conducteurs sont dans le champ B_0 on en déduit qu'ils ne sont parcourus par aucun courant induit.

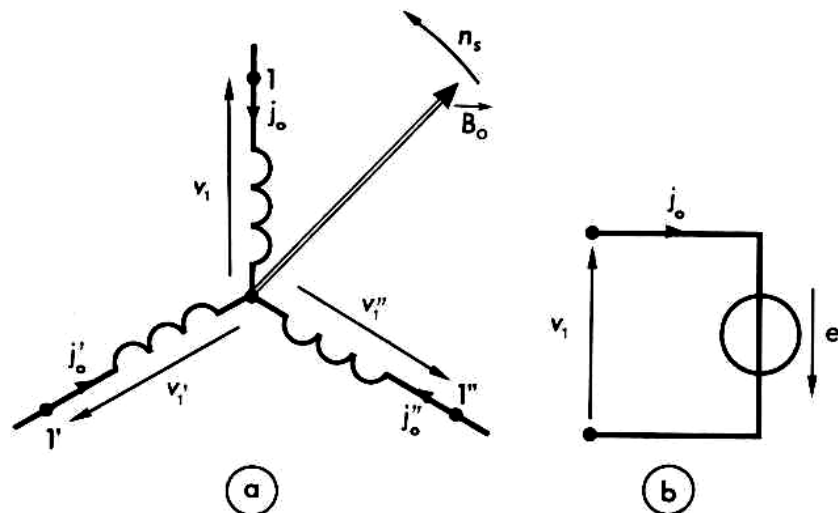
Pour qu'il en soit ainsi, il faut que le rotor tourne à la même fréquence que B_0 de telle sorte que les flux embrassés par les trois phases rotoriques restent constants

(aucune f.é.m. n'est induite dans ces phases) : cette fréquence de rotation est celle de **synchronisme** (fig. 5– 4a) (déjà rencontrée dans les machines synchrones).

$$n_s = f$$

Si le moteur est à $2p$ pôles, on a :

$$n_s = f / p$$



Marche à vide
Fig. 5 – 4

- Champ magnétique B_0

Le champ B_0 créé par le stator, induit dans chacune des phases statoriques une f.é.m. Si on néglige les chutes résistives du stator et les chutes inductives du stator, ces f.é.m. sont respectivement égales (au signe près avec la convention récepteur) à la tension appliquée sur la phase correspondante (fig. 5 – 4b); pour la phase 1, par exemple, on a :

$$e_1 = - v_1$$

Les f.é.m. induites dans les phases statoriques ne dépendent que de v_1 , v'_1 , v''_1 : il en est de même pour B_0 qui leur donne naissance.

- Courants magnétisants

Si, en plus des pertes mécanique $P_{méca}$, on néglige les pertes magnétiques $P_{st\ mag}$ dans les tôles du stator (dus au fait que B_0 tourne à n_s par rapport à l'armature statorique), le moteur n'absorbe, à vide, aucune puissance active

$$P_0 = 3 V_1 J_0 \cos \varphi = 0 \quad \Rightarrow \quad \cos \varphi = 0 \quad \Rightarrow \quad \varphi = \pi / 2$$

Les courants à vide sont purement réactifs ; pour la phase 1, par exemple, on a

$$(J_0, V_1) = \pi / 2$$

Le diagramme de la fig. 5 – 5 représente à l'instant $t = 0$ le diagramme temps constitué par les vecteurs de Fresnel V_1 , $E_1 = -V_1$ et J_0 et le diagramme espace constitué par le vecteur B_0 , l'onde de champ le long de l'entrefer.

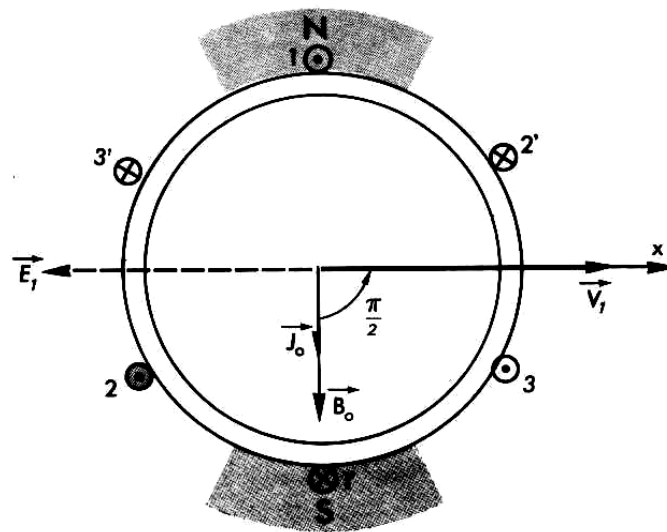


Diagramme vectoriel
Fig. 5- 5

Les courants à vide, donnant naissance au champ magnétique B_0 , sont appelés **courants magnétisants** :

- leur valeur efficace J_0 est faible devant la valeur nominale J_n des courants statoriques;
- ils sont en quadrature arrière par rapport à la tension appliquée correspondante.

V.2.2. Marche en charge

• Glissement

Si on applique un couple résistant T_r sur l'arbre du moteur le rotor ralentit momentanément, puis se met à tourner à une fréquence constante n inférieure à n_s .

Quand au champ magnétique B_0 qui ne dépend que des tensions v_1 , v'_1 , v''_1 , il continue à tourner à n_s . Par rapport au rotor sa fréquence de rotation est donc : $n_s - n$.

Cette fréquence de rotation n'a, en elle-même, aucune signification; on considère toujours sa valeur relative par rapport à n_s :

$$g = (n_s - n) / n_s$$

Cette valeur relative, souvent exprimée en pourcentage, est appelée **glissement** (elle précise la rapidité du « glissement » de l'onde de champ le long de la surface cylindrique du rotor).

En marche normale, g ne vaut généralement que quelques pour cent. Il faut noter que, dans le fonctionnement à vide où $n = n_s$, le glissement est nul : $g = 0$.

- Champ magnétique en charge

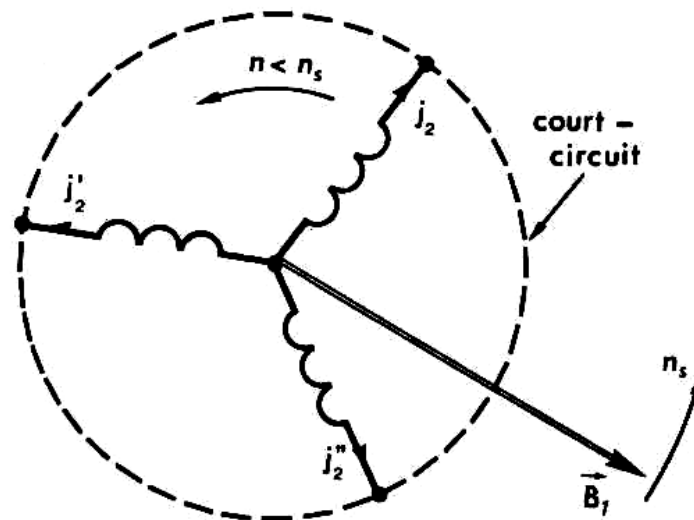
A vide, le champ magnétique B_0 est créé exclusivement par le stator (les courants rotoriques sont nuls); en charge, au contraire, il est dû à l'action simultanée du stator et du rotor.

Les courants statoriques en charge (j_1, j_1', j_1'') ont une valeur efficace J_1 supérieur à J_0 et une fréquence toujours égale à f (fréquence des tensions appliquées).

Ces courants donnent naissance à un champ B_1 tournant (fig. 5 – 6), par rapport au stator, à la fréquence de synchronisme $n_s = f$; il tourne donc, par rapport au rotor, à la fréquence

$$n_s - n = g n_s$$

B_1 induit dans les phases du rotor (fermées sur elles-mêmes) les courants j_2, j_2', j_2'' ; ces courants rotoriques admettent pour fréquence $(n_s - n) = g n_s$, c'est-à-dire $g f$.



Champ magnétique en charge

Fig. 5- 6

Il s'agit d'une fréquence très inférieure à f , souvent de l'ordre de quelques hertz seulement.

Les courants rotoriques sont des **courants induits** : ils obéissent à la loi de Lentz, c'est-à-dire qu'ils tendent d'annuler la cause leur donnant naissance, le champ B_1 . Ils créent un champ magnétique tournant B_2 qui amoindrit le champ statorique. En conséquence B_2 tourne à la même fréquence que B_1 , c'est-à-dire à la fréquence de synchronisme n_s .

La résultante ($B_1 + B_2$) a une norme plus faible que B_1 . Cette résultante est le champ B_0 . En effet, les f.é.m. induites dans les phases statoriques étant toujours les mêmes, le champ qui leur donne naissance est aussi le même, **en charge et à vide**.

$$B_1 + B_2 = B_0$$

Le **champ magnétique** dans un moteur asynchrone, toujours alimenté par le même réseau triphasé, est **indépendant du régime de fonctionnement**, c'est-à-dire indépendant du couple résistant T_r , exercé sur l'arbre.

- Courants statoriques

Dans la machine à vide, $T_r = 0$, on a $j_2 = j_2' = j_2'' = 0$ donc $B_2 = 0$, d'où

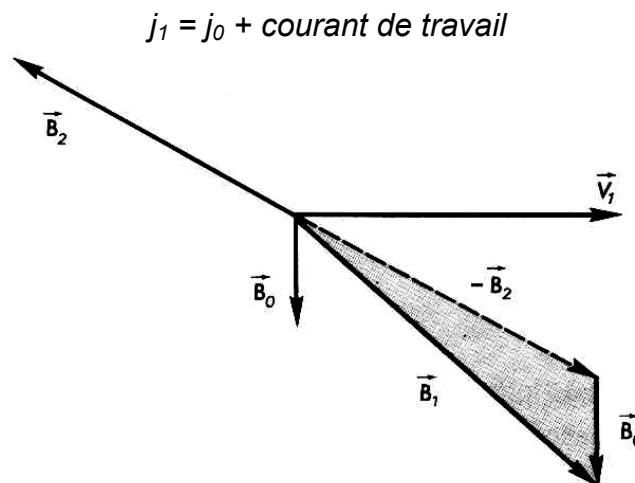
$$B_1 = B_0$$

Les courants statoriques sont faibles et purement réactifs. Ce sont les **courants magnétisants** $j_0 = j_0' = j_0''$.

Dans la marche en charge, $T_r \neq 0$, les courants rotoriques sont différents de zéro, donc $B_2 \neq 0$. Les courants statoriques créent le champ

$$B_1 = B_0 + (-B_2)$$

Ces derniers courants doivent compenser l'**action démagnétisante** du rotor; il en résulte que, lorsqu'on passe du fonctionnement à vide au fonctionnement en charge, chaque phase du stator appelle un courant supplémentaire, dit courant de travail, qui s'ajoute au courant magnétisant correspondant (fig. 5 – 7).



Champ magnétique au travail
Fig. 5 - 7

- Analogie avec le transformateur triphasé

Toutes les propriétés du moteur asynchrone que nous venons de mettre en évidence, ont déjà été rencontrées dans le transformateur triphasé

V.2.3. Considérations mécaniques

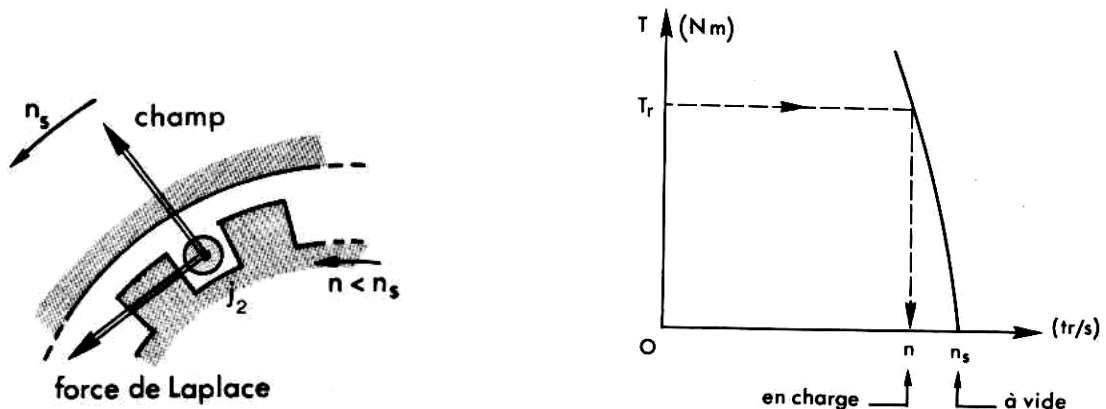
- Couple électromagnétique

Lorsque le glissement est différent de zéro, les conducteurs rotoriques disposés dans les encoches sont parcourus par des courants induits (j_2 , j_2' , j_2'') situés dans le champ magnétique B_0 . Ils sont soumis à des forces de Laplace tangentes au rotor (fig. 5– 8a); l'ensemble de ces forces constitue le **couple électromagnétique T** du moteur. Les courants rotoriques étant des courants induits, ils tendent d'annuler la cause leur donnant naissance (la loi de Lentz), c'est-à-dire la rotation du champ B_0 par rapport au rotor. En conséquence, les forces de Laplace entraînent le rotor dans le sens de rotation du champ afin de réduire la vitesse relative de ce champ par rapport au rotor.

Lorsque le rotor tourne à n_s ($g = 0$), les courants (j_2 , j_2' , j_2'') sont nuls, ainsi que le couple électromagnétique T . Le fonctionnement n'est possible que si $T_r = 0$ (avec les pertes mécaniques négligeables).

Lorsque $n = n_s \Rightarrow T = 0$

Si on exerce un couple résistant T_r non nul, le rotor prend une fréquence de rotation n , inférieure à n_s , telle qu'il lui correspond un couple électromagnétique T égal à T_r (fig. 5– 8b).

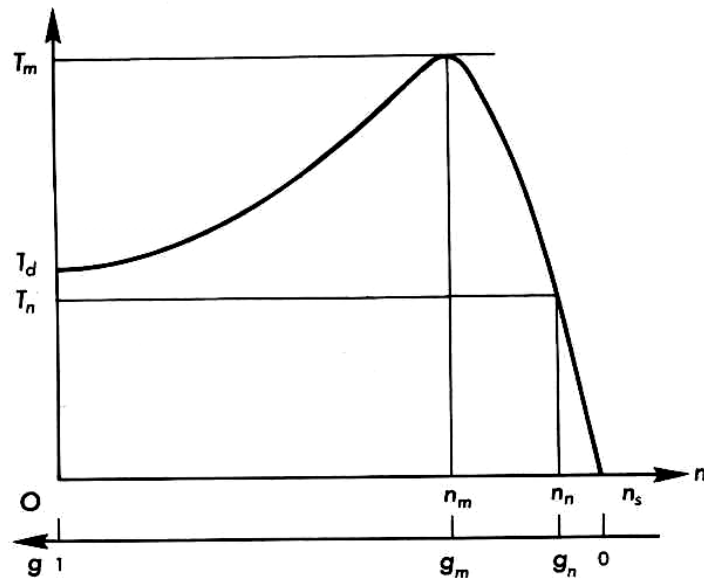


Couple électromagnétique
Fig. 5 - 8

Le couple électromagnétique T croît depuis zéro lorsque n diminue à partir de n_s .

La caractéristique mécanique est le graphe de la fonction $n = f(T)$.

Aux faibles glissements T est proportionnel à g . Le plus souvent, entre 0 et g_n , donc entre n_s et n_n , la caractéristique mécanique peut être considérée comme rectiligne (fig. 5 – 9).



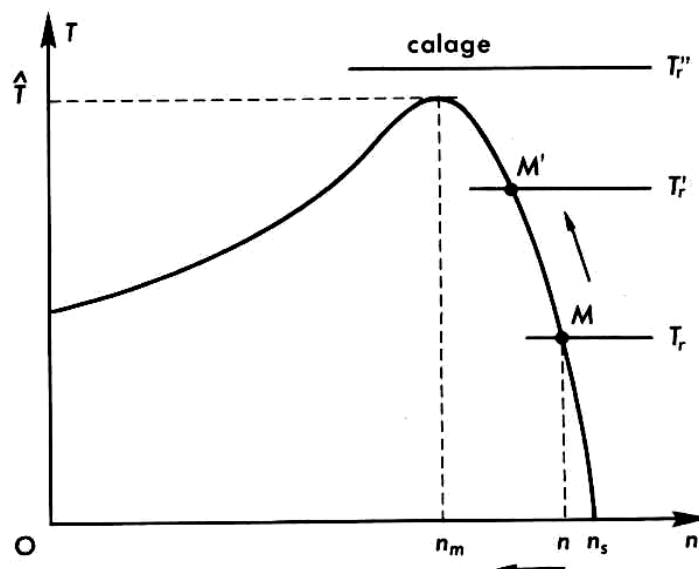
Caractéristique mécanique

Fig. 5 - 9

Si on exerce un couple résistant T_r (fig. 5– 10) :

- si $T_r < T_{max} \Rightarrow n$ diminue depuis n_s et prend une valeur (comprise entre n_s et n_m) telle que $T = T_r$;

- si $T_r > T_{max} \Rightarrow n$ diminue jusqu'à n_m puis s'annule très rapidement (puisque le couple moteur T décroît lorsque n diminue) : c'est le calage du moteur; il faut alors déconnecter immédiatement le moteur du réseau pour lui éviter de griller.



Stabilité de fonctionnement d'un moteur asynchrone

Fig. 5 - 10

Cet incident risque d'autant moins de se produire que T_{max} est plus grand devant T_n : comme pour le moteur synchrone, on introduit le facteur de stabilité

$$s = T_{max} / T_n$$

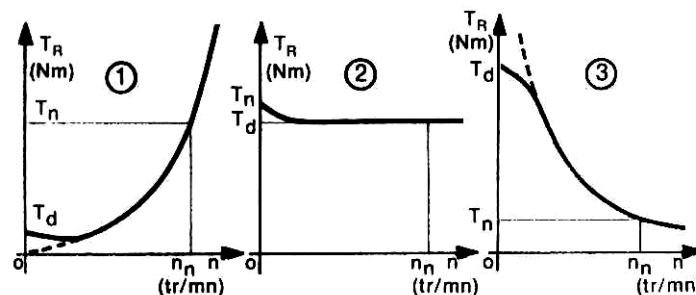
Il est souvent **voisin de 2**, ce qui permet de placer sur la caractéristique mécanique approximativement le point de fonctionnement nominal.

La conception de tout équipement doit prendre en compte les données du Cahier des charges qui précise :

- les caractéristiques de grandeur et de forme du couple résistant T_R de la machine entraînée,
- les conditions d'exploitation de l'ensemble "équipement - moteur - machine",
- les caractéristiques du réseau de distribution de l'énergie électrique.

Les caractéristiques mécaniques couple résistant en fonction de la vitesse de rotation, $T_R = f(n)$, des machines entraînées sont bien représentatives de leurs conditions de fonctionnement. On distingue trois types principaux :

- Caractéristique d'allure parabolique (fig. 5-11a) : ventilateur, pompe centrifuge à vide),
- Caractéristique à couple résistant constant (fig. 5-11b) : engins de levage,
- Caractéristique d'allure hyperbolique (fig. 5-11c) : essoreuse, concasseur.

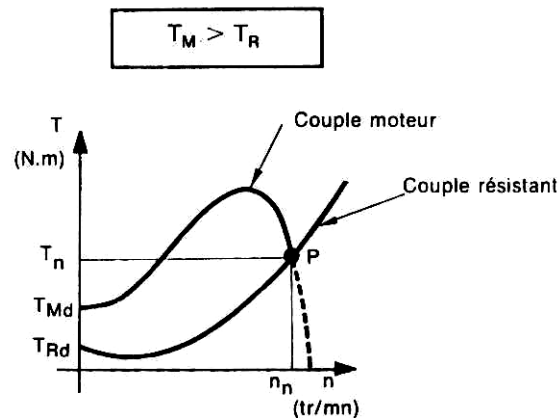


Principaux types de caractéristiques mécaniques
Fig. 5-11

Le processus de mise en service d'une machine met en évidence deux types de phases :

- Les phases stables : fonctionnement en régime nominal et arrêt.
- Les phases transitoires : démarrage, freinage, changement de sens de rotation, changement ou variation de vitesse.

Exception faite de la phase de freinage qui conduit à l'arrêt, dans toutes les phases transitoires, le couple moteur, T_M , doit être supérieur en valeur absolue au couple résistant, T_R (fig. 5-12).



T_{Md} : couple moteur au décollage
 T_{Rd} : couple résistant au décollage.

Mise en fonctionnement d'une machine
 Fig. 5-12

Le point P particulier, pour lequel $T_M = T_R$, définit le point d'équilibre ou de fonctionnement de l'ensemble "moteur - machine". A ce point de fonctionnement P correspondent le couple nominal T_n et la vitesse nominale n_n .

Les conditions caractéristiques du milieu ambiant: atmosphère (humidité, corrosion, explosion, poussières, etc.), température, chocs mécaniques, guident le choix du moteur vers les différents types proposés par les constructeurs: moteurs protégés, moteurs étanches, moteurs antidéflagrants, moteurs tropicalisés, etc.

Les contraintes du réseau d'énergie électrique, essentiellement d'ordre énergétique, comme nature du courant (continu ou alternatif), type de distribution (monophasé, triphasé trois ou quatre fils), grandeur de la tension, limite de l'intensité en ligne, sont imposées à l'utilisateur et doivent être prises en compte dans le choix du moteur.

- Couplage au réseau et inversion du sens de rotation

- 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.

- 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

- Pertes rotoriques

Le stator exerce sur le rotor le couple T par l'intermédiaire d'un champ tournant à n_s (en tr/s); la **puissance transmise** du stator au rotor est donc :

$$P_{tr} = T (2\pi n_s)$$

Sous l'action du couple T , le rotor tourne à $n < n_s$: la **puissance mécanique au niveau du rotor** est :

$$P = T (2\pi n)$$

La différence est ainsi perdue dans le rotor : les pertes rotoriques sont donc :

$$P_{rotor} = P_{tr} - P = T 2\pi (n_s - n) = T 2\pi g n_s$$

$$P_{rotor} = g T (2\pi n_s)$$

$$P_{rotor} = g P_{tr}$$

Les pertes rotoriques sont égales à la somme des pertes par effet Joule dans l'enroulement du rotor et des pertes magnétiques dans les tôles. Elles apparaissent sous forme de chaleur. En effet le champ glisse lentement le long du rotor ($g n_s \ll n_s$) les pertes magnétiques dans les tôles sont négligeables devant les pertes par effet Joule et on peut écrire :

$$\text{Pertes rotoriques par effet Joule} \approx g P_{tr}$$

- Bilan de puissance et rendement

Le moteur absorbe, au niveau de stator, la puissance électrique $P_a = 3 V I \cos \varphi$. Le stator subit deux types de pertes :

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

Contrairement à ce qui se passe dans le rotor, les pertes magnétiques ne sont pas négligeables. En effet l'onde de champ magnétique tourne très vite (fréquence n_s) par rapport aux tôles du stator et les pertes magnétiques ne sont pas très inférieures aux pertes par effet Joule.

La puissance transmise du stator au rotor P_{tr} est la différence :

$$P_{tr} = P_a - (P_{st J} + P_{st mag})$$

Les pertes rotoriques étant égales à $g P_{tr}$, la puissance mécanique P au niveau du rotor est : $P = P_{tr} - g P_{tr} = P_{tr} (1 - g)$.

