

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR - ANNABA
BADJI MOKHTAR – ANNABA UNIVERSITY



جامعة باجي مختار – عنابة

Faculté : Sciences de l'ingénierat
Département : Electrotechnique
Domaine : Sciences et Technologie
Filière : Electrotechnique

MEMOIRE
PRESENTE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME
DE LICENCE

Thème :

**Étude et simulation d'un moteur
asynchrone trèsphasé**

Présenté par :

- BOUZIANE ADEL.
- ALIOUAT HACENE.

Encadrant Par : GHOUELBOUREK SIHEM
Maître de conférences (A) - BADJI Mokhtar - Annaba

Jury de Soutenance :

Mihoub M.larbi	Maître de conférences (A)	BADJI Mokhtar - Annaba	Examineur
----------------	---------------------------	------------------------	-----------

Année Universitaire : 2020/2021

REMERCIEMENTS

Avant tout, nous remercions DIEU le tout puissant de nous avoir donné le courage, la volonté, la patience et la santé durant toutes ces années d'études et que grâce à lui ce travail a pu être réalisé.

Nous tenons à adresser nos vifs remerciements à notre promotrice Mme S. Ghoudelbourek qui nous a soutenus tout au long de ce travail. Sa compétence et sa disponibilité ont été pour nous un soutien certain pour la réalisation de ce travail.

Nous remercions également les membres de jury d'avoir accepté d'évaluer notre travail. Notre remerciement aussi à tous les enseignants qui nous ont enseigné durant les années du cursus. Nous souhaitons également adresser nos remerciements à nos parents, à nos frères et sœurs, à nos amis et à tous ceux qui ont contribué à la réalisation de notre travail.

Dédicaces

Avec l'expression de ma reconnaissance, je dédie ce modeste travail à ceux qui, quels que soient les termes embrassés, je n'arriverais jamais à leur exprimer mon amour sincère.

*A l'homme, mon précieux offre du dieu, qui doit ma vie, ma réussite et tout mon respect : mon cher père **MOSTAPHA**.*

*A la femme qui a souffert sans me laisser souffrir, qui n'a jamais dit non à mes exigences et qui n'a épargné aucun effort pour me rendre heureuse : mon adorable mère **HADDA**.*

*A ma petite famille **MON EPOUS** qui n'ont pas cessé de me conseiller, encourager et soutenir tout au long de mes études. Que Dieu les protège et leurs offre la chance et le bonheur.*

*A mes adorable petites enfants **MOHAMED ISLAM-ABD ELOUADOUD ET ABD ELMOUMEN** qui sait toujours comment procurer la joie et le bonheur pour toute la famille.*

*Sans oublier mon binôme **ADEL BOUZIANE**, et mon chère amis **soltani karim** pour son soutien moral, sa patience et sa compréhension tout au long de ce projet*

Dédicaces

Avec l'expression de ma reconnaissance, je dédie ce modeste travail à ceux qui, quels que soient les termes embrassés, je n'arriverais jamais à leur exprimer mon amour sincère.

*A l'homme, mon précieux offre du dieu, qui doit ma vie, ma réussite et tout mon respect : mon cher père **RABAH***

*A l'âme de ma mère qui a souffert sans me laisser souffrir, qui n'a jamais dit non à mes exigences et qui n'a épargné aucun effort pour me rendre heureuse: mon adorable mère **ZEINEB***

*A ma petite famille **MON EPOUS** qui n'ont pas cessée de me conseiller, encourager et soutenir tout au long de mes études. Que Dieu les protège et leurs offre la chance et le bonheur.*

*A mes adorables petites filles **ZEINEB** et **RAZANE** qui sait toujours comment procurer la joie et le bonheur pour toute la famille.*

*Sans oublier mon binôme **ALIOUATHACENE** pour son soutien moral, sa patience et sa compréhension tout au long de ce projet, sans oublier mes amis : **LABCHICH HICHEM** et **SOLTANI KARIM**, de qui j'ai reçu tout le soutien et un bon accompagnement*

Sommaire

Introduction générale

Chapitre I Etude d'un moteur asynchrone

I-1 Introduction	01
I-1-1 Moteur asynchrone	01
I-2 Constitution d'un moteur asynchrone triphasé	02
I-2-1 Stator (inducteur)	03
I-2-2 Rotor (Induit)	04
I-2-3 Rotor à cage d'écureuil	04
I-2-4 Rotor bobiné	05
I-2-5 Rotor à double cage	06
I-2-6 Rotor à encoches profondes	06
I.3. Classification des moteurs asynchrones :	07
I.3.1 Les moteurs de (classe A)	07
I.3.2 Moteur à couple de démarrage normal (classe B)	07
I.3.3 Moteur à couple de démarrage élevé (classe C)	07
I.3.4 Moteur à glissement élevé (classe D)	07
I.4. Bobinage	08
I-5 Principe de fonctionnement	09
I.6. Définition du glissement	10
I.7. Quadrants de fonctionnements	11
I.8. Pannes des moteurs asynchrones	12
I.9. Connexion au réseau	13
I.9.1. Couplage étoile	13
I.9.2. Couplage triangle	14
I-10 Bilan de puissance	14
I-10-1 puissance électrique absorbée P_a	15
I-10-2 Pertes Joule au stator P_{Js}	16
I-10-3 Pertes fer au stator P_{fs}	16
I-10-3-1 Pertes par courant de Foucault	16
I-10-3-2 Pertes par cycle d'Hystérésis	16
I-10-4 Puissance transmise au rotor P_{tr}	17

I-10-5 Pertes Joule au rotor P_{Jr}	17
I-10-6 Pertes fer au rotor.....	17
I-10-7 Puissance mécanique totale P_M	17
I-10-8 Pertes mécaniques P_m	18
I-10-9 Puissance utile P_u	18
I-5 Le couple	18
I-5-1 Le couple électromagnétique C_{em}	18
I-5-2 Le couple utile C_u	18
I-6 Rendement	19
I-7 Plaque signalétique d'un moteur asynchrone triphasé	20
 Chapitre II Démarrage d'un moteur asynchrone 	
Introduction	21
II-1 Démarrage direct	21
II-1-1 couplage et procédure de commutation	21
II-1-2 Avantages et inconvénients	23
II -1-3 Courbes caractéristiques couple-courant de démarrage direct	23
II-2 Démarrage sous tension réduite	23
II-3 Démarrage étoile-triangle	24
II-3-1 couplage et procédure de commutation	24
II-3-2 Courbes du démarrage étoile triangle	27
II-3-3 Avantages et inconvénients	27
II-4 Démarrage par autotransformateur	27
II-4-1 procédure de couplage	28
II-4-2 : Courbes caractéristiques couple - courant de démarrage par Autotransformateur.....	30
II-4-3 Avantages et inconvénients	30
II-5 Démarrage par des résistances statoriques	30
II-5-1 Couplage et procédure de commutation	30
II-5-2: Courbes caractéristiques couple - courant de démarrage par Résistances statoriques	33

II-5-3 Avantages et inconvénients	33
II-6 Démarrage par gradateur de tension	33
II-6-1 Principe de fonctionnement et couplage	34
II-6-2 Schéma fonctionnel	35
II-6-3 : Schéma de puissance et de commande	35
II-6-4 : Courbes caractéristiques	37
II-6-5 : Avantages et inconvénients	37
II-7 Démarrage par variateur de vitesse (Convertisseur de fréquence) pour moteur asynchrone	38
II-7-1 Principe général	38
II-7-2 Constitution	38
II-7-3 Le redresseur	38
II-7-4 L'onduleur	39
II-7-5 Description du fonctionnement	39
II-7-6 Avantages et inconvénients	40
II-8 Tableau de Comparaison des différents modes de démarrage	40
II-9 : Conclusion	41

Chapitre III Freinage des moteurs asynchrones

III.1.Introduction	42
III.2. FREINAGE MECANIQUE	42
III.2.1. Frein à manque de courant	42
III.2.2. Frein à appel de courant	43
III.3.Freinage par contre-courant	43
A/ Moteur à cage	43
B/Moteur à rotor bobiné (Moteur à bagues)	44
III.3.1 Schémas de puissance et de commande dans le cas d'un moteur en court-circuit ..	45
III.3.2 Schémas de puissance et de commande dans le cas d'un moteur à bagues	46
III.4. Freinage par injection de courant continu	47

III.4. 1 Principe	47
III.4. 2 Schémas des circuits de puissance et de commande	47
III.5. Freinage électronique	48
III.6. Freinage par fonctionnement en hyper-synchrone	48
III.7 Conclusion	55
Conclusion Général	

Liste des figures

Chapitre I Etude d'un moteur asynchrone

Figure (I-1) : Eclaté d'un moteur asynchrone à cage

Figure (I-2) : Eclaté d'un moteur asynchrone à bagues.

Figure (I-3) : Stator d'un moteur asynchrone

Figure (I-4) : Symboles électrique du moteur asynchrone à rotor bobiné (a) et à cage d'écureuil (b).

Figure (I-5) : Rotor à cage d'écureuil

Figure (I-6) : Rotor bobiné

Figure (I-7) : Schéma de principe d'un rotor bobiné

Figure (I-7-1) Courbe du couple en fonction de la vitesse pour moteurs de classe A, B, C et D.

Figure (I-8) Quadrants de fonctionnements.

Figure (I-9) : la caractéristique du couple en fonction de la vitesse.

Chapitre II Démarrage d'un moteur asynchrone

Figure (II-1) Schéma de démarrage direct d'un moteur asynchrone triphasé.

Figure (II-1-2) Courbes caractéristiques couple-courant de démarrage direct

Figure (II-2) démarrage étoile-triangle.

Figure (II.2.1) Courbes du démarrage étoile triangle.

Figure (II-3) démarrage par autotransformateur.

Figure (II-3-2) : Courbes caractéristiques couple - courant de démarrage

Par autotransformateur.

Figure (II-4) : Schéma de démarrage a résistances statoriques

D'un moteur asynchrone triphasé.

Figure (II-5) : Courbes caractéristiques couple - courant de démarrage par résistances Statoriques.

Figure (II-6) principe de gradateur de tension.

Figure (II-7) démarrage par gradateur de tension.

Figure (II-8) Schéma fonctionnel d'un Démarreur progressif d'un moteur asynchrone triphasé.

Figure (II-09) Schéma de démarrage et arrêt progressif d'un moteur asynchrone triphasé.

Figure (II-10) Courbes caractéristiques de démarrage par un convertisseur électronique

(Gradateur).

Figure (II-11) Schéma de principe d'un convertisseur de fréquence.

Figure (II-12) La modulation de largeur d'impulsions.

Chapitre III Freinage des moteurs asynchrones

Figure (III.2.1) Schémas des circuits de puissance et de commande
Frein à manquer de courant.

Figure (III.2.2) Schémas des circuits de puissance et de commande
Frein à appel de courant.

Figure (III.3.1) Principe du freinage à contre-courant.

Figure (III.3.2) Principe du freinage à contre-courant pour une machine asynchrone à bagues.

Figure (III.3.3) Schémas de puissance et de commande dans le cas d'un moteur en court-circuit.

Figure (III.3.4) Schémas de puissance et de commande dans le cas d'un moteur à bagues.

Figure (III.4.1) schémas de puissance Freinage par injection de courant continu.

Figure (III.4.3) schémas de commande Freinage par injection de courant continu.

Chapitre IV simulation d'un moteur asynchrone très phrasé

Figure-1- courbe tension entre phase

Figure-2- courbe courant statorique et rotorique

Figure-3- courbe du couple

Figure-4- courbe de la vitesse

Liste des tableaux :

1. Tableau pannes des moteurs asynchrones.
2. Tableau des schémas de démarrage direct d'un moteur asynchrone triphasé.
3. Tableau de Comparaison des différents modes de démarrage

Introduction générale

L'électrotechnique est la science qui s'occupe des applications Pratiques des phénomènes électromagnétiques dans l'Industrie et la vie Courante.

L'Importance particulière que présente de nos jours L'électrotechnique tient au fait qu'elle offre les moyens permettant de Résoudre de façon relativement simple les problèmes les plus importants qui se posent dans l'économie nationale (l'industrie, vie quotidienne, Transports, transmissions d'informations, médecine ...etc.) Tels, par Exemple, que le transport à grande distance et la conversion de grande Quantités d'énergie et la transmission de signaux a des distances Pratiquement illimitées.

Parmi les parties principales dans la science de génie électrique on trouve la commande électrique qui consiste à la relation entre le moteur électrique comme élément d'investissement de l'énergie électrique et la machine ou le système mécanique qui 'il entraine et tout ce qui tend par cette relation comme variation dc la tension de l'intensité , de la fréquence de l'énergie électrique, et par conséquent de la transformée de l'énergie mécanique ainsi que la commande de forme et la vitesse du mouvement suivant le travail de la machine exigée.

Le développement théorique de la commande électrique des moteurs à courant alternatif ou à courant continu est lie aux développements de la Construction et le mode de fonctionnement de ces machines, ce développement conduit et l'augmentation de la productivité de ces machines à la réduction de l'effort physique de l'humain ainsi il a disposé des méthodes d'étude des caractéristiques de fonctionnement des moteurs à travers les différents modes de commande préliminaires de boucles Ouverte ou fermée .

la commande des moteurs électriques a vitesse Variable a apporté aux processus industriels d'énormes avantages en améliorants leurs performances statiques et dynamiques en facilitant leurs automatisation. Dès l'apparition de l'électronique dc puissance le souci de stabilité, de régulation de vitesse a trouvé une réponse satisfaisante Avec les moteurs à courant continu. Toute fois l'utilisation de ces Moteurs ne reste qu'a des domaines de vitesse et de puissance bien Limitées et cela à cause de leurs collecteurs qui représentent un Inconvénient major, pour les moteurs.

Vue le grand développement dans l'industrie des éléments de puissance et le système de réglage destine à la commande des moteurs asynchrones ces derniers ont connu Un grand développement dans le domaine industriel.

Les moteurs Asynchrones ne demandent aucun entretien (absence de la commutation Mécanique) leurs prix sont relativement faibles par rapport aux moteurs à courant continu. D'autre part les moteurs asynchrones sont robustes et Moins chères part contre le cout des

convertisseurs nécessaires a des Variations de vitesse élevée parmi ces moteurs on a choisi comme objet d'étude pour notre mémoire de fin de cycle le moteur asynchrone triphasé à cause de son large utilisation dans le domaine industriel, de sa construction simple, de sa fiabilité, de son efficacité et son prix Faible par rapport aux autres moteurs.

Chapitre 1

Etude d'un moteur asynchrone

I-1 Introduction

L'entraînement des machines est assuré en très grande majorité par des moteurs asynchrones alimentés en courant alternatif triphasé et quelque fois en monophasé.

Ce type de moteur s'impose en effet dans la plupart des applications par son prix de revient avantageux ses qualités de robustesse et sa simplicité d'entretien.

Il paraît donc indispensable de rappeler, les principes de construction et de fonctionnement de ces moteurs puis de décrire et comparer les principaux dispositifs de démarrage, réglage de vitesse et freinage qui leur sont associés.

I-1-1 Moteur asynchrone :

Un moteur asynchrone comprend un stator et un rotor. Alimenté par le réseau de distribution, il produit un champ tournant. Le rotor, que l'on assimile pour l'instant à une masse métallique, balayé par ce champ est le siège de courants induits.

Des forces électromagnétiques prennent naissance et provoquent la rotation du rotor. En effet, d'après la loi de Lenz, le système réagit de façon à s'opposer à la cause des courants induits, c'est-à-dire au balayage du rotor par le champ tournant. Pour cette raison le rotor tourne dans le même sens que le champ et à la même vitesse que lui sensiblement; il n'est plus alors balayé qu'à une vitesse extrêmement faible par celui-là il ne peut y avoir synchronisme, sinon aucun courant n'est plus induit dans le rotor et le moment du couple moteur dévient nul : Cela explique le qualificatif d'asynchrone donné à ce moteur. La différence relative entre la vitesse de synchronisme et du champ statorique et la vitesse n du rotor est appelée le glissement

La vitesse de synchronisme est égale au rapport $\frac{W}{p}$ de la pulsation W des courants d'alimentation au nombre de paires de pôles p de l'enroulement statorique correspondant à une phase. Le glissement dépend de la charge du moteur.

