

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

Université de Jijel



*Faculté des sciences et de la technologie
Département d'Electrotechnique*

Mémoire de fin d'études

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de Master

En électrotechnique

Option : Machines électriques

Thème

**Etude comparative de différentes méthodes de freinage des
moteurs asynchrones**

Présenté par :

***HAMMIA Bilal
HACINI Alaeddine***

Proposé et dirigé par :

Pr. M.R.MEKIDECHE

Année universitaire : 2019/2020

Remerciements

Nous remercions Dieu qui nous a donné la force et la volonté de faire cet humble travail.

Tout d'abord, je voudrais remercier mon superviseur le professeur Mohamed Rachid Mekideche pour son travail d'encouragement et de soutien permanent. C'est un immense honneur de pouvoir travailler en étroite collaboration avec lui.

Cette collaboration nous a donné l'opportunité d'approfondir nos connaissances dans le domaine de la modélisation numérique ainsi que les équipements électriques.

Nos travaux n'auraient pu s'achever sans leur soutenance. C'est pourquoi nous remercions chacun des membres du jury, président de jury M. D. Amiour, Rapporteur et Examineur M. A. Bourouina de nous 'avoir fait l'honneur d'y être présent.

C'est également avec sincérité que nous remercions tous les enseignants de département électrotechnique d'université Mohammed Seddik Ben Yahia.

Nous voulons également remercier nos parents pour leur soutien moral et financier tout au long de notre parcours académique.

Enfin, nous tenons à remercier tous ceux qui nous ont aidés de près ou de loin pour l'achèvement de ce travail.

Dédicace

Avant tous, je remercie dieu le tout puissant de M'avoir donné le courage et la patience pour réaliser ce travail malgré toutes les difficultés rencontrées.

Je dédie ce modeste travail :

A mes chers parents ma mère et mon père pour leurs patience, leur amour, leur soutien moral et financier ainsi que leurs encouragements et aussi tous les sacrifices qu'ils ont endurés. Que Dieu les garde et veille sur eux.

A mes frères : Belkacem ~ Younes ~ Taha ~ Abdo

Pour les enfants de mes frères : Sondos ~ Hajar ~ M. Anas

M.Iyad ~ Louai ~ Ilyas .

A ma grande famille : HAMMIA ~ HAMIDATOU

À ma grand-mère, que Dieu la protège et prolonge sa vie

A mon chère amie et binôme Alaeddin et à toute sa famille

Aux chers amis : Houili, Ala, chocho, Hani, Chouaib, Bahi,

Bilal, Djamel, Yacin, Adam, Amjad, offi, mammar.

À tous les amis de l'université, en particulier à mes collègues de classe en Machine électrique, classe 2020

HAMMIA Bilal

Dédicace

Tout d'abord, je remercie Dieu Tout-Puissant de m'avoir donné courage et Patience pour faire ce travail malgré toutes les difficultés que j'ai rencontrées.

Je dédie cette thèse:

A mes chers parents, ma mère et mon père pour leur patience, leur amour, leur soutien moral et financier ainsi que pour eux l'encouragement ainsi que tous les sacrifices qu'ils ont endurés que dieu les protège et les préserve.

Je voudrais également remercier tous les amis et amis proches et éloignés des étudiants en génie électrique en particulier, je tiens à remercier Bilal Hammia, mon collègue sur mémoire de fin d'études et un salut spécial à Taha Hamidatou, Absa Amjad, Anfal ben RazkAllah et à tous les membres de la famille.

Alaeddine HACINI

SOMMAIRE

Introduction générale 1

Chapitre I

Le moteur asynchrone dans son environnement

I.1.Introduction 3

I.2. Constitution de la machine asynchrone 3

I.2.1. Le Stator 4

I.2.2. Le rotor 5

I.2.2.1. Moteur asynchrone à rotor bobiné 5

I.2.2.2. Rotor en court-circuit (à cage d'écureuil) 6

I.3. Principe de fonctionnement de la machine asynchrone 8

I.4. Caractéristique de la machine asynchrone..... 8

II.4.1. Le glissement 8

II.4.2. Le couple électromagnétique 9

II.4.3. Bilan de puissance de la machine asynchrone 10

II.4.3.1. Puissance électrique absorbée (P_a) 10

II.4.3.2. Les pertes joules statorique (P_{js}) 10

II.4.3.3. Pertes fer au stator (P_{fs}) 11

II.4.3.4. Puissance transmise (P_{tr}) 11

II.4.3.5. Le couple électromagnétique (C_{em}) 11

II.4.3.6. Puissance mécanique (P_m) 11

II.4.3.7. Pertes par effet joules et dans le fer au rotor (P_{jr} et P_{fr}) 12

II.4.3.8. Pertes mécaniques (P_{mec}) 12

SOMMAIRE

II.4.3.9. Pertes constantes (P_c).....	12
II.4.3.10. Puissance utile (P_u).....	12
I.5. Avantages et inconvénients de la machine asynchrone.....	12
I.6. Principe de la variation de vitesse des machines asynchrones.....	13
I.6.1. Quadrants de fonctionnement.	13
I.6.2. Variation de vitesse de la machine asynchrone.	14
I.6.2.1. Réglage par variation du nombre de paires de pôles.....	14
I.6.2.2. Réglage par variation de tension.....	14
I.6.2.3. Réglage par action sur le glissement.....	14
I.6.2.4. Réglage par variation de fréquence.....	14
I.7. Démarrage des moteurs asynchrone.....	15
I.7.1. Démarrage direct	15
I.7.1.a. Avantages.....	15
I.7.1.b. Inconvénients	15
I.7.2. Démarrage Etoile – Triangle($Y\Delta$).....	15
I.7.2.a. Avantages.....	15
I.7.2.b. Inconvénients	16
I.7.3 Démarrage à résistances statoriques	16
I.7.3.a. Avantages.....	16
I.7.3.b. Inconvénients	16
I.7.4. Démarrage par auto –transformateur	16
I.7.4.a. Avantages.....	16
I.7.4.b. Inconvénients	17
I.7.5. Démarrage par résistances rotoriques	17
I.7.5.a. Avantage	17

SOMMAIRE

I.7.5.b. Inconvénient.....	17
1.8. Conclusion.....	17

Chapitre II

Aspects modernes pour le freinage de moteurs asynchrones

II.1. Introduction	18
II.2. Freinage mécanique	18
II.2.1. Fonctionnement.....	18
II.2.2. Frein à manque de courant	19
II.2.3. Frein à appel de courant	19
II.3. Freinage électronique	20
II.4. Freinage par fonctionnement en hyper-synchrone	20
II.5: Freinage à contre courant (inversion de flux)	21
II.5.1 . Moteur à cage	22
II.5.2 . Moteur à rotor bobiné (Moteur à bagues).....	23
II.6. Freinage par injection de courant	24
II.7. Conclusion	26

Chapitre III

Modèles mathématiques de la machine asynchrone

III.1. Introduction	27
III.2. Equations électriques	27
III.2.1. Au stator.....	27
III.2.2. Au rotor.....	27
III.3. Equations magnétiques	28
III.4. Equations mécaniques	29
III.5. Equation de la dynamique du moteur	30
III.6.1 Transformation de Park	30

SOMMAIRE

III.6.1.1. Equations électriques	32
III.6.1.2. Equations magnétiques	33
III.6.1.3. Equations mécaniques	33
III.6.2. Choix du repère	34
III.6.2.1. Référentiel fixe par rapport au stator	34
III.6.2.2. Référentiel fixe par rapport au rotor	35
III.6.2.3. Référentiel fixe par rapport au champ tournant	35
Conclusion.....	36

Chapitre IV

Modèles numériques et applications au freinage de la machine asynchrone

IV.1. Modelé Simulink de démarrage d'un moteur asynchrone.....	37
IV.2. Résultats obtenus pour le démarrage et fonctionnement en charge de la MAS : variables de vitesse, de couple et de courant en fonction du temps.....	38
IV.3. Freinage à contre courant d'un moteur asynchrone.	40
IV.3.1. Modelé Simulink de freinage à contre courant d'un moteur asynchrone.	40
IV.3.2. Variables de vitesse, de couple et de courant	41
IV.3.3. Etude de l'influence du moment d'inertie sur la dynamique de freinage	43
IV.4. Freinage par injection de courant d'un moteur asynchrone	49
IV.4.1. Modèle simulink de freinage par injection de courant d'un moteur asynchrone.....	49
IV.4.2. Variables de couple et de vitesse.....	50
IV.4.3. Etude paramétrique en fonction de l'intensité du courant d'injection.....	52
IV.4.4. Etude de l'influence du moment d'inertie sur la qualité du freinage.....	55

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE.....	58
---------------------------------	-----------

LISTE DES FIGURES

Figure I.1 : Les différents organes de la machine asynchrone.....	3
Figure I.2 : Le stator.....	4
Figure I. 3 : Rotor bobiné.....	5
Figure I.4 : Rotor à cage d'écureuil.....	6
Figure I.5 : Rotor à cage simple.....	6
Figure I.6 : Rotor à cage profond.....	7
Figure I.7 : Rotor à cage double.....	7
Figure I.8 : Le principe de fonctionnement d'un moteur asynchrone.....	8
Figure I.9 : Modèle d'une phase ramené au stator.....	9
Figure I.10 : Bilan de puissance.....	10
Figure. I.11 : Quadrants de fonctionnement.....	13
Figure.II.1: Freinage mécanique dans moteur asynchrone.....	18
Figure.II.2 : Frein à manque de courant	19
Figure.II.3 : Frein à appel de courant Moteur frein.....	19
Figure.II.4 : Freinage par fonctionnement en hyper-synchrone.....	21
Figure.II.5 : Freinage à contre courant (inversion de flux) dans moteur asynchrone.....	22
Figure.II.6 : Principe du freinage à contre-courant de MAS à cage.....	23
Figure.II.7 : Principe du freinage à contre-courant pour une machine asynchrone à bagues.....	24
Figure.II.8 : Freinage par injection de courant dans moteur asynchrone.....	25
Figure. III.1: Représentation angulaire des systèmes d'axes dans l'espace électrique.....	30
Figure.IV.1 : Schéma bloc modèle Simulink de démarrage de la machine asynchrone.....	38
Figure.IV.2 : Résultats de la simulation du démarrage et du fonctionnement en charge d'un moteur asynchrone.....	39
Figure.IV.3 : Schéma bloc modèle Simulink de freinage à contre courant de la machine asynchrone.....	40
Figure.IV.4 : Résultats de la simulation du freinage à contre courant à vide.....	42
Figure.IV.5 : Résultats de la simulation du freinage à contre courant en charge.....	43
Figure.IV.6 : Résultats de la simulation du freinage à contre courant à ($J=50 \cdot 10^{-3}(\text{kg.})$).....	44

Figure.IV.7 : Résultats de la simulation du freinage à contre courant à ($J=55 \cdot 10^{-3}(\text{kg.})$).....	45
Figure.IV.8 : Résultats de la simulation du freinage à contre courant à ($J=40 \cdot 10^{-3}(\text{kg.})$).....	46
Figure.IV.9 : Résultats de la simulation du freinage à contre courant à ($J=30 \cdot 10^{-3}(\text{kg.})$).....	47
Figure.IV.10 : Résultats de la simulation du freinage à contre courant à ($J=20 \cdot 10^{-3}(\text{kg.})$).....	48
Figure.IV.11 : Temps de freinage vs moment d'inertie.....	49
Figure.IV.12 : Schéma bloc modèle Simulink de freinage par injection de courant de la machine asynchrone.....	50
Figure.IV.13 : Résultats de la simulation du freinage par injection de courant continu à vide...51	
Figure.IV.14 : Résultats de la simulation du freinage par injection de courant continu en charge.....	52
Figure.IV.15 : Résultats de la simulation du freinage par injection de courant à ($I=50\text{A}$).....	53
Figure.IV.16 : Résultats de la simulation du freinage par injection de courant à ($I=70\text{A}$).....	53
Figure.IV.17 : Résultats de la simulation du freinage par injection de courant à ($I=100\text{A}$).....	54
Figure.IV.18 : Temps de freinage vs intensité du courant d'injection.....	54
Figure.IV.19 : Résultats de la simulation du freinage par injection de courant à ($J=60 \cdot 10^{-3}(\text{kg.})$).....	55
Figure.IV.20 : Résultats de la simulation du freinage par injection de courant à ($J=50 \cdot 10^{-3}(\text{kg.})$).....	56
Figure.IV.21 : Résultats de la simulation du freinage par injection de courant à ($J=40 \cdot 10^{-3}(\text{kg.})$).....	57
Figure.IV.22 : Résultats de la simulation du freinage par injection de courant à ($J=30 \cdot 10^{-3}(\text{kg.})$).....	57
Figure.IV.23 : Temps de freinage vs moment d'inertie pour $I = 50\text{A}$	58

Résumé

Cette étude s'intéresse principalement au comportement d'un moteur asynchrone à cage. Le démarrage et le freinage (dans le but d'un arrêt programmé) des moteurs asynchrones sont deux étapes principales de leur fonctionnement. Entre ces deux étapes, il y a la vitesse de marche nominale, dans laquelle des méthodes sophistiquées de contrôle de la vitesse sont appliquées.

Nous avons donc tenté d'étudier, à la fois qualitativement et quantitativement, la phase de freinage des machines asynchrones et, dans une moindre mesure, la phase de démarrage en raison des similitudes entre ces deux phases.