Il lui correspond le couple électromagnétique T

$$T = P / 2\pi n$$

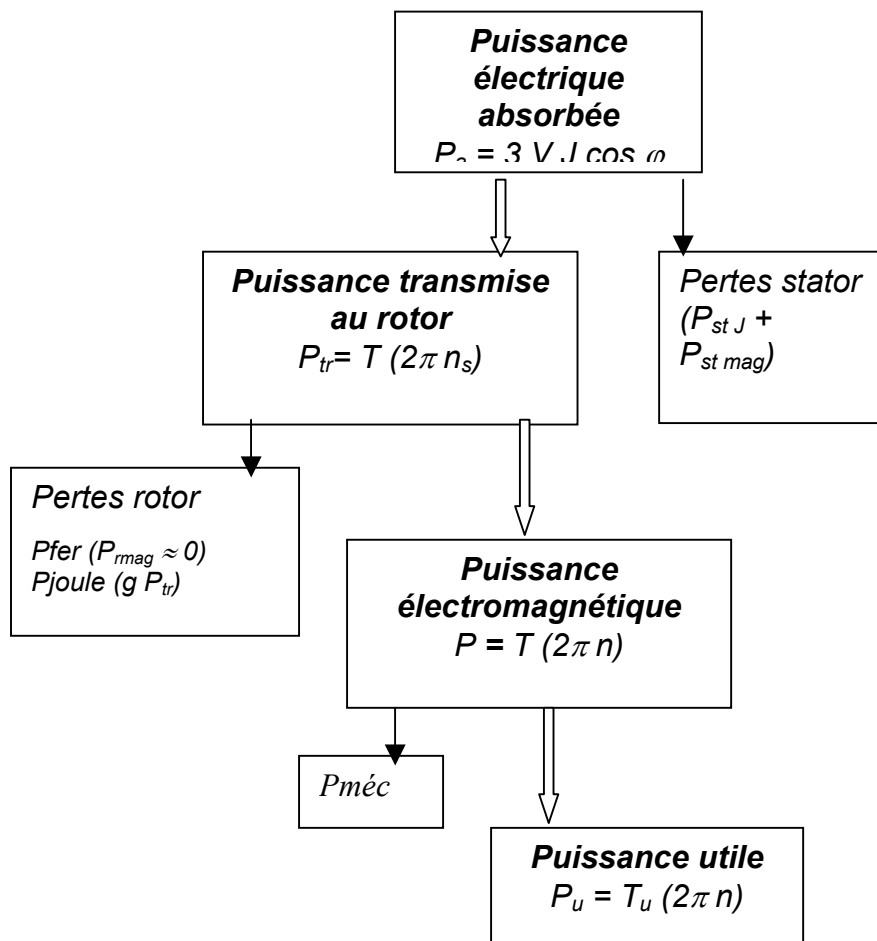
La puissance utile P_u disponible sur l'arbre est légèrement inférieure à P ; il faut tenir compte des pertes mécaniques $P_{méc}$ du moteur :

$$P_u = P - P_{méc}$$

Il lui correspond le couple utile T_u tel que

$$T_u = P_u / 2\pi n = (P - P_{méc}) / 2\pi n = T - P_{méc} / 2\pi n$$

Le bilan de puissance du moteur asynchrone peut être représenté de la façon suivante :



Les pertes mécaniques $P_{méc}$ ne dépendent que de n ; comme n reste voisin de n_s , ces pertes sont sensiblement **constantes**.

Mais les pertes magnétiques dans le stator sont aussi constantes : par suite la somme $P_{méc} + P_{st mag}$ est pratiquement indépendante du régime de fonctionnement et porte le nom de **pertes constantes** du moteur asynchrone.

Le rendement du moteur η du moteur, par définition, est

$$\eta = P_u / P_a = (P - P_{\text{méc}}) / (P_{\text{tr}} + P_{\text{st}})$$

P_{st} représentent les pertes statoriques. Or $P = P_{\text{tr}} - P_{\text{rotor}} = P_{\text{tr}} - g P_{\text{tr}} = P_{\text{tr}} (1 - g)$.

Le rendement peut être écrit sous la forme :

$$\eta = [P_{\text{tr}} (1 - g) - P_{\text{méc}}] / (P_{\text{tr}} + P_{\text{st}})$$

Si on néglige les pertes statoriques P_{st} devant P_{tr} et $P_{\text{méc}}$ devant $P = P_{\text{tr}} (1 - g)$, l'expression du rendement se réduit à :

$$\eta = 1 - g$$

Il s'agit d'une expression assez approximative(on ne tient compte que des pertes rotoriques) d'autant moins erronée d'ailleurs que le moteur est plus puissant, mais elle montre que, en marche normale, le glissement g doit être très faible pour que le rendement soit acceptable.

V.3. Essais du moteur asynchrone

Les essais d'un moteur asynchrone sont effectués surtout pour déterminer le rendement par la méthode des pertes séparées.

La détermination des pertes constantes ($P_c = P_{\text{méc}} + P_{\text{st mag}}$) se fait facilement par le fonctionnement à vide, la puissance absorbée à vide P_0 ne sert que pour vaincre les pertes constantes (qui sont à peu près les mêmes à vide qu'en charge car les conditions de flux au stator et de vitesse sont à peu près les mêmes) et les pertes Joule dans le stator qui à vide valent $1,5 R I_0^2$ (R résistance entre deux bornes du stator). On a donc $P_c = P_0 - 1,5 R I_0^2$.

Les essais en court-circuit à rotor calé donne la possibilité de déterminer les pertes par effet Joule.

Les essais en charge vérifient les caractéristiques du moteur à sa puissance nominale. La puissance absorbée est mesurée par la méthode des deux wattmètres. La résistance à froid des enroulements couplés peut être mesurée aussi par la méthode voltampèremétrique ou bien directement à l'aide d'un ohmmètre. La résistance au travail est calculée selon la formule $R_t = R_0 (1 + \alpha \Delta t)$.

V.4. Exercices

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

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

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

- 3) La fréquence de rotation n est telle que

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

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

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

- 4) En marche normale, le couple utile vaut

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

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

- 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

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

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

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

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

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

- 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

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

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

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

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

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

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 phases 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 $1\,430 \text{ tr/mn}$.

SOLUTION

La vitesse de synchronisme de ce moteur est

$$n_s = 3\,000 / p \quad \Rightarrow \quad n_s = 3\,000 / 2 = 1\,500 \text{ tr/mn}$$

On en déduit le glissement en charge

$$g = (n_s - n) / n_s \quad \Rightarrow \quad g = (1500 - 1430) / 1500 = 0,0467 = 4,67\%$$

Pour que chaque phase statorique du moteur soit alimentée sous la tension nominale il faut que le couplage soit en étoile. La résistance d'une phase est donc

égale à la moitié de la résistance mesurée entre deux bornes du stator, soit égale à $1,1 \Omega$.

L'étude à vide permet de déterminer :

- les pertes par effet Joule dans le stator

$$P_{st J} = 3 \cdot 1,1 \cdot 5,2^2 = 90 \text{ W}$$

- les pertes magnétiques dans le stator

$$\begin{aligned} P_{st mag} + P_{mec} &= 2 P_{st mag} = P_v - P_{st J} \\ P_{st mag} &= \frac{1}{2} (P_v - P_{st J}) \Rightarrow P_{st mag} = \frac{1}{2} (390 - 90) = 150 \text{ W} \end{aligned}$$

- les pertes mécaniques

$$P_{mec} = P_{st mag} \Rightarrow P_{mec} = 150 \text{ W}$$

On peut ensuite, grâce à l'essai en charge, déterminer :

- les pertes par effet Joule dans le stator

$$P_{st J} = 3 \cdot 1,1 \cdot 7,5^2 = 186 \text{ W}$$

- la puissance transmise au rotor

$$\begin{aligned} P_{tr} &= P_u - P_{st J} - P_{st mag} \\ P_{tr} &= 4070 - 186 - 150 = 3374 \text{ W} \end{aligned}$$

- les pertes rotoriques par effet Joule

$$P_{r J} = g P_{tr} \Rightarrow P_{r J} = 0,0467 \cdot 3374 = 174 \text{ W}$$

On en déduit finalement :

- les pertes totales

$$\begin{aligned} P_{pertes} &= P_{st J} + P_{st mag} + P_{r J} + P_{mec} \\ P_{pertes} &= 186 + 150 + 174 + 150 = 660 \text{ W} \end{aligned}$$

- le rendement

$$\begin{aligned} \eta &= (P_a - P_{pertes}) / P_u \Rightarrow \eta = (4070 - 660) / 4070 = 0,838 \\ \eta &= 84\% \end{aligned}$$

VI. appareillages de commande et de protection:

VI.1. Appareillage 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-6-1) 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.

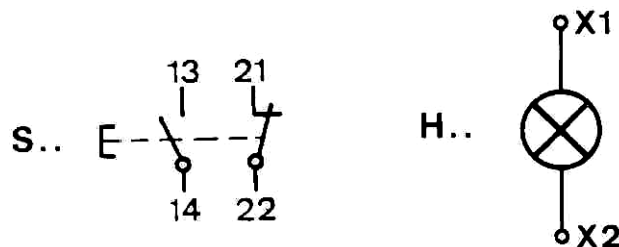


fig.6-1. bouton poussoir

- **Les contacteurs**

Définition :

Le contacteur (fig.6-2) 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.

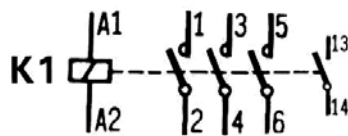


fig.6-2

- **Relais auxiliaires**

Relais auxiliaires (fig 6-3) sont des contacteurs dont le bloc de contacts est prévu pour le couplage auxiliaires (circuits de commande, de signalisation et de verrouillage).



fig.6-3

- **Relais temporisés**

Les relais temporisés (fig 6-4) 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.

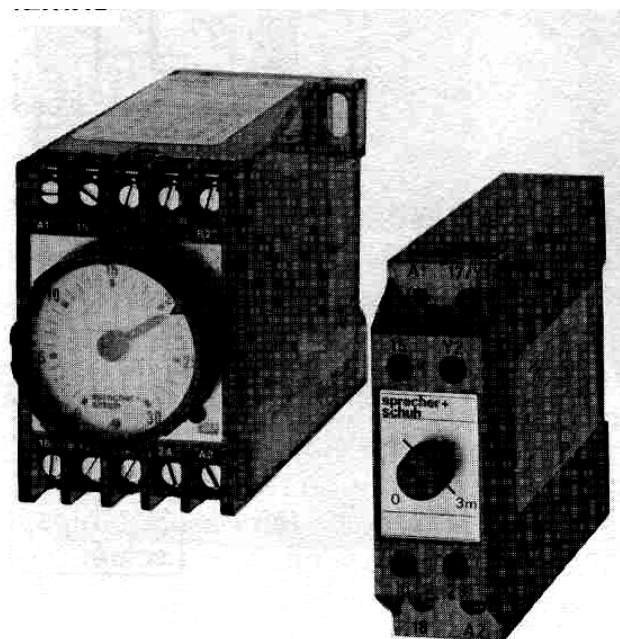


fig.6-4

VI.2. 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.6-5)

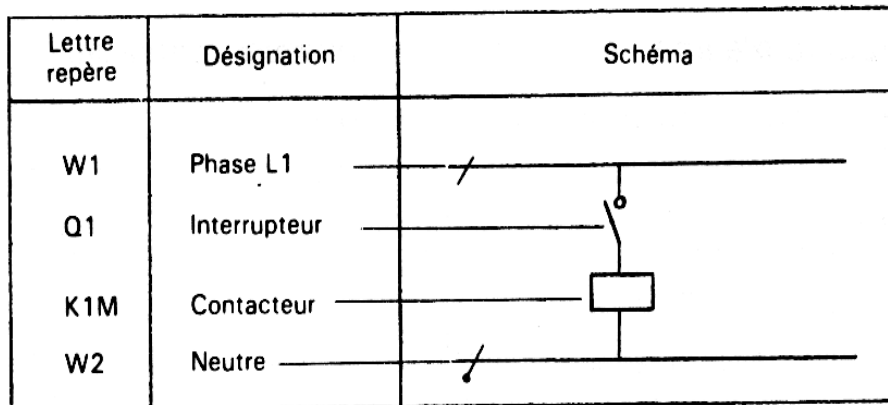


fig.6-5

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.6-6)

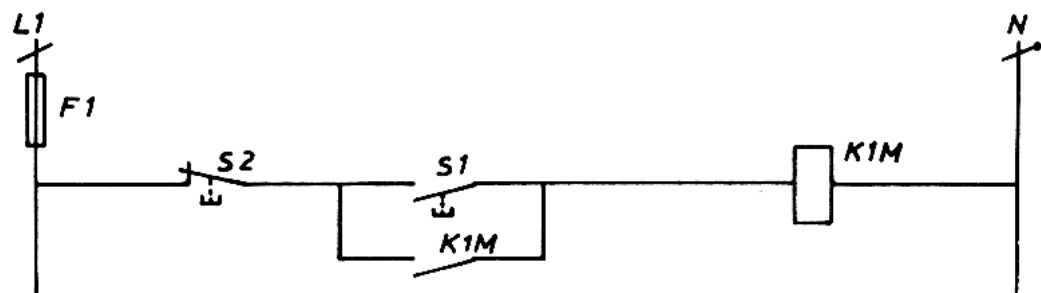


fig.6-6

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.6-7)

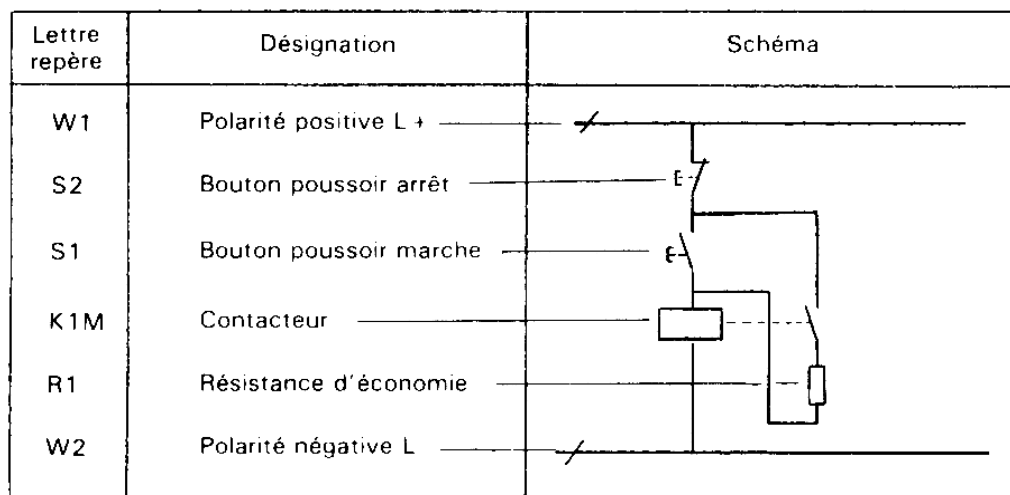


fig.6-7

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 S 2 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 K 1M n'est pas alimentée.
- Les contacts de puissance de K 1M 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.6-8)

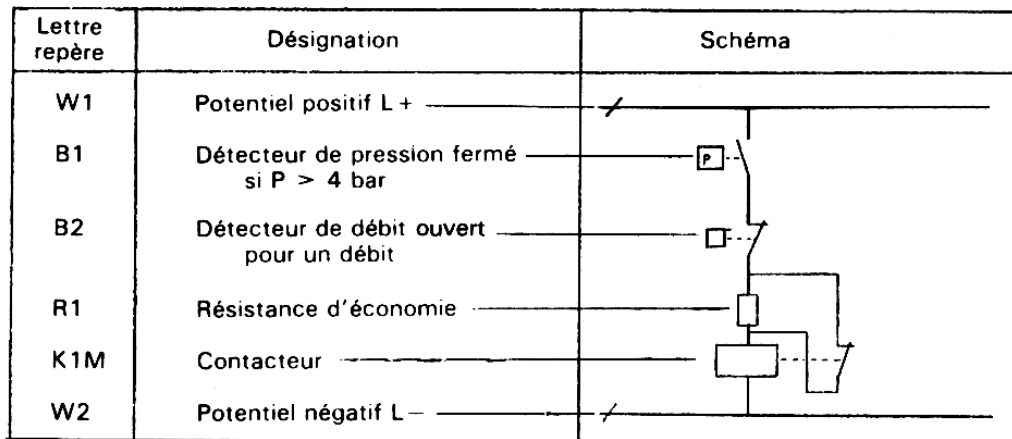


fig.6-8

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.

VI.3. 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.

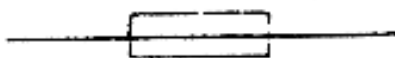
a) **Fusible** (fig.6-9)

fig.6-9

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.6-10)

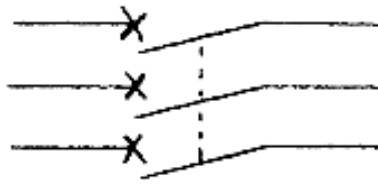


fig.6-10

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.6-11)

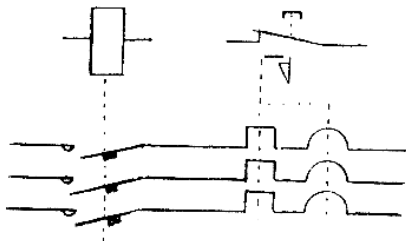


fig.6-11

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.

VII. Problèmes industriels

Les moteurs asynchrones triphasés, spécialement les moteurs à cage, sont les moteurs électriques les plus répandus dans l'industrie; il est donc essentiel de développer les principaux problèmes posés par leur utilisation.

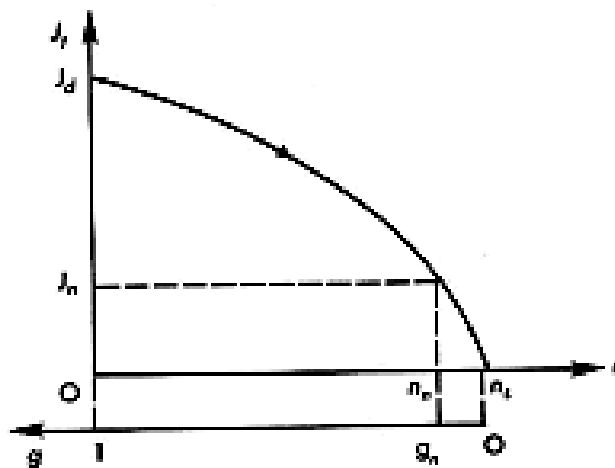
Les performances d'un moteur concernent les domaines suivants : démarrage, variation de la vitesse, freinage et inversion du sens de marche.

VII.1. Problèmes de démarrage

Le problème du démarrage comporte deux aspects :

a) Courant appelé

Lorsque le stator est mis sous tension, le rotor est à l'arrêt ($n = 0 \Rightarrow g = 1$) : le moteur se comporte exactement comme un transformateur triphasé en court-circuit (les courants rotoriques ont la même fréquence f que les grandeurs statoriques). La valeur efficace I_d des courants appelés dans la ligne est alors très supérieure au courant nominal I_n (fig. 7- 1). I_d est le courant de décollage (ou de démarrage); le rapport I_d / I_n , appelé **pointe de courant**, est souvent compris entre 4 et 10.



Courant de démarrage

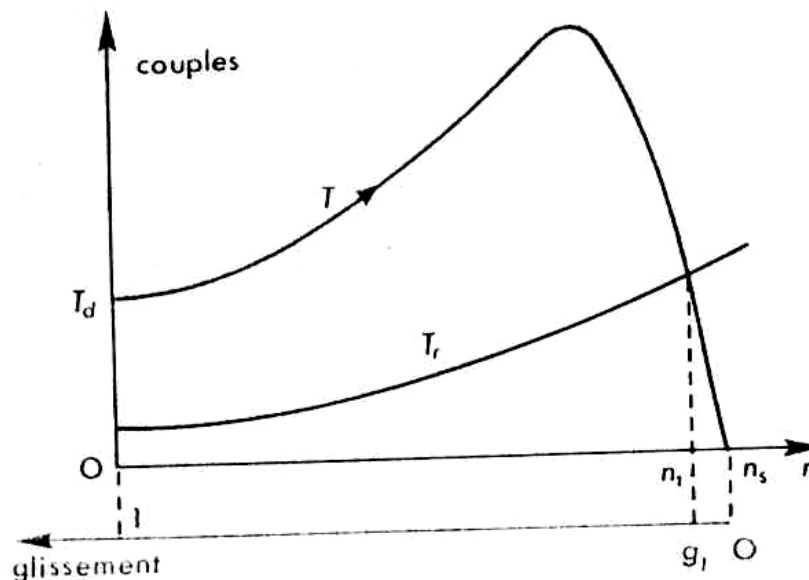
Fig. 7- 1

Dès que le moteur se met à tourner, le courant appelé diminue rapidement. En fait, pendant le démarrage le courant reste supérieur à sa valeur nominale que très peu de temps. Le moteur est généralement capable de le supporter sans échauffement dangereux. Cependant il en résulte, dans la ligne alimentant le moteur, une chute de tension qui, malgré sa brièveté, est inacceptable pour les autres usagers branchés sur la même ligne.

b) Couple exercé

Pour que le groupe, moteur asynchrone + machine entraînée, démarre il faut que le couple électromagnétique T_d au décollage soit **supérieur** au couple résistant T_r correspondant à $n = 0$.

S'il en est ainsi le groupe voit sa fréquence de rotation n croître jusqu'à une limite, l'abscisse n_1 du point d'intersection de la caractéristique $n = f(T)$ du moteur et de la caractéristique $n = f(T_r)$ de la machine entraînée (fig. 7- 2).



Couple de démarrage

Fig. 7 - 2

Lorsque n a atteint cette limite, le démarrage est terminé : c'est le régime **permanent** puisque le couple moteur T est exactement équilibré par le couple résistant T_r .

Au cours de démarrage g passe progressivement de 1 à une valeur voisine de zéro (par exemple $g = 0,05$); les pertes rotoriques, proportionnelles à g , sont très supérieures, pendant toute la durée du démarrage, à leur valeur en marche nominale; pour que l'échauffement du moteur ne soit pas excessif, il faut que le temps de démarrage soit aussi court que possible.

VII.2. démarrage des moteurs à cage

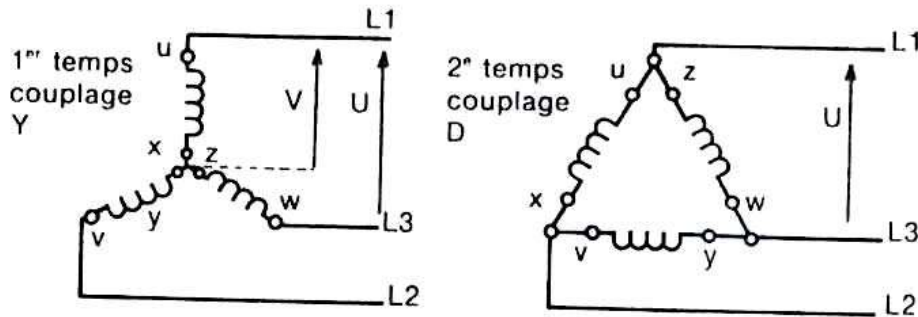
Lorsque la puissance du moteur est faible (inférieure à 1.5 kW) on tolère le démarrage direct.

Dans les autres cas, il faut effectuer le démarrage sous tension réduite c'est à dire avec une valeur inférieure à tension nominale V_n . On y parvient de différentes façons.

a) Démarrage étoile-triangle :

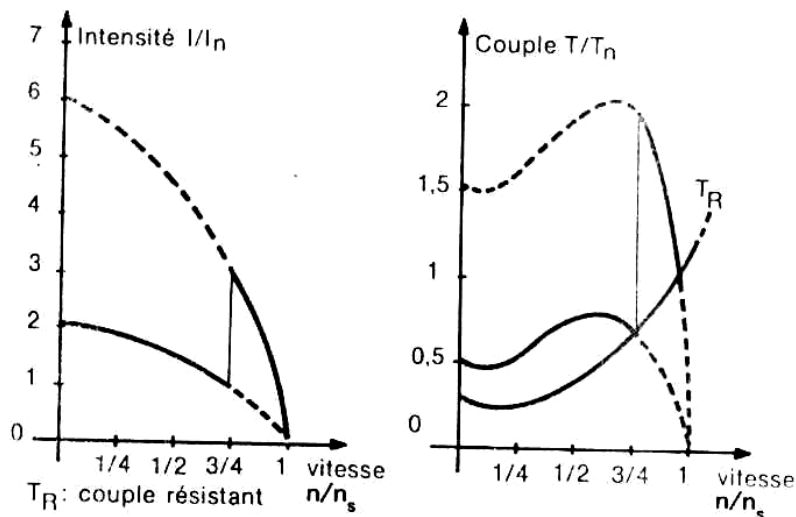
Ce procédé est basé sur le rapport des grandeurs entre la tension simple V et la tension composée d'un réseau triphasé de distribution $U = V \sqrt{3}$ (fig. 7- 3).

