

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITE MOULOUD MAMMARI DE TIZI-OUZOU



FACULTE DE GENIE ELECTRIQUE ET D'INFORMATIQUE  
DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE

## Mémoire de Fin d'Etudes de MASTER PROFESSIONNEL

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Génie Electrique

**Spécialité : ELECTROTECHNIQUE INDUSTRIELLE**

*Présenté par*  
**Athmane BIR**

Thème

# Démarrages et Protection des Moteurs Asynchrones Triphasés

*Mémoire soutenu publiquement le 28 septembre 2016 devant le jury composé de :*

**M Ahmed CHALLAL**

Maitre Assistant Classe A, UMMTO, Président

**M Karim HADJ SAID**

Maitre Assistant Classe A, UMMTO, Rapporteur

**M Farid HOCINI**

Maitre de Conférence Classe B, UMMTO, Examineur

**M Hamza BESSAI**

Maitre Assistant Classe A, UMMTO, Examineur

## REMERCIEMENT

*Je remercie Dieu de m'avoir donné la force et le courage pour réaliser ce modeste travail.*

*Je remercie Monsieur **KARIM HADJ-SAID** qui a suivi ce travail, pour son aide, ses orientations pédagogiques dans l'élaboration de ce mémoire, et tous les conseils qu'il a prodigué pendant toute la durée de ce travail malgré ses nombreuses occupations.*

*J'adresse mes plus vifs remerciements aux membres du jury pour l'honneur qu'ils me font en acceptant la charge de juger ce travail.*

*Je suis reconnaissant envers mes enseignants auxquels je dois ma formation en électrotechnique.*

*Enfin, je ne pourrais terminer ces remerciements sans oublier ma famille pour leur aide, compréhension, encouragement et soutien, qu'elle m'a apportés durant mes études et à tous mes amis.*

## DEDICACES

*A qui puis-je dédier cet humble travail si ce n'est à mes très chers parents, dont le sacrifice, la tendresse, l'amour, la patience, le soutien, l'aide et les encouragements sont l'essence de ma réussite. Sans eux, je ne serais pas ce que je suis aujourd'hui.*

*A mes frères Idris et Zakaria et ma sœur Meriem.*

*A Radia pour sa présence et son soutien.*

*A tout(es) mes amis, Brahim, Kousseila, Hamza, Billa, Célia, Hamid,...*

## Sommaire

❖ Introduction générale .....	1
-------------------------------	---

### Chapitre I : généralités sur les moteurs asynchrones triphasés

I-1-Introduction .....	2
I-2-Constitution .....	2
I-2-1 –Stator .....	3
I-2-2-Rotor.....	4
Rotor à cage.....	4
Rotor à double cages .....	5
Rotor bobiné (à bagues) .....	5
Rotor à encoches profondes .....	6
I-3-classification des moteurs asynchrones .....	6
I-3-1 Moteur à couple de démarrage normal.....	6
I-3-2- Moteur à couple de démarrage élevé .....	6
I-3-3 Moteur à glissement élevé.....	7
I-4- Bobinage.....	7
I-5- Principe de fonctionnement.....	8
I-6- Définition du glissement .....	9
I-7- Quadrants de Fonctionnements .....	10
I-8- Pannes des moteurs asynchrones.....	11
I-9- Connexion au réseau .....	12
I-9-1 Couplage étoile.....	12
I-9-1 Couplage triangle.....	13
I-10- Bilans des puissances .....	13
I-11- Rendement d'un moteur asynchrone triphasé .....	14
I-12- Plaque signalétique.....	15
I-13- Conclusion.....	15

## Chapitre II : démarrages des moteurs asynchrones

II.1.Introduction.....	16
II.2. les problèmes de démarrage des moteurs asynchrone triphasé.....	16
II.2.1 Moteur à cage d'écureuil .....	17
II.2.2 Moteur a rotor bobiné .....	17
II.3:Les principaux modes de démarrage .....	18
II.3.1 : Démarrage direct .....	18
A/Couplage et procédure de commutation .....	18
B/Avantages et inconvénients .....	18
II.3.2 : Démarrage sous tension réduite.....	19
II .3.3 : Démarrage étoile-triangle .....	20
A/Couplage et procédure de commutation .....	20
B/Avantages et inconvénients .....	20
II. 3.4 : Démarrage statorique à résistance .....	21
A/Couplage et procédure de commutation .....	21
B/Avantages et inconvénients .....	23
II. 3.5. Démarrage a tension réduite par autotransformateur.....	23
A/Couplage et procédure de commutation .....	23
B/Avantages et inconvénients .....	25
II.4: Démarrage progressif.....	26
II.4.1: Démarrage par un convertisseur électronique .....	26
A/ Schéma fonctionnel .....	26
B /Schéma de puissance et de commande .....	27
C / Principe de fonctionnement .....	27
D / Courbes caractéristiques.....	28
E/Avantages et inconvénients .....	29
II.4.2 Démarrage par variateur de vitesse pour moteur asynchrone.....	29
A/ Principe général.....	29

B/ Constitution .....	30
B-1/Le redresseur .....	30
B-2/L'onduleur .....	30
C/ Description du fonctionnement .....	30
D/ Avantages et inconvénients .....	31
II.5. Tableau récapitulatif des différents modes de démarrages .....	32
II.6. Conclusion .....	33

### **Chapitre III : freinage des moteurs asynchrones**

III.1. Introduction .....	34
III. 2. Freinage par contre-courant .....	34
A/ Moteur a cage .....	34
A/ Moteur a rotor bobiné (Moteur à bagues) .....	35
III.3. Freinage par injection de courant redressé .....	36
III. 4. Freinage électronique .....	38
III. 5. Freinage par fonctionnement en hyper-synchrone .....	38
III.6. Autres systèmes de freinage .....	38
III 7. Inversion du sens de marche .....	39

### **Chapitre IV : Protection des moteurs asynchrones**

IV.1. Introduction .....	40
IV.2. Les défauts .....	40
IV.2.1. Les courts-circuits .....	40
IV. 2-1-1- Les effets du court-circuit .....	40
A/ /Les effets électrodynamiques .....	41
B/ /Les effets thermiques .....	41
IV.2.2. L'échauffement .....	41
IV.2-2-1- Cause de l'échauffement .....	41
IV.2.3. Les surcharges .....	41

IV.2.3.1 - Les effets de surcharge.....	42
IV.2.4 Défaillance de phase .....	42
IV.2.4.1 effet de défaillance de phases.....	42
IV.3. Protection des moteurs .....	44
A/ Les données Constructeur .....	44
B/ Les données Fournisseur d'énergie sur l'alimentation.....	44
C/ Les données de la plaque signalétique.....	44
IV.3.1. Protection contre les surcharges thermiques .....	46
IV.3.1.1. Protection par mesure directe de température (F23) .....	46
IV.3.1.2. Protection par image thermique (F49) .....	46
IV.3.1.3. Conclusion.....	48
IV.3.2. Protection contre les déséquilibres de courant (F46)	
les coupures de phase / inversion de phases (F47).....	49
IV.3.3. Protection contre un court-circuit entre phases (F50/51).....	50
IV.3.4. Protection contre des défauts phase-terre (F50N/51N, F64, F67N).....	51
IV.3.4.1: Neutre direct à la terre.....	51
IV.3.4.2 : Neutre à la terre par une impédance.....	52
IV.3.4.1: Neutre isolé .....	53
IV.3.4. Conclusion.....	55
❖ Conclusion générale .....	56

## Introduction générale

Les moteurs électriques sont de nos jours, à l'exception des dispositifs d'éclairage, les récepteurs les plus nombreux dans les industries et les installations tertiaires. Leur fonction, de convertir l'énergie électrique en énergie mécanique, leur donne une importance économique toute particulière qui fait qu'aucun concepteur d'installation ou de machine, aucun installateur et aucun exploitant ne peut les ignorer.

Parmi tous les types de moteurs existants, les moteurs asynchrones triphasés notamment les moteurs à cage sont les plus utilisés dans l'industrie et au-delà d'une certaine puissance dans les applications du bâtiment. De plus, bien que leur commande par des équipements à contacteurs soit parfaitement adaptée pour un grand nombre d'applications, l'emploi de matériels électroniques en constante progression élargit leur champ d'application. C'est le cas pour contrôler le démarrage et l'arrêt avec les démarreurs-ralentisseurs progressifs, comme lorsqu'un réglage précis de la vitesse est également nécessaire avec les variateurs-régulateurs de vitesse.

Toutefois, les moteurs asynchrones à bagues sont utilisés pour certaines applications de forte puissance dans l'industrie et les moteurs asynchrones monophasés restent adaptés pour des applications de puissances limitées plutôt pour les applications du bâtiment.

Mon travail, après une présentation du moteur asynchrone et de son principe de fonctionnement, détaille plus particulièrement la technique et les particularités d'emploi des de cette machine, notamment les principaux dispositifs de démarrage, le réglage de vitesse et le freinage qui leur sont associés, les différents types de défauts, ainsi que la protection adéquate qu'il faut pour chacune de ces contraintes. Finalement je termine par une conclusion générale.

### **I.1.Introduction :**

Une machine électrique est un dispositif électromagnétique permettant la conversion d'énergie en travail ou en énergie mécanique, ou qui fournit de l'énergie électrique à partir d'une autre forme d'énergie.

Les machines électriques qui produisent une énergie électrique à partir d'une énergie mécanique sont appelées dynamo, alternateurs ou générateurs suivant la technologie utilisé.

Toutes les machines électriques étant réversibles, la distinction moteur /générateur ne se fait que sur l'usage final de la machine.

Comme toutes les machines électriques tournantes, les moteurs électriques sont constitués d'un stator (partie fixe) et d'un rotor (partie mobile).

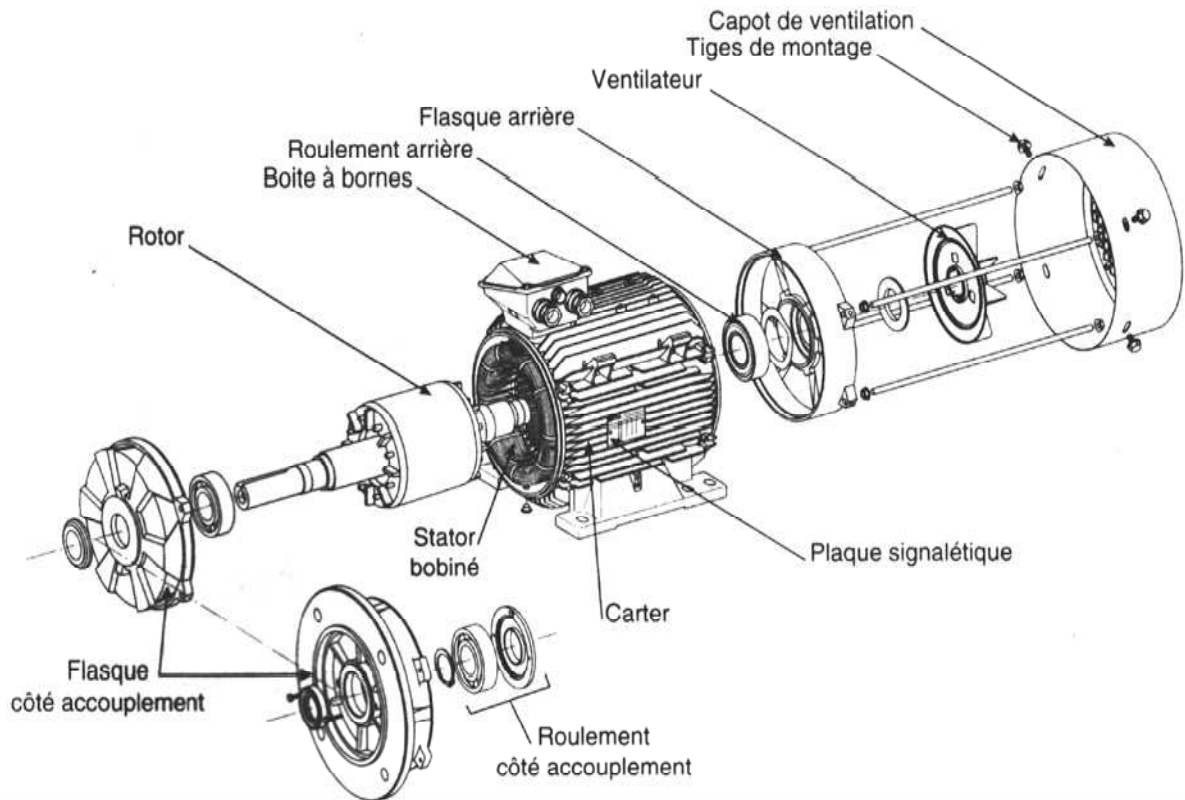
Il existe des moteurs électriques à courant continu (DC) et des moteurs électriques à courant alternatif (AC). Dans la catégorie des moteurs à courant alternatif, on peut retrouver :

- Moteurs synchrones.
- Moteurs asynchrones qui feront l'objet de notre étude.

Les moteurs asynchrones triphasés sont les moteurs les plus employés dans l'industrie, cette importance peut être déduite d'une statistique qui indique que plus de 50% de l'énergie produite est transformé en énergie mécanique par les machines asynchrones. Ils possèdent en effet plusieurs avantages : simplicité, robustesse, prix peu élevé et entretien facile. [1] [11] [13]

### **I.2. Constitution :**

Deux composantes principales constituent les moteurs asynchrones, elles sont faites de tôle d'acier et comportent des encoches dans lesquelles on place les enroulements .l'une des composante appelée le stator, il est fixe, produit un champ magnétique tournant ; on y trouve les enroulements reliés a la source .L'autre composante, nommée le rotor, il est monté sur un axe et libre de tourner, Entraîné par un champ tournant, et il produit de l'énergie mécanique.



**Figure I.1. Constitution d'un moteur asynchrone**

### I.2.1. Le stator :

Dans tous les cas, le stator reste au moins dans son principe, le même ; il est constitué d'un enroulement bobiné réparti à l'intérieur d'une carcasse cylindrique faisant office de bâti, et logé à l'intérieur d'un circuit magnétique supporté par cette carcasse

Ce circuit magnétique est formé d'un empilage de tôles, en forme de couronnes circulaires, dans lesquelles sont découpées les encoches parallèles à l'axe de la machine.



**Figure I.2. Stator Avec bobinage**



**figure I.3. Stator sans bobinage**

### I.2.2. Le rotor

Le rotor est fait comme le stator, c'est un empilage de tôles magnétique en acier formant un cylindre claveté sur l'arbre du moteur, il forme la partie mobile du moteur ; et il est placé à l'intérieur du stator. Il tourne à une vitesse inférieure à la vitesse du champ tournant ; parmi les rotors on distingue :

➤ **Rotor à cage :**

Le circuit du rotor est constitué de barres conductrices régulièrement réparties entre deux couronnes métalliques formant les extrémités, le tout rappelant la forme d'une cage d'écureuil. Bien entendu, cette cage est insérée à l'intérieur d'un circuit magnétique analogue à celui du rotor bobiné.

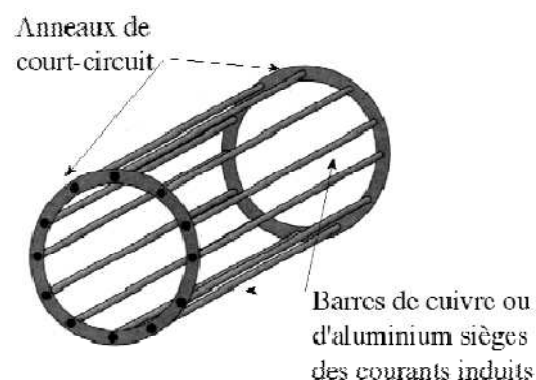
Les barres sont faites en cuivre, en bronze ou en aluminium, suivant les caractéristiques mécaniques et électriques recherchées par le constructeur.

Dans certaines constructions, notamment pour des moteurs à basse tension (230/400v), la cage est réalisée par coulée et centrifugation d'aluminium

Les tôles ferromagnétiques servent à guider les lignes de champs tandis que les barres accueillent les courants induits.



**Figure I.4. Rotor à simple cage**



**Figure I.5. Cage d'écureuil**

➤ **Rotor à double cage :**

Ce rotor comporte deux cages, l'une extérieure assez résistante, l'autre intérieure de faible résistance. Au début du démarrage, le flux étant à fréquence élevée, les courants induits sont dans la cage intérieure. Le couple produit par la cage extérieure est important, et l'appel de courant réduit. En fin de démarrage, la fréquence diminue dans le rotor, et le passage du flux à travers la cage intérieure est plus facile.

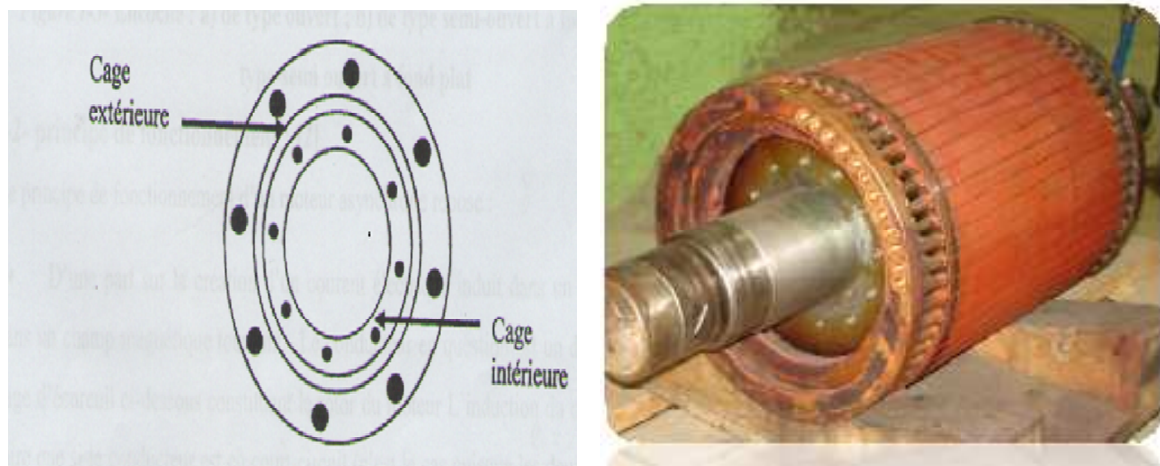


Figure. I 6. Rotor à double cage

➤ **Rotor bobiné (rotor à bagues):**

C'est un cylindre constitué de tôles empilées solidaire sur l'arbre du moteur, les encoches sont percées dans ses tôles. Prés de la surface de ce cylindre, des conducteurs passent dans ses encoches et sont réunis a une de leur extrémité en court-circuit, l'autre extrémité est raccordée a 3 bagues permettent une liaison avec un circuit fixe (des résistances).

