



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique

جامعة وهران 2 محمد بن أحمد
Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed

معهد الصيانة والأمن الصناعي
Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle

Département de Maintenance en Instrumentation

MÉMOIRE

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Maintenance en Instrumentation

Spécialité : Mesure – Analyse - Qualité

Thème

**Simulation Matlab de tous les démarrages d'un
moteur asynchrone**

Présenté et soutenu publiquement par :

AZZOUNE Nadjib

BEN AHMED Lahcen

Devant le jury composé de :

Nom et Prénom	Grade	Etablissement	Qualité
CHENNOUFI Mohamed	M.A.A	Unive 2 IMSI	Président
CHOUITEK Mama	M.C.B	Unive 2 IMSI	Encadreur
BOURAHLA Boumadiane	M.A.B	Unive 2 IMSI	Examinateur

Juin2017

REMERCIEMENTS

Au nom d'ALLAH, le tout miséricordieux, le très miséricordieux, par de divinité à part lui, le vivant, celui qui subsiste par lui-même

Nous remercions avant tous ALLAH pour son aide, ses innombrables dons, ALLAH qui nous a donné la force, la volonté et le moral pour accomplir nos études

Nous remercions notre encadreur **M^{me} CHouitek Mama** pour l'aide qu'elle a fourni afin d'achever ce modeste travail.

J'adresse également mes remerciements aux examinateurs pour avoir accepté de juger notre travail.

Que soient remerciés tous nos enseignants durant toutes nos années d'études.

Enfin, nous n'oublions pas de remercier nos chers parents et toutes les personnes qui nous ont aidés de prêt ou de loin à réaliser ce travail dans les meilleures conditions morales et matérielles.

NADJIB ET LAHCEN

DEDICACE

Nous remercions «ALLAH» les toutes puissances de nous avoir aidés à l'élaboration de ce travail, ainsi que les personnes qui ont contribué de près ou de loin qu'ils trouvent ici le témoignage de notre gratitude.

Ce mémoire est dédié

A nos chères parents, qui par leurs amour, leurs précieux conseils, leurs compréhension, et a leur soutien, nous ont guidé vers la voix de la réussite.

A Mme.Chuitek notre encadreur

A nos frères et sœurs,

A tout nos familles,

A tout nos amis,

*A nos collègues et surtout à ceux de la spécialité : Mesure-Analyse-
Qualité.*

*A nos enseignants de l'institut de maintenance et de sécurité
industrielle,*

A toute la famille universitaire d'Oran,

A tous ceux que nous avons oubliés involontairement.

ملخص

إن التقدم المحرز في مجال إلكترونيك القدرة و دارات التحكم ساهم في الاستخدام المتزايد للمحركات التزامنية نظرا لما تتميز به من خصائص كالصلابة و التكلفة و الاستطاعة و نظرا لتعدد استعمالاتها فإننا نحصى العديد من تقنيات التشغيل مختلفة الميزات و الإمكانيات و هذا للحد من الاستهلاك المفرط للتيار عند التشغيل و ما يترتب عنه من جهد و سرعة. في هذا العمل تطرقنا إلى كيفية عمل دارات التشغيل و التحكم لكل نوع من أنواع التشغيل و حددنا النقاط الايجابية و السلبية لكل منها. بعد ذلك قمنا بمحاكاة تشغيلها بكيفيتين مختلفتين الأولى المحرك مستقل و الثانية المحرك زائد العمل.

RESUME

Les progrès réalisés en matière d'électronique de puissance et de circuits de commande ont contribué à l'utilisation grandissante des machines asynchrones dans les systèmes d'entrainements électrique. Le recours aux machines asynchrones et surtout lié à leur robustesse, leur puissance massique, leur coût de fabrication et la capacité.

En raison de la multiplicité d'utilisation, on compte des différentes techniques d'exploitation caractéristique et capacités, et cela pour réduire la consommation excessive du courant lors de démarrage et de la conséquence de ses efforts et de la vitesse.

Dans ce travail, nous avons discuté les façons de travaille, les circuits de commande et puissance, et les avantages et les inconvénients de chacun type.

En fin, nous avons simulé son démarrage de deux façons : l'une avec un moteur et vide et l'autre le moteur est relié à une charge

Mots clés : Moteur asynchrone – Champ magnétique – Démarrage – Couple – Puissance – Commande – Matlab – Simulink

ABSTRACT

Advances in electronics power and control circuits have contributed to the growing use of asynchronous machines in electric drive systems. The use of asynchronous machines is mainly linked to their robustness, power density and their manufacturing cost and capacity.

Due to the multiplicity of use, we count many different operating techniques to reduce the excessive use of the current during the start, and the consequence of its forces and the speed.

In this work we discussed how operating circuits and control for each type and we identified the positive and negative points for each.

Then we simulated its operation in two different ways : the first is the engine is independent and the second is : motor is connected to the load.

KEYWORDS: Asynchronous machine – Magnetic field – Start-up – Power – Couple – Commande – Matlab – Simulink

Sommaire

Tableaux des matières

Notion et symbole	1
-------------------------	---

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale.....	03
----------------------------	----

CHAPITRE 01:Généralité sur les machine asynchrones

I.1 Introduction.....	05
-----------------------	----

I.2 Historique sur les machine asynchrones.....	05
---	----

I.3 Constitution des machines asynchrones	05
---	----

I.3.1Le stator.....	06
---------------------	----

I.3.2 Le rotor	07
----------------------	----

A- Rotor à bague	07
------------------------	----

B-Rotor à cage.....	08
---------------------	----

C-Entrfer	09
-----------------	----

I.4 Symbole	09
-------------------	----

I.5 Principe de fonctionnement du moteur à induction	09
--	----

I.5.1 Définition du glissement	10
--------------------------------------	----

I.5.2 Bilan de puissance.....	11
-------------------------------	----

I.5.3 Rendement	11
-----------------------	----

I.6 Caractéristiques du moteur asynchrone	12
I.6.1 Fonctionnement à vide	12
I.6.2 Fonctionnement en charge	12
I.6.3 Caractéristiques mécanique $C_u=F(n)$	12
I.6.4 Point du fonctionnement du moteur en charge	12
I.6.5 Caractéristique $C_u=F(n)$	13
I.6.6 Résumé des caractéristiques	14
I.7 Couplage de la plaque a bornes	14
I.8 Branchement du moteur sur le réseau triphasé	15
I.9 Plaque signalétique	16
I.10 Réversibilité	16
I.11 conséquences d'une variation de la tension ou de la fréquence sur un moteur asynchrone	16
I.11.1 Augmentation ou la diminution de la tension	16
I.11.2 Augmentation ou diminution de la fréquence	17
I.12 Démarrage des moteur à induction.....	17
I.13 Commande des moteurs	18
I.14 Utilisation du moteur asynchrone	18
I.15 Les avantages et les inconvénients du moteur asynchrone	20
I.15.1 Les avantage du moteur asynchrone.....	20
I.15.2 Les inconvénients du moteur asynchrone	21

I.16 Conclusion	21
-----------------------	----

CHAPITRE 02: Modélisation d'une machine asynchrone

II.1 Intoduction	22
II.2 Généralités sur les machines asynchrone triphasée.....	22
II.2.1 Définition	22
II.2.2 Description.....	22
II.2.3 Problèmes posée par le moteur asynchrone	23
II.3 Modélisation du moteur asynchrone	23
II.3.1 Hypotèses simplificatrices	23
II.3.2 Mise en équation	24
A. Equations électriques.....	24
B. Equations magnétiques.....	26
C. Equation mécaniques	27
II.4 Transformation de Park	28
II.4.1 Equations électriques	29
II.4.2 Equation magnétique.....	30
II.4.3 Expression du couple électromagnétique et de puissance	30
II.4.4 Equation mécanique	31
II.5 Choix du référentiel	32
II.5.1 Référentiel immobile par rapport au stator.....	32
II.5.2 Référentiel immobile par rapport au champ tournant	33

II.5.3 Référenciel immobile par rapport au rotor	33
II.6 Mise en équation d'état	34
II.7 Conclusion.....	37
CHAPITRE 03: Démarrage des moteurs asynchrones à cage	
III.1 Introduction	38
III.2 Moteur asynchrone triphasé à rotor en court-circuit	39
III.3. Fonctionnement - constitution.....	39
III.3.1 Constitution	39
III.3.2 Fonctionnement	39
III.4 Caractéristique des moteur à cage	40
III.5 Avantages des moteur à cage	41
III.6 Inconvénients des moteur asynchrone à cage	41
III.7 Démarrage des moteur asynchrone à cage.....	41
III.8 Conduction d'un démarrage correct	42
III.9 Démarrage direct	42
III.10 Démarrage des moteur à enroulements partagés « part-winding »	45
III.11 Démarrage étoile/triangle.....	50
III.12 Démarrage statorique a résistances	52
III.13 Démarrage par auto-transformateur	56
III.14 Conclusion.....	61

Tableau comparatif des différents modes de démarrages des moteurs asynchrones triphasés.....	62
--	----

CHAPITRE 04: Simulation des différents procédés de démarrage des moteurs asynchrones

IV.1 Résultats des simulation.....	63
IV.1.1 Démarrage direct.....	63
IV.1.2 Démarrage étoile/triangle	64
IV.1.3 Démarrage par autotransformateur	65
IV.1.4 Démarrage statorique à résistance	66
IV.2 interprétation des résultats de la simulation	67
IV.2.1 Démarrage direct.....	67
IV.2.2 Démarrage étoile/triangle.....	67
IV.2.3 Démarrage par autotransformateur	68
IV.2.4 Démarrage statorique à résistance	68
IV.3 conclusion	68

Conclusion générale

Annexe 1

Annexe 2

Bibliographie

Notions et symboles

Notions et symboles

Symbole	signification
MAS	Machine asynchrone.
ω	pulsation électrique.
Ω	Vitesse mécanique.
Ω_s	Vitesse synchrone de rotation du champ tournant.
Ω_r	Vitesse de rotation du rotor
g	Glissement ou la variation relative des vitesse statorique et rotorique
P	Nombre de paire de pole.
V	Tension simple.
U	Tension composé.
R	Résistance.
I	Courant.
In	Courant nominale.
K	Moment d'inertie des masses tournantes
t	Temps
C_m	Couple électromagnétique.
C_r	Couple résistance imposé à la machine.
a,b,c	Indices correspondant aux trois phase a,b,c
r	Grandeur rotor ou de repère rotor (R)
s	Grandeur stator ou de repère stator (S)
d-q	Axe direct (en quadrature).
α,β	Axe correspondants au référentiel fixe par rapport au stator.
f	Fréquence d'alimentation.
ir a,b,c	Courants rotoriques instantanés.
is a,b,c	Courant statoriques instantanés.

$I_{x,s,r}$	Courant statorique d'axe direct (en quadrature).
$I_{dr,dq}$	Courant rotorique d'axe direct (en quadrature)
J	Moment d'inertie des masses tournantes
L_r	Inductance propre d'une phase statorique.
L_m	Inductance mutuelle stator rotor.
M_s	coefficient de mutuelle inductance entre deux phases du stator.
M_r	coefficient de mutuelle inductance entre deux phases du rotor.
M_{sr}	Maximum de l'inductance mutuelle entre une phase du rotor et une phase du stator lorsque les axes sont alignés.
σ	coefficient de dispersion de Blondel.
V_{sa},V_{sb},V_{sc}	Tensions appliquée aux trois phases statoriques.
$\Phi_{sa},\Phi_{sb},\Phi_{sc}$	Le flux total à travers ces enroulements.
r_s	Résistance d'un phase statorique.
r_r	Résistance d'un phase rotorique.
[A]	Matrice de transformation de Park.
[B]	Matrice d'entrée

Introduction générale

INTRODUCTION GENERALE

Les moteurs électriques sont de nos jours, à l'exception des dispositifs d'éclairage, les récepteurs les plus nombreux dans les industries. 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 existant, les moteurs asynchrones triphasés notamment les moteurs à cage sont les plus utilisés dans l'industrie et au-delà d'une certaine puissance dans la plupart des applications. De plus, bien que leur commande par des équipements à contacteurs soit parfaitement adaptée pour un grand nombre 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.

L'utilisation des moteurs asynchrones dit à induction associés à des convertisseurs se généralise dans les applications nécessitant de fortes performances, notamment en couple dynamique (au démarrage ou aux changements de régime), et en précision et plage de vitesse.

L'Objectif de notre thèse est une présentation des divers types de moteurs asynchrones et de leur principe de fonctionnement, on détaillera plus particulièrement les différentes techniques de démarrage de moteurs asynchrones et leurs simulations. Notre présent mémoire est constitué de quatre chapitres, le premier expose une généralité sur les moteurs asynchrone, leur constitution et leur principe de fonctionnement et les différents éléments de protection utilisé pour ces moteurs.

Suivi d'un second chapitre ou on présentera la modélisation de la machine asynchrone en régime sain. En effet, nous avons modélisé la machine dans le repère de Park.

La modélisation sera détaillée depuis les équations du modèle triphasé jusqu'à l'obtention des équations finales. Le troisième chapitre présente une étude sur les moteurs asynchrone à cage et les différents procédés de démarrage utilisé pour ce type.

Le quatrième chapitre sera consacré à une étude sur les moteurs asynchrones à bague et les différents procédés de démarrage utilisés pour ce type de moteur, dans le cinquième chapitre on présentera une interprétation des résultats des simulations des différents types de démarrage utilisés pour les moteurs asynchrones triphasés.

Enfin on terminera par une conclusion générale présentant le travail accompli, les difficultés rencontrées et les perspectives pour la continuité de ce travail.

Chapitre I :

Généralités sur la machine asynchrone.

Introduction

L'entraînement des machines est assuré en très grande majorité par des moteurs asynchrones, alimentés en courant alternatif triphasé et Quelques 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 nous paraît donc indispensable des rappeler les principes des constructions et de fonctionnement de ces moteurs, puis de décrire et de comparer les principaux dispositifs de démarrage qui leur sont associés. [1]

I.1 Historiques sur les machines asynchrones

Historiquement le dix-neuvième siècle fut l'époque des grandes découvertes en Electrotechnique dont les bases fondamentales ont été établies (1820—1830) par des hommes de science parmi lesquels on peut citer, OERSTED, AMPERE, BIOT, SAVART, LAPLACE, OHM, FARADAY; plus tard en (1873) MAXWELL formalisa les lois de l'électromagnétisme moderne dans son ouvrage fameux ; "Treatise on Electricity and Magnésme"

Mais ce n'est qu'à partir de (1870) que l'électrotechnique industrielle s'affirma notamment grâce a la production d'énergie électrique par les génératrices a courant continu (dynamos) de gramme et de siemens. Ensuite, dans les années (1880), furent conçus les alternateurs et les transformateurs polyphasés. Les premiers devaient concurrencer et détrôner les dynamos pour la production de l'électricité, enfin les travaux du yougoslave TESLA et de l'italien FERRARIS complétèrent les systèmes a courant alternatifs polyphasés par la conception et la construction des machines d'induction ou asynchrones en (1888). [2]

. Les machines asynchrones couvrent actuellement l'essentiel de besoins de la transformation d'énergie électrique en énergie mécanique, A titre d'exemple, elles sont utilisées pour la quasi-totalité des fonctions auxiliaires d'une centrale de production électrique ; ils sont généralement de même dans les procédés industrielles. L'étude de ces machines acquit donc une grande importance.

I.2 Constitution des machines asynchrones

Les moteurs asynchrones, appelés moteur à induction, sont pratiquement tous des moteurs triphasés. Ils sont basés sur l'entraînement d'une masse métallique par l'action d'un champ tournant. [3]

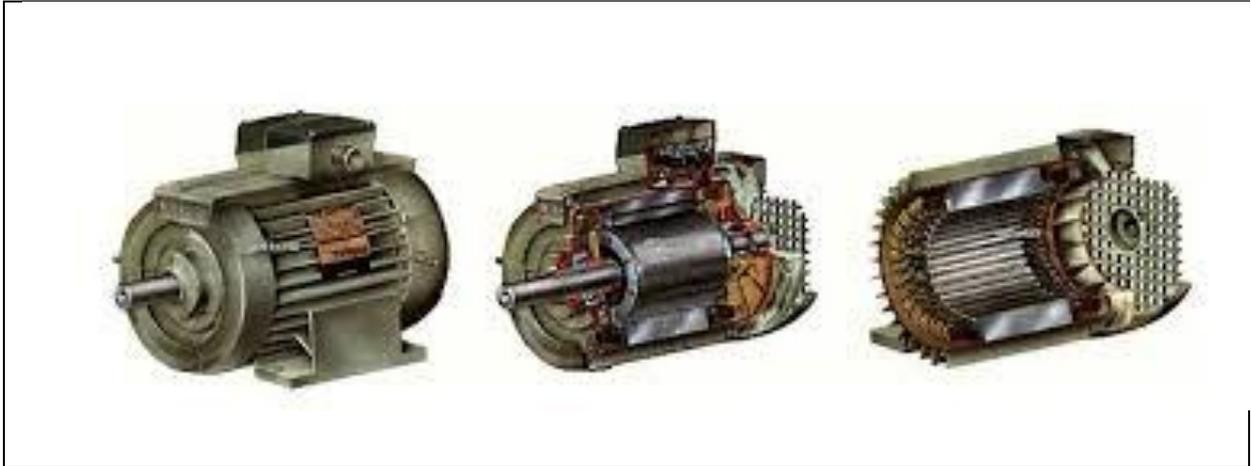


Figure I.1 : Machine asynchrone

Les moteurs asynchrones triphasés sont des convertisseurs électromagnétiques qui transforment l'énergie électrique fournie par le réseau en énergie mécanique dont la vitesse de rotation N pour une fréquence donnée ' f ' dépend de la charge.

Les moteurs asynchrones comportant deux armatures coaxiales à champ tournant, l'une est fixe (c'est le stator) et l'autre mobile (c'est le rotor). [3]

I.2.1 Le stator

Il est appelé inducteur ou primaire, il est fixé au bâti et formé d'une carcasse ayant l'aspect général d'un cylindre creux, à l'intérieur duquel se trouve le circuit magnétique composé d'un empilage de tôles ayant la forme de couronnes circulaires.

A leur périphérie interne, ces tôles comportent un certain nombre d'encoches régulièrement réparties qui, par suite de l'empilage créent des rainures, ou sont logés des faisceaux du bobinage.

La figure (I-2) représente un stator comportant un bobinage triphasé, dont chaque phase ne comporte qu'une bobine occupant deux encoches diamétralement opposées, les trois phases sont identiques mais décalées entre elle de $2\pi/3$.

Cet enroulement (bobines), est alimenté en triphasé par l'intermédiaire de la plaque à bornes ce qui permet de l'alimenter en étoile ou en triangle, et possède des p paires de pôles, [4]. Les courants alternatifs dans le stator créent un champ magnétique B tournant à la pulsation de synchronisme. [11]

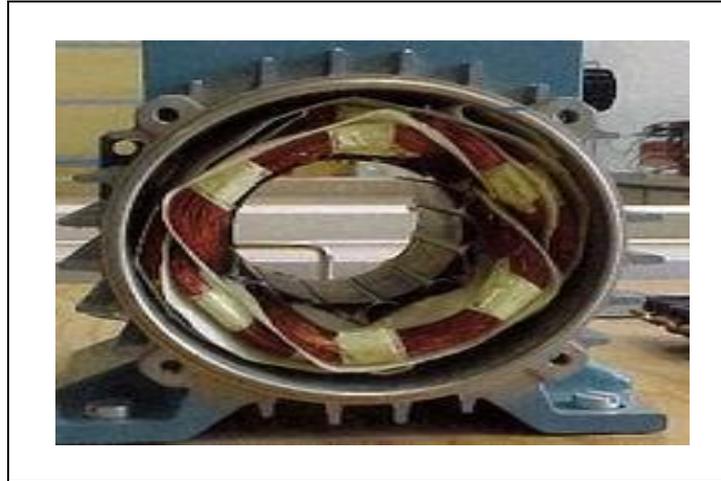


Figure I.2: Stator d'une machine asynchrone.

$$\Omega_s = \frac{\omega}{p}$$

Ω_s : vitesse synchrone de rotation du champ tournant en rad.s-1.

ω : pulsation des courants alternatifs en rad.s-1 $\omega = 2\pi f$

p : nombre de paires de pôles

I.2.2 Le rotor

Le rotor n'est lié électriquement à aucune source d'énergie (ni continue, ni alternative) ce qui simplifie beaucoup sa construction, on distingue deux type de rotor. [3]

A - Rotor a bagues

Ce rotor à pole lisse comporte dans ces rainures un enroulement identique à celui du stator, les trois phases sont branchées en étoile ce qui permet d'insérer un rhéostat dans leur circuit, ce rhéostat qui mis en marche normale et permet d'assurer de meilleures conditions de démarrage

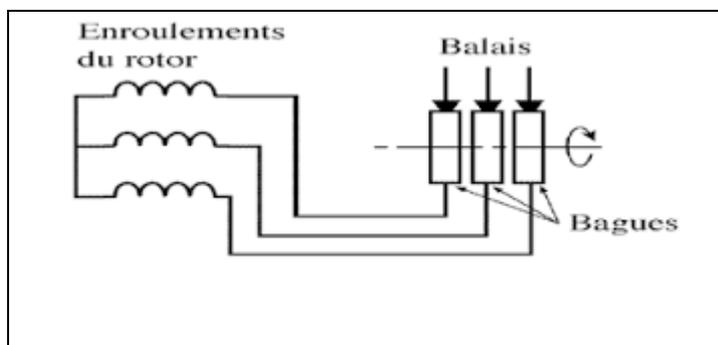


Figure I.3 : Un rotor bobiné

Signalons que, si le nombre des pôles du rotor est obligatoirement le même, que celui de stator, le nombre de phases peut être différent. Cependant, il n'est pas intéressant pour un moteur à bague d'augmenter le nombre des phases du rotor car il faudrait augmenter le nombre des bagues et des balais. [3]

B - Rotor à cage

L'enroulement est remplacé des barres de cuivre ou d'aluminium logées dans des encoches, et réunies à leurs extrémités par deux couronnes de cuivre ou d'aluminium. Es cages comportent généralement des barreaux décalés afin de réduire les harmoniques d'encoches, il en résulte une légère diminution de la **F.E.M** induite par le champ tournant statorique dans ces barreaux. Un tel rotor est très robuste, puis sa construction est particulièrement économique.

La cage étant généralement réalisée avec l'aluminium que l'on coule dans les encoches préparées à l'avance. En effet il n'est pas nécessaire d'isoler les barres et la masse du rotor, car les courants induits s'établissent surtout dans les barres, et leur étude théorique est identique à celle des moteurs à bagues.

Un rotor à cage est assimilable a un rotor à bagues qui aurait $q=N$ phases si la cage tourne dans un champ bipolaire alors qu'il a $q=N / p$ tourne à un champ $2p$ pôles.

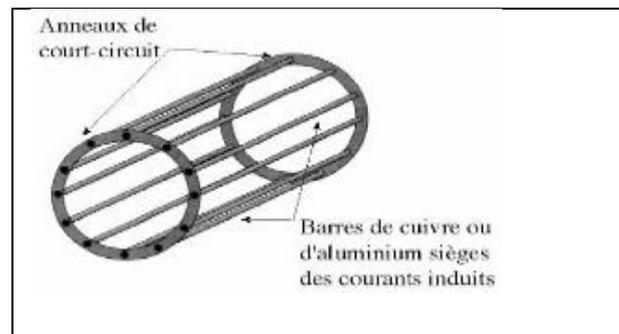


Figure I.4 : Un rotor à cage d'écureuil

Par comparaison avec les moteurs à bague, les moteurs à cage ont l'avantage d'être robustes et ont un cout plus faible. Il n'est pas possible de faire varier la résistance de leur rotor. Ce qui rend défavorable les conditions de démarrage quand on l'aliment à tension et à

fréquence constantes. On remédie cet inconvénient en utilisant soit des rotors à double cages, soit des rotors à une seule cage. [3]

C - Entrefer

L'entrefer est l'espace entre le stator et le rotor. [12]

I.3 Symboles

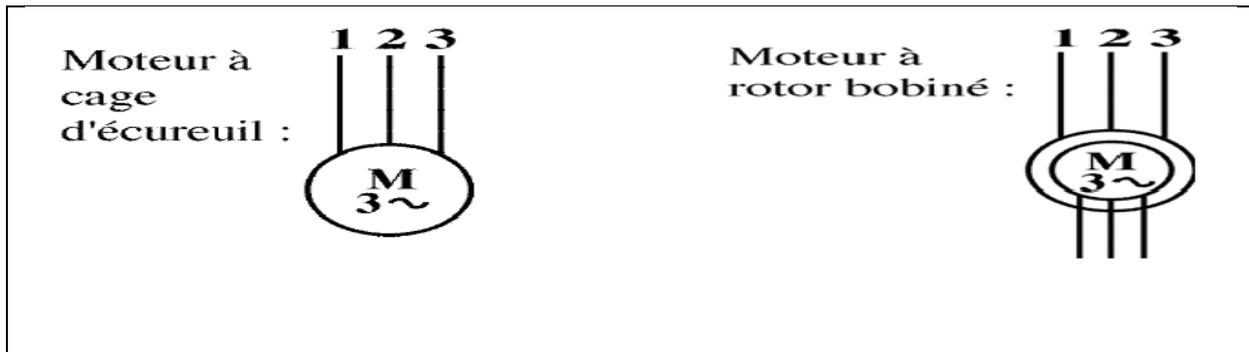


Figure I.5 : Symbole d'un moteur asynchrone.