Sur la base d'une étude comparative, nous montrons que chaque méthode a ses propres avantages et inconvénients.

Abstract

This study is mainly interested in the behavior of an asynchronous motor. Starting and braking (with the aim of a programmed stop) of asynchronous motors are two main stages of their operation. Between these two stages there is the rated walking speed, in which sophisticated methods of speed control are applied.

We therefore attempted to study, both qualitatively and quantitatively, the braking phase of asynchronous machines and, to a lesser extent, the starting phase due to the similarities between these two phases.

Based on a comparative study, we show that each method has its own advantages and disadvantages.

Introduction Générale

Introduction générale

Les moteurs asynchrones sont, de nos jours, d'un usage universel dans quasiment les tous aspects de notre vie. Traction, lévitation, électroménager et maintenant véhicule électrique ; autant de domaines grand public où le moteur asynchrone est au cœur du système de fonctionnement.

Dans certaines applications, il est exigé une commande précise de la vitesse de rotation de ces moteurs, ce qui nécessite la mise en œuvre d'une commande adaptée. Plus simplement, dans d'autres applications, et pour des raisons de sécurité ou de processing, il est impératif d'obtenir l'arrêt le plus rapide possible du dispositif. C'est le cas, par exemple dans le domaine de la traction électrique où les raisons de sécurité sont mises en avant, ou bien dans celui des machines outils où la précision des courses donc des dimensions façonnées sont prioritaires. Dans cet objectif, un freinage mécanique par frottements n'est pas suffisamment énergique et les temps d'arrêts peuvent être trop longs. On préfère utiliser, dans ces circonstances, des méthodes de freinage dites électriques. Cela consiste à créer un champ tournant dans l'entrefer de la machine dans le sens opposé à celui du rotor. Pour un freinage encore plus énergique et avec des temps d'arrêt quasiment nuls, on peut combiner, de manière simultanée, plusieurs méthodes de freinage.

Il existe plusieurs méthodes de freinage électrique. Toutes reviennent, comme il a été dit plus haut, à opposer le sens de rotation du rotor au champ tournant créé par le stator et qui se comporte en champ résistant de freinage.

L'objectif de ce travail de projet de fin d'études de Master II en électrotechnique est de développer des modèles numériques de freinage électrique de machines asynchrones à des fins d'étude du comportement dynamique et de comparaison du point de vue énergétique et efficacité du freinage. Cette étude qui a été remaniée et adaptée aux conditions particulières et, espérons, exceptionnelles, dans lesquelles elle a été menée (pandémie mondiale de la COVID19 et mesures de confinement appliquées de manière particulière à l'Université) a été développée sous l'environnement MATLAB- SIMULINK. En raison du temps imparti, cette étude a concerné les deux méthodes de freinage électrique les plus utilisées industriellement : le freinage par inversion de flux (dit aussi freinage à contre-courant) et le freinage par injection de courant continu dans le stator.

Le mémoire développé comporte quatre parties ou chapitres.

Le premier chapitre présente de manière qualitative la machine asynchrone dans son environnement et dans son comportement dynamique en mettant l'accent sur ses différents modes de fonctionnement ainsi que les méthodes utilisées pour démarrage ainsi que le réglage de la vitesse.

Le second chapitre est consacré à une présentation assez exhaustive des principales méthodes électriques utilisées pour le freinages des moteurs asynchrones. Bien sûr, la lumière est particulièrement mise sur les deux principales méthodes qui vont faire l'objet des études et des modèles développés dans le cadre de ce mémoire, à savoir le freinage par inversion de flux et le freinage par injection de courant continu dans le stator.

Dans la troisième partie du mémoire les équations, aussi bien électromagnétiques que mécaniques et qui régissent le fonctionnement de la machine asynchrone, sont exposées. En raison de la nature dynamique et transitoire de la phase de freinage de ces machines, le référentiel ainsi que la transformée de Park sont utilisées pour cette étude.

Le quatrième chapitre exprime les résultats qui sont les nôtres à l'issue de cette étude. Ils sont obtenus sous l'environnement MATLAB-SIMULINK. Les caractéristiques électriques et mécaniques en régime dynamique durant la phase de freinage sont calculées et obtenues pour les deux méthodes de freinage objet de notre étude. Les modèles permettent aussi bien de faire des études paramétrées que des études comparatives entre les deux méthodes de freinage adoptées.

Ce mémoire sera clos par une conclusion générale qui fait ressortir les principaux enseignements de notre étude.

Chapitre I

*Le moteur asynchrone dans son
environnement*

I.1. Introduction

Les machines asynchrones sont très utilisées (on estime que 80% des moteurs de la planète sont des moteurs asynchrones) car leur coût est inférieur à celui des autres machines, de plus ces machines sont robustes. Comme les autres machines, la machine asynchrone est réversible et de très nombreuses génératrices asynchrones de puissance inférieure à quelques 5 MW fournissent un surplus d'énergie active aussi bien sur des réseaux terrestres qu'à bord des navires. La gamme de puissance couverte par les machines asynchrones est très étendue.[1]

Pour fonctionner en courant monophasé, ces machines nécessitent un système de démarrage. Pour les applications de puissance, au-delà de quelques kilowatts, les moteurs asynchrones sont uniquement alimentés par des systèmes des courants triphasés.[2]

I.2. Constitution de la machine asynchrone

Les machines asynchrones triphasées peuvent se décomposer du point de vue mécanique en trois parties. Suivants Exemple (Figure I.1).[3]

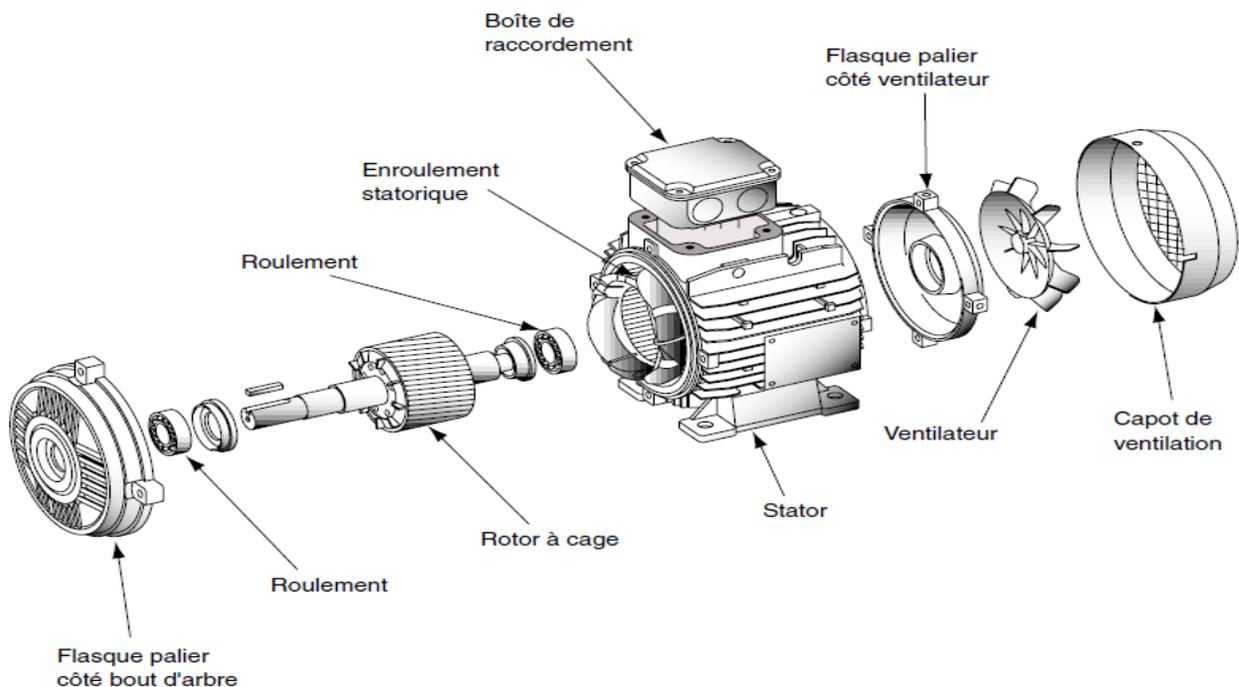


Figure I.1 : Les différents organes de la machine asynchrone

I.2.1. Le Stator

Le stator est un enroulement alimenté en tension alternative triphasée, et c'est la partie fixe du moteur. Elle est constituée d'une carcasse sur laquelle est fixée une couronne de tôle d'acier de qualité spéciale munie d'encoches. Les bobinages de sections appropriés sont répartis dans ces encoches en formant un ensemble d'enroulements qui comporte autant de circuits qu'il y a des phases sur le réseau d'alimentation. [4]

Le stator d'une machine triphasée comporte 3 enroulements couplés en étoile ou en triangle et décalés entre eux de $2\pi/3$ qui sont alimentés par un système de tension équilibrée, ceux-ci produisent un champ magnétique tournant à la vitesse de synchronisme. La vitesse de synchronisme est en fonction de la fréquence du réseau d'alimentation (50 Hz en Europe) et du nombre de paires de pôles.

Vu que la fréquence est fixe, la vitesse de rotation du champ tournant du moteur ne peut varier qu'en fonction du nombre de paires de pôles. [5]

Nombre de pôles	2	4	6	8	12
Vitesse (tr/min)	3000	1500	1000	750	500

Tableau I.1 : Nombre de paires de pôles.



Figure I.2 : Le stator

Donc 7 bornes il se compose principalement :

- De la carcasse.
- Des paliers.
- Des flasques de palier.
- Du ventilateur refroidissant le moteur.
- Le capot protégeant le ventilateur.

L'intérieur du stator comprend essentiellement :

- un noyau en fer feuilleté de manière à canaliser le flux magnétique,
- les enroulements (ou bobinage en cuivre) des trois phases logées dans les encoches du noyau.

I.2.2. Le rotor

C'est la partie mobile du moteur. Elle est placée à l'intérieur du stator et constituée d'un empilage de tôles d'acier formant un cylindre claveté sur l'arbre du moteur. On distingue deux types de rotor

I.2.2.1. Moteur asynchrone à rotor bobiné

Il comporte un enroulement exécuté comme un enroulement triphasé statorique, les enroulements rotoriques sont généralement connectés en étoile, et les extrémités sont sortie par l'intermédiaire des bagues de frottement et des balais pour aboutir au rhéostat de démarrage.

Suivants Exemple (Figure I. 3) [6]

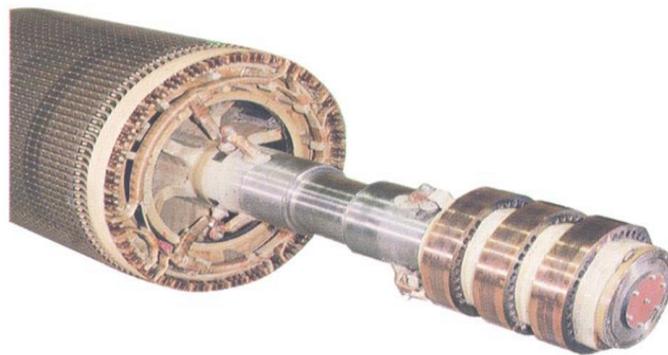


Figure I. 3 : Rotor bobiné

Cependant, il présente les avantages suivants :

- Le couple de démarrage est plus élevé,
- Il est possible de régler la vitesse du moteur à l'aide de résistances extérieures (rhéostats),
- Le courant de démarrage est plus faible lorsqu'on ajoute un rhéostat.