Les pôles du rotor sont en même nombre que le stator. Sur les bagues viennent frotter des balais raccordés au dispositif de démarrage.



**Figure. I.7. Rotor à bagues**

### ➤ **Rotor à encoches profondes**

Comporte une cage rotorique simple avec des barres très plates s'enfonçant profondément dans le circuit magnétique. L'effet de peau limite la pénétration du champ magnétique dans le rotor, et ce, d'autant plus que la fréquence est élevée.

A la mise sous tension, le rotor est immobile et les courants induits dans les barres rotoriques, à la fréquence de l'alimentation du stator se concentrent à la périphérie du rotor, ce qui correspond à une cage de forte résistance. Quand la vitesse augmente, la fréquence des courants induits diminue et la profondeur de pénétration du champ magnétique augmente. La cage présente ainsi une résistance plus faible en régime permanent.

## **I.3. Classification des moteurs asynchrones : [14]**

Les moteurs asynchrones sont classés selon les conditions environnementales dont ils seront exposés et selon leurs caractéristiques électriques et mécaniques dont on citera les principales catégories qui suivent :

### **I.3.1 Moteur à couple de démarrage normal (classe B) :**

La grande majorité des moteurs asynchrones appartient à ce groupe. Ces moteurs, d'usage général, peuvent entraîner des ventilateurs, des pompes centrifuges, des machines utiles, etc.

### **I.3.2 Moteur à couple de démarrage élevé (classe C) :**

Ces moteurs comportent, en général, un rotor à double cages. Ils sont utilisés dans les cas où le démarrage est difficile ou d'une durée plutôt longue. Par exemple les pompes et les compresseurs à piston

### I.3.3. Moteur à glissement élevé (classe D) :

Ce sont des moteurs à glissement élevé, avec un courant de démarrage plus faible, leur vitesse nominale est d'environ 10% plus faible que leur vitesse synchrone, leur régime de charge doit être intermittent afin de prévenir tout échauffement excessif. Ils sont utilisés dans le cas où le démarrage est lent (comme un séchoir centrifuge) et pour l'entraînement de machines telles que les cisailles, poinçonneuses et presses. La cage d'écureuil de ces moteurs est faite en laiton pour augmenter sa résistance

Les caractéristiques couple-vitesse de ces différents moteurs, ainsi que les détails de construction de leurs rotors sont représentés sur la figure suivante :

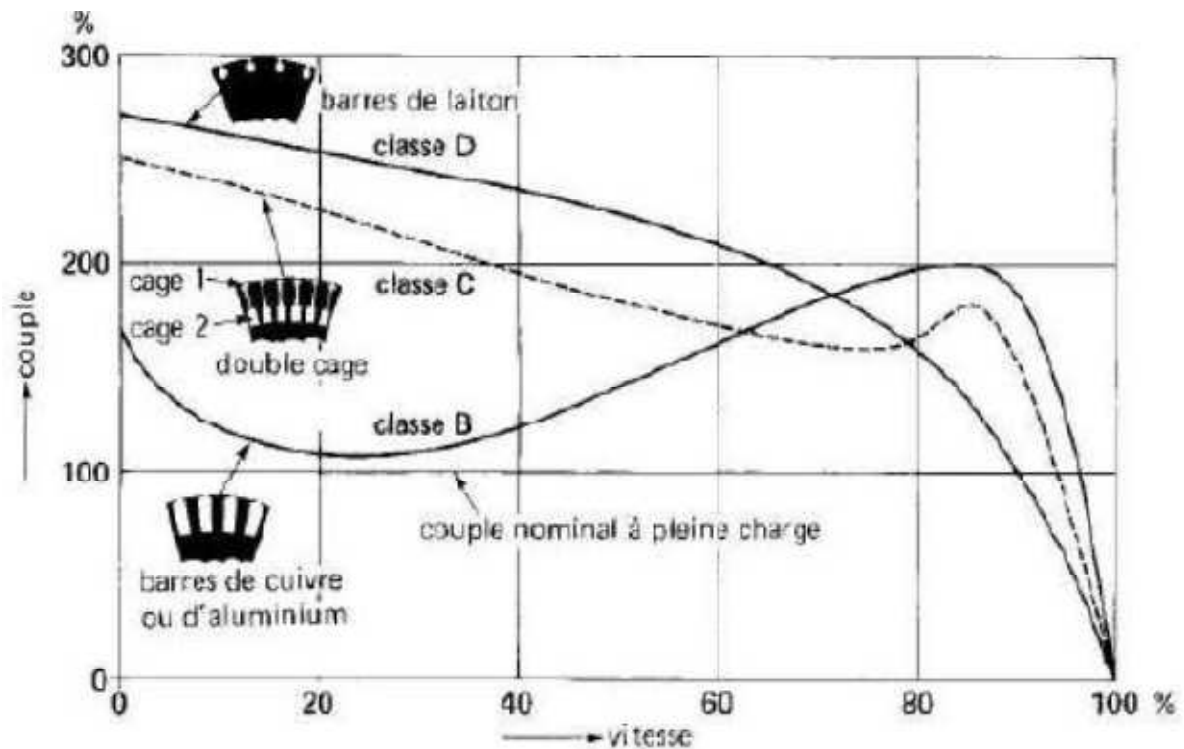


Figure .I. 8. Courbe du couple en fonction de la vitesse pour moteurs de classe B, C et D. L Coupe du rotor indique le genre de conducteurs utilisés. [14]

### I.4. Bobinage : [9]

On peut effectuer le bobinage d'une machine tournante de plusieurs façons, mais on utilise habituellement deux enroulements à une seule ou à deux couches au stator, mais vu la forme des sections on distingue trois types d'enroulements les plus utilisées ; l'enroulement

concentrique, imbriqué et ondulé. Chaque type présente des avantages dans certaines applications.

L'enroulement imbriqué est le type de bobinage le plus employé dans les stators des moteurs triphasés des moyennes et grandes puissances. Même si ce type de bobinage peut être à simple couche, on choisit plutôt de le construire à double couche ; chaque bobine est formée de la moitié des conducteurs contenus dans une encoche et disposée de façon que l'un des cotés de la bobine soit dans le haut d'une encoche (coté supérieur) et l'autre dans le fond (coté inférieur).

Puisque les bobines d'un enroulement imbriqué à double couches n'occupent que la moitié de l'encoche, on peut modifier la largeur et les placer dans une paire d'encoches qui ne correspond plus au pas d'encoche normal. Les bobines sont habituellement de largeur réduite et donnent un pas dit raccourci.

Cette configuration complique le bobinage et sa mise en place, mais présente l'avantage, si le choix du pas raccourci est judicieux, d'atténuer les harmoniques de l'onde de flux et d'améliorer ainsi le comportement du moteur.

- ❖ L'enroulement ondulé est idéal pour les rotors des moteurs asynchrones à bagues.
- ❖ Dans le cas de petits moteurs asynchrones, particulièrement lorsque le bobinage est mécanisé; on utilise généralement l'enroulement concentrique.
- ❖ La disposition de bobinage dans les encoches différencie ces différents types d'enroulements

### **I.5. principe de fonctionnement : [13]**

Le fonctionnement du moteur asynchrone triphasé est basé sur l'application de trois principes fondamentaux :

- Théorème d'Ampère ( principe I).
- Loi de Faraday ( principe II).
- Loi de Lenz ( principe III).

Au moment où l'on ferme l'interrupteur, les enroulements statoriques à P pair de pôles seront branchés sur un système de tension triphasée équilibré et se trouvent parcourus par un système du courant également triphasé équilibré de même pulsation électrique.

Ces courants donnent naissance à une Fmm tournante et par la suite un flux magnétique tournant ( Principe I).

Les enroulements rotoriques voient défiler les P paires de pôles du champ tournant statorique et donc traversés par un flux qui varie sinusoïdalement dans le temps

(principe III). Aux bornes de ces enroulements va apparaître un système de Fem induite triphasé équilibré (principe II).

Comme ces enroulements sont fermés sur eux même, ils seront alors parcourus par un système du courant triphasé équilibré, ces derniers vont créer à leurs tours une Fmm et par la suite un flux magnétique tournant à P paires de pôles. Par conséquent les deux Fmm ainsi que les deux flux (flux statorique et rotorique) tournent à la même pulsation de rotation par rapport au stator. L'interaction entre les deux champs tournants donne naissance au couple électromagnétique de la machine.

### I.6. Définition du glissement

Le glissement qu'on note «  $g$  » est une grandeur qui rend compte de l'écart de vitesse de rotation d'une machine asynchrone par rapport à la vitesse de rotation de son champ statorique. Il doit y avoir une différence de vitesse pour que ce type de moteur fonctionne car c'est le décalage entre le rotor et le champ statorique qui provoque l'apparition des courants induits au rotor, courants qui créent le champ rotorique.

$$\text{On écrit alors : } g = \frac{(N_s - N_r)}{N_s} \times 100$$

- On désigne par  $N_s$  la *fréquence de rotation du champ statorique* dans la machine.
- On désigne par  $N_r$  la *fréquence de rotation* de la machine.

En régime, le glissement est toujours faible, de l'ordre de quelques pour cents : de 2 % pour les machines les plus grosses à 6 ou 7 % pour les petites machines triphasées, il peut atteindre 10 % pour les petites machines monophasées. Les pertes par effet joule dans le rotor étant proportionnelles au glissement, une machine de qualité se doit de fonctionner avec un faible glissement.

➤ Le glissement peut aussi être calculé à partir des vitesses angulaires

$$\text{avec : } g = \frac{(W_s - W_r)}{W_s} \times 100$$

- $W_s$  la *vitesse angulaire de synchronisme* du champ statorique dans la machine.
- $W_r$  la *vitesse angulaire de rotation* de la machine.

### I.7. Quadrants de fonctionnements :

La machine asynchrone peut fonctionner dans quatre quadrants, les modes de fonctionnements possibles sont :

- **Unidirectionnel** : le passage de l'énergie ne peut se faire que dans le sens réseau vers le moteur (quadrants 2 et 4 seuls)
- **Bidirectionnel** : l'énergie peut circuler dans les deux sens. la machine synchrone peut fonctionner en moteur (quadrants 2 et 4) ou en alternateur (1 et 3).

On utilise ici la réversibilité de la machine asynchrone soit pour réinjecter l'énergie dans le réseau, soit pour obtenir un couple de freinage

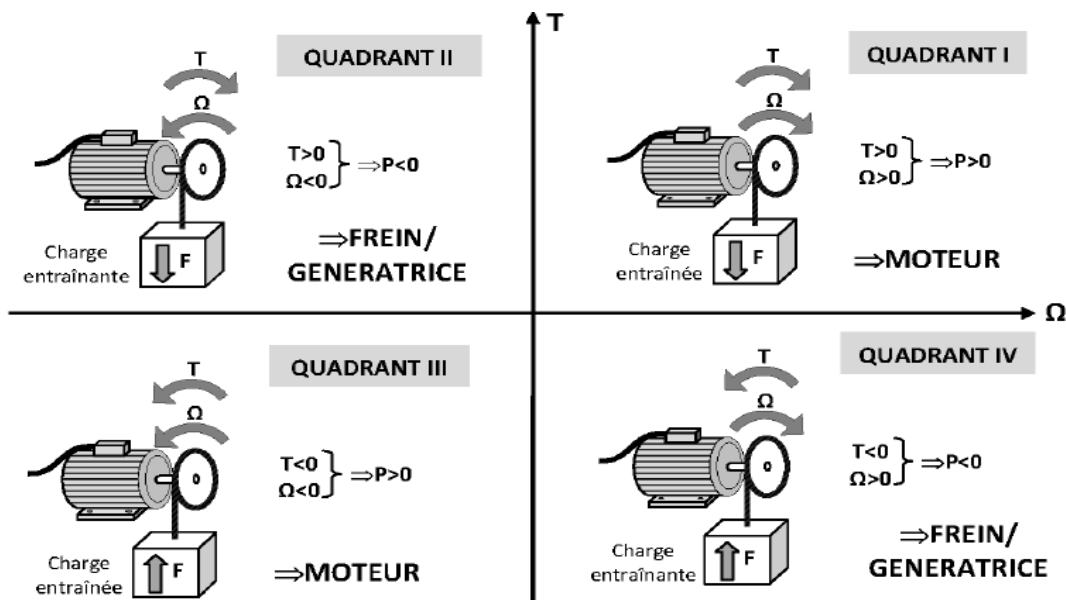


Figure .I.9. Quadrants de fonctionnements

**I.8. Pannes des moteurs asynchrones :**

Constatation	Raisons possibles	Vérification et remèdes
Le moteur ne décolle pas, aucun renflement.	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Manque de tension du réseau</li> <li>2. Des fusibles fondus.</li> <li>3. Une coupure dans la ligne.</li> </ol>	<p>Vérifier la tension avant l'interrupteur avec une lampe témoin ou un voltmètre, vérifié s'il arrive à la plaque à bornes.</p> <p>Vérifier leurs états.</p> <p>Vérifier les bornes, les contacts de l'appareillage et la ligne</p>
Le moteur ne décolle pas et le renflement est normal	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Mauvais couplage à la plaque à bornes.</li> <li>2. Coupure dans le rotor.</li> <li>3. Coupure dans le rhéostat</li> <li>4. Usure ou mauvais contacte des balais.</li> <li>5. Coupure dans le circuit rotorique</li> <li>6. Couple résistant trop grand au démarrage</li> </ol>	<p>Le stator est couplé en étoile pour une tension d'alimentation en triangle.</p> <p>Soudure rompue dans un rotor à cage. Vérifier la tension aux bagues, dans un rotor bobiné. S'il ya une coupure, le voltmètre restera au zéro dans une position.</p> <p>Vérifier le rhéostat à la lampe témoin.</p> <p>Vérifier l'état de la pression des balais.</p> <p>Vérifier la ligne et le serrage des diverses bornes. Vérifier le rhéostat et les balais.</p> <p>Décharger le moteur et vérifier son comportement</p>

Le moteur ne décolle pas et produit un fort renflement.	1. Une phase ne reçoit pas de courant.	Vérifier la tension aux bornes du moteur avec un voltmètre ou une lampe témoin, puis remonter vers la source si la tension n'est pas normale sur une phase. Un fusible peut être fondu. Vérifier le serrage des contacts, des bornes et de l'interrupteur. La ligne peut être coupée.
	2. Une phase est coupée dans le stator.	Vérifier chaque phase avec la lampe témoin après les avoir déconnectées à la plaque à bornes
	3. Un court circuit dans le stator	Le bobinage va fumer à l'endroit du court circuit, le stator risque de griller. Ne pas insister ; couper le courant et réparer localement, si possible, le bobinage.

Tableau. I.1.pannes des moteurs asynchrones [13]

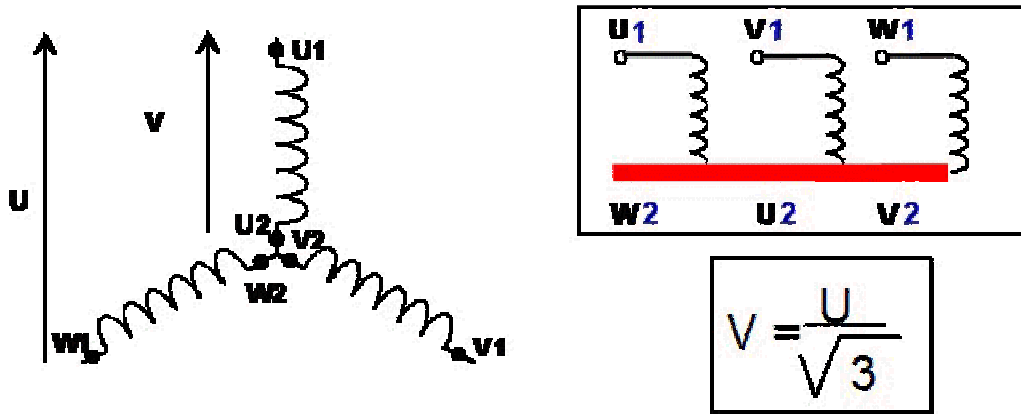
## I.9.Connexion au réseau :

Le stator des moteurs asynchrones standards possède trois enroulements relié a une plaque à borne comportant six bornes repérées U1, V1, W1 et U2, V2, W2. Les enroulements sont branchés de telle sorte que la tension du réseau corresponde à la tension qui supporte un enroulement du moteur :

### I.9.1. Couplage étoile :

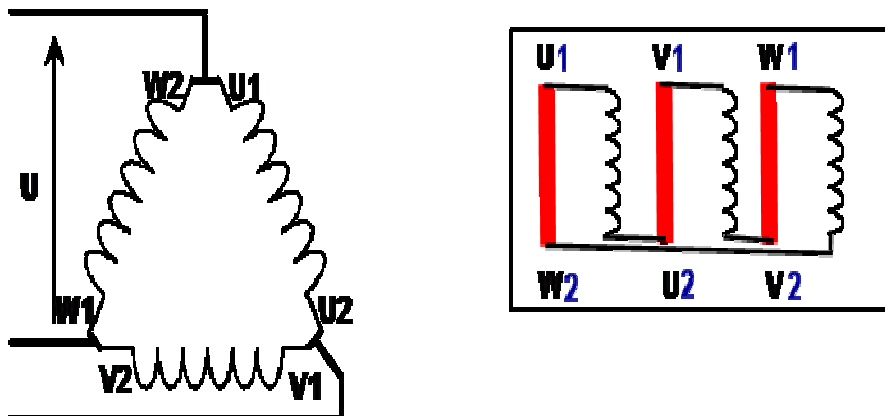
Dans le montage étoile, chaque enroulement est soumis à la tension simple V tension entre phase et neutre. Chaque enroulement est traversé par le courant de ligne I. Si la plus grande tension de la plaque signalétique du moteur correspond à la tension entre phases du

réseau, on choisit le couplage étoile :  $V = \frac{U}{\sqrt{3}}$



**I.9.2. Couplage triangle :**

Dans le montage triangle, un enroulement est câblé entre deux fils de phases, avec une tension composée U et chaque enroulement est traversé par un courant de valeur efficace J. Si la tension est petite élevée, elle correspond à la tension du réseau (le couplage sera triangle).