I.4 Principe de fonctionnement du moteur à induction

Le principe de fonctionnement des moteurs asynchrones est basé sur la production d'un champ tournant. On considère qu'un aimant tournant produit un champ électromagnétique qui traverse un cylindre métallique.

Les génératrices du cylindre placées dans le champ se comportent comme des brins actifs (AB et CD).

Elles sont parcourues par un courant proportionnel à F et engendrent des forces perpendiculaires qui constituent le couple.

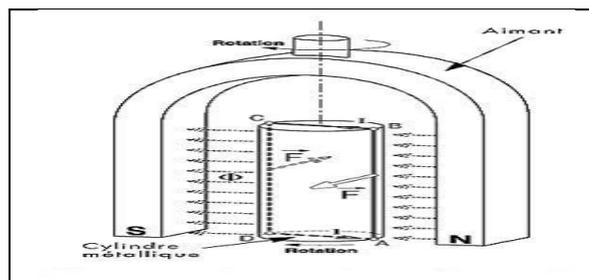


Figure I.6 : Principe de base d'un moteur.

On constate que le cylindre suit la rotation de l'aimant avec un léger décalage appelé glissement.

Sur les moteurs asynchrones triphasés .le champ tournant est produit par trois bobinages fixés géométriquement décalés 120° , et parcourus par des courants alternatifs présentant le même décalage électrique. Les trois champs alternatifs qu'ils produisent se compensent pour former un champ tournant d'amplitude constante comme il est présenté dans cette figure.

[10]

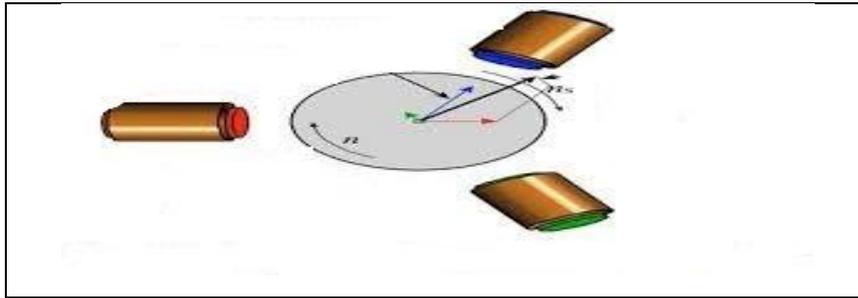


Figure I.7: Principe de fonctionnement d'un moteur à induction.

I.5 Définition de glissement

Par définition, le glissement est l'écart des vitesses angulaires synchrones Ω_s et réelles Ω_r rapporté à la vitesse du champ tournant

$$g = \frac{\Omega_s - \Omega_r}{\Omega_s} = \frac{n_s - n_r}{n_s}$$

n_s : vitesse de rotation de synchronisme du champ tournant (tr.s^{-1})

n_r : vitesse de rotation du rotor (tr.s^{-1})

$$\Omega_s = 2 \pi n_s / 60 \text{ (rad. s}^{-1}\text{)}$$

$$\Omega = 2 \pi n / 60 \text{ (rad. S}^{-1}\text{)}$$

Examinons les différents cas possibles :

$g = 0$ pour $n_r = n_s$ il n'y a pas de couple.

$G < 0$ pour $n_r > n_s$ la machine fonction en génératrice.

$G > 0$ pour $n_r < n_s$ la machine fonction en moteur.

$G = 1$ pour $n_r = 0$ la machine est à l'arrêt ou à l'instant de démarrage

$g > 1$ pour $n_r < 0$ la vitesse de rotation est l'inverse de celle du champ tournant, le moteur fonction en mode freinage. [4]

I.6 Bilan des puissances du moteur

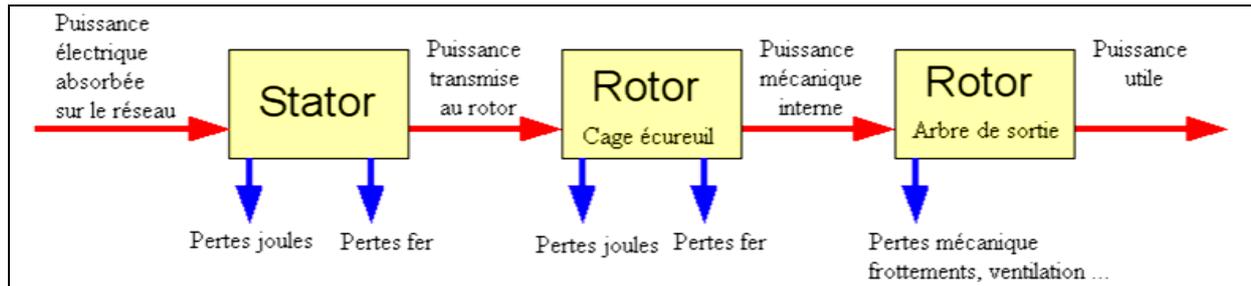


Figure I.8 : Bilan des puissances du moteur.

Le moteur absorbe du réseau la puissance

$$P_a = \sqrt{3} U I \cos \alpha$$

Une partie de cette puissance (1 à 2 %) est perdue dans le stator sous forme de pertes dans le fer (P_{fs}) et de pertes dans le cuivre dues à l'effet joule (P_{js}).

La puissance restante est alors transmise au rotor par le champ tournant sous la forme de puissance électromagnétique :

$$P_{tr} = P_a - (P_{js} - P_{fs})$$

Le rotor utilise cette puissance à deux fins : Une partie est gaspillée par l'effet joule dans les enroulements du rotor (résistance propre du rhéostat extérieur si celui-ci n'est pas en court circuit), l'autre partie se trouve en puissance mécanique P_m disponible sur l'arbre de moteur, [3]

I.7 Rendement

Le rendement d'un moteur asynchrone est la puissance de sortie sur la puissance d'entrée, c'est donc le rapport de la puissance utile sur la puissance absorbé. [3]

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

I.8 Caractéristique du moteur asynchrone :

I.8.1- Fonctionnement à vide :

A vide le moteur n'entraîne pas de charge.

Conséquence :

Le glissement est nul est le moteur tourne à la vitesse de synchronisme A vide : $g = 0$ donc $n_r = n_s$

Autre observations :

Le facteur de puissance à vide est très faible ($< 0,2$) et le courant absorbé reste fort (P est petit et Q est grand). On parle alors de courant réactif ou magnétisant (il sert à créer le champ magnétique).

I.8.2 - Fonctionnement en charge

Le moteur fournit maintenant de la puissance active, le stator appelle un courant actif.

Remarque : le moteur asynchrone est capable de démarrer en charge, [10]

A- Caractéristique mécanique $C_u=f(n)$

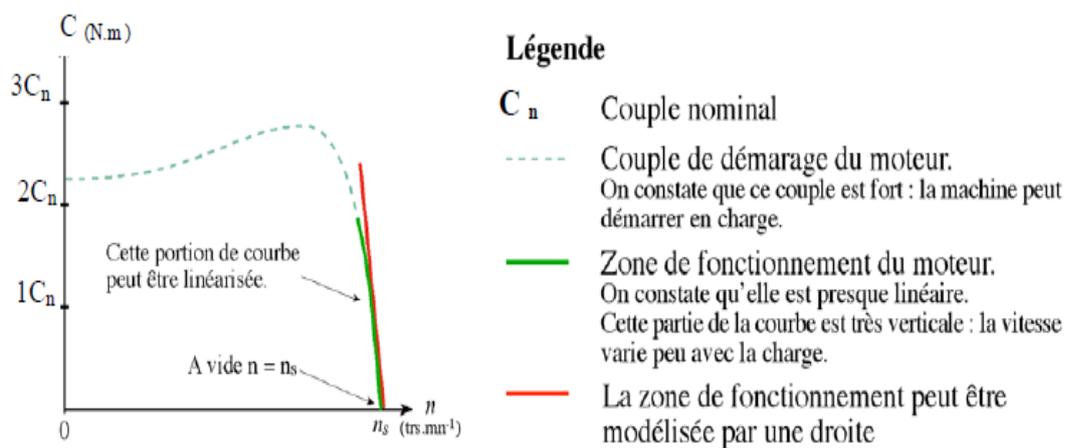


Figure I.9 : Caractéristique du moteur asynchrone.

B- Point du fonctionnement du moteur en charge :

Le couple varie avec la fréquence de rotation pour le moteur et pour la charge entraînée. la caractéristique du moteur et de la charge se croisent au point de fonctionnement pour lequel

les couples moteur et résistant sont identiques. La courbe du couple résistant dépend de la charge. [12]

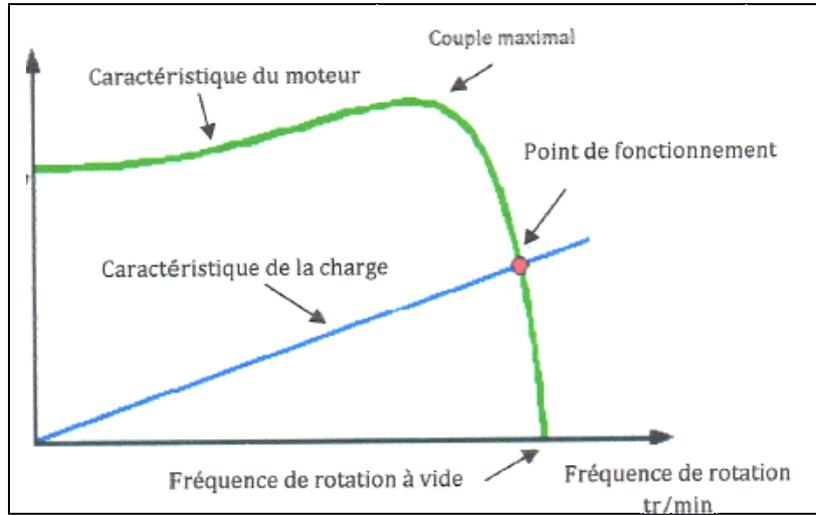
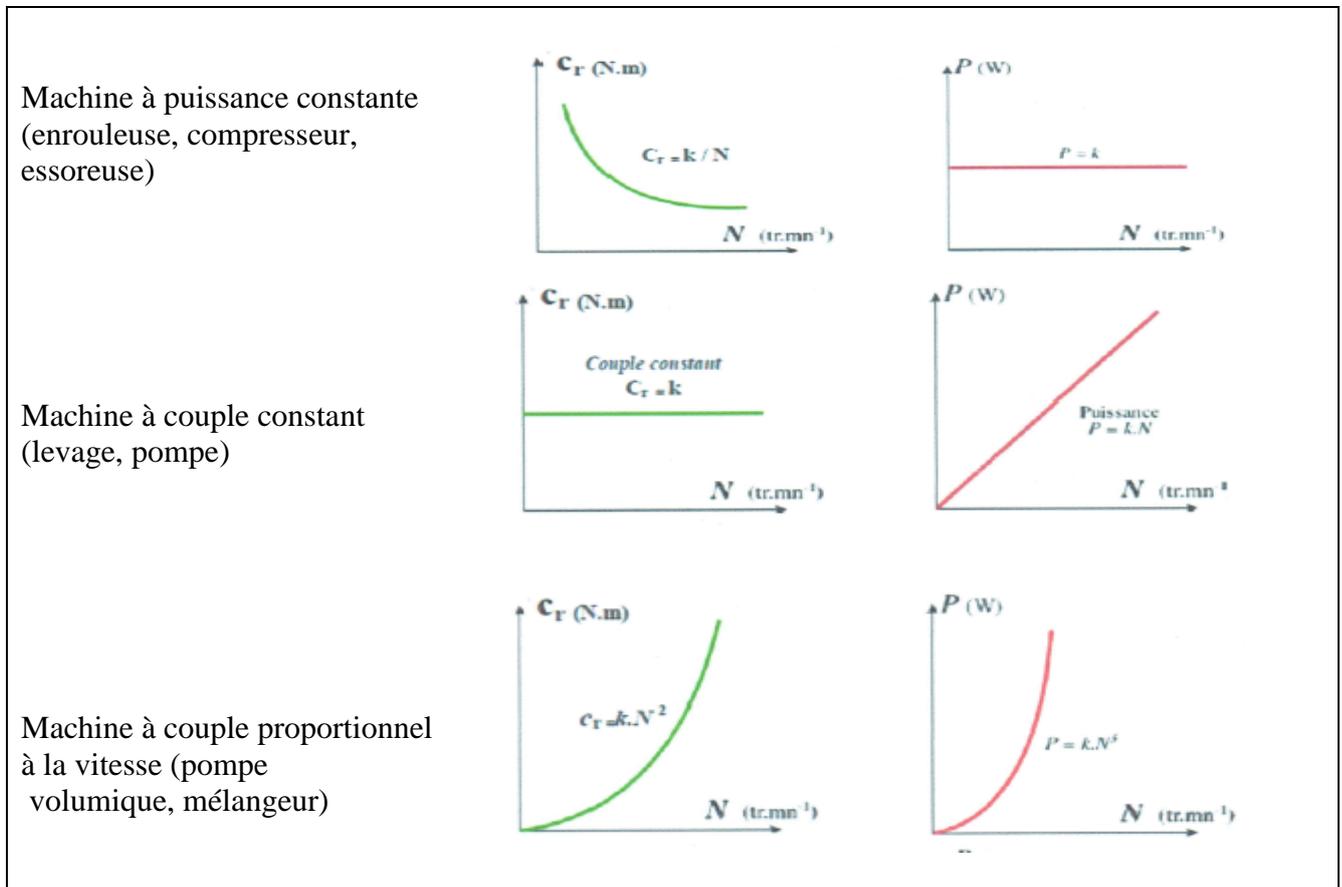
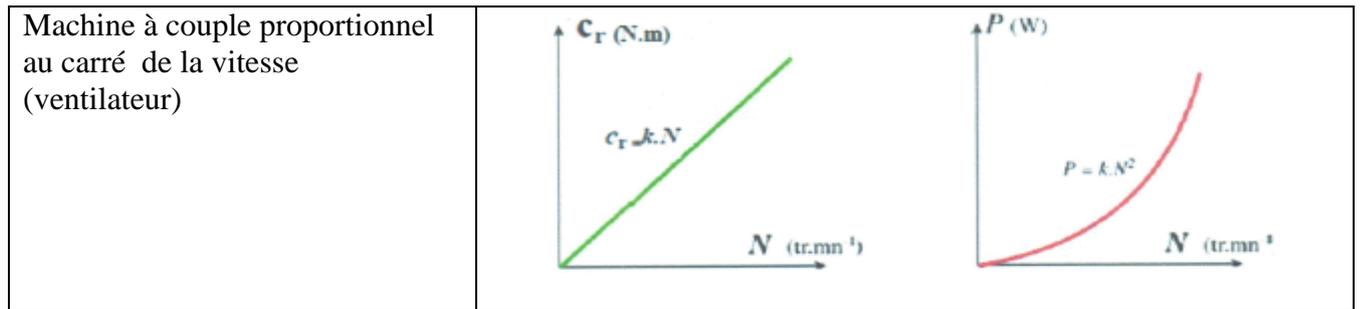


Figure I.10 : Point de fonctionnement du moteur.

C- Caractéristique $C_u=f(n)$ de quelques charges





I.9 Résumé des caractéristiques

- A vide, le courant est non négligeable, mais la puissance absorbée est surtout réactive (**Q**).
- Le couple et le courant de démarrage sont importants.
- La machine asynchrone peut démarrer en charge.
- la vitesse du champ tournant est : $n_s = 60 f / P$ (f la fréquence du courant et P le nombre de paires de pôles).
- le glissement est le rapport entre la vitesse du champ et celle du rotor.
- Quelle que soit la charge la vitesse varie très peu ($n = n_s$), [12]

I.10 Couplage de la plaque à bornes

Le branchement des bobines sur le réseau se fait au niveau de la plaque à borne située sur le dessus de moteur. On dispose ainsi de 6 connexions, une pour chacune des extrémités des trois bobines. Les bornes sont reliées aux bobines selon la figure ci-contre. [10]

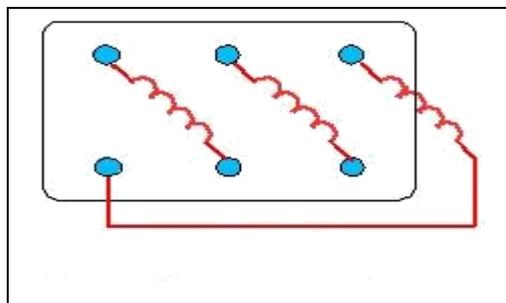


Figure I.11 : la plaque à bornes

I.11 Branchement du moteur sur le réseau

Il n'est pas toujours possible de brancher un moteur asynchrone en étoile ou en triangle

Avec le branchement étoile, la tension au borne de chacune des bobines est de 220 V dans le montage en triangle, chacune des bobines est alimentée en tension nominale de réseau (380V), [12]

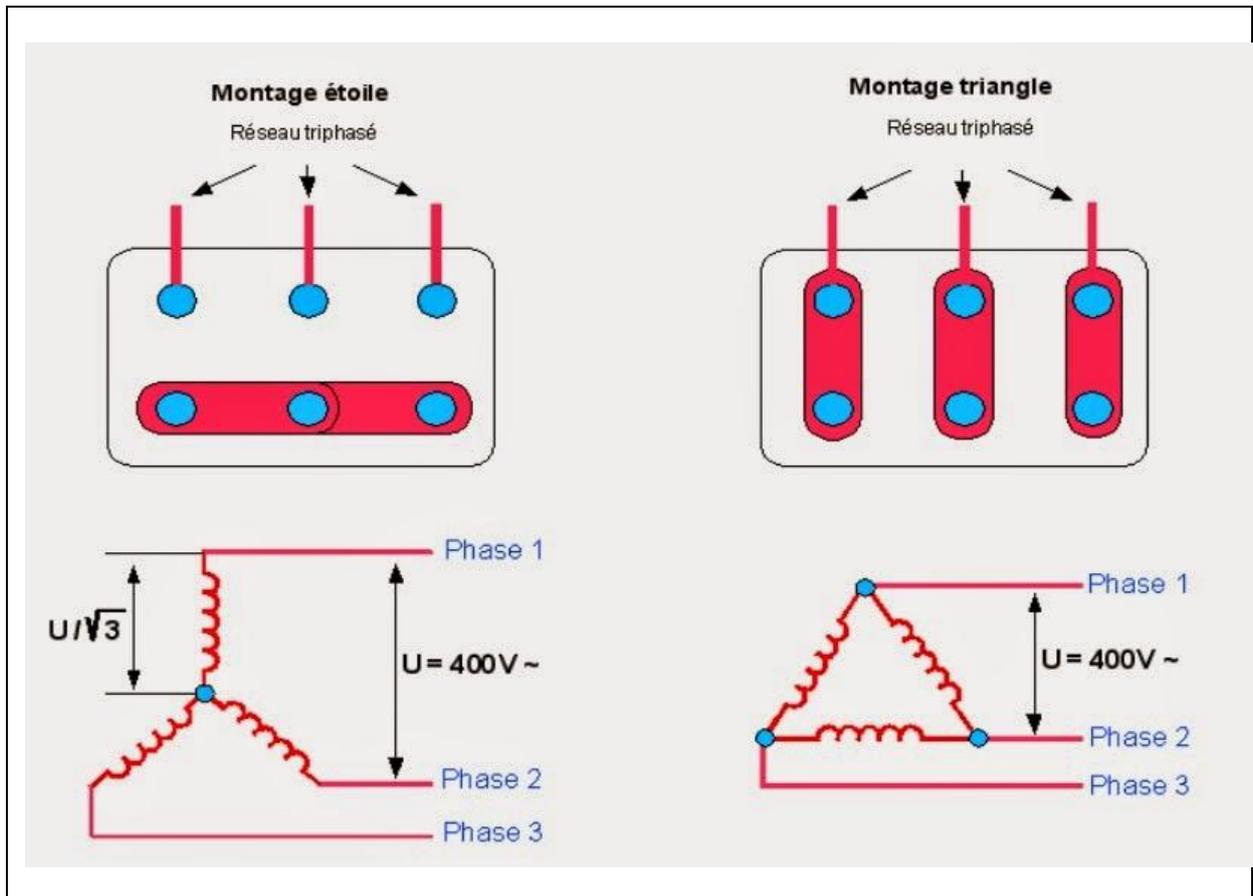


Figure I.12 : Couplage de moteur.

Exemple :- sur une plaque signalétique d'un moteur on lit : **380 ~/ A 220**

-le réseau est en **220 / 380 V** De la plaque signalétique on déduit que la tension nominale d'une phase du moteur est de **220 V**. Si on branche ce moteur en triangle, la tension au borne d'une phase sera de **380 V** ce qui est trop élevé. Ce moteur peut être branché uniquement en étoile sur le réseau **220 / 380 V**.

I.12 plaque signalétique

Exemple d'une plaque signalétique. [11]

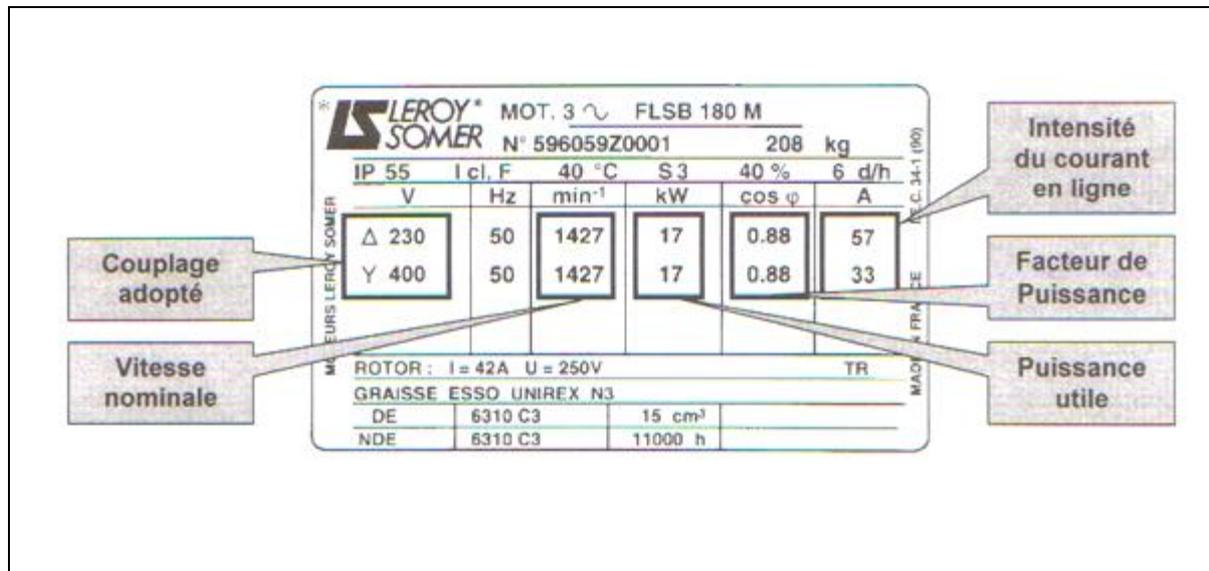


Figure I.13: Plaque signalétique.