I.2.2.2. Rotor en court-circuit (à cage d'écureuil) [2]

C'est le plus fréquent. Ce type de rotor a été inventé au début des années 1890. Ces rotors sont constitués de tôles ferromagnétiques et de barres conductrices régulièrement réparties à la périphérie du rotor. Les barres sont reliées entre elles par des anneaux de court-circuit. Les tôles ferromagnétiques servent à guider les lignes de champ tandis que les barres accueillent les courants d'induits. Pour les machines de faible puissance,

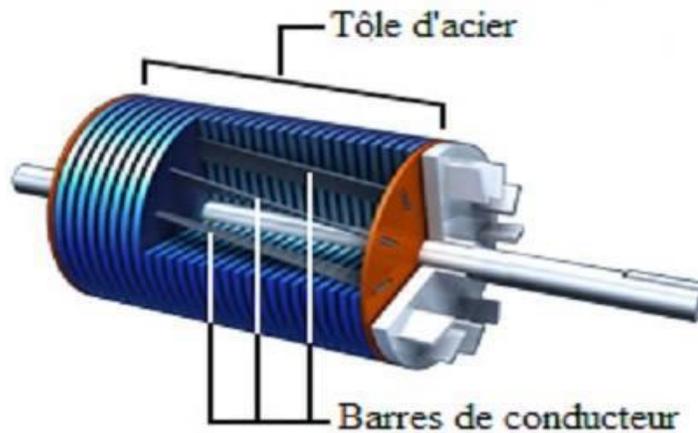


Figure I.4 : Rotor à cage d'écureuil

Le rotor des moteurs en court-circuit est de trois types

a) Rotor a cage simple

Le rotor à simple cage est utilisé pour les moteurs de faibles puissances, Le couple de démarrage est faible et le courant de démarrage est élevé par rapport au courant nominal

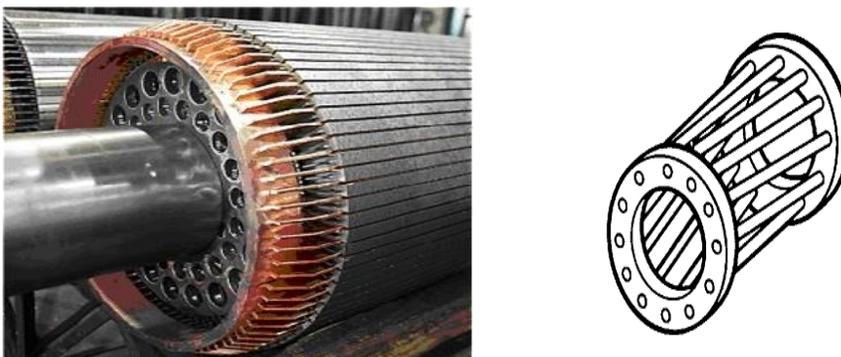


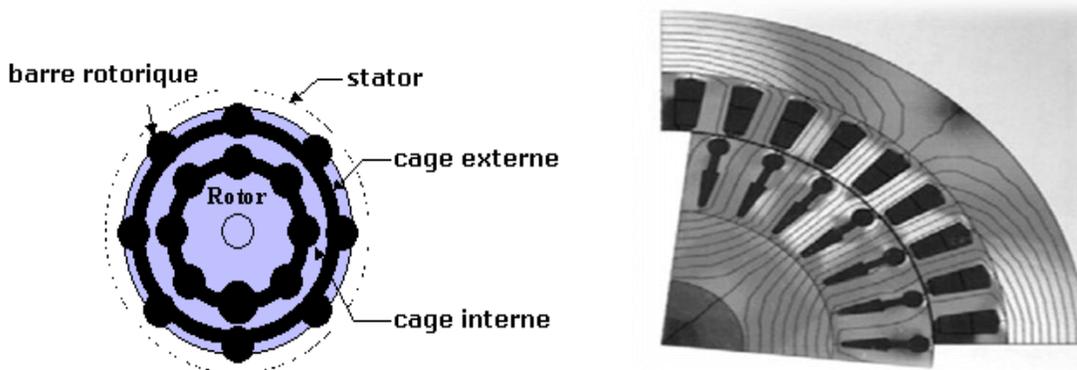
Figure I.5 : Rotor à cage simple

b) Rotor a cage profonde

C'est une cage constituée d'un type de barre plus profond que la précédente. Lors du démarrage d'un moteur de ce type, un phénomène physique fait circuler le courant dans la périphérie des conducteurs, grâce à des encoches plus profondes dans le rotor pour optimiser le démarrage. On obtient avec ces deux modèles un meilleur couple de démarrage : ils sont plus adaptés aux démarrages en charge que les moteurs à cage simple

**Figure I.6 : Rotor à cage profond****c) Rotor a cage double**

Il se compose de deux cages à écureuil, une pour le démarrage (à l'extérieur) et une pour le fonctionnement normal du moteur (à l'intérieur). Il combine les caractéristiques du moteur à cage avec les qualités du moteur à rotor bobiné

**Figure I.7 : Rotor à cage double**

I.3. Principe de fonctionnement de la machine asynchrone [6]

En alimente trois bobines identiques décalées de 120°, par une tension alternative triphasée, on produit trois champs magnétiques alternatifs, ces trois champs magnétiques alternatifs produit se composent pour former un champ tournant à l'intérieur du rotor. Ce champ crée dans le circuit électrique du rotor des courants induits qui provoquent une force magnétomotrice qui entraîne le rotor en rotation.

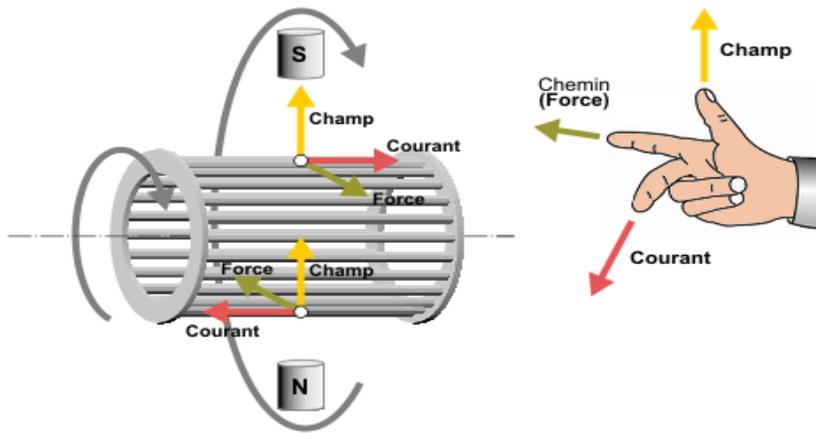


Figure I.8 : Le principe de fonctionnement d'un moteur asynchrone

Comme montré sur le schéma ci-dessus, le champ tournant, à un instant donné, est orienté vers le haut. En considérant deux conducteurs diamétralement opposés, on constate que les courants induits dans ces deux conducteurs sont en sens inverse et, associés au champ magnétique, créent des forces motrices en sens inverse. Le rotor étant libre de tourner sur l'axe X-Y, les deux forces s'associent pour imprimer aux deux conducteurs un couple permettant la rotation de la cage d'écureuil : le moteur électrique est inventé.

I.4. Caractéristique de la machine asynchrone [6]

La machine asynchrone est caractérisée par deux grandeurs principales :

II.4.1. Le glissement

Par définition, le glissement est l'écart relatif entre la vitesse de rotor Ω_r et la vitesse de synchronisme Ω_s , on le note g et on le définit par la relation suivante.

$$g = \frac{(\Omega_s - \Omega_r)}{\Omega_s} \dots\dots\dots(I.1)$$

$$\Omega_s = \frac{\omega}{p} \dots\dots\dots(I.2)$$

Ω_s : vitesse de synchronisme en rad/ seconde;

Ω_r : vitesse de rotation du rotor

$0 < g < 1$; $g=1$ (moteur à l'arrêt) et $g \sim 0$ (à vide).

II.4.2. Le couple électromagnétique

Le couple électromagnétique exercé par le champ glissant sur le rotor est donné par le schéma équivalent d'une phase de la machine asynchrone qui est représenté par la figure (I.9). La machine est représentée comme un transformateur dont le secondaire est court-circuité et dans lequel les courants et tension possèdent des rapports de transformations différent.

$$C_{em} = \frac{3PV^2_{eff}}{\Omega} \frac{R_2}{\frac{R^2_2}{g} + (L_2\omega)^2} \dots\dots\dots(I.3)$$

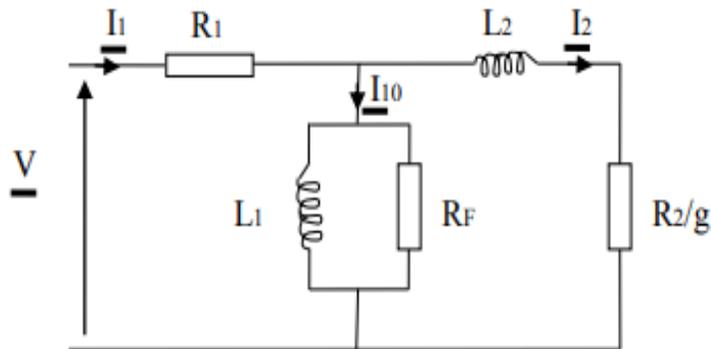


Figure I.9 : Modèle d'une phase ramené au stator

R_1 : Résistance du stator

L_1 et R_F : Bobine à noyau de fer

L_2 : Inductance de fuite

R_2/g : Résistance fictive représentant la puissance transmise

R_2 : Résistance du rotor ramenée au stator

II.4.3. Bilan de puissance de la machine asynchrone

La figure I.10 représente les différentes puissances dans la machine asynchrone.

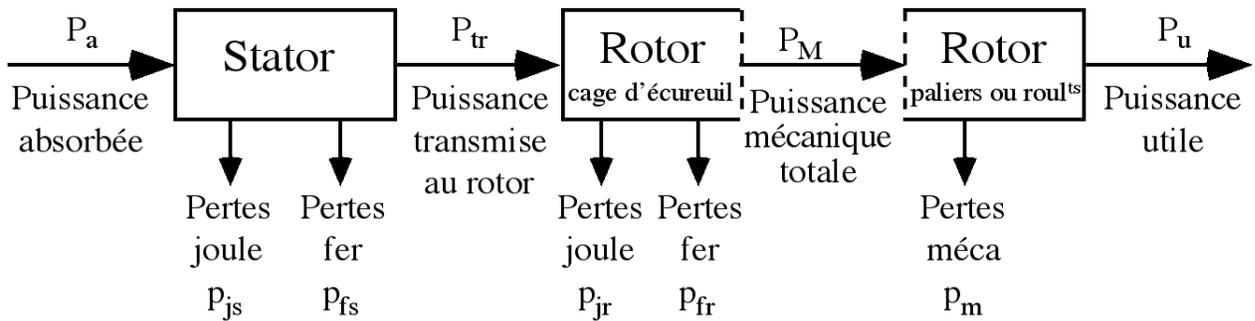


Figure I.10 : Bilan de puissance

II.4.3.1. Puissance électrique absorbée (Pa)

Le moteur absorbe du réseau : $P_a = \sqrt{3} U_s I_s \cos \varphi$ (I.4)

P_a : La puissance électrique absorbée en watts [W].

U_s : La tension entre deux phases en volts [V].

I_s : L'intensité du courant de ligne en ampères [A].

φ : L'angle de déphasage entre courant et tension en degrés [°].

Une partie de la puissance absorbée est dissipée en pertes joules statorique (P_{js}) et en pertes fer dans le stator (P_{fs}), le reste de la puissance transmise (P_{tr}) traverse l'entrefer c'est ainsi la puissance électromagnétique (P_{em}).

II.4.3.2. Les pertes joules statorique (Pjs)

- **1er cas : La résistance R est donnée entre deux bornes de phases**

$$P_{js} = \frac{3}{2} R^2 \text{(I.5)}$$

P_{js} : Les pertes par effet Joule dans le stator en watts [W].

R : La résistance entre deux bornes de phases en ohms [Ω].

I^2 : L'intensité du courant de ligne en ampères carré [A^2].

- **2ème cas : La résistance R' est celle d'un enroulement**

a- Couplage étoile:

$$P_{js} = 3R' I^2 \text{(I.6)}$$

P_{js} : Les pertes par effet Joule dans le stator en watt [W].

R' : La résistance d'un enroulement en ohms [Ω].

I^2 : L'intensité du courant de ligne en ampères carré [A^2].

b- Couplage triangle:

$$P_{js} = 3R' J^2 \dots\dots\dots(I.7)$$

P_{js} : Les pertes par effet Joule dans le stator en watts [W].

R' : La résistance d'un enroulement en ohms [Ω]

J^2 : L'intensité du courant dans un enroulement en ampères carré [A^2].

II.4.3.3. Pertes fer au stator (P_{fs})

Elles ne dépendent que de la tension U et de la fréquence f , donc elles sont constantes si le moteur couplé au réseau fixe.

$$P_{fs} = 3 \times \frac{U^2}{R_1} \dots\dots\dots(I.8)$$

II.4.3.4. Puissance transmise (P_{tr})

C'est la puissance que reçoit le rotor :

$$P_{tr} = P_a - P_{js} - P_{fs} \dots\dots\dots(I.9)$$

P_{tr} : La puissance transmise au rotor en watts [W].

P_a : La puissance électrique absorbée en watts [W].

P_{js} : Les pertes par effet Joule dans le stator en watts [W].

II.4.3.5. Le couple électromagnétique (C_{em})

Les forces qui s'exercent sur les conducteurs du rotor tournant à la vitesse Ω et l'action de l'ensemble électromagnétique se réduit à un couple électromagnétique résultant de moment C_{em} .

$$C_{em} = \frac{P_{tr}}{\Omega} \dots\dots\dots(I.10)$$

P_{tr} : La puissance transmise [W].

C_{em} : Le couple électromagnétique en Newton-mètre [Nm].

Ω : La Vitesse de rotation du rotor en radians par seconde [rad/s].

II.4.3.6. Puissance mécanique (P_m)

Le couple électromagnétique de moment entraîne le rotor à la vitesse Ω . il lui communique alors la puissance mécanique P_m .

$$P_m = C_{em} \times \Omega = P_{tr} \times \frac{\Omega}{\Omega_s} = P_{tr} \times (1 - g) \dots\dots\dots(I.11)$$

g : glissement

Ω_s : Vitesse de synchronisme [rad/s].

II.4.3.7. Pertes par effet joules et dans le fer au rotor (Pjr et Pfr)

Ces pertes représentent la différence entre P_{tr} et P_m elles sont dues aux courants induits elles ne sont pas mesurables, car le rotor est court-circuité

$$P_{jr} + P_{fr} = P_{tr} - P_m = P_{tr} - P_{tr}(1 - g) = g \times P_{tr} \dots\dots\dots(I.12)$$

P_{jr} : Perte joule au rotor

P_{fr} : Perte fer au rotor

P_m : Puissance mécanique

II.4.3.8. Pertes mécaniques (Pmec)

Elles sont pratiquement constantes :

$$P_{mec} = P_m - P_u \dots\dots\dots(I.13)$$

P_{mec} : Perte mécanique

P_u : Puissance utile

II.4.3.9. Pertes constantes (Pc)

Ces pertes ne dépendent que de la tension (U), de la fréquence (f) et de la vitesse (Ω). Comme ces grandeurs sont généralement constantes, les pertes fer au stator et les pertes mécaniques sont aussi.

$$P_c = P_{fs} + P_m \dots\dots\dots(I.14)$$

II.4.3.10. Puissance utile (Pu)

$$P_u = P_m - P_{mec} \dots\dots\dots(I.15)$$

Le couple utile :

$$C_u = \frac{P_u}{\Omega} \dots\dots\dots(I.16)$$

Le rendement :

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} \dots\dots\dots(I.17)$$

I.5. Avantages et inconvénients de la machine asynchrone

Les machines asynchrones présentent ces les avantages et quelques les inconvénients :

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> - Faible coût d'achat - Faible coût d'entretien - Structure simple. - Robuste et facile à construire. 	<ul style="list-style-type: none"> - Variation de vitesse (nécessité d'un variateur de vitesse) - La vitesse dépend de la charge.