Il augmente en même temps qu'elle, sans dépasser cependant quelques pour cent (de 1 à 15%). Pratiquement, on peut dire que la vitesse d'un moteur asynchrone ne diffère jamais beaucoup de la vitesse de synchronisme.

Il existe deux types de moteur asynchrone :

Moteur asynchrone monophasé.

Moteur asynchrone triphasé.

Dans ce qui suit on s'intéresse au moteur asynchrone triphasé.

I-2 Constitution d'un moteur asynchrone triphasé

Un moteur asynchrone triphasé comporte deux parties principales : un stator ou inducteur et un rotor ou induit séparés par un entrefer de faible épaisseur.

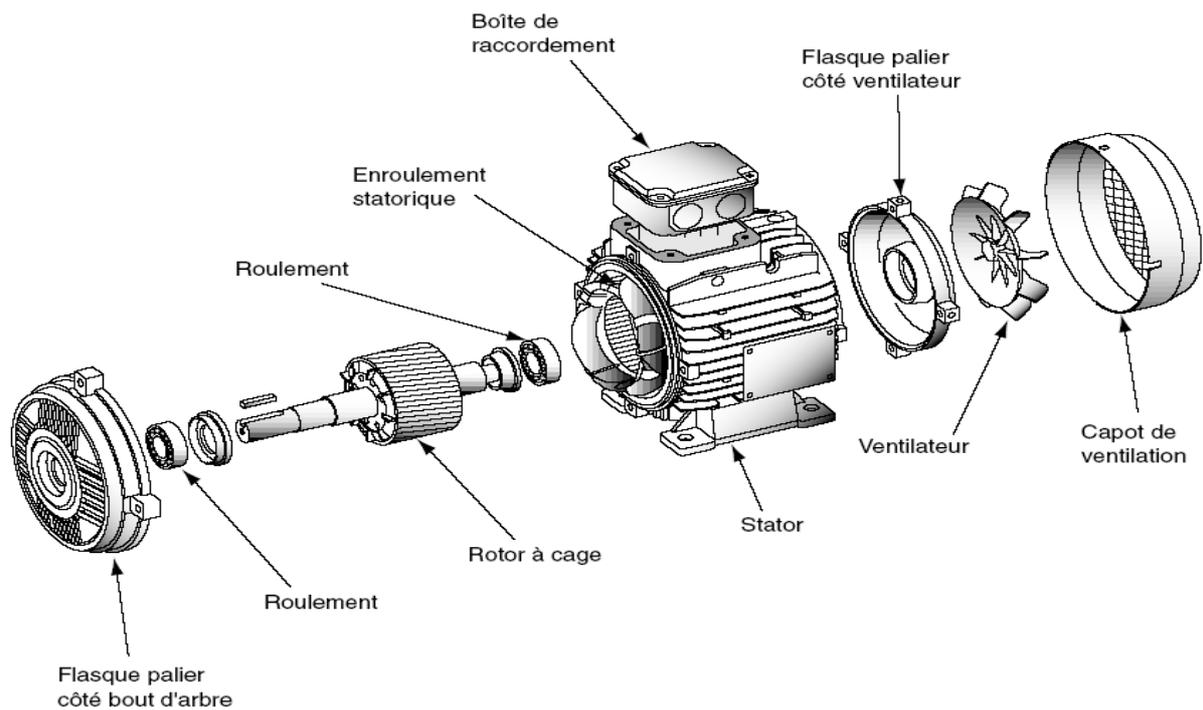


Figure (I-1) : Eclaté d'un moteur asynchrone à cage.

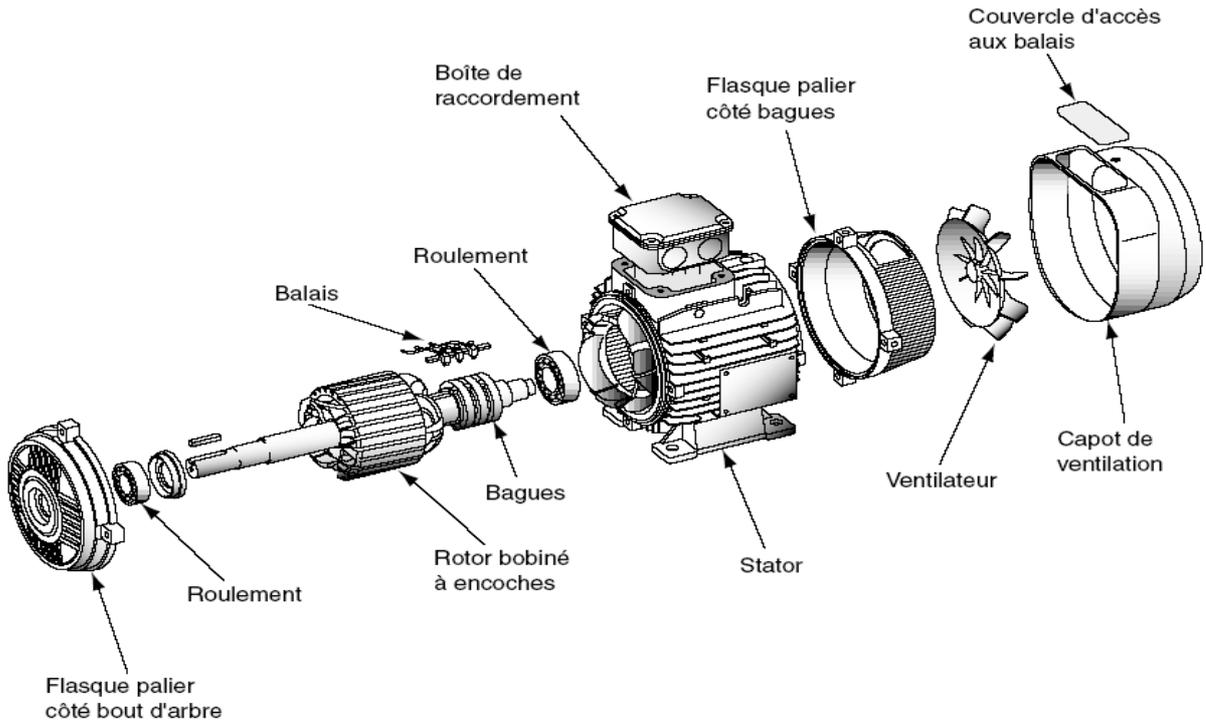


Figure (I-2) : Eclaté d'un moteur asynchrone à bagues.

I-2-1 Stator (inducteur)

C'est la partie fixe du moteur. Une carcasse en fonte ou en alliage léger referme une couronne de tôles minces (de l'ordre de 0.5 mm d'épaisseur) en acier au silicium. Les tôles sont isolées entre elles par oxydation ou par un vernis isolant. Le feuilletage du circuit magnétique réduit les pertes par cycle d'Hystérésis et par courants de Foucault. Les tôles sont munies d'encoches dans lesquelles prennent place les enroulements statoriques destinés à produire le champ tournant. Chaque enroulement est constitué de plusieurs bobines. Le mode de couplage de ces bobines entre elles définit le nombre de paires de pôles du moteur, donc la vitesse du champ tournant.

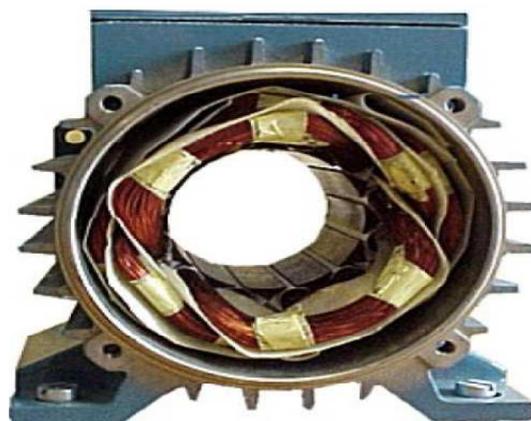


Figure (I-3) : Stator d'un moteur asynchrone

I-2-2 Rotor (Induit) [7]

C'est l'élément mobile du moteur. Comme le circuit magnétique du stator, il est constitué d'un empilage de tôles minces, isolées entre elles, et formant un cylindre claveté sur l'arbre du moteur. Le rotor est constitué de conducteurs en court-circuit donc n'est relié à aucune alimentation électrique et il tourne à une vitesse (N) inférieure à celle du champ tournant.

Selon la construction du rotor, on peut distinguer deux familles de moteurs asynchrones : Les moteurs à cage dont le rotor forme une cage d'écureuil et les moteurs à bague dont le rotor est bobiné.



Figure (I-4) : Symboles électrique du moteur asynchrone à rotor bobiné (a) et à cage d'écureuil (b)

I-2-3 Rotor à cage d'écureuil

C'est le plus fréquent. Ce type de rotor a été inventé par **Michail Ossipowitsch Doliwo-Dobrowolski** en 1889. Il est constitué de tôles ferromagnétiques et de barres conductrices très souvent en aluminium avec des extrémités court-circuitées par deux couronnes également conductrices, sa résistance électrique est très faible.

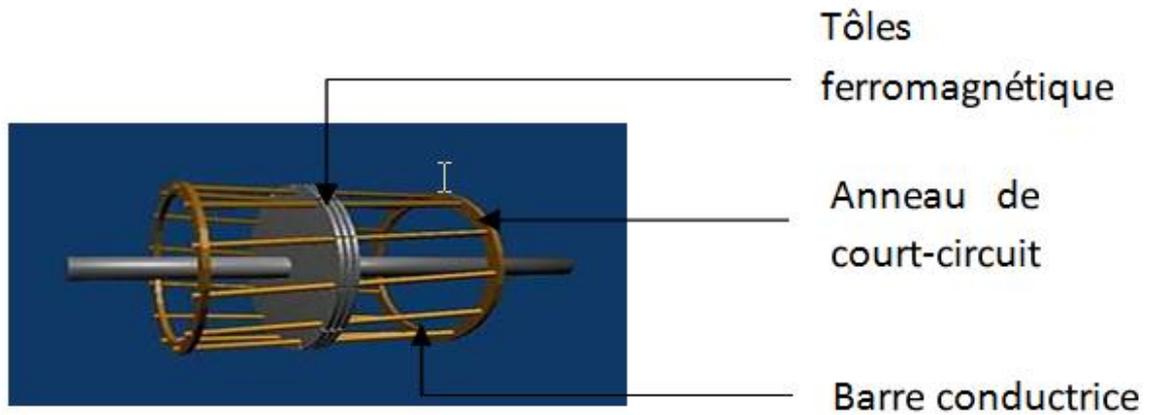


Figure (I-5) : Rotor à cage d'écureuil

I-2-4 Rotor bobiné

Les tôles du rotor sont munies d'encoches dans lesquelles sont placées des conducteurs d'un enroulement triphasé identiques à ceux du stator. Une extrémité de chacun des enroulements est reliée à un point commun (couplage étoile) et l'autre extrémité est reliée à une bague.

On peut accéder à ces bobinages par l'intermédiaire de trois bagues sur lesquelles frottent trois balais, cet accès est plus souvent utilisé pour augmenter le couple de démarrage par l'intermédiaire de résistances situées à l'extérieur de la machine.

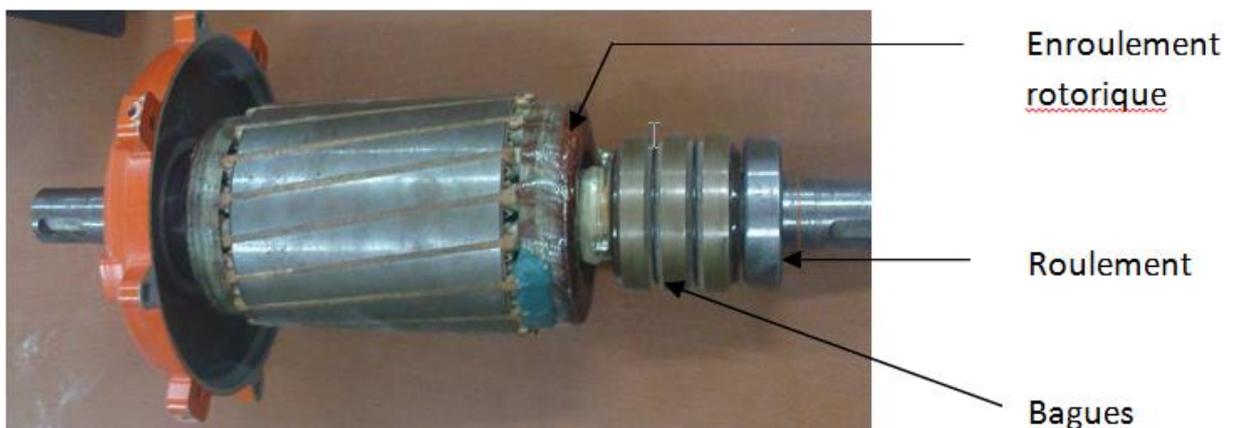


Figure (I-6) : Rotor bobiné

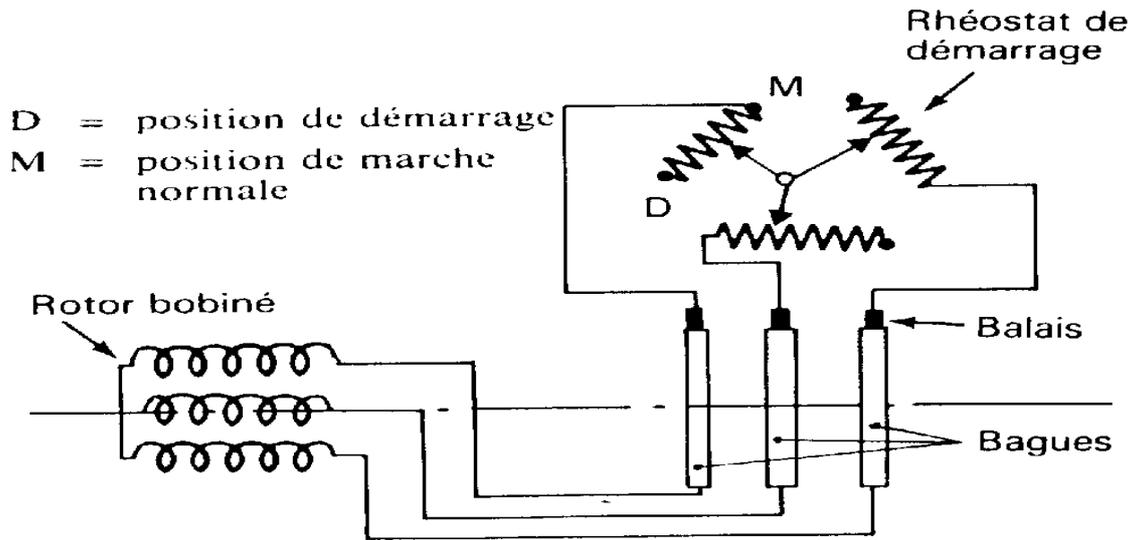


Figure (I-7) : Schéma de principe d'un rotor bobiné

I-2-5 Rotor à double cage :

Le rotor comporte deux cages coaxiales. La cage externe (fréquemment réalisée en laiton ou en bronze) à une résistance élevée, elle est active au démarrage pour réduire l'appel de courant et d'augmenter le couple. La cage interne (en cuivre) est moins résistive, elle est active en régime nominal et cela pour réduire les pertes par effet Joule au rotor [1].

I-2-6 Rotor à encoches profondes

C'est un rotor à cage simple avec des barres très plates s'enfonçant dans le circuit magnétique. Au démarrage, et par effet de peau, le courant se localise dans la partie supérieure de la barre et donc la section utile réduite, la résistance augmente et le courant diminue. Mais au fonctionnement nominal, cet effet diminue avec l'augmentation de la vitesse et la diminution de la fréquence, ce qui va réduire la résistance des barres [1].