I.13 Réversibilité

Toutes les machines tournantes sont réversibles. Dans le cas de la machine asynchrone, étant donné que son rotor n'est pas excité, elle ne peut être autonome. Mais elle est réversible dans le sens où elle peut fournir de la puissance au réseau en fonctionnement en charge, [12]

I.14 Conséquence d'une variation de la tension ou de fréquence sur un moteur asynchrone

A- Augmentation ou diminution de la tension

» **Vitesse** : Lors des variations de tension la vitesse au synchronisme n'est pas modifiée. Mais sur un moteur en charge une augmentation de la tension entraîne une diminution du glissement et par la même l'accélération du moteur. Ce phénomène est limité par la saturation de la machine, par contre si la tension d'alimentation décroît le moteur tourne plus lentement.

» **Couple** : Le couple étant proportionnel au carré de la tension, il augmente lorsque la tension est élevée.

Inversement, il diminue considérablement lorsque la tension est plus faible. Si le moteur a été calculé trop juste, il peut ne pas démarrer, ou même caler et il risque d'être détérioré en cas de chute de tension persistante.

» **Courant de démarrage :** Il varie proportionnellement à la tension d'alimentation donc, si celle-ci est plus élevée, le courant absorbé au moment du démarrage augmente, par contre, si la tension diminue, le courant de démarrage diminue également. Le courant en régime établi varie d'ailleurs de façon analogue.

B- Augmentation ou diminution de la fréquence

» **Vitesse :** Sur un moteur asynchrone, nous l'avons vu précédemment, la vitesse de synchronisme est proportionnelle à la fréquence. Cette propriété est souvent utilisée pour faire fonctionner à très grande vitesse des moteurs spécialement conçus pour une alimentation par exemple en **400 Hz** (rectifieuses, appareils de laboratoire ou chirurgicaux, etc.....).

Il est possible également d'obtenir une vitesse variable par réglage de puissance par exemple de **6 à 50 Hz** (rouleaux transporteurs, appareils de levage, etc.....).

» **Couple :** A tension constante, le courant de démarrage est inversement proportionnel au carré de la fréquence. Si celle-ci augmente, le couple développé par le moteur diminue considérablement. Inversement, si la fréquence décroît, le couple croît.

» **Courant de démarrage :** A tension constante, le courant de démarrage varie en sens inverse de la fréquence. De ce fait, il augmente, si la fréquence diminue ou inversement. Ces variations de couple et de courant sont le plus souvent gênantes.

En pratique, pour les éviter, il est conseillé de varier la tension d'alimentation proportionnellement à la fréquence, [1].

I.15 Démarrage des moteurs à induction

Dans tout moteur électrique, deux paramètres ont montrés leurs importances lors du démarrage, à savoir le courant de démarrage et le couple de démarrage. Un fort appel de courant au démarrage (qui peut valoir 4 à 6 fois le courant nominal), peut provoquer une chute de tension excessive dans le réseau, de même un faible couple au démarrage augmenterait les pertes mécaniques, et donnerait un démarrage très long, mais vu que certaines machines sont obligées de démarrer directement en charge, à cause de cela il est nécessaire que le couple de démarrage soit au moins égal au couple nominal, [5].

I.16 Commande des moteurs

I.16.1 Généralités

Les appareils insérés dans les circuits d'alimentation d'un moteur assurent diverses fonctions prévus les règles d'installations : **NFC15-100**.

I.16 .2 Circuit de commande

Il comprend tous les appareils nécessaires à la commande et au contrôle des automatismes.

Il est composé de :

- Une source d'alimentation.
- Un appareil d'isolement. (contacts auxiliaires du sectionneur).
- Une protection du circuit (fusible, disjoncteur).
- Appareils de commande ou de contrôle (bouton poussoir, détecteur de grandeur physique).
- Organes de commande (bobine de contacteur)

I.16 .3 Circuit de puissance

Il comprend les appareils nécessaires au fonctionnement des récepteurs de puissances et sert à exécuter les ordres reçus du circuit de commande.

Il est composé de :

- Une source d'alimentation généralement triphasée.
- Un appareil d'isolement (sectionneur).
- Une protection du circuit (fusible, relais de protection)
- Appareils de commande (les contacts de puissance du contacteur)
- Des récepteurs de puissance (des moteurs).

Deux éléments différents d'un même appareil peuvent être repartis dans les deux circuits.

Exemple : Le contacteur, le sectionneur

Les circuits de commande et de puissance possèdent chacun leurs propres alimentations.

I.17 Utilisation des moteurs asynchrones

Comme on l'a expliqué, les performances d'un moteur concernent les domaines suivant : démarrage, variation de la vitesse, freinage et inversion de sens de marche. Comme la vitesse N reste très proche de la vitesse N_s de synchronisme, pour varier la vitesse du moteur il faut en fait varier la fréquence f_s à l'aide d'un onduleur.

Mais pour faire varier la vitesse sans modifier le couple utile il faut garder le rapport V_s / f_s constant (V_s est la tension d'alimentation d'un enroulement). Si on augmente la vitesse, il faut augmenter la fréquence et la tension d'alimentation dans les limites du bon fonctionnement de la machine.

Le moteur asynchrone triphasé, d'une puissance de quelques centaines de watts à plusieurs mégawatts est le plus utilisé de tous les moteurs électriques. Son rapport coût / puissance est le plus faible. Associés à onduleurs de tension.

Moteurs asynchrones de forte puissance peuvent fonctionner à vitesse variable dans un large domaine (les derniers TGV, le tram de Strasbourg,...). Toute fois l'emploi de ce type de moteur est évité en très fort puissance ($P > 10$ MW) car la consommation de puissance réactive est alors un handicap.

Remarque

En électroménager (exemple : lave-linge) la vitesse des moteurs asynchrones n'est pas réglé par un onduleur, mais ces moteurs possèdent plusieurs bobinage. Il est alors possible de changer le nombre de paires de pôles et donc la vitesse, [10]

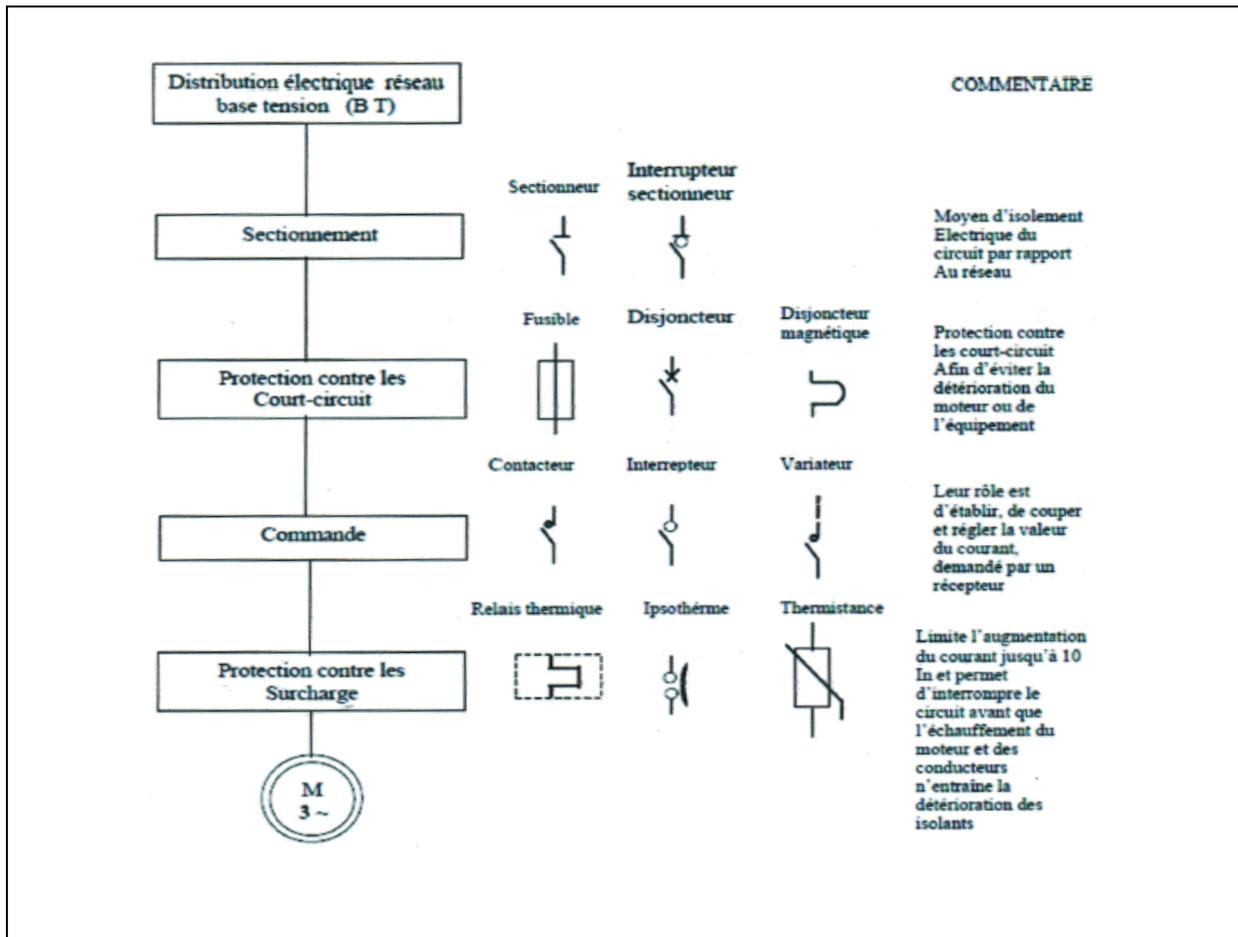


Figure I.14 : Commande des moteurs.

I.18 Les avantages et les inconvénients du moteur asynchrone

Si l'on compare le moteur asynchrone au moteur shunt à courant continu, on constate que les caractéristiques dans leurs parties stables, sont identiques, ce qui conduit aux mêmes applications industrielles. En ce qui concerne le choix d'un moteur pour une application donnée, il est intéressant de signaler les avantages et les inconvénients de ces deux moteurs.

I.19. Avantages du moteur asynchrone

Comparé au moteur shunt, le moteur asynchrone a l'avantage d'être alimenté directement par le réseau triphasé. Son prix d'achat est moins élevé, il est beaucoup plus robuste car il ne nécessite pratiquement pas d'entretien.

Ces deux qualités fondamentales (prix et solidité) résultent du fait qu'il n'a pas de collecteur. En effet, le collecteur est un organe coûteux et fragile qui nécessite un entretien fréquent : changement des balais.

1.20 Inconvénients du moteur asynchrone

A l'exception du démarrage et de l'inversion du sens de marche que l'on peut résoudre de façon satisfaisante, le moteur asynchrone a des performances très médiocres par rapport à celles du moteur shunt. En effet jusqu'à ces dernières années, l'entraînement idéal était réalisé par le léonard formé un moteur shunt alimenté par un convertisseur de tension, [3].

I.21 Conclusion

Dans ce chapitre on a donné un historique sur les machines asynchrone et nous avons exposé une étude générale sur les moteur asynchrones triphasés (constitution, principe de fonctionnement, caractéristique), plus on a donné l'utilisation de ce type de moteur, ses avantages et ses inconvénients.

Dans le chapitre suivant on donne la modélisation de la machine asynchrone triphasée en utilisant la transformation du Park.

|

Chapitre II :

Modélisation d'une machine asynchrone.

II .1 Introduction

En générale les machines réelles sont connues par leurs enroulements et leurs géométries propres trop complexe, pou se prêter à une analyse tenant compte de leurs configurations exactes, On doit donc développer pour chaque type un modèle dont le comportement soit le plus proche possible de modèle réel [1].

La modélisation des machines électrique est une phase primordiale pour l'observation et l'analyse des différentes évolutions de ses grandeurs électromécaniques d'une part et d'autre part pour l'élaboration des lois de commande [2].

Pour obtenir le modèle d'un système, trois tâches doivent être accomplies [3] :

- Choisir le modèle.
- Déterminer ses paramètres.
- Et en fin vérifier sa validité.

Dans ce chapitre, nous avons pris comme point de départ un rappel du modèle mathématique de la machine asynchrone généralisée, suivi de la simplification des équations par la transformation de **PARK**, en vue d'une modélisation de la machine asynchrone triphasée en machine biphasée équivalente. Après un choix convenable du référentiel, On déduit le modèle d'état de la machine asynchrone.

II.2 Généralités sur les machines asynchrones triphasées

II.2.2 Définition

Une machine asynchrone est une machine à courant alternatif dont la vitesse du rotor et la vitesse du champ magnétique tournant ne sont pas égales. Le rotor est toujours en retard par rapport à la vitesse du champ statorique . La machine asynchrone est dite machine à induction car l'énergie transférée du stator au rotor au inversement se fait par induction électromagnétique.

II.2.2 Description

Les machines asynchrone .appelées également machine à induction sont des convertisseurs électromagnétique tournant transformant l'énergie électrique en énergie mécanique, elles sont

utilisées en moteur bien qu'elles puissent fonctionner en générateur. La machine asynchrone à cage constituée d'un deux parties. Le stator et le rotor.

Le stator représente la partie statique de la machine. Il est constitué d'un circuit magnétique comportant de multiples encoches à l'intérieur desquelles sont bobinées par trois enroulements formant les enroulements statoriques. Au centre de ce cylindre, On retrouve le rotor de la machine dont le circuit magnétique est composé des barres généralement en cuivre ou en aluminium coulé. Ces barres sont reliées entre elles à chaque extrémité par un anneau de court-circuit.

II.2.3 Problèmes posés par le moteur asynchrone

Dans le moteur asynchrone. Le courant statorique sert à la fois à générer le flux et le couple. Le découplage naturel de la machine à courant contenu n'existe plus d'autre part, on ne peut connaître les variables internes du rotor à cage (I_r par exemple) qu'à travers le stator.

L'inaccessibilité du roto nous amènera à modifier l'équation vectorielle rotorique pour exprimer les grandeurs rotoriques à travers leurs actions sur le stator la simplicité structurelle cache donc une grande complexité fonctionnelle due aux caractéristiques qui viennent d'être évoquées mais également aux non linéarités, à la difficulté d'indentification et aux variations des paramètres (R_r en particulier, jusqu'à 50%).

II.3 Modélisation du moteur asynchrone

II.3.1 Hypothèse simplificatrices

La modélisation de la machine asynchrone s'appuie sur un certain nombre d'hypothèses simplificatrices, qui sont [4].

- L'entrefer est d'épaisseur uniforme.
- L'effet d'encoche est négligeable.
- Distribution spatiale des forces magnétomotrices d'entrefer est sinusoïdale.
- Circuit magnétique non saturé et à perméabilité constante.
- Pertes ferromagnétiques négligeables.

-Les résistances des enroulements ne varient pas en fonction de la température de fonctionnement et on néglige également l'effet de peau.

Ainsi, parmi les conséquences importantes de ces hypothèses, on peut citer :

-L'additivité du flux.

-La constance de l'inductance propre.

-La loi de variation sinusoïdale des inductances mutuelles entre les enroulements statoriques et rotoriques en fonction de l'angle électrique entre leurs axes magnétiques.

II.3.2 Mise en équations

La représentation schématique de la machine asynchrone dans le repère (abc) est donnée par la figure (II.1).

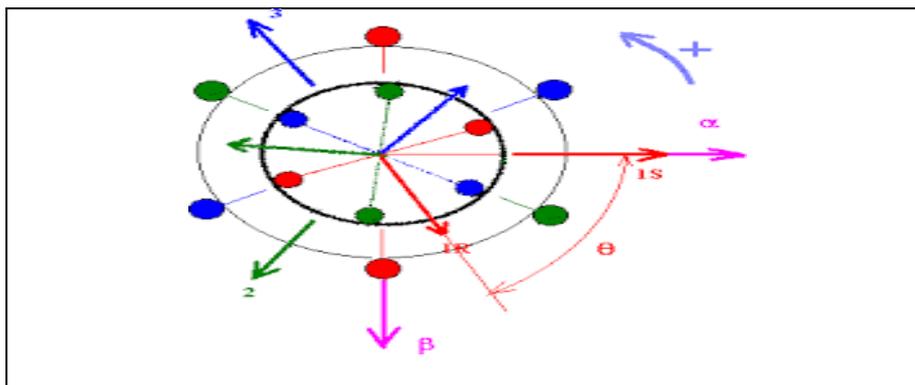


Figure II.1 : Modèle généralisé de la M.AS.triphasé

Dans ce cadre des hypothèses simplificatrices et pour une machine équilibrée, les équations de la machine s'écrivent comme suit :

A. Équation Électrique

Avec l'hypothèse précédente, les équations des trois phases statoriques et rotoriques s'écrivent à l'aide de la loi de Faraday [2] :

$$\begin{cases} V_{sa} = r_s i_{sa} + \frac{d}{dt} \Phi_{sa} \\ V_{sb} = r_s i_{sb} + \frac{d}{dt} \Phi_{sb} \\ V_{sc} = r_s i_{sc} + \frac{d}{dt} \Phi_{sc} \end{cases} \quad (\text{II.1})$$

$$\begin{cases} V_{ra} = r_r i_{ra} + \frac{d}{dt} \Phi_{ra} \\ V_{rb} = r_r i_{rb} + \frac{d}{dt} \Phi_{rb} \\ V_{rc} = r_r i_{rc} + \frac{d}{dt} \Phi_{rc} \end{cases} \quad (\text{II.2})$$

En désignant par :

V_{sa}, V_{sb}, V_{sc} : Les tensions appliquées aux trios phase statoriques.

i_{sa}, i_{sb}, i_{sc} : Les courants qui traversent les trois phases statoriques.

$\Phi_{sa}, \Phi_{sb}, \Phi_{sc}$: les flux totaux à travers ces enroulements.

r_s : Résistance d'une phase statorique .

r_r : Résistance d'une phase rotorique.

Les équations (II.1) et (II.2) peuvent être écrire sous la forme matricielle suivante :

Pour le stator :

$$\begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_s & 0 & 0 \\ 0 & r_s & 0 \\ 0 & 0 & r_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{sa} \\ \Phi_{sb} \\ \Phi_{sc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.3})$$

Ou sous la forme condensée comme suit :

$$[V_{sabc}] = [R_s] [i_{sabc}] + \frac{d}{dt} [\Phi_{sabc}] \quad (\text{II.4})$$

Pour le rotor :

$$\begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_r & 0 & 0 \\ 0 & r_r & 0 \\ 0 & 0 & r_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{ra} \\ \Phi_{rb} \\ \Phi_{rc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.5})$$

$$[V_{rabc}] = [R_r] [i_{rabc}] + \frac{d}{dt} [\Phi_{rabc}] \quad (\text{II.6})$$

B. Equation Magnétiques

Les relations entre les flux et les courants s'écrivent sous forme matricielle comme suit :

Pour le stator :

$$[\Phi_{sabc}] = [L_{ss}][i_{sabc}] + [M_{sr}][i_{rabc}] \quad (\text{II.7})$$

Pour le rotor :

$$[\Phi_{rabc}] = [L_{rr}][i_{rabc}] + [M_{rs}][i_{sabc}] \quad (\text{II.8})$$

Telque :

$$[M_{sr}] = [M_{rr}]^T \quad (\text{II.9})$$

En désignant par :

$[L_{ss}]$: Matrice des inductances statorique.

$[L_{rr}]$: Matrice des inductances rotorique.

$[M_{sr}]$: Matrice des inductances mutuelles statoriques.

$[M_{rs}]$: Matrice des inductances mutuelles rotoriques.

Avec :

$$[L_{ss}] = \begin{bmatrix} L_s & M_s & M_s \\ M_s & L_s & M_s \\ M_s & M_s & L_s \end{bmatrix} \quad (\text{II.10})$$

$$[L_{rr}] = \begin{bmatrix} L_r & M_r & M_r \\ M_r & L_r & M_r \\ M_r & M_r & L_r \end{bmatrix} \quad (\text{II.11})$$

Avec :

L_s : Inductance propre d'une phase statorique.

L_r : Inductance propre d'une phase rotorique.

M_s : Inductance mutuelle entre phase statorique.

M_r : Inductance mutuelle entre phase rotorique.

$$[M_{sr}] = [M_{rs}^T] = \begin{bmatrix} \cos(\theta_r) & \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r) & \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r) \end{bmatrix} \quad (\text{II.12})$$

θ_r : Angle qui définit la position relative instantanée entre les axes magnétique des phase statoriques et rotoriques.

m : Valeur maximale de l'induction mutuelle entre une phase statorique et une phase rotorique lorsque les deux axes se coïncident.

C. Equation mécanique

L'équation de mouvement est donnée par :

$$J \frac{d\Omega_r}{dt} = C_s - C_r - f\Omega_r \quad (\text{II.13})$$

Le couple est donné par l'expression suivante :

$$C_e = P \begin{bmatrix} i_{sa} & i_{sb} & i_{sc} \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \left[M_{sr} \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} \right] \quad (\text{II.14})$$

Avec :

Ω : Vitesse de frottement visqueux.

f : Coefficient de frottement visqueux.

J : Moment d'inertie des masses tournantes.

C_{em} : Couple électromagnétique.

C_r : Couple résistant.

Les équations précédentes font apparaître des difficultés pour la résolution analytique du fait que les termes trigonométriques de la matrice des inductances varient en fonction de la position. Cela conduit à la transformation de Park, qui permettra de rendre ces termes indépendants de la position.

II.4 Transformation de Park

Pour obtenir un système d'équation à coefficient constants, on transforme les enroulements statoriques et rotoriques en enroulement orthogonaux équivalents selon la transformation de Park.

La transformation de Park (fig II-2) permet le passage d'un système triphasé (a,b,c) vers un système biphasée (α,β)

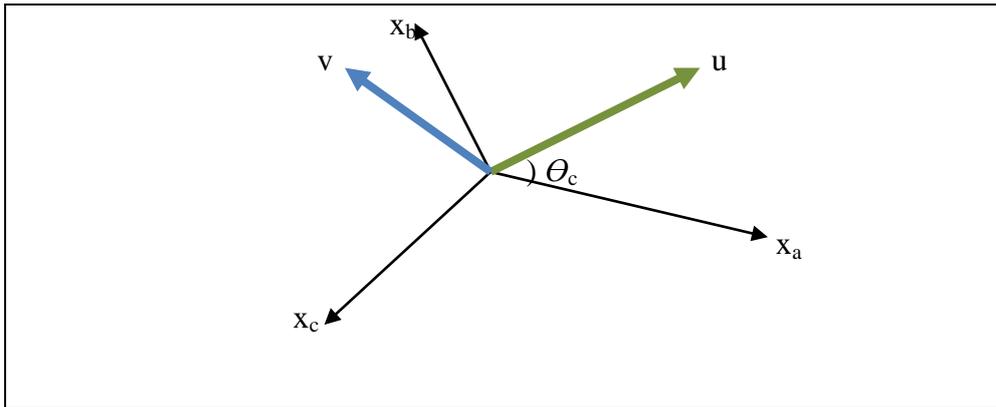


Figure (II-2) : Passage du repère triphasé au repère biphasée

Pour transformer un système triphasé [abc] en un système biphasé [uv] avec une composant homopolaire comme indique dans l'équation suivante.

$$[L_{uvo}] = [P(\theta_c)] = [X_{abc}] \quad (\text{II.15})$$

Le passage inverse est donner par :

$$[X_{abc}] = [P(\theta_c)]^{-1} = [X_{uvo}] \quad (\text{II.16})$$

Tel que :

X : peut être la tension, le courant ou le flux.

$[P(\theta_{\text{coor}})]$: est la matrice de transformation directe de Park.

$[P(\theta_{\text{coor}})]^{-1}$: est la matrice de transformation inverse de Park.

Avec :

$$[\mathbf{P}(\theta_c)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta_c) & \cos(\theta_c - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_c + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta_c) & -\sin(\theta_c - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_c + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.17})$$

La matrice de transformation $[\mathbf{P}(\theta_c)]$ étant orthonormée, le calcul de sa matrice inverse est donc simplifié :

$$[\mathbf{P}(\theta_c)]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta_c) & -\sin(\theta_c) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta_c - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_c - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta_c + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_c + \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.18})$$

La composante homopolaire est de valeur nulle, si on considère que le système (abc) est équilibré et symétrique.