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
Fig. 7 – 3

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 (fig. 7– 4).



a) $I = f(n)$; b) $T = f(n)$

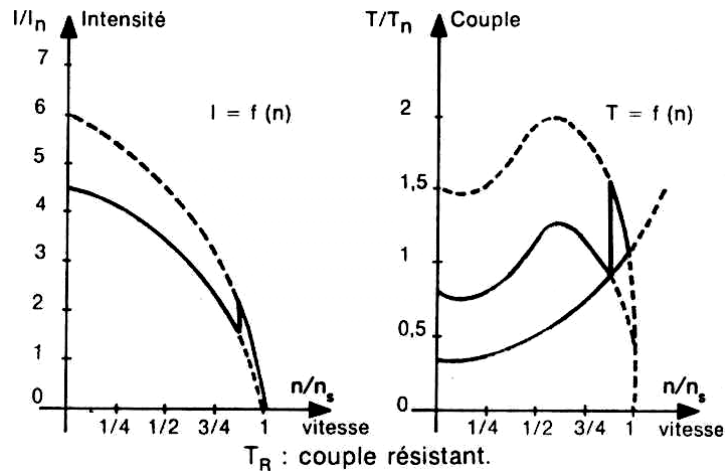
Caractéristiques techniques

Fig. 7– 4

b) Démarrage par élimination des résistances statoriques :

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 (fig. 7– 5).



a) $I = f(n)$;

b) $T = f(n)$

Caractéristiques techniques
Fig. 7 – 5

c) Démarrage par auto-transformateur :

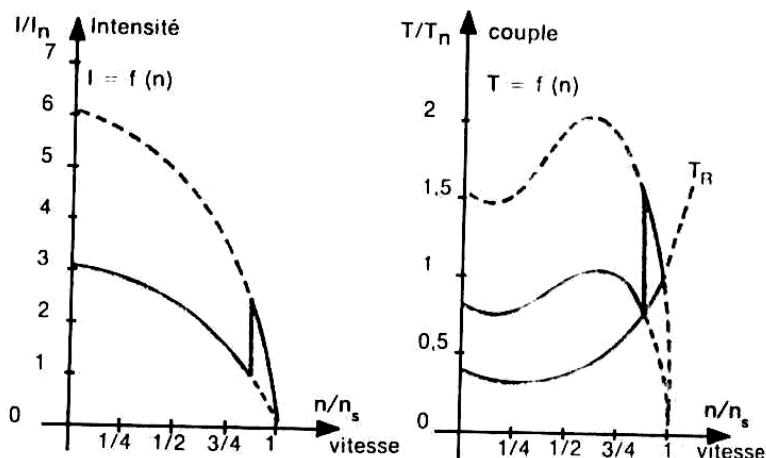
Ce procédé de démarrage se fait en trois temps :

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 (fig. 7– 6).



a) $I = f(n)$;

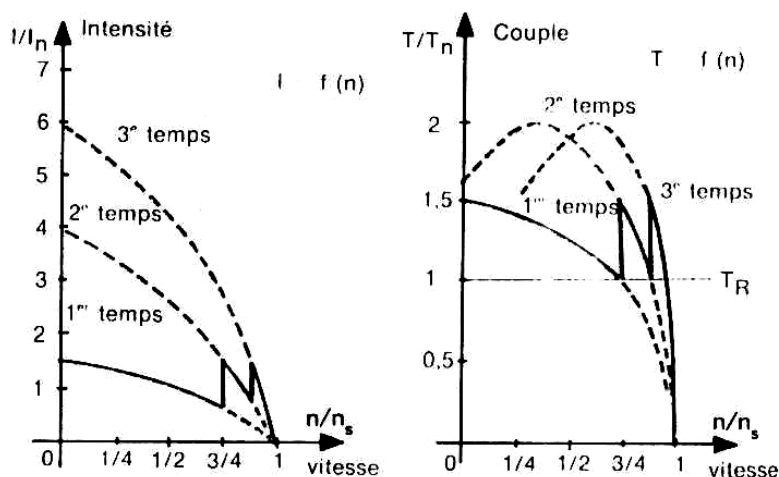
b) $T = f(n)$

Caractéristiques techniques
Fig. 7 – 6

VII.3. démarrage des moteurs à bagues

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. (fig. 7– 7).



Caractéristiques techniques
a) $I = f(n)$; b) $T = f(n)$
Fig. 7– 7

VII.4. Démarrage semi-automatique des moteurs asynchrones triphasés

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

VII.4.1. Démarrage direct

a) Démarrage direct un sens de rotation

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

Schéma fonctionnel de l'ensemble (fig 7-8)

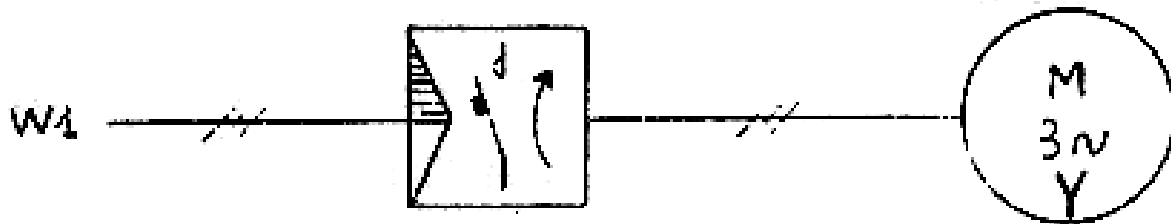


Figure 7-8

Schéma développé rangé des circuits de commande et de puissance (fig 7-9)

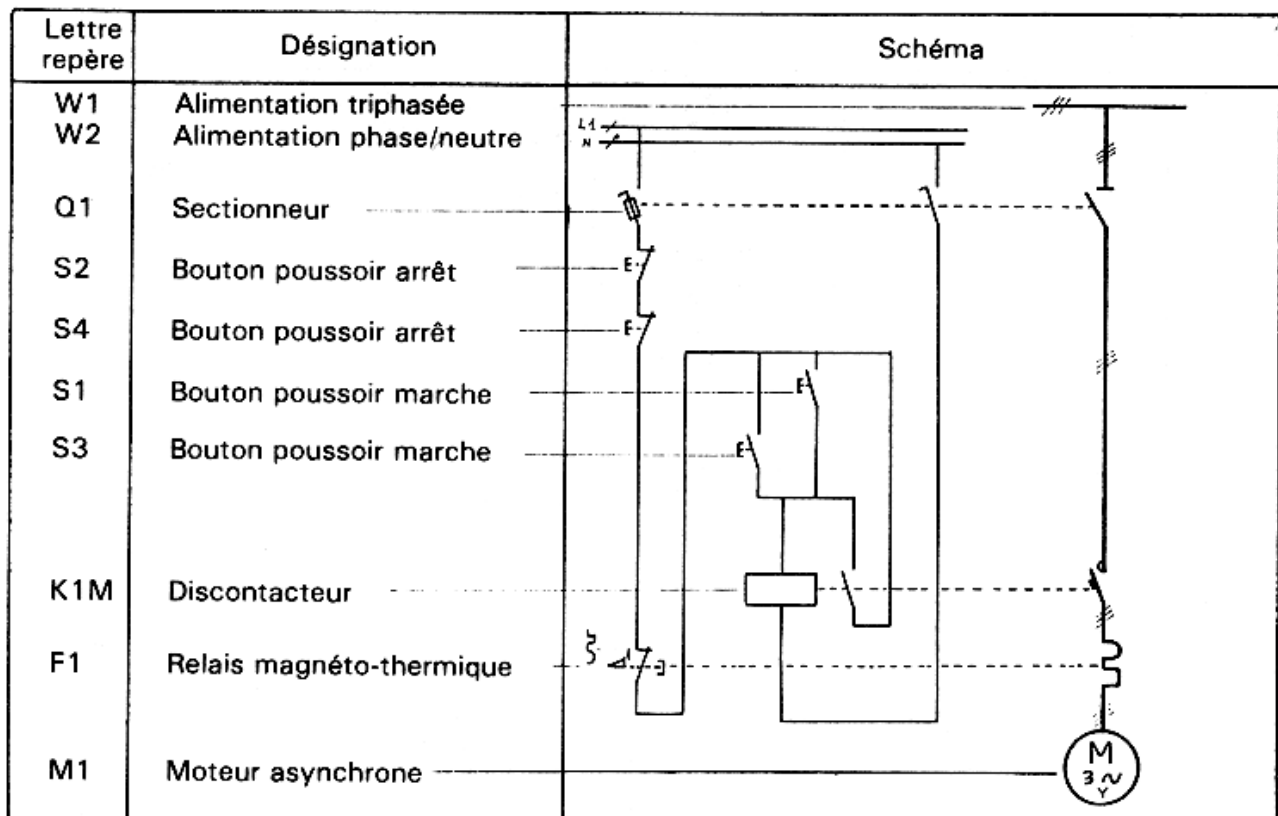


Figure 7-9

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

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

Schéma fonctionnel de l'ensemble (fig 7-10)

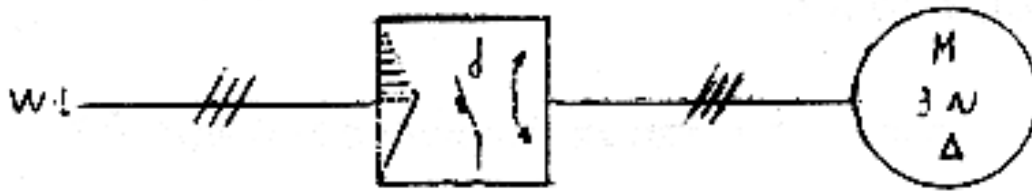


Figure 7-10

Schéma développé du circuit de puissance (fig 7-11)

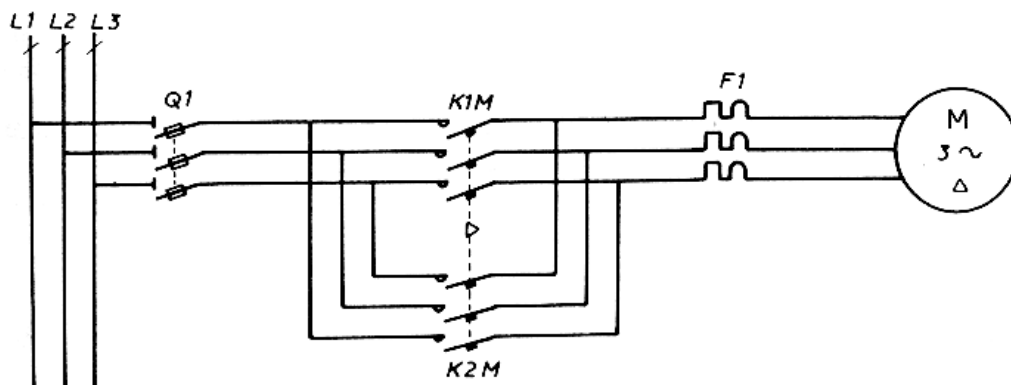


Figure 7-11

Schéma développé du circuit de commande (fig 7-12)

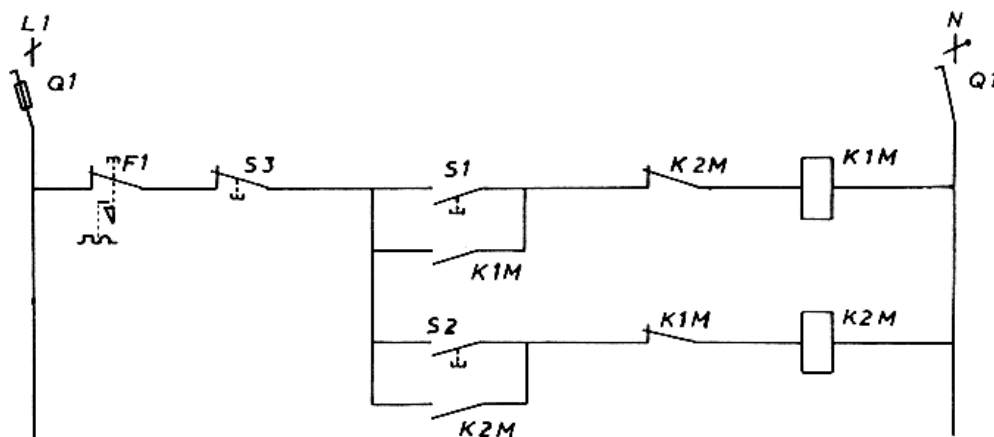


Figure 7-12

Légende :

- Q1 : 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
- 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.

VII.4.2. Démarrage étoile triangle

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^{er} temps : chaque enroulement du stator est alimenté sous une tension réduite (couplage étoile).*
- *2^{ème} : 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'écureuil.*
- *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 semi-automatique étoile triangle d'un moteur à un seul sens de rotation;
commandé par discontacteur.

Schéma fonctionnel de l'ensemble (fig 7-13)

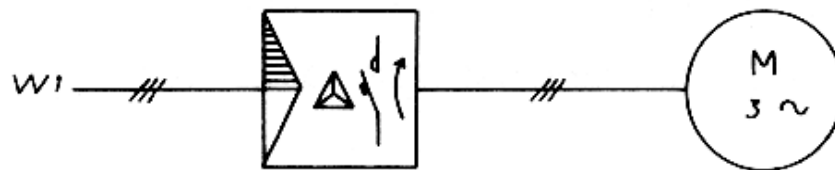


Figure 7-13

Schéma développé du circuit de puissance (fig 7-14)

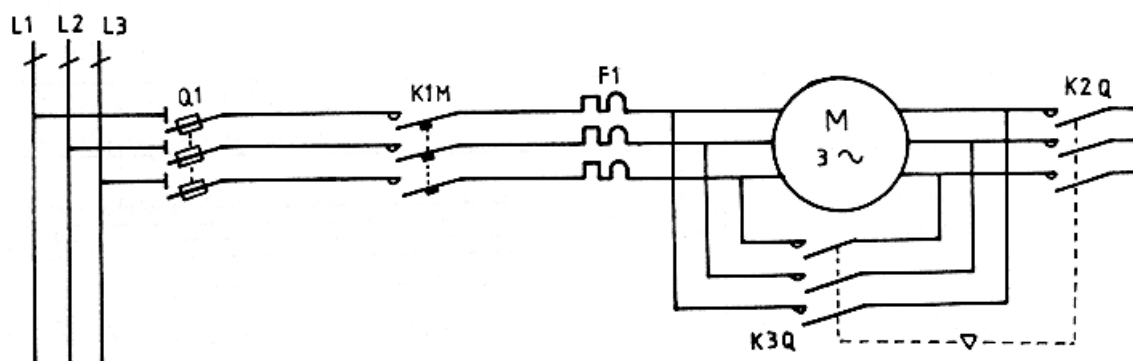


Figure 7-14

Schéma développé du circuit de commande (fig 7-15)

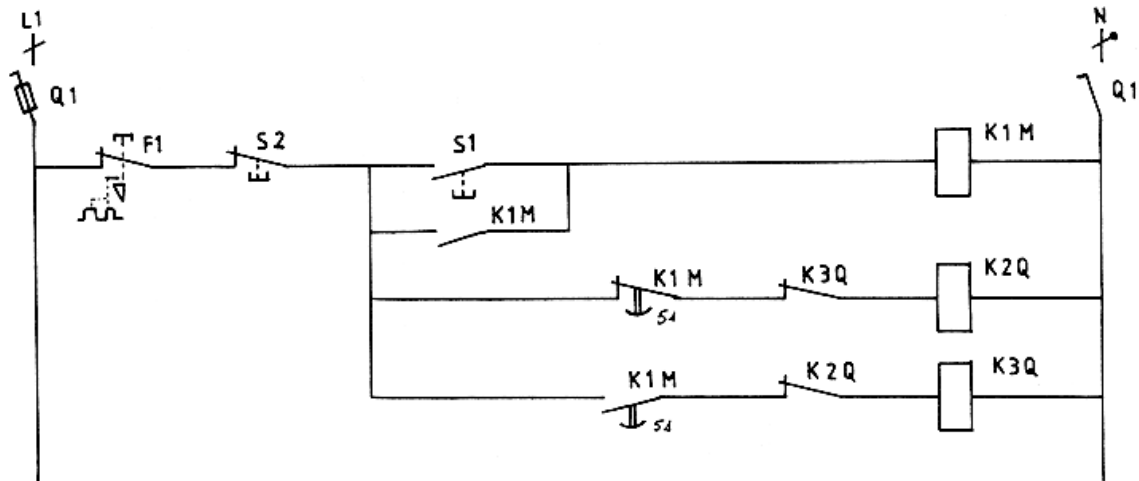


Figure 7-15

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.

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 7-16)

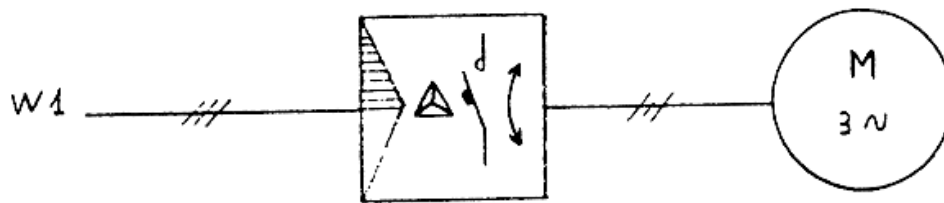
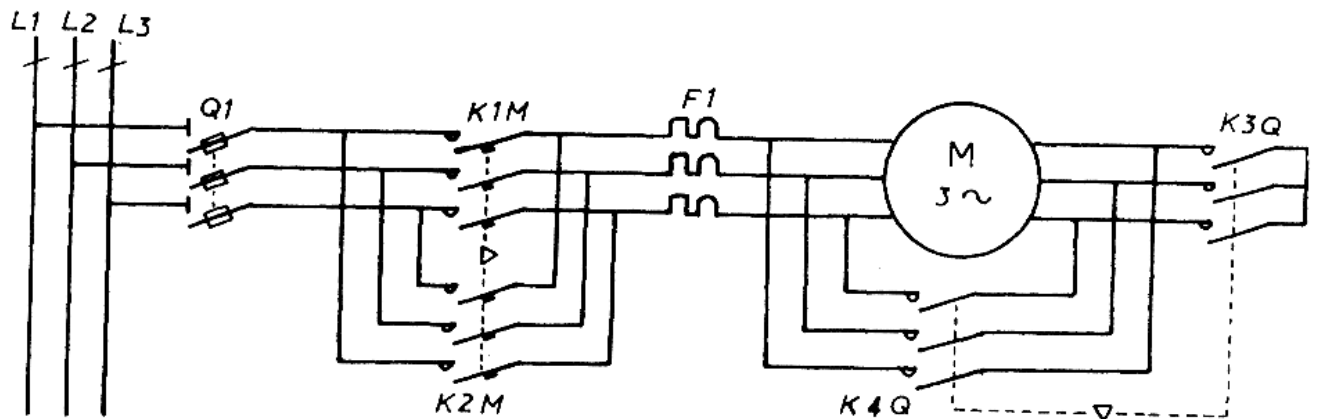


Figure 7-16

schéma développé du circuit de puissance (fig 7-17)



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 7-17

Schéma développé du circuit de commande (fig 7-18)

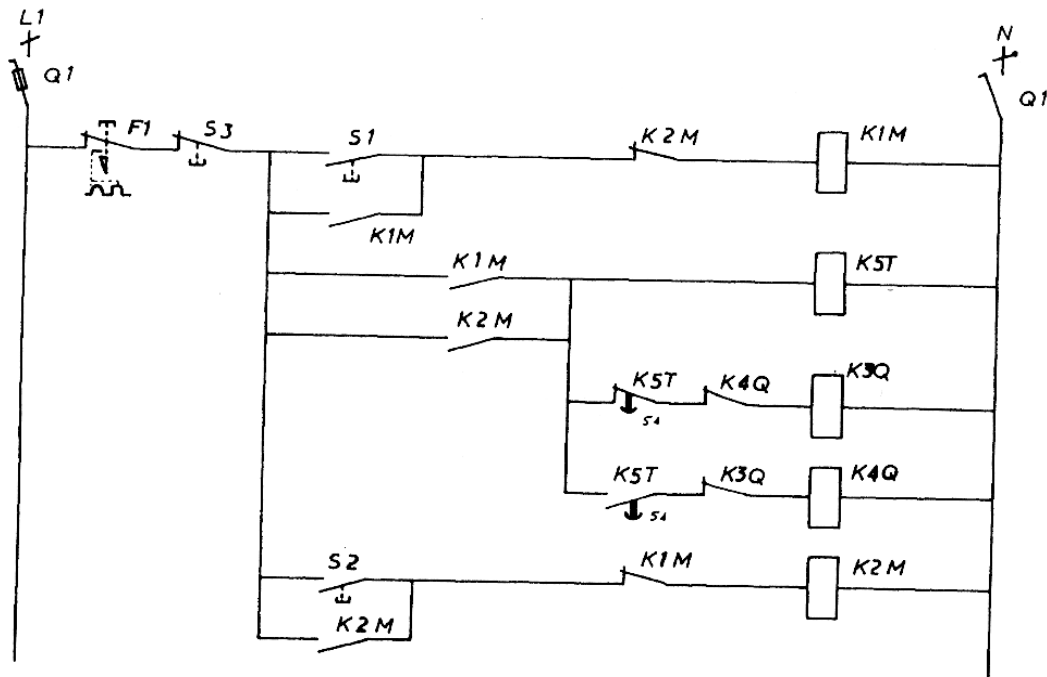


Figure 7-18

VII.4.3. Démarrage par élimination de résistances statoriques

Ce démarrage s'effectue en deux temps minimum.

- 1^{er} temps : les enroulements du stator sont alimentés à travers des résistances (donc sous tension réduite).
- 2^{ème} 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 semi-automatique en trois temps par élimination de résistances statoriques d'un moteur asynchrone triphasé à un seul sens de rotation.