I.3. Classification des moteurs asynchrones :

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 Les moteurs de (classe A) :

Le couple de chute et le courant de démarrage sont plus élevés. Ce moteur gère les surcharges transitoires rencontrées dans les machines de moulage par injection.

I.3.2 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.3.3 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.3.4 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 :

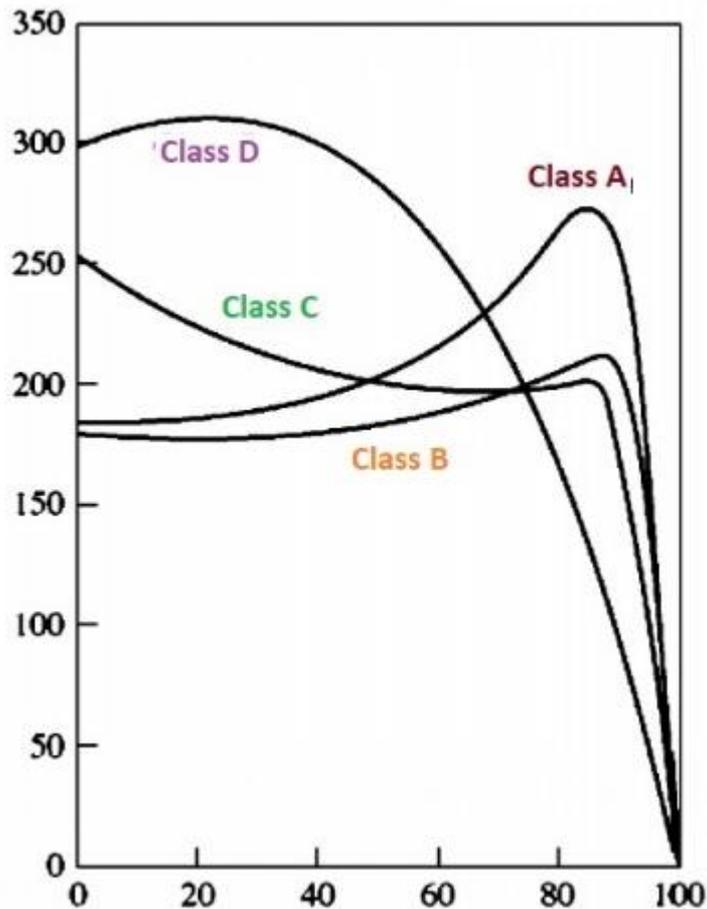


Figure (I.7.1) Courbe du couple en fonction de la vitesse pour Moteurs de classe A, B, C et D.

I.4. Bobinage :

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 côtés 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 et 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

En alimentant les trois bobines statoriques déphasées de 120 degrés ou de $2\pi/3$ rad par un système alternatif triphasé, ceci permet de créer un champ magnétique tournant dans l'espace et dans le temps, il peut être considéré comme un champ constant qui tourne à la pulsation de synchronisme [2].

$$\Omega_s = \frac{\omega_s}{P} \quad [\text{rd/s}]$$

La vitesse à laquelle tourne ce champ magnétique dans l'entrefer est dite : **vitesse de synchronisme**, elle est directement proportionnelle à la fréquence, f , du réseau et inversement proportionnelle au nombre de paires de pôles, P .

$$N_s = 60 \frac{f}{P} \quad [\text{tr/min}]$$

Ce champ variable coupe les conducteurs rotorique ; et d'après la loi de **Faraday**:

$e = \frac{d\phi}{dt}$ (tout conducteur soumis à une variation du flux est un siège d'une f.e.m), et donc une force électromotrice induite apparaît, ce qui engendre des courants induits circulant dans les conducteurs rotoriques en court-circuit.

La loi de Lenz ($e = - \frac{d\phi}{dt}$), explique que la f.e.m induite crée dans les conducteurs rotorique s'oppose à la cause qui lui a donné naissance, donc elle s'oppose à la

variation du flux. Et pour cela le rotor va se mettre à tourner dans la même direction que le champ statorique pour tenter de le rattraper [2].

La rotation du rotor est engendrée par l'apparition des forces de **Laplace** (de Lorentz, pour le Anglo-Saxons), qui sont un résultat de l'interaction entre le champ tournant et les courants induits :

$$d\vec{f} = i \cdot d\vec{L} \wedge \vec{B}$$

Le rotor n'arrivera jamais à tourner à la même vitesse que le champ statorique, cet écart avec la vitesse de synchronisme joue un rôle fondamental et il est défini par un paramètre important dit : **glissement**.

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.

On écrit alors ;

$$g = \frac{\Omega_s - \Omega}{\Omega_s} = \frac{N_s - N}{N_s} ; \quad \Omega = (1-g) \Omega_s$$

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.

En fonctionnement normal, la fréquence des f.e.m. et des courants rotoriques est très faible, elle est donnée en fonction du glissement :

$$f_r = g \cdot f \quad [Hz]$$

Avec

f : fréquence du réseau en hertz (Hz).

ω_s : Pulsation électrique du champ tournant en [rad/s].

N_s : vitesse de synchronisme en (tr/min).

N : vitesse de rotation du rotor en [tr/min].

Ω : vitesse mécanique synchrone de rotation du champ tournant en [rad/s].

ω : vitesse mécanique de rotation du rotor en [rad/s].

P : nombre de paires de pôles.

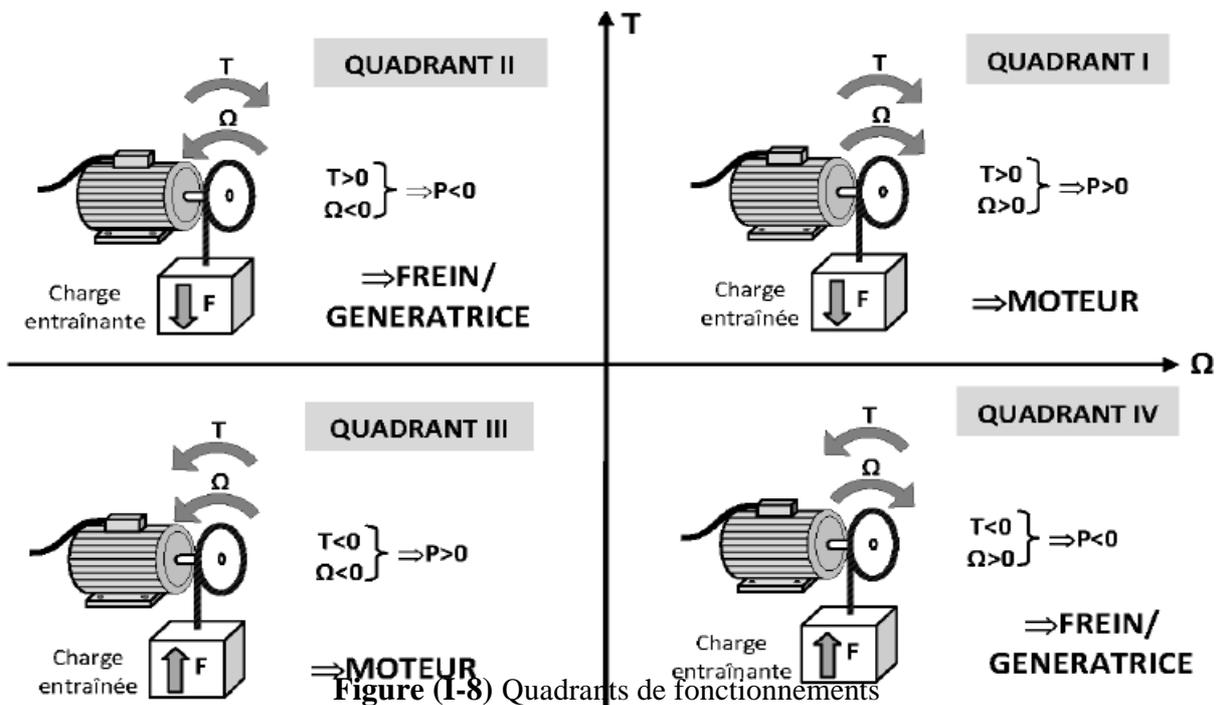
I.7. Quadrants de fonctionnements :

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 (1et 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



I.8. Pannes des moteurs asynchrones :

Constatation	Raisons possibles	Vérification et remèdes
Le moteur ne décolle pas, aucun renflement.	1. Manque de tension du réseau	Vérifier la tension avant l'interrupteur avec une lampe témoin ou un voltmètre, vérifié s'il arrive à la plaque à bornes.
	2. Des fusibles fondus.	Vérifier leurs états.
	3. Une coupure dans la ligne.	Vérifier les bornes, les contacts de l'appareillage et la ligne
Le moteur ne décolle pas et le renflement est normal	1. Mauvais couplage à la plaque à bornes.	Le stator est couplé en étoile pour une tension d'alimentation en triangle.
	2. Coupure dans le rotor.	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.
	3. Coupure dans le rhéostat	Vérifier le rhéostat à la lampe témoin.
	4. Usure ou mauvais contacte des balais.	Vérifier l'état de la pression des balais.
	5. Coupure dans le circuit rotorique	Vérifier la ligne et le serrage des diverses bornes. Vérifier le rhéostat et les balais.
	6. Couple résistant trop grand	Décharger le moteur et vérifier son comportement
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 découplées 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

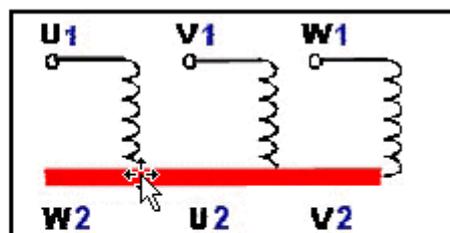
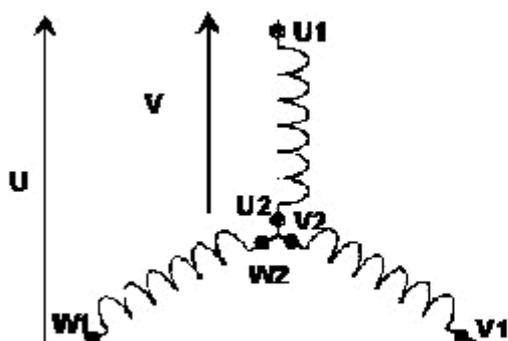
I.9.Connexion au réseau :

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 :

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



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

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).

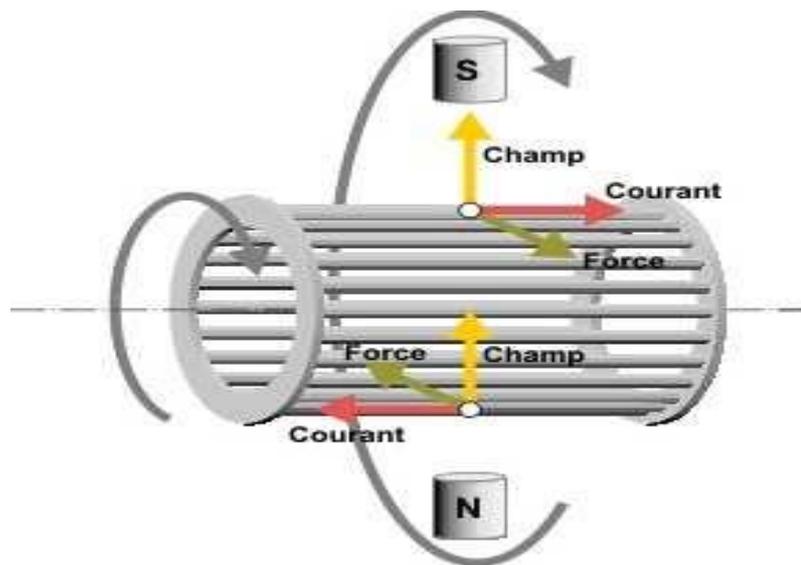
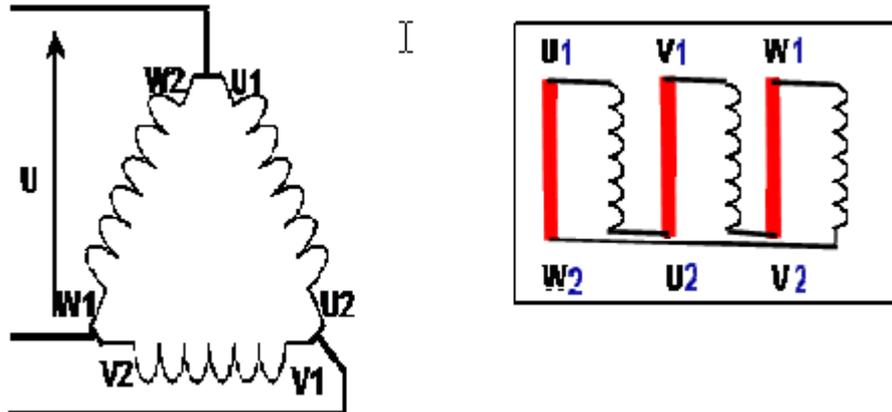
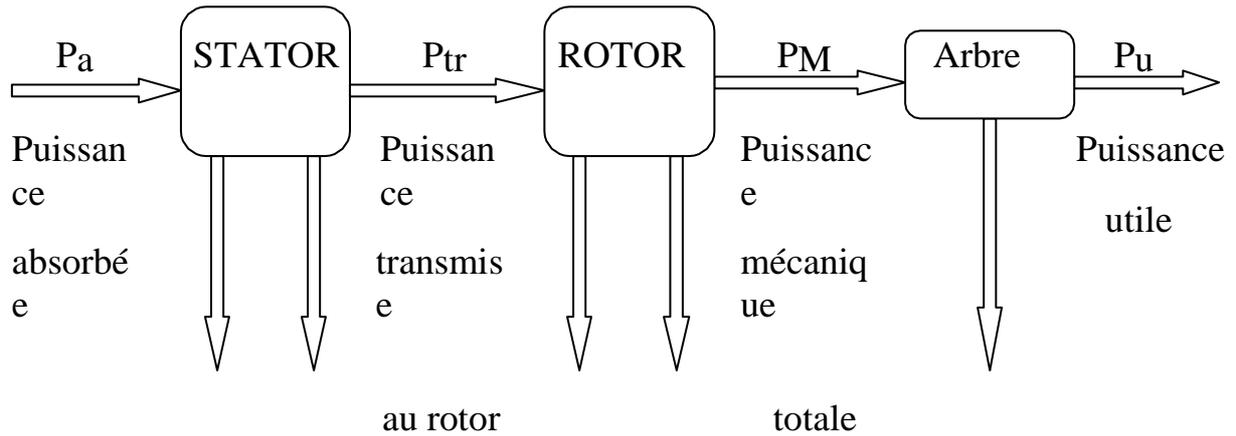


Figure (I-9) : Schéma de représentation d'une machine asynchrone

I-10 Bilan de puissance

Lors de la transformation d'énergie électrique en énergie mécanique, apparait une forme intermédiaire d'énergie, l'énergie électromagnétique. L'énergie électrique absorbée est en partie transformée en énergie mécanique utile, une autre partie stockée sous forme d'énergie magnétique, le reste étant dissipé sous forme de pertes, d'où le bilan de puissances suivant :



Pertes
Joule : P_Js

Perte fer : P_{fs}

Pertes Joule :
 P_{Jr}

Pertes fer :
 P_{fr}

Pertes
mécaniques

P_m

I-10-1 puissance électrique absorbée P_a

La puissance électrique P_a absorbée par un stator d'un moteur asynchrone quel que soit le couplage de ses bobines (étoile ou triangle) est :

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

Avec :

U : Tension composée aux bornes du moteur [V].

I : Courant de ligne [A].

cos φ : Facteur de puissance du moteur.