θ_c : la position angulaire du système d'axes (uv) par rapport au système d'axes réel (abc).

$$\omega_c = \frac{d}{dt} \theta_c \quad : \text{Vitesse de cordonnée.}$$

Dans ces conditions les équations électriques, magnétiques et mécaniques deviennent :

II.4.1 Equation Electriques

On applique la transformation de Park sur les deux équations (I.4) et (I.6), et en admettant que le rotor étant en court-circuit, il en résulte :

$$\begin{cases} V_{su} = r_s i_{su} + \frac{d}{dt} \Phi_{su} - \omega_c \Phi_{sv} \\ V_{sv} = r_s i_{sv} + \frac{d}{dt} \Phi_{sv} - \omega_c \Phi_{su} \\ V_{ru} = 0 = r_r i_{ru} + \frac{d}{dt} \Phi_{ru} - \omega_c \Phi_{rv} \\ V_{rv} = 0 = r_r i_{rv} + \frac{d}{dt} \Phi_{rv} - \omega_c \Phi_{ru} \end{cases} \quad (\text{II.19})$$

le système (u,v) tourne à la vitesse $(\omega_c - \omega_r)$ par rapport au rotor.

II.4.2 Equation Magnétique

L'application de la transformation de Park sur les équations (I.07) et (I.08) donne :

$$\begin{cases} \Phi_{su} = l_s i_{su} + M i_{ru} \\ \Phi_{sv} = l_s i_{sv} + M i_{rv} \\ \Phi_{ru} = l_r i_{ru} + M i_{su} \\ \Phi_{rv} = l_r i_{rv} + M i_{sv} \end{cases} \quad (\text{II.20})$$

Avec :

$I_s = L_s = M_s$: Inductance cyclique propre statorique.

$I_r = L_r = M_r$: Inductance cyclique propre statorique.

$M = \frac{3}{2} m$ =: Inductance cyclique mutuelle entre l'armature du stator et l'armature du rotor.

II.4.3 Expression du couple électromagnétique et de la puissance

L'expression du couple électromagnétique est donnée par :

$$C_e = \frac{\partial W_e}{\partial \theta_{\text{géo}}} = P \frac{\partial W_e}{\partial \theta \acute{e}} \quad (\text{II.21})$$

$$\theta_{\text{géo}} = \frac{\theta \acute{e}}{p} \quad (\text{II.22})$$

avec :

W_e : énergie emmagasinée dans le circuit magnétique.

$\theta_{\text{géo}}$: Ecart angulaire de la partie (rotor par rapport au stator).

P : Nombre de paires de pole.

Selon Park, l'expression de la puissance transmise est la suivante :

$$P(t) = V_{sa} i_{sa} + V_{sb} i_{sb} + V_{sc} i_{sc} \quad (\text{II.23})$$

$$P(t) = V_{su} i_{su} + V_{sv} i_{sv} + V_{so} i_{so} \quad (\text{II.24})$$

Le système, étant équilibrée, il vient :

$$P(t) = [V_{su} i_{su} + V_{sv} i_{sv}] \quad (\text{II.25})$$

En remplaçant V_{su} et V_{sv} par leurs expressions il vient que :

$$P(t) = [r_s i_{su}^2 + r_s i_{sv}^2] + \left[i_{su} \frac{d}{dt} \Phi_{su} + i_{sv} \frac{d}{dt} \Phi_{sv} \right] + \omega_c [\Phi_{su} i_{sv} - \Phi_{sv} i_{su}] \quad (\text{II.26})$$

Cette dernière expression est composée de trois parties :

$[r_s i_{su}^2 + r_s i_{sv}^2]$: Représente les chutes ohmiques.

$\left[i_{su} \frac{d}{dt} \Phi_{su} + i_{sv} \frac{d}{dt} \Phi_{sv} \right]$: Représente la variation de l'énergie magnétique.

$\omega_c [\Phi_{su} i_{sv} - \Phi_{sv} i_{su}]$: Représente la puissance transférée du stator au rotor à travers l'entrefer (puissance électromagnétique).

Sachant que :

$$P_e = C_e \omega_c \quad (\text{II.27})$$

Alors :

$$C_e = [\Phi_{su} i_{sv} - \Phi_{sv} i_{su}] \quad (\text{II.28})$$

Ou bien encore :

$$C_e = \frac{PM}{l_r} [\Phi_{ru} i_{sv} - \Phi_{rv} i_{su}] \quad (\text{II.29})$$

II.4.3 Equation Mécanique

L'équation du couple électromagnétique et de mouvement sont définis comme suit :

$$C_e = \frac{PM}{l_r} \frac{PM}{l_r} [\Phi_{r\alpha} i_{s\beta} - \Phi_{r\beta} i_{s\alpha}] \quad (\text{II.30})$$

$$J \frac{d}{dt} \Omega_r = C_e - C_r - f \Omega_r \quad (\text{II.31})$$

$$\omega_r = P \Omega_r \quad (\text{II.32})$$

II.5 Choix du référentiel

L'étude analytique du moteur asynchrone à l'aide de la transformation de Park, nécessite l'utilisation d'un référentiel qui permet de simplifier au maximum les expressions analytiques. Il existe des différentes possibilités pour choix du repère d'axes (u,v) qui se fait en fonction de l'application.

II.5.1 Référentiel immobile par rapport au stator

Il se traduit par les conditions :

$$\omega_s = \frac{d\theta_s}{dt} = 0 \quad (\text{II.33})$$

Et on remplaçant l'indice «u» par «α» «v» par «β», on obtient

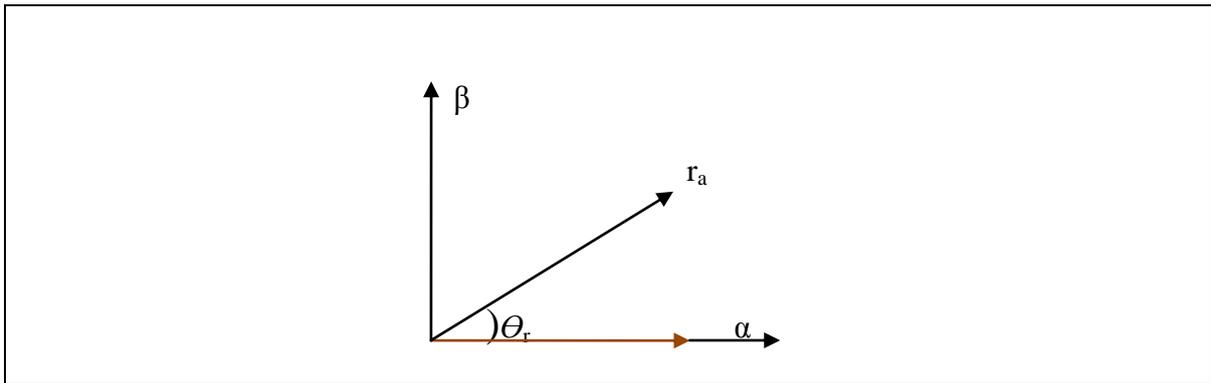


Figure (II-3) : Définition des axes réels de la MAS par rapport au référentiel (α β)

Les équations de système (II-19) prennent la forme :

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{s\alpha} = r_s i_{s\alpha} + \frac{d}{dt} \Phi_{s\alpha} \\ V_{s\beta} = r_s i_{s\beta} + \frac{d}{dt} \Phi_{s\beta} \\ V_{r\alpha} = 0 = r_r i_{r\alpha} + \frac{d}{dt} \Phi_{r\alpha} + \omega_r \Phi_{r\beta} \\ V_{r\beta} = 0 = r_r i_{r\beta} + \frac{d}{dt} \Phi_{r\beta} - \omega_r \Phi_{r\alpha} \end{array} \right. \quad (\text{II.34})$$

C'est le repère le mieux adapté pour travailler avec les grandeurs instantanées. Il possède des tensions et des courants réels et peut être utilisé pour étudier les régimes de démarrage et de freinage des machines à courant alternatif [6]

II.5.2 Référentiel immobile par rapport au champ tournant

Il se traduit par les conditions :

$$\omega_c = \frac{d}{dt} \theta_s = \omega_s \quad (\text{II.35})$$

Et en remplaçant l'indice «u» par «d» et «v» par «q»

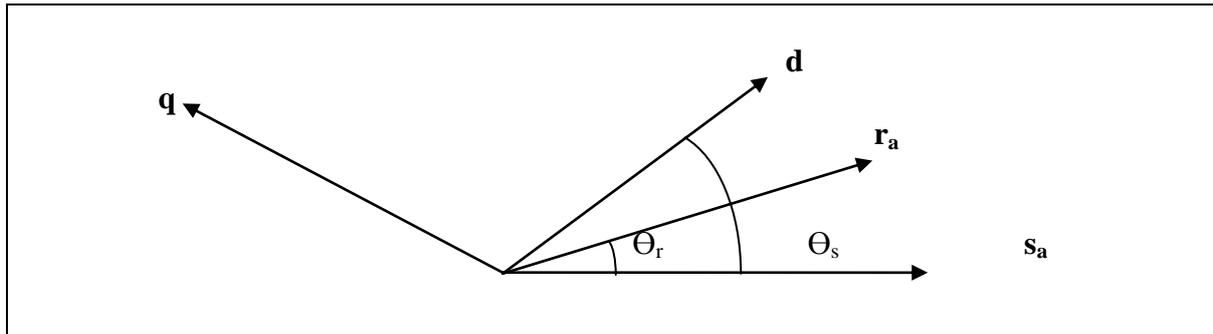


Figure (II-4) : Définition des axes réels de la MAS par rapport au référentiel (dq)

Les équations des systèmes (II-19) prennent la forme :

$$\begin{cases} V_{sd} = r_s i_{sd} + \frac{d}{dt} \Phi_{sd} - \omega_s \Phi_{sq} \\ V_{sq} = r_s i_{sq} + \frac{d}{dt} \Phi_{sq} - \omega_s \Phi_{sd} \\ V_{sd} = 0 = r_r i_{rd} + \frac{d}{dt} \Phi_{rd} - (\omega_s - \omega_r) \Phi_{rq} \\ V_{sq} = 0 = r_r i_{rq} + \frac{d}{dt} \Phi_{rq} - (\omega_s - \omega_r) \Phi_{rd} \end{cases} \quad (\text{II.36})$$

Avec :

$$\omega_g = \omega_s - \omega_{rr} \quad (\text{II.37})$$

Ce référentiel est le seul qui n'introduit pas de simplification dans la formulation des équations. Il fait correspondre des grandeurs continues aux grandeurs sinusoïdales en régime permanent, raison pour laquelle ce référentiel est utilisé en commande [2]

II.5.3 Référentiel immobile par rapport au rotor

Il se traduit par les conditions :

$$\omega_c = \frac{d}{dt} \theta_r = \omega_r \quad (\text{II.38})$$

Et on remplaçant l'indice «u» par «x» et «v» par «y».

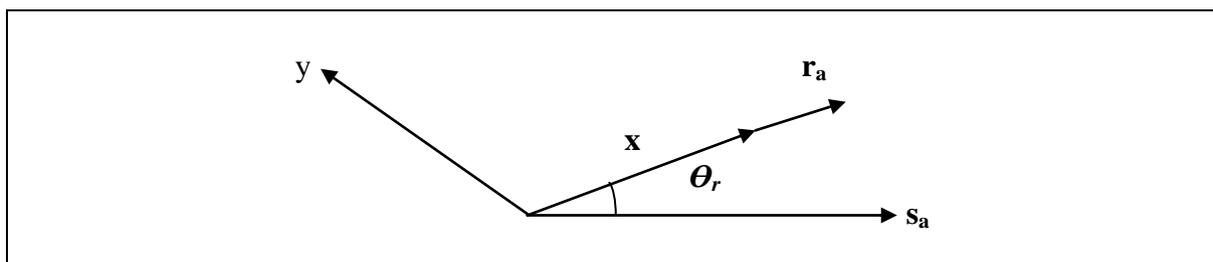


Figure (II-4) : Définition des axes réels de la MAS par rapport au référentiel (xy)

Les équations de système (II-17) prennent la forme :

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{sx} = r_s i_{sx} + \frac{d}{dt} \Phi_{sx} - \omega_r \Phi_{sy} \\ V_{sy} = r_s i_{sy} + \frac{d}{dt} \Phi_{sy} + \omega_r \Phi_{sx} \\ V_{rx} = 0 = r_r i_{rx} + \frac{d}{dt} \Phi_{rx} \\ V_{ry} = 0 = r_r i_{ry} + \frac{d}{dt} \Phi_{ry} \end{array} \right. \quad (\text{II.39})$$

Ce système est utilisé pour étudier les processus transitoires dans les machines synchrones et asynchrones.

c.6 Mise en équation d'état

Les phénomènes transitoires dans les machines asynchrones peuvent être étudiés à partir du modèle généralisé dans un référentiel lié au stator (α, β) . Considérons les tensions $(V_{s\alpha}, V_{s\beta})$ comme grandeurs de commande, les courants statoriques $(i_{s\alpha}, i_{s\beta})$, les flux rotorique $(\Phi_{r\alpha}, \Phi_{r\beta})$, la vitesse mécanique Ω_r comme variables d'état et le couple résistant comme perturbation.

Soit le système d'équations statoriques et rotoriques exprimées dans le repère (α, β)

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{s\alpha} = r_s i_{s\alpha} + \frac{d}{dt} \Phi_{s\alpha} \\ V_{s\beta} = r_s i_{s\beta} + \frac{d}{dt} \Phi_{s\beta} \\ V_{r\alpha} = 0 = r_r i_{r\alpha} + \frac{d}{dt} \Phi_{r\alpha} + \omega_r \Phi_{r\beta} \\ V_{r\beta} = 0 = r_r i_{r\beta} + \frac{d}{dt} \Phi_{r\beta} - \omega_r \Phi_{r\alpha} \end{array} \right. \quad (\text{II.40})$$

En substituant le système (II.22) dans (II.39), on aboutit à :

$$\begin{bmatrix} V \\ V \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -r & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -r & 0 & \frac{M}{l_r} \\ \frac{M}{T_r} & 0 & \frac{1}{T_r} & -\omega_r \\ 0 & \frac{M}{T_r} & \omega_r & \frac{1}{T_r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \\ \Phi_{r\alpha} \\ \Phi_{r\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma l_s & 0 & \frac{M}{l_r} & 0 \\ 0 & \sigma l_s & 0 & \frac{M}{l_r} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \\ \Phi_{r\alpha} \\ \Phi_{r\beta} \end{bmatrix} \quad (\text{II.41})$$

On cherche à obtenir un système d'équation écrit sous forme d'équation d'état le modèle sera de la forme :

$$[X'] = [A] [X] + [B] [U] \quad (\text{II.42})$$

Telque :

$$[X] = [i_{s\alpha} \ i_{s\beta} \ \Phi_{r\alpha} \ \Phi_{r\beta}]^T : \text{Vecteur d'état.}$$

$$[A] = \text{Matrice d'évolution d'état du système.}$$

$$[B] = \text{Matrice de commande du système.}$$

$$[U] = [V_{s\alpha} \ V_{s\beta}]^T : \text{Vecteur de commande.}$$

Après tout les calculs fait on trouve

$$[A] = \begin{bmatrix} -\left(\frac{1}{\sigma T_s} + \frac{M^2}{l_r T_r}\right) & 0 & \frac{M}{\sigma l_s l_r T_r} & \frac{M}{\sigma l_s l_r} \omega_r \\ 0 & -\left(\frac{1}{\sigma T_s} + \frac{M^2}{l_r T_r}\right) & -\frac{M}{\sigma l_s l_r} \omega_r & \frac{M}{\sigma l_s l_r T_r} \\ \frac{M}{T_r} & 0 & \frac{-1}{T_r} & -\omega_r \\ 0 & \frac{M}{T_r} & \omega_r & \frac{-1}{T_r} \end{bmatrix} \quad (\text{II.43})$$

$$[B] = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sigma l_s} & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sigma l_s} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{II.44})$$

Avec :

$$\sigma = 1 - \frac{M^2}{l_s l_r} : \text{Le coefficient de la fuite totale.}$$

$$T_s = \frac{l_s}{r_s} : \text{Le constante de temps statorique .}$$

$$T_r = \frac{l_r}{r_r} : \text{Constante de temps statorique.}$$

[A] : Matrice d'état qui caractérise le système.

[B] : Matrice d'entrée.

II.7 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons fait la modalisation de la machine asynchrone, cette modélisation basée sur la théorie de Park, l'intérêt primordial de cette transformation est de simplifier le problème dans le modèle triphasé.

Les résultats obtenus par simulation (étudier en Chapitre quatre) montrent la validité du modèle de Park de la machine asynchrone, cette dernière répond bien pour l'étude des différents type de démarrage des moteurs asynchrones sur un réseau standard.

Dans le chapitre suivant on donne une étude sur les moteurs asynchrones triphasés à cage et les différents procède de démarrage utilisé pour ce type de moteur.

Chapitre III :

Démarrage des moteurs asynchrones à cage d'écureuil

III .1 Introduction

Grace à leurs simplicité, leurs robustesse et leurs cout attractif, les moteurs à cage sont les moteurs les plus souvent utilisés dans l'industrie .En commutation direct, ils absorbent un courant de démarrage jusqu'à 8 fois plus important que le courant nominal et développent donc un couple de démarrage élevé.

Les courants de démarrage élevés ont souvent comme conséquence une chute de tension désagréable et les couples de démarrage élevés nécessitent des éléments mécaniques résistant aux surcharges. C'est la raison pour laquelle les distributeurs l'électricité fixent des valeurs limites pour les courants de démarrage des moteurs ,par rapport aux courant de fonctionnement nominaux .Les valeurs permises varient d'un réseau à l'autre , en fonction de la charge en e qui concerne la mécanique des procédés qui diminuent les couples de démarrage sont souhaitables.

III .2 Moteur asynchrone triphasé à rotor en court-circuit

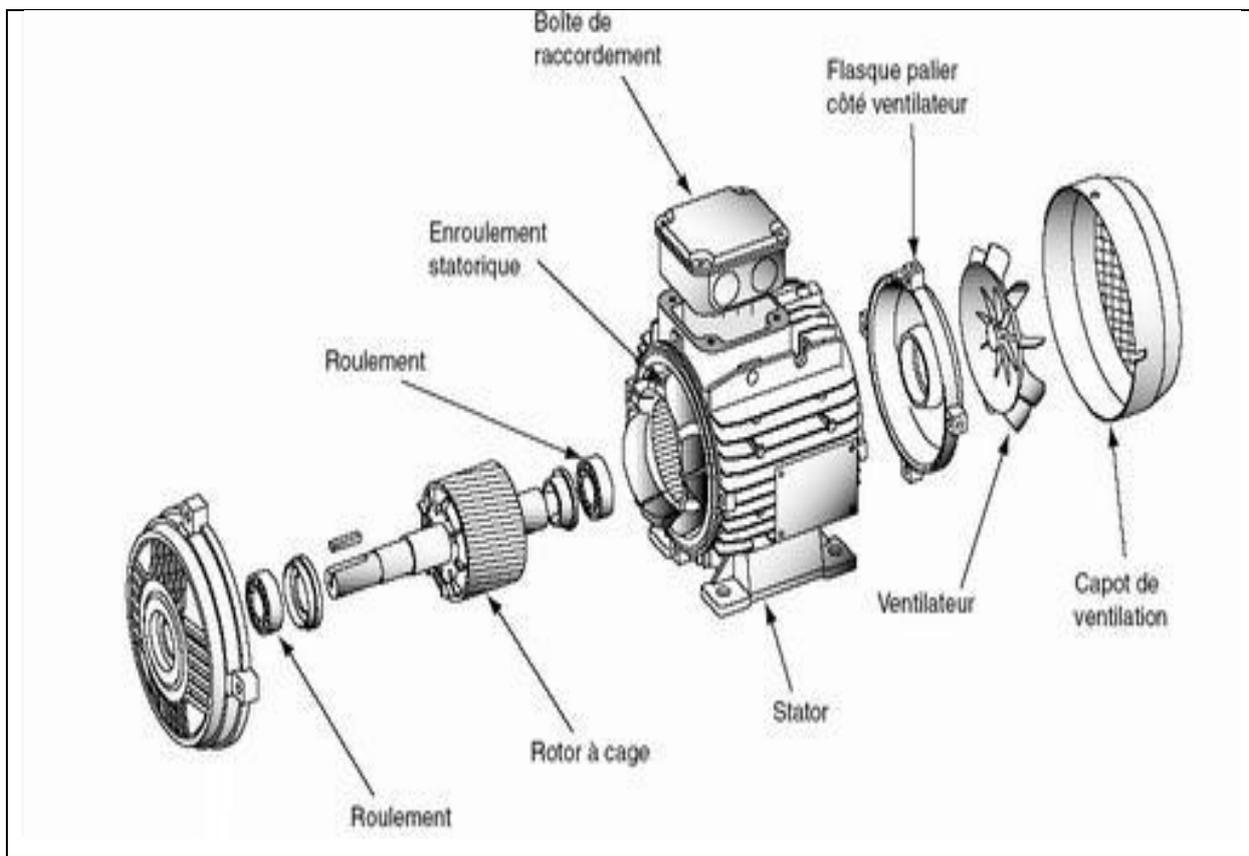


Figure III .1 : Moteur asynchrone triphasé.

III .3 Constitution /fonctionnement

III .3.1 Constitution

Le stator est constitué d'une carcasse sur laquelle est fixée une couronne de tôle d'acier de qualité spéciale, munies d'encoches .Des bobinages de section appropriés sont répartis dans ces dernières et forment un ensemble d'enroulement qui comporte trois circuits (trois phases).

Le rotor est constitué d'un empilage de tôles d'acier formant un cylindre claveté sur l'arbre moteur .Dans des tours ou dans des encoches disposer vers l'extérieur du cylindre parallèlement à son axe, sont placés des conducteurs.

A chaque extrémité, ceux-ci sont raccordes sur une couronne métallique. L'ensemble a l'aspect d'une cage d'écureuil, d'où les noms de ce type de rotor sur certains moteurs, la cage d'écureuil est entièrement moulée (alliage d'aluminium injecté sous pression). [6]

III .3.2 Fonctionnement

Les trois champs magnétiques alternatifs produits par les trois bobines composent pour former un champ tournant (figure III.2).

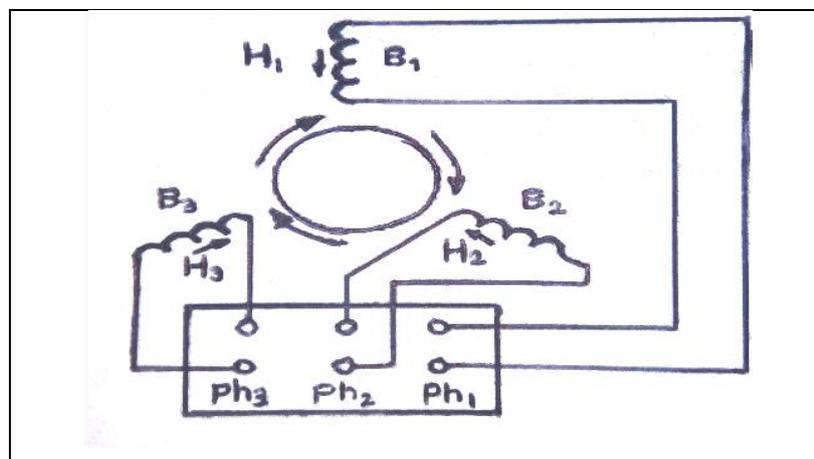


Figure III.2 fonctionnement d'un moteur asynchrone à cage.

Les barres métalliques constituant la cage d'écureuil sont coupées par le champ tournant produit par le stator, ce qui donne naissance à des courants induits intenses dans ces barres (loi de Lenz) .Ces courants réagissent sur le champ tournant en donnant naissance à un couple moteur qui provoque la rotation de la cage. Si la cage tournait à la même vitesse que le champ (vitesse de synchronisme), il n'y aurait plus des courants induits et le couple exercés

serait nul. C'est parce que la vitesse de rotor est inférieure à celle du champ tournant que ce type de moteur est dit asynchrone [6].