**I.10. Bilan de puissances :**

Le moteur asynchrone absorbe sur le réseau une puissance électrique active triphasée Pa

$$P_a = \sqrt{3} * U * I * \cos \phi$$

Avec :

U : est la tension composée du réseau (V)

I : est le courant en phase (A)

φ : est le déphasage entre le courant et la tension

Une partie de cette puissance  $P_{js}$  est dissipée par effet Joule dans les enroulements du stator, le champ magnétique inducteur entraîne des pertes dans le fer  $P_{fer}$  par hystérésis et par courant de Foucault. Le reste de la puissance  $P_{tr}$  est transmise au rotor vers l'entrefer.

La figure ci dessous représente le bilan des puissances et des pertes d'un moteur asynchrone triphasé :

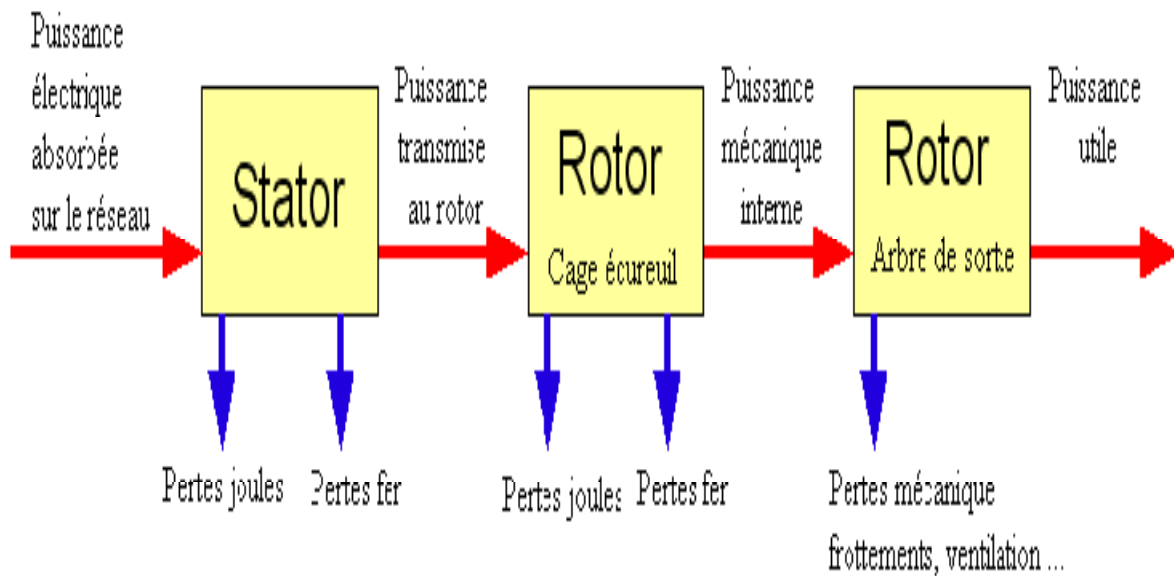


Figure .I.10. Bilan des puissances et des pertes [13]

### I .11. Rendement d'un moteur asynchrone triphasé :

Le rendement  $\eta$  du moteur asynchrone est le rapport entre la puissance utile qu'il fournit et la puissance électrique qu'il absorbe.

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} [\%]$$

$P_u$  : puissance fournie par le moteur asynchrone triphasé

$P_a$  : puissance absorbée par le moteur asynchrone triphasé

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} = \frac{pu}{pu - (pjs + pfr + pjr + pc)}$$

### I.12. Plaque signalétique :

La plaque signalétique spécifie les valeurs du point de fonctionnement nominal (point pour lequel le moteur fonctionne normalement) :

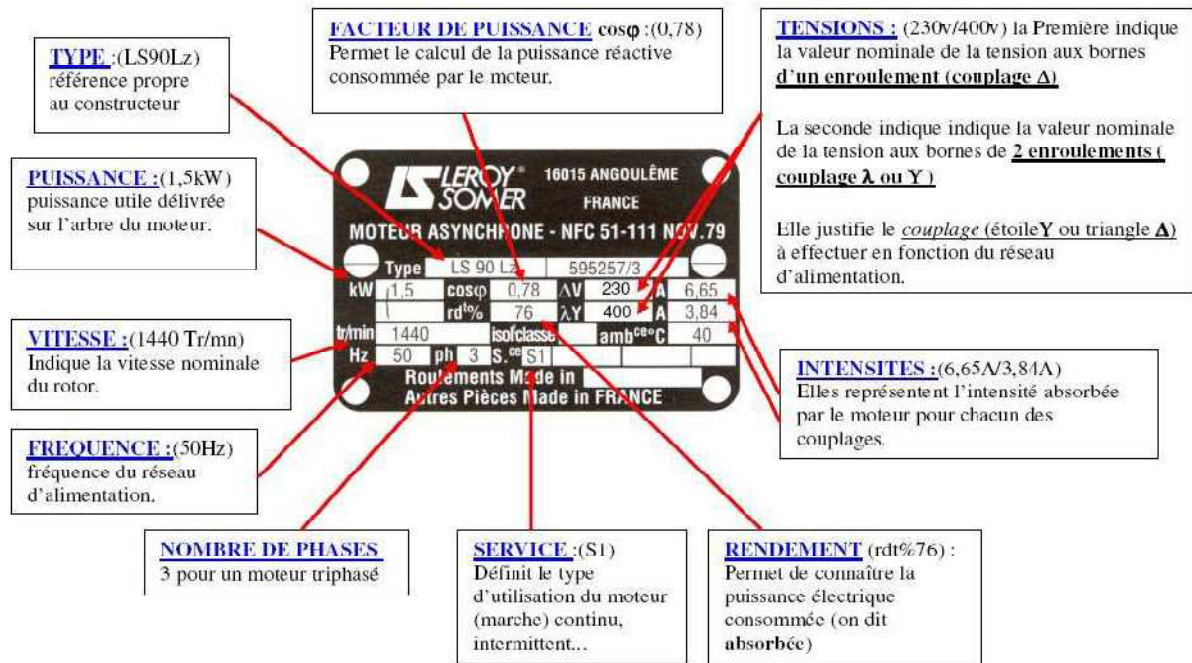


Figure .I.11. Plaque signalétique d'un moteur asynchrone triphasé

### I.13. Conclusion :

les moteurs asynchrones triphasés sont très employés dans l'industrie pour les différents avantages qu'ils présentent .le moteur asynchrone triphasé de faible et de moyenne puissance est utilisé dans les ventilateurs et les pompes hydrauliques ,ainsi que dans les mélangeurs et les centrifugeuses ,le moteur de grande puissance est utilisé dans les machines outils, les appareils de levage et les compresseurs .



### II.1.Introduction : [5]

Lors de la mise sous tension d'un moteur, l'appel de courant sur le réseau est important et peut, surtout si la section de la ligne d'alimentation est insuffisante, provoquer une chute de tension susceptible d'affecter le fonctionnement des récepteurs. Parfois, cette chute de tension est telle qu'elle est perceptible sur les appareils d'éclairage. Pour remédier à ces inconvénients, les règlements de quelques secteurs interdisent, au-dessus d'une certaine puissance, l'emploi de moteurs démarrant en direct.

En fonction des caractéristiques du moteur et de la charge, plusieurs méthodes de démarrages sont utilisées. Le choix sera dicté par des impératifs électriques, mécaniques et économiques.

La nature de la charge entraînée aura également une grande incidence sur le mode de démarrage à retenir.

### II.2 : les problèmes de démarrage des moteurs asynchrone triphasés :

Au moment du démarrage, le moteur asynchrone 3~ fonctionne comme un transformateur, dont lequel le primaire (stator) est sous une tension et le secondaire (rotor) est en court-circuit, l'intensité appelée est alors très simple. Suivant le type et la puissance du moteur, le courant de démarrage peut atteindre 4 à 10 fois le courant nominale de pleine charge. Cet appel de courant très important de courte durée que le moteur pourrait le supporter sans risque d'échauffement dangereux, par ailleurs il est un gêne pour la distribution d'énergie électrique et pour les utilisateurs en voisinage sur la même ligne, en provoquant des chutes de tension excessives, il est alors nécessaire de réduire ce courant de démarrage.

#### II.2.1 Moteur à cage d'écureuil :

Pour ce type de moteur, le seul moyen pour réduire le courant de démarrage est de réduire la tension aux bornes du stator en utilisant plusieurs moyens par exemple le démarrage étoile-triangle.

#### II.2.2 Moteur a rotor bobiné:

Il est possible de réduire le courant de démarrage, en insérant un rhéostat dans les enroulements rotoriques, Le courant rotoriques est sensiblement proportionnel au couple fournie :  $C_d = 2C_n$  et  $I_d = 2I_n$  Avec:

$I_d$  : courant de démarrage [A].

$I_n$  : courant nominal [A].

$C_d$  : couple de démarrage [Nm].

$C_n$  : couple nominal [Nm].

Le moteur à rotor bobiné ne peut pas démarrer en un seul temps (courant et couple inadmissible). Il est recommandé d'employer les moteurs à rotor bobiné pour l'entraînement des machines de grande puissance et ceux exigent un grand couple de démarrage et les moteurs à cage sont plus économiques, plus robustes ; que les moteurs à rotor bobiné. La puissance est : Inférieure à 30 kW sous 4 pôles ; Supérieure à 30 kW, on utilise des moteurs à rotor bobiné.

### II.3: Les principaux modes de démarrage:

**II.3.1 : Démarrage direct [5]** : C'est le mode de démarrage le plus simple dans lequel le stator est directement couplé sur le réseau. Le moteur démarre sur ses caractéristiques naturelles.

#### A/Couplage et procédure de commutation :

Au moment de la mise sous tension, le moteur se comporte comme un transformateur dont le secondaire, constitué par la cage du rotor très peu résistante, est en court-circuit. Le courant induit dans le rotor est important. Il en résulte une pointe de courant sur le réseau :

$$I_{\text{démarrage}} = 5 \text{ à } 8 I_{\text{nominal}}$$

Le couple de démarrage est en moyenne :  $C_{\text{démarrage}} = 0.5 \text{ à } 1.5 C_{\text{nominal}}$ .

Malgré les avantages qu'il présente (simplicité de l'appareillage, couple de démarrage élevé, démarrage rapide, prix faible), le démarrage direct ne peut convenir que dans les cas où :

- la puissance du moteur est faible par rapport à la puissance du réseau, de manière à limiter les perturbations dues à l'appel de courant,
- la machine entraînée ne nécessite pas une mise en vitesse progressive où comporte un dispositif amortisseur qui réduit le choc du démarrage, et peut accepter une mise en rotation rapide
- le couple de démarrage peut être élevé sans incidence sur le fonctionnement de la machine ou de la charge entraînée.

Ce démarrage ne convient pas si :

- Le réseau ne peut accepter de chute de tension

- La machine entraînée ne peut accepter les à-coups mécaniques brutaux
- Le confort et la sécurité des usagers sont mis en cause (escalier mécanique)

**B/Avantages et inconvénients**

➤ **Avantages**

- Simplicité de l'appareillage.
- Couple de démarrage important.
- Temps de démarrage court.

➤ **Inconvénients**

- Appel du courant important
- Démarrage brutal
- Ne permet pas un démarrage doux et progressif.

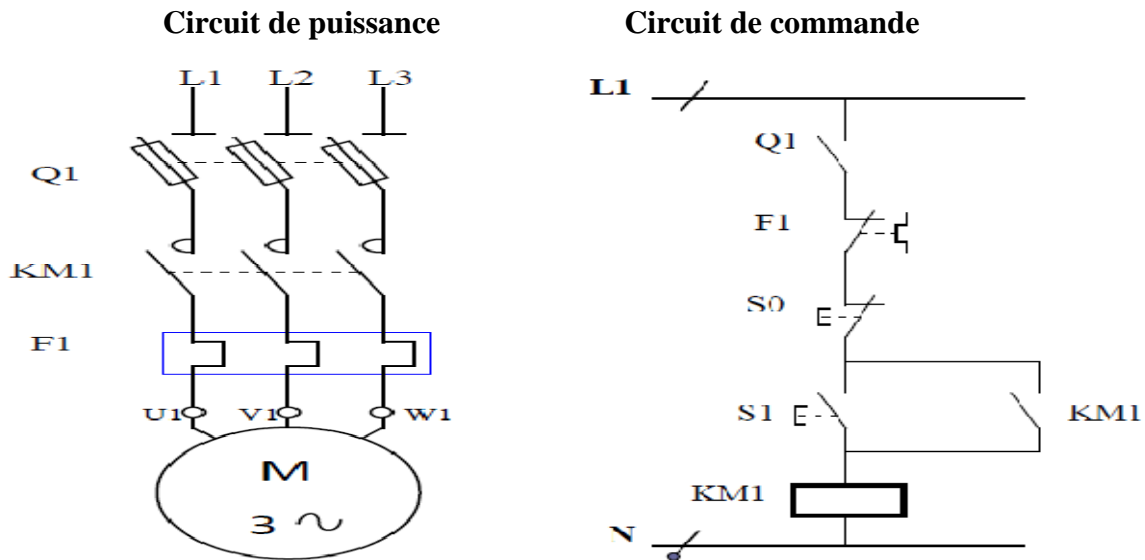


Figure II.1 : Schéma de démarrage direct d'un moteur asynchrone triphasé. [5]

- |                                     |  |
|-------------------------------------|--|
| L1, L2, L3 : alimentation triphasée | F : contact auxiliaire du relais thermique |
| Q : fusible sectionneur             | S0: bouton poussoir arrêt                  |
| KM1 : contacteur principal 1        | S1: bouton poussoir marche                 |
| F : relais thermique                | KM1 : bobine du contacteur                 |
| M : moteur triphasé                 | KM1 : contact auxiliaire du contacteur     |

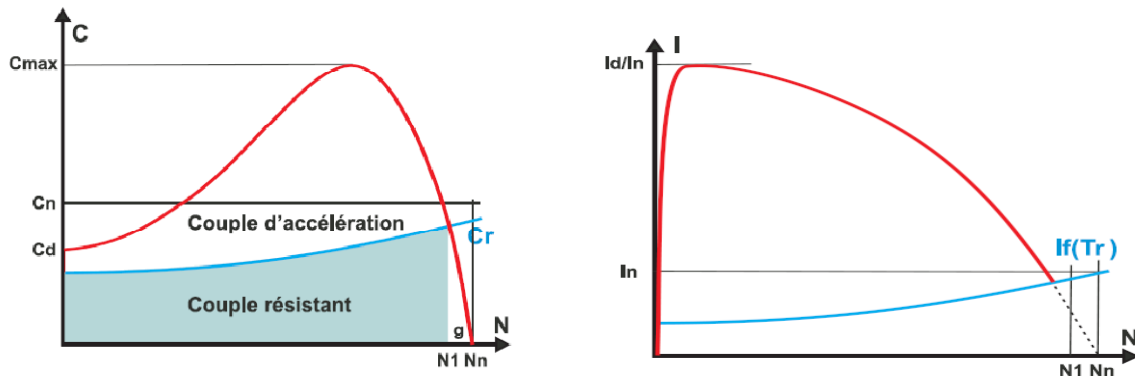


Figure II-2 : Courbes caractéristiques couple-courant de démarrage direct. [5]

### II.3.2 : Démarrage sous tension réduite

Plusieurs dispositifs permettent de réduire la tension aux bornes des enroulements du stator pendant la durée du démarrage du moteur ce qui est un moyen de limiter l'intensité du courant de démarrage. L'inconvénient est que le couple moteur est également diminué et que cela augmente la durée avant laquelle la machine atteint le régime permanent.

### II.3.3 : Démarrage étoile-triangle:

Ce mode de démarrage ne peut être utilisé qu'avec un moteur sur lequel les deux extrémités de chacun des trois enroulements statoriques sont ramenées sur la plaque à bornes. Par ailleurs, le bobinage doit être réalisé de telle sorte que le couplage triangle corresponde à la tension du réseau : par exemple, pour un réseau triphasé 380 V, il faut un moteur bobiné en 380 V triangle et 660 V étoile. [14]

#### A/Couplage et procédure de commutation :

Le principe consiste à démarrer le moteur en couplant les enroulements en étoile sous la tension réseau, ce qui revient à diviser la tension nominale du moteur en étoile par  $\sqrt{3}$ . La pointe de courant de démarrage est divisée par 3 :  $I_d = 1.5 \text{ à } 2.6 I_n$

En effet, un moteur 380 V/660 V couplé en étoile sous sa tension nominale 660 V absorbe un courant  $\sqrt{3}$  fois plus faible qu'en couplage triangle sous 380 V. Le couplage étoile étant effectué sous 380 V, le courant est divisé une nouvelle fois par  $\sqrt{3}$  donc au total par 3.

Le couple de démarrage étant proportionnel au carré de la tension d'alimentation, il est lui aussi divisé par 3 :  $C_d = 0.2 \text{ à } 0.5 C_n$ .

La vitesse du moteur se stabilise quand les couples moteur et résistant s'équilibrent, généralement entre 75 et 85 % de la vitesse nominale. Les enroulements sont alors couplés en triangle et le moteur rejoint ses caractéristiques naturelles. Le passage du couplage étoile au couplage triangle est commandé par un temporisateur. La fermeture du contacteur triangle s'effectue avec un retard de 30 à 50 millisecondes après l'ouverture du contacteur étoile, ce qui évite un court-circuit entre phases, les deux contacteurs ne pouvant être fermés simultanément.

Le démarrage étoile-triangle convient aux machines qui ont un faible couple résistant ou qui démarrent à vide (ex : machine à bois). Pour limiter ces phénomènes transitoires, des variantes peuvent être nécessaires, au-delà d'une certaine puissance. L'une consiste en une temporisation de 1 à 2 secondes au passage étoile-triangle. [5] [14]

### **B/Avantages et inconvénients :**

#### ➤ **Avantages**

- Appel de courant en étoile réduit au tiers de sa valeur en direct.
- Faible complication d'appareillage.

#### ➤ **Inconvénients**

- Couple réduit au tiers de sa valeur en direct.
- Coupure entre les positions étoile et triangle d'où apparition de transitoires.