Tableau I.2 : Avantages et inconvénients de la MAS

I.6. Principe de la variation de vitesse des machines asynchrones

I.6.1. Quadrants de fonctionnement [2]

Les machines synchrones, asynchrone et à courant continu sont naturellement réversibles. Pour bénéficier de cette propriété, il faut que le convertisseur et la source soient également réversibles. Si la source ne l'est pas on ne peut pas récupérer l'énergie

La dissiper dans des rhéostats (réversibilité dissipatrice). Le choix d'une structure convertisseur/machine 1, 2 ou 4 quadrants repose exclusivement sur le cahier des charges.

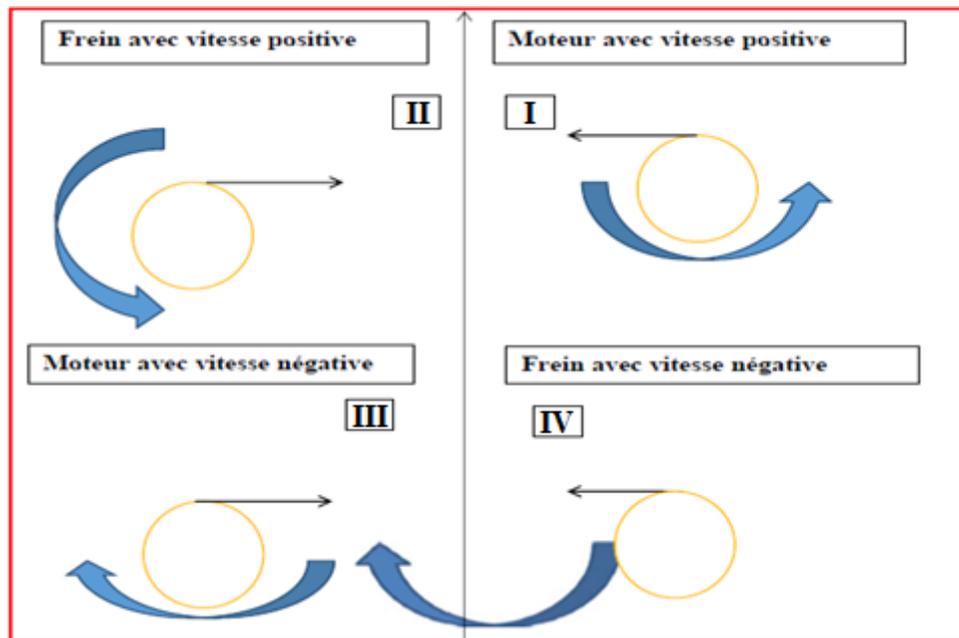


Figure. I.11 : Quadrants de fonctionnement

- Quadrant I seul : La machine ne tourne que dans un seul sens de rotation, le couple est positif ou nul (accélérations contrôlées et décélération non contrôlées)

- 2 Quadrants (I et II): La machine ne tourne que dans un seul sens de rotation, le couple est positif ou négatif (accélérations et décélération contrôlées)
- 2 Quadrants (I et IV): La machine tourne dans les deux sens de rotation (pour le sens inverse la charge est nécessairement entraînant), le couple est toujours positif (accélérations contrôlées et décélération non contrôlées)
- 4 Quadrants (I à IV): La machine tourne dans les deux sens de rotation quel que soit la charge entraînée le couple est positif ou négatif (accélérations et décélération contrôlées)

I.6.2. Variation de vitesse de la machine asynchrone [7]

I.6.2.1. Réglage par variation du nombre de paires de pôles

Ceci donnant une variation non continue de la vitesse ce mode n'est donc pas envisagé pour un réglage fin du point de fonctionnement désiré.

I.6.2.2. Réglage par variation de tension

Le couple électromagnétique de la machine asynchrone est proportionnel au carré de la tension d'alimentation statorique. Il est donc possible d'envisager un ajustement de la vitesse au-dessous de la vitesse nominale en modifiant la tension d'alimentation statorique avec un gradateur triphasé. Cette solution est le plus souvent utilisée pour le démarrage de charges à caractéristique de couple quadratique ($C_r = k\Omega^2$)

I.6.2.3. Réglage par action sur le glissement

L'utilisation de résistances rotorique permet un réglage de la vitesse au-dessous de la vitesse nominale mais avec un rendement déplorable. On essaiera donc de récupérer cette énergie transmise au rotor : c'est la cascade hypo synchrone réservée à la très forte puissance pour des machines à rotor bobiné [2].

I.6.2.4. Réglage par variation de fréquence

La fréquence de rotation de la machine étant au glissement près proportionnel à la fréquence d'alimentation des enroulements statoriques, on essaiera de créer pour ces enroulements un réseau à fréquence variable ce sont les onduleurs de tension. On peut aussi chercher à injecter des courants dans les enroulements pour imposer le couple de la machine ce sont les onduleurs de courant ou commutateurs de courant. On peut également convertir directement la fréquence du réseau industriel en une fréquence variable plus faible (de 0 à 1/3 de la fréquence réseau) à l'aide d'un cyclo convertisseur à commutation naturelle piloté lui aussi en fréquence en courant ou vectoriellement.

I.7. Démarrage des moteurs asynchrone [8]

Le moteur asynchrone d'induction qui est le moteur de base de l'industrie actuelle convient surtout pour les commandes à vitesse constante. Sa mise en vitesse au moment du démarrage, est liée à la surintensité admissible par l'installation électrique au couple nécessaire à la machine entraînée, et à la durée de démarrage admissible

I.7.1. Démarrage direct

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

I.7.1.a. Avantages

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

I.7.1.b. Inconvénients

- Appel du courant important
- Démarrage brutal

I.7.2. Démarrage Etoile – Triangle($Y\Delta$)

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

I.7.2.a. Avantages

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

I.7.2.b. Inconvénients

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

I.7.3 Démarrage à résistances statoriques

C'est une mise en série temporaire d'un plusieurs groupes de résistances en série avec le stator

I.7.3.a. Avantages

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

I.7.3.b. Inconvénients

- Appel de courant plus important qu'en étoile – triangle 4 à 5 fois I_n
- Le couple de démarrage est diminué par rapport au démarrage direct $0.75C_n$

I.7.4. Démarrage par auto –transformateur

Au moment du démarrage, la tension est réduite au moyen d'un auto – transformateur

- Temps auto – transformateur en Y le moteur est alimenté à tension réduite
- Temps ouverture du point Y, seule la self de la partie supérieure de l'enroulement limite le courant
- Temps alimentation du moteur sous pleine tension

I.7.4.a. Avantages

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

I.7.4.b. Inconvénients

- Prix d'achat élevé de l'équipement.

I.7.5. Démarrage par résistances rotoriques [9]

Dans le cas des moteurs asynchrones à rotor bobiné, le démarrage peut s'effectuer en insérant des résistances en série avec le bobinage rotorique, tout en alimentant le stator sous la pleine tension de réseau. Le courant absorbé est sensiblement proportionnel au couple fourni ou très peu supérieur. On obtient fréquemment des couples de démarrage égaux à 2,5 fois le (C_n) sans surintensité excessive. On peut encore réduire la surintensité en augmentant le nombre de démarrages $C_d < 2,5C_n$.

I.7.5.a. Avantage

- L'appel de courant est pour un couple de démarrage donnée le plus faible par rapport à tous les autres modes de démarrage
- Possibilités de choisir par construction, couple et le nombre de temps de démarrage
- Pas de coupure d'alimentation pendant le démarrage.

I.7.5.b. Inconvénient

- Nécessité d'un moteur à rotor bobiné
- Equipement plus cher

I.8. Conclusion

Le moteur asynchrone est de loin le type de moteur le plus utilisé pour les applications où il est nécessaire de contrôler la vitesse et le déplacement d'une charge.

Quant au moteur asynchrone seul, sa popularité résulte du peu d'entretien nécessaire, de sa simplicité de construction, de sa standardisation et de sa robuste.

Chapitre II

*Aspects modernes pour le freinage des
moteurs asynchrones*

II.1. Introduction

Dans un grand nombre d'applications, l'arrêt du moteur est obtenu simplement par décélération naturelle. Le temps de décélération dépend alors uniquement de l'inertie et du couple résistant de la machine entraînée. Mais il est souvent nécessaire de réduire ce temps. Le freinage électrique apporte dans ce cas une solution efficace et simple. Par rapport aux freinages mécanique et hydraulique, il offre l'avantage de la simplicité et de ne mettre en œuvre aucune pièce d'usure. [10]

Dans ce chapitre, nous aborderons les types de freinage le plus utilisés pour un moteur asynchrone.

II.2. Freinage mécanique

Ce système est constitué d'un frein à disque solidaire avec l'arbre de la machine asynchrone et dont les mâchoires, initialement serrées hors tension sont commandées par un électro-aimant. Après alimentation de l'électro-aimant, les mâchoires se desserrent laissant la rotation libre. La coupure de l'alimentation provoque un freinage, ce dispositif aussi appelé (Freinage à manque de courant) est souvent prévu comme dispositif d'arrêt d'urgence [11].

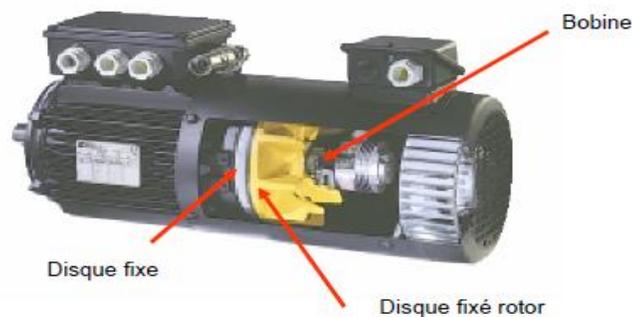


Figure.II.1 : Freinage mécanique dans le moteur asynchrone

II.2.1. Fonctionnement

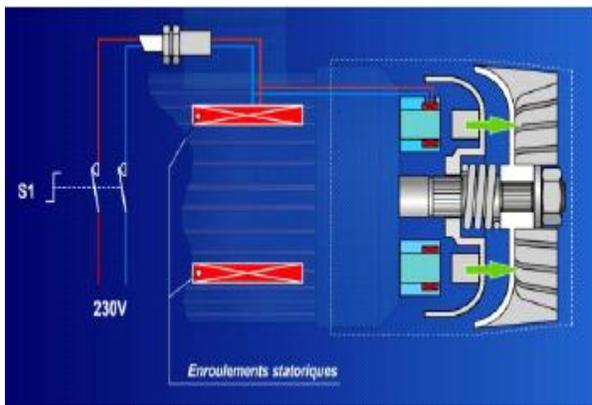
- Une bobine commande le déplacement d'un disque bloqué en rotation
- Ce disque vient en contact avec un disque fixé sur le rotor du moteur
- Le frottement des deux disques provoque le ralentissement du moteur

Il en existe deux types :

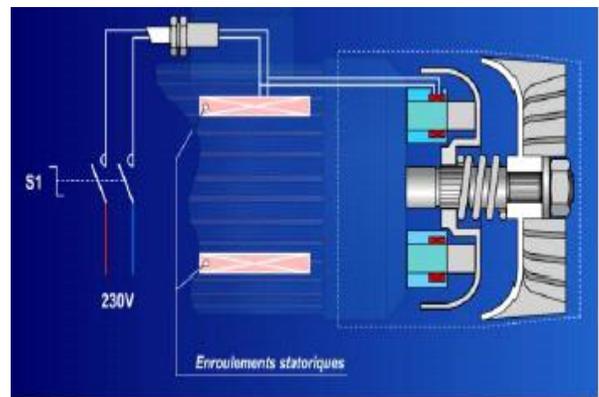
- Frein à manque de courant.
- Frein à appel de courant.

II.2.2. Frein à manque de courant [12]

Le frein est actionné mécaniquement (système de ressort au repos), il est souvent utilisé pour des raisons de sécurité : lorsque le moteur n'est pas alimenté (arrêt normal ou arrêt d'urgence) le freinage est réalisé. L'électroaimant est alimenté en triphasé, branché en parallèle sur les enroulements statoriques. L'avantage de ce procédé réside dans le fait que le freinage est toujours assuré, même en cas de coupure d'énergie. C'est la raison pour laquelle ce procédé est fortement conseillé lorsque la sécurité est prépondérante. Le frein à manque de courant fonctionne de pair avec le moteur : il est raccordé en parallèle avec le moteur au niveau même du boîtier de raccordement.