III.4 Caractéristiques des moteurs à cage

La caractéristique vitesse-couple et vitesse-intensité des moteurs à cage (figure III.3) présent une grande diversité, d'ailleurs bien explicable, car les constructeurs ont du adapter leur machine à des usages fort différents, et chercher un compromis entre des exigences contradictoires de couple, d'intensité, de rendement et de prix de revient.

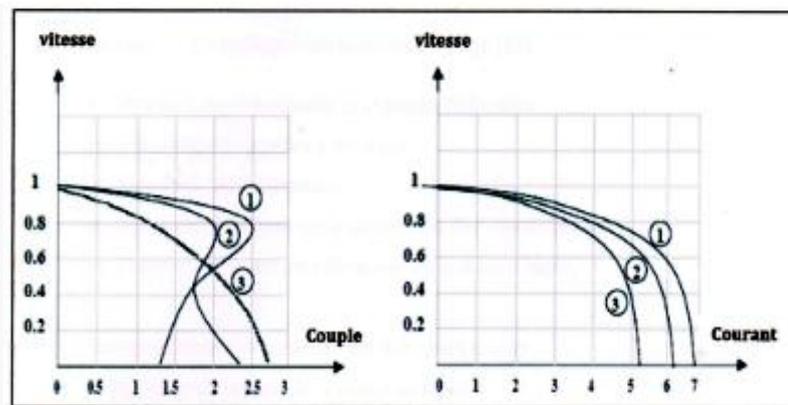


Figure III.3: La caractéristique vitesse /couple et vitesse/intensité des moteurs à cage.

On classe généralement les moteurs à cage en trois familles principales:

1ère famille

Les moteurs à simple cage suivent les courbes (1) de figure (3), le couple à calage n'est pas élevé et la pointe d'intensité est très importante.

2ème famille

Les moteurs à double cage (également les moteurs à triple cage et ceux à encoches profondes) suivent les courbes (2) figure (3). Le couple est plus élevé pendant le démarrage et la pointe d'intensité est réduite. Par contre le glissement en régime établi est légèrement supérieur.

3ème famille :

Les moteurs à grand glissement, suivent les courbes (3) de la figure (3).

Par constructeur, la résistance du rotor est nettement plus forte le glissement et les pertes en marche normale sont notablement augmentés. Ce type de moteur, beaucoup moins répandu que les deux premières, est utilisé pour les applications nécessitant des accélérations et des freinages fréquents [7].

III .5 Avantage des moteurs asynchrones à cage [15]

- Vitesse à peu près constante à charges différentes
- Possibilités de grandes surcharges
- Simplicité de construction
- Simplicité du démarrage et possibilités de l'automatisation
- $\cos \varphi$ et rendement plus élevé que les moteurs à bague

III .6 Inconvénients des moteurs asynchrones à cage

- Difficulté de réglage de la vitesse de rotation
- Grande intensité de courant absorbé au démarrage
- Faible $\cos \varphi$ aux charges insuffisantes
- Sensibilités aux fluctuations de la tension

III .7 Démarrage des moteurs asynchrone à cage

Lors de la mise sous tension d'un moteur. L'appel de courant sur le réseau est important surtout si la section de la ligne d'alimentation est insuffisante, provoque 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 des moteurs à induction démarrant « en direct », d'autres se contentent d'imposer en fonction de la puissance des moteurs, le rapport entre le courant de démarrage et le courant nominal.

Le moteur à cage est le seul à pouvoir être couplé directement sur le réseau avec un appareillage simple. Seules les extrémités des enroulements du stator sortent sur la plaque à bornes. Les caractéristiques du rotor ayant été déterminées une fois pour toutes par le constructeur, les divers procédés de démarrage permettent uniquement de faire varier la tension au bornes du stator. Sur ce type de moteur, la réduction de la pointe de courant s'accompagne automatiquement d'une forte réduction du couple.[1]

III .8 condition d'un démarrage correct

Il faut qu'à toutes les allures, le couple de développé par le moteur soit supérieur au couple exercé par la machine entraînée .Cette condition doit être observée même dans le cas fréquent au la tension de réseau d'alimentation subit des chute importantes le couple de moteur étant proportionnel au carré de la tension , l'influence de cette considération sur la détermination du moteur est souvent majeure.

De plus, il est fréquemment nécessaire de réduire le courant au calage, en particulier lorsque le branchement es effectué sur un réseau de distribution basse tension .Dans ce cas, en effet des règlements rigoureux limite la valeur de courant de démarrage.

Déverses méthodes permettent de réduire artificiellement et momentanément la tension au bornes de stator. Nous allons décrire successivement les procédés de démarrage le plus courants. [7]

III .9 démarrage direct

C'est un procédé de démarrage simple obtenu en un seul temps, le stator du moteur est couplé directement se réseau, le moteur démarre sur ses caractéristiques naturelles avec une forte pointe.

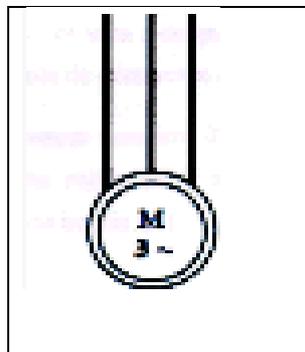


Figure III.4 : couplage direct de moteur sur le réseau.

Ce procédé est idéal dans la mesure où la pointe de courant es acceptable et si le couple initiale de démarrage du moteur (fixé par le type de construction de son rotor et vision en général de $1.5C_n$) convient a mise en route de la machine.

La pointe de courant .Lors de la mise de la tension. Est très élevée. De l'ordre de **4 à 8** fois le courant nominal. Le couple pendant le démarrage est toujours supérieur au couple nominal surtout pour les moteur modernes a cages complexes. Il est maximal lorsque le moteur atteint environ **80%** de sa vitesse a ce moment. La pointe de courant est considérablement amortie.

Ce dispositif permet de démarrer des machine même a pleine charge .Si le réseau admet la pointe de courant au moment du démarrage. Il est donc particulièrement indique pour les machines de petite et moyenne puissance.

Cependant. Le couple à l'instant de la mise sous tension étant voisin de **1,5 Cn**. Ce procédé est déconseillé si le démarrage doit être doux et progressif (certains monte-charge tapis transporteurs, etc....) [1].

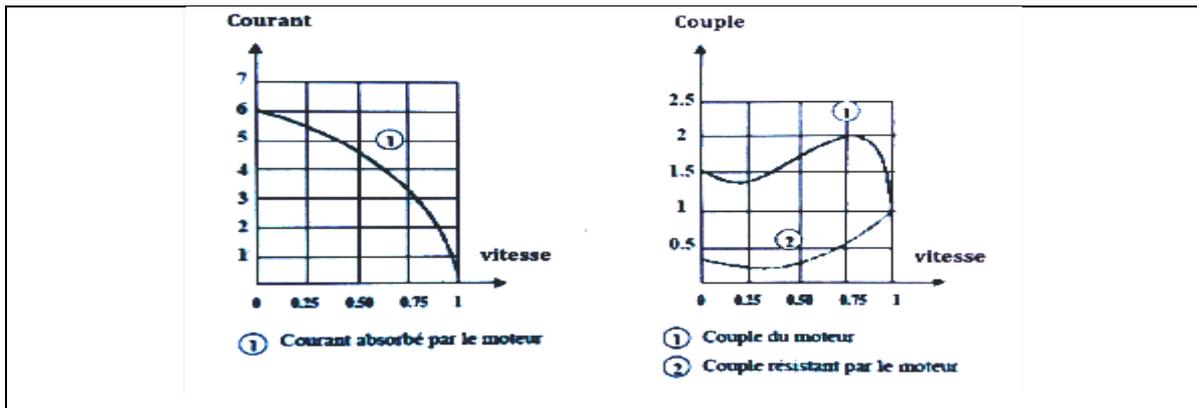


Figure III.5 : Caractéristiques naturel du moteur

III .9 .1 Fonctionnement

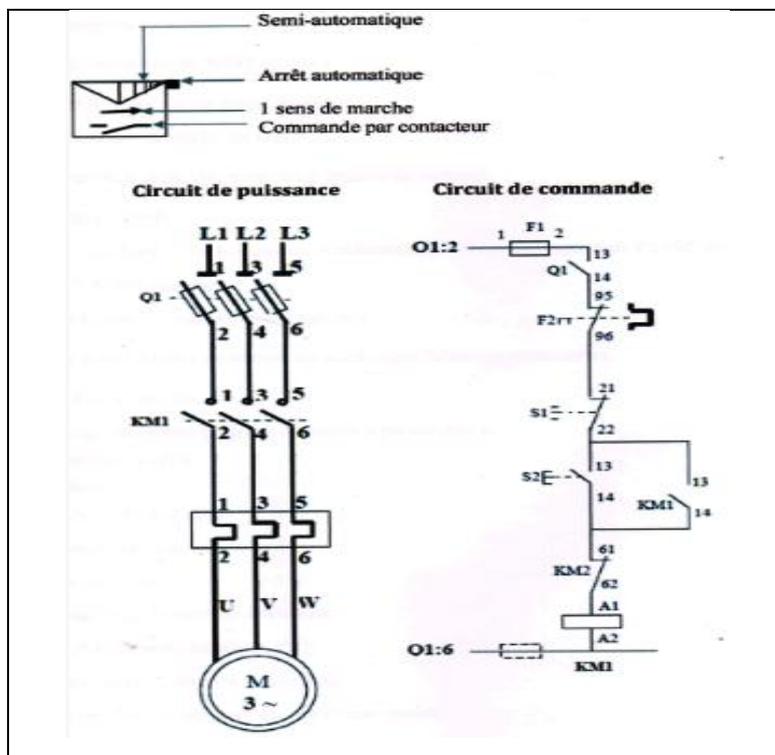


Figure III.6 Démarrage direct du moteur asynchrone.

III .9 .2 Circuit de commande

- Impulsion sur **S2**.
- Fermeture de **KM1**.
- Auto maintien **KM1** (13-14).

III .9 .3 Circuit de puissance

- Fermeture manuelle de **Q1**.
- Fermeture de **KM1**, mise sous tension de moteur.

III .9 .4 Arrêt

Par impulsion sur **S1** ou par déclenchement du relais de protection **F2** (95-96).

III .9 .5 Protection

- Par fusible contre les courts-circuits.
- Par relais thermique contre les surcharges à faibles et prolongées.

III .9 .6 Emploi

- Petites machines pouvant démarrer à pleine charge.
- Machines outils
- Palans.

III .9 .7 Avantages

- démarreur simple.
- Economique.
- couple de démarrage important.

III .9 .8 Inconvénients

- Pointe de courant plus importante.
- le réseau doit pouvoir admettre cette pointe.
- Démarrage brutal. [5]

Courant $I_d=4$ à 8

Couple $C_d= 0,5$ à $1,5C_n$

III .9 .9 Solution pour diminuer la pointe d'intensité au démarrage

Les caractéristiques d'un démarrage direct figure (III.4) ont des inconvénients.

Nous les avons cités. Rappelons simplement que la pointe d'intensité peut provoquer une chute de tension supérieure à **5%** de la tension totale et venir ainsi perturber le fonctionnement des appareils alimenté par le même réseau.

- Différents artifices des démarrages ou l'utilisation de moteurs spéciaux permettent de réduire ces inconvénients.
- Moteur à double cage.
- Artifices de démarrage sur un moteur ordinaire (étoile-triangle, résistance, autotransformateur ...).

III .10 Démarrage des moteur à enroulements partagés « part-winding »

Ce type de moteur comporte un enroulement statorique dédoublé en deux enroulements parallèles avec six ou douze bornes sorties. Il est équivalent à deux « demi moteur » d'égale puissance.

Lors du couplage du premier enroulement sur le réseau d'alimentation le « demi moteur » démarre en direct sous la pleine tension de réseau, ce qui divise le courant de démarrage et le couple par deux.

Ce dernier est néanmoins supérieur au couple que fournirait un moteur à cage de même puissance démarrant en étoile triangle.

En fin de démarrage, un appareillage identique couple le second enroulement sur le réseau. A ce moment, la pointe de courant est faible et de courte durée, car le moteur n'a pas été séparé de réseau d'alimentation et n'a plus qu'un faible glissement. [1]

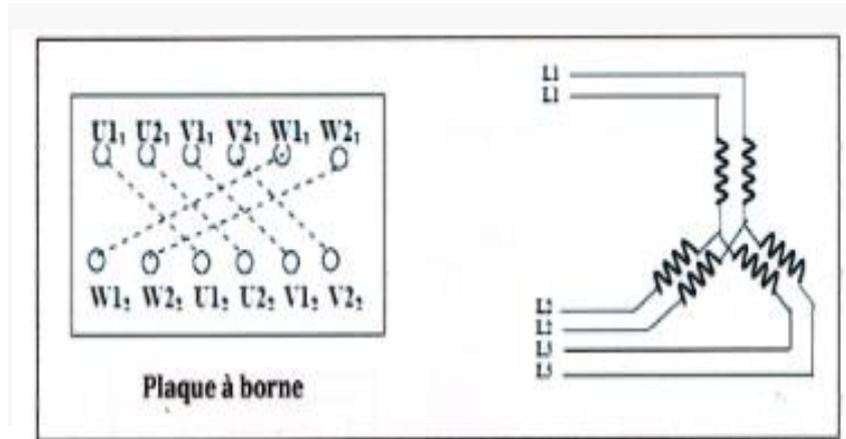


Figure III.7 : couplage du stator sur le réseau

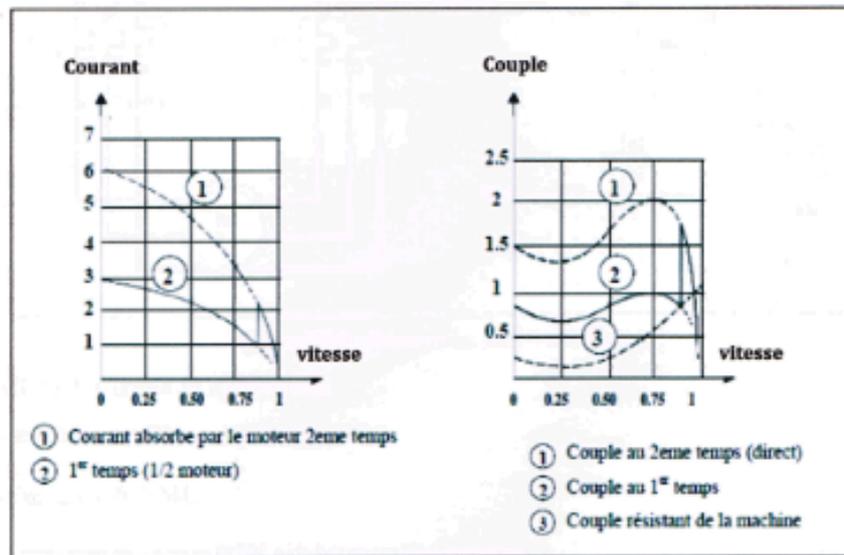


Figure III.8 : Caractéristique couple/courant en fonction de la vitesse.

III .10.1 Fonctionnement

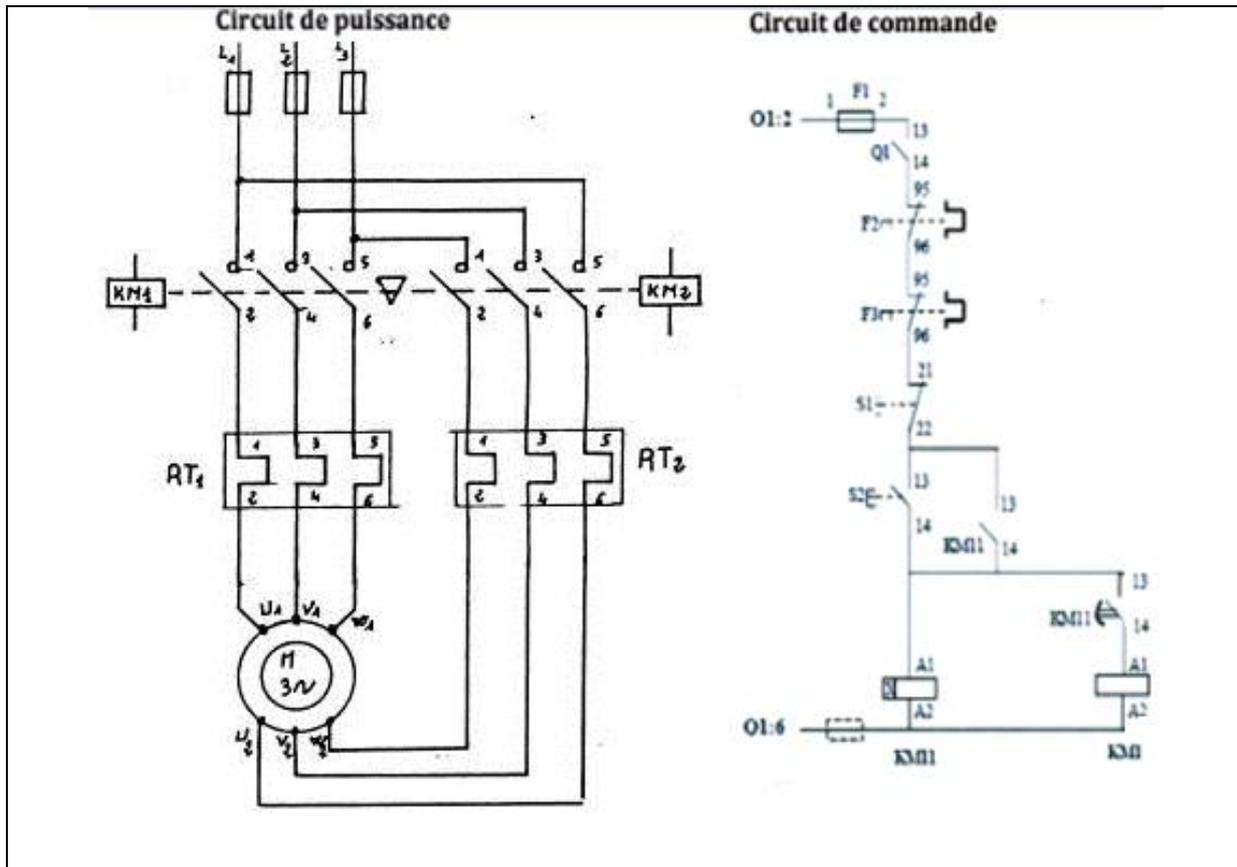


Figure III.9 : Démarrage part-winding.

III .10 .2 Circuit de commande :

- Impulsion sur S2.
- Excitation de **KM1**.
- Fermeture du contact **KM1** (13-14) auto alimentation.
- Fermeture du contact temporisé **KM1** (13-14).

III .10 .3 Circuit de puissance

- Fermeture de Q1.
- Fermeture de **KM1**.
- Fermeture de **KM2**

III .10 .4 Arrêt

- Par impulsion S1

- Par déclenchement du relais thermique **F2** ou **F3**.

III .10 .5 Protection

- Par fusibles contre les courts circuits.
- Par relais thermique contre les surcharges faibles et prolongées

III .10 .6 Avantages

- Pointe d'intensité faible et de courte durée.
- Au moment du 2ème couplage le moteur n'est pas séparé du réseau
- Faible glissement. [5]

III .11 . Démarrage étoile /triangle

Ce démarrage ne peut s'appliquer qu'aux moteurs dont les deux extrémités des trois enroulements du stator sont sorties sur la plaque à bornes et de le couplage triangle correspond à la tension de réseau (exemple pour un réseau **380V**, il faut un moteur **380V triangle /660V étoile**)

Le procédé consiste à démarrer le moteur en connectant ses enroulements en étoile ceux-ci se trouvent alors alimentés sous une tension du réseau divisée par trois soit se environ **58 %** de la tension nominale .Cette tension est constante pendant tout le premier temps. Le couple qui est réduit dans le rapport du carré de la tension est égal au tiers de couple fourni par le moteur démarrant en direct. Le courant dans la ligne d'alimentation est réduit dans la même proportion.

Le courant à l'intérieur même de chaque enroulement est réduit seulement dans le rapport **0,58** mais il n'a pas à être pris en considération du point de vue de l'utilisation les valeurs initiales typiques sont pour le courant **2 In** et pour couple **0,5 Cn**.

Le démarrage étoile-triangle convient donc bien aux machines démarrant à vide ou à couple résistant faible. Au second temps, la suppression de couplage étoile est suivie du couplage triangle.

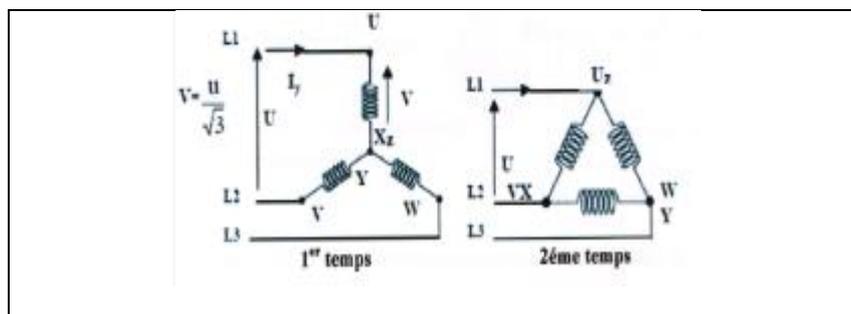
Chaque enroulement est alors alimenté sous la pleine tension du réseau, le moteur rejoint ses caractéristiques naturelles.

Le couple moteur reste faible pendant tout le couplage « étoile » et la vitesse, stabilisée à la fin de ce temps. Peut être assez basse si le couple résistant de la machine est relativement

élevé (par exemple dans le cas d'une machine centrifuge) .Il en résulte alors des pointes importantes de courant et de couple au passage étoile –triangle.

Ces considérations peuvent conduire à renoncer au démarrage étoile –triangle pour des machines à des caractéristiques « centrifuges », surtout au –delà d'une certaine puissance (par exemple **55KW**).

Par ailleurs, il faut remarquer que le courant qui traverse les enroulements du contacteur du moteur est discontinu en effet, il est interrompu au moment de l'ouverture du contacteur « étoile » pour se rétablir brutalement (sous la pleine tension de réseau), leur de la fermeture du contacteur « triangle ».



Etant donné les caractéristiques très inductives de ces enroulements. Le passage en triangle s'accompagne de pointes de courant transitoires très importantes au-delà d'une certaine puissance. Il est donc conseillé soit de renoncer au démarrage étoile-triangle. Soit d'utiliser une variante permettant de limiter les phénomènes transitoires parmi ces variantes :

A-Etoile/triangle avec temporisation au passage étoile/triangle

Nécessite une machine à couple résistant très faible d'inertie suffisante pour éviter une baisse de vitesse notable pendant la temporisation (en générale **1à2**).

B-Démarrage en trois temps : étoile/triangle + résistance triangle

La coupure subsiste, mais une résistance est mais en série avec les enroulements couples en triangle, pendant environ **3** secondes.

C- Démarrage a étoile/triangle sans coupure

La résistance destinée à se trouver temporairement en série avec le couplage triangle es branchée immédiatement avant l'ouverture de contacteur étoile, a fin d'éviter toute

interruption du circuit. L'étude détaillée de ses variantes sortirait du cadre de cette présentation. [1]

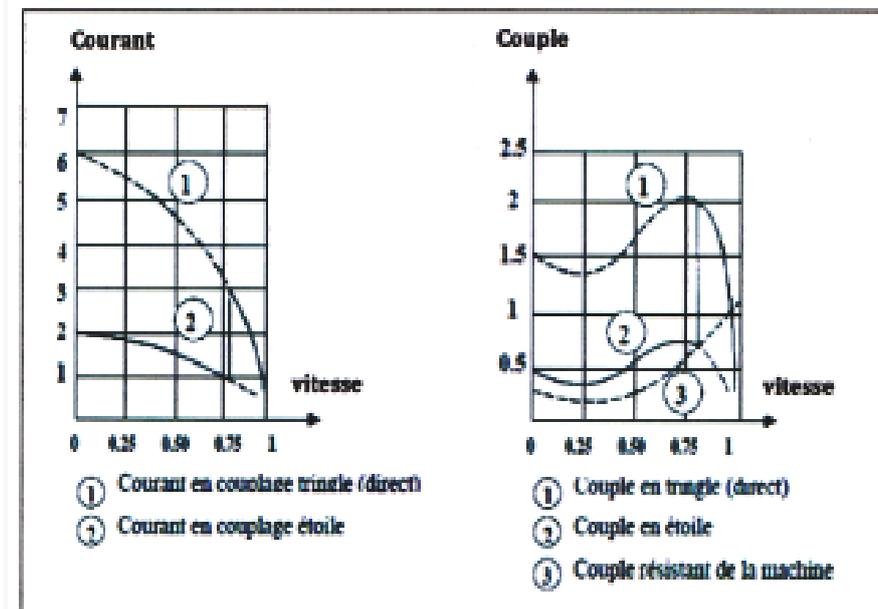


Figure III.10 : Caractéristique couple/courant en fonction de la vitesse.