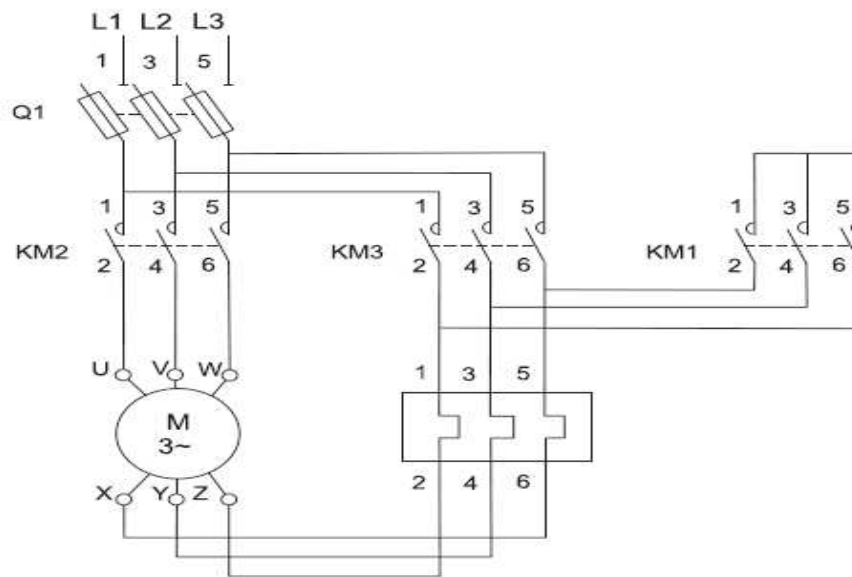


Figure II.3 : Schéma de démarrage étoile-triangle d'un moteur asynchrone triphasé.[5]

### II.3.4 : Démarrage statorique à résistance: [5]

Le principe consiste à démarrer le moteur sous tension réduite en insérant des résistances en série avec les enroulements. Lorsque la vitesse se stabilise, les résistances sont éliminées et le moteur est couplé directement sur le réseau. Cette opération est généralement commandée par un temporisateur.

#### A/Couplage et procédure de commutation :

Dans ce mode de démarrage, le couplage des enroulements du moteur n'est pas modifié. Il n'est donc pas nécessaire que les deux extrémités de chaque enroulement soient sorties sur la plaque à bornes.

La valeur de la résistance est calculée en fonction de la pointe de courant au démarrage à ne pas dépasser, ou de la valeur minimale du couple de démarrage nécessaire compte tenu du couple résistant de la machine entraînée. En général, les valeurs de courant et de couple de démarrage sont :

$$- I_{\text{démarrage}} = 4.5 I_{\text{nominal}}$$

$$- C_{\text{démarrage}} = 0.75 C_{\text{nominal}}$$

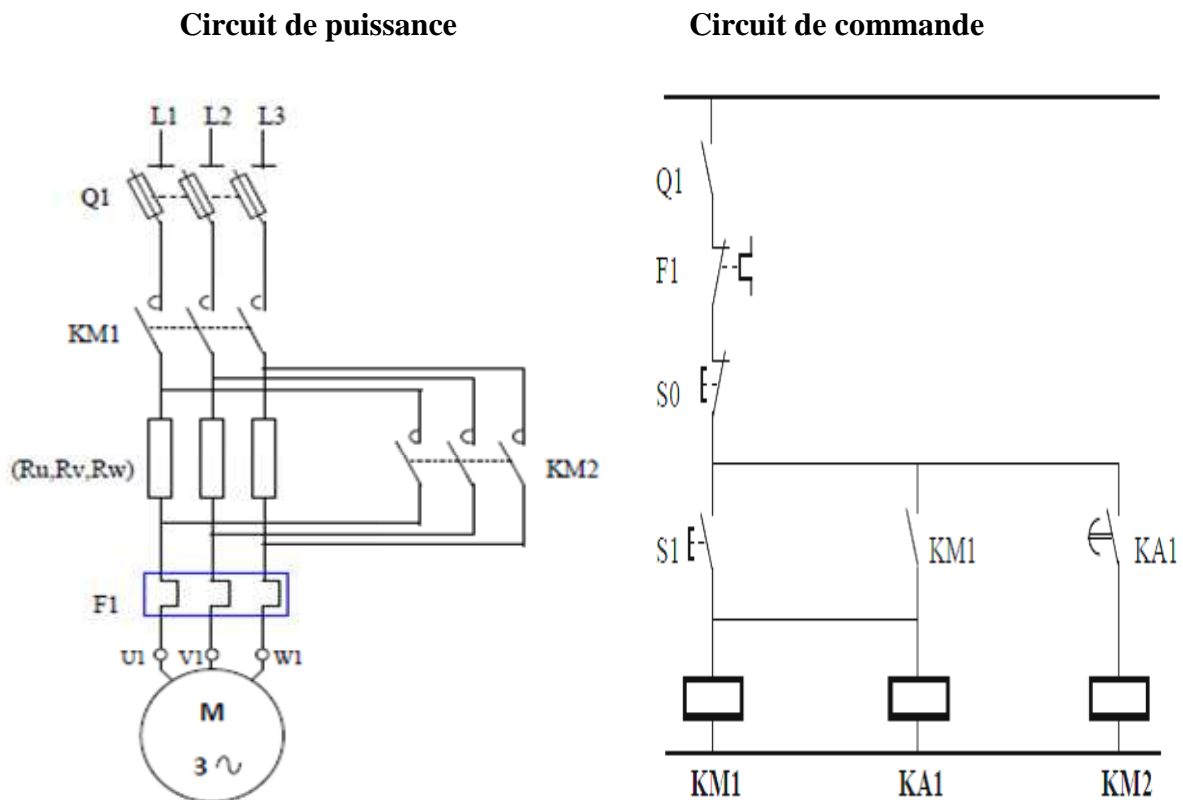


Figure II.4 : Schéma de démarrage à résistances statoriques d'un moteur asynchrone triphasé. [5]

Avec :

KM1: contacteur « ligne »

KM2 : contacteur de court- circuit des résistances (Ru, Rv, Rw).

La chute de tension est proportionnelle au courant absorbé par le moteur. Comme le courant diminue au fur et à mesure de l'accélération du moteur, il en est de même pour la chute de tension dans la résistance. La tension appliquée aux bornes du moteur est donc minimale au moment du démarrage, et elle augmente progressivement.

Le couple étant proportionnel au carré de la tension aux bornes du moteur, il augmente plus rapidement que dans le démarrage étoile-triangle où la tension reste fixe pendant tout le temps du couplage étoile.

Ce mode de démarrage convient donc bien aux machines ayant un couple résistant croissant avec la vitesse, comme par exemple les ventilateurs ou les pompes centrifuges.

Il présente l'inconvénient d'une pointe de courant relativement importante au démarrage. Cette pointe pourrait être réduite en augmentant la valeur de la résistance, mais cela entraînerait une chute de tension supplémentaire aux bornes du moteur, et par conséquent une diminution importante du couple de démarrage.

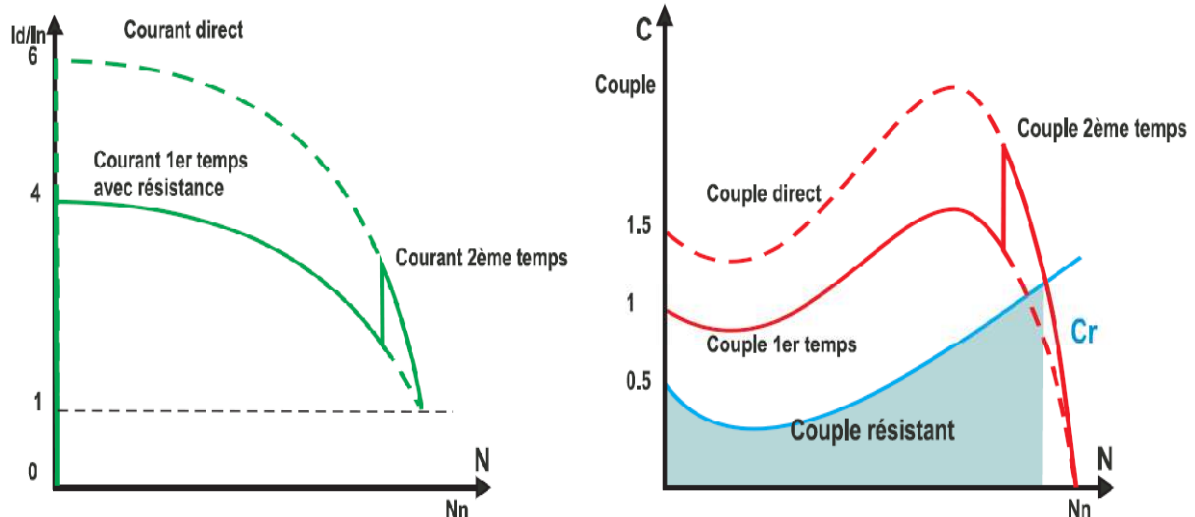


Figure II-5 : Courbes caractéristiques couple - courant de démarrage par résistances Statoriques. [5]

### A/Avantages et inconvénients

#### ➤ Avantages

- La tension d'alimentation est très fortement réduite au moment de démarrage, car l'appel du courant reste important.
- Couple moteur croissant pendant le démarrage et démarrage plus progressif.

#### ➤ Inconvénients

- Appel du courant plus important qu'en étoile-triangle 4 à 5 fois  $I_n$ .
- Le couple de démarrage est diminué par rapport au démarrage direct 0,75  $C_n$ .

### II.3.5. Démarrage a tension réduite par autotransformateur: [5]

Le moteur est alimenté sous tension réduite par l'intermédiaire d'un autotransformateur qui est mis hors circuit quand le démarrage est terminé.

Le démarrage s'effectue en trois temps :

#### A/Couplage et procédure de commutation :

- au premier temps, l'autotransformateur est d'abord couplé en étoile, puis le moteur est couplé au réseau à travers une partie des enroulements de l'autotransformateur. Le démarrage s'effectue sous une tension réduite qui est fonction du rapport de transformation. L'autotransformateur est généralement muni de prises permettant de choisir le rapport de transformation, donc la valeur de la tension réduite la mieux adaptée.

- avant de passer au couplage plein tension, l'étoile est ouvert. La fraction de bobinage raccordée au réseau constitue alors une inductance en série avec le moteur. Cette opération est effectuée lorsque la vitesse d'équilibre est atteinte à la fin du premier temps.

- le couplage plein tension intervient après le deuxième temps généralement très court (de l'ordre d'une fraction de seconde). La portion de bobinage de l'autotransformateur en série avec le moteur est court-circuitée, puis l'autotransformateur est mis hors circuit.

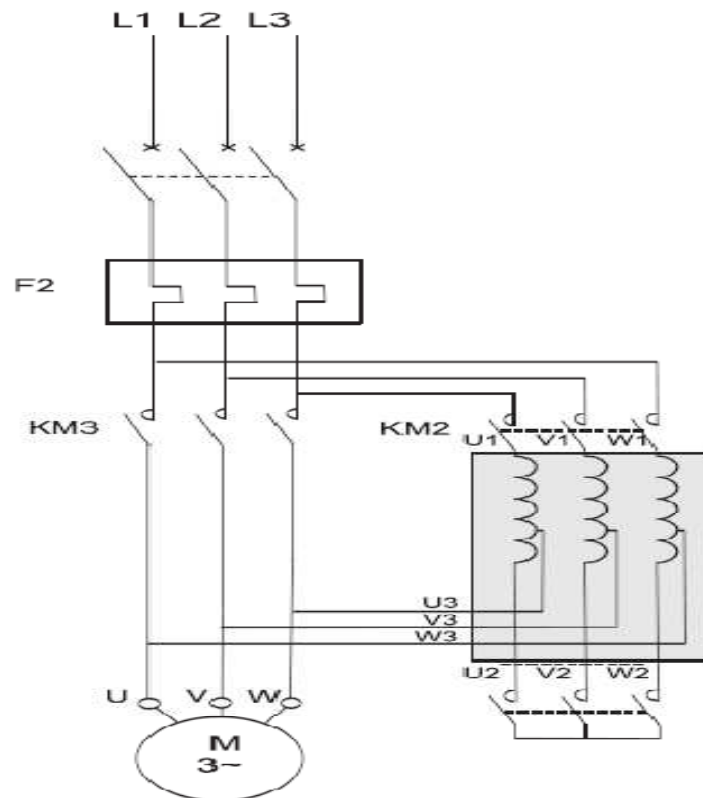


Figure II.6 : Schéma de démarrage par autotransformateur d'un moteur asynchrone triphasé.

Le courant et le couple de démarrage varient dans les mêmes proportions. Ils sont divisés par ( $U_{\text{réseau}}/U_{\text{réduite}}$ ).

Les valeurs obtenues sont les suivantes :  $I_d = 1.7 \text{ à } 4 I_n$

$$C_d = 0.5 \text{ à } 0.85 C_n$$

Le démarrage s'effectue sans qu'il y ait interruption du courant dans le moteur. De ce fait, les phénomènes transitoires liés à une telle interruption n'existent pas.

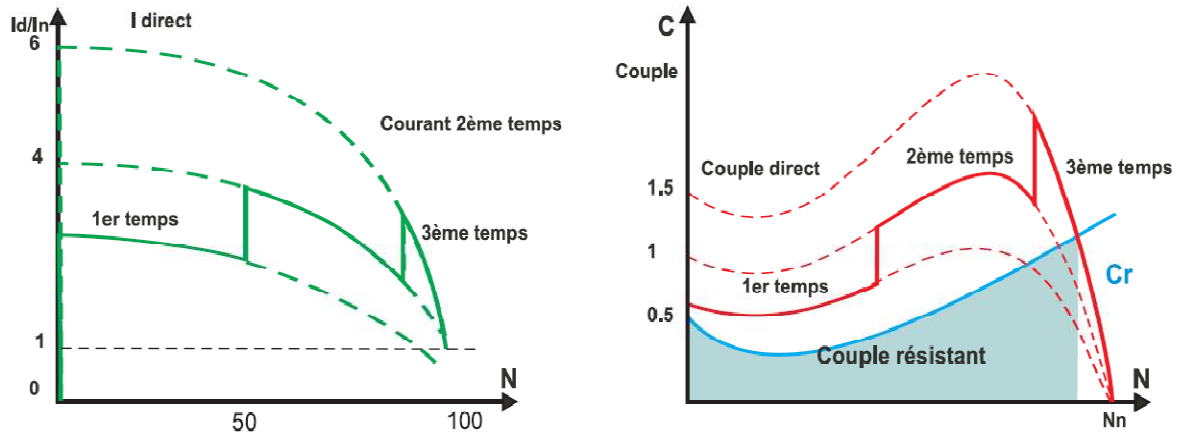


Figure II-7 : Courbes caractéristiques couple - courant de démarrage par autotransformateur.[5]

En revanche, si certaines précautions ne sont pas prises des phénomènes transitoires de même nature peuvent apparaître lors du couplage sous pleine tension. En effet, la valeur de l'inductance en série avec le moteur, après ouverture de l'étoilage, est grande par rapport celle du moteur. Il s'ensuit une chute de tension importante qui entraîne une pointe de courant transitoire élevée au moment du couplage sous pleine tension. Pour éviter cet inconvénient, le circuit magnétique de l'autotransformateur comporte un entrefer dont la présence conduit à une diminution de la valeur de l'inductance. Cette valeur est calculée de telle façon qu'au moment de l'ouverture de l'étoilage au deuxième temps, il n'y ait pas de variation de tension aux bornes du moteur.

La présence de l'entrefer a pour conséquence une augmentation du courant magnétisant de l'autotransformateur. Ce courant magnétisant augmente l'appel de courant dans le réseau lors de la mise sous tension de l'autotransformateur.

Ce mode de démarrage est généralement utilisé en BT pour des moteurs de puissance supérieure à 150 kW. Mais il conduit à des équipements relativement coûteux en raison du prix élevé de l'autotransformateur.

### Avantages et inconvénients

- **Avantages :**
  - Possibilité de choisir le couple de décollage.
  - Réduction de l'appel du courant.
  - Démarrage en 3 temps sans coupure.
  
- **Inconvénient :** -Prix d'achat élevé de l'équipement.

## II.4/Démarrage progressif : [7]

### II-4-1/Démarrage par un convertisseur électronique :

Les démarreurs progressifs sont des appareils de commande électronique conçus pour le démarrage progressif des moteurs asynchrones triphasés. Par le biais d'une commande en angle de phase, les trois phases du moteur sont influencées par des thyristors (Gradateur) de telle sorte que les intensités puissent augmenter constamment. Le gradateur est un dispositif qui permet à partir d'une source alternative de convertir une tension sinusoïdale de valeur efficace constante à une tension alternative de même fréquence mais de valeur efficace variable, c'est un interrupteur statique constitué de deux thyristors « tête-bêche » pour la commande des puissances élevées ou un « triac » pour commande de faible puissances... Le couple du moteur se comporte de même manière au cours de l'accélération, ceci permet au moteur de démarrer sans secousse. On évite aussi la détérioration d'élément de commande en supprimant le couple au démarrage qui se manifeste brutalement dans le cas d'un enclenchement direct. Cette propriété permet de réduire les coûts de fabrication des éléments du moteur. Quand le démarrage a réussi, les éléments de l'électronique de puissance sont shuntés aux éléments du moteur. La fonction d'arrêt progressif a pour le but de prolonger la durée naturelle de décélération des moteurs et éviter ainsi leur arrêt brutal. Le schéma ci-dessous représente démarrage par un convertisseur électronique (Gradateur) moteur asynchrone triphasé.