Schéma fonctionnel de l'ensemble (fig 7-19)



Figure 7-19

Schéma développé du circuit de puissance (fig 7-20)

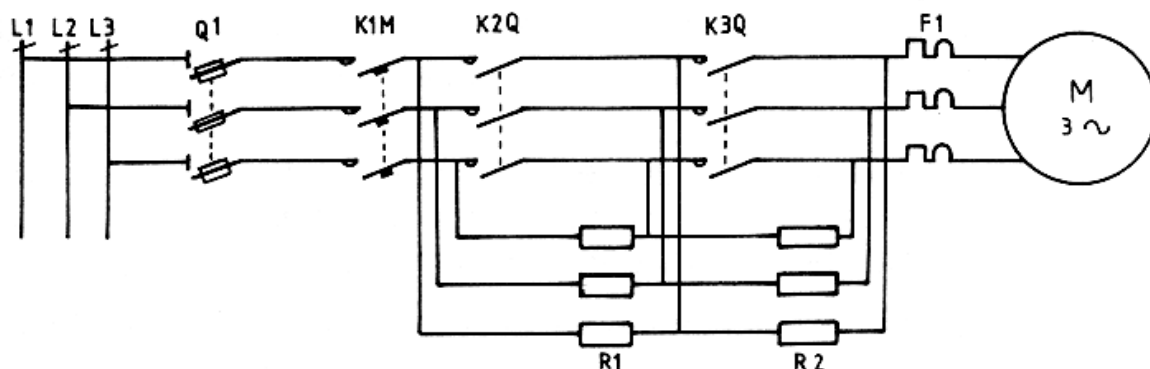


Figure 7-20

Schéma développé du circuit de commande (fig 7-21)

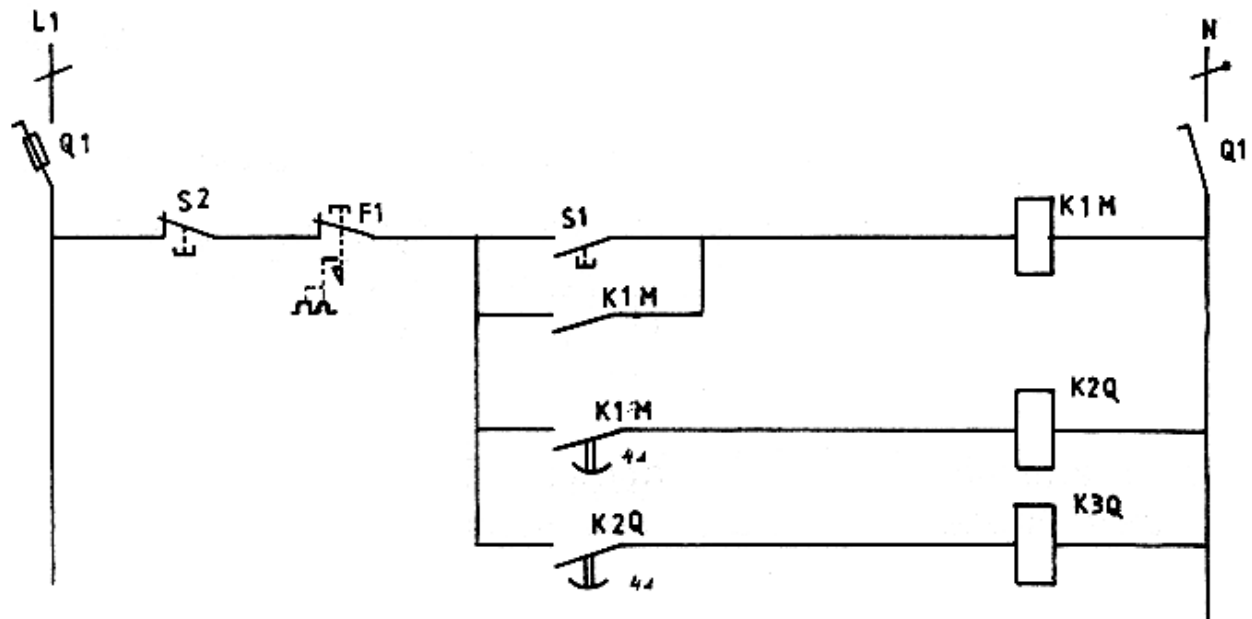


Figure 7-21

Légende :

- Q1 : fusible sectionneur*
- F1 : relais magnéto-thermique
- S1 : bouton poussoir marche
- S2 : bouton poussoir arrêt
- K1M : discontacteur principal
- K2Q : contacteur 2^e temps
- K3Q : contacteur 3^e 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^{ème} 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^e 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 7-22)

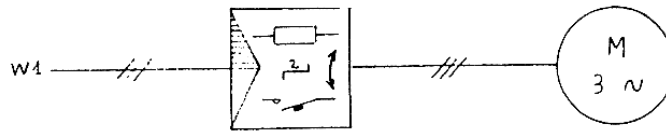


Figure 7-22

Schéma développé du circuit de puissance (fig 7-23)

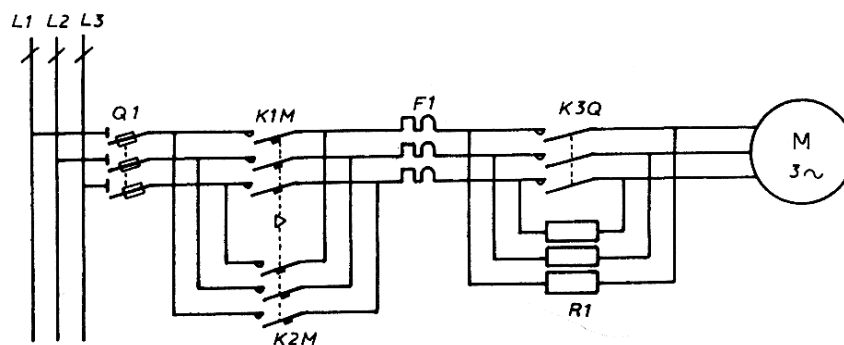
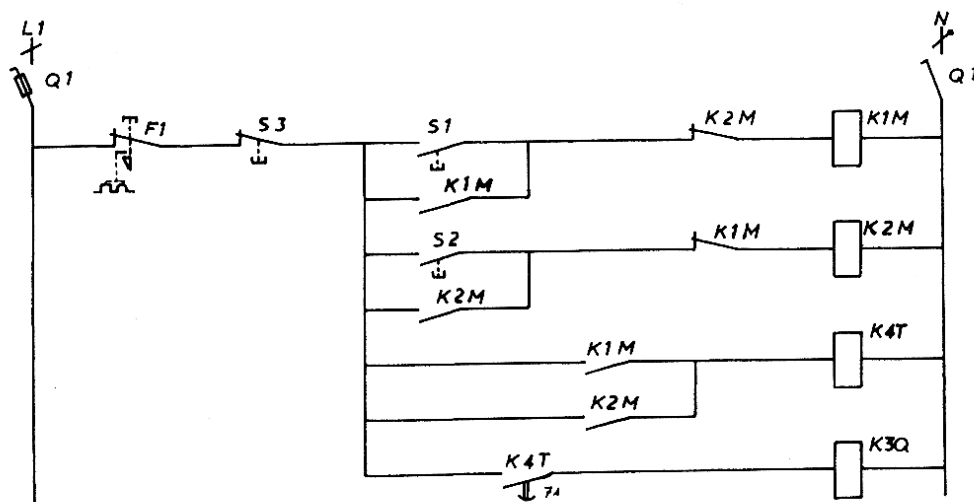


Figure 7-23

Schéma développé du circuit de commande (fig 7-24)



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 7-24

VII.4.4. Démarrage par autotransformateur

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

- 1^{er} temps : le moteur est alimenté sous une tension très réduite délivrée par l'autotransformateur.
- 2^{ème} temps : le moteur est alimenté sous une tension réduite à travers une partie des enroulements de l'autotransformateur
- 3^{ème} 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 7-25)



Figure 7-25

Schéma développé du circuit de puissance (fig 7-26)

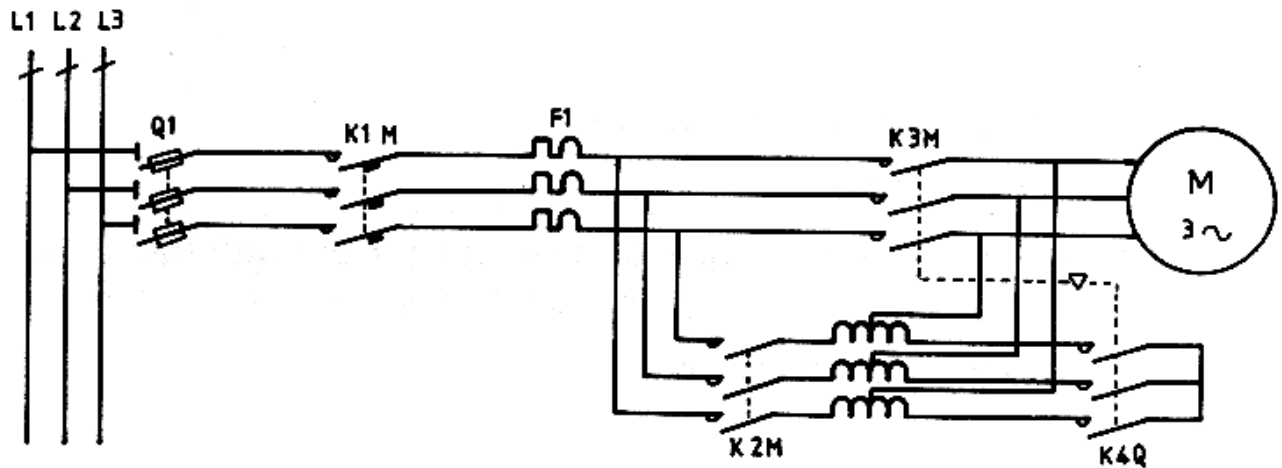


Figure 7-26

Schéma développé du circuit de commande (fig 7-27)

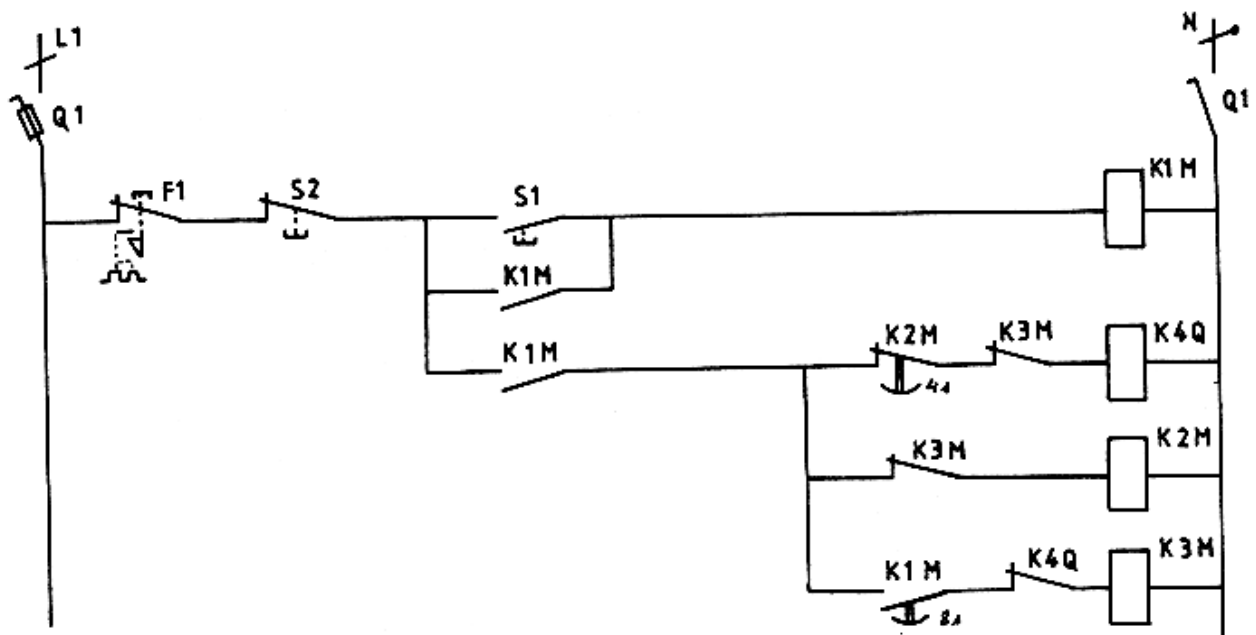


Figure 7-27

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^e temps
- K4M : contacteur étoile
- T1 : Autotransformateur
- M : moteur asynchrone triphasé

Fonctionnement de l'ensemble

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

- S'auto-alimente.*
- Excite les bobines K4Q et K2M*
- Alimente le moteur à travers l'autotransformateur couplé en étoile.*

Au bout de quatre secondes, le contact temporisé de K2M s'ouvre et désexcite la bobine K4Q ; le moteur est alimenté à travers une partie des enroulements de l'autotransformateur. Après quatre secondes le discontacteur K1M ferme son contact temporisé ce qui provoque l'excitation de la bobine K3M et la désexcitation de K2M ; le moteur est alors alimenté sous sa tension nominale.

Une action sur le bouton poussoir arrêt ou un fonctionnement du relais magnéto-thermique coupe l'alimentation du circuit de commande ; le moteur s'arrête.

Remarque

Les contacteurs K3M et K4Q doivent être verrouillés mécaniquement et électriquement pour éviter les courts-circuits entre phases.

Note : Les contacteurs possèdent des contacts temporisés.

b) Démarrage par autotransformateur deux sens de rotation (fig 7-28)

Schéma développé du circuit de puissance

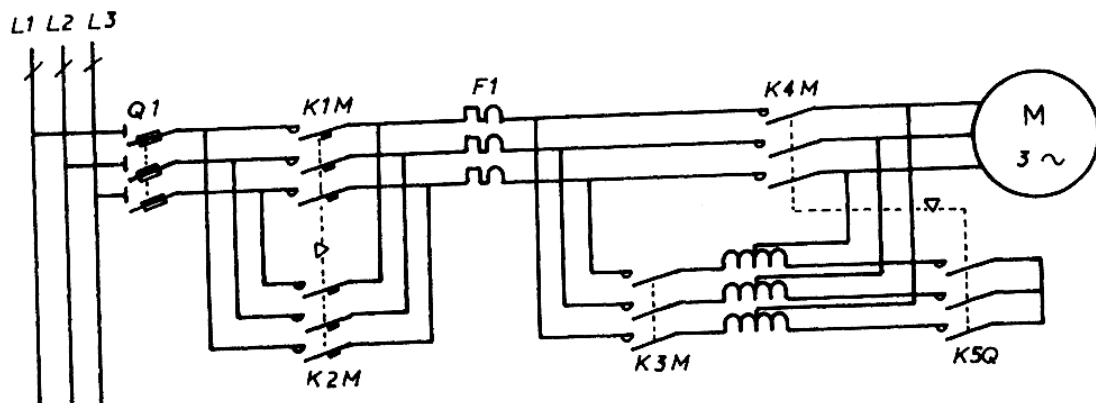
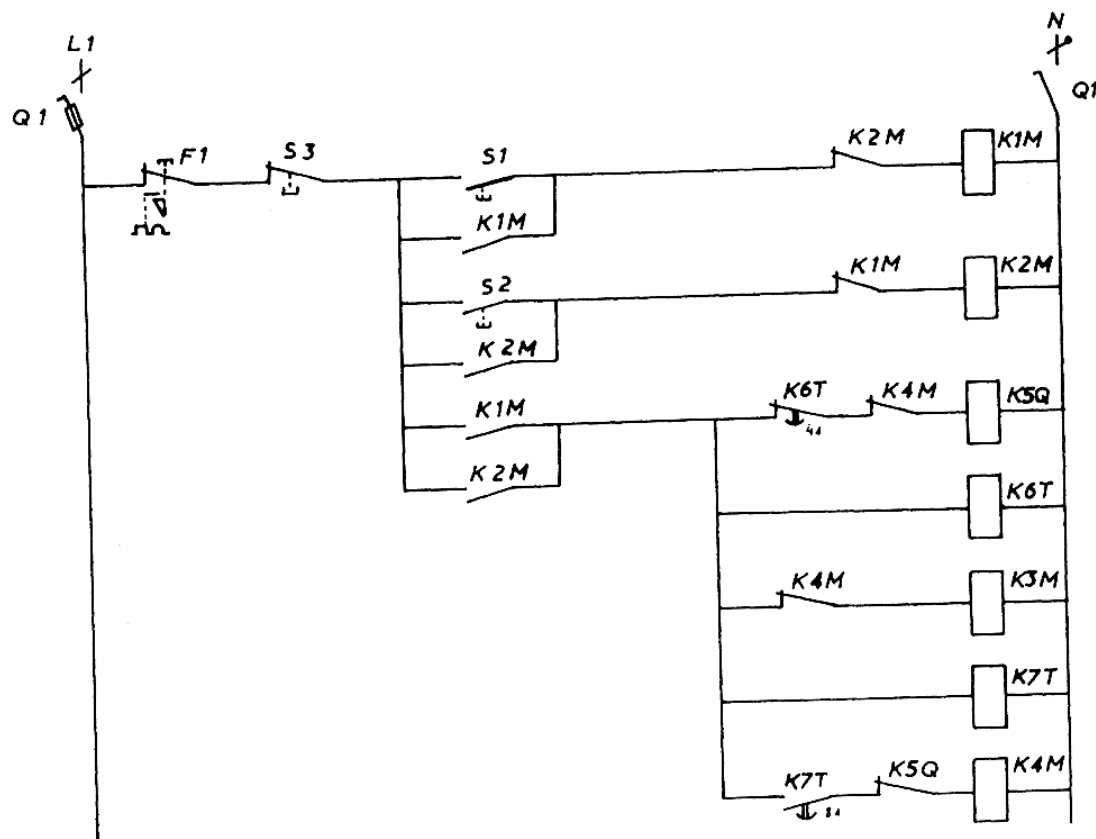


Schéma développé du circuit de commande



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 7-28

VII.4.5. Démarrage par élimination de résistances rotoriques

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^{er} temps : On limite le courant dans les enroulements du rotor en insérant dans ce circuit des résistances.
- 2^{ème} 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.

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 7-29)

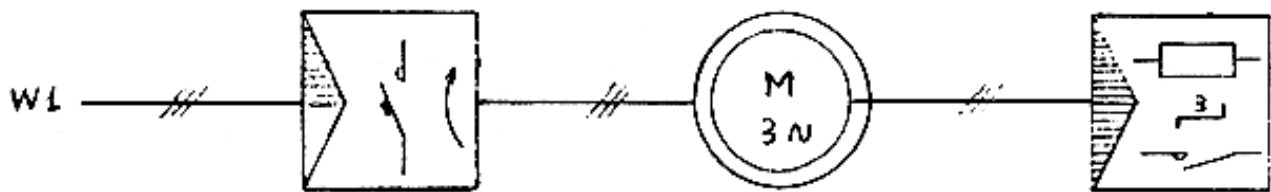


Figure 7-29

Schéma développé du circuit de commande (fig 7-30)

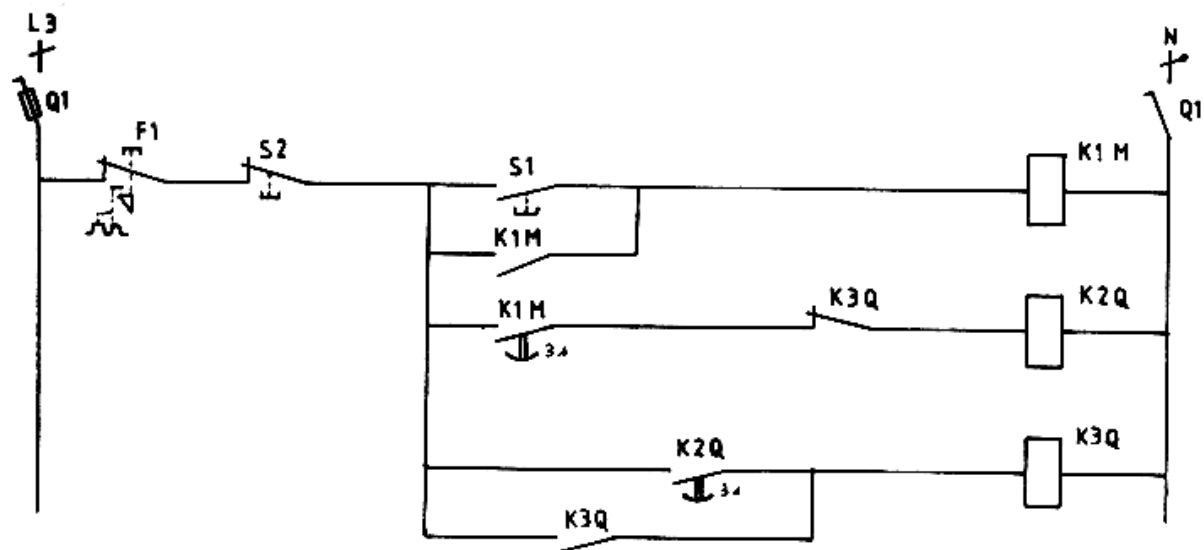


Figure 7-30

Schéma développé un circuit de puissance (fig 7-31)

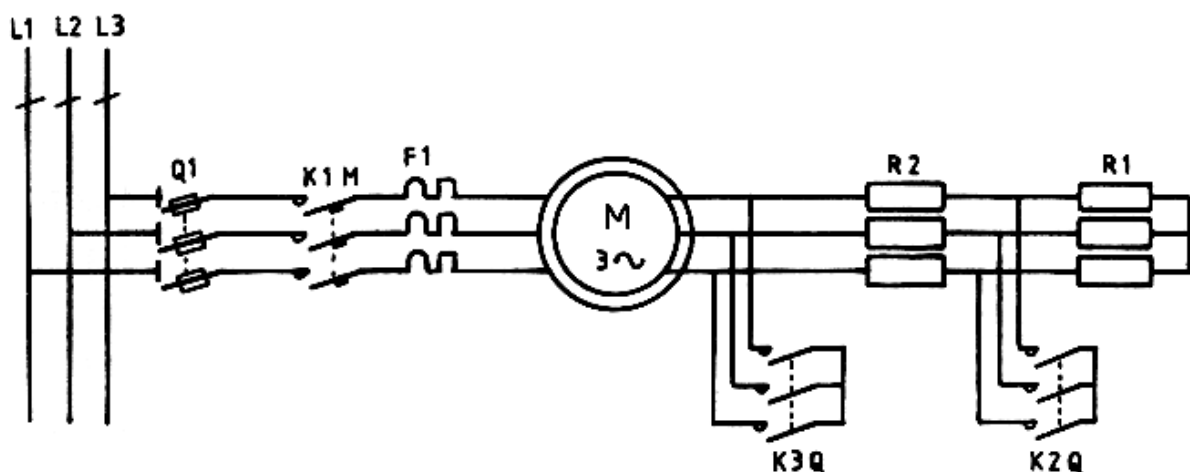


Figure 7-31

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^{ème} 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^{ème} 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 7-32)

Schéma développé du circuit de puissance

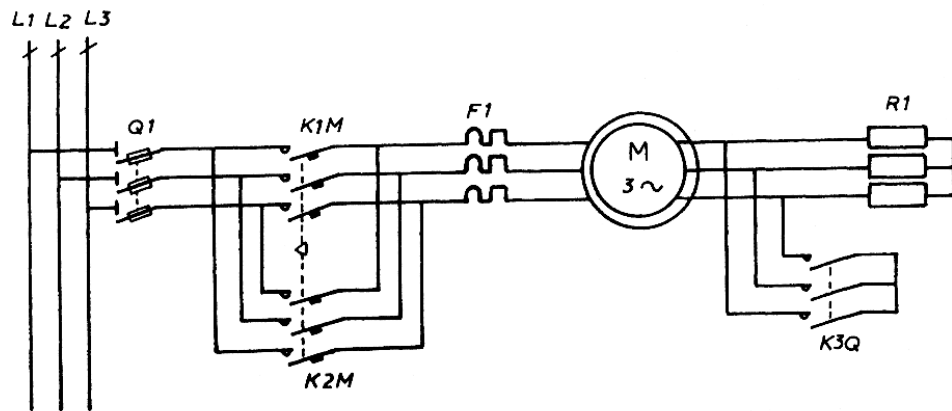
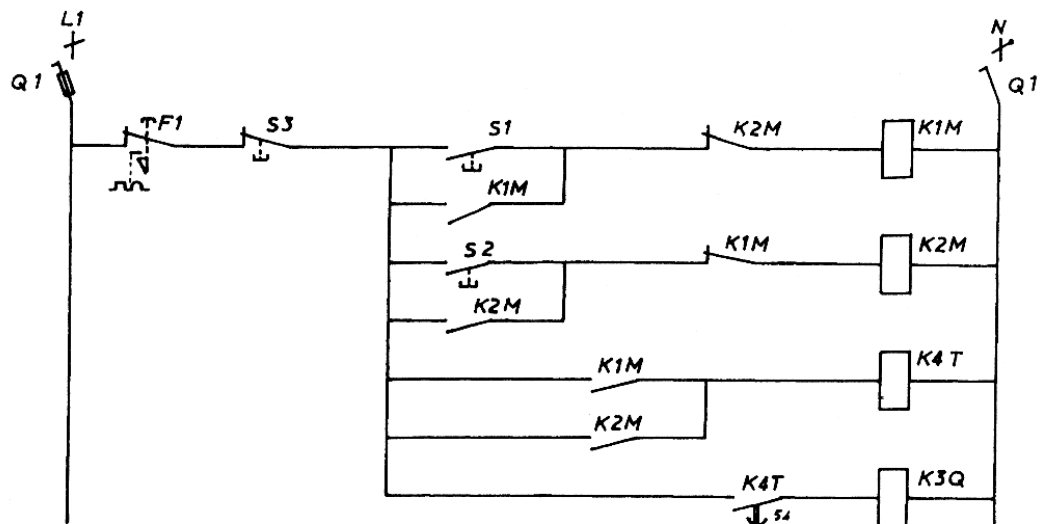


Schéma développé du circuit de commande



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 7-32

VII.5. Freinage des moteurs asynchrones triphasés

VII.5.1. 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.