I-10-2 Pertes Joule au stator P_{Js}

Elles représentent les pertes ohmiques dans l'enroulement statorique, donc c'est l'énergie dissipée sous forme de chaleur.

$$P_{Js} = 3.R_s.I_s^2 \quad [W]$$

Avec :

R_s : La résistance d'une phase statorique [Ω].

I_s : Le courant efficace traversant l'enroulement statorique [A].

I-10-3 Pertes fer au stator P_{fs}

Les pertes fer rassemble les pertes par courant de Foucault et les pertes par cycle d'Hystérésis, elles sont fonction du flux magnétique, donc elles ne dépendent que de la tension d'alimentation et de la fréquence des courants statoriques. Or, en régime de fonctionnement nominal, ces grandeurs ne varient pas, et par conséquent, les pertes fer peuvent être considérées comme constantes quelle que soit la charge du moteur. Dans la pratique, on néglige les pertes fer rotorique car la fréquence des courants induits est très faible. Elles sont mesurées lors d'un essai à vide.

I-10-3-1 Pertes par courant de Foucault

Ce sont les pertes engendrées par la circulation des courants induits (courant de Foucault) dans la masse du métal qui sont dus à la variation du champ magnétique, ce phénomène a été découvert par le physicien Français **Léon Foucault** en 1851. Elles sont proportionnelles au carré de la fréquence et de l'amplitude de l'induction [3].

$$P_f = K_f.f^2.V.e^2.B_{max}^2 \quad [W/kg]$$

I-10-3-2 Pertes par cycle d'Hystérésis

L'hystérésis est le retard de l'effet sur la cause. Donc ces pertes sont dues au fait que les domaines du métal présentent une certaine constante de temps avant de s'orienter, il existe un retard entre l'application du champ et l'apparition de l'induction. Elles sont proportionnelles à la fréquence f , et au carré de l'induction maximale [3].

$$P_H = K_h.f.V.B_{max}^2 \quad [W/kg]$$

K_f et K_h : sont des constantes caractérisant la tôle.

B_{max} : l'induction maximale [T].

e : l'épaisseur d'une tôle magnétique [mm].

I-10-4 Puissance transmise au rotor P_{tr}

La puissance transmise au rotor est la puissance du champ magnétique tournant, que l'on appelle aussi puissance électromagnétique.

$$P_{tr} = P_a - P_{Js} - P_{fs} \quad [W]$$

I-10-5 Pertes Joule au rotor P_{Jr}

Elles représentent les pertes ohmiques dans le rotor. Quel que soit à cage ou à rotor bobiné, elles sont fonction de la puissance transmise et du glissement.

$$P_{Jr} = g \cdot P_{tr}$$

Et pour le rotor bobiné, les pertes Joules peuvent être aussi calculées comme celles du stator.

$$P_{jr} = 3 \cdot R_r \cdot I_r^2 \quad [W]$$

Avec :

R_r : Résistance d'une phase rotorique.

I_r : courant efficace traversant l'enroulement rotorique.

g : glissement.

I-10-6 Pertes fer au rotor

Puisque la fréquence des courants rotoriques est faible, et les pertes fer dépendent d'elle, donc en pratique on peut négliger ces pertes.

I-10-7 Puissance mécanique totale P_M

La puissance mécanique c'est la puissance transmise à l'arbre du moteur.

$$P_M = P_{tr} - P_{jr} = (1 - g) \cdot P_{tr} \quad [W]$$

Avec des pertes fer rotoriques négligées.

I-10-8 Pertes mécaniques P_m

Elles regroupent les pertes par frottements et par ventilation, et elles dépendent uniquement de la vitesse de rotation du moteur. Puisque la vitesse de rotation du moteur variant peu avec la charge, donc on peut considérer ces pertes comme constantes. On peut les déterminer à l'aide d'un essai à vide.

I-10-9 Puissance utile P_u

C'est la puissance transmise à la charge, on peut la déterminer en connaissant les pertes mécaniques.

$$P_u = P_M - P_m$$

I-5 Le couple

Parmi les caractéristiques d'un moteur, il est important de connaître la valeur du couple développé sur l'arbre.

I-5-1 Le couple électromagnétique C_{em}

Les forces qui s'exercent sur les conducteurs du rotor tournent à la vitesse Ω_s , elles glissent sur le rotor, qui lui-même tourne à la vitesse Ω , l'action de l'ensemble des forces électromagnétiques, se réduit à l'application d'un moment de couple électromagnétique.

$$C_{em} = \frac{P_{tr}}{\Omega_s} = \frac{P_M}{\Omega} \quad [N.m]$$

I-5-2 Le couple utile C_u

Le rotor tourne à la vitesse Ω et transmet à la charge une puissance P_u , l'action de ces forces engendre le couple utile.

$$C_u = \frac{P_u}{\Omega} \quad [N.m]$$

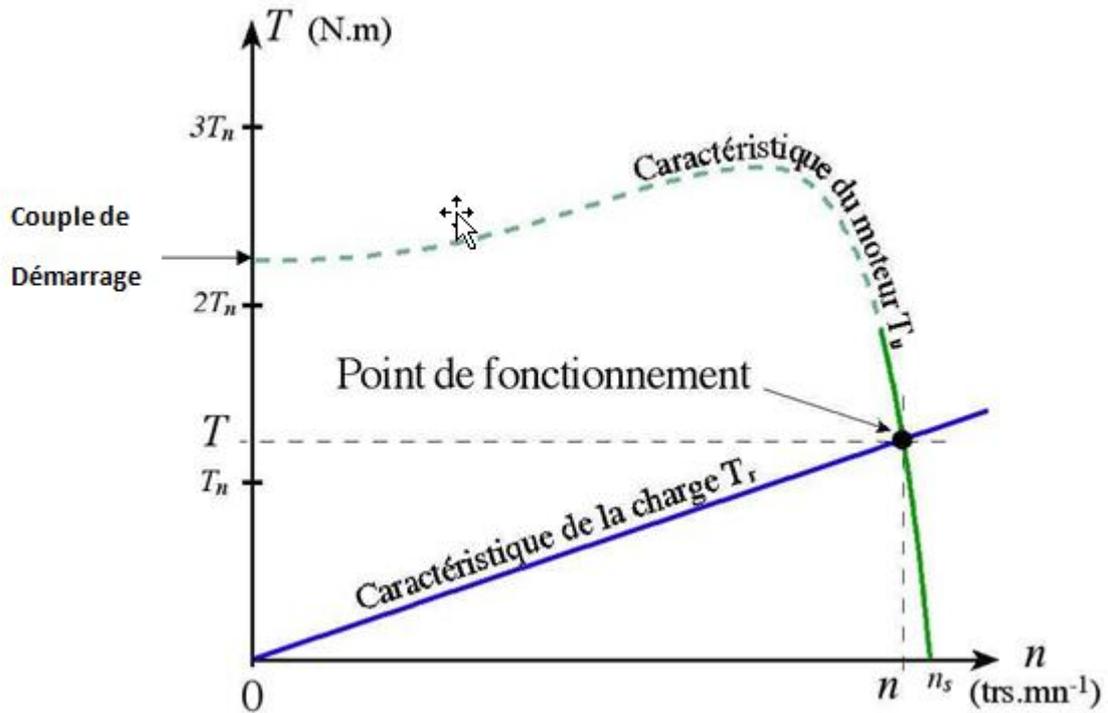


Figure (I-9) : la caractéristique du couple en fonction de la vitesse

Les moteurs asynchrones sont caractérisés par un couple de démarrage très élevé, donc ils peuvent démarrer en charge facilement.

Le couple moteur varie avec la vitesse de rotation jusqu'à sa valeur max et redescend jusqu'à avoir une valeur nulle pour une vitesse égale à celle du synchronisme. Pour des vitesses proches de celle du synchronisme ou pour les faibles glissements, la courbe du couple peut être considérée comme une droite de pente négative, donc le couple est inversement proportionnel à la vitesse de rotation.

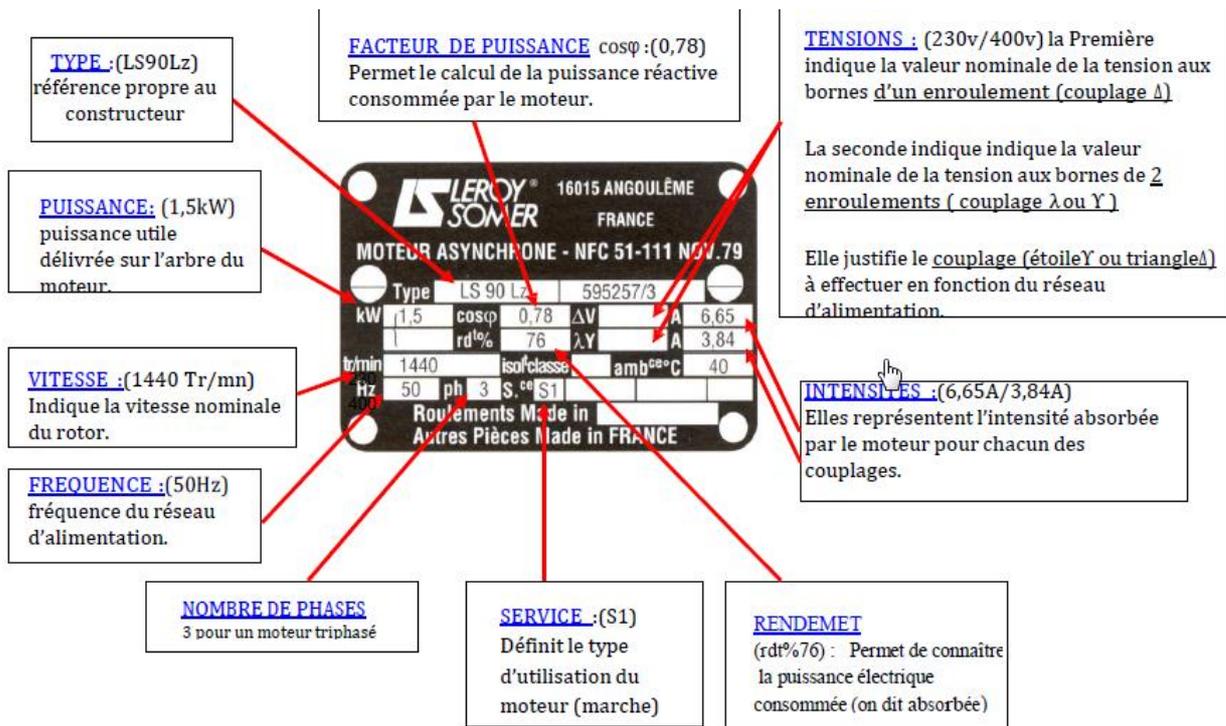
Le point de fonctionnement correspond au point d'intersection de la caractéristique mécanique de la charge entraînée par le moteur $T_r(N)$ avec la caractéristique électromécanique du moteur.

I-6 Rendement

Le rendement d'un moteur asynchrone est le rapport entre la puissance utile et la puissance absorbée. [8]

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

I-7 Plaque signalétique d'un moteur asynchrone triphasé :



Chapitre II
Démarrage
d'un moteur
asynrone

Introduction

Lors de la mise sous tension d'un moteur, l'appel de courant sur le réseau est important et 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 perceptible sur les appareils d'éclairage. Pour remédier à ces inconvénients.

Les règlements de quelques secteurs interdisent, au-dessus d'une certaine puissance.

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. L'objectif de ce chapitre est de présenter quelques modes de démarrage d'un moteur asynchrone à cage d'écureuil.

II-1 Démarrage direct [4]

C'est le plus simple qui ne peut être exécuté qu'avec le moteur asynchrone à rotor à cage. Les enroulements du stator sont couplés directement sur le réseau

II-1-1 couplage et procédure de commutation

C'est le mode de démarrage le plus simple dans lequel le stator est directement couplé sur le réseau (Fig II.1). Le moteur démarre sur ses caractéristiques naturelles.

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 :

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

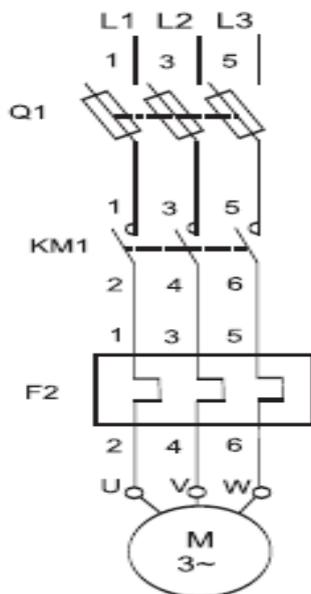
Le couple de démarrage est en moyenne :

$$C_{\text{démarrage}} = 0.5 \text{ à } 1.5 C_{\text{nominal}}$$

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,
- le couple de démarrage peut être élevé sans incidence sur le fonctionnement de la machine ou de la charge entraînée.

Circuit de puissance



Circuit de commande

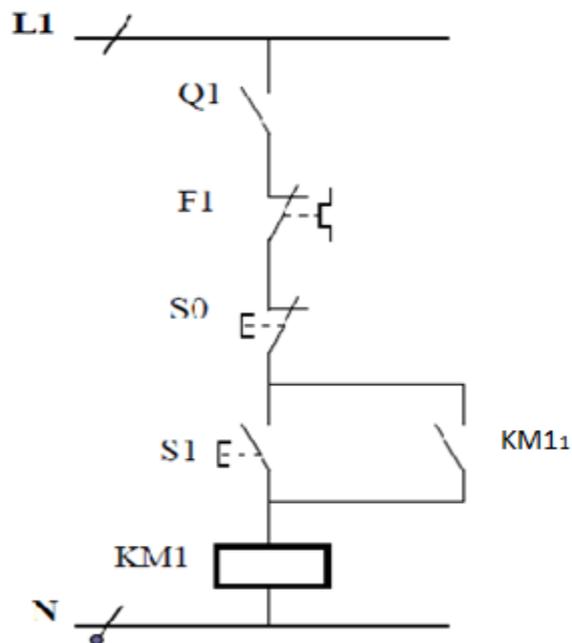


Figure (II-1) Schéma de démarrage direct d'un moteur asynchrone triphasé. [4]

<p>L1, L2, L3 : alimentation triphasée. Q1 : sectionneur à fusible. KM1 : contacteur principal 1. F : relais thermique. M : moteur triphasé.</p>	<p>F : contact auxiliaire du relais thermique. S0: bouton poussoir arrêt. S1: bouton poussoir marche. KM1 : bobine du contacteur. KM1₁ : contact auxiliaire du contacteur.</p>
---	--

II-1-2 Avantages et inconvénients

a) Avantages

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

b) Inconvénients

- Appel du courant important
- Démarrage brutal.

II -1-3 Courbes caractéristiques couple-courant de démarrage direct

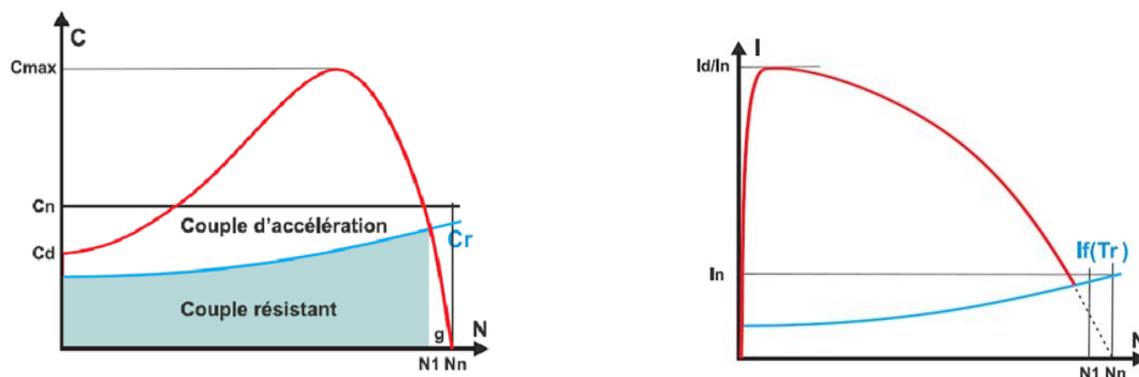


Figure (II-1-2) Courbes caractéristiques couple-courant de démarrage direct. [4]

II-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 Démarrage étoile-triangle

Ce procédé ne peut s'appliquer qu'aux moteurs dont toutes les extrémités d'enroulement sont sorties sur la plaque à bornes, et dont le couplage triangle correspond à la tension du réseau. Le démarrage s'effectue en 2 temps.