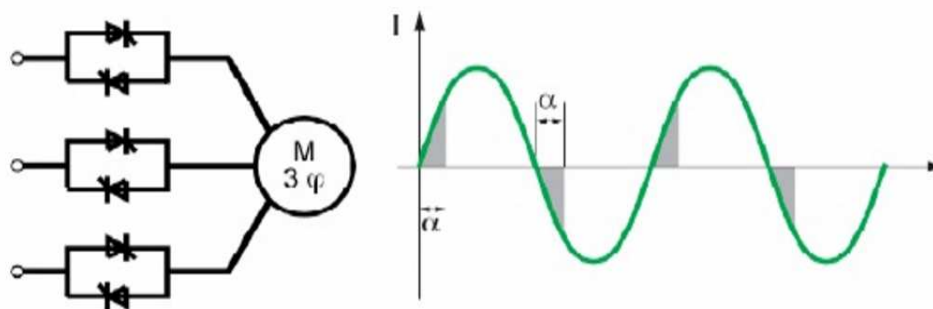


Figure II-8 : Schéma de démarrage par un convertisseur électronique (Gradateur) pour moteur asynchrone triphasé. [5]

### A/Schéma fonctionnel :

Le schéma ci-dessous montre le schéma fonctionnel du mode de démarrage par un convertisseur électronique d'un moteur asynchrone triphasé :

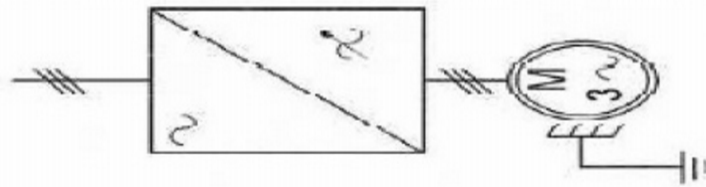
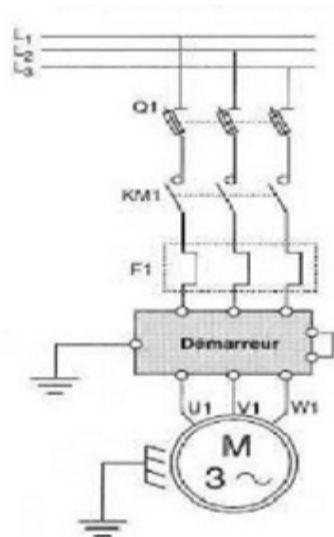


Figure II-9 : Schéma fonctionnel d'un Démarreur progressif d'un moteur asynchrone triphasé. [5]

### B/Schéma de puissance et de commande :

Le schéma de puissance et de commande du démarrage électronique semi automatique représenté par la figure ci-dessous :

#### Schéma de puissance



#### Schéma de commande

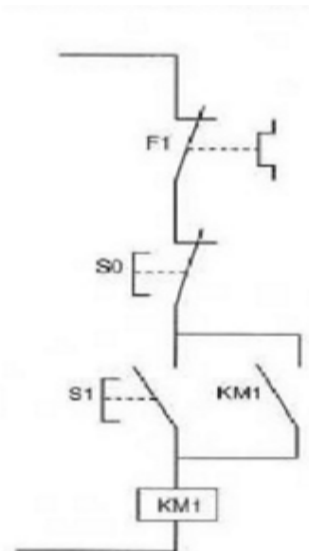
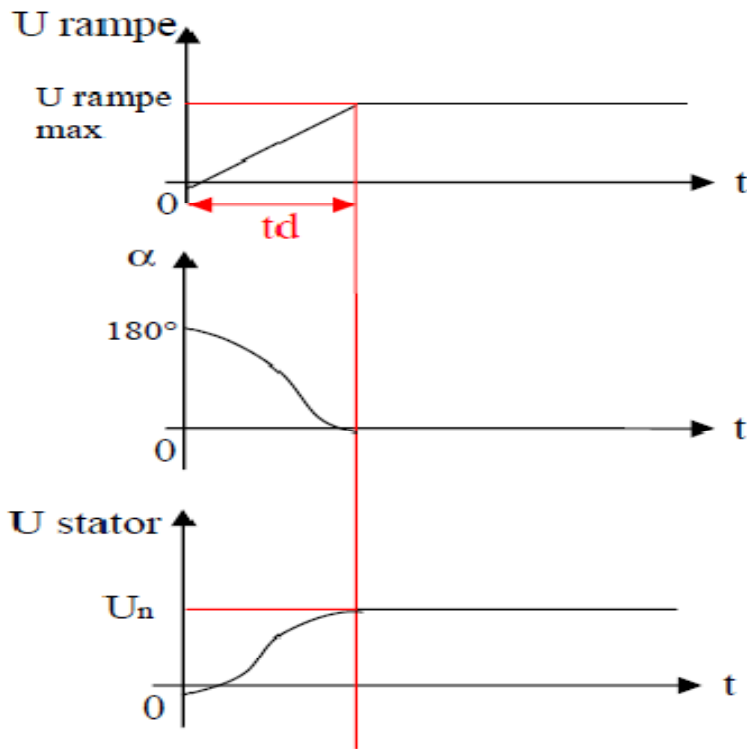


Figure II-10 : Schéma de démarrage et arrêt progressif d'un moteur asynchrone triphasé. [5]

### C/ Principe de fonctionnement :

La tension du réseau d'alimentation est appliquée progressivement au stator du moteur. La variation de la tension statoriques est obtenue par la variation continue de l'angle  $\alpha$  de retard à l'amorçage des thyristors du gradateur. La consigne de démarrage permet de régler la pente d'un signal en forme de « rampe » cette consigne est étalonnée en secondes. A la fin du démarrage, le stator du moteur est sous tension nominale, les thyristors sont alors en pleine conduction. Pour une charge donnée, le réglage de la pente permet de faire varier la durée de démarrage, donc le temps de mise en vitesse progressive de l'association moteur+charge. Le phénomène inverse se produit lors d'un arrêt progressif contrôlé. La consigne de décélération permet de faire évoluer l'angle  $\alpha$  des thyristors de  $0^\circ$  à  $180^\circ$  donc

$U_{\text{moteur}}$  de  $U_n$  à 0, comme l'indique sur la figure ci-dessous :



**D/Courbes caractéristiques :** La figure ci-dessous représente les différentes caractéristiques de couple et courant de mode démarrage par un convertisseur électronique :

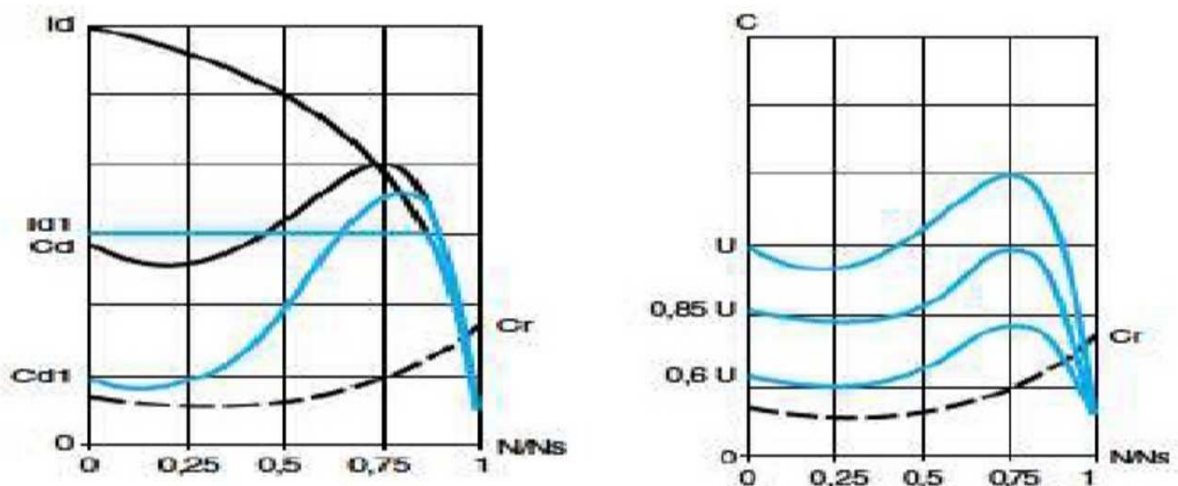


Figure II-11 : Courbes caractéristiques de démarrage par un convertisseur électronique (Gradateur).

**E/Avantages et inconvénients :****➤ Avantages :**

- La maîtrise des caractéristiques de fonctionnement.
- La protection thermique du moteur et du démarreur.
- Réduction des pointes de courant et diminution des chutes de tension en ligne.
- Démarrer progressivement les machines.
- Il permet décélération progressive.
- Réduction des couples au démarrage pour protéger la mécanique.
- Peu encombrant.
- Du point de vue économique, ce mode de démarrage satisfaisant car son rendement est excellent.

**➤ Inconvénients :**

- Génère les perturbations. –
- Ce procédé est utilisé que pour l'entraînement de machines démarrant à vide
- Utiliser des capteurs.

**II-4-2/Démarrage par variateur de vitesse (Convertisseur de fréquence)  
pour moteur asynchrone :**

Le variateur de vitesse pour moteur asynchrone reprend les mêmes principes de base que le variateur pour moteur à courant continu. L'apparition sur le marché de variateurs de vitesse économiques pour moteur asynchrone est assez récente. En France, Télémécanique a été une des compagnies pionnières en la matière. L'évolution des technologies a permis la réalisation de variateurs économiques fiables et performants.

**A/ Principe général :**

Le convertisseur de fréquence, alimenté à tension et fréquence fixes par le réseau, assure au moteur, en fonction des exigences de vitesse, son alimentation en courant alternatif à tension et fréquence variables. Pour alimenter convenablement un moteur asynchrone à couple constant quelle que soit la vitesse, il est nécessaire de maintenir le flux constant. Ceci nécessite que la tension et la fréquence évoluent simultanément et dans les mêmes proportions.

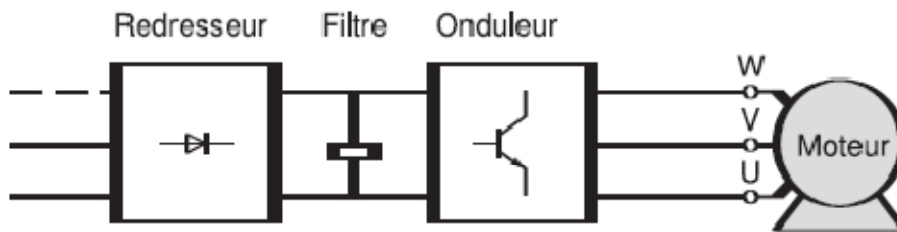


Figure II-12: Schéma de principe d'un convertisseur de fréquence. [5]

### **B/Constitution :**

Le circuit de puissance est constitué par un redresseur et un onduleur qui, à partir de la tension redressée, produit une tension d'amplitude et fréquence variables. Pour respecter la directive CE (Communauté Européenne) et les normes associées, un filtre « réseau » est placé en amont du pont redresseur.

#### **B-1/Le redresseur :**

Le redresseur est en général équipé d'un pont redresseur à diodes et d'un circuit de filtrage constitué d'un ou plusieurs condensateurs en fonction de la puissance. Un circuit de limitation contrôle l'intensité à la mise sous tension du variateur. Certains convertisseurs utilisent un pont à thyristors pour limiter le courant d'appel de ces condensateurs de filtrage qui sont chargés à une valeur sensiblement égale à la valeur crête de la sinusoïde réseau.

#### **B-2/L'onduleur :**

Le pont onduleur, connecté à ces condensateurs, utilise six semi-conducteurs de puissance (en général des IGBT) et des diodes de roue libre associées. Ce type de variateur est destiné à l'alimentation des moteurs asynchrones à cage et qui permet de créer un mini-réseau électrique à tension et fréquence variables capable d'alimenter un moteur unique ou plusieurs moteurs en parallèle.

### **C/Description du fonctionnement :**

La tension alternative monophasée ou triphasée du réseau est convertie en tension continue par l'intermédiaire du pont redresseur et des condensateurs de filtrage. Cette tension continue est alors découpée par un pont onduleur à transistors, pour donner une succession d'impulsions de largeur variable. L'ajustage de la largeur des impulsions et leur répétition permet d'ajuster l'alimentation du moteur en tension et en fréquence pour conserver un rapport  $U/f$  constant afin de maintenir le flux désiré dans le moteur. L'inductance du moteur réalise un lissage du courant. La commande de la modulation est réalisée par un microprocesseur est un ASIC (application specific integrated circuit) circuit

intégré pour application spécifique). La détermination de la modulation dépend des tensions et fréquences, donc des vitesses demandées en sortie.

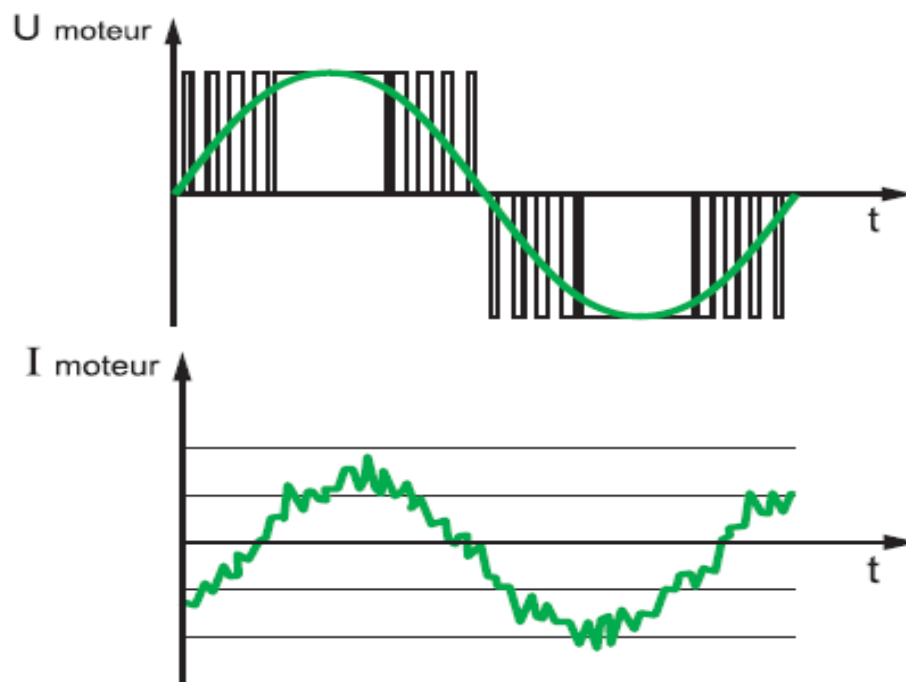


Figure II-13 : La modulation de largeur d'impulsions [5].

#### **D/ Avantages et inconvénients :**

##### **➤ Avantages :**

- Le couple fourni autorise l'entraînement de toutes les machines. .
- Le Convertisseur de fréquence autorise le fonctionnement du moteur dans les deux sens de marche et le freinage.
- Le Convertisseur de fréquence intègre la protection thermique du moteur et la protection contre les courts-circuits.

##### **➤ Inconvénients :**

- Prix d'achat élevé de l'équipement.
- L'échauffement des composants électroniques.
- La fréquence de sortie peut être supérieure à la fréquence d'alimentation

## II-5 Tableau récapitulatif des différents modes de démarrage des moteurs triphasés :

	Démarrage direct	Démarrage étoile triangle	Démarrage statoriques	Démarrage par auto transformateur	Démarrage rotorique	Démarrage électronique
Courant de démarrage	100%	33%	50%	40/65/80%	70%	150 à 750%
Surcharge en ligne	4 à 8 In	1.3 à 1.6 In	4.5 In	1.7 à 4 In	< 2.5 In	
Couple en % de Cd	100%	33%	50%	40/65/80%		10 à 50% (50 à 100% en 100ms)
Couple initiale au démarrage	0.6 à 1.5 Cn	0.2 à 0.5 Cn	0.6 à 0.85 Cn	0.4 à 0.85 Cn	0.4 à 0.85 Cn	< 2.5 Cn
commande	T.O.R	T.O.R	1 cran fixe	3 crans fixe	De 1 à 5 crans	électronique
avantages	-démarrage simple et économique -couple au démarrage important	économique -bon rapport couple/courant	-possibilités de réglages des valeurs au démarrage	-bon rapport couple/ courant -possibilités de réglages des valeurs au démarrage	-très bon rapport couple/courant -possibilité de réglage des valeurs au démarrage	-Démarrage sans à coup montée progressive en vitesse -limitation de l'appel de courant au démarrage
Inconvénients	-pointe de courant très importante. -démarrage brutal	-couple de démarrage faible. -coupure d'alimentation au changement de couplage.	-faible réduction de la pointe de courant au démarrage  -nécessite des résistances volumineuses	-nécessite une auto transformatrice onéreuse -présente des risques de réseau perturbé	-moteur à bague plus onéreux	-prix très cher

Tableau II-1 : Comparaisons entre les différents types de démarrages

**II-6 : Conclusion :**

Dans ce chapitre, j'ai cité les différents modes de démarrage d'un moteur asynchrone triphasé et ses caractéristiques et les différents schémas de circuit de commande et de puissance pour chaque mode. J'ai aussi donné un aperçu sur les avantages et les inconvénients des différents modes de démarrage.

Le choix d'un mode de démarrage nécessite une bonne communication entre le fournisseur d'énergie électrique, le constructeur du moteur et de la machine entraînée.

Les caractéristiques indispensables à ce choix sont :

- la puissance du réseau d'alimentation et l'appel de courant maximal autorisé.
- le couple et l'intensité du moteur à pleine tension en fonction de la vitesse de rotation.
- le couple résistant de la machine entraînée.
- le moment d'inertie des masses tournantes.

Si le rapport entre la puissance du réseau d'alimentation et la puissance du moteur est inférieur à 5, un soin particulier doit être apporté au choix du mode de démarrage comme à celui de la coordination de l'ensemble des protections.

### III.1.Introduction:

Dans un grand nombre d'applications, l'arrêt du moteur est obtenu simplement par décélération naturelle. Le temps de décélération dépend alors uniquement de l'inertie et du couple résistant de la machine entraînée. Mais il est souvent nécessaire de réduire ce temps. Le freinage électrique apporte dans ce cas une solution efficace et simple. Par rapport aux freinages mécanique et hydraulique, il offre l'avantage de la simplicité et de ne mettre en œuvre aucune pièce d'usure.

### III.2.Freinage par contre-courant[5] :

Le principe consiste, après avoir isolé le moteur du réseau alors qu'il tourne encore, à le reconnecter sur le réseau en sens inverse. C'est un mode de freinage très efficace avec un couple, en général supérieur au couple de démarrage, qui doit être arrêté suffisamment tôt pour éviter que le moteur ne reparte en sens inverse.

Divers dispositifs automatiques sont employés pour commander l'arrêt dès que la vitesse approche de zéro :

- détecteurs d'arrêt à friction, détecteurs d'arrêt centrifuges,
- dispositifs chronométriques,
- relais de mesure de la fréquence ou de la tension au rotor (rotor bobiné), etc.

#### A/ Moteur à cage :

Avant d'adopter ce système il faut absolument s'assurer que le moteur est capable de supporter des freinages en contre-courant avec le service envisagé. En effet, outre les contraintes mécaniques, ce procédé impose des contraintes thermiques importantes au rotor, l'énergie correspondant à chaque freinage (énergie de glissement prise au réseau et énergie cinétique) étant dissipée dans la cage. Les sollicitations thermiques, pendant le freinage sont trois fois plus importantes que pour une mise en vitesse.

Au moment du freinage, les pointes de courant et de couple sont nettement supérieures à celles produites lors du démarrage.