VII.5.2. 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 7-33)

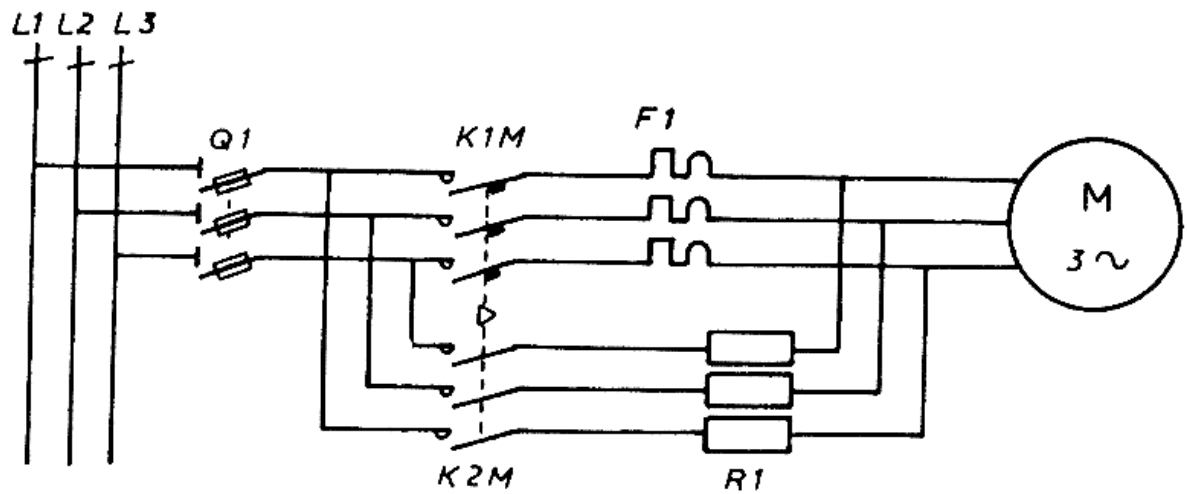
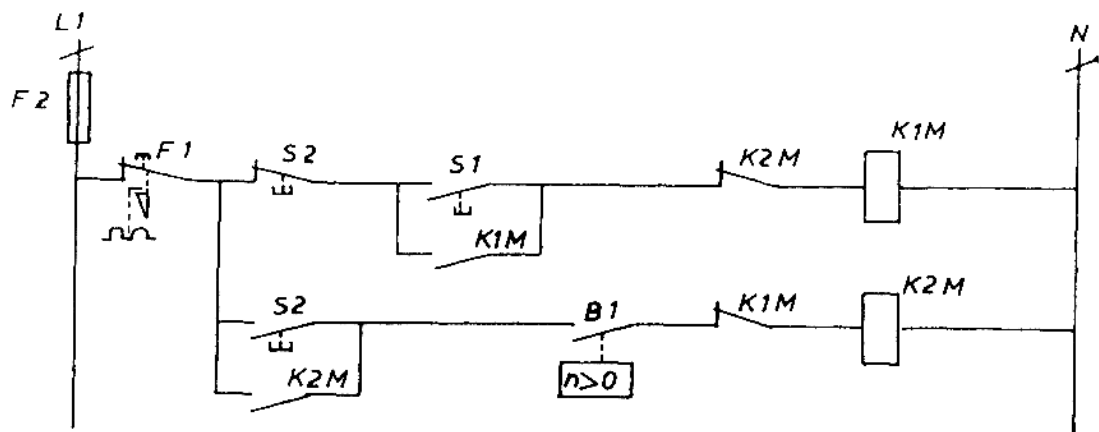


Figure 7-33

Schéma développé du circuit de commande (fig 7-34)



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 7-34

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 K 2M ; 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 K 2M 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.*

VII.5.3. 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 :

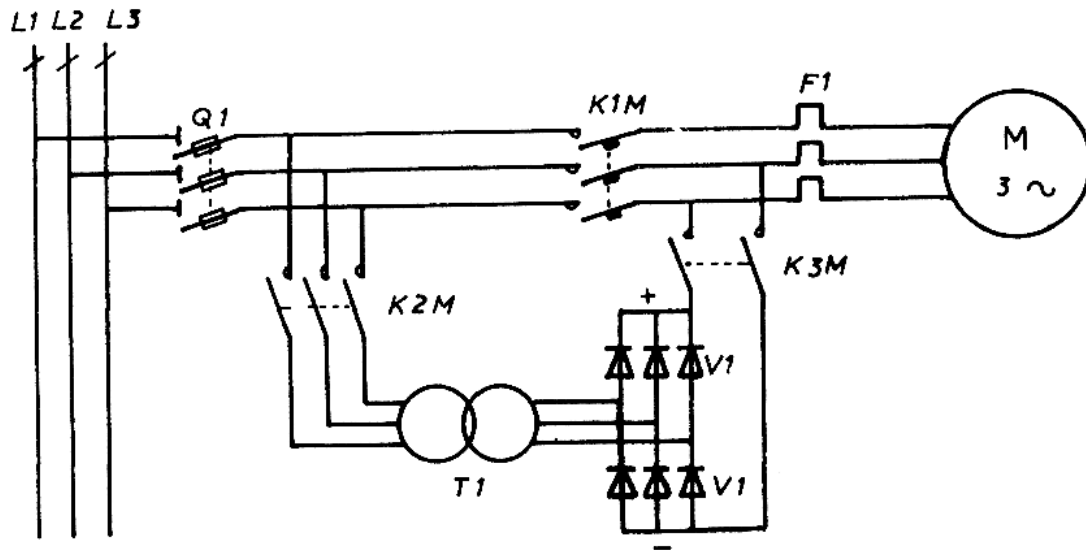
-Il n'y a aucun risque d'inversion du sens de rotation du moteur après son arrêt complet.

-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 7-35)



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 7-35

Schéma développé du circuit de commande (fig 7-36)

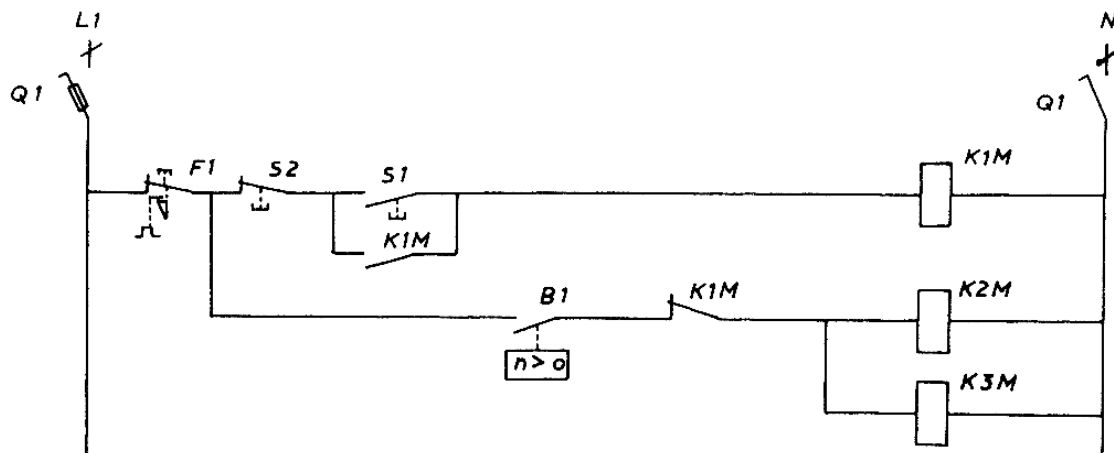


Figure 7-36

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.

VIII. Les différents types de moteurs à double vitesse et leurs systèmes de commande

VIII.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 8-1)

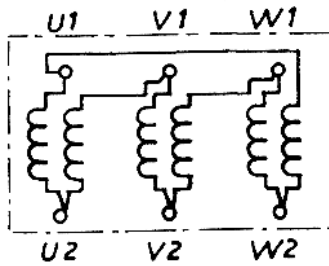


Figure 8-1
La plaque à bornes comporte six bornes.

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 8-2)

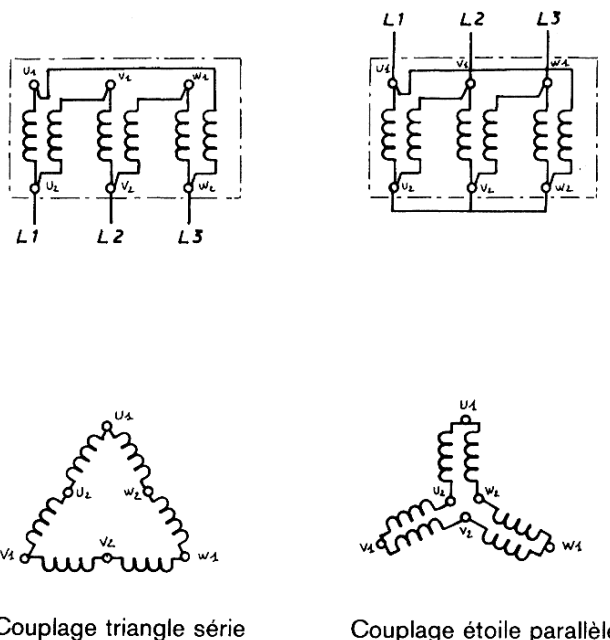


Figure 8-2

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 8-3)

Schéma développé du circuit de puissance

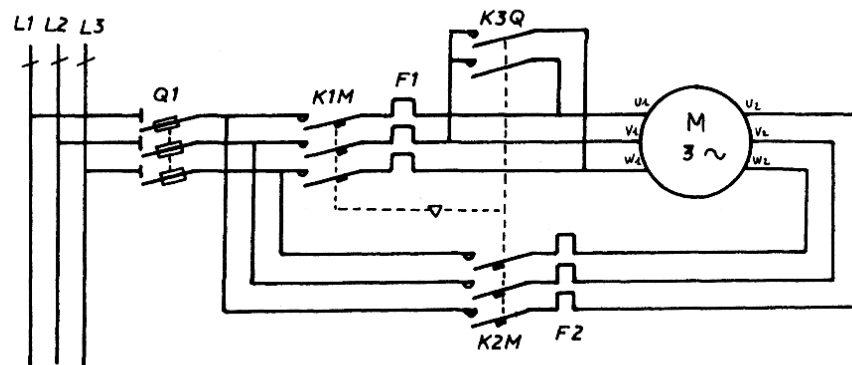
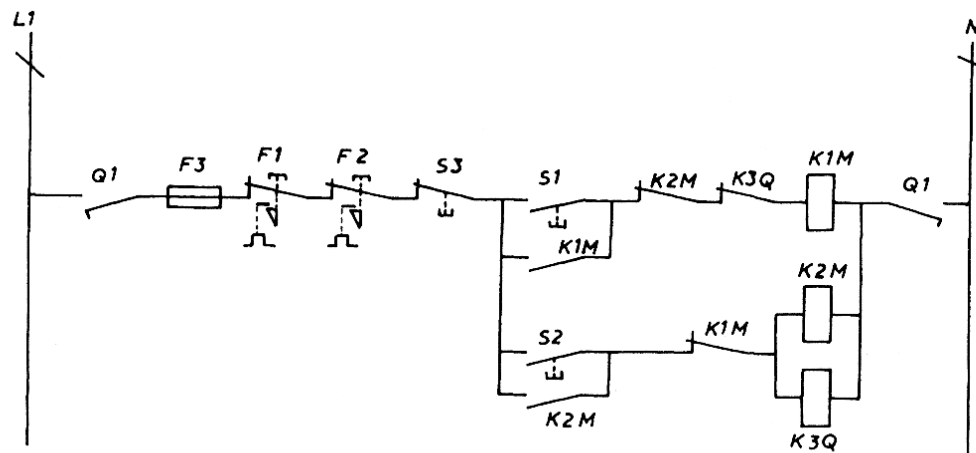


Schéma développé du circuit de commande



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 8-3

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 8-4)

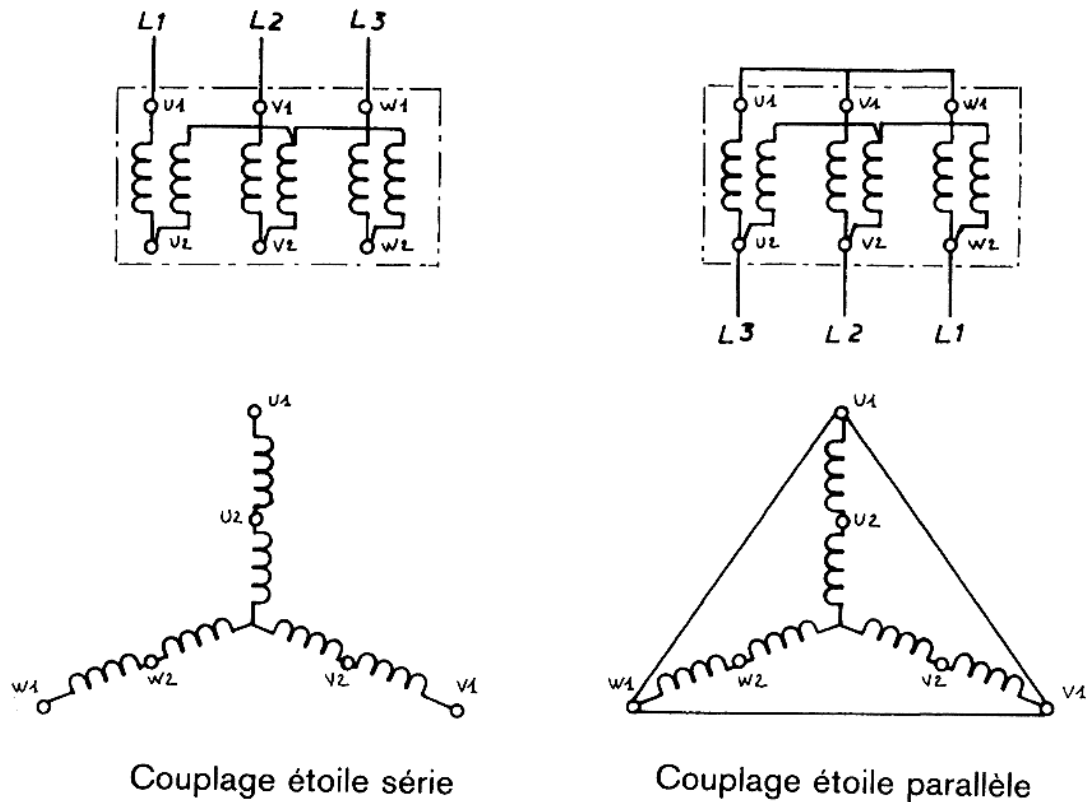


Figure 8-4

Exemple de schéma (fig 8-5)

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

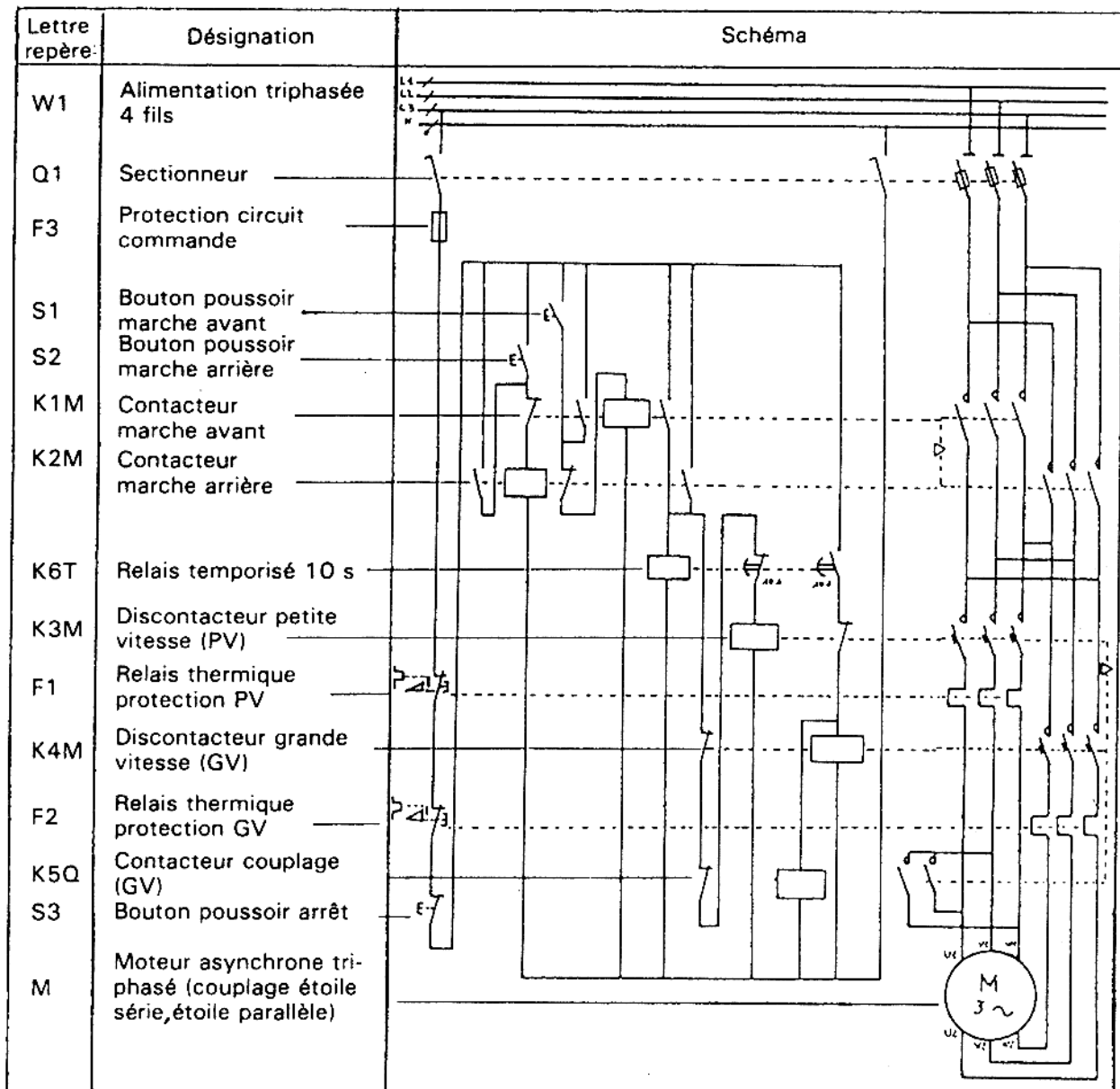


Figure 8-5

VIII.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'écureuil.

Plaque à bornes du moteur (fig 8-6)

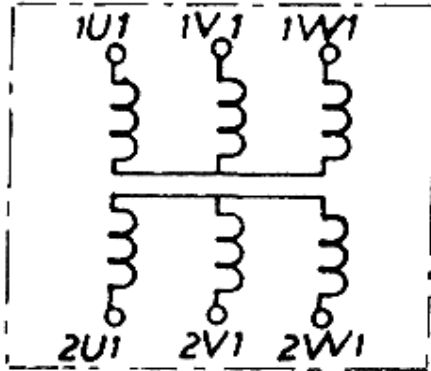


Figure 8-6

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 8-7)

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

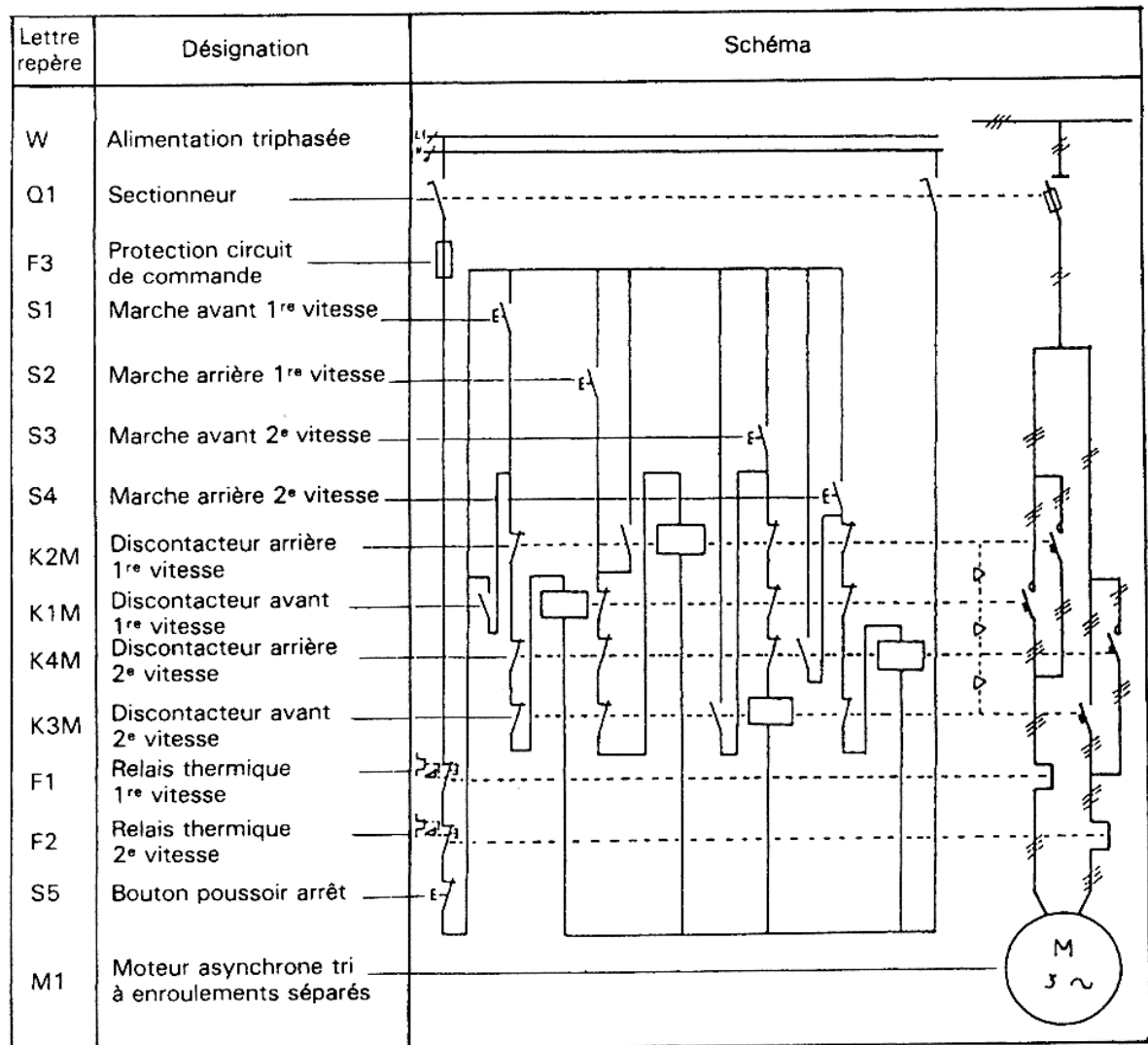


Figure 8-7

IX. 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 9 -1).

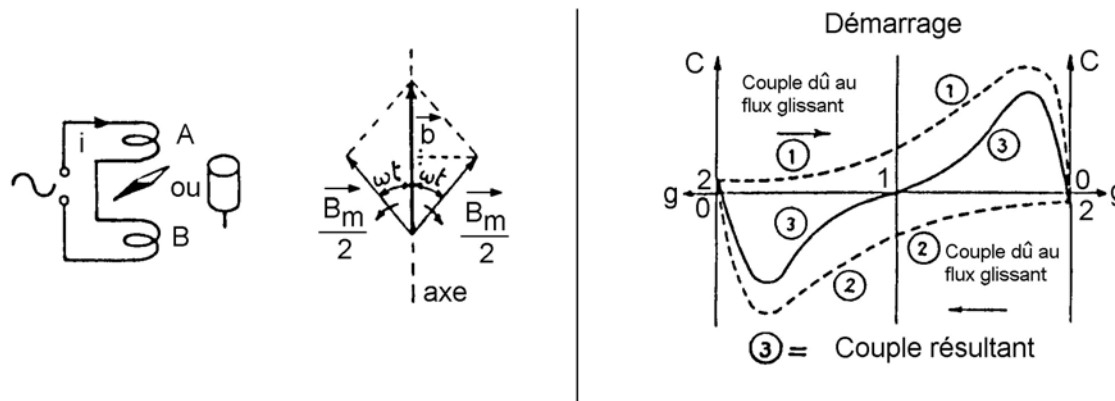


Figure 9-1

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 9 - 2).

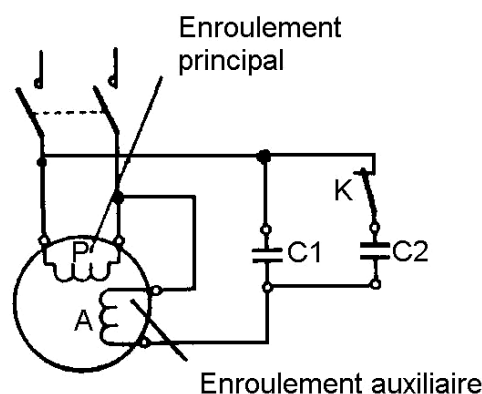


Figure 9-2

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

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 9 -3).