- 1 temps : mise sous tension et couplage étoile des enroulements.

Le moteur démarre à tension réduite n

- 2 temps : Suppression du couplage étoile, et mise en couplage triangle Le moteur est alimenté sous pleine tension

II-3-1 couplage et procédure de commutation

Ce mode de démarrage (Fig II-2) 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.

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 $\sqrt{3}$ (dans l'exemple ci-dessus, la tension réseau 380 V = $660 \text{ V}/\sqrt{3}$).

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 absorbent 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 courant qui traverse les enroulements est interrompu à l'ouverture du contacteur étoile. Il se rétablit à la fermeture du contacteur triangle.

Ce passage en triangle s'accompagne d'une pointe de courant transitoire très brève mais très importante, due à la force contre-électromotrice du moteur.

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. [4]

Cette temporisation permet une diminution de la force contre-électromotrice, donc de la pointe de courant transitoire.

Ceci ne peut être utilisé que si la machine a une inertie suffisante pour éviter un ralentissement trop important pendant la durée de la temporisation.

Une autre est le démarrage en 3 temps :

étoile-triangle + résistance-triangle.

La coupure subsiste, mais la résistance mise en série, pendant trois secondes environ, avec les enroulements couplés en triangle, réduit la pointe de courant transitoire.

Une variante est le démarrage étoile-triangle + résistance-triangle sans coupure.

La résistance est mise en série avec les enroulements immédiatement avant l'ouverture du contacteur étoile. Ceci évite toute interruption de courant, donc l'apparition de phénomènes transitoires.

L'utilisation de ces variantes se traduit par la mise en œuvre de matériel supplémentaire, ce qui peut avoir pour conséquence une augmentation non négligeable du coût de l'installation.

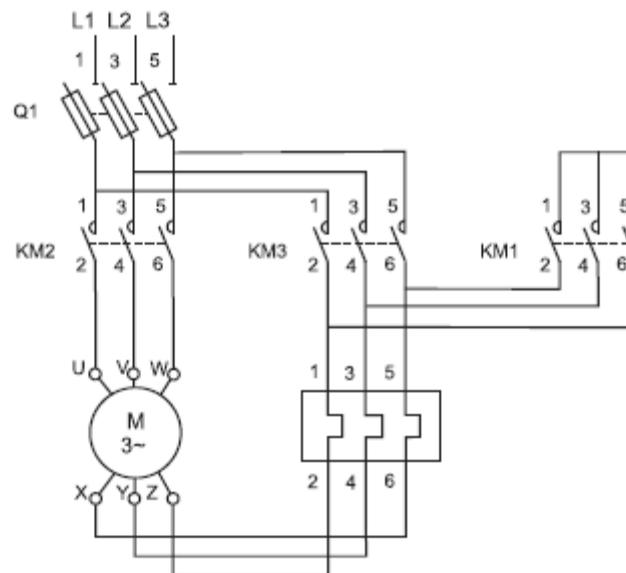


Figure (II-2) démarrage étoile-triangle [4]

II-3-2 Courbes du démarrage étoile triangle

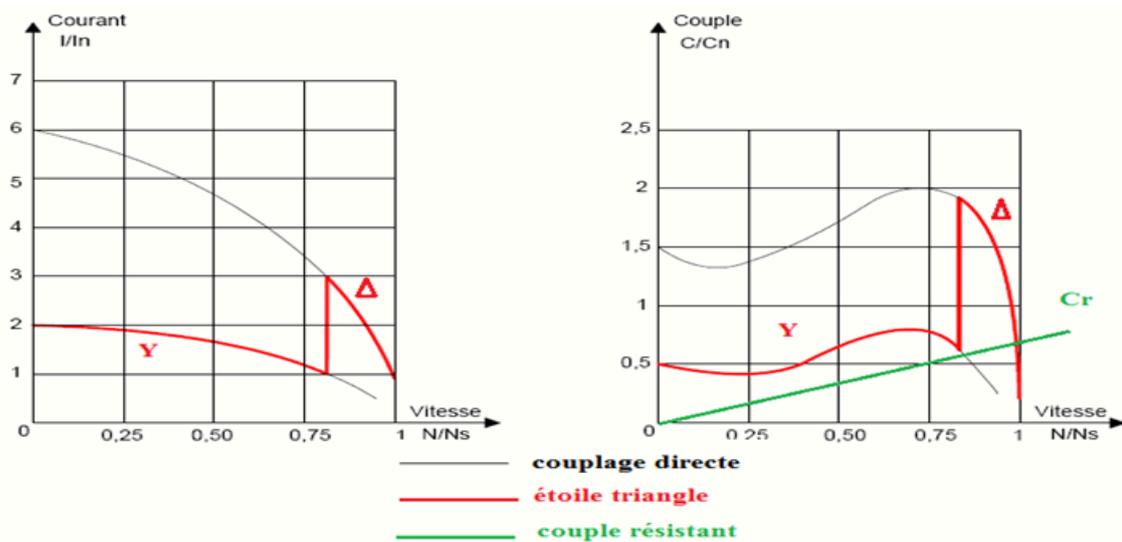


Figure (II.2.1) Courbes du démarrage étoile triangle

II-3-3 Avantages et inconvénients

a) Avantages

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

b) Inconvénients

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

II-4 Démarrage par autotransformateur [4]

Au moment de démarrage, la tension est réduite au moyen d'un auto-transformateur.

- 1- Temps Auto-transformateur en Y le moteur est alimenté à tension réduite
- 2- Temps Ouverture du point Y, seul la self de la partie supérieure de l'enroulement limite le courant
- 3- Temps Alimentation du moteur sous pleine tension

II-4-1 procédure de couplage

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 :

- 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'entoilage 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.

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.

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'entoilage, est grande par rapport à 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'entoilage 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.

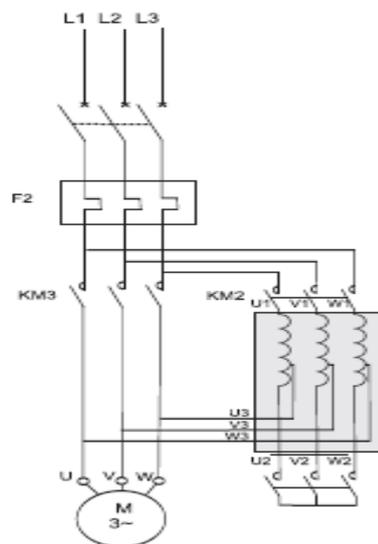


Figure (II-3) démarrage par autotransformateur [4]

II-4-2 : Courbes caractéristiques couple - courant de démarrage par autotransformateur

Figure (II-3-2) : Courbes caractéristiques couple - courant de démarrage

par autotransformateur.

II-4-3 Avantages et inconvénients

a) Avantages

- Possibilité de choisir le couple de décollage.
- Réduction de l'appel du courant.
- Démarrage en 3 temps sans coupure.

b) Inconvénient

- Prix d'achat élevé de l'équipement.

II-5 Démarrage par des résistances statoriques. [4]

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.

II-5-1 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 :

- $I_d = 4.5 I_n$
- $C_d = 0.75 C_n$

Pendant la phase d'accélération avec les résistances, la tension appliquée aux bornes du moteur n'est pas constante. Cette tension est égale à la tension du réseau diminuée de la chute de tension dans la résistance de démarrage.

La chute de tension est proportionnelle au courant absorbé par les résistances

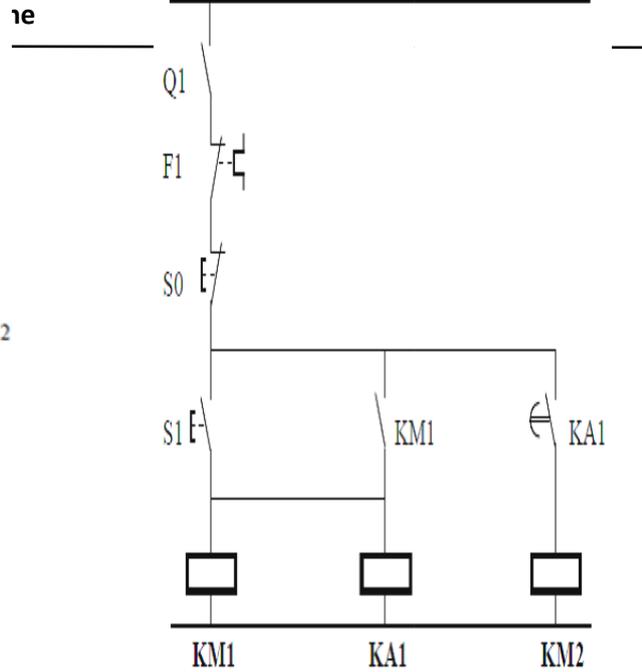
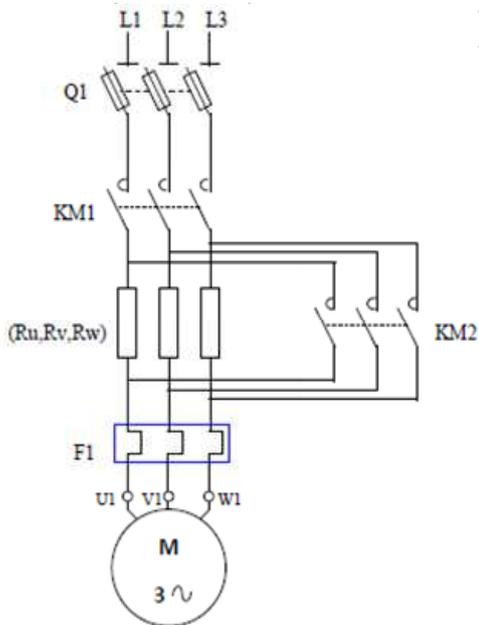
Comme le courant diminue au fur et à mesure de l'accélération du moteur, il en est de même pour la chute de tension dans la résistance. La tension appliquée aux bornes du moteur est donc minimale au moment du démarrage, et elle augmente progressivement.

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.

En revanche, l'élimination de la résistance en fin de démarrage se fait sans qu'il y ait interruption de l'alimentation du moteur, donc sans phénomène transitoire.



Circuit de puissance

Circuit de commande

Figure (II-4) : Schéma de démarrage a résistances statoriques d'un moteur asynchrone triphasé. [4]

Avec : **KM1**: contacteur « ligne »

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

II-5-2: Courbes caractéristiques couple - courant de démarrage par Résistances statoriques :

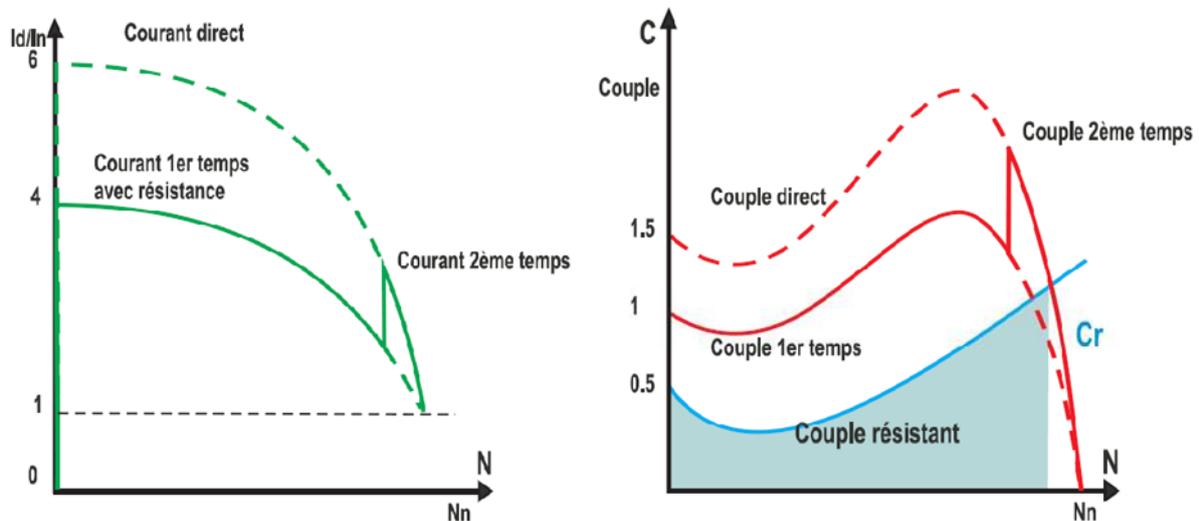


Figure (II-5) : Courbes caractéristiques couple - courant de démarrage par résistances Statoriques. [4]

II-5-3 Avantages et inconvénients

a) 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.

b) 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-6 Démarrage par gradateur de tension [6]

Le gradateur est un convertisseur qui permet de transformer une source de tension sinusoïdale alternative de valeur efficace fixe en une tension alternative de valeur efficace variable de même fréquence.

II-6-1 Principe de fonctionnement et couplage:

Le gradateur se comporte comme un interrupteur. Il permet d'établir ou d'interrompre la liaison entre la source de tension et le récepteur. La tension aux bornes du récepteur évolue en fonction de la commande de l'interrupteur. Le réglage de l'intensité du courant débité par la source permet de moduler l'énergie absorbée par le récepteur.

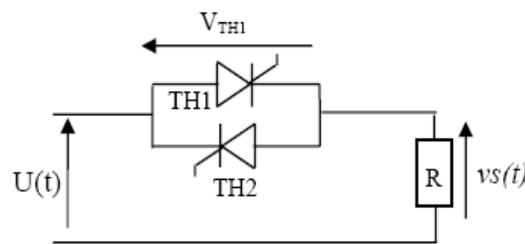


Figure (II-6) principe de gradateur de tension.

L'interrupteur qui constitue le gradateur est composé de 2 thyristors montés tête-bêche ou d'un triac. Cet étage de puissance est associé à une « électronique » de commande permettant de faire varier l'angle d'amorçage α des thyristors.

Le moteur asynchrone triphasé est alimenté par l'intermédiaire d'un gradateur qui provoque la montée progressive de la tension.

On peut réduire l'intensité de démarrage à une valeur précise en agissant sur l'angle de commande des thyristors.