Afin d'obtenir un freinage sans brutalité, il est souvent inséré, lors du couplage en contre-courant, une résistance en série avec chaque phase du stator. Le couple et le courant sont alors réduits comme dans le cas du démarrage statorique.

Les inconvénients du freinage par contre-courant d'un moteur à cage sont tels que, ce procédé n'est utilisé que sur certaines applications avec des moteurs de faible puissance.

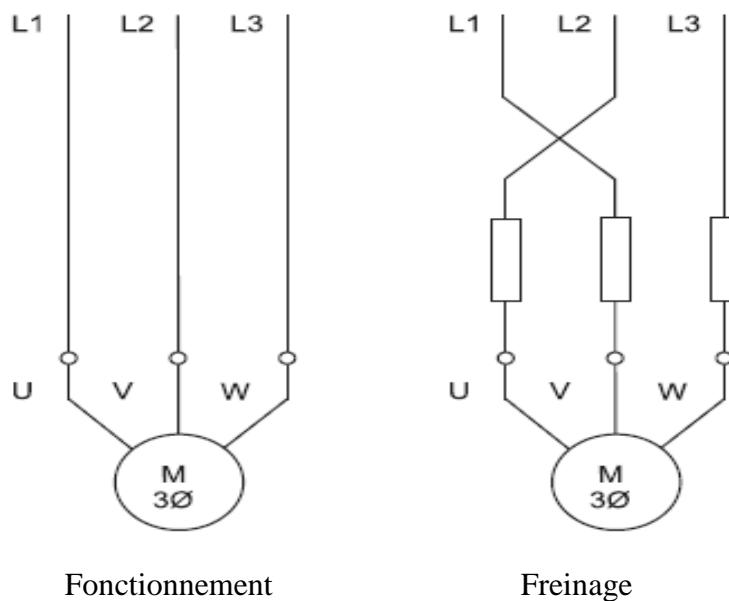


Figure III.1 : Principe du freinage à contre courant.

### **B/Moteur à rotor bobiné (Moteur à bagues) :**

Afin de limiter la pointe de courant et de couple, il est impératif, avant de coupler le stator du moteur en contre-courant, de réinsérer les résistances rotoriques ayant servi au démarrage, et souvent même d'ajouter une section supplémentaire dite de freinage.

Le couple de freinage peut être facilement réglé à la valeur désirée en choisissant une résistance rotorique convenable. Au moment de l'inversion, la tension rotorique est presque le double de la tension rotorique à l'arrêt, ce qui impose quelquefois des précautions particulières d'isolement.

Comme pour les moteurs à cage, une énergie importante est produite dans le circuit rotorique. Elle est dissipée en totalité (aux pertes près) dans les résistances.

La commande automatique de l'arrêt à la vitesse nulle peut être faite par l'un des dispositifs cités plus haut, ou bien par l'action d'un relais de tension ou de fréquence inséré dans le circuit rotorique.

Avec ce système, il est possible de retenir une charge entraînée à une vitesse modérée. La caractéristique est très instable (fortes variations de vitesse pour faibles variations de couple).

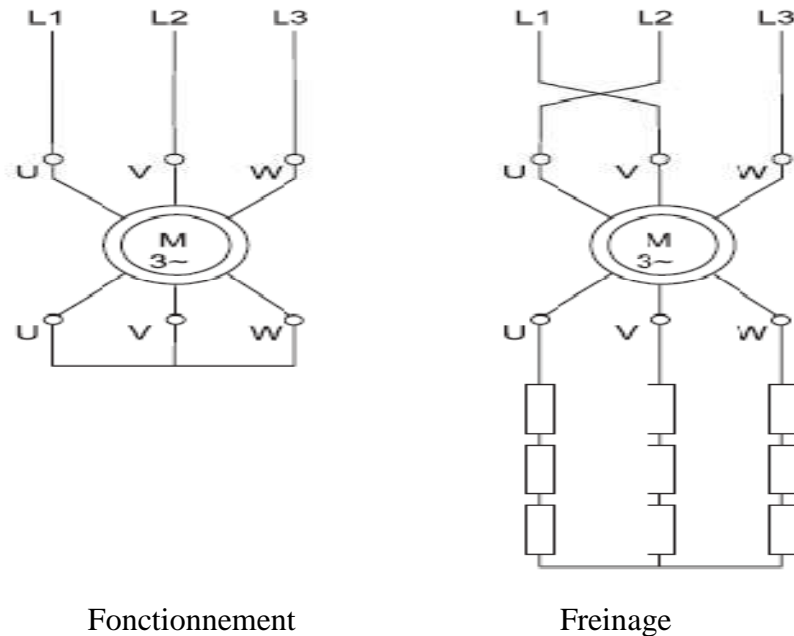


Figure III.2 : Principe du freinage à contre courant pour une machine asynchrone à bagues.

### III.3.Freinage par injection de courant redressé[5] :

Ce mode de freinage est utilisé sur les moteurs à bagues et à cage. Par rapport au système à contre-courant, le prix de la source de courant redressé est compensé par un moindre volume des résistances. Avec les variateurs et démarreurs électroniques, cette possibilité de freinage est offerte sans supplément de coût.

Le procédé consiste à envoyer du courant redressé dans le stator préalablement séparé du réseau. Ce courant redressé crée un flux fixe dans l'entrefer du moteur. Pour que la valeur de ce flux corresponde à un freinage convenable, le courant doit être environ 1.3 fois le courant nominal. L'excédent de pertes thermiques dû à cette légère surintensité est généralement compensé par le fait que le freinage est suivi d'un temps d'arrêt.

La valeur du courant étant fixée par la seule résistance des enroulements du stator, la tension de la source de courant redressé est faible. Cette source est généralement constituée de redresseurs ou fournie par les variateurs. Ceux-ci doivent pouvoir supporter les surtensions transitoires produites par les enroulements qui viennent d'être déconnectés du réseau alternatif (à 380 volts efficaces, par exemple).

Le mouvement du rotor représente un glissement par rapport à un champ fixe dans l'espace (alors que, dans le système à contre-courant, le champ tourne en sens inverse). Le moteur se comporte comme un générateur synchrone débitant dans le rotor. Les caractéristiques obtenues avec un système de freinage par injection de courant redressé présentent, par rapport à celles résultant d'un système à contre-courant, des différences importantes :

- l'énergie dissipée dans les résistances rotoriques ou dans la cage est moins importante. Il s'agit uniquement de l'équivalent de l'énergie mécanique communiquée par les masses en mouvement. La seule énergie prise au réseau est l'excitation du stator.
- si la charge n'est pas entraînante, le moteur ne redémarre pas en sens inverse.
- si la charge est entraînante, le système fournit un freinage permanent qui retient cette charge à faible vitesse. Il s'agit donc d'un freinage de ralentissement et non d'un freinage d'arrêt. La caractéristique est beaucoup plus stable qu'en contre-courant.

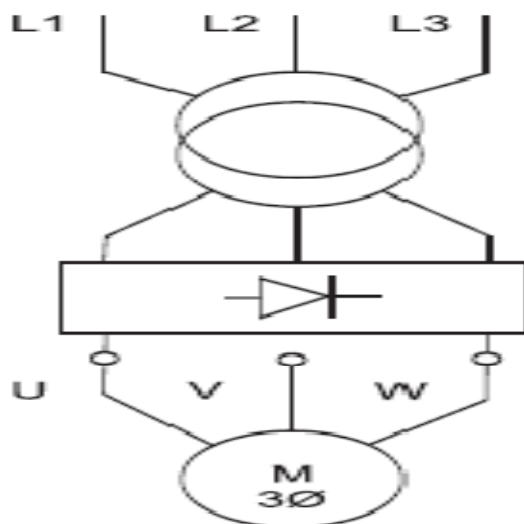


Figure III.3 : Principe du freinage à courant continu pour une machine asynchrone.

Dans le cas d'un moteur à bagues, les caractéristiques couple-vitesse sont en fonction du choix des résistances.

Dans le cas d'un moteur à cage, ce système permet de régler facilement le couple de freinage en agissant sur le courant continu d'excitation. Cependant, le couple de freinage sera faible quand le moteur tourne à vitesse élevée.

Afin d'éviter les échauffements inutiles, il faut prévoir un dispositif coupant le courant dans le stator une fois le freinage réalisé.

### III.4. Freinage électronique [5]:

Le freinage électronique s'obtient aisément avec un variateur de vitesse muni d'une résistance de freinage. Le moteur asynchrone se comporte alors comme une génératrice et l'énergie mécanique est dissipée dans la résistance de freinage sans augmentation des pertes dans le moteur.

### III.5. Freinage par fonctionnement en hyper-synchrone[5] :

C'est le cas où le moteur est entraîné par sa charge au-dessus de la vitesse de synchronisme. Il se comporte alors comme une génératrice asynchrone et développe un couple de freinage. Aux pertes près, l'énergie est récupérée par le réseau.

Sur un moteur de levage, la descente de la charge à la vitesse nominale correspond à ce type de fonctionnement. Le couple de freinage équilibre alors exactement le couple dû à la charge et amène non pas un ralentissement, mais une marche à vitesse constante.

S'il s'agit d'un moteur à bagues, il est essentiel de court-circuiter tout ou partie des résistances rotoriques, pour éviter que le moteur ne soit entraîné très au-delà de sa vitesse nominale, avec les risques mécaniques que cela comporterait.

Ce fonctionnement possède les qualités idéales d'un système de retenu de charge entraînant :

- la vitesse est stable, pratiquement indépendante du couple entraînant.
- l'énergie est récupérée et renvoyée au réseau.

Il ne correspond cependant qu'à une seule vitesse, c'est-à-dire approximativement à la vitesse nominale.

Le freinage hyper synchrone se rencontre également sur les moteurs à plusieurs vitesses lors du passage de la grande à la petite vitesse. Il est aisément réalisable avec un variateur de vitesse électronique, le seul fait de baisser la consigne de fréquence entraîne automatiquement ce type de fonctionnement.

### III.6. Autres systèmes de freinage :

On rencontre encore parfois le freinage en monophasé qui consiste à alimenter le moteur entre deux phases du réseau et à réunir la borne libre à l'une des deux autres reliées au réseau. Le couple de freinage est limité au 1/3 du couple maximum moteur. Ce système ne peut freiner la pleine charge et nécessite donc d'être complété par un freinage à contre-courant. Ce fonctionnement s'accompagne de déséquilibres et de pertes importantes.

On peut citer également le freinage par ralentisseur à courants de Foucault. C'est un principe analogue à celui utilisé sur les véhicules industriels en complément des freins mécaniques (ralentisseurs électriques). L'énergie mécanique est dissipée en chaleur dans le ralentisseur. Le réglage du freinage se fait facilement par un enroulement d'excitation. Mais L'augmentation importante de l'inertie est un inconvénient.

### III.7. Inversion du sens de marche :

L'inversion du sens de marche des moteurs asynchrones triphasés se fait simplement par l'inversion du champ tournant dans le moteur, ce qui se réalise en croisant deux enroulements.

Cette inversion se fait en général à l'arrêt. Dans le cas contraire, l'inversion des phases conduit à un freinage à contre courant.

L'inversion du sens de rotation des moteurs monophasés est également possible si l'on a accès à tous les enroulements.

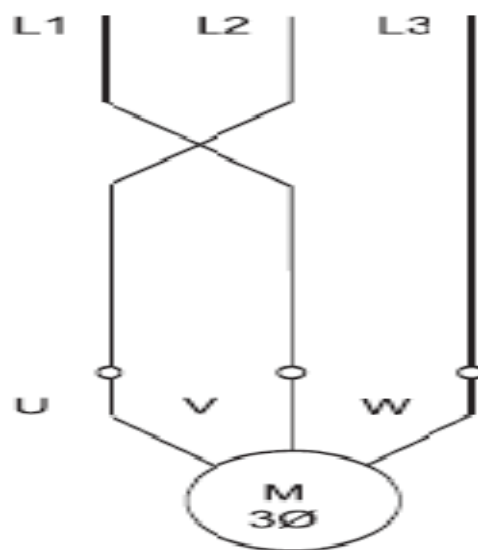


Figure III.4. Principe d'inversion du sens de marche d'un moteur asynchrone.



### IV.1.Introduction:

Les machines électriques tournantes peuvent, comme tous les appareils industriels, être affectées de défauts de fonctionnement. Ces défauts les rendent en général inaptes à plus ou moins long terme, à assurer leur service, et perturbent le fonctionnement d'autres matériels. Les défauts, ainsi que les conditions anormales de fonctionnement, doivent donc être détectés le plus rapidement possible et provoquer la déconnexion électrique entre la machine et le réseau auquel elle est raccordée.

- Électrique :

- surtension, chute de tension, déséquilibre et perte de phases qui provoquent des variations sur le courant absorbé.

- courts-circuits dont le courant peut atteindre des niveaux destructeurs pour le récepteur.

- Mécanique :

- calage du rotor, surcharge momentanée ou prolongée qui entraînent une augmentation du courant absorbé par le moteur, d'où un échauffement dangereux pour ses bobinages.

Au niveau d'une installation comportant des moteurs électriques, nous pouvons distinguer deux types de défauts : les défauts d'origine interne au moteur, et les défauts d'origine externe.

### IV.2.Les défauts :

**IV.2.1. Les court-circuit :** C'est la différence de potentiel électrique entre deux points (liaison entre phases, entre neutre et phase ou entre phase et masse conductrice). Qui se traduit par une augmentation brutale du courant à des valeurs supérieures au courant d'emplois (fonctionnement).

**IV 2-1-1-Les effets du court-circuit :** Le courant de court-circuit peut produire des dommages importants sur le moteur, en provoquant des effets électrodynamique et thermique.

**A/ Les effets électrodynamique :**

- Casse ou déformation des pièces ou des jeux de barres ;
- Répulsion des contacts ;
- Propagation des arcs électriques.

**B/ Les effets thermique :**

- Fusion des contacts, des enroulements, des bilames et des connexions.

**IV.2.2. L'échauffement [4] :** Selon les normes, chaque fabricant de moteurs garantit que le moteur n'est pas mis en danger si en fonctionnement nominal et pour des surcharges de courte durée, les pièces critiques de la machine restent dans la plage de température admise. Les dispositifs de protection des moteurs doivent d'une part permettre l'utilisation optimale et donc le fonctionnement économique du moteur, et d'autre part, réagir suffisamment vite en cas de surcharge

**IV 2-2-1-Cause de l'échauffement :** L'échauffement en résulte des Pertes qui sont dissipées en chaleur lors de la transformation de l'énergie électrique en énergie mécanique. La perte totale peut se subdiviser en deux Composantes :

- **Les pertes dépendant du courant :** elles sont pratiquement constantes, c'est-à-dire qu'elles existent également en fonctionnement à vide.

- Pertes dans le fer par démagnétisation et par courant parasite
- Pertes mécaniques par frottement et ventilation.

- **Les pertes dépendant du courant :** elles augmentent avec la charge, c'est-à-dire avec l'intensité du courant.

- Pertes par effet Joule dans le stator
- Perte par effet Joule dans le rotor

**IV -2-3-Les surcharges :** Pendant le fonctionnement du moteur, celui-ci absorbe rarement son courant nominal; si la puissance mécanique demandée est supérieure à la puissance mécanique donnée sur la plaque signalétique, le moteur passe en surcharge (le courant absorbé par le moteur est supérieur à l'intensité nominale) et commence à chauffer anormalement ; la surcharge est une surintensité de faible valeur mais de longue durée.

**IV -2-3-1 - Les effets de surcharge :** L'échauffement produit par les surcharges entraîne une évaporation d'une partie du matériau de l'isolation, ce qui provoque une augmentation de porosité et donc une diminution de la résistance à la tension et vieillissement de l'isolation. Ainsi la durée de vie est réduite.

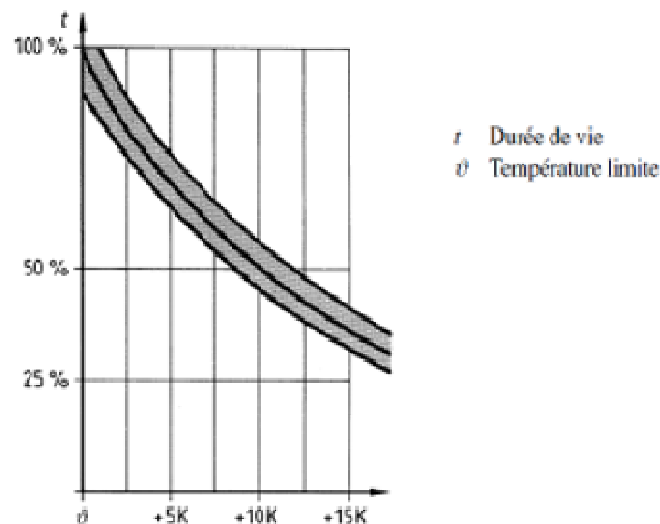


Figure IV.1. Diminution de la durée de vie moyenne des enroulements en cas de sur-température. [4]

**IV -2-4- Défaillance de phase:** Par défaillance de phase, on entend l'interruption d'un conducteur polaire. Le moteur tourne alors sur une phase et peut être endommagé. La cause peut être par exemple un appareil de protection de surcharge déclenché.

**IV -2-4-1-effet de défaillance de phases :** Dans les deux autres phases, alors couplées en série, le courant diminue d'environ 67%. Cette situation se présente car le moteur maintient sa puissance de sortie d'arbre pratiquement constante. L'augmentation absolue du courant dans les phases et dans les deux conducteurs extérieurs intacts, dépend de la charge momentanée.