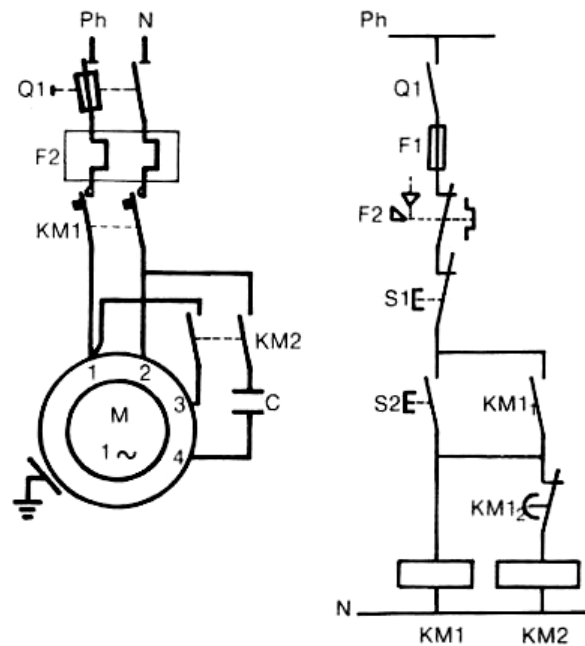


Figure 9 -3

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 9-4).

Il est nécessaire d'utiliser des artifices de démarrage tels que : enroulement auxiliaire ou spire de déphasage.

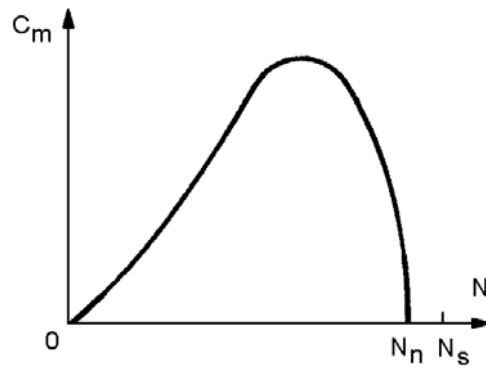


Figure 9-4

- **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 9-5).

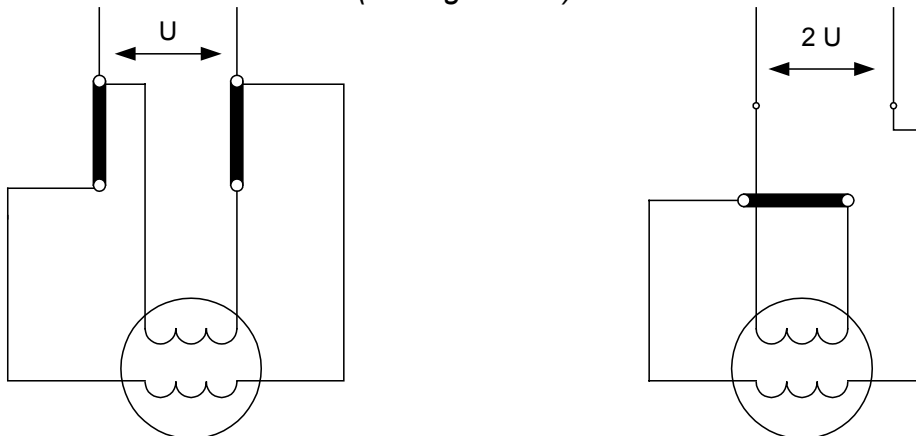


Figure 9 -5

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.

X. Entretien et dépannage des machines à courant alternatif

X.1. Entretien

L'entretien des machines à courant alternatif est assez réduit et se limite à l'entretien systématique qui comporte :

- Renouvellement de la graisse pour les paliers à roulements à billes et au maintien du niveau d'huile dans les paliers à coussinets;
- Dépoussiérage, qui peut être fait au soufflet, à l'air comprimé et à l'aide de chiffons ou d'étoffe pour les parties accessibles;
- Propreté du collecteur ou des bagues, que l'on peut entretenir en utilisant soit une pierre ponce, soit du papier de verre à grain fin;
- Vérification des charbons des balais, tant au point de vue leur pression sur le collecteur ou les bagues que de leur usure. S'il y a lieu de les remplacer, il faut choisir des balais de même composition que les anciens;
- Vérification du serrage des fils d'arrivée à la plaque à bornes;
- Vérification de la tension de la courroie ou du serrage du manchon d'accouplement.

X.2. Dépannage

X.2.1. Types de défaillances

Les interventions que le service de maintenance doit effectuer le plus souvent sur la partie électrique d'une machine à courant alternatif proviennent :

- d'un court-circuit dans les sections des enroulements;
- d'un défaut d'isolement entre sections ou entre le bobinage et la masse métallique du moteur;
- d'une coupure dans le bobinage ou entre le bobinage et le collecteur;
- d'un court-circuit entre lames du collecteur;
- de l'usure mécanique du collecteur ou des bagues;
- du débordement des micas entre les lames du collecteur.

La plupart de ces anomalies sont graves et nécessitent presque toujours le remplacement de la partie en cause.

X.2.2. Préparation de l'intervention

Dès que le service de maintenance reçoit une demande d'intervention il doit procéder à une préparation des travaux.

La préparation de l'intervention d'un dépannage ou d'une réparation au cas d'une défaillance demande le groupement et l'élaboration d'un certain nombre de documents nécessaires.

a) Documentation technique

Dans cette partie on distingue les différents types de documents techniques fournis par les fabricants qui doivent être consultés par le dépanneur :

- Catalogue : c'est une nomenclature qui permet d'identifier et de situer sans ambiguïté les différents articles et produits d'un fabricant;
- Manuel d'installation : un document donnant les principales précautions à prendre pendant le transport, le magasinage et l'installation d'une machine;

- ### ***b) Plaque signalétique***

Parmi les caractéristiques on trouve :

- Le type de la machine (moteur ou génératrice)
- La nature d'alimentation (courant alternatif)
- La tension d'alimentation, en V (V / U)
- Le courant nominal, en A (I_{Δ} / I_{λ})
- La vitesse de rotation, en tr/min
- La puissance nominale, en kW
- Le courant d'excitation, en A (pour génératrice)
- Le nombre de phase (1 ou 3)
- La fréquence, en Hz
- L'indice de protection : IP...
- La nature de l'isolant : A, BE, F, H ...

C'est un document qui est élaboré par le service de maintenance à la base de la demande d'intervention et de la documentation technique (fig. 10-1).

BON DE TRAVAIL						BT N°	
DATE 19... [][] [][] [][]			DEMANDEUR..... .		PARC..... ...		
MATERIEL.....			MARQUE..... ...	TYPE..... ...	N°.....		
NATURE DU TRAVAIL  				PRIX DE REVIENT			
				Main d'œuvre			
				Fournitures			
				TOTAL.....			
Fournitures	Nb	Coûts unit.	TOTAL	Dates	Ouvriers	Heures	

Fig. 10-1 Bon de travail

A partir du bon de travail le dépanneur détermine les types et les quantités des matériels nécessaires et prépare un bon de sortie du magasin.

X.2.3. Analyse de l'état réel de l'équipement

Pour analyser l'état réel de l'équipement le dépanneur doit faire des vérifications préliminaires, telles que :

a) Présence des sources d'alimentation

On mesure la valeur de la tension aux bornes des circuits de puissance et de commande pour s'assurer que la tension correspond bien à la tension nominale de la machine.

b) Etat des protections et des organes de commande

On vérifie les éléments de protection tels que fusibles, relais thermiques, disjoncteurs, etc. (calibrage, réglage et enclenchement). Dans le circuit de commande on vérifie l'état des contacteurs et leur fonctionnement.

c) Vérifications mécaniques

La plus simple vérification est de faire tourner l'arbre de la machine à la main pour savoir si la rotation est facile et qu'il n'y a pas de blocage mécanique.

On peut utiliser nos organes de sens pour détecter certains défauts, comme par exemple :

- Vérification visuelle : on peut voir la machine électrique à courant alternatif et son mécanisme d'entraînement pendant qu'il fonctionne pour détecter les signes d'oscillation (vibrations et bruits). Une usure des paliers et un mauvais alignement peuvent être à l'origine d'une défaillance.
- Vérification tactile : un moteur ou génératrice doit être chaud(e) mais pas brûlant(e). La chaleur excessive provient d'un problème de refroidissement des bobinages, des engrenages encrassés, une courroie trop tendue, une manque d'huile au niveau des paliers, etc.
- Vérification auditive : si on entend un grondement, c'est peut être qu'un palier est usé ou des pièces mal lubrifiées produisent des bruits aigus.
- Vérification olfactive : Un moteur (une génératrice) défectueux(se) dégage une odeur que l'on peut sentir. Cette odeur peut provenir d'un échauffement de l'isolant de la bobine ou d'une friction des pièces au niveau des paliers. Un moteur grillé dégage une odeur acre de plastique carbonisé.

d) Vérifications électriques

Si le problème n'est pas apparent, on doit réaliser un essai de mise en marche pour prendre note des symptômes et localiser les points tests.

Les vérifications sont faites à l'aide des instruments de mesure : le multimètre, l'ohmmètre, le grognard, le tachymètre, l'accéléromètre (pour les vibrations), etc.

On peut mesurer, par exemple, la tension d'alimentation, le courant absorbé, le courant d'excitation, la vitesse de rotation, les résistances des bobines, les résistances par rapport à la masse, les vibrations, etc.

Les relevés de ces mesures sont ensuite comparés aux valeurs de référence qui sont mentionnées dans la documentation technique donnée par le constructeur. Les valeurs mentionnées dans les spécifications techniques et les caractéristiques électriques et mécaniques de la machine servent au dépanneur pour détecter les écarts et savoir la cause de la panne.

X.2.4. 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. Il est précédé par deux actions :

- 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 le(s)quel(s) 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 maintenances correctives nécessaires.

La conduite d'un diagnostic nécessite un grand nombre d'informations saisies auprès des utilisateurs du système (de l'équipement), dans les documents des constructeurs, dans les documents du service technique, dans les documents des méthodes de maintenance.

a) La méthode générale de diagnostic

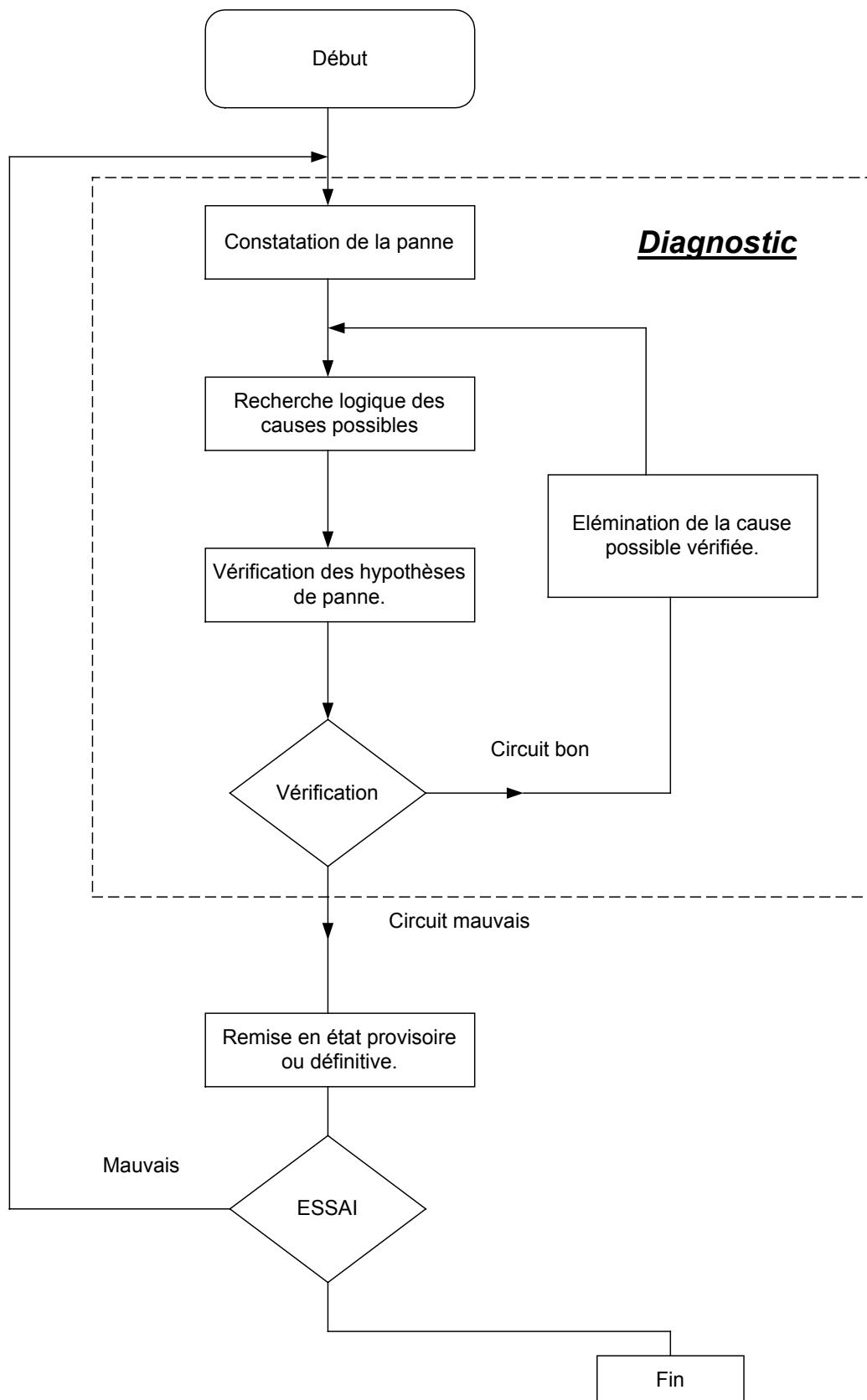
La méthode générale de diagnostic comporte deux étapes essentielles :

- Inventaire des hypothèses :

Le diagnostic doit identifier les causes probables de la défaillance. L'efficacité du diagnostic doit conduire à hiérarchiser les hypothèses par rapport à deux enterrés : leur probabilité de se révéler vraies et la facilité de leur vérification.

- Vérification des hypothèses retenues :

En les prenant dans l'ordre de leur classement chaque hypothèse doit être vérifiée. L'enchaînement de ses vérifications doit être fait jusqu'à la constatation d'un essai bon. La recherche d'une panne dans un circuit électrique ou électronique relève d'un raisonnement logique faisant appel aux étapes suivantes (fig. 10-2) :



Etapes d'un diagnostic
Fig. 10-2

b) Exemple d'un diagnostic

Soit un équipement entraîné par un moteur asynchrone à cage qui est en panne. La nature de la panne est : Le moteur ne démarre pas.

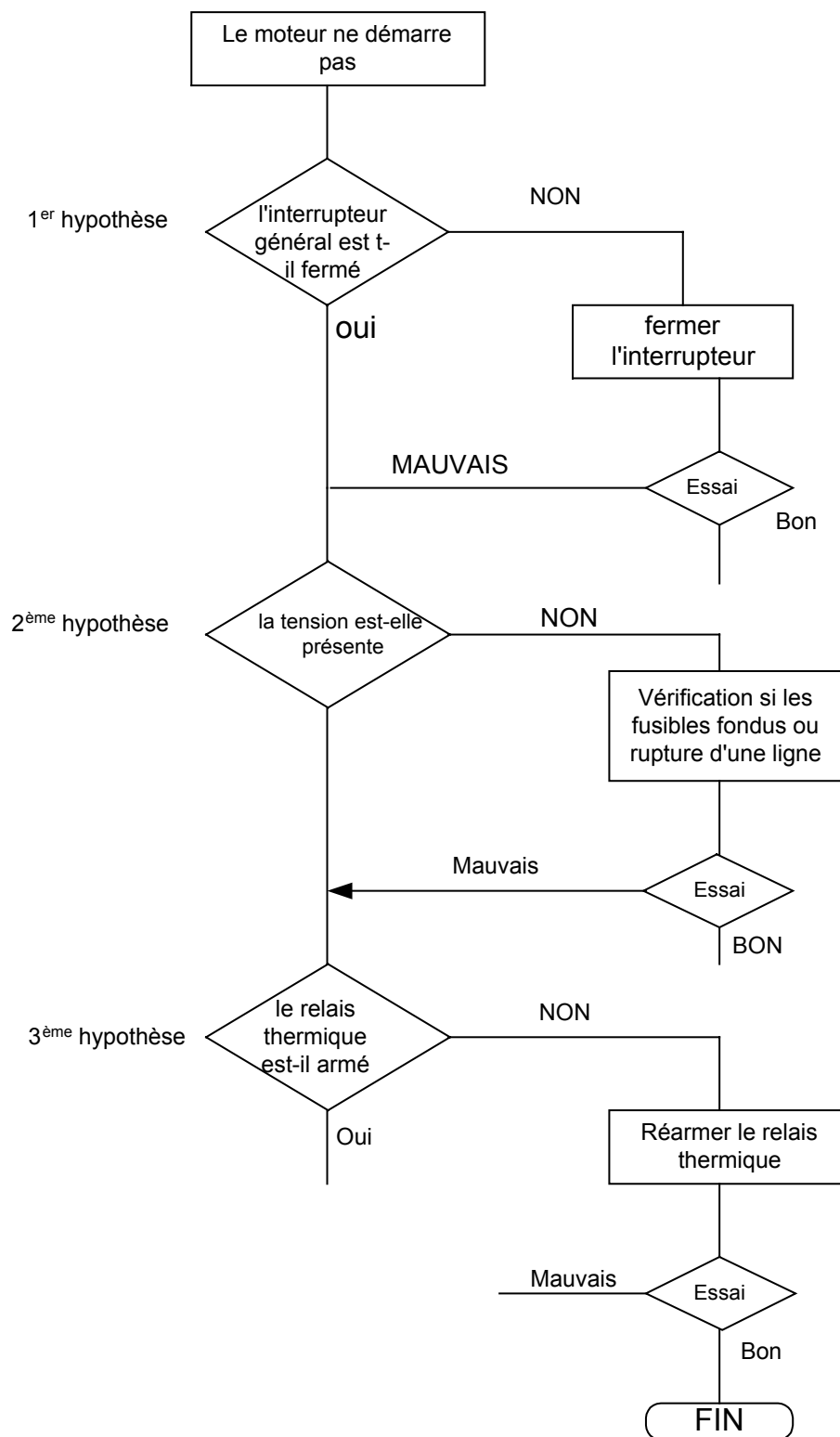
On propose un inventaire des hypothèses :

- Interrupteur général ouvert;
- Rupture d'un fil de ligne ou fusion des fusibles;
- Relais thermique non armé;
- Rupture interne d'une phase du stator;
- Circuit du rotor coupé;
- Couple résistant trop élevé;
- Court-circuits dans le stator ou rotor;
- Coussinets grippés, ou frottement du rotor sur le stator ou corps étranger dans l'entrefer du moteur, etc.

Ces hypothèses doivent être hiérarchisées selon leur probabilité de se révéler vraies et leur facilité de vérification et, en les prenant dans l'ordre du classement, chaque hypothèse doit être vérifiée.

Les vérifications doivent être enchaînées jusqu'à la constatation d'un essai bon (fig. 10-3).

Remarque : Si après le réarmement du relais l'essai est mauvais on passe à l'hypothèse suivant jusqu'à la constatation d'un essai bon. Ici on a supposé que l'essai est bon après le réarmement du relais.



Vérification des hypothèses pour le diagnostic d'une panne
Fig. 10-3

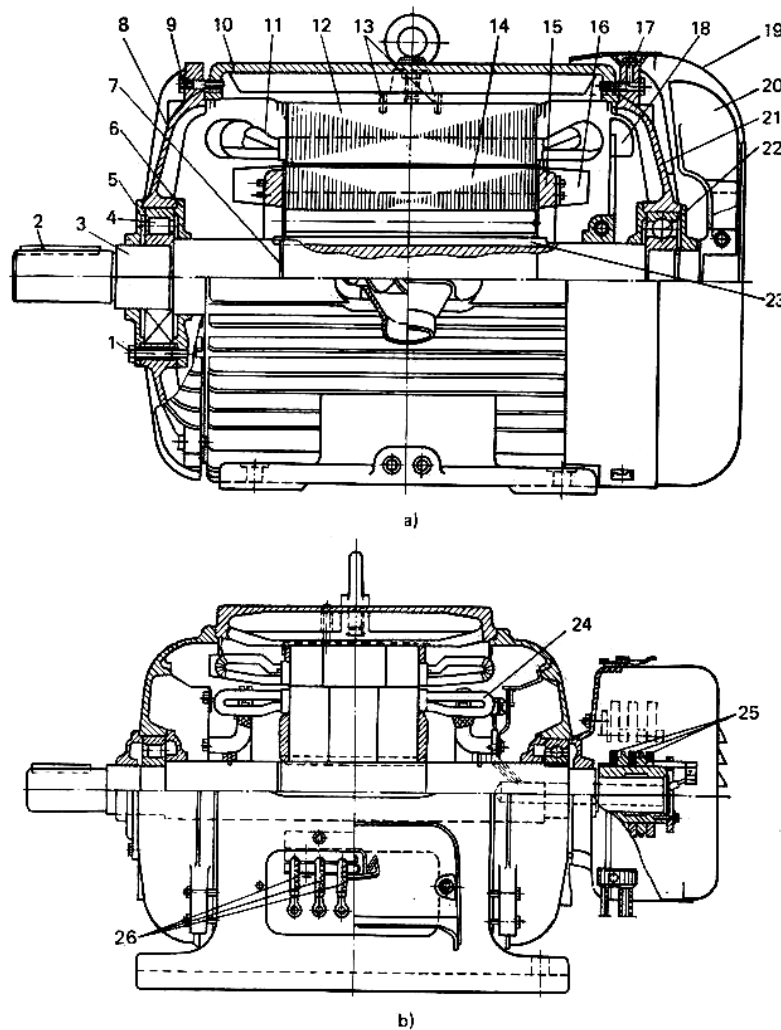
X.2.5. Remplacement des composants défectueux

Les machines électriques qui arrivent en réparation peuvent être de différentes puissances, versions et conceptions.

a) Démontage et remontage

L'ordre de démontage de chaque machine est déterminé par sa construction et par le souci de réutiliser au maximum les pièces en bon état. Le volume de démontage est déterminé par le volume et la nature des travaux de réparation à réaliser.

Comme exemple on peut prendre le démontage et le remontage d'un moteur asynchrone triphasé (fig. 10-4).



Moteurs asynchrones triphasés de la série AO2 à rotor en court-circuit (a) et bobiné (b) :

1,9,17 – Boulons; 2, 23 – Clavettes; 3 – Arbre du rotor; 1, 22 – Roulements à rouleaux et à billes; 5, 6 – Couvercles extérieur et intérieur du roulement; 7 – Bague d'arrêt; 8, 21 – Paliers flasques; 10 – Culasse; 11 – Enroulement statorique; 12, 14 – Noyaux (carcasses) statorique et rotorique; 13 – Vis de fixation du noyau statorique sur la culasse; 15 – Couronne du rotor; 16 – Ailette du ventilateur; 18, 20 – Ventilateurs; 19 – Enveloppe du ventilateur; 24 – Enroulement de phase rotorique; 25 – Bagues d'alimentation du rotor; 26 – Sorties de l'enroulement statorique.

Fig. 10-4

Les opérations du démontage sont comme suit :

- Repérer les flasques par rapport à la carcasse du moteur;
- Enlever le capot (19) du ventilateur extérieur (20);
- Enlever le ventilateur (20);
- Dévisser les boulons de fixation des paliers flasques (8) et (21) sur la culasse (10);
- Dévisser les boulons de fixation des couvercles (5) et (6) du roulement (4) du flasque arrière (8) ;
- Déposer le flasque palier arrière (8) en le détachant de la culasse (10) par de légers coups de marteau portés à travers une cale de bois ou d'aluminium;
- Préparer le rotor à l'extraction de l'alésage du stator en frappant légèrement sur le bout de l'arbre (3) avec un marteau à travers une cale;
- Faire sortir le rotor une fois qu'il est déplacé vers le palier flasque avant (21);
- Déposer le palier flasque avant du roulement emmanché sur l'arbre du rotor, après avoir dévissé les boulons de fixation des couvercles du roulement.