Pour limiter l'appel de courant au démarrage, on réduit la tension efficace ce qui limite le couple moteur au démarrage. On doit donc s'assurer en permanence que le couple de démarrage soit supérieur au couple résistant du système à entraîner

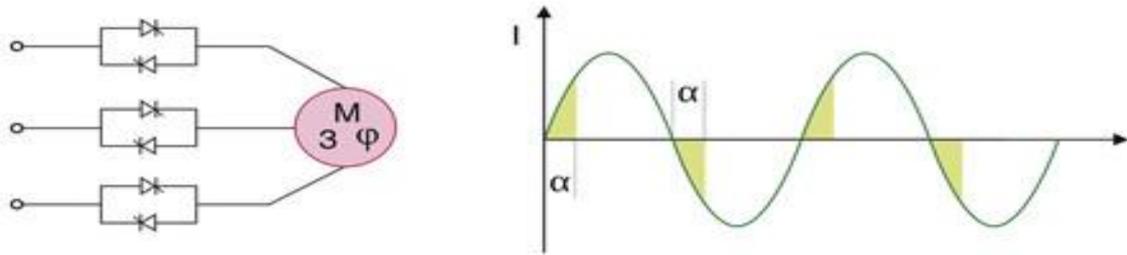


Figure (II-7) démarrage par gradateur de tension. [4]

II-6-2 Schéma fonctionnel :

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

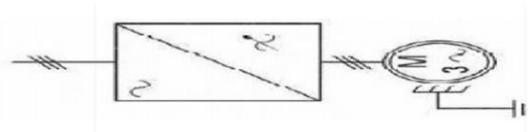


Figure (II-8) Schéma fonctionnel d'un Démarreur progressif d'un moteur asynchrone triphasé. [4]

II-6-3 : Schéma de puissance et de commande :

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

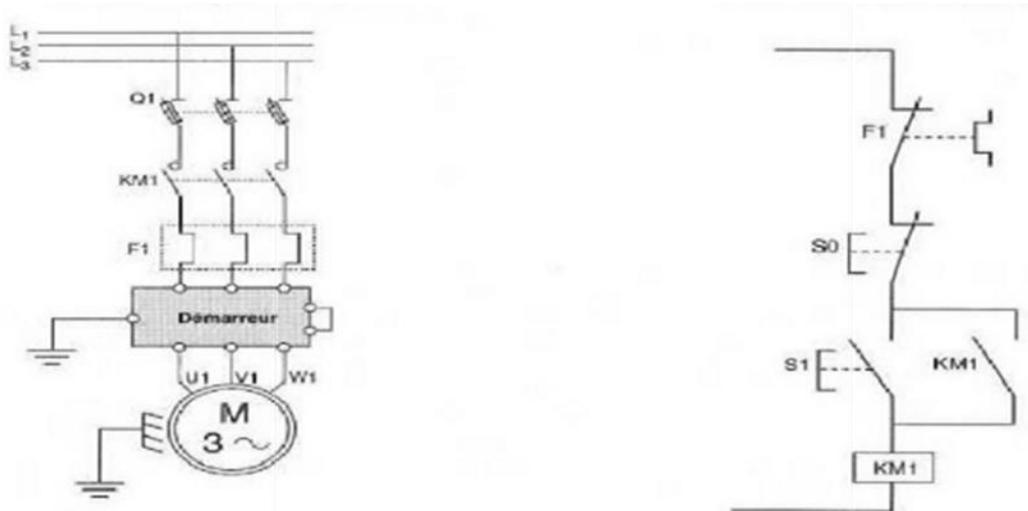
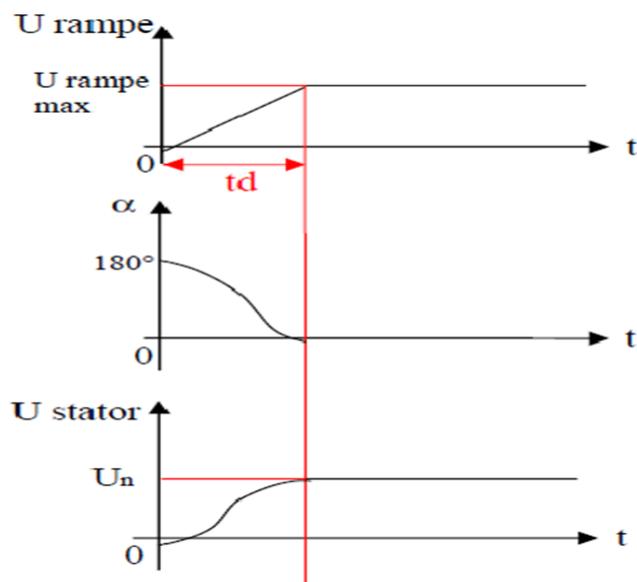


Figure (II-09) Schéma de démarrage et arrêt progressif d'un moteur asynchrone triphasé. [4]

La consigne de décélération permet de faire évoluer l'angle α des thyristors de 0° à 180° donc U_{moteur} de U_n à 0, comme l'indique sur la figure ci-dessous :



II-6-4 : Courbes caractéristiques :

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

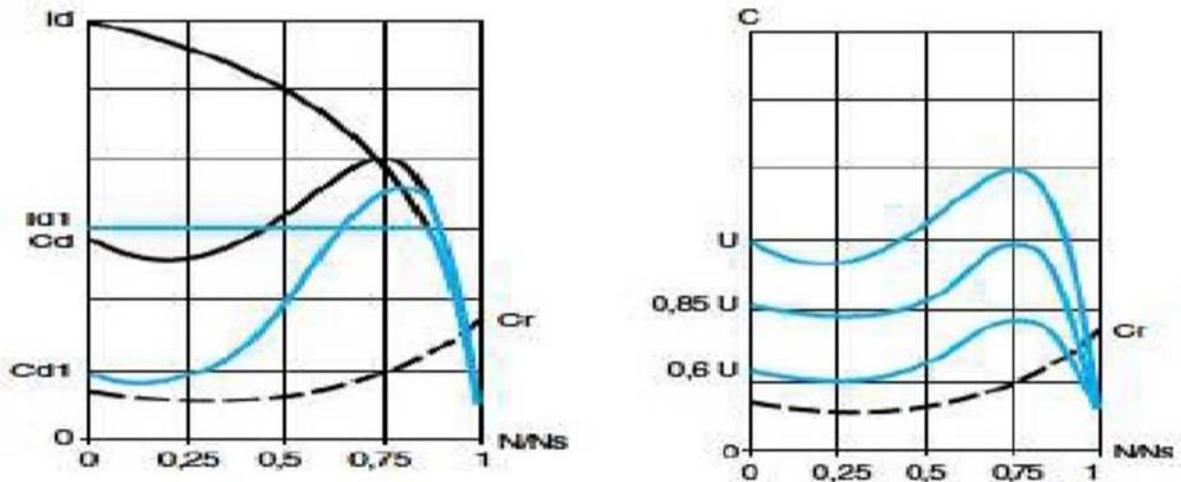


Figure (II-10) Courbes caractéristiques de démarrage par un convertisseur électronique(Gradateur).

II-6-5 : Avantages et inconvénients.

a) Avantage :

- 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.

b) Inconvénients

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

II-7 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.

II-7-1 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.

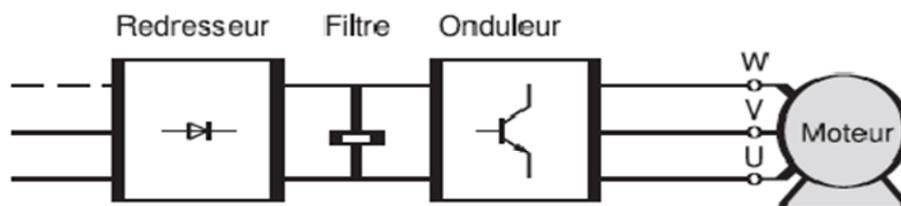


Figure (II-11) Schéma de principe d'un convertisseur de fréquence. [4]

II-7-2 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.

II-7-3 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.

II-7-4 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.

II-7-5 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 spécifique integrated circuit) circuit intégré pour application spécifique). La détermination de la modulation dépend des tensions et fréquences, donc des vitesses demandées en sortie.

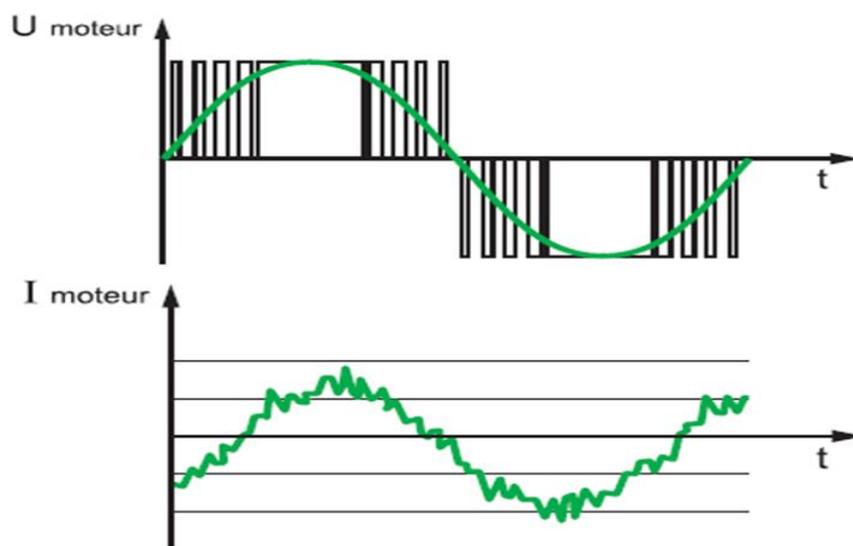


Figure (II-12) La modulation de largeur d'impulsions. [4]

II-7-6 Avantages et inconvénients :

a) Avantage :

- 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 court-circuités.

b) Inconvénients :

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

II-8 Tableau de Comparaison des différents modes de démarrage :

	Démarrage direct	Démarrage étoile triangle	Démarrage statoriques	Démarrage par auto transformateur	Démarrage rotorique	Démarrageur électronique
Courant de démarrage	100%	33%	50%	40/65/80%	70%	150à 750%
Surcharge en ligne	4 à 8 In	1.3à1.6In	4.5 In	1.7à 4 In	< 2.5In	
Couple en % de Cd	100%	33%	50%	40/65/80%		10 à50% (50 à 100% en 100ms)
Couple initiale au démarrage	0.6à 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
	T.O.R	T.O.R				

commande			1 cran fixe	3 crans fixe	De 1 à 5 crans	électronique
avantages	- démarreur 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	-très bon rapport couple/courant - possibilité de réglage des	-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	-faible réduction de la pointe de courant au démarrage -nécessite des résistances	-nécessite une auto transformatrice onéreuse -présente des risques de réseau	-moteur à bague plus onéreux	-prix très cher

II-9 : 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.

Chapitre III

Freinage des moteurs asynchrones

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 MECANIQUE

Ce sont des moteurs comportant un dispositif de freinage mécanique (mâchoire, disque,...): **MOTEUR FREIN** commandé par un électroaimant. Il en existe deux types :

- III.2.1. Frein à manque de courant :

Le frein est actionné mécaniquement (système de ressorts au repos), il est souvent utilisé pour des raisons de sécurité : lorsque le moteur n'est pas alimenté (arrêt normal ou arrêt d'urgence) le freinage est réalisé.

L'électroaimant est alimenté en triphasé, branché en parallèle sur les enroulements statoriques.

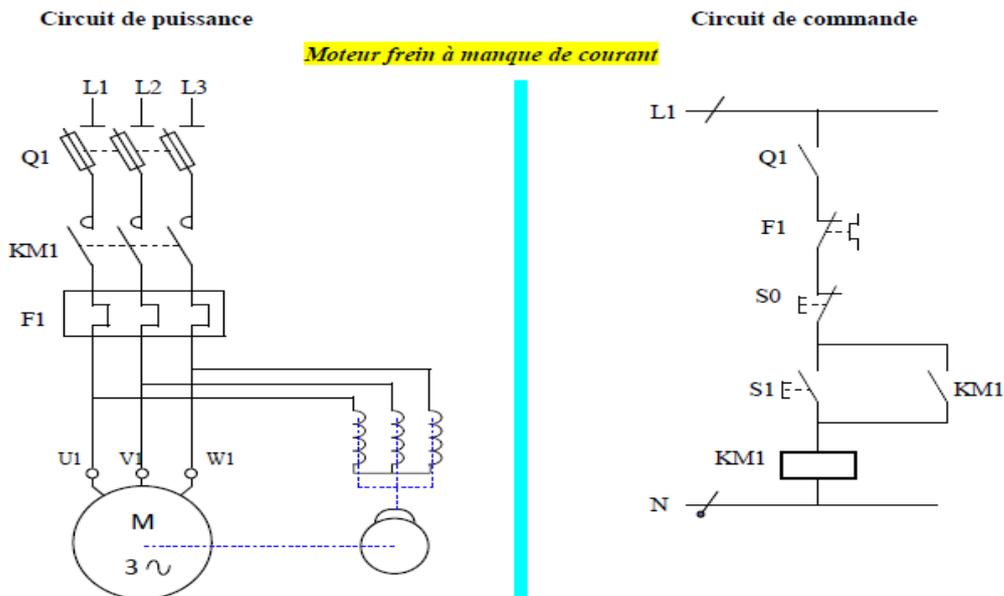


Figure (III.2.1) Schémas des circuits de puissance et de commande

Frein à manquer de courant.

- III.2.2. Frein à appel de courant :

Nécessite une alimentation électrique indépendante de celle du moteur.

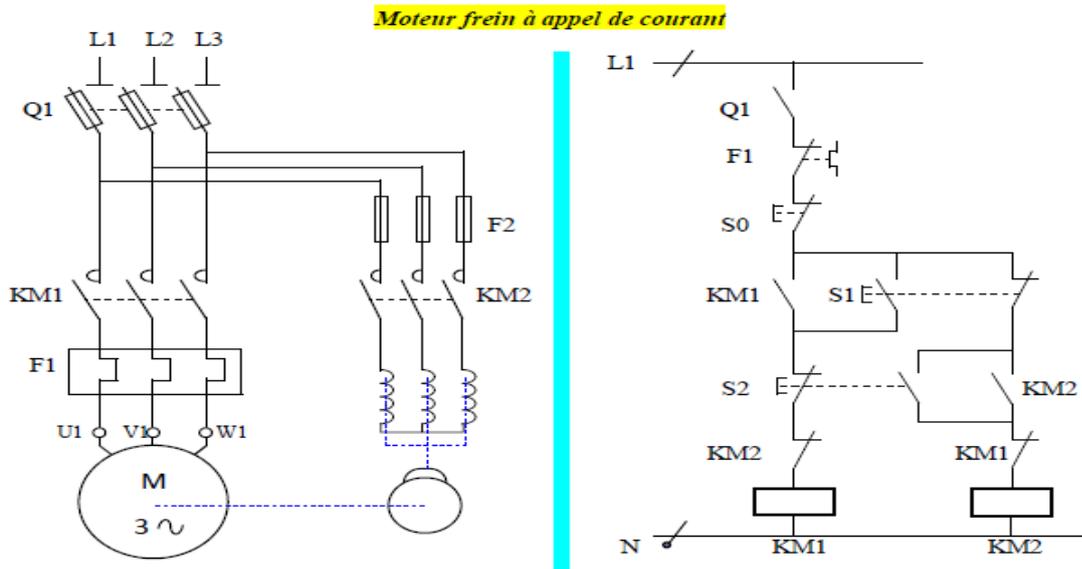


Figure (III.2.2) Schémas des circuits de puissance et de commande

Frein à appel de courant.

III.3.Freinage par contre-courant : [4]

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.

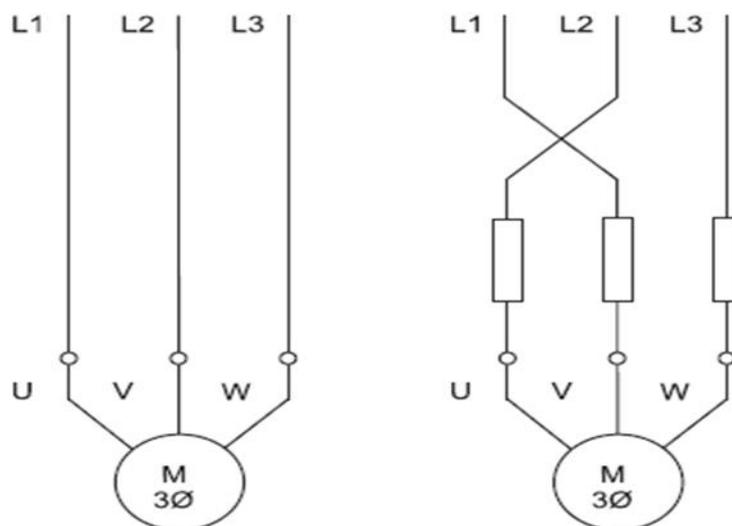


Figure (III.3.1) Principe du freinage à contre-courant

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).