Moteur en fonctionnement



Moteur à l'arrêt et frein actif

Figure.II.2 : Frein à manque de courant

II.2.3. Frein à appel de courant [12]

Dans le cas du frein à appel de courant, c'est l'alimentation du frein qui provoque le freinage du moteur. Il nécessite une alimentation électrique indépendante de celle du moteur.

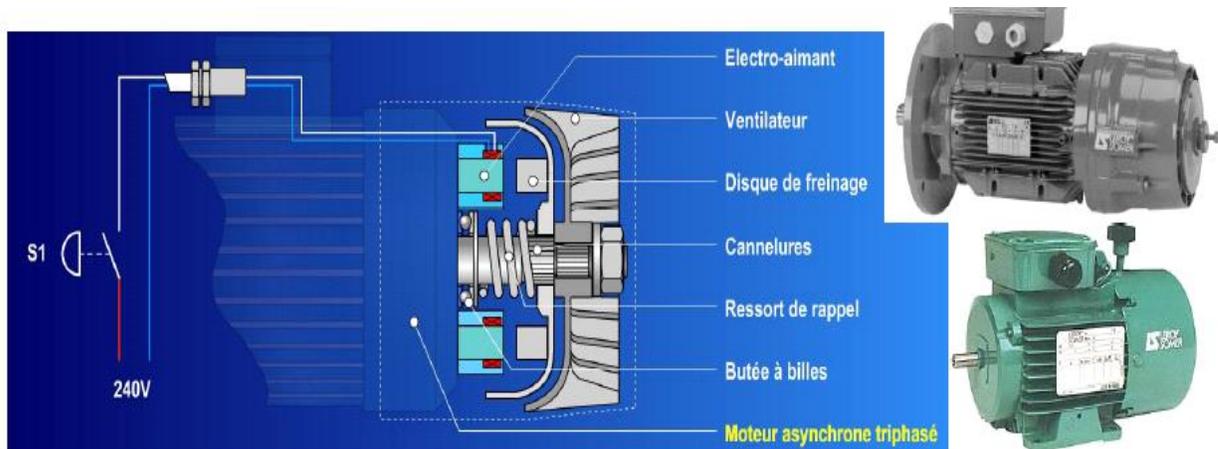


Figure.II.3 : Frein à appel de courant Moteur frein

Les parties fixes (en bleu) et les parties tournantes (en gris).

Electro-aimant : Il crée le champ magnétique qui va attirer le disque de freinage au contact de la partie fixe.

Ventilateur : Il crée un flux d'air qui refroidit le moteur et, dans la foulée, évacue la chaleur produite lors du freinage.

Disque de freinage : Equipé de garniture de freinage, il est lié en rotation à l'arbre moteur mais peut coulisser sur les cannelures pour venir au contact des parties fixes et assurer ainsi le freinage.

Cannelures : Leur rôle est de réaliser une liaison en rotation du disque sur l'arbre tout en autorisant un déplacement en translation.

Ressort de rappel : Il ramène le disque de freinage à sa position d'origine lorsque l'électro aimant n'est plus alimenté.

Butée à bile : Son rôle est de minimiser les frottements existants entre le ressort de rappel (qui tourne avec le disque) et le carter du moteur (qui est fixe). Parfois, elle peut être remplacée par une simple bague en téflon associée à une rondelle en acier.

II.3. Freinage électronique

Le freinage électronique s'obtient aisément avec un variateur de vitesse muni d'une résistance de freinage. Le moteur asynchrone se comporte alors comme une génératrice et l'énergie mécanique est dissipée dans la résistance de freinage sans augmentation des pertes dans le moteur. [10]

II.4. Freinage par fonctionnement en hyper-synchrone

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

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

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

Ce fonctionnement possède les qualités idéales d'un système de retenue de charge entraînée :

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

Il ne correspond cependant qu'à une seule vitesse, c'est-à-dire approximativement à la vitesse nominale. Le freinage hyper synchrone se rencontre également sur les moteurs à plusieurs vitesses lors du passage de la grande à la petite vitesse. Le freinage en hyper synchrone est aisément réalisable avec un variateur de vitesse électronique, le seul fait de baisser la consigne de fréquence entraîne automatiquement ce type de fonctionnement. [10]



Figure.II.4 : Freinage par fonctionnement en hyper-synchrone

II.5. Freinage à contre courant (inversion de flux)

Les machines électriques sont naturellement réversibles. Soit le variateur et la source sont également réversibles et l'énergie est récupérée sur le réseau lors d'une phase de freinage soit la source ne l'est pas et dans ce cas l'énergie est dissipée dans une résistance de freinage. [13]

Le principe consiste, après avoir isolé le moteur du réseau alors qu'il tourne encore, à le reconnecter sur le réseau en sens inverse. C'est un mode de freinage très efficace qui doit être arrêté suffisamment tôt pour éviter que le moteur ne reparte en sens inverse. [14]

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

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

La Figure suivante illustre la méthode de freinage contre courant :

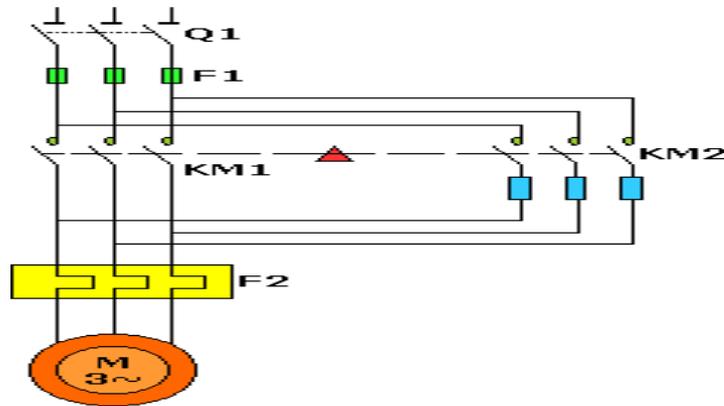


Figure.II.5 : Freinage à contre courant (inversion de flux) dans moteur asynchrone

Lors du freinage, il y a ouverture de KM1 puis fermeture de KM2 : le moteur est alimenté par un champ statorique inverse. Les pointes de courant sont très importantes et il est conseillé d'insérer un jeu de résistances pour limiter ce courant. KM2 doit s'ouvrir dès l'arrêt du moteur, pour éviter un redémarrage en sens inverse : il est donc nécessaire de prévoir un capteur détectant l'absence de rotation (capteur centrifuge).

II.5.1. Moteur à cage

Avant d'adopter ce système (Figure 6), il faut absolument s'assurer que le moteur est capable de supporter des freinages en contre-courant avec le service envisagé. En effet, outre les contraintes mécaniques, ce procédé impose des contraintes thermiques importantes au rotor, l'énergie correspondant à chaque freinage (énergie de glissement prise au réseau et énergie cinétique) étant dissipée dans la cage. Les sollicitations thermiques, pendant le freinage sont trois fois plus importantes que pour une mise en vitesse. Au moment du freinage, les pointes de courant et de couple sont nettement supérieures à celles produites lors du démarrage. Afin d'obtenir un freinage sans brutalité, il est souvent inséré, lors du couplage en contre-courant, une résistance en série avec chaque phase du stator. Le couple et le courant sont alors réduits comme dans le cas du démarrage statorique. Les inconvénients du freinage par contre-courant d'un moteur à cage sont tels que ce procédé n'est utilisé que sur certaines applications avec des moteurs de faible puissance. [14]

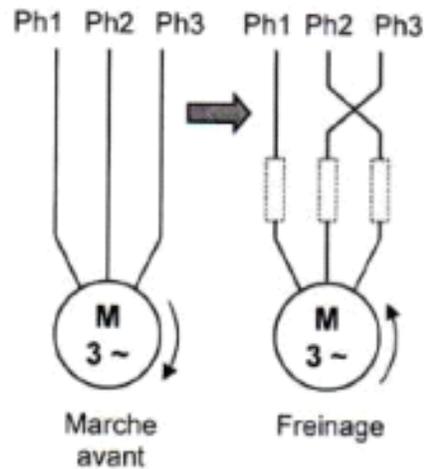


Figure.II.6 : Principe du freinage à contre-courant de MAS à cage

II.5.2 : Moteur à rotor bobiné (Moteur à bagues)

Afin de limiter la pointe de courant et de couple, il est impératif, avant de coupler le stator du moteur en contre-courant, de réinsérer les résistances rotoriques ayant servi au démarrage, et souvent même d'ajouter une section supplémentaire dite de freinage (Figure.7).

Le couple de freinage peut être facilement réglé à la valeur désirée en choisissant une résistance rotorique convenable. Au moment de l'inversion, la tension rotorique est presque le double de la tension rotorique à l'arrêt, ce qui impose quelquefois des précautions particulières d'isolement. Comme pour les moteurs à cage, une énergie importante est produite dans le circuit rotorique. Elle est dissipée en totalité (aux pertes près) dans les résistances. La commande automatique de l'arrêt à la vitesse nulle peut être faite par l'un des dispositifs cités plus haut, ou bien par l'action d'un relais de tension ou de fréquence inséré dans le circuit rotorique. Avec ce système, il est possible de retenir une charge entraînée à une vitesse modérée. la caractéristique est très instable (fortes variations de vitesse pour faibles variations de couple). [14]

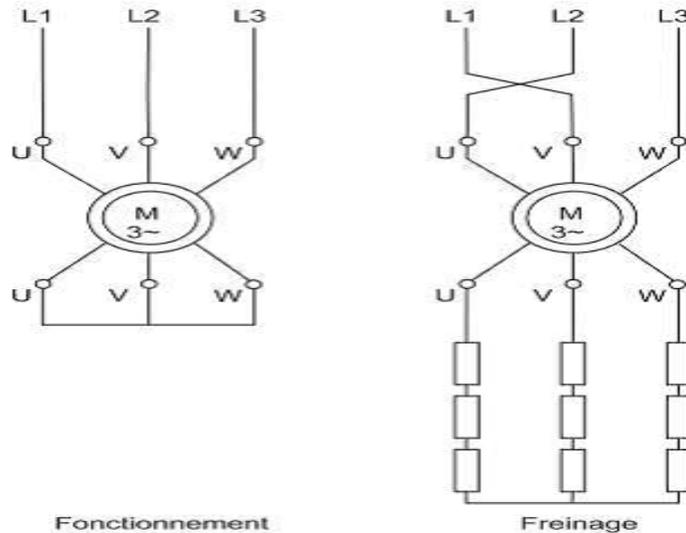


Figure.II.7 : Principe du freinage à contre-courant pour une machine asynchrone à bagues

II.6. Freinage par injection de courant

L'alimentation en courant continu du stator crée un champ fixe dans la machine qui s'oppose au mouvement. C'est la méthode la plus efficace pour freiner la machine mais les contraintes en courant sont également très sévères. Le contrôle de l'intensité du courant continu permet de contrôler le freinage. [11]

Ce mode de freinage est utilisé sur les moteurs à bagues et à cage (Figure.1). Par rapport au système à contre-courant, le prix de la source de courant redressé est compensé par un moindre volume des résistances. Avec les variateurs et démarreurs électroniques, cette possibilité de freinage est offerte sans supplément de coût. Le procédé consiste à envoyer du courant redressé dans le stator préalablement séparé du réseau. Ce courant redressé crée un flux fixe dans l'entrefer du moteur. Pour que la valeur de ce flux corresponde à un freinage convenable, le courant doit être environ 1.3 Fois le courant nominal. L'excédent de pertes thermiques dû à cette légère surintensité est généralement compensé par le fait que le freinage est suivi d'un temps d'arrêt. La valeur du courant étant fixée par la seule résistance des enroulements du stator, la tension de la source de courant redressé est faible. Cette source est généralement constituée de redresseurs ou fournie par les variateurs. Ceux-ci doivent pouvoir supporter les surtensions transitoires produites par les enroulements qui viennent d'être déconnectés du réseau alternatif (à 380 volts efficaces, par exemple). Le mouvement du rotor représente un glissement par rapport à un champ fixe dans l'espace (alors que, dans le système à contre-courant, le champ tourne en sens inverse). Le moteur

se comporte comme un générateur synchrone débitant dans le rotor. Les caractéristiques obtenues avec un système de freinage par injection de courant redressé présentent, par rapport à celles résultant d'un système à contre-courant, des différences importantes :

- L'énergie dissipée dans les résistances rotoriques ou dans la cage est moins importante.

Il s'agit uniquement de l'équivalent de l'énergie mécanique communiquée par les masses en mouvement. la seule énergie prise au réseau est l'excitation du stator,

- Si la charge n'est pas entraînée, le moteur ne redémarre pas en sens inverse,

- Si la charge est entraînée, le système fournit un freinage permanent qui retient cette charge à faible vitesse. Il s'agit donc d'un freinage de ralentissement et non d'un freinage d'arrêt.