En cas de démontage d'une machine à rotor bobiné on enlève d'abord l'enveloppe des bagues d'alimentation, ensuite les balais et les roulements de l'arbre à l'aide d'un arrache-roulement.

Le remontage se fait en commençant par la dernière opération de démontage, puis serrer toutes les parties démontées et faire tourner le rotor à la main pour s'assurer de sa rotation libre.

b) Réparation et remplacement de composants

Une fois la machine démontée et les éléments contrôlés au cours de démontage certains éléments peuvent présenter des défaillances et doivent être remplacés par leurs équivalents tels que : roulements, ventilateur, condensateurs de démarrage ou antiparasite, balais, etc.

D'autres doivent être réparés, par exemple : collecteur, bobines du stator, bobines polaires, bagues collectrices, garniture de frein.

c) Réglage de nouveaux paramètres

Après le remplacement ou la réparation certains paramètres doivent être réglés de nouveau.

d) Vérification du fonctionnement de l'équipement après dépannage

Avant de procéder à l'essai électrique de l'équipement il faut s'assurer que toutes les connexions dans les circuits de puissance et de commande sont parfaitement serrées. Cette opération est importante car une connexion mal serrée peut provoquer différents incidents : échauffement anormal, chute de tension, court-circuit.

- Vérification du circuit de puissance

Cette vérification, qui se fait l'équipement hors tension, permet de s'assurer que le câblage du circuit de puissance est conforme au schéma. Dans la majorité des cas, l'opérateur ne disposant pas des moteurs, elle est effectuée à l'aide d'une lampe-test.

- Vérification du circuit de commande (contrôle fil à fil)

Cette vérification, qui se fait généralement l'équipement sous tension, a pour but de s'assurer que le câblage du circuit de commande est conforme au schéma. Elle permet également de contrôler le bon fonctionnement des appareils.

Afin de procéder aux essais en toute sécurité, il est indispensable de séparer totalement, pendant toute la durée de ces essais, le circuit de puissance du circuit de commande.

- Vérification de l'organe d'entraînement (moteur)

Après son démontage on vérifie l'état des bobines, des bagues collectrices, des roulements et après le remontage on vérifie le serrage de toutes les parties démontées.

On fait tourner à la main l'arbre du moteur pour s'assurer de sa rotation libre. Lors de son alimentation à partir du réseau on vérifie le bruit et la vibration et s'il n'y a pas de chaleur excessive ou une odeur étrange.

- Essai d'ensemble

Le raccordement de la ligne d'alimentation ainsi que celui de tous les circuits extérieurs de « puissance » et de « commande » étant exécutés conformément au schéma il est possible de procéder à l'essai d'ensemble de l'équipement.

L'essai de l'ensemble consiste à stimuler toutes les phases de fonctionnement de la machine ou du processus dans l'ordre où elles doivent se réaliser et à contrôler les asservissements et les sécurités.

Le but de l'essai de l'ensemble est de s'assurer que le fonctionnement de l'équipement est celui décrit dans le cahier des charges. Il permet également de vérifier les incidents d'une fausse manœuvre dans la conduite de la machine.

Remarque : Lors des vérifications le dépanneur doit utiliser des outils à main isolés et éventuellement des gants isolants, des lunettes de protection, des chaussures à semelle isolante. Il doit baliser la zone pour assurer la sécurité

**MODULE 27: INSTALLATION ET DEPANNAGE DE MOTEURS ET DE
GENERATRICES A COURANT ALTERNATIF**

GUIDE DE TRAVAUX PRATIQUES

TP1 - 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 mm²
- Conducteurs isolés 2,5 mm²

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

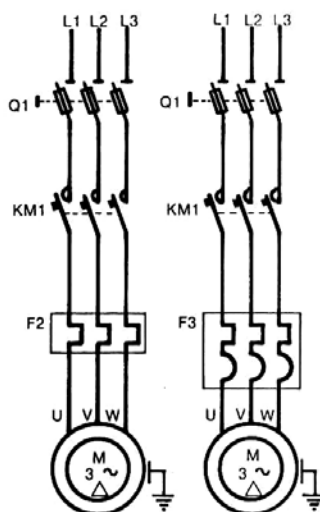


Schéma du circuit de commande

L1, L3 : arrivée du réseau triphasé

Q1 : sectionneur porte-fusibles tripolaire équipé avec 2 contacts à fermeture

KM1 : contacteur tripolaire

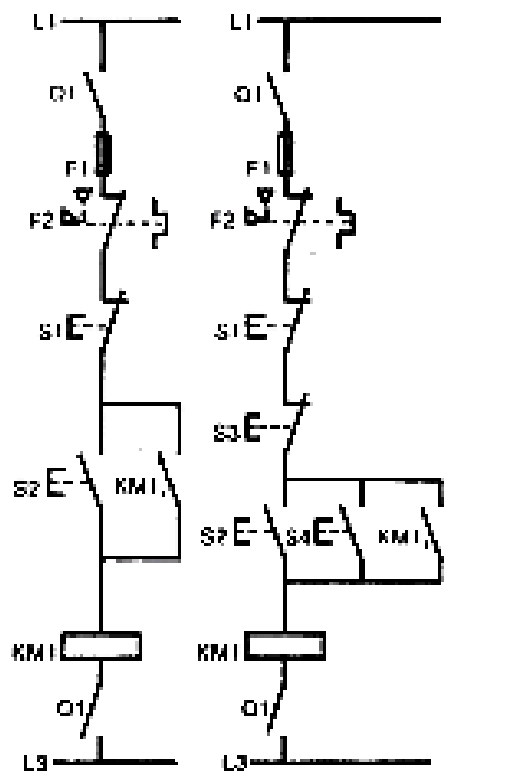
F2 : relais de protection thermique

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.

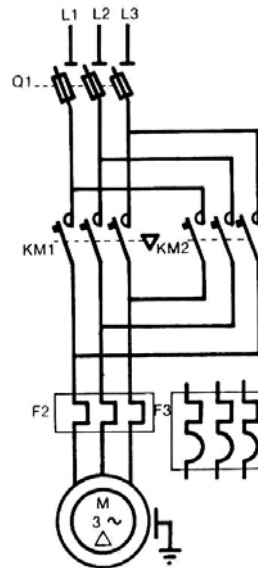


Schéma du circuit de commande

L1, L3 : arrivée du réseau triphasé

Q1 : sectionneur porte-fusibles tripolaire équipé avec 2 contacts à fermeture

KM1, KM2 : contacteurs tripolaires

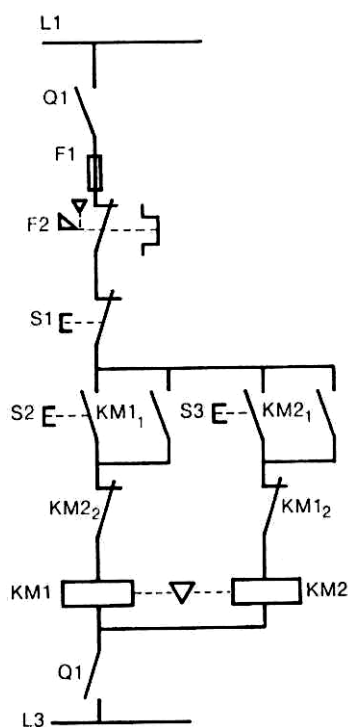
F2 : relais de protection thermique

F1 : fusible

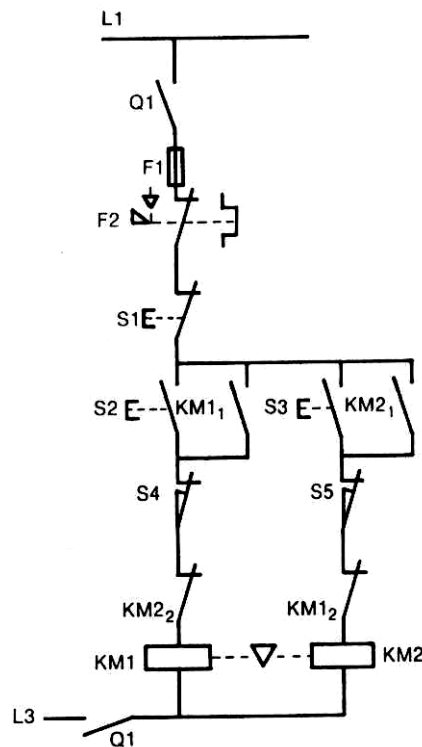
S1 : bouton-poussoir arrêt

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.

TP2 - 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 mm²
- Conducteurs isolés 2,5 mm²

4. 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 ~ Δ : moteur asynchrone triphasé à cage 380 V/660 V si on a un réseau 220V/380 V

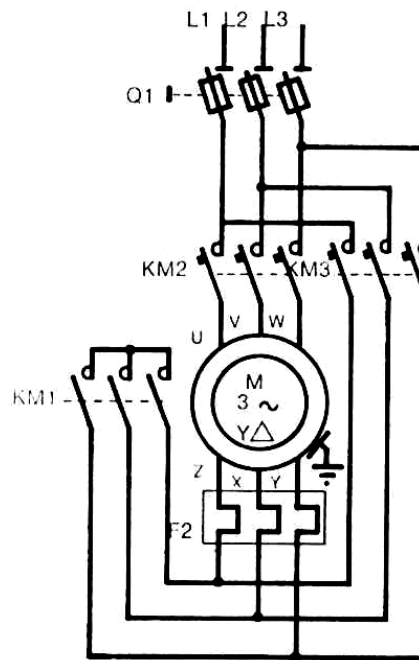


Schéma du circuit de commande

L1, L3 : arrivée du réseau triphasé

Q1 : sectionneur porte-fusibles tripolaire équipé avec 2 contacts à fermeture

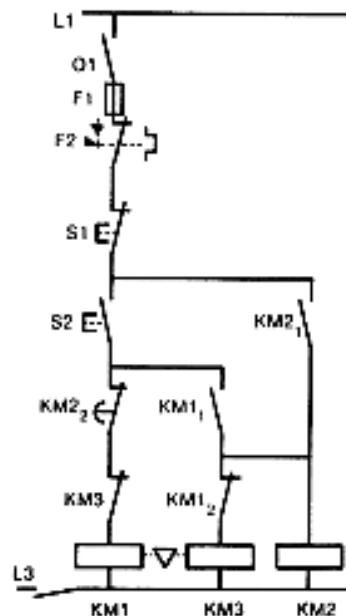
F2 : relais de protection thermique

F1 : fusible

S1 : boutons-poussoirs arrêt

S2 : boutons-poussoirs marche

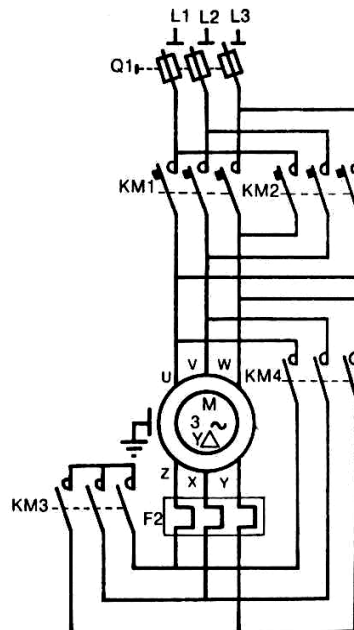
Le circuit de commande est protégé par le fusible F1 et isolé de toute alimentation par le sectionneur Q1.



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

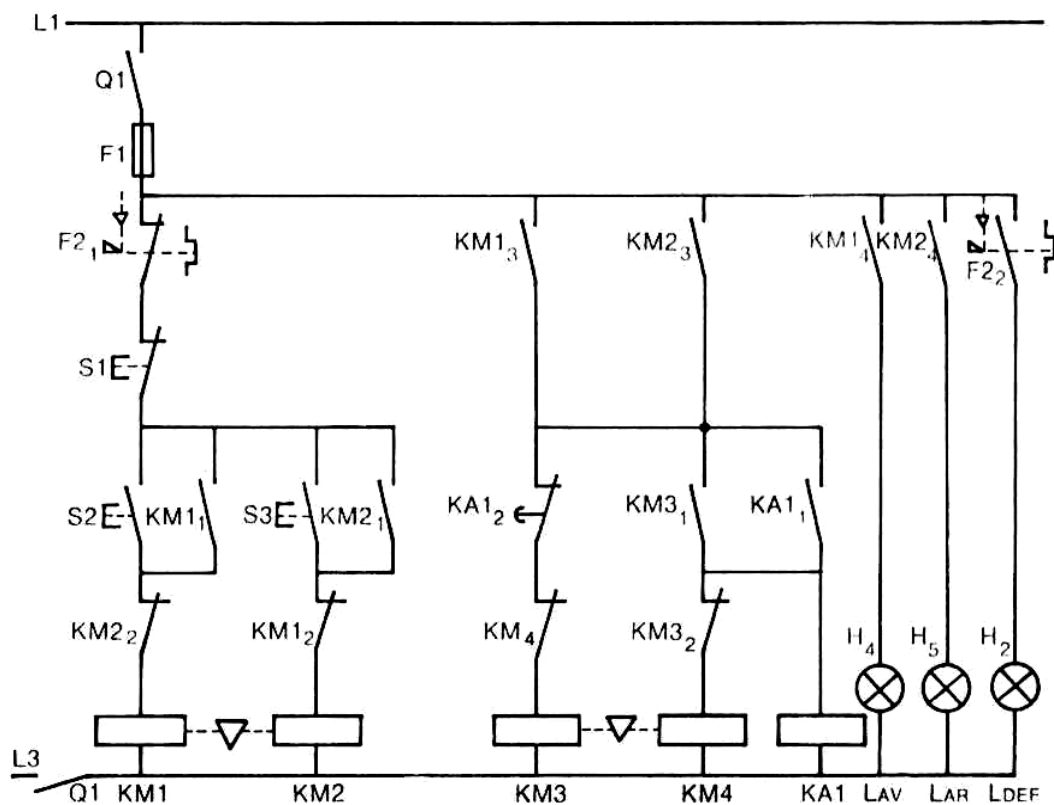


L'inversion du sens de marche est obtenue par le croisement de deux fils de phase: L1 et L3 sont inversés.

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)



TP3 - 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 mm²
- Conducteurs isolés 2,5 mm²

4. Déroulement du TP

• Démarrage semi-automatique, un sens de marche

Schéma du circuit de puissance

L1, L2, L3 : arrivée du réseau triphasé

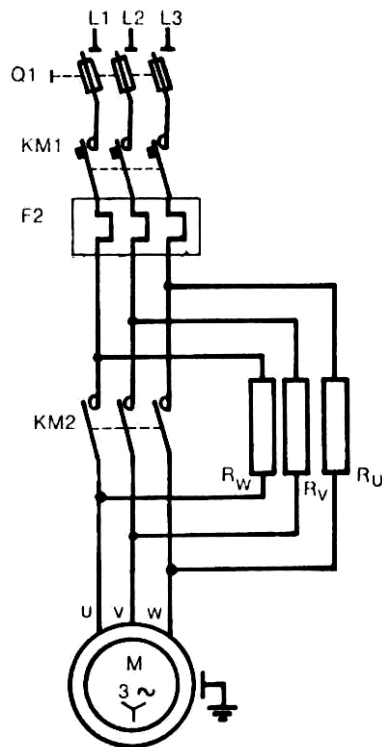
Q1 : sectionneur porte-fusibles tripolaire équipé avec 2 contacts à fermeture

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 court-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)

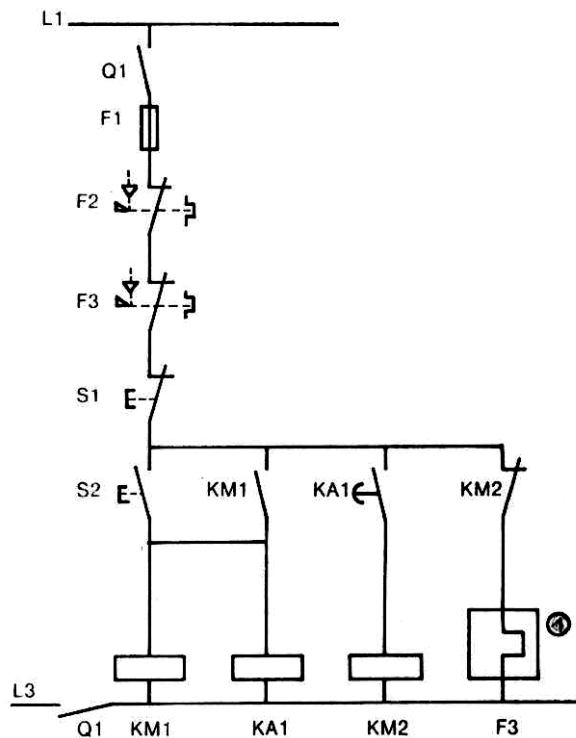
F2 : relais de protection thermique

F3 : relais de protection thermique (facultatif, pour la protection des résistances contre les démarrages trop fréquents ou incomplets)

F1 : fusible

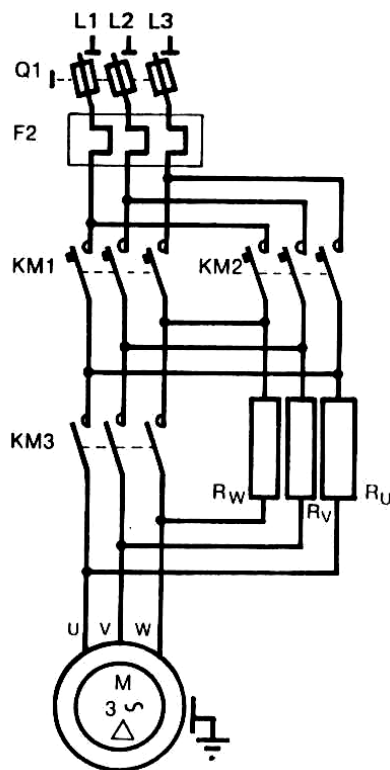
S1 : boutons-poussoirs arrêt

S2 : boutons-poussoirs marche



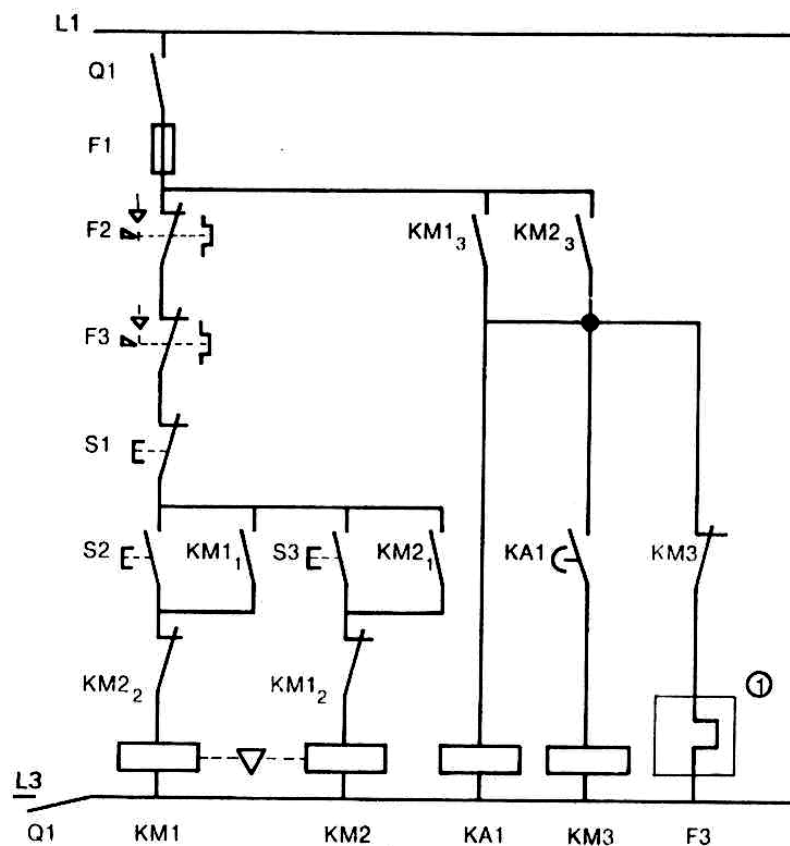
- **Démarrage semi-automatique, deux sens de marche**

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



TP4 - 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 mm²
- Conducteurs isolés 2,5 mm²

4. Déroulement du TP**• Démarrage semi-automatique, un sens de marche**

Schéma du circuit de puissance

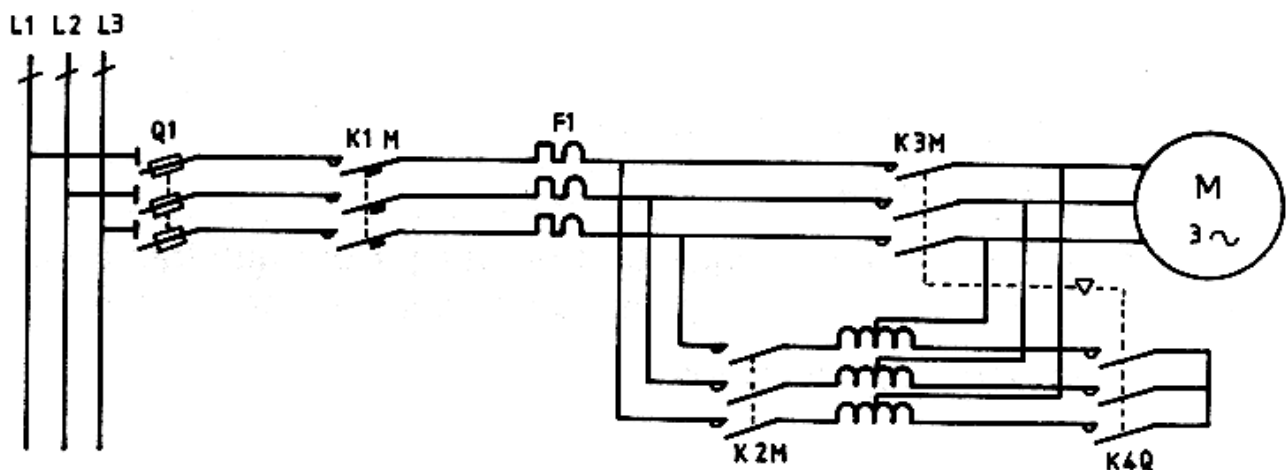
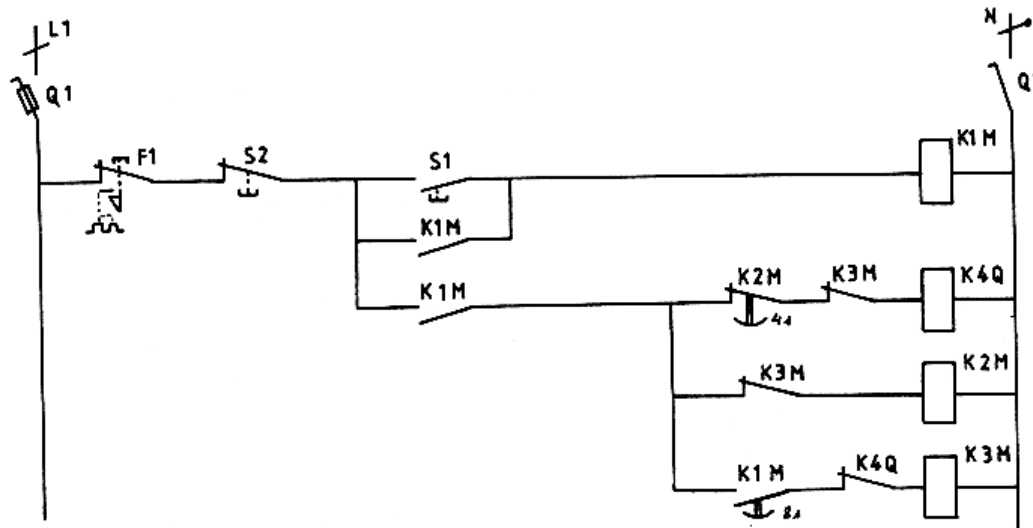