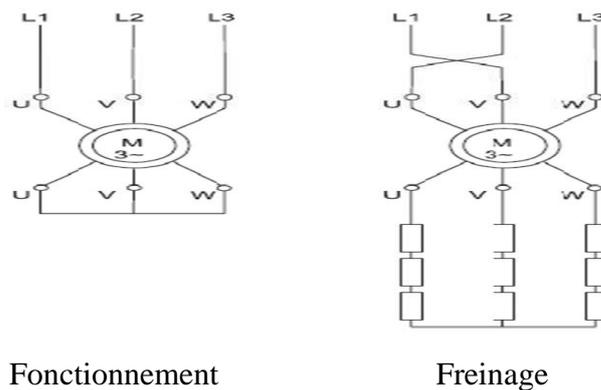


Figure (III.3.2) Principe du freinage à contre-courant pour une machine asynchrone à bagues.

III.3.1 Schémas de puissance et de commande dans le cas d'un moteur en court-circuit:

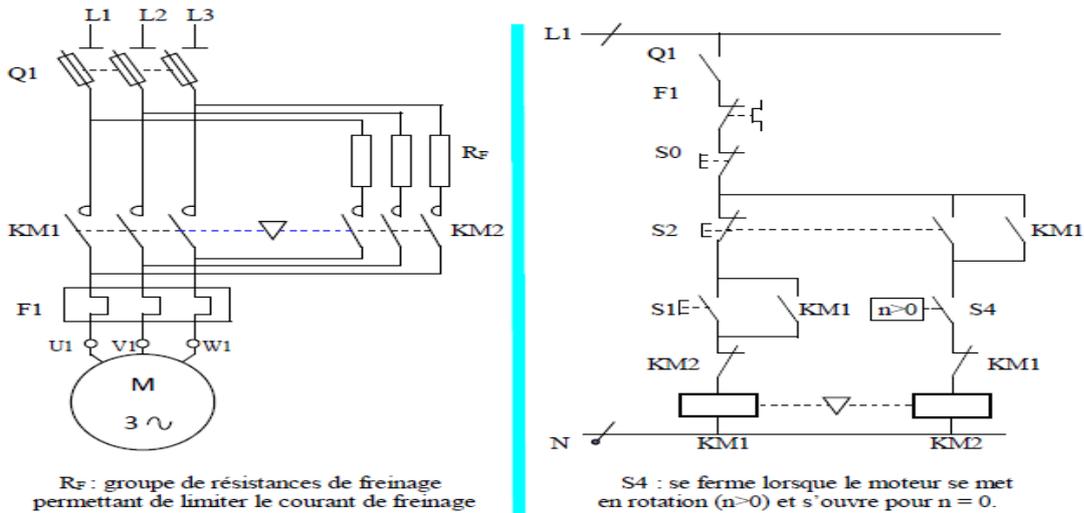


Figure (III.3.3) Schémas de puissance et de commande dans le cas d'un moteur en court-circuit.

III.3.2 Schémas de puissance et de commande dans le cas d'un moteur à bagues :

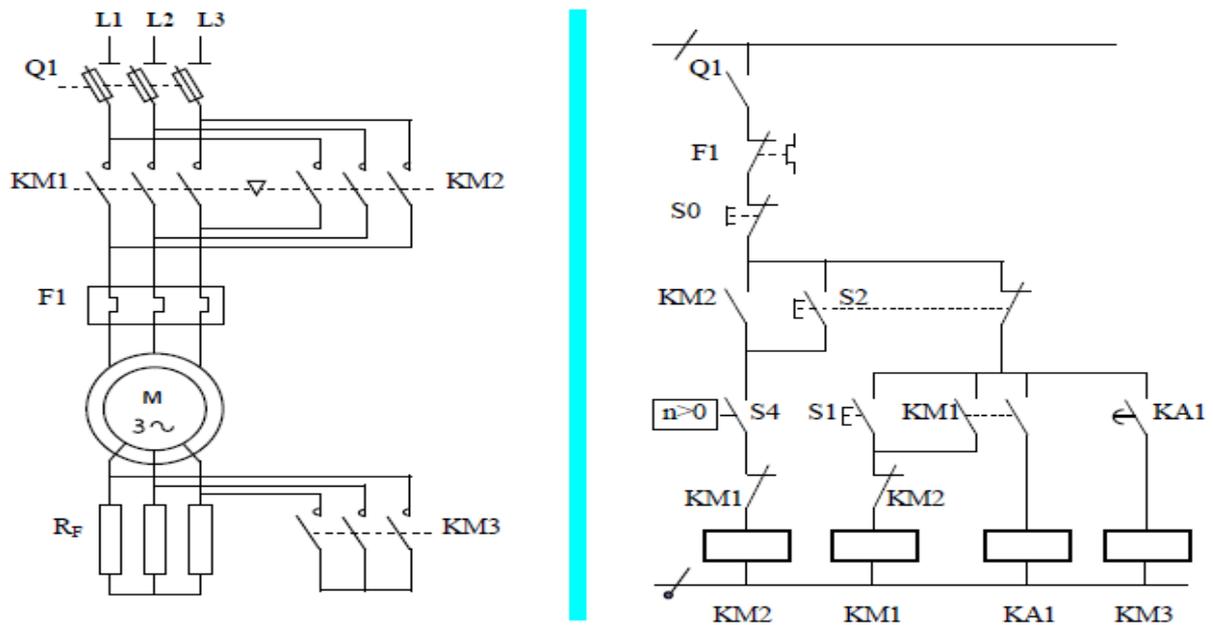


Figure (III.3.4) Schémas de puissance et de commande dans le cas d'un moteur à bagues.

III.4. Freinage par injection de courant continu :

III.4. 1 Principe :

On déconnecte les enroulements du stator, puis on les alimente avec une source de tension redressée. Le champ tournant est remplacé ainsi par un champ fixe (créé par la source de tension redressée) qui provoque le ralentissement du rotor.

Remarque :- Il n'y a toujours pas de blocage.

- Le courant de freinage est de l'ordre de 1,3 I_n .

La valeur moyenne de la tension redressée dépasse rarement 20V pour ne pas provoquer d'échauffement excessif.

- Les résistances rotoriques sont remises en service.

Critique Avantage : pas de risque de démarrage dans l'autre sens. Inconvénient : il faut couper le courant dans le stator pour éviter l'échauffement.

III.4. 2 Schémas des circuits de puissance et de commande :

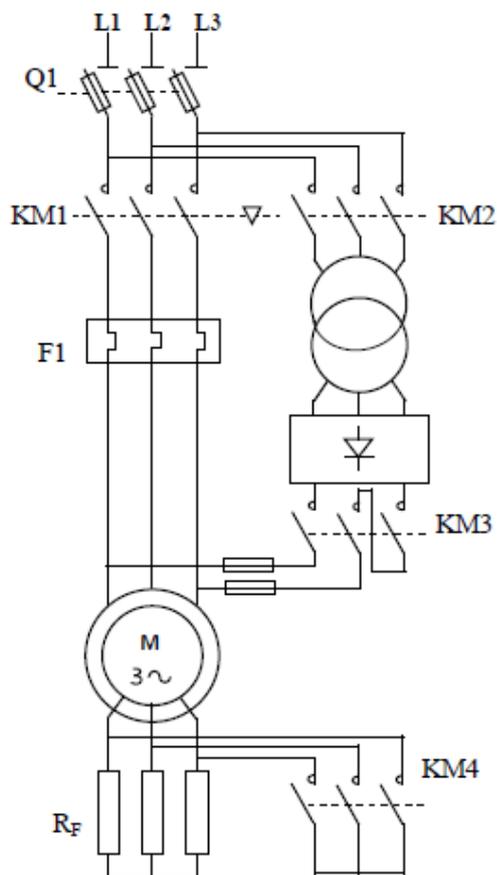


Figure (III.4.1) schémas de puissance

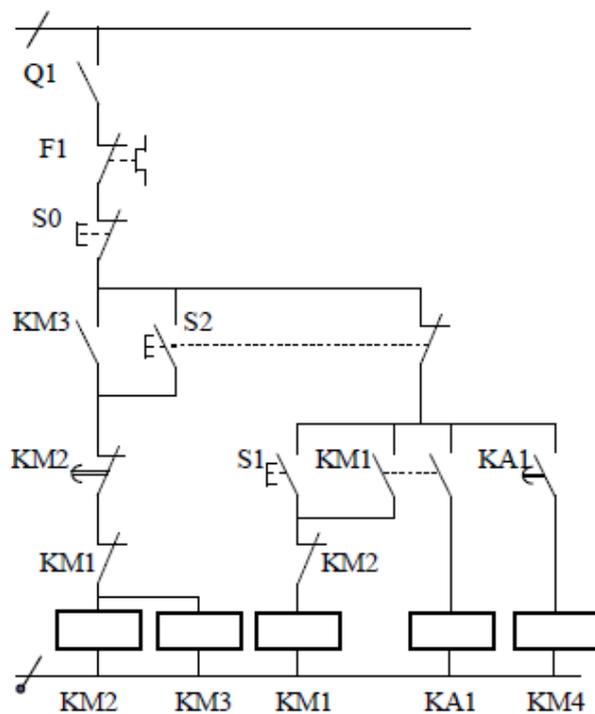


Figure (III.4.3) schémas de commande

III.5. Freinage électronique [4]:

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.6. Freinage par fonctionnement en hyper-synchrone [4] :

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.

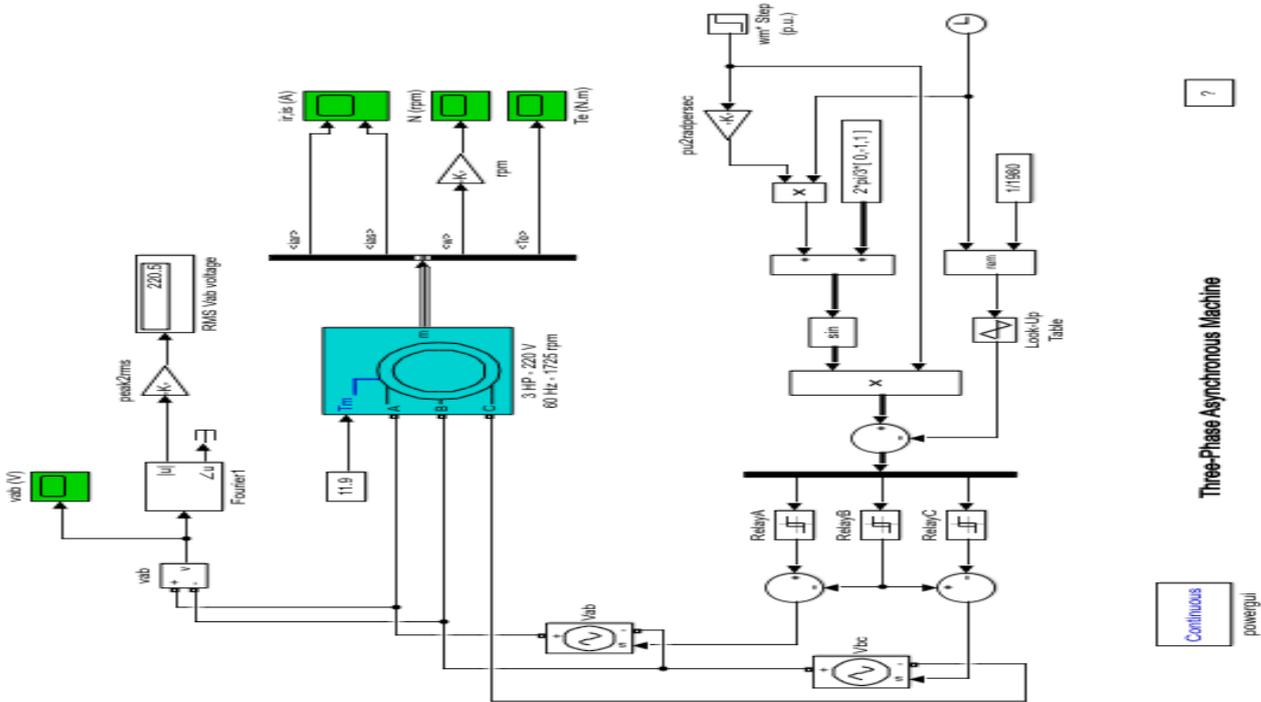
Ce fonctionnement possède les qualités idéales d'un système de retenu de charge entraînant :

- 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. :simulation d'un moteur asynchronetriphases:



- Tension entre phase :