La caractéristique est beaucoup plus stable qu'en contre-courant. Dans le cas d'un moteur à bagues, les caractéristiques couple-vitesse sont fonction du choix des résistances. Dans le cas d'un moteur à cage, ce système permet de régler facilement le couple de freinage en agissant sur le courant continu d'excitation. Cependant, le couple de freinage sera faible quand le moteur tourne à vitesse élevée. Afin d'éviter les échauffements inutiles, il faut prévoir un dispositif coupant le courant dans le stator une fois le freinage réalisé [14]

La Figure suivante illustre la méthode de freinage par injection de courant

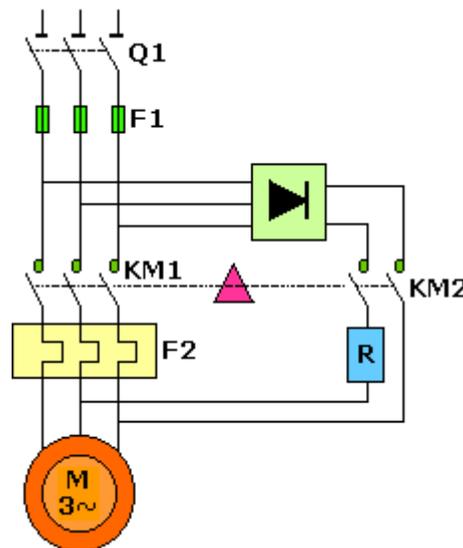


Figure.II.8 : Freinage par injection de courant dans le moteur asynchrone

Lorsque l'ordre de démarrage est donné, KM1 se ferme et le moteur se met en rotation lorsque l'arrêt est demandé, KM1 s'ouvre, puis KM2 se ferme un courant continu (limité par la résistance R) est envoyé dans le stator le moteur se comporte comme un alternateur en court-circuit

l'inducteur, constitué par 2 phases du stator, produit un champ magnétique fixe l'induit, constitué par le rotor en court-circuit, tourne dans ce champ magnétique des courants rotoriques apparaissent : l'énergie cinétique est transformée en pertes par effet joule au niveau du rotor : le moteur ralentit lorsque le moteur est à l'arrêt, KM2 s'ouvre.

Avantages : Pas de risque de démarrage dans l'autre sens.

Inconvénient : il faut couper le courant dans le stator pour éviter l'échauffement [12]

II.7. Conclusion

Dans ce chapitre on a cité quelques techniques de freinage des moteurs asynchrone triphasés avec la présentation des schémas électriques (schémas de puissance et de commande), afin de réaliser un freinage en toute sécurité. [15]

Nous avons plus développé les méthodes de freinage par inversion de flux ainsi que celle avec freinage par injection de courant continu dans le stator parce que ce sont elles qui feront l'objet des modèles que nous allons calculer dans les chapitres suivants.

Chapitre III

*Modèles mathématiques de la machine
asynchrone*

III.1. Introduction

Les régimes transitoires sont provoqués par de multiples variations dans l'alimentation ou dans les caractéristiques de construction du moteur, il existe donc plusieurs causes de régime transitoire, le démarrage et le freinage sont les exemples les plus fréquemment rencontrés. Ils affectent les grandeurs électriques comme le courant au démarrage, mais aussi les grandeurs mécaniques comme les oscillations de couple, qui sont toujours gênantes particulièrement dans les arbres de transmissions et leurs organes annexe. On mesure donc toute l'importance que l'on doit accorder à ces régimes.

L'analyse d'un régime transitoire n'est jamais simple, même lorsque l'on fait des hypothèses simplificatrices, après la mise en équation des phénomènes physiques, la résolution reste souvent compliquée. En effet, on aboutit à un système d'équations différentielles d'ordre six à coefficients variables peu utilisable sous cette forme. On cherche alors à simplifier le problème pour se ramener à un système d'ordre inférieur à coefficients constants. La technique la plus employée est la transformation de Park qui consiste à remplacer les enroulements triphasés réels par des enroulements diphasés fictifs.

III.2. Equations électriques

La loi de Kirchhoff permet d'écrire :

$$V = Ri + \frac{d\varphi}{dt}$$

Pour les trois phases statoriques on résume cette écriture par l'écriture matricielle

Condensée :

$$[V_{sabc}] = R[i_{abc}] + \frac{d}{dt}[\varphi_{abc}] \dots \dots \dots (III.1)$$

III.2.1. Au stator

$$\begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{sa} \\ \varphi_{sb} \\ \varphi_{sc} \end{bmatrix} \dots \dots \dots (III.2)$$

III.2.2. Au rotor

$$\begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{ra} \\ \varphi_{rb} \\ \varphi_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \dots \dots \dots (III.3)$$

Le rotor étant en court-circuit, ses tensions sont nulles.

V_s : la matrice des tensions par phase au stator

V_r : la matrice des tensions par phase au rotor

i_s : la matrice des courants au stator

i_r : la matrice des courants au rotor

R_s : Résistance statorique

R_r : Résistance rotorique

φ_s : la phase a statorique

φ_r : la phase a rotorique

III.3. Equations magnétiques

Chaque flux comporte une interaction avec les courants de toutes les phases compris la sienne (notion de flux / inductance propre).

Exemple de la phase a statorique :

$$\varphi_{sa} = L_s i_{sa} + M_s (i_{sb} + i_{sc}) + M_1 \cdot i_{ra} + M_3 \cdot i_{rb} + M_2 \cdot i_{rc} \dots \dots \dots (III.4)$$

$$\begin{bmatrix} \varphi_{sa} \\ \varphi_{sb} \\ \varphi_{sc} \\ \varphi_{ra} \\ \varphi_{rb} \\ \varphi_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & M_s & M_s & M_1 & M_2 & M_3 \\ M_s & L_s & M_s & M_2 & M_1 & M_3 \\ M_s & M_s & L_s & M_3 & M_2 & M_1 \\ M_1 & M_2 & M_3 & L_r & M_r & M_r \\ M_3 & M_1 & M_2 & M_r & L_r & M_r \\ M_2 & M_3 & M_1 & M_r & M_r & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \\ i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} \dots \dots \dots (III.5)$$

Cette matrice des inductances fait apparaitre quatre sous matrice

$$\begin{bmatrix} \varphi_{sabc} \\ \varphi_{rabc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [L_s] & [M_{sr}] \\ [M_{sr}] & [L_r] \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{sabc} \\ i_{rabc} \end{bmatrix} \dots \dots \dots (III.6)$$

Avec : $[M_{sr}] = [M_{sr}]^T \dots \dots \dots (III.7)$

Où :

L_s : est l'inductance propre d'une phase statorique.

L_r : est l'inductance propre d'une phase rotorique.

M_s : est l'inductance mutuelle entre deux phases statoriques.

M_r : est l'inductance mutuelle entre deux phases rotoriques.

M_{sr} : est le maximum de l'inductance mutuelle entre deux phases rotoriques et une phase statorique.

$$\text{Avec : } [M_{sr}] = [M_{sr}]^T = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta + 2\frac{\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - 2\frac{\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta - 2\frac{\pi}{3}\right) & \cos(\theta) & \cos\left(\theta + 2\frac{\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta + 2\frac{\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - 2\frac{\pi}{3}\right) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \dots\dots\dots \text{(III.8)}$$

$$M_1 = M_{sr} \cos(\theta)$$

$$M_2 = M_{sr} \cos(\theta - 2\pi/3) \dots\dots\dots \text{(III.9)}$$

$$M_3 = M_{sr} \cos(\theta + 2\pi/3)$$

$[M_{sr}]$: Matrices des inductances mutuelles du couplage stator – rotor.

θ : angle électrique définit la position relative instantanée entre les axes rotorique et les statorique que sont choisi comme axes de références.

On obtient finalement :

$$\begin{cases} [V_{sabc}] = [R_s] \cdot [i_{sabc}] + \frac{d}{dt} ([L_s] \cdot [i_{sabc}] + [M_{sr}] \cdot [i_{rabc}]) \\ [V_{rabc}] = [R_r] \cdot [i_{rabc}] + \frac{d}{dt} ([L_r] \cdot [i_{rabc}] + [M_{sr}] \cdot [i_{sabc}]) \end{cases}$$

III.4. Equations mécaniques

L'étude des caractéristiques dynamiques de la machines asynchrone fait introduire des variations non seulement des paramètres électriques (tension, courant flux, FEM) mais aussi des paramètres mécanique (couple, vitesse).

L'expression de l'équation mécanique est :

$$C_e - C_r = J \frac{d}{dt} \Omega + f \Omega \dots\dots\dots \text{(III.11)}$$

Avec :

J : moment d'inertie du rotor. [Kgm²]

f : coefficient de frottement visqueux. [Nm/rad/s]

C_e : couple électromagnétique. [Nm]

C_r : couple résistant. [Nm]

Ω : La vitesse angulaire du rotor, ou la vitesse mécanique du rotor.

Le couple électromagnétique est donné par :

$$C_e = [i_{sa} \ i_{sb} \ i_{sc}] \frac{d}{dt} [M_{sr}] \cdot \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} \dots\dots\dots (III.12)$$

III.5. Equation de la dynamique du moteur

Le principe fondamental de la dynamique appliqué au moteur donne :

$$C_{em} - C_r = J \frac{d\Omega_r}{dt} \dots\dots\dots (III.13)$$

III.6.1 Transformation de Park

La transformation de Park est constituée d'une transformation triphasée-biphasé suivie d'une rotation. Elle permet de passer du repère fixe (abc) vers le repère mobile (d q). [1]

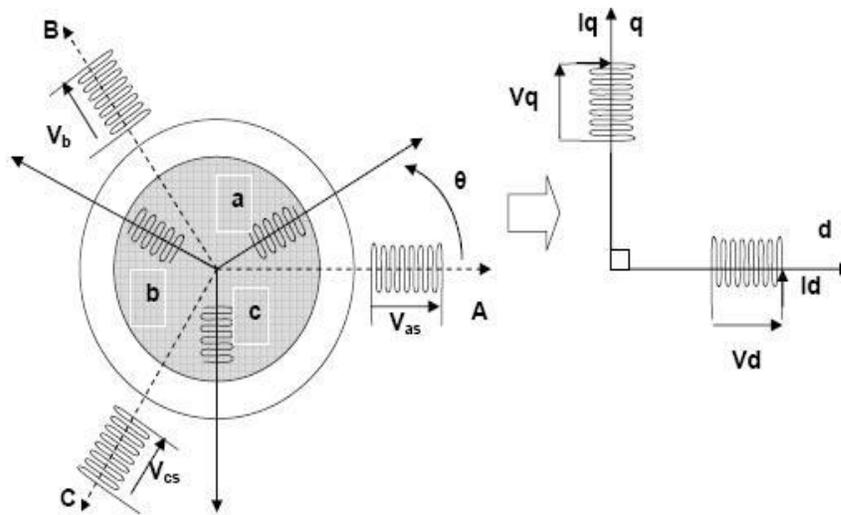


Figure. III.1: représentation angulaire des systèmes d'axes dans l'espace électrique

Les repères de la transformation de Park des grandeurs statorique et celle des grandeurs rotoriques doivent coïncider pour simplifier ces équations. Ceci se fait en liant les θ_s et θ_r angles par la relation :

$$\theta_s = \theta + \theta_r$$

Alors dans ce cas la transformation de Park normalisée est obtenue à l'aide de la matrice de passage :

$$[P]^{-1}[V_{dq0}] = [R][P]^{-1}[i_{dq0}] + \frac{d}{dt}([P]^{-1}[\varphi_{dq0}]) \dots\dots\dots (III.13)$$

$$[P] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - 2\frac{\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + 2\frac{\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta) & -\sin\left(\theta - 2\frac{\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + 2\frac{\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \dots\dots\dots (III.14)$$

Cette matrice est orthogonale, c'est-à-dire $[P(\theta)]^T = [P(\theta)]^{-1}$

La transformation de Park peut être appliquée sur les tensions, les courants et les flux.

Le changement de variable relatif aux courants, tension et flux est défini par la transformation :

$$\begin{bmatrix} x_d \\ x_q \\ x_0 \end{bmatrix} = P(\theta) \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \dots\dots\dots (III.15)$$

Avec x : tension, courant ou flux, et les indices suivantes représentent :

”0” : Indice de l'axe homopolaire.

”d” : indice de l'axe direct.

”q” : indice de l'axe quadrature.

La matrice inverse de transformation de Park normalisée a pour expression :

$$[P]^{-1} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_s) & -\sin(\theta_s) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta_s - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta_s - \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta_s + \frac{4\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta_s + \frac{4\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \dots\dots\dots (III.16)$$

On démontre que :

$$[P] \left(\frac{d}{dt} [P]^{-1} \right) = \frac{d\theta}{dt} \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (III.17)$$

On obtient finalement le système des équations de Park. Qui constitue ainsi un modèle électrique dynamique pour l'enroulement biphasé équivalent :

$$\begin{aligned} V_d &= R i_d + \frac{d\varphi_d}{dt} - \frac{d\theta}{dt} \varphi_q \\ V_q &= R i_q + \frac{d\varphi_q}{dt} + \frac{d\theta}{dt} \varphi_d \dots\dots\dots (III.18) \\ V_0 &= R i_0 + \frac{d\varphi_0}{dt} \end{aligned}$$

Pour la réduction de la matrice des inductances les transformations proposées établissent les relations entre les flux d'axe d, q, 0. Et les flux d'axe a, b, c :

$$[\varphi_{sdq0}] = [P(\theta_s)][\varphi_{sabc}]$$

$$[\varphi_{rdq0}] = [P(\theta_r)][\varphi_{rabc}]$$

Après le calcul, on trouve :

$$\begin{pmatrix} \varphi_{sd} \\ \varphi_{sq} \\ \varphi_{s0} \\ \varphi_{rd} \\ \varphi_{rq} \\ \varphi_{r0} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L_s - M_s & 0 & 0 & \frac{3}{2}M_{sr} & 0 & 0 \\ 0 & L_s - M_s & 0 & 0 & \frac{3}{2}M & 0 \\ 0 & 0 & L_s + 2M_s & 0 & 0 & 0 \\ \frac{3}{2}M_{sr} & 0 & 0 & L_r - M_r & 0 & 0 \\ 0 & \frac{3}{2}M_{sr} & 0 & 0 & L_r - M_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & L_r + 2M_r \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_{s0} \\ i_{rd} \\ i_{rq} \\ i_{r0} \end{pmatrix} \dots\dots\dots (III.19)$$

$L_s = i_s - M_r$: inductance cyclique statorique.