III .11 .1 Schéma fonctionnelle de démarrage « étoile-triangle » :

Avec bloc de contact temporisé sur le contacteur KM2.

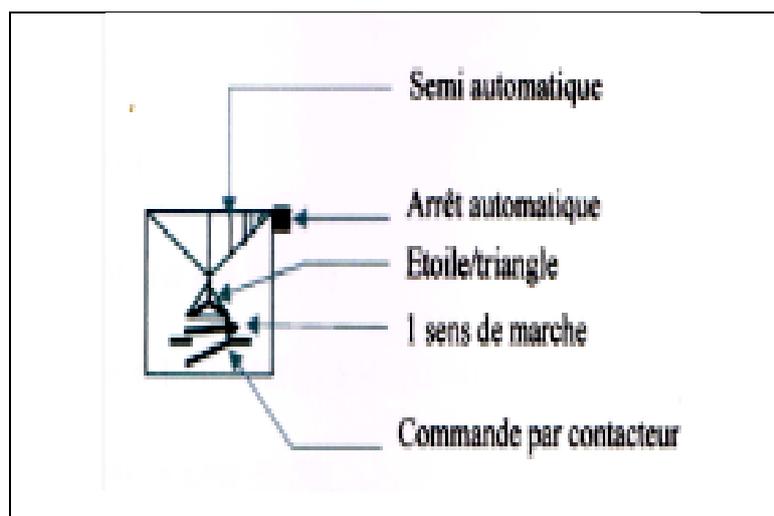


Figure III.11 : Schéma fonctionnelle de démarrage « étoile-triangle ».

III .11 .2 Fonctionnement

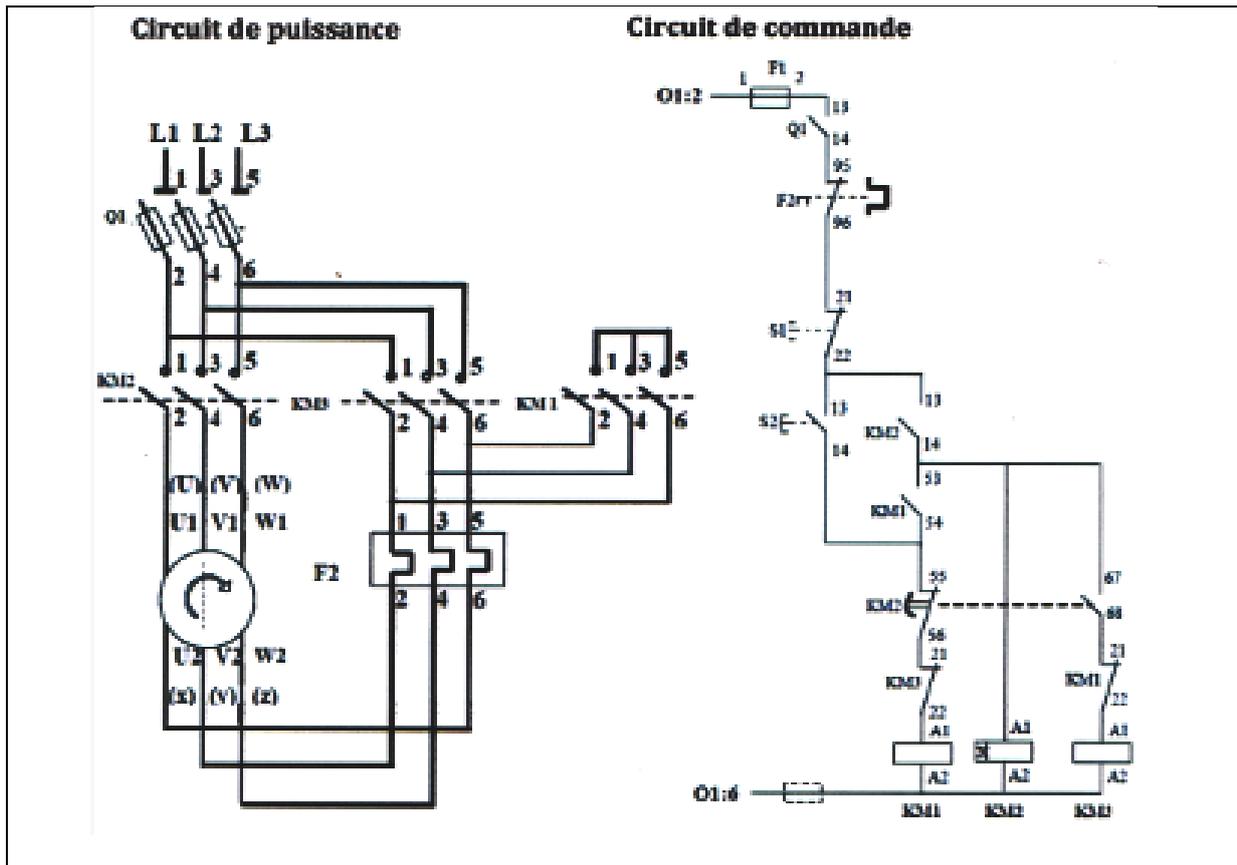


Figure III .12: Schéma de démarrage étoile /triangle.

III .11 .3 Circuit de commande

- Impulsion sur **S2**.
- Fermeture de **KM1**.
- Fermeture de **KM2** par **KM1** (53-54).
- Auto alimentation de **KM1-KM2** par **KM2** (13 -14).
- Ouverture de **KM1** par **KM2** (55- 56).
- Fermeture de **KM3** par **KM1** (21-22) et **KM2** (67-68).

III .11.4 Particularités

La tension admissible dans les enroulements du moteur couplé en triangle doit correspondre à la tension du réseau d'alimentation.

Q1 calibre **In** de moteur.

F2 calibre (**In** moteur / $\sqrt{3}$).

KM1 calibre (**In** moteur/ $\sqrt{3}$).

KM2- KM3 calibre (**In** moteur/ $\sqrt{3}$).

III .11.5 Circuit de puissance

- Fermeture manuelle de **Q1**.
- Fermeture de **KM1** : couplage étoile.
- Fermeture de **KM2** : alimentation de moteur.
- Ouverture de **KM1** : élimination de couplage étoile.
- Fermeture de **KM3** : couplage triangle.

III .11.6 Arrêt

- Par impulsion **S1**
- Par déclenchement du relais thermique **F2** ou **F3**

III .11.7 Protection

- Par fusibles contre les courts-circuits incorporés au sectionneur.
- Par relais thermique **F2** contre les surcharges faibles et prolongées.
- Fusible **F1** pour le circuit de commande.

Courant **$I_d = 1.3 \text{ à } 2.6 I_n$**

Couple **$C_d = 0.2 \text{ à } 0.5$**

III .11.8 Avantage

- Bon rapport couple/courant.
- Réduction importante de courant de démarrage.

III .11.9 Inconvénients

- Couple au démarrage faible réduit au tiers de sa valeur en direct.
- Pas de possibilité de réglage de la vitesse.
- coupure d'alimentation au changement de couplage, apparition de phénomènes transitoires.
- Puissance limitée. [5]

III .12 Démarrage statorique

L'alimentation sous tension réduite du moteur le premier temps, est obtenue par la mise en série avec chaque phase au stator d'une résistance qui est ensuite court-circuitée, généralement en un seul temps.

Les couplages électriques des enroulements vis-à-vis ou réseau n'étant pas modifiés au cours de démarrage, le courant de démarrage parcourant la ligne d'alimentation n'est réduit que proportionnellement à la tension appliquée au moteur, tandis que le couple se trouve réduit comme le carré de celle-ci.

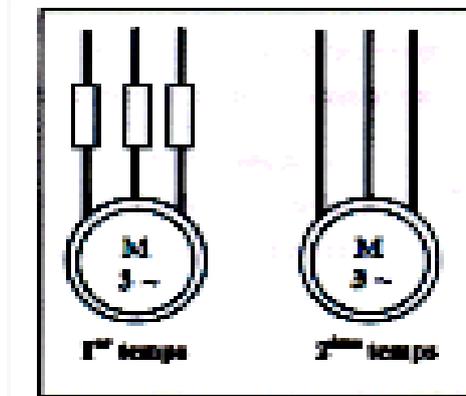


Figure III.13 : branchement des résistances avec le moteur.

Le couple initial de démarrage est relativement faible (valeur typique $0,75C_n$) pour une pointe de courant encore importante (valeur typique $4,5 I_n$).

La tension appliquée aux bornes du moteur ne reste pas constant pendant la période d'accélération.

Le courant, maximum lorsque le moteur est mis sous tension, diminue au fur et à mesure que le moteur accélère : la chute de tension aux bornes des résistances diminue et la tension aux bornes des moteurs augmente progressivement.

Comme le couple est proportionnel au carré de la tension, les valeurs de couple obtenues sont plus élevées, pour un couple initial donné, qu'avec un système délivrant une tension réduite de valeur fixe.

Les courbes des démarrages « statorique » et « étoile triangle », tracées pour des couples initiaux de démarrage même ordre, mettent nettement en évidence cette propriété.

Avec un démarrage étoile triangle du moteur entraînant une machine de type centrifuge, la vitesse atteinte à la fin de premier temps est de **80%** environ de la vitesse nominale : le passage au deuxième temps se traduit par de forts à-coups de couple et de courant.

Avec un démarrage statorique par résistance, le passage sous pleine tension se fait pour une vitesse nettement plus élevée avec des pointes beaucoup plus faibles.

La mise en vitesse est progressive et sans à-coups il est possible d'ailleurs de modifier les valeurs de courant et de couple de démarrage en adaptant la résistance.

Le démarrage statorique à résistance convient donc bien pour démarrer des machines à couple résistant croissant ou voisin de la moitié du couple nominal, y compris les machines puissantes et de forte inertie. [1]

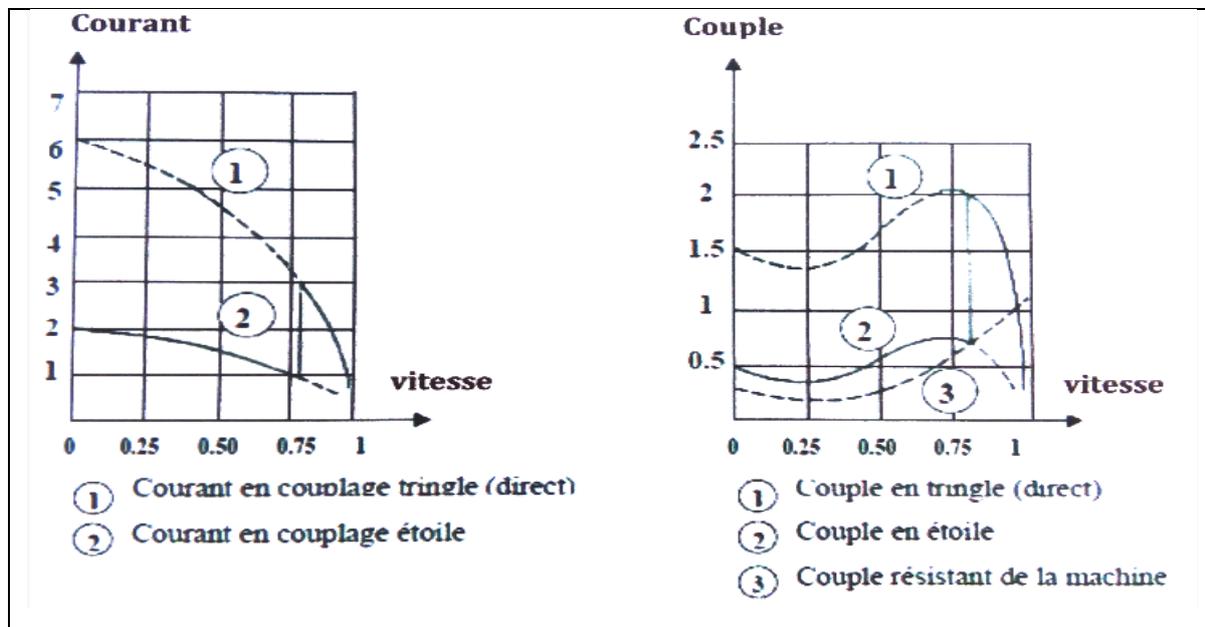


Figure III.14 : Caractéristique couple/courant en fonction de la vitesse.

III .12.1 Schéma fonctionnelle de démarrage statorique :

Deux contacteurs de calibre différent, Avec bloc de contacte temporisé sur le contacteur KM11.

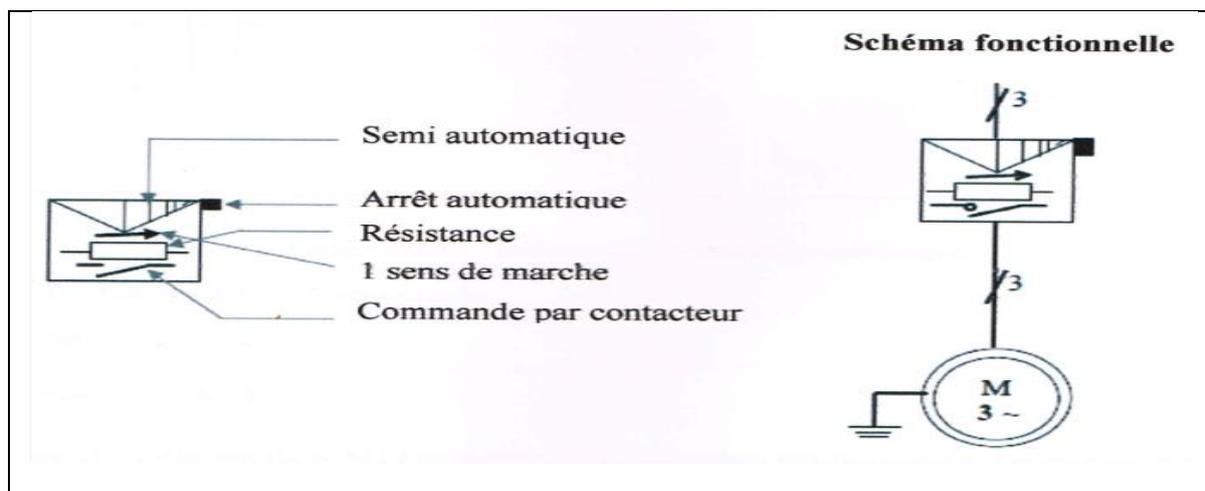


Figure III.15 : Schéma fonctionnelle de démarrage statorique

III .11.2 Fonctionnement

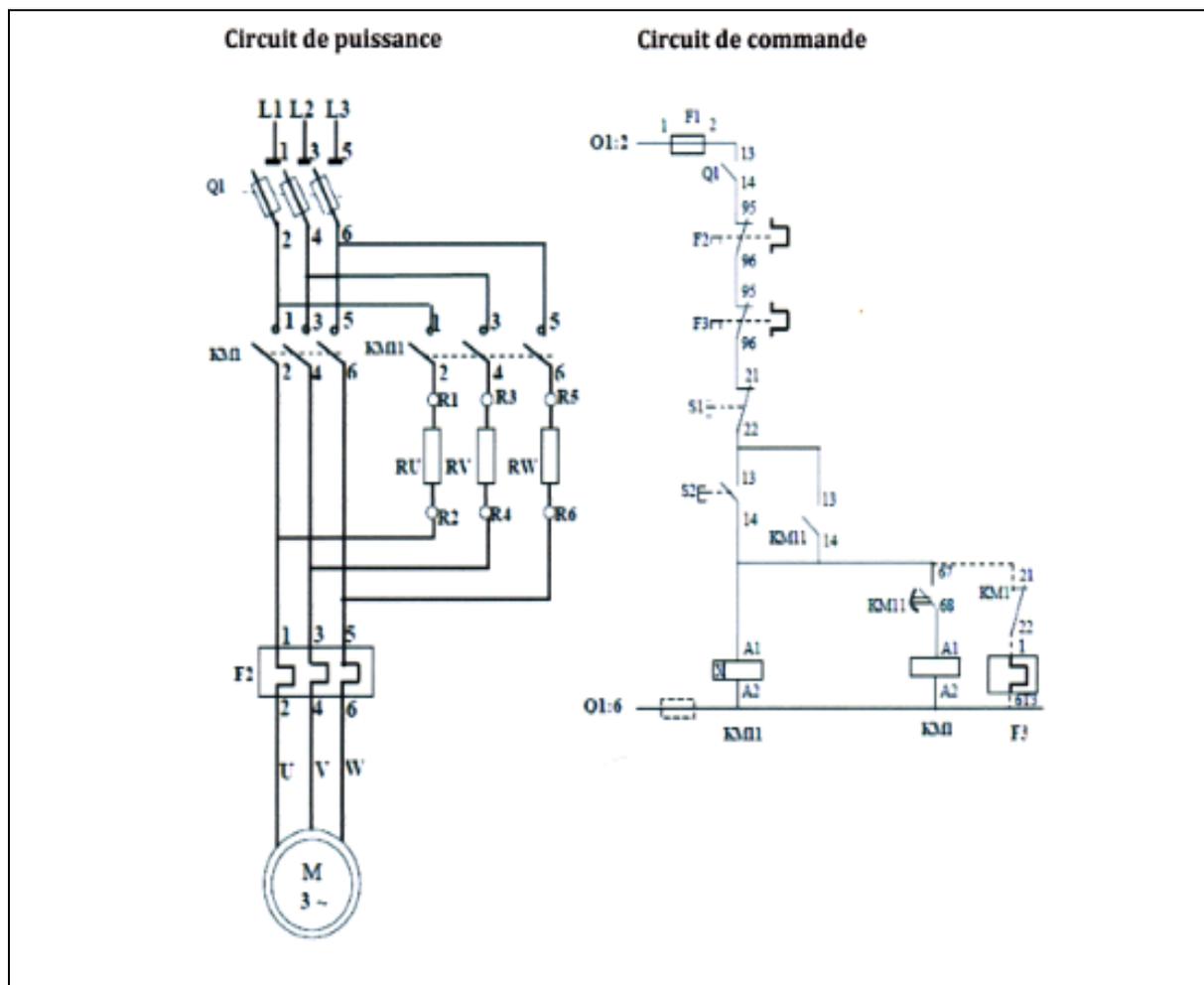


Figure III.16 : Schéma de démarrage statorique.

III .11.3 Circuit de commande

- Impulsion sur **S2**.
- Fermeture de **KM11**.
- Auto alimentation de **KM11** et alimentation de relais temporisateur. Thermique **F3**.
- Fermeture de **KM1** par **KM11** (67-68).
- Elimination de **F3** par **KM1** (21-22).

III .11.4 Particularités

- **Q1** : calibre **In** moteur.
- **KM11** : calibre $(I_n \text{ moteur})\sqrt{2}$.
- **KM1** : calibre **In** moteur.
- **F2** : calibre **In** moteur.

III .12.5 Circuit de puissance

- Fermeture manuelle de **Q1**.
- Fermeture de **KM11** (mise sous tension de moteur et insertion des résistances).
- Fermeture de **KM1** (court-circuitage des résistances, couplage direct du moteur).

III .12.6 Arrêt

Impulsion sur **S1**.

III .12.7 Protection

- Par fusibles **F1** contre les courts-circuits.
- Par relais thermique **F2** contre les surcharges faibles et prolongées.
- **F3** contre les démarrages fréquents et incomplets.

Courant $I_d = 4,5 I_n$.

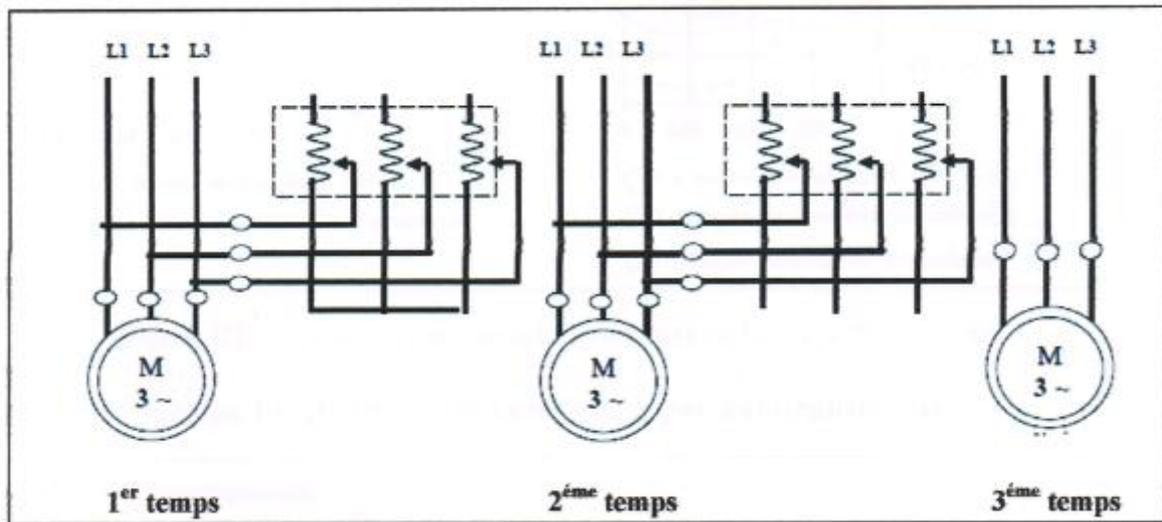
Couple $C_d = 0,6 \text{ à } 0,85 C_n$.

III .13 Démarrage par autotransformateur

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 comme indique la figure suivante 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 pleine 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 pleine 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-circuité, puis l'autotransformateur est mis hors circuit. Le courant de démarrage varie dans les mêmes proportions. Ils sont divisés par $(U_{\text{réseau}}/U_{\text{réduite}})$.



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'étoilage, 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 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 la 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 réseau du prix élevé de l'autotransformateur.

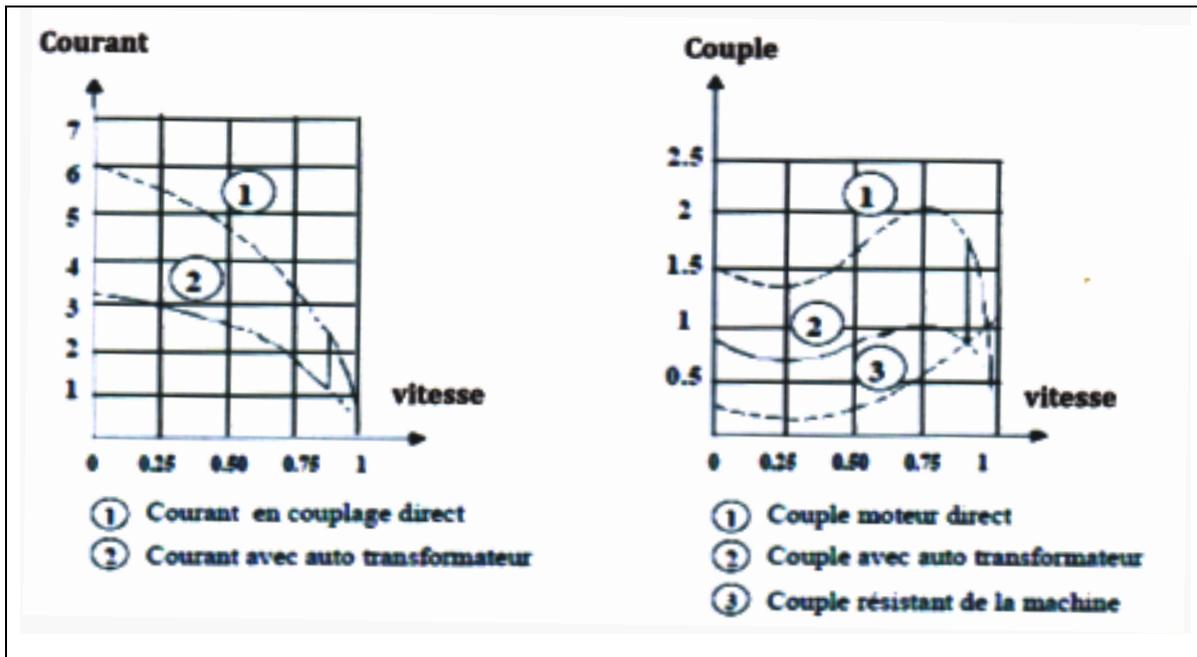


Figure III.17 : Caractéristique couple/courant en fonction de la vitesse.