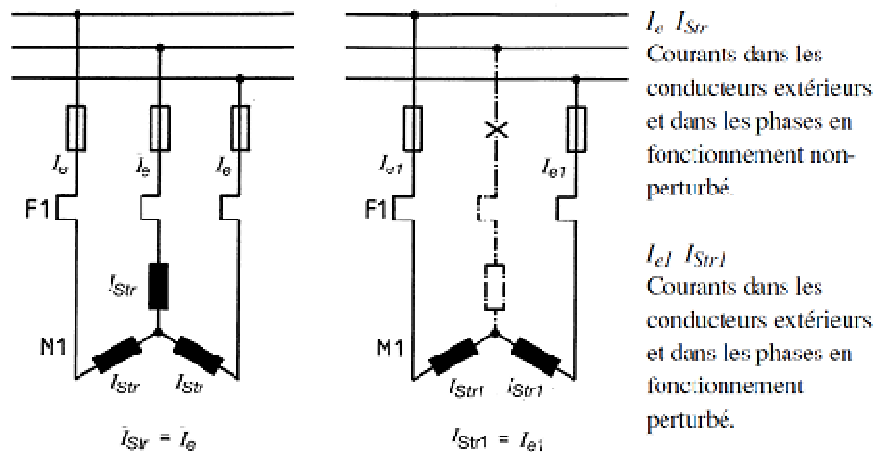


Figure IV.2. Défaillance de phase d'un moteur en couplage étoile. [4]

Le tableau suivant résume les causes de défaillances les plus fréquentes, leurs effets et leurs dommages que peuvent provoquer :

Causes	Effets	Dommages possibles
<b>Surcharge thermique:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Conditions de démarrage extrêmes</li> <li>• Rotor bloqué</li> <li>• Surcharge de longue durée</li> <li>• Sous-tension</li> </ul> Fonctionnement intermittent inadmissible	Surintensité et donc échauffement inadmissible des enroulements	Cage de rotor dessoudée Enroulements stator brûlés
<b>Problèmes de refroidissement:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Refroidissement perturbé</li> <li>• Temp. ambiante trop élevée</li> </ul>	Echauffement inadmissible	Enroulements stator brûlés
<b>Causes électriques:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Fonctionnement sur une phase</li> <li>• Asymétrie tension</li> <li>• Défaut de terre</li> <li>• Court-circuit entre spires</li> <li>• Court-circuit entre Enroulements</li> </ul>	Surintensité asymétrique Echauffement inadmissible selon dimension moteur et charge	Enroulements ou partie d'enroulement brûlé Dommages aux paliers
<b>Causes mécaniques:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mauvais équilibrage.</li> <li>• Mauvais alignement d'irrégulière des paliers l'entraînement.</li> <li>• Entraînement mal monté (par exemple charge sur paliers trop importante à cause d'une courroie)</li> </ul>	Détérioration irrégulière des paliers	Dommages aux paliers

Tableau. IV.1. Causes des défaillances, effets et dommages possibles pour les moteurs. [4]

**IV.3. Protection des moteurs [8] :**

Pour effectuer les différentes fonctions de protection il est nécessaire de disposer d'un maximum d'informations sur les caractéristiques du moteur.

Celles-ci peuvent être connues auprès du Constructeur de moteurs ou à défaut par la lecture des plaques signalétiques. Les renseignements, dans ce dernier cas sont obligatoirement fragmentaires.

**➤ A/ Les données Constructeur :**

- \* Puissance nominale du moteur.
- \* Tension d'utilisation.
- \* Type de Service.
- \* Classe de l'isolant.
- \* Surcharge permanente admissible.
- \* Courant nominal.
- \* Cos  $\varphi$  nominal.
- \* Rendement  $\eta$  nominal.
- \* Courant de démarrage.
- \* Temps de démarrage.
- \* Temps où le rotor peut rester bloqué.
- \* Nombre de démarrages autorisés à froid.
- \* Dans un temps de référence à froid.
- \* Temps d'attente entre deux démarrages consécutifs à froid.
- \* Nombre de démarrages autorisés à chaud.
- \* Dans un temps de référence à chaud.
- \* Temps d'attente entre deux démarrages consécutifs à chaud.
- \* Constante de temps thermique à l'échauffement.
- \* Constante de temps thermique au refroidissement.
- \* Courant inverse permanent admissible.
- \* Courant inverse temporaire admissible pendant un temps de référence.
- \* Cas des pompes : courant et cosinus  $\varphi$  à vide, courant minimal d'utilisation.
- \* Pour les calculs d'apport de courant de défaut.

**➤ B/ Les données Fournisseur d'énergie sur l'alimentation :**

- \* Puissance de court-circuit maximum entre phases du réseau.
- \* Puissance de court-circuit minimum entre phases du réseau.
- \* Puissance de court-circuit maximum phase-terre du réseau.
- \* Puissance de court-circuit minimum phase-terre du réseau.
- \* Taux de déséquilibre (en tension) maximum garanti.

**➤ C/ Les données des plaques signalétiques :****Plaque signalétique du moteur:**

- \* Tension nominale d'utilisation.

\* Soit la puissance active «électrique» exprimée en watt avec indication du  $\cos\phi$ , du rendement  $\eta$  et éventuellement du courant de démarrage.

\* Soit la puissance «mécanique» exprimée en CV avec indication du  $\cos\phi$ , du rendement  $\eta$  et éventuellement du courant de démarrage.

**Plaque signalétique des transformateurs de courant:**

**Rapport de transformation :  $I_{np} / I_{ns}$  :**

**Exemple 1:**

60 / 5 A ce qui signifie que :

le courant nominal primaire( $I_{np}$ ) du transformateur de courant est de 60 A,

le courant nominal secondaire( $I_{ns}$ ) du transformateur de courant est de 5 A.

**Puissance et Classe de Précision :**

**Exemple 2:**

15 VA classe 5 P 20 ce qui signifie que : l'erreur composée (angle + rapport) de précision sera de 5% à 20 fois le courant nominal (soit  $5 \cdot 20 = 100$  A) sur une charge de 15 VA (soit une résistance équivalente de  $15/5^2 = 0.6 \Omega$ ).

Les moteurs électriques de puissances inférieures à 15 kW sont protégés d'une manière générale contre les surcharges et les court-circuits entre phases par l'intermédiaire des dispositifs suivants :

- \* Dispositifs intégrés comprenant Contacteur, disjoncteur et protections.
- \* Disjoncteur magnéto-thermique type « Moteur » + Contacteur.
- \* Sectionneur - fusible + Contacteur + Relais thermique.
- \* Disjoncteur + Contacteur + Relais thermique.

Les fusibles utilisés ont été spécialement mis au point pour être associés au moteur exemple :

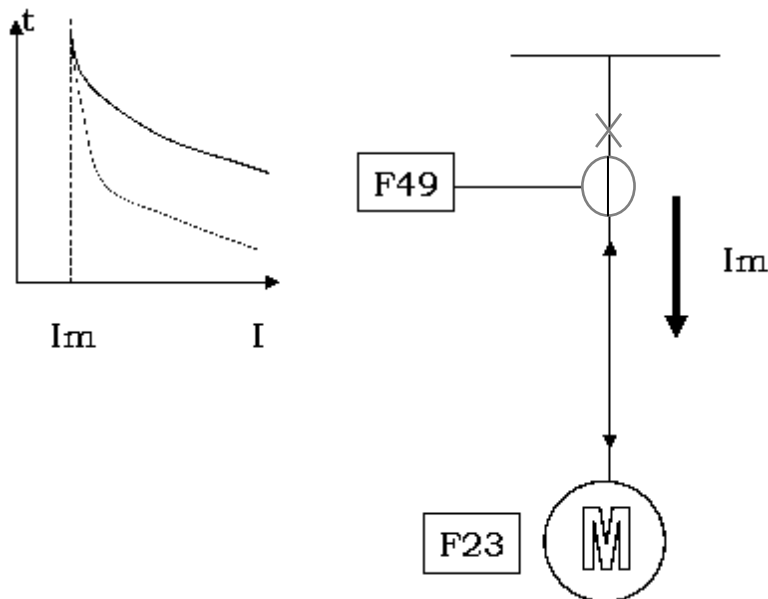
- Intensité pouvant être supportée sans fondre pendant 1 heure :  $4 I_n$
- Temps de fusion sous  $7 I_n$  : 5 s.

Les disjoncteurs ont un pouvoir de coupure qui leur permettent de couper le courant de court-circuit, leur temps de coupure (fonctionnement de la protection + ouverture des contacts + extinction de l'arc) sont très faibles (en général inférieurs à 30 ms).

Les contacteurs ont un pouvoir de coupure limité qui ne leur permettent pas de couper le courant de court-circuit.

Les moteurs électriques de puissances supérieures à 15 kW sont protégés d'une manière plus complète.

### IV.3.1. Protection contre les surcharges thermiques :



Deux principes sont utilisables pour protéger le moteur :

#### IV.3.1.1 Protection par mesure directe de température (F23) :

Le moteur est équipé de sondes à résistance (Pt, Cu, Ni) ou de varistances dont la résistance est une fonction de la température (ex : sondes Pt  $R=100 \Omega$  à  $0^\circ\text{C}$  suivant DIN 43760) logées dans les encoches du stator.

La mesure de température est faite au travers d'une mesure de résistance.

➤ **Avantage:**

Possibilité d'afficher la température réelle.

➤ **Inconvénients:**

Obligation de prévoir les moteurs avec ces sondes, qui sont généralement fragiles et qu'il faudra alimenter.

Une liaison défectueuse entre la sonde et l'élément détecteur entraînera un déclenchement intempestif.

Il existe un gradient de température entre la sonde et le cuivre provoqué par l'isolant, une forte surcharge sera mal répercutée.

#### IV.3.1.2. Protection par image thermique (F49) :

Le moteur est assimilé à un système thermique à une seule constante et un simulateur, alimenté par l'image du courant traversant ce moteur, reproduit l'état thermique du moteur.

Il va être traité dans ce chapitre une notion propre à la protection qui est l'état froid et l'état

chaud.

En effet le moteur intègre thermiquement les différents états qui lui sont imposés. Les fabricants de protection ont l'habitude de se référer à ces deux états caractéristiques. A partir de l'état froid, le moteur est soumis à une surintensité de  $n \cdot I_n$  et le temps  $t_f$  que mettra le moteur pour atteindre sa température limite de fonctionnement, en sachant que la température limite de fonctionnement est défini normalement pour  $S \cdot I_n$  (il est prévu, en général une surcharge permanente admissible de 15%).

La température limite correspondant à cette surcharge est  $k_s^2 I_n^2$ , le moteur étant mis en surcharge, à partir de l'état froid, avec une intensité de  $n \cdot I_n$ , la détection de dépassement sera atteinte lorsque :

$$K_s^2 \cdot I_n^2 = k_n^2 \cdot I_n^2 \cdot (1 - e^{-t/T_e})$$

$$n^2 (1 - e^{-t/T_e}) = s^2$$

$$(e^{-t/T_e}) = \frac{n^2 - s^2}{n^2}$$

$$e^{t/T_e} = \frac{n^2 - s^2}{n^2}$$

$$\frac{t}{T_e} = \text{Logn} \frac{n^2 - s^2}{n^2}$$

$$t = T_e \cdot \text{Logn} \frac{n^2 - s^2}{n^2}$$

D'où l'expression :

$$t_f = T_e \cdot \text{Logn} \left( \frac{n^2 - s^2}{n^2} \right)$$

*Nota:* Si la température limite de fonctionnement est définie pour  $I_n$  (pas de surcharge autorisée) l'équation devient :

$$t_f = T_e \cdot \text{Logn} \frac{n^2}{n^2 - 1}$$

C'est l'équation de la courbe «à froid» de la protection.

➤ **Exemple:**

$T_e = 15$  mn et une limite de fonctionnement de  $I_n$  le seuil de détection sera obtenu au bout d'un temps de :

$$258.9 \text{ s pour } n = 2 I_n$$

$$36.7 \text{ s pour } n = 5 I_n$$

$$9 \text{ s pour } n = 10 I_n$$

Si après une surcharge de durée infinie à  $n\% \cdot I_n$  (ce qui signifie que le moteur était alimenté en permanence à 50% de  $I_n$  si  $n\% \cdot I_n = 0.5$ ) ; l'équilibre thermique est obtenu à  $k_n\%^2 I_n^2$ , le

temps  $t_c$  que mettra le moteur pour atteindre sa température limite de fonctionnement après une surcharge de  $n \cdot I_n$  sera de :

La détection de dépassement sera atteinte pour :

$$((kn\%^2 * In^2) + (kn^2 * In^2)) * (1 - e^{-t/Te}) = ks^2 * In^2$$

$$(n\% + n^2) * (1 - e^{-t/Te}) = S^2$$

$$e^{-t/Te} = \frac{n\%^2 - n^2 - S^2}{n^2}$$

$$e^{t/Te} = \frac{n^2}{n\%^2 - n^2 - S^2}$$

D'où l'expression:

$$t_c = Te * \text{Logn}\left(\frac{n^2}{n^2 - S^2 + n\%^2}\right)$$

C'est l'équation de la courbe «à chaud» de la protection.

#### IV.3.1.3. Conclusion:

Le simulateur n'a besoin, pour définir les temps de surcharge admissible pour atteindre la température limite de fonctionnement du moteur que de connaître :

- \* La constante de temps thermique à l'échauffement du moteur  $T_e$ .
- \* La constante de temps thermique au refroidissement du moteur  $T_r$  (de manière à simuler, de la même manière, la déperdition de chaleur lorsque le moteur s'arrête, le réglage s'effectuant généralement sous la forme  $T_r/T_e$ ).

- \* La surcharge permanente admissible.

\* Du courant qui traverse le moteur, celui-ci peut être soit le courant secondaire (composante directe + composante inverse) soit un courant «équivalent» contenant la composante directe + la composante inverse survalorisée de manière à tenir compte du caractère particulier de la composante inverse sur la surcharge thermique.

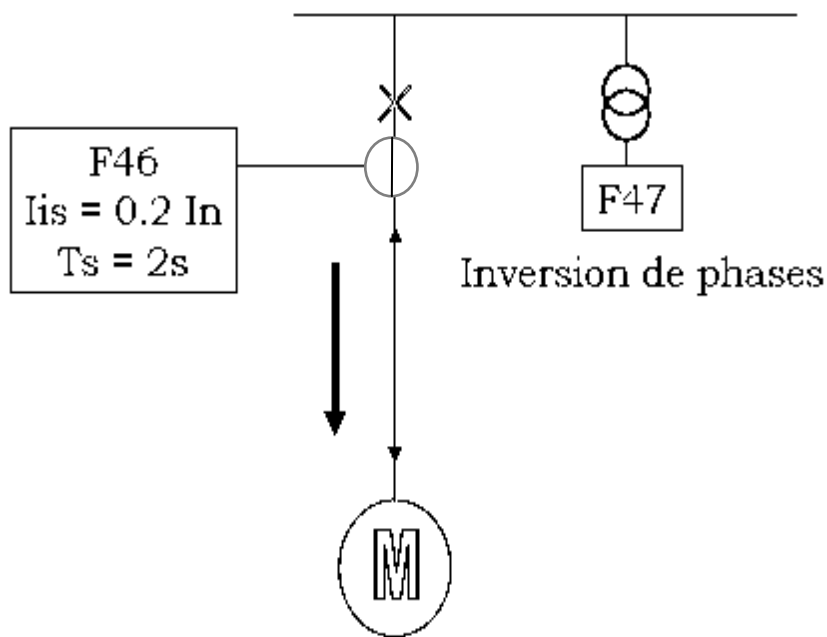
#### ➤ **Avantage:**

Solution simple et fiable.

#### ➤ **Inconvénients:**

Difficultés d'obtenir, auprès du Constructeur de moteurs, des renseignements précis. Ne tient ni compte des «points chauds», ni de la température réelle ambiante (surpuissance disponible quand la température ambiante est basse).

### IV.3.2. Protection contre les déséquilibres de courant (F46) les coupures de phase / inversion de phases (F47) :



En plus d'intégrer la composante inverse dans la fonction image thermique, qui est obligatoirement une protection à détection lente, il est souhaitable, pour éviter un échauffement anormal du rotor, de protéger le moteur pour une anomalie d'alimentation ou pour une présence anormale de courant inverse.

Une phase manquante au démarrage du moteur provoquera un courant inverse de 346 % (avec  $I_{dém} = 6 I_n$ ), qui sera détectée par  $I_i >>$ .

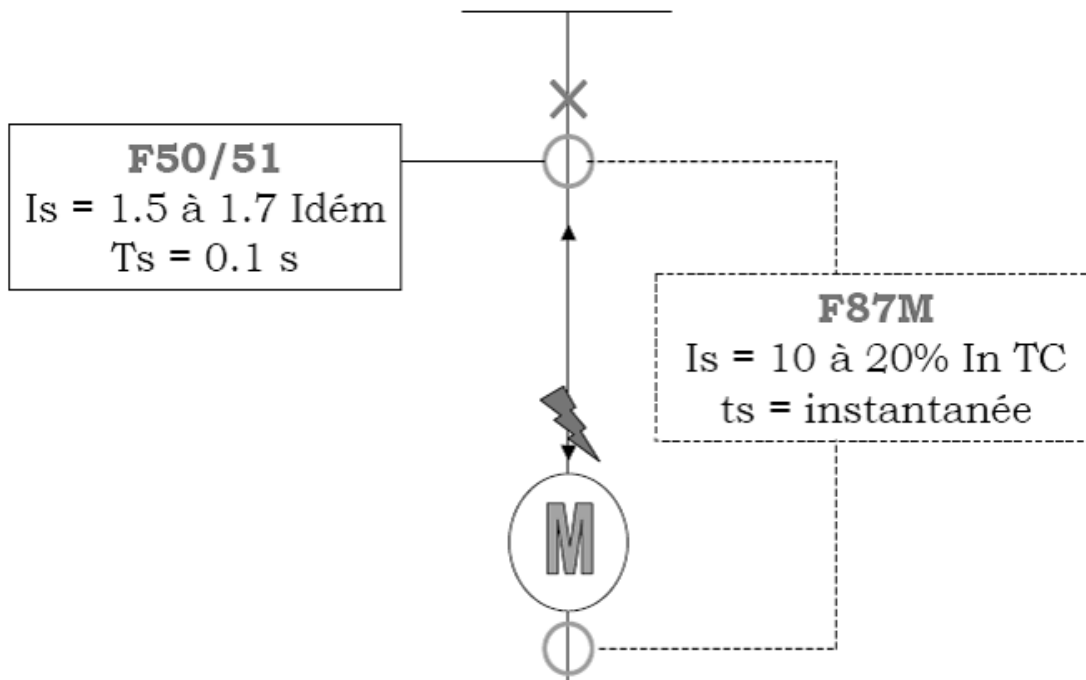
Le seuil  $I_i >$  et la temporisation  $t_{I_i >}$  seront réglés en fonction de la caractéristique  $t = f(I_i)^2$  du moteur fourni par le constructeur.

Le seuil  $I_i >$  sera réglé à  $0.2 I_n$  environ.

Une temporisation minimum  $t_{I_i >}$  de 2 s sera prévue pour laisser le temps aux défauts extérieurs d'être éliminés (valeur de temporisation pouvant être augmentée suivant les possibilités du moteur).

### IV.3.3. Protection contre un court-circuit entre phases (F50/51) :

En **MT**, la détection d'un court circuit entre phase se fera par une fonction ampèremétrique temporisée.