$L_r = i_r - M_r$: inductance cyclique rotorique.

$M = \frac{3}{2}M_{sr}$: inductance mutuelle cyclique entre stator et rotor.

Le mode habituel d'alimentation de stator et la structure des enroulements rotorique conférant la nullité aux sommes des courants statorique et de courant rotorique, les composantes d'indice (0) sont nulles. Dans ces conditions de fonctionnement en mode non dégradé, les flux d'axe d et q sont simplement définis par les trois paramètres constants L_s , L_r , M . est aux Courant par la relation

$$\begin{pmatrix} \varphi_{sd} \\ \varphi_{sq} \\ \varphi_{rd} \\ \varphi_{rq} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_s & 0 \\ 0 & M & 0 & L_s \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_{rd} \\ i_{rq} \end{pmatrix} \dots\dots\dots (III.20)$$

III.6.1.1. Equation électrique

Les équations des Park des tensions, statorique et rotorique s'écrivent :

$$\begin{aligned} V_{sd} &= R_s i_{sd} + \frac{d\varphi_{sd}}{dt} - \frac{d\theta_s}{dt} \varphi_{sq} \\ V_{sq} &= R_s i_{sq} + \frac{d\varphi_{sq}}{dt} + \frac{d\theta_s}{dt} \varphi_{sd} \dots\dots\dots (III.21) \\ V_{rd} &= R_r i_{rd} + \frac{d\varphi_{rd}}{dt} - \frac{d\theta_r}{dt} \varphi_{rq} = 0 \\ V_{rq} &= R_r i_{rq} + \frac{d\varphi_{rq}}{dt} - \frac{d\theta_r}{dt} \varphi_{rd} = 0 \end{aligned}$$

Dans le repère de Park (d, q) tournant à la vitesse angulaire $\omega_s = \frac{d\theta_s}{dt}$

L'équation suivant :

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{sd} = R_S i_{sd} + \frac{d\varphi_{sd}}{dt} - \omega_s \varphi_{sq} \\ V_{sq} = R_S i_{sq} + \frac{d\varphi_{sq}}{dt} - \omega_s \varphi_{sd} \end{array} \right\} \dots\dots\dots (III.22)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} R_r i_{rd} + \frac{d\varphi_{rd}}{dt} - (\omega_s - \omega) \varphi_{rq} = 0 \\ R_r i_{rq} + \frac{d\varphi_{rq}}{dt} - (\omega_s - \omega) \varphi_{rd} = 0 \end{array} \right\} \dots\dots\dots (III.23)$$

III.6.1.2. Equations magnétique

Avec les flux :

$$\begin{aligned} \varphi_{sd} &= L_S i_{sd} + M i_{rd} \\ \varphi_{sq} &= L_S i_{sq} + M i_{rq} \dots\dots\dots (III.24) \\ \varphi_{rd} &= L_r i_{sd} + M i_{sd} \\ \varphi_{rq} &= L_r i_{rq} + M i_{sq} \end{aligned}$$

III.6.1.3. Equation mécanique

L'équation du couple et celle du mouvement s'écrivent :

$$C_e = P M [i_{sq} i_{rd} - i_{sd} i_{rq}] \dots\dots\dots (III.25)$$

Avec :

$$\frac{J d\omega}{P dt} = C_e - C_r - \frac{f}{P} \omega \dots\dots\dots (III.26)$$

J : Moment d'inertie du rotor.

f : Coefficient de frottement visqueux.

P : Nombre de pair de pôles.

C_e : Couple électromagnétique.

C_r : Couple résistant.

III.6.2. Choix du repère

Jusqu'à présent, nous avons exprimé les équations et les grandeurs de la machine dans un repère dq qui fait un angle électrique Θ_s avec le stator et qui fait également un angle électrique Θ_r avec le rotor mais qui n'est pas défini par ailleurs, c'est-à-dire qu'il est libre.

Il existe trois choix importants. On peut fixer le repère au stator dq , au rotor ou au champ tournant. Rappelons que le repère dq est le repère mobile, c'est-à-dire qu'il nous appartient de calculer les angles des transformations de Park Θ_s et Θ_r afin d'effectuer les rotations.

III.6.2.1. Référentiel fixe par rapport au stator

Il se traduit par les conditions :

$$\begin{aligned} \Theta_s &= 0 & , & & \Theta_r &= -\Theta \\ \frac{d\Theta_s}{dt} &= 0 & , & & \frac{d\Theta_r}{dt} &= -\frac{d\Theta_s}{dt} \\ \omega_s &= 0 & , & & \omega_r &= -\omega_s \end{aligned}$$

Les équations électriques prennent la forme :

$$\left\{ \begin{aligned} V_{sd} &= R_s i_{sd} + \frac{d\varphi_{sd}}{dt} \\ V_{sq} &= R_s i_{sq} + \frac{d\varphi_{sq}}{dt} \\ 0 &= R_r i_{rd} + \frac{d\varphi_{rd}}{dt} + \omega_s \varphi_{rq} \\ 0 &= R_r i_{rq} + \frac{d\varphi_{rq}}{dt} - \omega_s \varphi_{rd} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(III.27)$$

Après arrangement des équations avec $(i_{sd}, i_{sq}, i_{rd}, i_{rq})$ on aboutit à :

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{di_{sd}}{dt} &= -\frac{1}{\sigma T_s} i_{sd} + \frac{M^2}{\sigma L_s L_r} \omega i_{sq} + \frac{M}{\sigma L_s T_r} i_{rd} + \frac{M}{\sigma L_s} \omega i_{rq} + \frac{V_{sd}}{\sigma L_s} \\ \frac{di_{sq}}{dt} &= -\frac{M^2}{\sigma L_s L_r} \omega i_{sd} - \frac{1}{\sigma T_s} i_{sq} - \frac{M}{\sigma L_s} \omega i_{rd} + \frac{M}{\sigma L_s T_r} i_{rq} + \frac{V_{sq}}{\sigma L_s} \\ \frac{di_{rd}}{dt} &= \frac{M}{\sigma L_s L_r} i_{sd} - \frac{M}{\sigma L_r} \omega i_{sq} - \frac{1}{\sigma T_r} i_{rd} - \frac{1}{\sigma} \omega i_{rq} + \frac{M}{\sigma L_s L_r} V_{sd} \\ \frac{di_{rq}}{dt} &= \frac{M}{\sigma L_r} \omega i_{sd} + \frac{M}{\sigma T_s L_r} i_{sq} + \frac{1}{\sigma} \omega i_{rd} - \frac{1}{\sigma T_r} i_{rq} + \frac{M}{\sigma L_s L_r} V_{sq} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(III.28)$$

Avec :

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

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

$T_s = \frac{l_r}{r_r}$: Constante de temps rotorique.

III.6.2.2. Référentiel fixe par rapport au rotor

Ce référentiel est choisi de préférence en vue d'étudier des variations des grandeurs statoriques.

Il se traduit par les conditions :

$$\begin{aligned} \theta_s &= 0 & , & & \theta_r &= 0 \\ \frac{d\theta_s}{dt} &= \frac{d\theta}{dt} & , & & \frac{d\theta_r}{dt} &= 0 \\ \omega_r &= 0 & , & & \omega_s &= \omega \end{aligned}$$

Les équations électriques prennent la forme :

$$\left\{ \begin{aligned} V_{sd} &= R_s i_{sd} + \frac{d\phi_{sd}}{dt} - \omega_s \phi_{sq} \\ V_{sq} &= R_s i_{sq} + \frac{d\phi_{sq}}{dt} + \omega_s \phi_{sd} \\ 0 &= R_r i_{rd} + \frac{d\phi_{rd}}{dt} \\ 0 &= R_r i_{rq} + \frac{d\phi_{rq}}{dt} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(III.29)$$

Après arrangement des équations, on aboutit à :

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{di_{sd}}{dt} &= -\frac{1}{\sigma T_s} i_{sd} + \frac{1}{\sigma} \omega i_{sq} + \frac{M}{\sigma L_s T_r} i_{rd} + \frac{M}{\sigma L_s} \omega i_{rq} + \frac{V_{sd}}{\sigma L_s} \\ \frac{di_{sq}}{dt} &= -\frac{1}{\sigma} \omega i_{sd} - \frac{1}{\sigma T_s} i_{sq} - \frac{M}{\sigma L_s} \omega i_{rd} + \frac{M}{\sigma L_s T_r} i_{rq} + \frac{V_{sq}}{\sigma L_s} \\ \frac{di_{rd}}{dt} &= \frac{M}{\sigma L_s L_r} i_{sd} - \frac{M}{\sigma L_r} \omega i_{sq} - \frac{1}{\sigma T_r} i_{rd} - \frac{M^2}{\sigma L_s L_r} \omega i_{rq} - \frac{M}{\sigma L_s L_r} V_{sd} \\ \frac{di_{rq}}{dt} &= \frac{M}{\sigma L_r} \omega i_{sd} + \frac{M}{\sigma T_s L_r} i_{sq} + \frac{M^2}{\sigma L_s L_r} \omega i_{rd} - \frac{1}{\sigma T_r} i_{rq} - \frac{M}{\sigma L_s L_r} V_{sq} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(III.30)$$

III.6.2.3. Référentiel fixe par rapport au champ tournant

Ce référentiel est le seul qui n'introduise 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.

Il se traduit par les conditions :

$$\frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s \dots\dots\dots(III.31)$$

$$\frac{d\theta_r}{dt} = \omega_s - \omega = \omega_r \dots\dots\dots(III.32)$$

Les équations électriques prennent la forme :

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{sd} = R_S i_{sd} + \frac{d\varphi_{sd}}{dt} - \omega_s \varphi_{sq} \\ V_{sq} = R_S i_{sq} + \frac{d\varphi_{sq}}{dt} + \omega_s \varphi_{sd} \\ 0 = R_r i_{rd} + \frac{d\varphi_{rd}}{dt} - \omega_r \varphi_{rq} \\ 0 = R_r i_{rq} + \frac{d\varphi_{rq}}{dt} + \omega_r \varphi_{rd} \end{array} \right\} \dots\dots\dots(III.33)$$

Après arrangement des équations, on aboutit à :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{di_{sd}}{dt} = \frac{1}{\sigma T_s} i_{sd} + (\omega_r \frac{1}{\sigma} \omega) i_{sq} + \frac{M}{\sigma L_s T_r} i_{rd} + \frac{M}{\sigma L_s} \omega i_{rq} + \frac{V_{sd}}{\sigma L_s} \\ \frac{di_{sq}}{dt} = -(\omega_r \frac{1}{\sigma} \omega) i_{sd} - \frac{1}{\sigma T_s} i_{sq} - \frac{M}{\sigma L_s} \omega i_{rd} + \frac{M}{\sigma L_s T_r} i_{rq} + \frac{V_{sq}}{\sigma L_s} \\ \frac{di_{rd}}{dt} = \frac{M}{\sigma L_s L_r} i_{sd} - \frac{M}{\sigma L_r} \omega i_{sq} - \frac{1}{\sigma T_r} i_{rd} + (\omega_r - \frac{M^2}{\sigma L_s L_r} \omega) i_{rq} - \frac{M}{\sigma L_s L_r} V_{sd} \\ \frac{di_{rq}}{dt} = \frac{M}{\sigma L_r} \omega i_{sd} + \frac{M}{\sigma T_s L_r} i_{sq} + (-\omega_r + \frac{M^2}{\sigma L_s L_r} \omega) i_{rd} - \frac{1}{\sigma T_r} i_{rq} - \frac{M}{\sigma L_s L_r} V_{sq} \end{array} \right\} \dots\dots\dots(III.34)$$

III.7. Conclusion

L'étude d'un système électromagnétique représenté dans notre sujet par l'entraînement d'une machine asynchrone réside dans la modélisation mathématique ensemble équations et des formes matricielles peut acheminer et déterminer les caractéristiques physiques après avoir une simulation.

Chapitre IV

*Modèles numériques et applications au
freinage de la machine asynchrone*

IV.1. Modelé Simulink de démarrage d'un moteur asynchrone

En utilisant le toolbox Simulink de Matlab on a développé l'étude du démarrage, puis du fonctionnement en charge, d'une machine asynchrone. Le processus s'effectue selon deux étapes successives :

- Démarrage à vide
- Couplage avec une charge mécanique à l'instant $t = 3s$

Les paramètres de la machine (dans le modèle de Park exposé précédemment) alimentée sous une tension composée de 220V avec la fréquence $f = 50\text{Hz}$ sont les suivants :

J (kg.)	p	M (H)	L_s (H)	L_r (H)	R_s (Ω)	R_r (Ω)
50.10^{-3}	2	0.258	0.280	0.274	4.85	3.805

Tableau IV.1 : Les paramètres de la MSA [16]

La machine est sans frottements.

La machine démarre à vide puis il y a couplage d'une charge avec un couple résistant $C_r = 15 \text{ N.m}$ à l'instant $t = 3s$.