III .12.1 Schéma fonctionnelle de démarrage par autotransformateur :

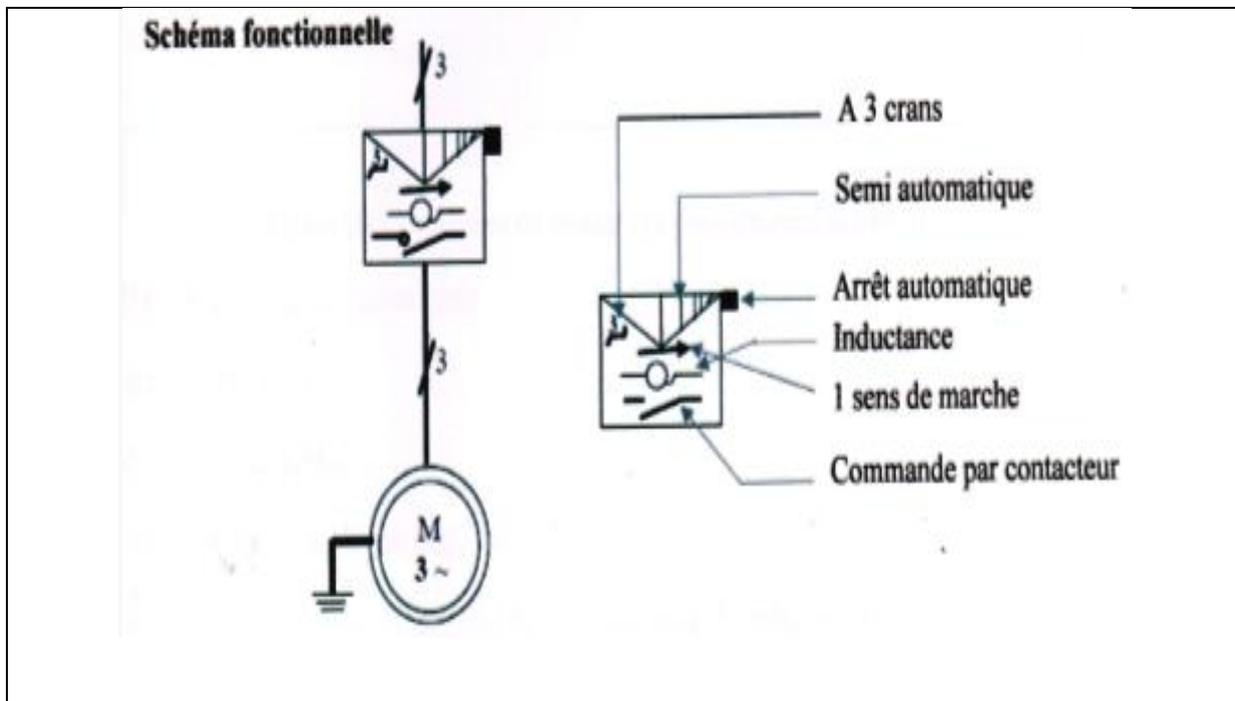


Figure III.8 : Schéma fonctionnelle de démarrage par autotransformateur.

III .12 .2 Fonctionnement :

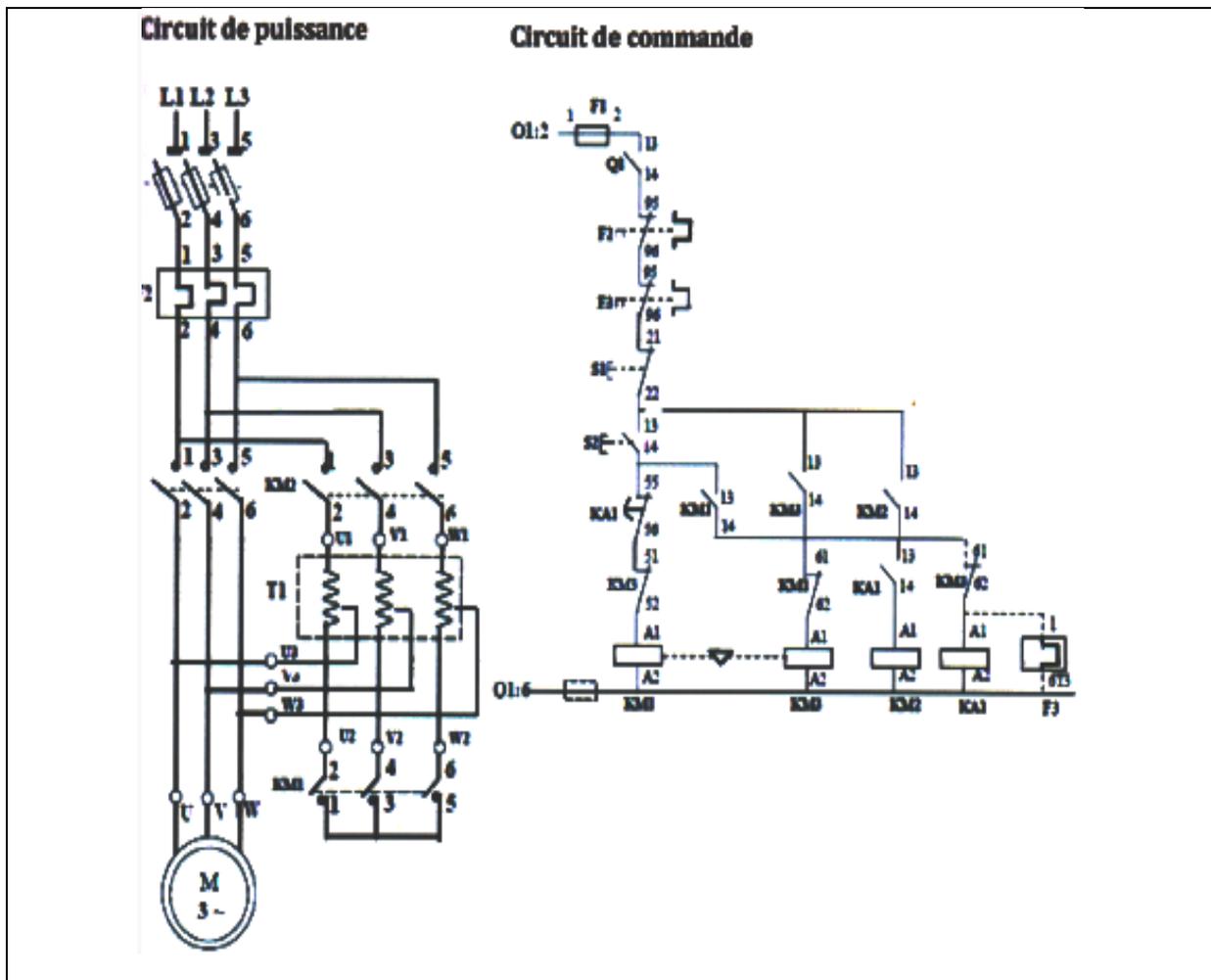


Figure III.9 : Schéma de démarrage par autotransformateur.

III .12 .3 Circuit de commande

- Impulsion sur S2.
- Fermeture de KM1.
- Verrouillage de KM3 par KM1 (61-62).
- Fermeture de KA1 par KM1 (13-14) et alimentation de relais temporisateur thermique F3.
- Fermeture de KM2 par KA1 (13-14).
- Auto-alimentation de KM2 (13-14).
- Ouverture de KM1 par KA1 (55-56).
- Fermeture de KM3 par KM1 (61-62).

- Verrouillage de **KM1** par **KM3** (51-52).
- Auto alimentation de **KM3** (13-14).
- Ouverture de **KA1** par **KM3** (61-62).
- Elimination de **F3** par **KM3** (61-62).
- Ouverture de **KM2** par **KA1** (13-14).

III .12 .4 Particularités

- **Q1** : calibre In moteur.
- **KM1-KM2-KM3** : calibre In moteur.
- **F2** : calibre In moteur.

III .12 .5 Circuit de puissance

- Fermeture manuelle de **Q1**.
- Fermeture de **KM1** (couplage étoile de l'autotransformateur).
- Fermeture de **KM2** (alimentation de l'autotransformateur).
- Ouverture de **KM1** (élimination de couplage étoile de l'autotransformateur).
- Fermeture de **KM3** (alimentation de l'autotransformateur).
- Ouverture de **KM2** (élimination de l'autotransformateur).

III .12 .6 Arrêt

Impulsion sur **S1**.

Courant $I_d = 1,7 \text{ à } 4 I_n$

Couple $C_d = 0,4 \text{ à } 0,85 C_n$.

III .12 .7 Avantages

- Bonne rapport couple/ courant.
- Possibilité de réglage des valeurs au démarrage.
- Pas de coupure d'alimentation pendant le démarrage.

III .12 .8 Inconvénients

- Auto transfo onéreux pour les puissances $< 37 \text{ KW}$.
- Encombrement important.

III .12 .9 Emploi

Il s'emploie généralement pour les grands moteurs. L'autotransformateur a d'habitude des modes de connexion correspondant respectivement à 55,65 et 75% de la tension nominale.

- Machines de forte puissance ou de forte inertie.
- Dans le cas où la réduction de la pointe de courant est un critère important.
- Compresseur industriel. [5]

III .13 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons exposé une étude sur les différents types de démarrages des moteurs asynchrones triphasés à cage. Nous avons également cité les avantages et les inconvénients de chaque procédé et leur différente application et nous avons présenté chaque type de démarrage par une figure illustrée, il existe différentes communications et méthodes :

- Démarrage direct.
- Démarrage étoile/triangle.
- Démarrage par autotransformateur.
- Démarrage statorique.

Dans le chapitre suivant on donne une étude sur les moteurs asynchrones triphasés à bague et les différents procédés de démarrage utilisés pour ce type de moteur.

Tableau comparatif des différents modes de démarrage des moteurs asynchrones triphasés

	Démarrage direct	Démarrage étoile triangle	Démarrage statorique	Démarrage par autotransformateur	Démarrage statorique
Réseau	Forte	faible	moyen	Faible à moyen	moyen
Courant de démarrage	pleine	faible	Faible à moyen	Faible à moyen	Faible à moyen
Surcharge en ligne	100 %	33 %	50 %	40/65/80 %	70 %
Couple en % de Cd	4 à 8 In	1.3 à 1.6 In	4.6 In	1.7 à 4 In	<2.5 In
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
Temps accélération pour démarrage	0.2...5s	2...15s	2...20s	2...20s	2...20s
Avantages	-démarrage simple et économique -couple au démarrage important	-économiques -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 -possibilités de réglages des valeurs au démarrage
Inconvénients	-pointe de courant très -démarrage brutal	-couple de démarrage faible -coupure d'alimentation au changement de couplage -moteur 6 bornes	-faible réduction de la pointe de courant au démarrage -nécessite des résistances volumineuses	-nécessite un autotransformateur onéreux -présente les risques de réseau perturbé	-plus onéreux
Domaines d'utilisation	-Entraînements avec réseaux forts permettant couple de démarrage élevé	-Machines démarrant à vide -Ventilateur et pompes -Centrifuges de petite puissance	-Machine à forte inertie sans problèmes particuliers de couple et de courant au démarrage	-Machine de forte puissance ou de forte inertie, dans les cas où la réduction de la pointe de courant est un critère important.	-Machines démarrant en charge à démarrage progressif

Chapitre IV :

Simulation des différents procédés de démarrage des moteurs asynchrones

IV.1) Résultats des simulations

IV.1.1) Démarrage direct :

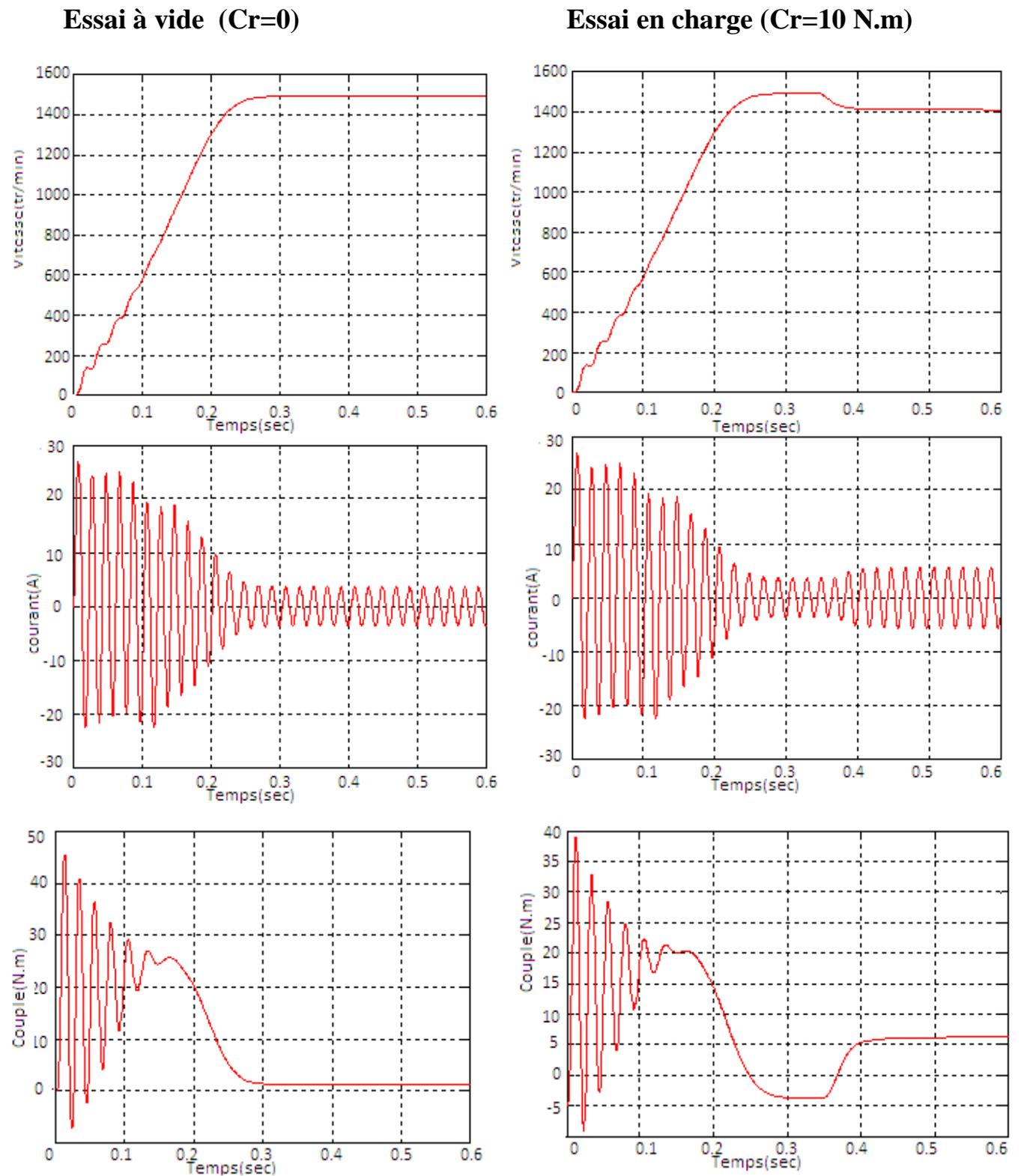


Figure IV.1.1 : Simulation de démarrage direct à vide et en charge du moteur asynchrone a cage d'écureuil.

IV.1.2) Démarrage étoile/triangle:

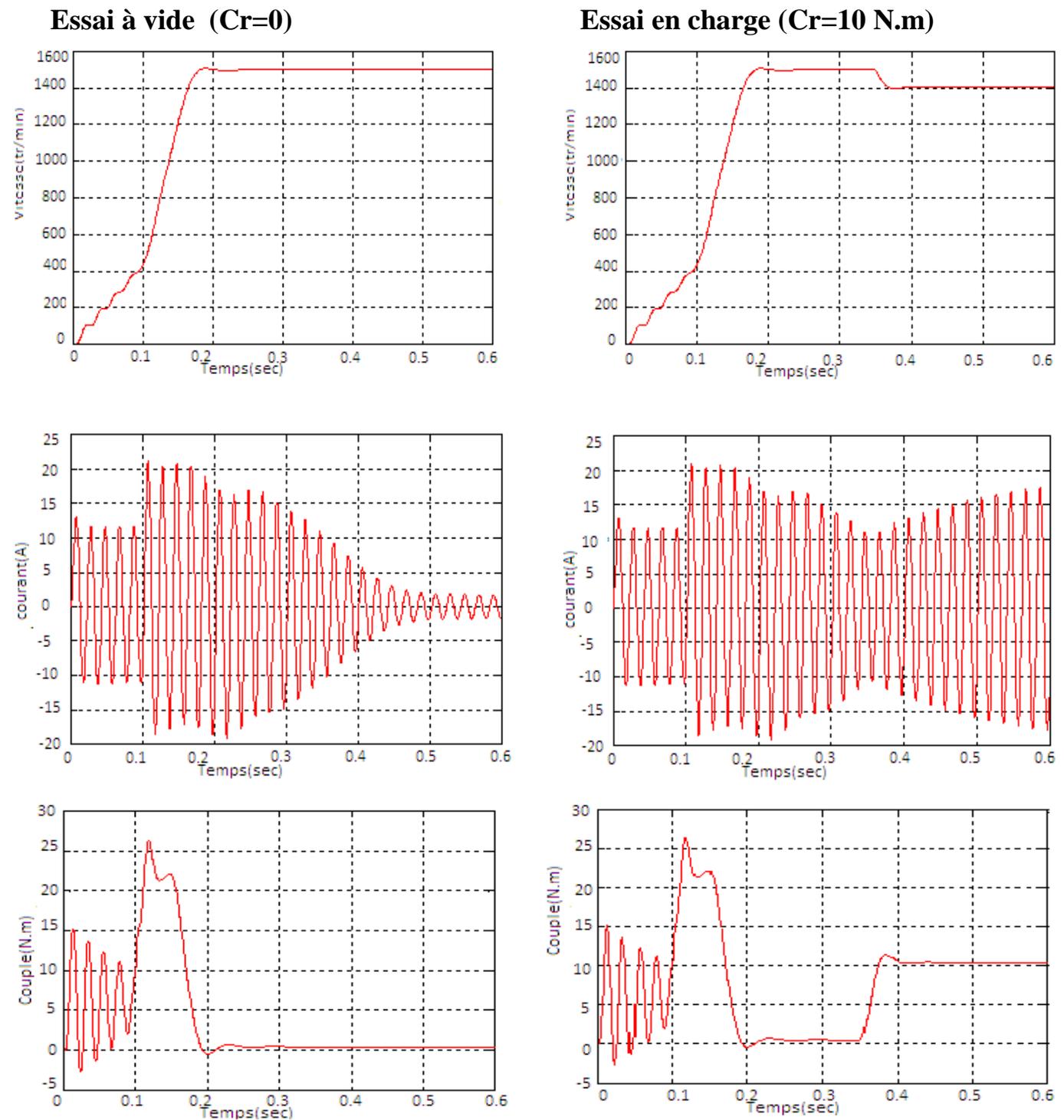
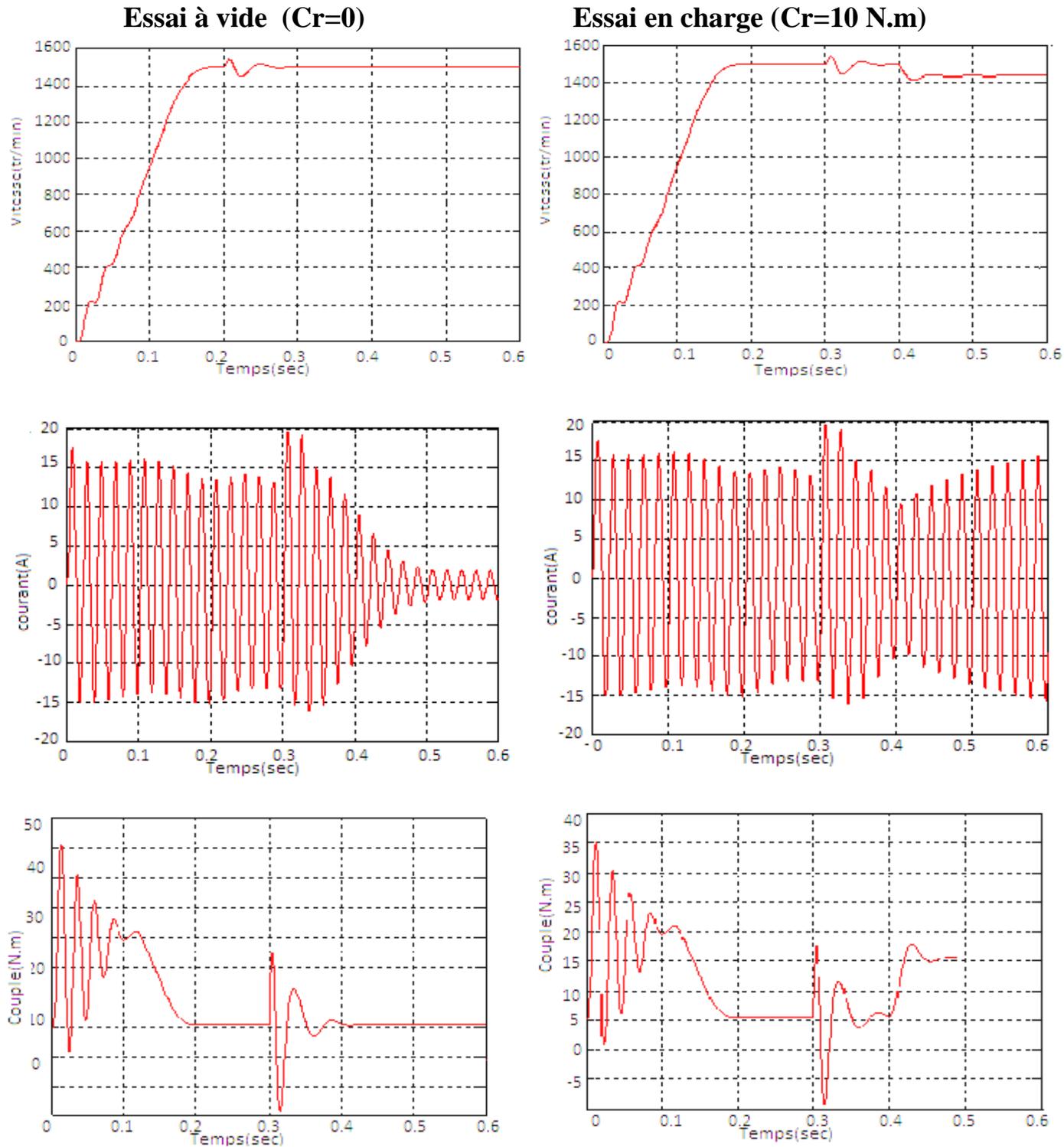


Figure IV.1.2 : Simulation de démarrage étoile/ triangle à vide et en charge du moteur asynchrone a cage d'écureuil.