Schéma développé du circuit de commande



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^e temps

K4M : contacteur étoile

T1 : Autotransformateur

M : moteur asynchrone triphasé à cage

TP5 - 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 mm²
- Conducteurs isolés 2,5 mm²

4. 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

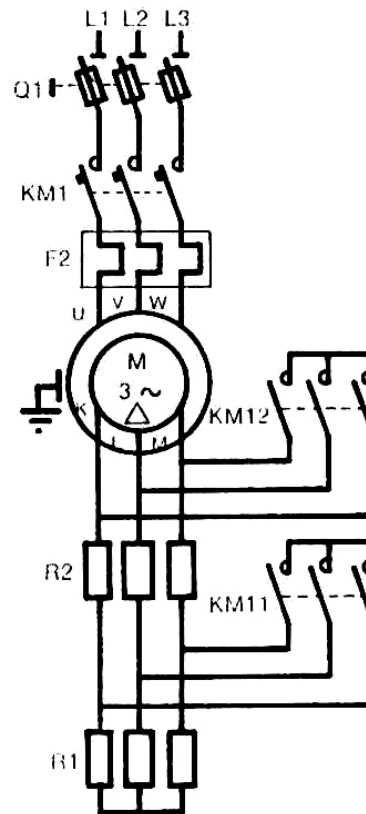


Schéma du circuit de commande

F3 : relais de protection thermique à un contact à ouverture (facultatif, assure la protection des résistances contre les démarrages trop fréquents ou incomplets)

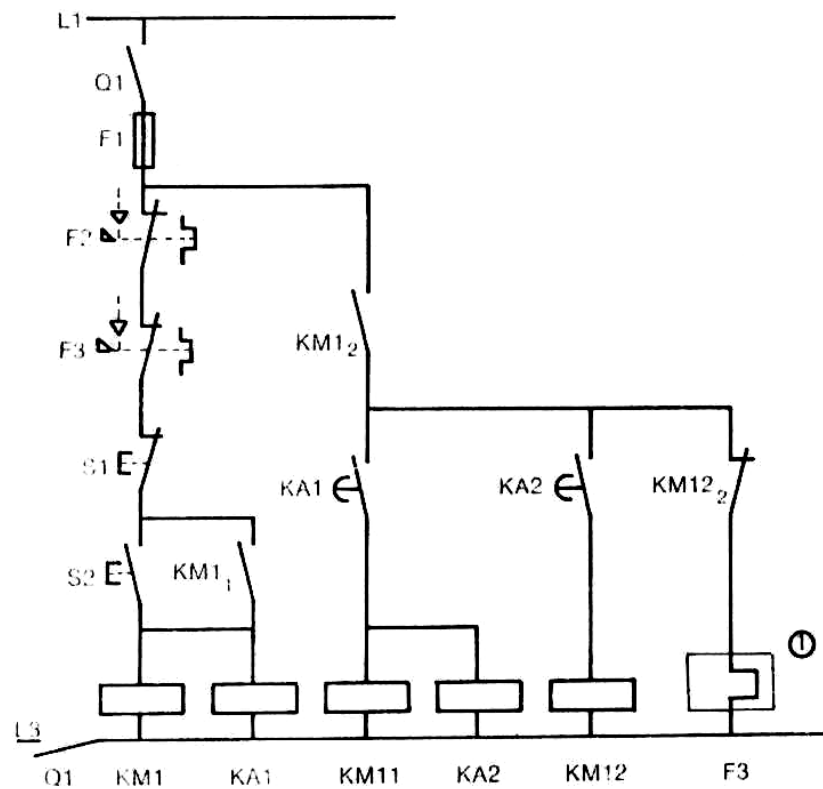
KA1 : relais auxiliaire temporisé (ou contacteur sur lequel on met un bloc de contacts temporisés)

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



- **Démarrage semi-automatique, deux sens de marche**

Schéma du circuit de puissance

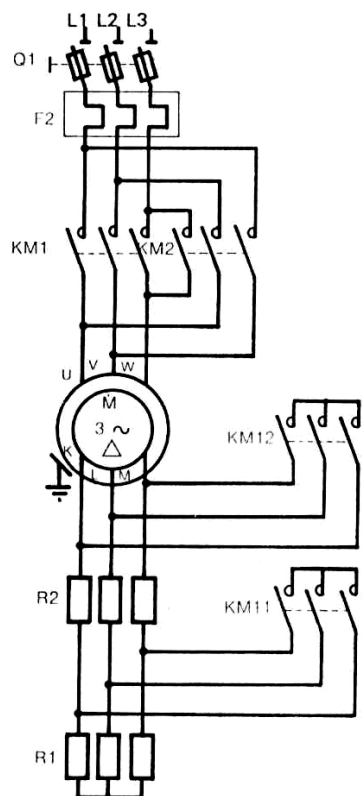
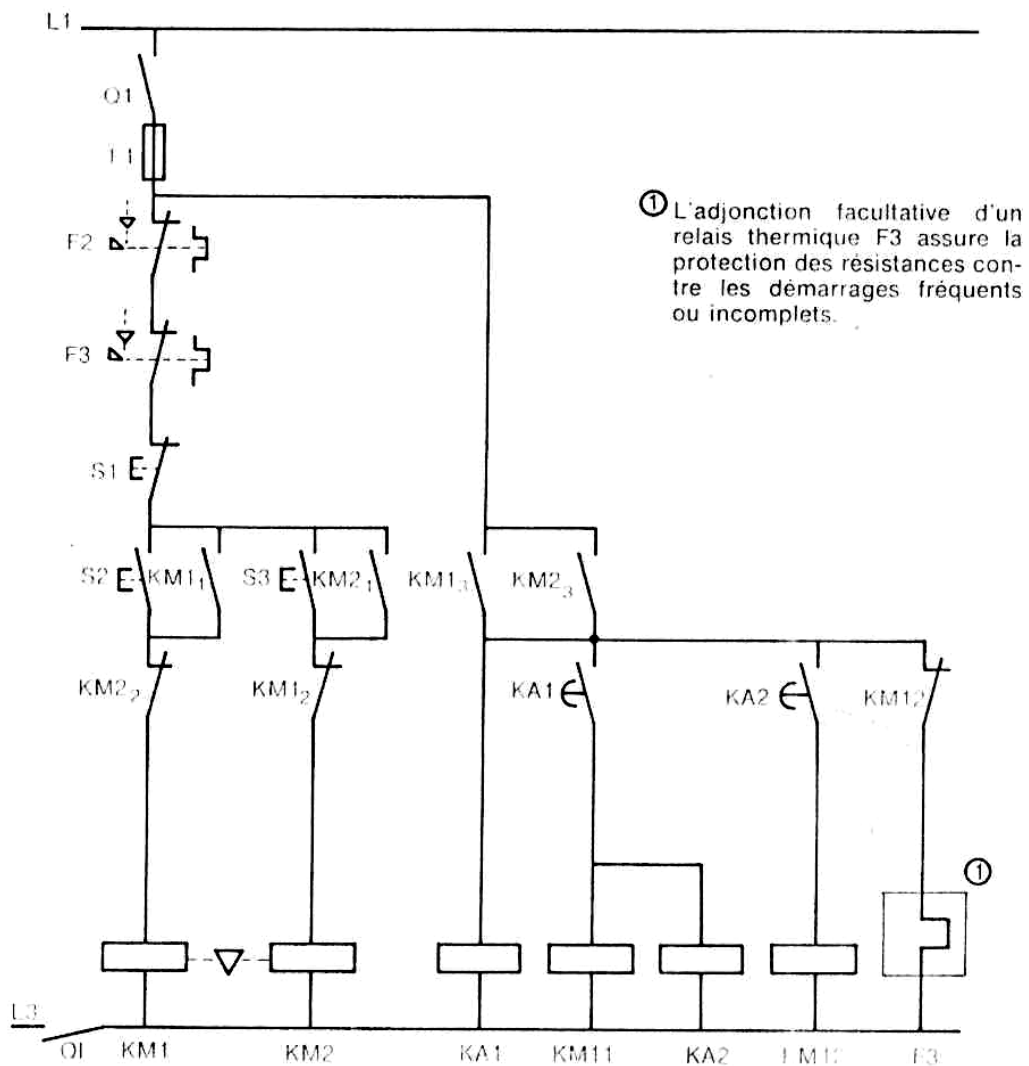


Schéma du circuit de commande



TP6 - 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.

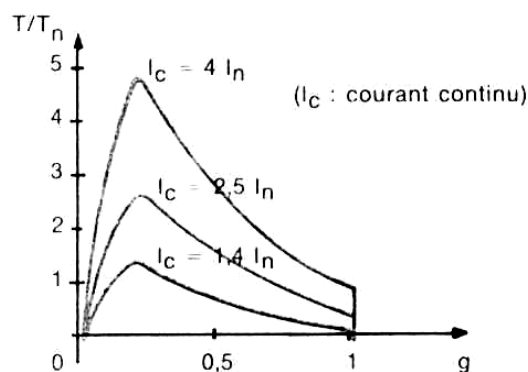
3. Matériels (Equipements et matière d'œuvre) par équipe:

- 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 mm²
- Conducteurs isolés 2,5 mm²

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



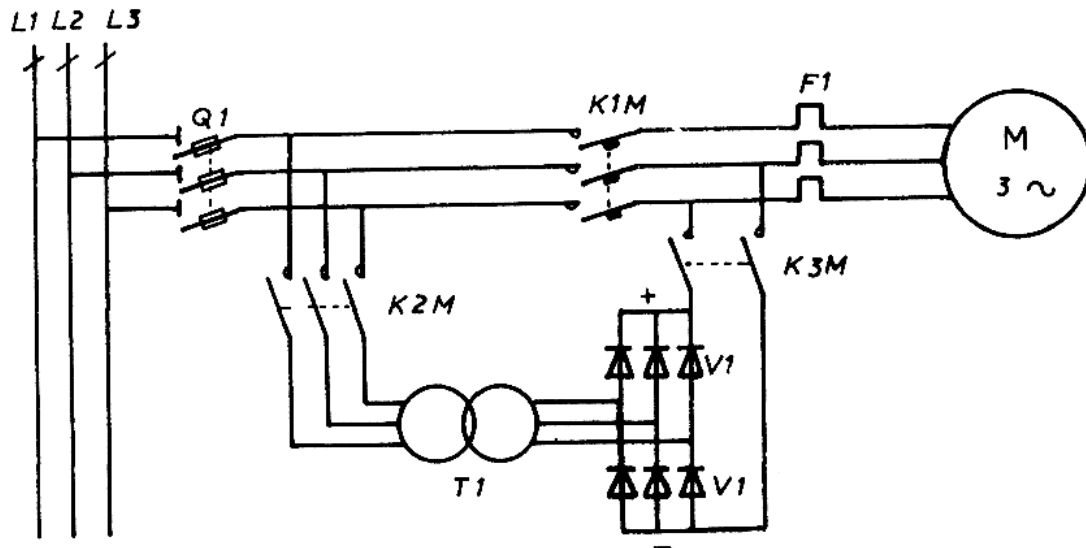
Couple de freinage

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.

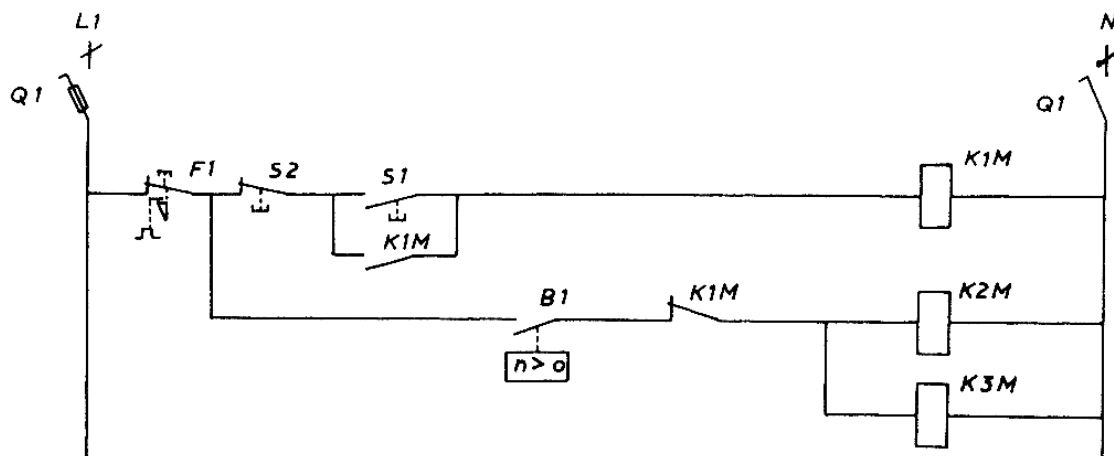
Schéma développé du circuit de puissance



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



TP7 - 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 (Equipement 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 $1,5 \text{ mm}^2$
- Conducteur isolé $2,5 \text{ mm}^2$

4. 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).

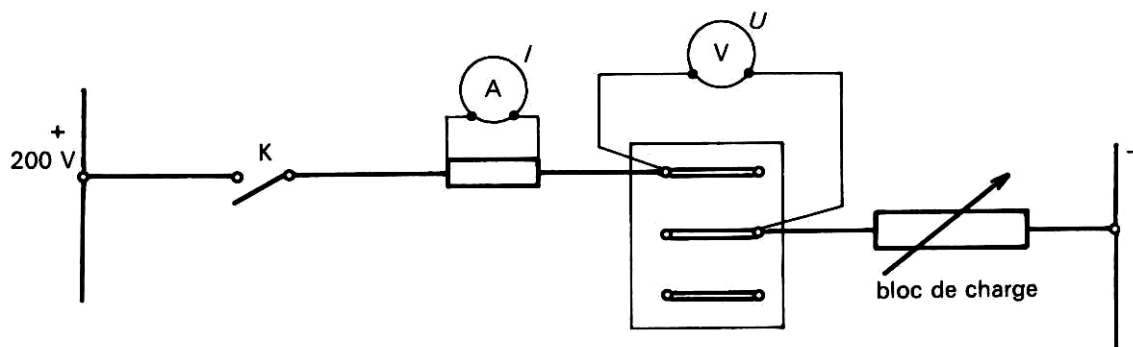


Schéma de mesure de la résistance des enroulements statoriques par la méthode ampèrevoltmétrique

Les résultats des mesures doivent être introduits dans le tableau ci-dessous:

I (A)				
U (V)				
R_0 (Ω)				

Le schéma sur la figure suivante donne le montage pour l'essai à vide.

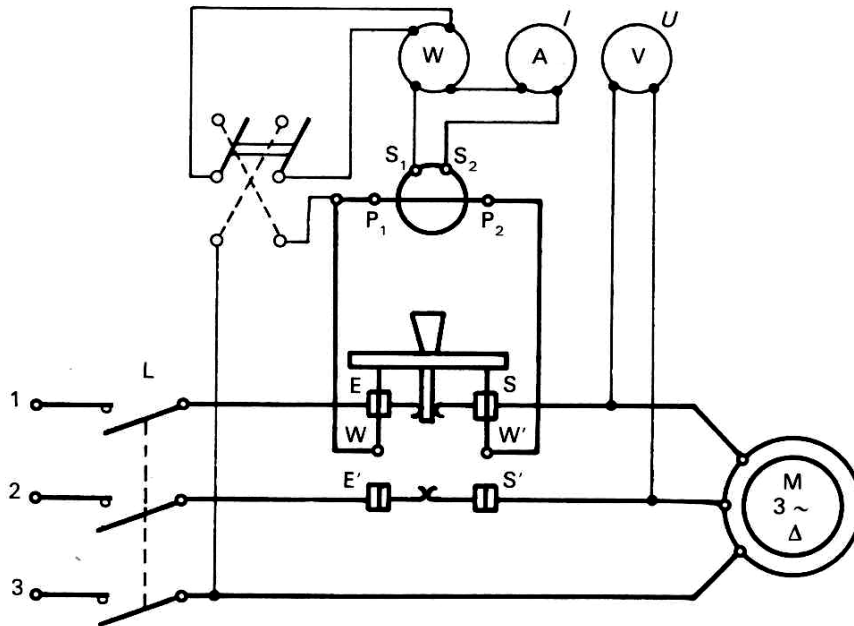


Schéma de montage pour l'essai à vide

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)	$S = \sqrt{3} \cdot U \cdot I$ (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.

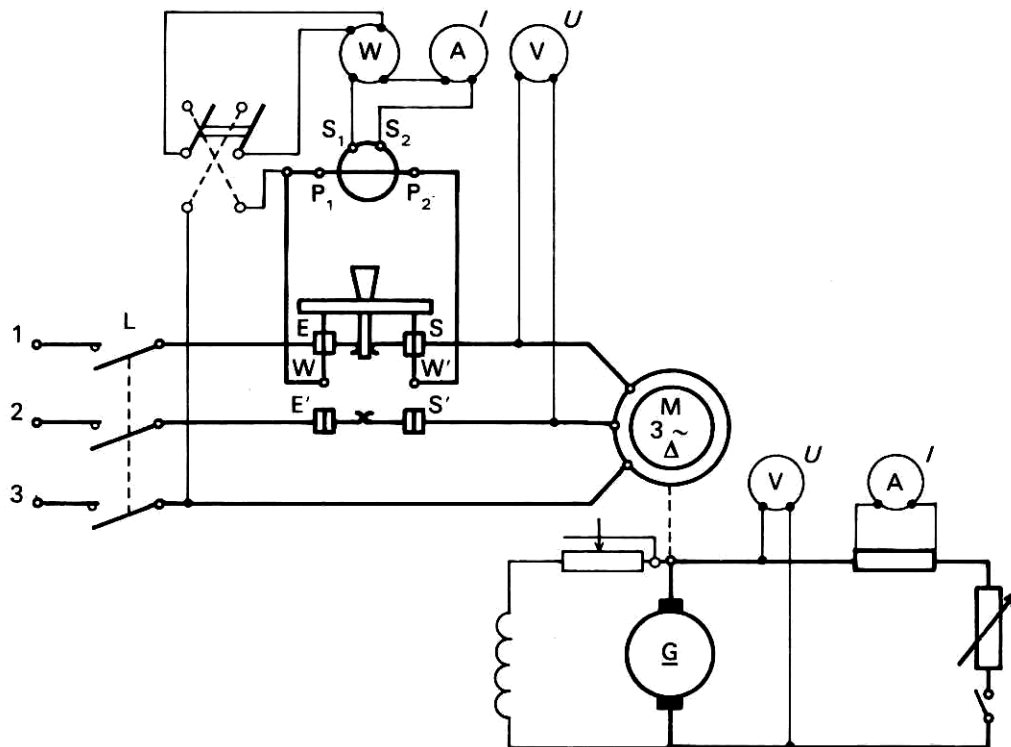


Schéma de montage pour l'essai en charge

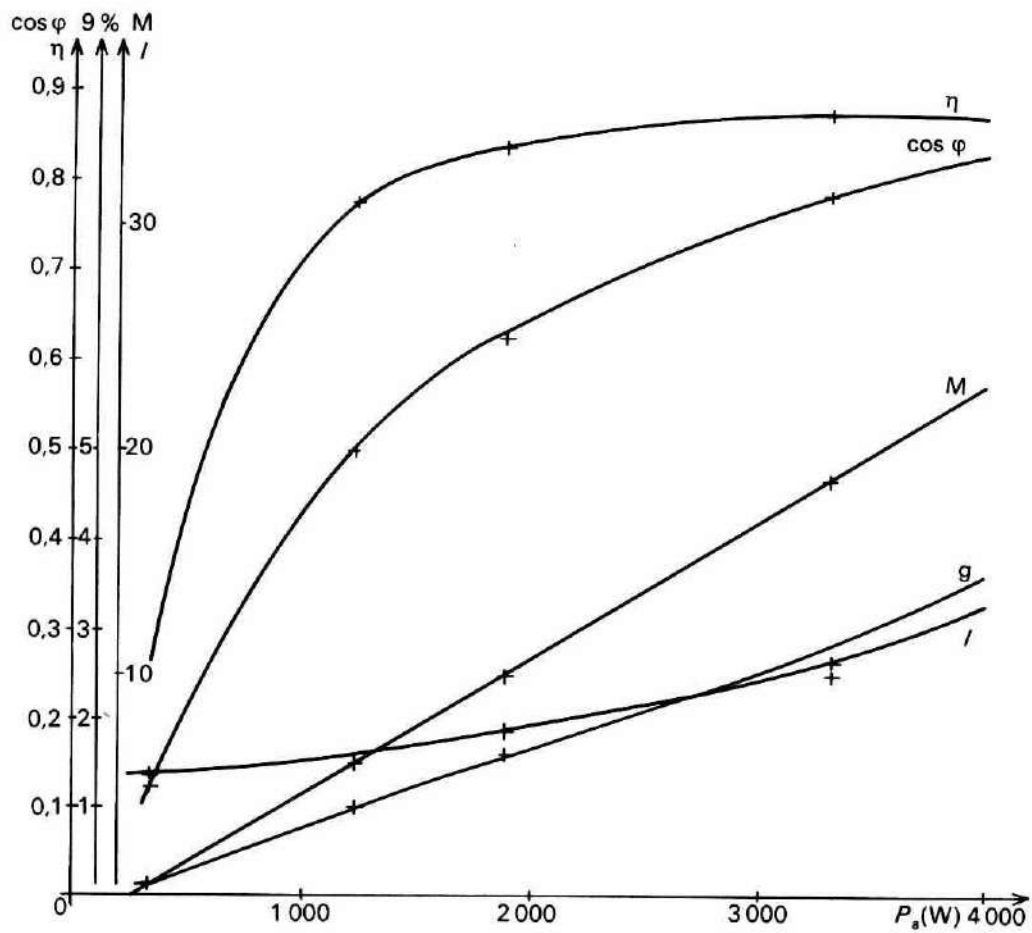
Les relevés et les résultats des calculs doivent être introduits dans les tableaux suivants:

Charges	P_1 (W)	P_2 (W)	P (W)	U (V)	I (A)	n' (tr / mn)
à vide						
$\frac{1}{2}$ charge nominale						
$\frac{3}{4}$ 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 / Ω' (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 : 2 heures

Barème : ... / 20

1) Champ tournant d'un moteur asynchrone triphasé – principe, diagramme vectoriel.

... / 4

2) Avantages et inconvénients d'un moteur synchrone.

... / 4

3)

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 ?

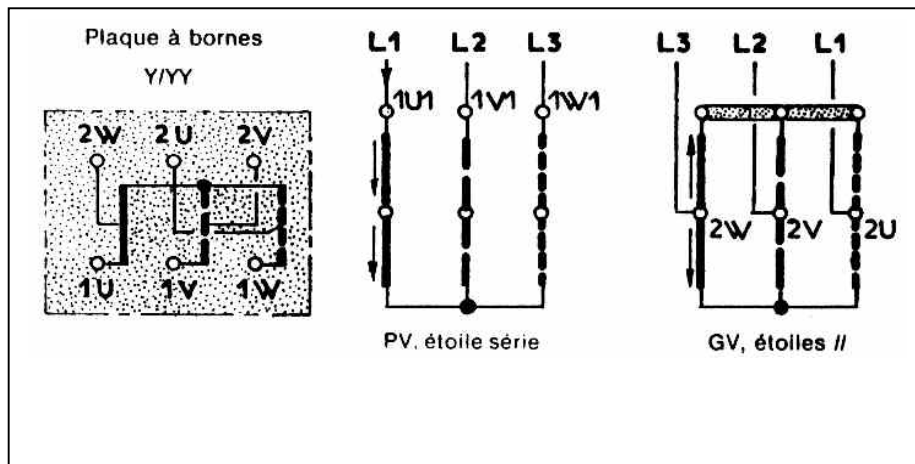
2) Les pertes mécaniques valent 510 W ; en déduire les pertes magnétiques statoriques.

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.

... / 8

- 4) Au quel type de moteur appartiennent les enroulements sur le schéma ?
... / 2



- 5) Vérification des hypothèses pour le diagnostic d'une panne.
... / 2

EPREUVE PRATIQUE

Durée : 6 heures
Barème : ... / 60

Démarrage par élimination des résistances statoriques (3 temps) :

1. Schémas de circuit de commande ;
.../12
2. Schémas de circuit de puissance
.../12
3. Avantages et inconvénients
.../10
4. Montage et essais
.../12
5. Panne et dépannage
.../14

Liste des références bibliographiques

Ouvrage	Auteur	Edition
<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>