Le seuil en courant  $I_{cc}$  sera situé au-dessus du courant de démarrage (ou plus exactement du courant statorique à rotor bloqué), et tiendra compte de la présence éventuelle d'une composante inverse :

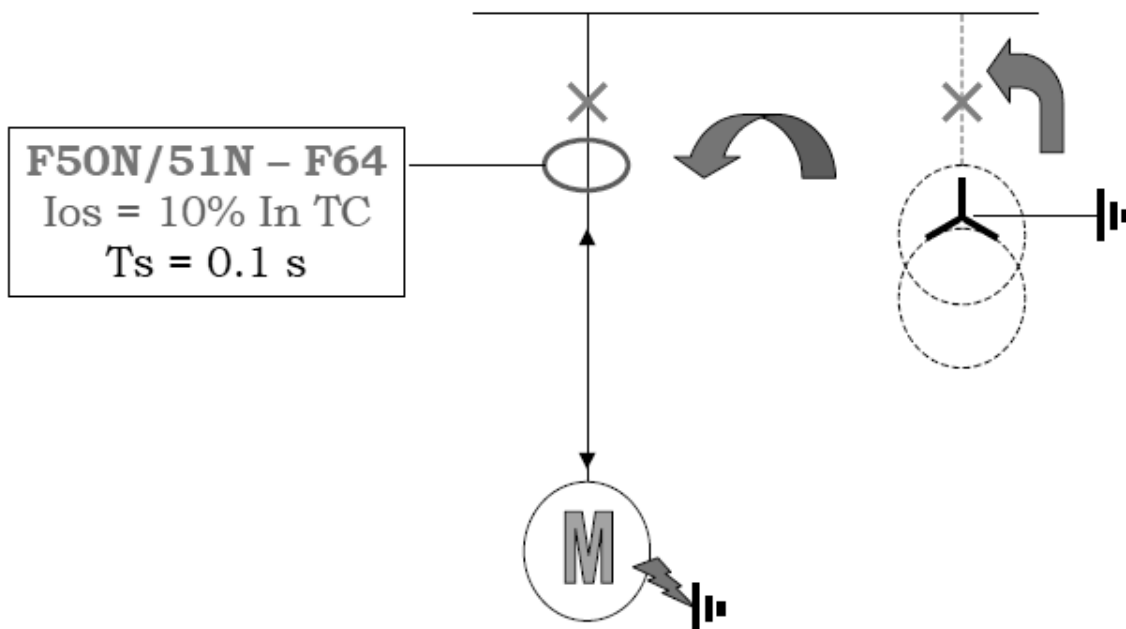
$1.5 I_{dém} < I_{cc} < 1.7 I_{dém}$  dans le cas des moteurs à démarrage direct ; et  $5 I_n < I_{cc} < 9 I_n$  dans le cas des moteurs à démarrage indirect.

La temporisation  $t_{I_{cc}}$  (fonctionnement quasi-instantané) sera au minimum de 60 ms pour les moteurs asynchrones et de 100 ms pour les moteurs synchrones, une valeur de temporisation de 100 ms est conseillée pour les moteurs asynchrones et 150 ms pour les moteurs synchrones

En **BT**, la détection se fera par un disjoncteur magnéto-thermique (notamment lorsque  $S_n < 15 \text{ kW}$ ) ou par des fusibles HPC type « moteurs » (associés à des interrupteurs ou contacteurs).

### IV.3.4. Protection contre des défauts phase-terre (F50N/51N, F64, F67N) :

#### IV.3.4.1: Neutre direct à la terre :



La détection se fera par une fonction ampèremétrique temporisée, alimentée soit par les transformateurs de courant phases en montage résiduel :  $I_r = 3I_o = I_1 + I_2 + I_3$ .

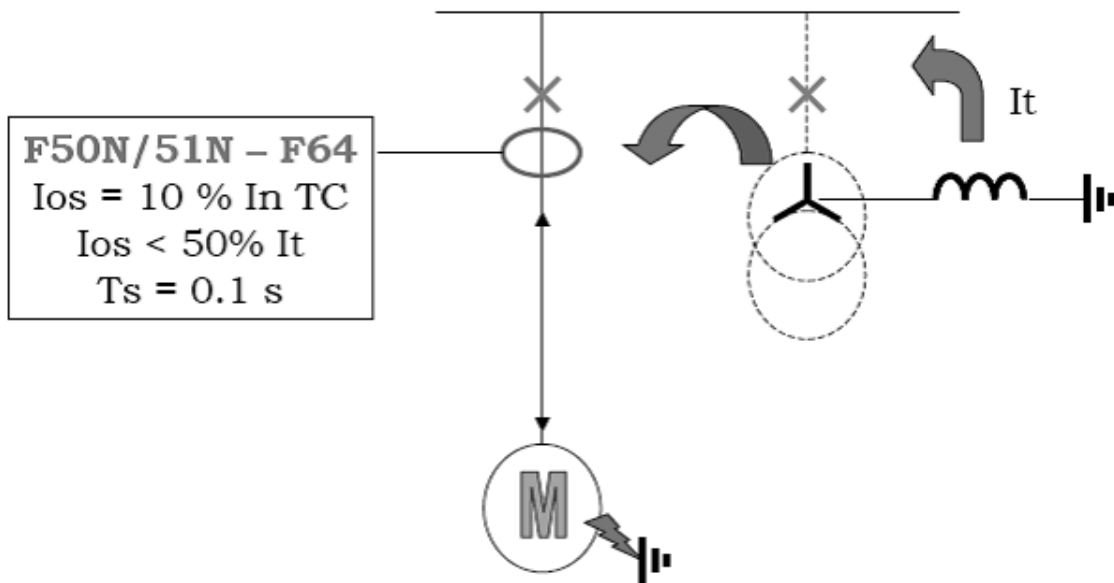
Soit par un tore «homopolaire» englobant tous les conducteurs (y compris le neutre).

Compte tenu de l'erreur des transformateurs de courant, le seuil  $I_o >$  sera volontairement limité de 10 à 20% de  $I_n$  dans le cas du montage résiduel et à 5% de  $I_n$  dans le cas du tore homopolaire (2 à 3% avec certaines précautions comme manchon métallique de flux, taille du Tore etc.).

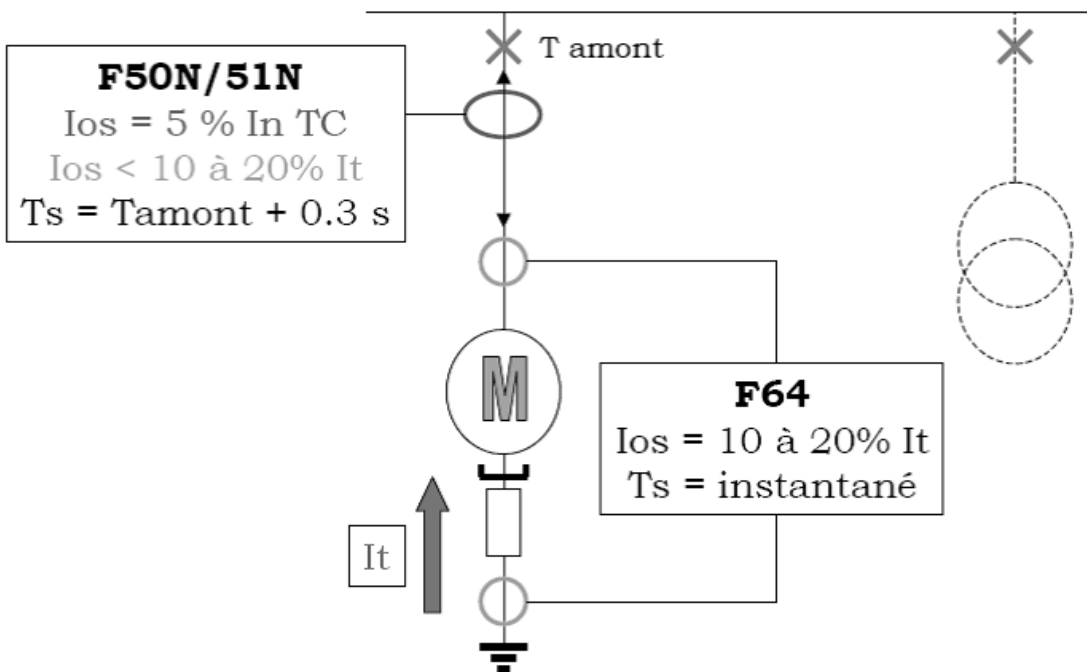
La temporisation  $t_{I_o >}$  (fonctionnement quasi-instantané) sera de 100 ms pour éviter un intempestif sur courant pseudo-différentiel à l'enclenchement.

**IV.3.4.2: Neutre à la terre par une impédance :**

Deux types de câblage sont possibles :



Ou:

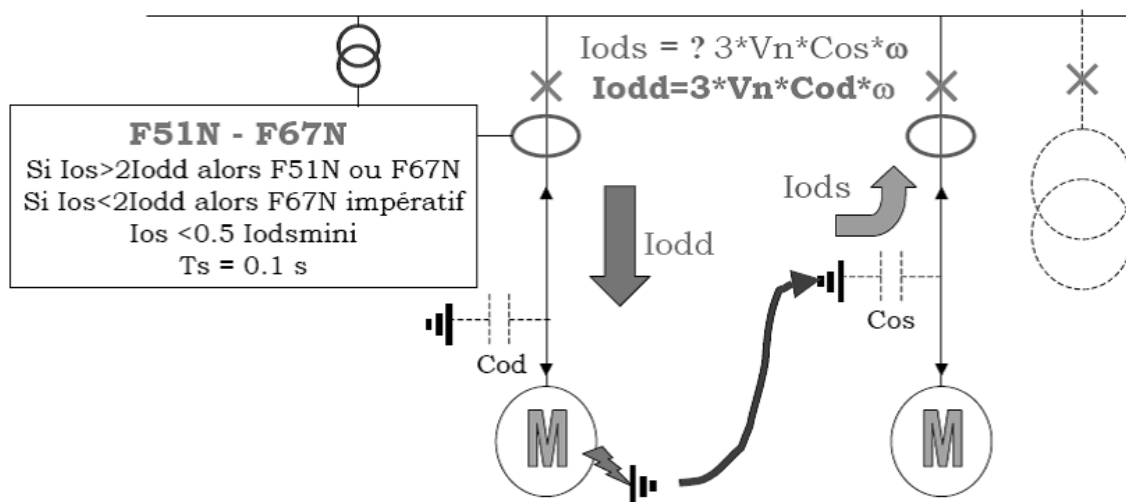


La détection se fera avec les mêmes principes que dans le cas du Neutre direct à la terre ; une attention particulière sera portée sur le choix de l'alimentation en courant (transformateurs de courant phases en montage résiduel ou tore homopolaire) le seuil  $I_{o>}$  devra être au maximum de 50% du courant de limitation à la terre par l'impédance.

Si la mise à la terre a lieu au niveau du moteur, le relais de terre devra comporter un filtre d'harmonique 3, le courant d'harmonique 3 produits par la machine (qui est de l'ordre de 1 à 3% de  $I_n$ ) circulera dans la connexion de mise à la terre même en absence de défaut, s'il peut se refermer par un autre chemin comme les capacités par exemple.

La temporisation  $t_{I_{o>}}$  (fonctionnement quasi-instantané) sera de 100 ms pour éviter un intempestif sur courant pseudo-différentiel à l'enclenchement.

#### IV.3.4.3: Neutre isolé :



Le seul courant pouvant faire fonctionner une fonction ampèremétrique est le courant capacitif du réseau. Une étude plus complète est nécessaire pour savoir si les courants capacitifs sont suffisants, s'il n'y a pas de risques d'élévation de potentiel des masses, si la sécurité impose la seule signalisation et non le déclenchement etc.

Lorsque l'on dispose de 3 transformateurs de tension dont le primaire est couplé en étoile et P2 mis à la terre, le secondaire étant couplé en triangle «ouvert» il est possible de raccorder une mesure de tension résiduelle  $V_r$  :  $V_r = 3V_o = V_1 + V_2 + V_3$ .

celle-ci indiquera la présence d'un défaut à la terre mais sans permettre une quelconque sélectivité.

#### Nota:

A) Le réglage de détection de défaut terre  $I_{o>}$  devra répondre à l'inégalité suivante :

$$2 \cdot I_{\text{défaut}} < (I_{o>}) < I_t / 2$$

Où:

$I_t$  = courant de défaut maximum à la terre.

$I_{\text{défautdépart}} = \text{courant de défaut produit par les capacités du départ sain protégé, pour un défaut extérieur.}$

$$I_{\text{défautdépart}} = 3 * V_n * C_o * \omega$$

Où :

$V_n$  = tension nominale phase-terre (tension simple).

$C_o$  = capacité (de service) par phase du câble.

$\omega$  = pulsation du courant = 314 à 50 Hz.

L'inégalité peut donc s'écrire :

$$6 * V_n * C_o * \omega < (I_o) < I_t/2.$$

**B/** Dans le cas d'un réseau capacitif important (alimentation par câbles) et de plusieurs moteurs alimentés en parallèle sur le même réseau, il sera nécessaire d'utiliser un relais directionnel (F67N), le courant résiduel étant «polarisé» par la tension homopolaire. Cette solution nécessite l'emploi de 3 Transformateurs Tension (en Y).

**C/** Dans le cas de l'utilisation d'un tore homopolaire, pour la détection d'un défaut à la terre, la définition du nombre de tours  $n$  de ce tore se fait de la manière suivante :

si  $I_o$  est le réglage souhaité (directionnel ou non), répondant à l'inégalité ci-dessus :

$$(I_o) = 0.05 * I_n < I_t/2.$$

La valeur à afficher  $i_o$  sur le relais sera :

$$(I_o) = \frac{0.05 * I_n}{n} \quad \text{Ou} \quad n = \frac{0.05 * I_n}{(I_o)}$$

Où :

$I_n$  = courant nominal des TC.

$n$  = nombre de tours du tore homopolaire.

**D/** Dans le cas où le stator du moteur serait mis à la terre par une impédance, de manière à servir de Générateur de terre pour l'ensemble du réseau, la protection de terre devrait être réalisée d'une manière différente :

$I_o$  sera réglé comme dans les chapitres précédents (la mesure ne sera réalisée que sur la seule fréquence fondamentale, l'harmonique 3 étant filtrée).

$t_{I_o}$  sera réglé comme la protection immédiatement en aval majorée de 0.3 s.

La détection des défauts internes au moteur  $I_{do}$  se fera par une protection différentielle homopolaire qui compare la somme des courants de phases du moteur ( $I_1 + I_2 + I_3$ ) au courant circulant dans le neutre  $I_r$ . Toute somme non nulle est significative d'un défaut extérieur.

Cette protection différentielle dite à haute impédance comprendra, dans sa branche différentielle, une résistance de stabilisation permettant de s'affranchir des risques de déclenchement intempestif provoqués par la saturation d'un TC.

Le réglage de  $I_{do}$  sera de 10 à 20% de  $I_n$ , cette protection sera instantanée.

### **IV.4.Conclusion :**

La protection des moteurs est une fonction essentielle pour la continuité du fonctionnement des machines. Le choix du dispositif de protection doit être fait avec rigueur. L'utilisateur aura tout intérêt à sélectionner les dispositifs intégrant une électronique de communication pour anticiper et prévenir les éventuels défauts. La recherche d'anomalies et la rapidité de remise en route seront ainsi grandement améliorées.



## Conclusion générale

Une conception économique de la protection d'un moteur nécessite que le dispositif de protection soit adapté aux exigences du moteur et de l'installation qu'il entraîne.

Il n'est pas judicieux de protéger une installation non-critique au moyen d'appareils très performants de haute qualité. Par contre, les dommages peuvent être importants si une partie importante d'une installation de production avec des conditions de démarrage et de fonctionnement exigeantes n'est pas surveillée et protégée.

Pour faciliter la sélection du bon appareil de protection, ou de la bonne combinaison de différents appareils de protection. Les critères importants de sélection sont:

- L'application
- Le type d'entraînement et la grosseur du moteur
- Les conditions ambiantes
- Les exigences de gestion du moteur.

# Bibliographie

- [1] Théodore Wild et Gilbert SYBILLE, (électrotechnique) 3<sup>ème</sup> et 4<sup>ème</sup> édition.
- [2] M.KOSTENKO et L.PIOTROVSKI. Machine électriques, Tome II, Troisième Edition , Editions Mir Moscou
- [3] Technique de l'ingénieur (moteur asynchrones triphasé).
- [4] Notions fondamentales sur la protection des moteurs, (Rockwell automation).
- [5] Démarrage et protection des moteurs asynchrones triphasés, Schneider Electric.
- [6] Technologie du matériel industriel, catalogue interne Schneider.
- [7] Notions fondamentales sur le démarrage des moteurs, (Rockwell automation).
- [8] Cahier Technique N°9 Protection des moteurs électriques, Microener
- [9] Conception optimale technico-économique d'un moteur asynchrone triphasé a double cage ; Mémoire d'ingénieur. Université de Tizi-Ouzou 2008-2009.
- [10] Conception d'un moteur asynchrone à cage d'écureuil alimenté par un convertisseur de fréquence, Mémoire d'ingénieur. Université de Tizi-Ouzou 2007-2008.
- [11] Optimisation d'une série de moteurs asynchrones triphasés a cage d'écureuil, Mémoire d'ingénieur. Université de Tizi-Ouzou 2007-2008.
- [12] Etudes et simulation de la machine asynchrone et à double alimentation, Mémoire d'ingénieur. Université de Tizi-Ouzou 2008-2009.
- [13] Calcul d'un moteur asynchrone a rendement élevé, Mémoire d'ingénieur. Université de Tizi-Ouzou 2008-2009.
- [14] Influence de la forme d'encoche sur le démarrage d'un moteur asynchrone, Mémoire d'ingénieur. Université de Tizi-Ouzou 2008-2009.

## **Résumé :**

Mon travail, après une présentation du moteur asynchrone et de son principe de fonctionnement, détaille plus particulièrement la technique et les particularités d'emploi des de cette machine, notamment les principaux dispositifs de démarrage, le réglage de vitesse et le freinage qui leur sont associés, les différents types de défauts, ainsi que la protection adéquate qu'il faut pour chacune de ces contraintes. Finalement je termine par une conclusion générale.

## **Mots clefs :**

Moteur

Asynchrones

Démarrages

Freinage

Protection

Convertisseur de fréquence