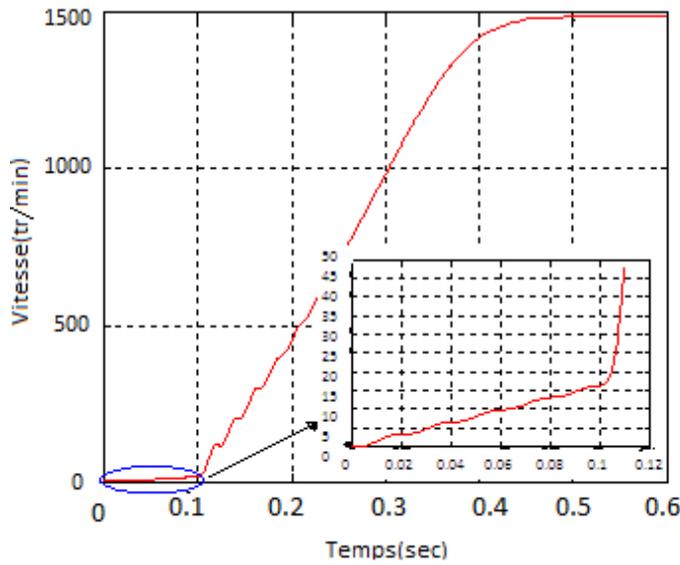
IV.1.3) Démarrage par autotransformateur :



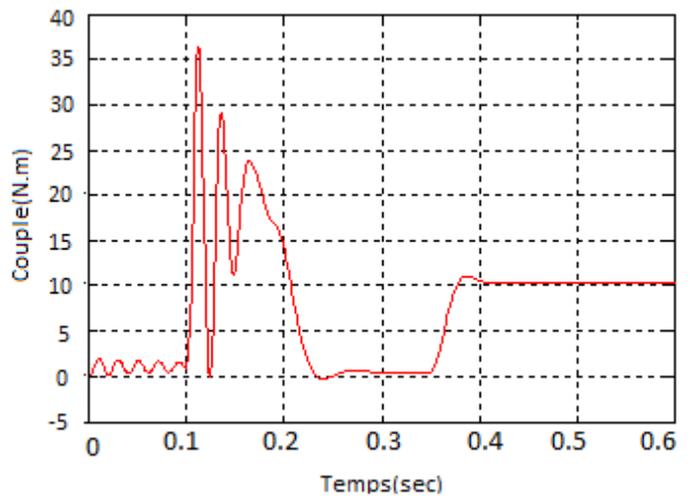
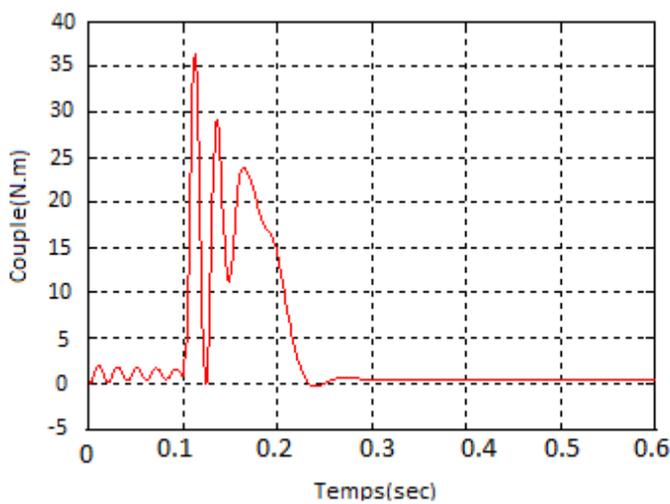
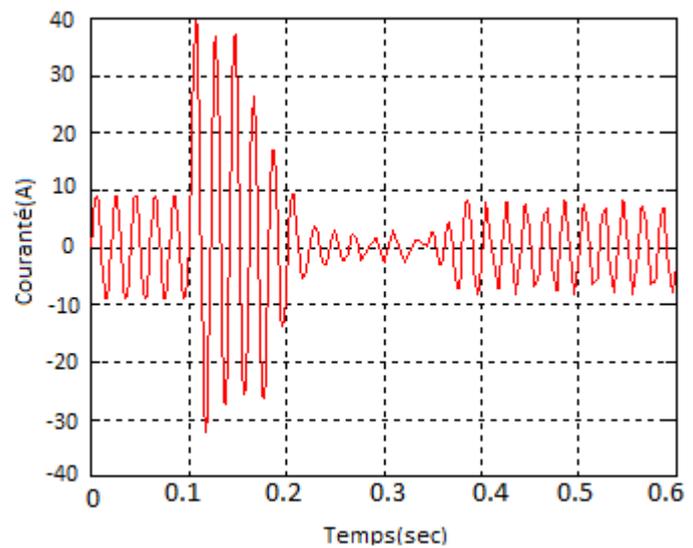
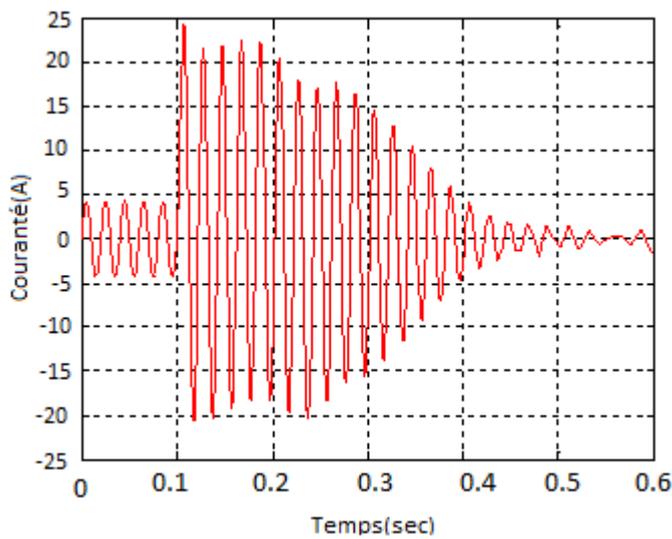
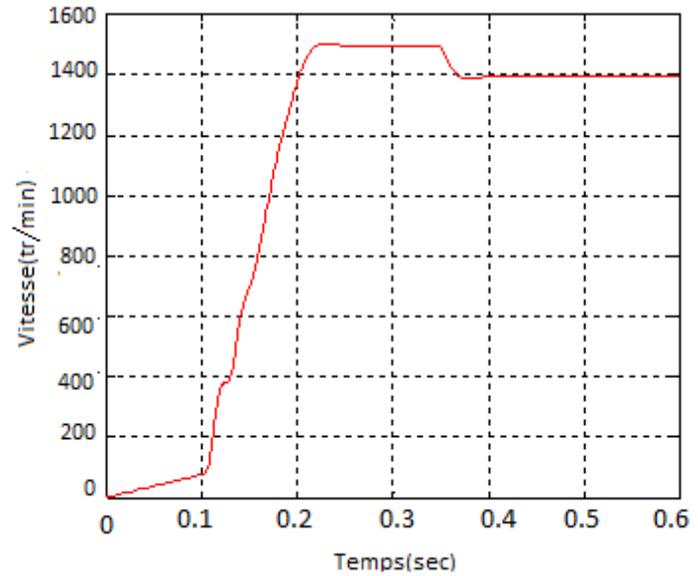
Figures IV.1.3 : Simulation de démarrage par autotransformateur à vide et en charge du moteur asynchrone a cage d'écureuil.

IV.1.4) Démarrage statorique à résistances:

Essai à vide ($C_r=0$)



Essai en charge ($C_r=10$ N.m)



Figures IV.1.4 : Simulation de démarrage statorique à vide et en charge du moteur asynchrone a cage d'écureuil.

IV.2) Interprétation des résultats de la simulation :

Notons que les paramètres de la machine sont donnés dans l'annexe (A).

En première étape on a simulé numériquement les différents modes de démarrage du moteur asynchrone alimenté par le réseau standard 220/380V, 50HZ et sans l'application de perturbation $C_r=0$ (**essai à vide**).

En deuxième étape, une perturbation du couple ($C_r=10\text{N.m}$) est appliquée à l'arbre du moteur à l'instant $t=0.35\text{s}$ (**essai en charge**).

IV.2.1) Démarrage direct

L'examen des courbes de la figure (V-5) permet de constater que le démarrage à vide avec une tension nominale permet d'avoir:

Aux premiers instants, les courants statoriques présentent des oscillations successives autour de zéro, mais qui disparaissent rapidement au bout de quelques alternances (environs de 0.28s), le régime permanent est atteint, ces oscillations peuvent être à l'origine de la destruction de la machine par échauffement en cas de répétitions excessives.

On remarque aussi que la vitesse de rotation augmente et se stabilise aux environs de la valeur 1500Tr/min après 0.25s, par contre le couple électromagnétique atteint une valeur maximale de 45 N.m en régime transitoire puis se stabilise après quelques oscillations à une valeur pratiquement nulle en régime permanent à vide. Lors de l'application de la charge, le couple électromagnétique rejoint sa valeur de référence pour compenser cette sollicitation avec une réponse quasiment instantanée avant de se stabiliser à la valeur de couple résistant.

IV.2.2) Démarrage étoile/triangle

A la mise sous tension, couplage étoile du stator. Le moteur démarre sous tension réduite, avec un couple de démarrage réduit au tiers de sa valeur en direct égale à 15N.m. Ce couplage d'enroulement provoque un courant de démarrage aussi réduit (14A). Lors de passage triangle à l'instant 0.1s le moteur est couplé sous sa tension nominale et cela provoque des fortes pointes d'intensité et de couple nettement supérieur aux valeurs de démarrage. La courbe de la vitesse présente un croisement lent pendant le démarrage étoile, après le passage en triangle à l'instant 0.1s, la vitesse rotorique augmente et s'établit à une valeur proche de la vitesse de synchronisme.

Lors de l'application de la charge le couple électromagnétique rejoint sa valeur de références avant de se stabiliser à la valeurs de couple résistant ,on constate une décroissance de vitesse rotorique qui se traduit par le glissement très fort ,les courant statoriques évoluant selon la charge appliquer a l'arbre du moteur .

IV.2.3) Démarrage par auto-transformateur

Au premier temps l'autotransformateur est couple en étoile, le démarrage s'effectue sous une tension réduite qui provoque un courant réduit mais un couple important (30N.m).Au couplage plein tension, on constate une diminution de couple électromagnétique (12N.m) et une augmentation du courant (20A).La vitesse augmente proportionnellement par rapport au temps jusqu'à 0.2s on remarque une oscillation faible due à l'ouverture du point neutre puis elle se stabilise. Après l'application d'un couple résistant $C_r=10\text{N.m}$ à l'instant 0.4s on remarque que le moteur répond à cette perturbation, le couple augmente jusqu'à la valeur de C_r , la vitesse de rotation et le courant de phase atteints les valeurs (15A, 1420Tr/min)

IV.2.4) Démarrage statorique à résistance :

Le moteur démarre sous tension réduite en insérant des résistances en série avec les enroulements et cela donne la permission d'ajuster le couple de démarrage à la valeur désirée et un courant de démarrage réduit .On remarque que le couple initial est assez faible ainsi que la vitesse. Lorsque la vitesse se stabilise, les résistances sont éliminées et le moteur est couplé directement sur le réseau à l'instant 0.1s.

A l'instant $t=0.35\text{sec}$ on charge la machine avec un couple $C_r=10\text{N.m}$, on constate que le courant d'appel statorique augmente à cause de l'augmentation du couple.une légère diminution de vitesse à l'instant d'application de la charge.

IV .3 Conclusion

On a insisté sur les différents démarrages des moteurs asynchrones, après comparaison des résultats des simulations a abouti que le meilleur démarrage reste celui de étoile/triangle car il présente des faible pointe de courant d'appel par rapport aux autres démarrages ce qui est bien pour le moteur lors du démarrage.

Conclusion générale

CONCLUSION GENERALE

L'entraînement des machine 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 et ses qualités de robustesse et sa simplicité d'entretien. La machine asynchrone présente un système d'équation très complexe à étudier à cause du couplage qui existe entre ses variables internes tel que le couple électromagnétique et le flux, d'où la nécessité de faire une simplification du système d'équation de la MAS en utilisant la transformation de Park.

Dans notre travail nous avons exposé l'étude et l'analyse des différents procédés de démarrage des moteurs asynchrones triphasés sans oublier de citer les avantages, les inconvénients et le domaine d'utilisation de chaque type de ces démarrages.

L'objectif essentiel de cette étude est de connaître les différentes techniques utilisées pour limiter le courant absorbé par le moteur au moment de démarrage, ainsi que le couple fourni et sa vitesse, puisque cet très fort appel de courant provoque des chutes de tension et des contraintes thermiques avec des effets électrodynamiques du reste de l'installation, c'est pour ces raisons qu'on a étudié les différents démarrages de ce moteur pour détecter les faiblesses au niveau du couple et la vitesse et en fin de compte lequel choisir pour un meilleur rendement, comme perspective à notre travail on proposera aux étudiants futurs de faire une comparaison de démarrage pour les moteurs asynchrones à l'usage.

Annexes

Paramètres du moteur asynchrone

La simulation est effectuée sur une machine définie par les paramètres suivants :

Puissance nominal : 1,5 KW

Tension nominal : 220/380 V

Rendement nominal : 0.78

Facteur de puissance nominal : 0.8

Vitesse nominal : 1420 tr/min

Fréquence nominal : 50 Hz

Résistance rotorique : 4.84 Ω

Résistance statorique : 3.805 Ω

Inductance cyclique du stator : 0.274 H

Inductance cyclique du rotor : 0.275 H

Inductance mutuelle cyclique : 0.258 H

Nombre de paires de pole : 2

Nombre d'inertie : 0.031 Kg.m²

Coefficient de frottement : 0.008 N.m/rad

Simulation des différents démarrages du moteur asynchrone

La simulation a été effectuée par le logiciel «simulink» sous «Matlab» dans cette partie on présentera les simulations numériques des différents modes de démarrages d'un moteur asynchrone triphasé, on alimente le moteur par une source de tension sinusoïdale de valeur efficace 220V et de fréquence 50Hz

Les figures suivantes représentent les schémas bloc de simulation des différents démarrages des moteurs asynchrones :

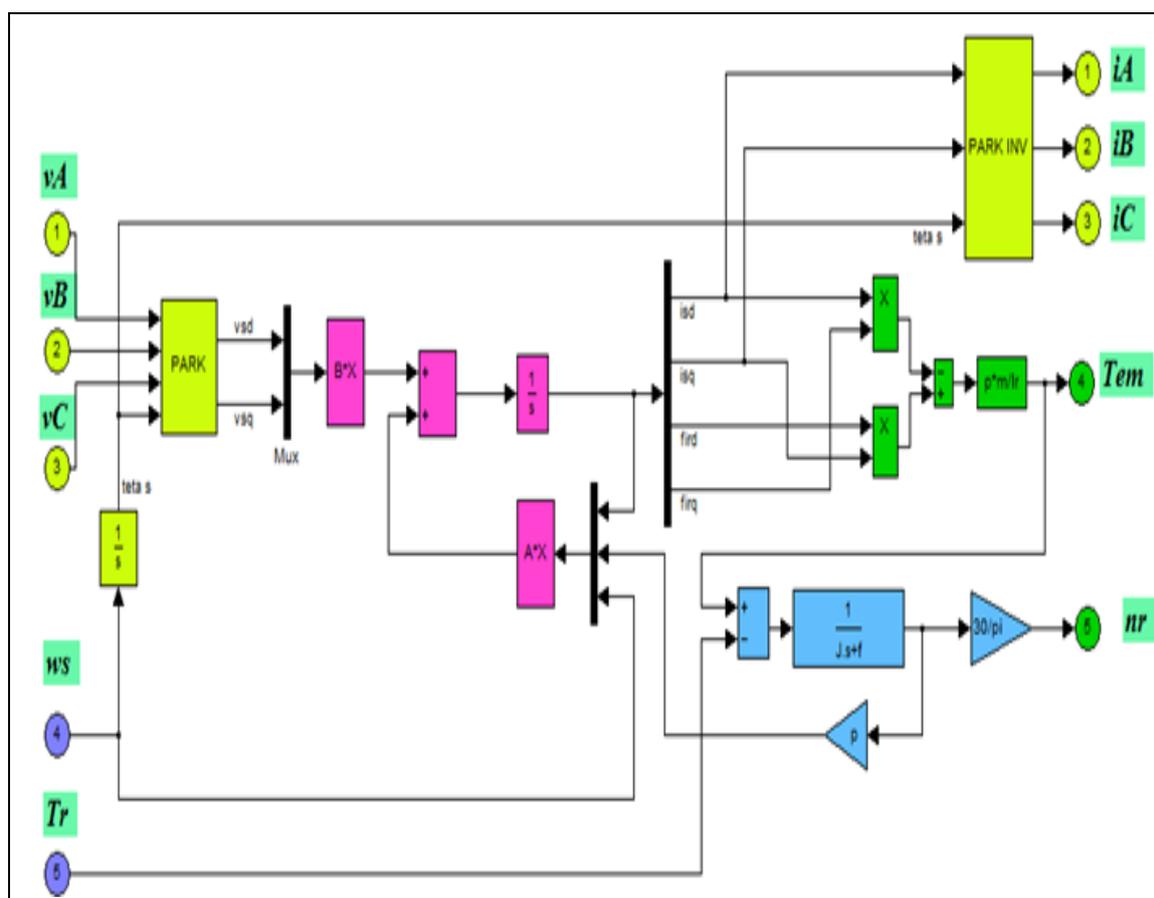


Figure 1 : Bloc de démarrage direct du moteur asynchrone.

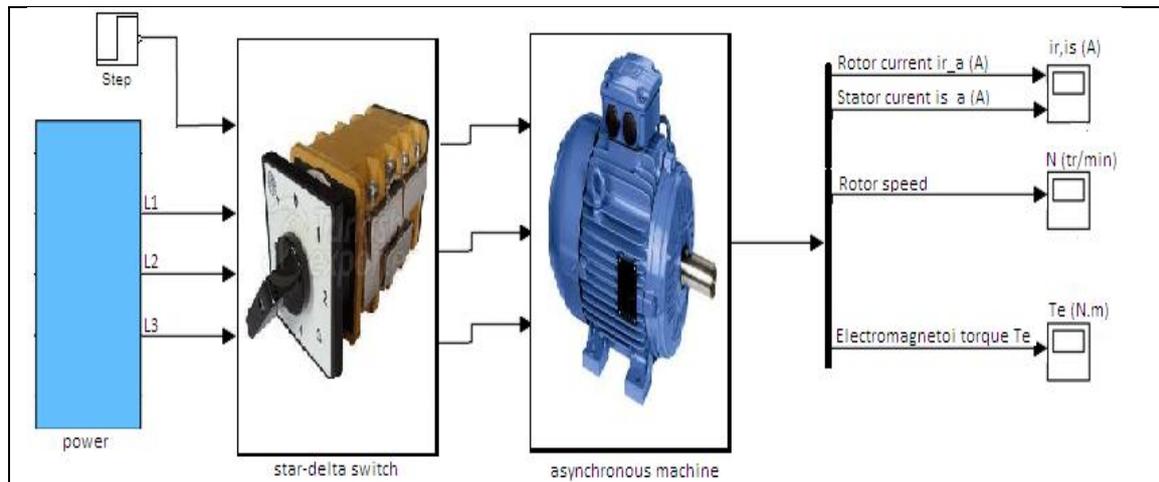


Figure 2 : Bloc de démarrage étoile/triangle du moteur asynchrone

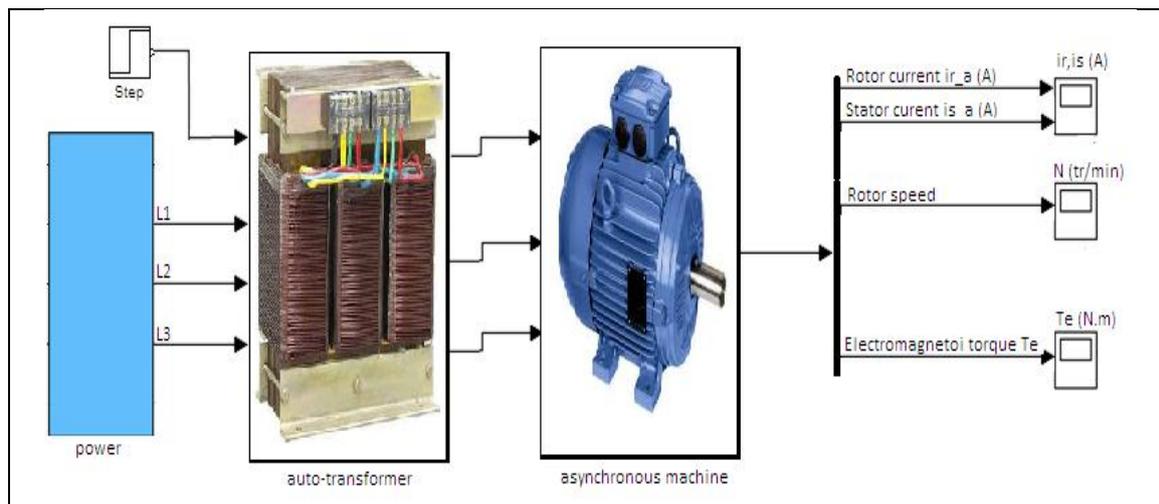


Figure 3 : Bloc de démarrage par autotransformateur du moteur asynchrone

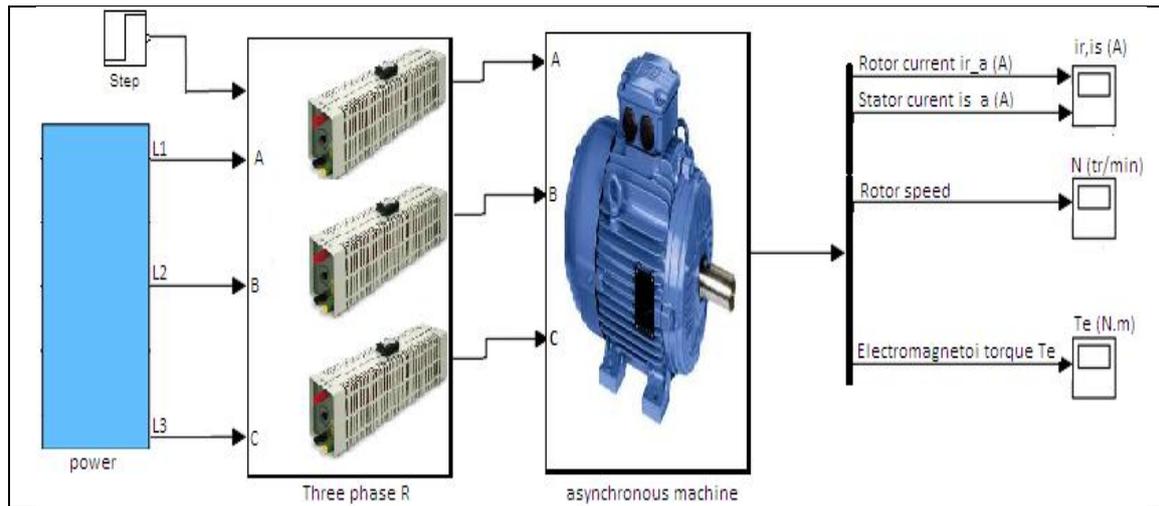


Figure 4 : Bloc de démarrage statique du moteur asynchrone

Bibliographie

Références bibliographiques

- [1] Télémechanique, schématique électrotechnique, **1986**.
- [2] C. Canudas «schéma électrique», **1994**.
- [3] J.P. Caron et J.P.Hautier, «Modélisation et commande de la machine asynchrone». Editions Technip, Paris, **1995**
- [4] Française miltant «machine électrique» Berti édition, **1993**.
- [5] R.bourgois, D.congniel memotch «électrotechnique» 5^{ème} édition **1996**.
- [6] J.C.Bossy, D.Mérat, «automatisme appliqué» collection A. Capeliez **1995**
- [7] Michel chevalier «La commande des moteurs électriques» édition 2, édition eyrolle, **1997**
- [8] D.Danic, R.le vcarrec, D.Blin «automatique et informatique industrielle» édition castiella Paris **1997**
- [9] M.Kostenko, L.Piotroviski «machine électrique» tome 2, édition mir Moscou, **1969**.
- [10] Mérat et R.Moreau «Physique appliquée, terminale électrotechnique» collection R. Édition Nathan technique **1994**.
- [11] Electro système, première STI – H. Ney- édition Nathan technique **1996**.
- [12] Delva.Trannoy «Physique appliquée», terminale génie électrotechnique Edition Hachette éducation **1994**.
- [15] M.Kouznetsov «Fondements de l'électrotechnique» tome 1, Edition «Ecole supérieure» Moscou.
- [16] Albert Terras « précis de physique et électricité appliquées» **2003**.
- [17] Stéphane Valkov «Physique appliquée, Electrotechnique» **2001**.
-