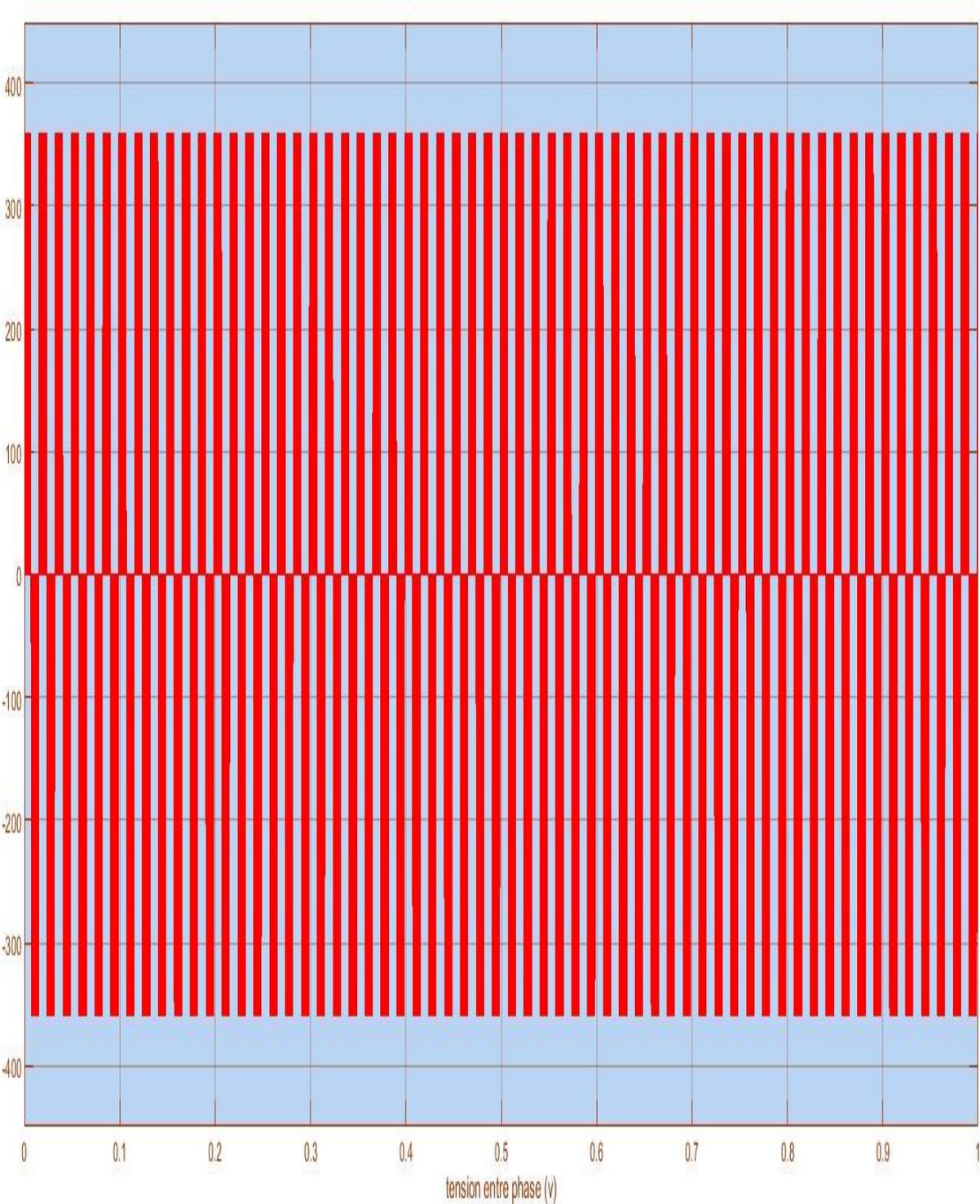


Figure 1 tension entre phcite

- **Courant de phase:**

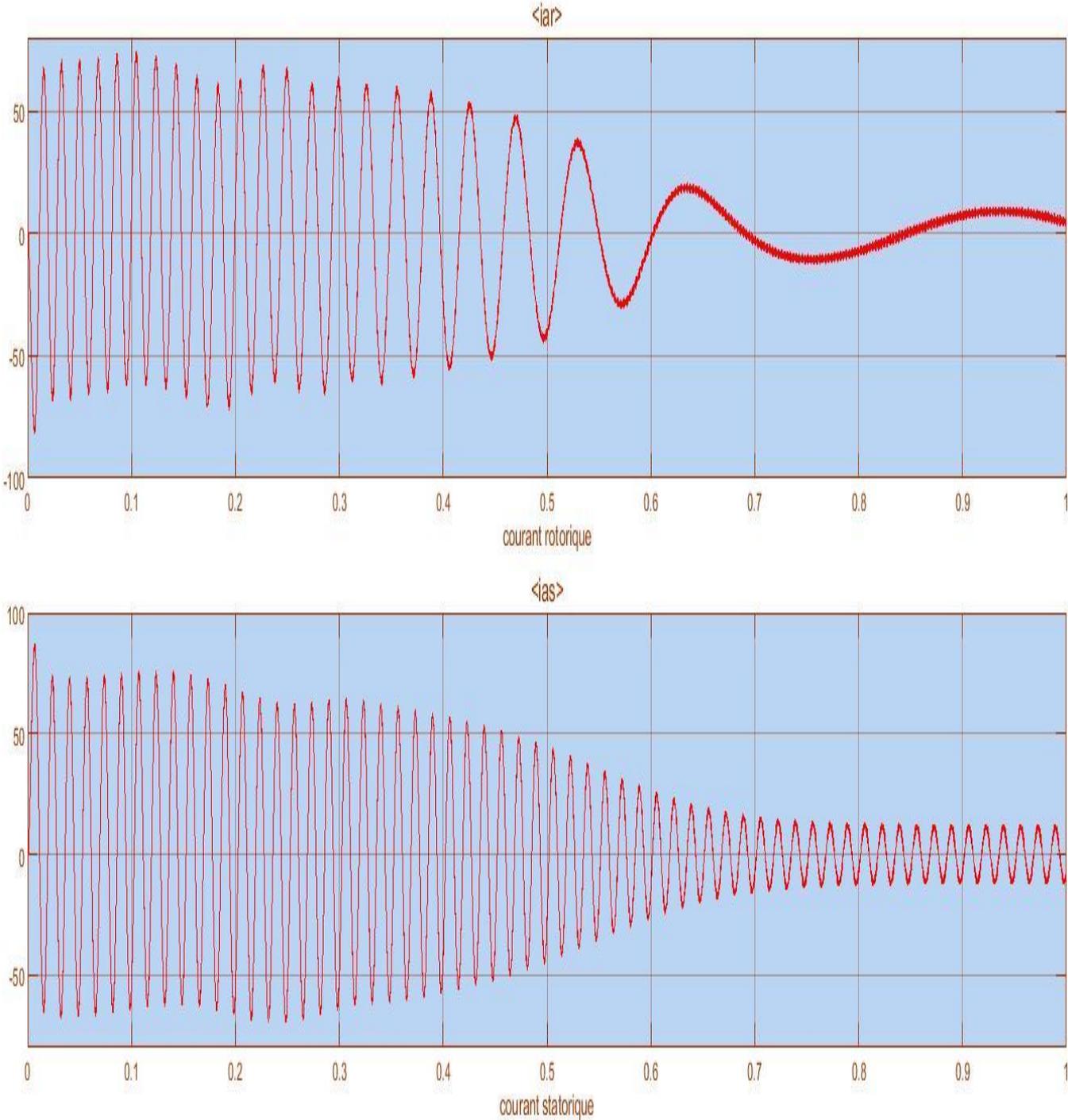
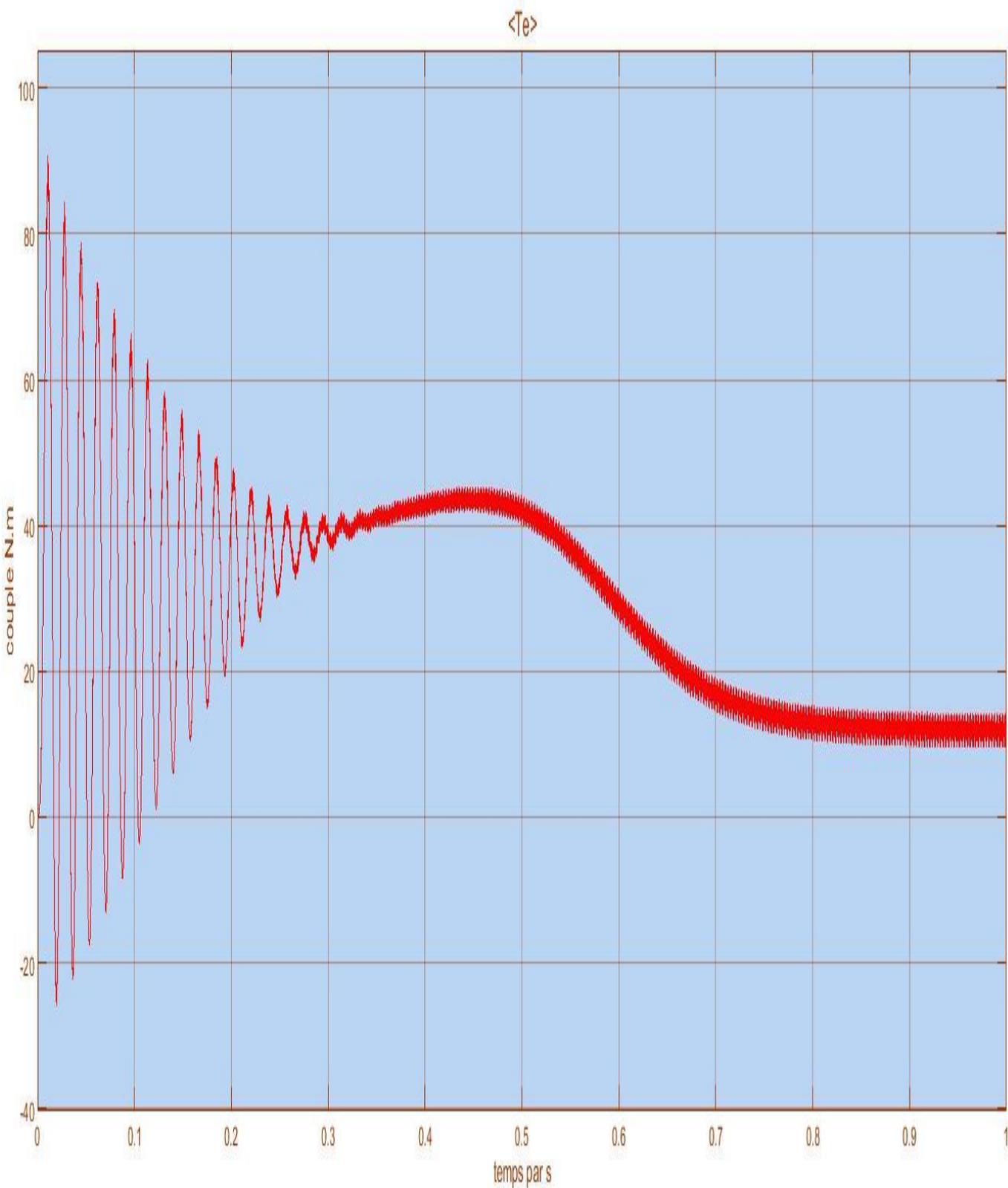


Figure 2 (courant de phase)

- **Couple électromagnétique :**



-Figure 3 (couple)-

- La courbe de la vitesse :

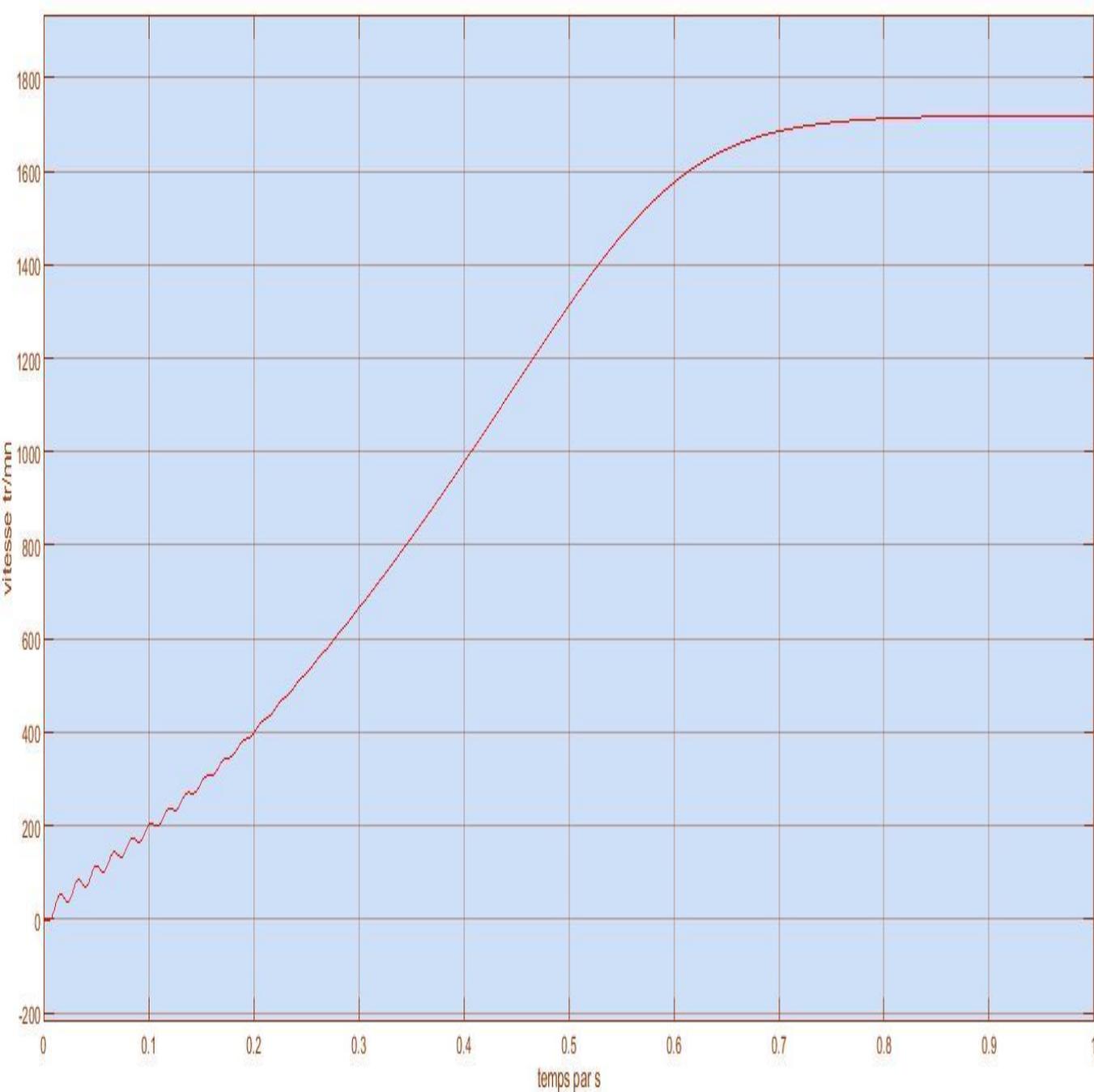


Figure 4 (vitesse)

Traitement des résultats de simulation :

.Le moteur asynchrone triphasé possède deux types de caractéristiques mécaniques :

- caractéristique statique ;
- caractéristique dynamique

Pour relever l'allure de la caractéristique dynamique, on utilise les couples mètres dynamique.

En réalité ce sont toutes sortes d'accéléromètres.

Le couple dynamique est déterminé d'après l'équation du mouvement comme :

$$C_{dyn} = qs$$

C'est-à-dire il est proportionnel à l'accélération.

Les résultats de simulation ont un centre que :

$$W = f(t)$$

$$c = f(t)$$

Les crevasses de la vitesse sont évidentes, à cause de l'oscillation du couple.

Après l'amortissement des courants libres, la variation du couple se rapproche de la caractéristique statique.

Plus la vitesse tend vers la vitesse synchrone plus le processus transitoire se manifeste de nouveau.

Pour un glissement inférieur au glissement critique, les courants dans les enroulements du moteur diminuent très vite au fur et à mesure que la vitesse augment.

Mais à cause de l'influence des inductances des enroulements la variation des courants est en retard par rapport à la variation de la vitesse.

ce phénomène se manifeste surtout, quand les constantes de temps τ_r et τ_s sont grandes et les valeurs du moment d'inertie sont petites. C'est pourquoi à la vitesse synchrone les courants rotoriques actifs n'amortissent pas jusqu'à zéro,

et le moteur continu à accélérer jusqu'à la vitesse supérieur à la vitesse synchrone.

au cours du dépassement de la vitesse synchrone les courants rotoriques diminuent, ainsi que le couple diminue et devient même négatif.

Donc on a les oscillations qui se manifestent à la fin du démarrage s'amortissent. L'analyse du processus transitoire électromagnétique dans le moteur asynchrone nous donne des résultats importants.

D'après les courbes $\mathbf{W} = f(t)$ et $\mathbf{c} = f(t)$ on déduit graphiquement $\mathbf{W} = f(c)$ c'est-à-dire la caractéristique mécanique du moteur asynchrone qui est représentée sur la Fig 2.

Les caractéristiques statique et dynamique sont différentes en particulier au début du processus à cause de l'existence des courants libres.

À la fin du démarrage ou les processus transitoires sont déjà amortis, on a les oscillations qui sont conditionnées d'après les inerties mécanique (moment d'inertie) et électrique (les inductances).

Sur la Fig 2 la caractéristique mécanique statique est obtenue par l'expérience, elle ne tient pas compte du processus transitoire. Il est à noter que la forme de la caractéristique mécanique dépend des paramètres des enroulements du moteur asynchrone et des inerties mécaniques, c'est-à-dire des paramètres de tout le système électromécanique.

III.7 Conclusion :

Dans ce chapitre on a cité quelques techniques de freinage des moteurs asynchrones triphasés avec la présentation des schémas électriques (schémas de puissance et de commande), afin de réaliser un freinage en toute sécurité.

Conclusions générales

Au cours de ce travail nous avons étudiés le fonctionnement d'un moteur asynchrone triphasés et équilibré a fréquence constante établi sous des hypothèses simplificatrices.

Après nous avons cite les différents modes de démarrage d'un moteur asynchrone triphasés et ses caractéristiques, et les différents schémas de circuit de commande et de puissance ainsi que les avantages et les inconvénients des différents modes de démarrage.

Dans notre étude nous avons présenté aussi les différents modes de freinages d'un moteur asynchrone triphasés, avec la présentation des schémas électriques (schéma commande _ schéma de puissance)

A la fin nous avons fait une simulation d'un moteur asynchrone triphasés, possède deux types de caractéristiques mécaniques: caractéristique statique _ caractéristique dynamique.

Donc on a les oscillations qui se manifestent a la fin du démarrage s, amortissent l'analyse du processus transitoire électromagnétique dans le moteur asynchrone, nous donne des résultats importants.

Bibliographie

[1] M.KOSTINKO, L.PIOTROVSKI « Machines électriques » Tome II. Edition Mir 1979.

[2] R.PERRET « Entrainement électrique2 ». Edition Lavoisier 2007

[3] Physique Appliquée, terminale électrotechnique - collection R. Mérat et R.

[4] Démarrage et protection des moteurs asynchrones triphasés, Schneider Electric

[6] Notions fondamentales sur le démarrage des moteurs, (Rockwell automation).