La figure suivante représente le schéma bloc pour l'étude de ce démarrage ou celui, en général d'un moteur asynchrone. Elle comporte essentiellement :

- Source alimentation alternative
- Bloc transformation de Park
- Bloc de la machine asynchrone MAS
- Bloc transformation de Park inverse

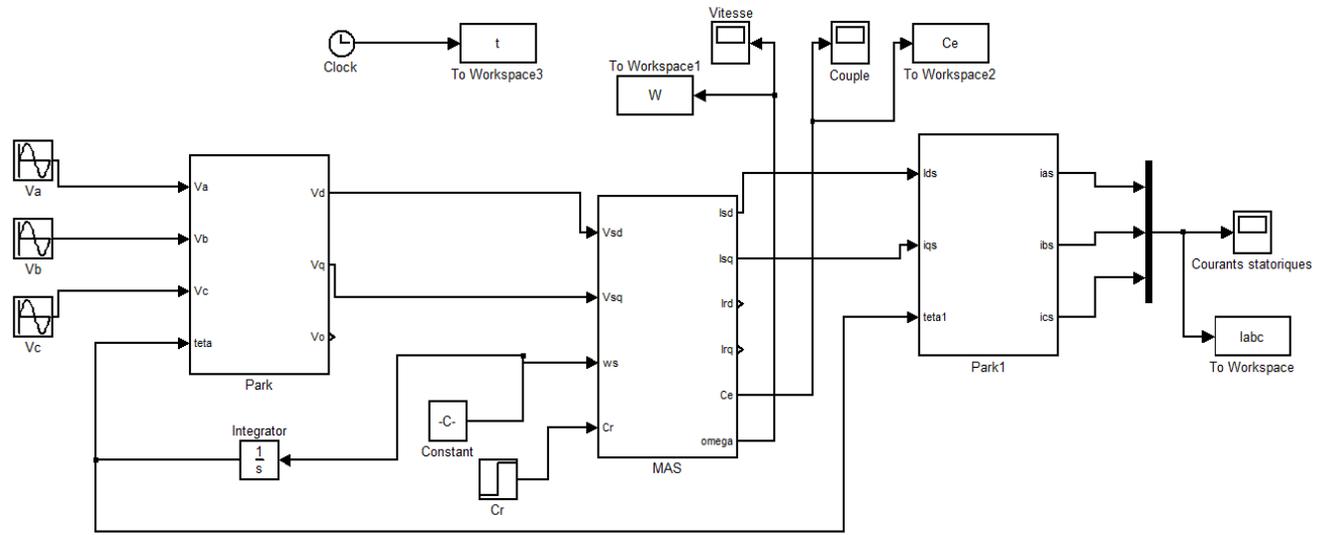
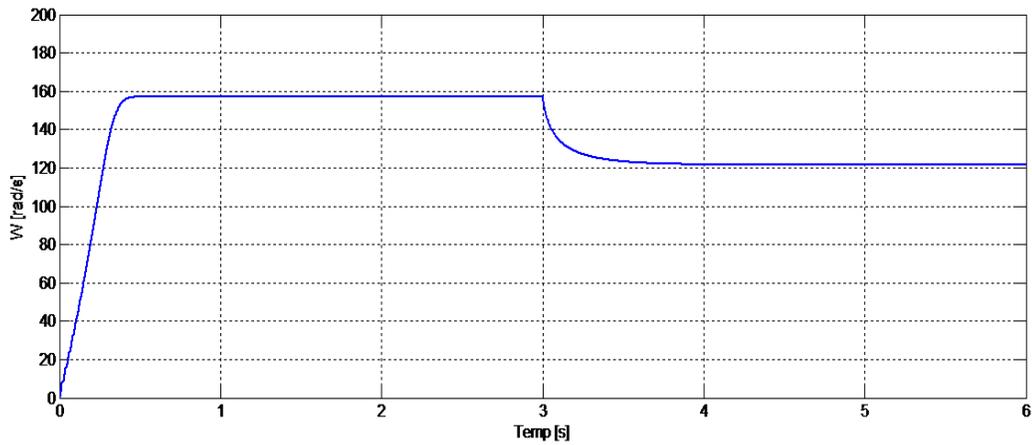
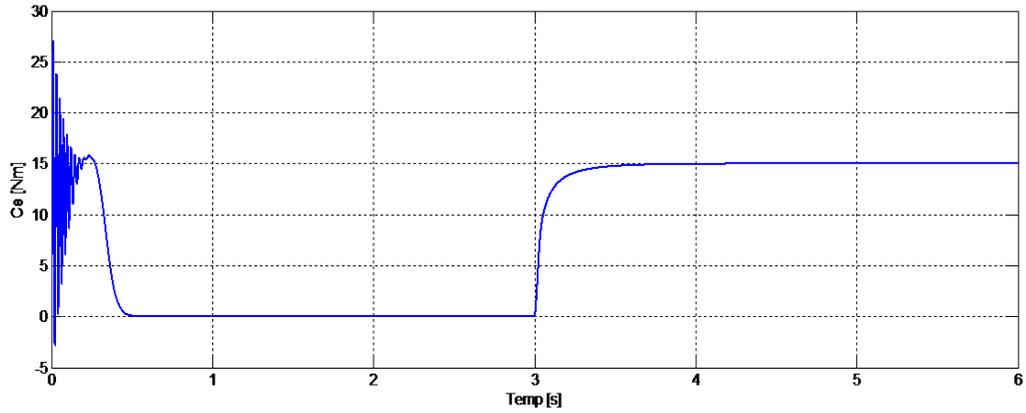


Figure.IV.1 : Schéma bloc modèle Simulink de démarrage de la machine asynchrone

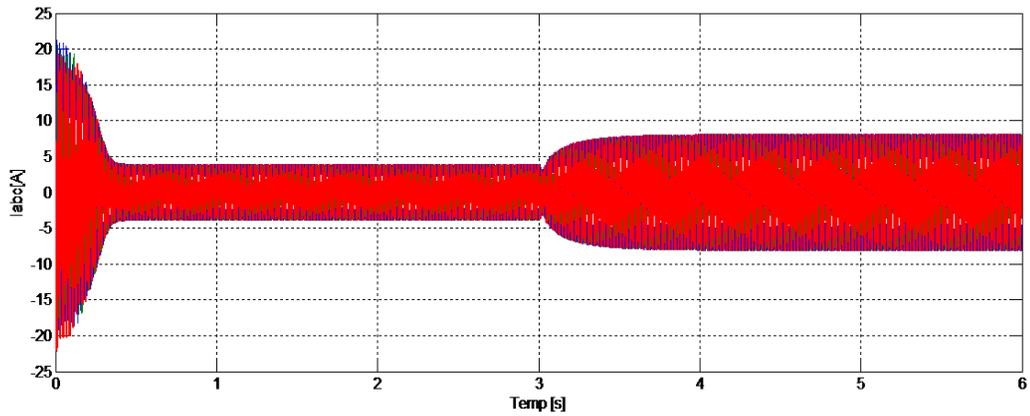
IV.2. Résultats obtenus pour le démarrage et fonctionnement en charge de la MAS : variables de vitesse, de couple et de courant en fonction du temps



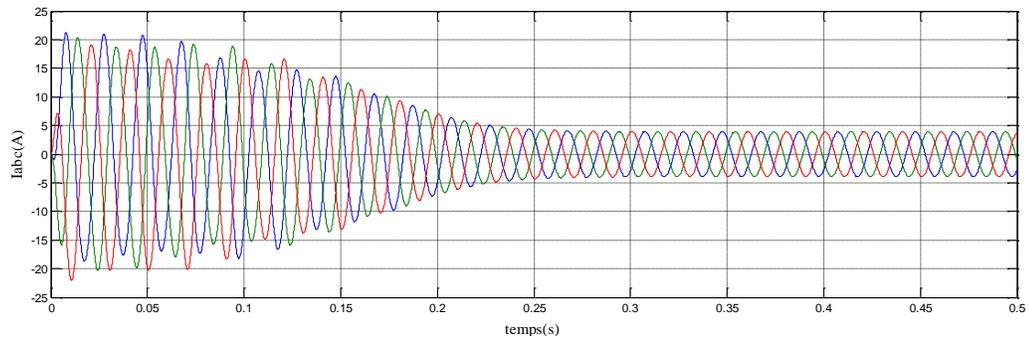
a. Comportement de la vitesse



b. Comportement du couple



c. Comportement du courant pour les trois phases



d. Comportement du courant pour les trois phases (a vidé)

Figure.IV.2 : Résultats de la simulation du démarrage et du fonctionnement en charge d'un moteur asynchrone

Lors de la phase initiale de démarrage, bien que le moteur soit à vide, l'appel de courant est assez élevé (supérieur à 20A) puis, durant le reste de la phase de démarrage à vide, le courant baisse pour se stabiliser à une valeur qui ne dépasse pas 5A. A l'instant $t = 3s$ (couplage de la charge) ce courant augmente et se stabilise à environ 08A.

Pour le couple, nous voyons au démarrage une zone à couple élevé (supérieur à 20 N.m), chargée d'harmoniques. Cela correspond à la zone instable des caractéristiques mécaniques de la machine asynchrones obtenues par les méthodes classiques analytiques telles que le schéma électrique équivalent ou bien le diagramme circulaire. Ensuite le couple devient nul puisque la machine est à vide. A l'instant $t=3s$, moment du couplage de la charge, le couple augmente et garde sa valeur nominale de 15 N.m. et qui est égale à celle du couple résistant de la charge.

La vitesse varie elle aussi durant les différentes étapes du processus. Si elle se stabilise à environ 160rd/s durant la phase à vide, elle chute à 120rd/s après le couplage de la charge mécanique.

IV.3. Freinage à contre courant d'un moteur asynchrone

IV.3.1. Modelé Simulink de freinage à contre courant d'un moteur asynchrone

L'opération consiste à inverser deux phases d'alimentation du moteur (A et B) au moment du freinage.

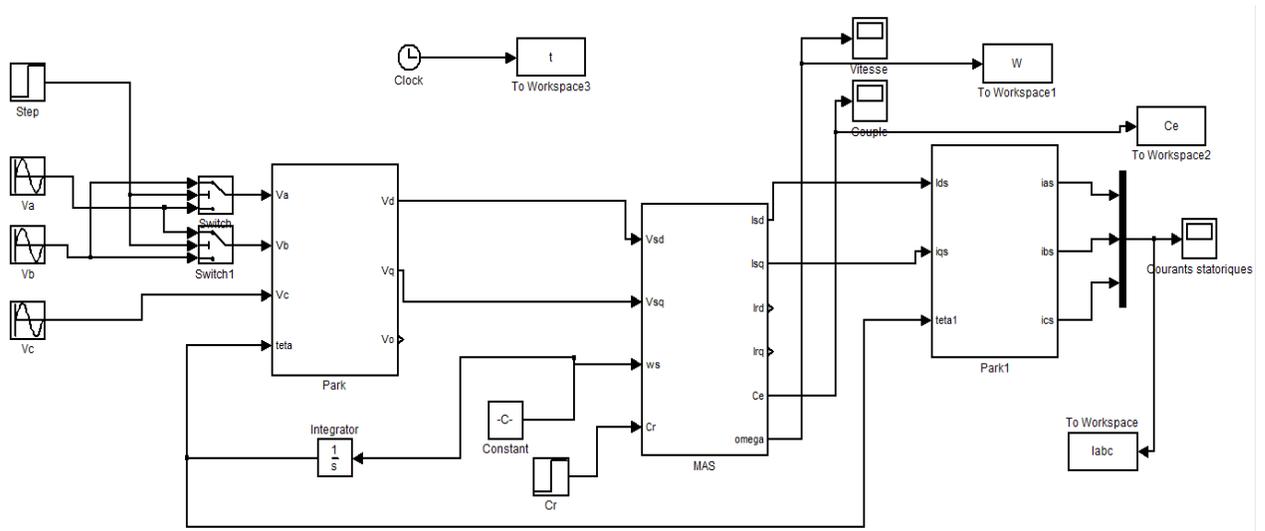
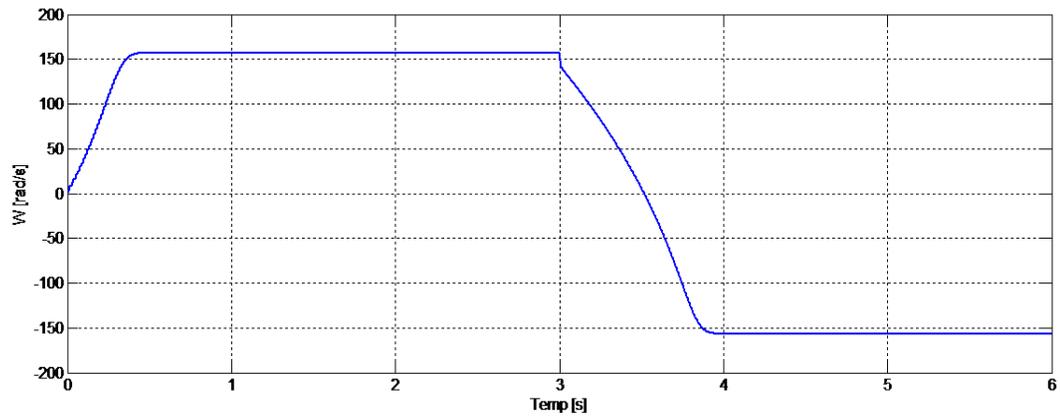


Figure.IV.3 : Schéma bloc modèle Simulink de freinage à contre courant de la machine asynchrone

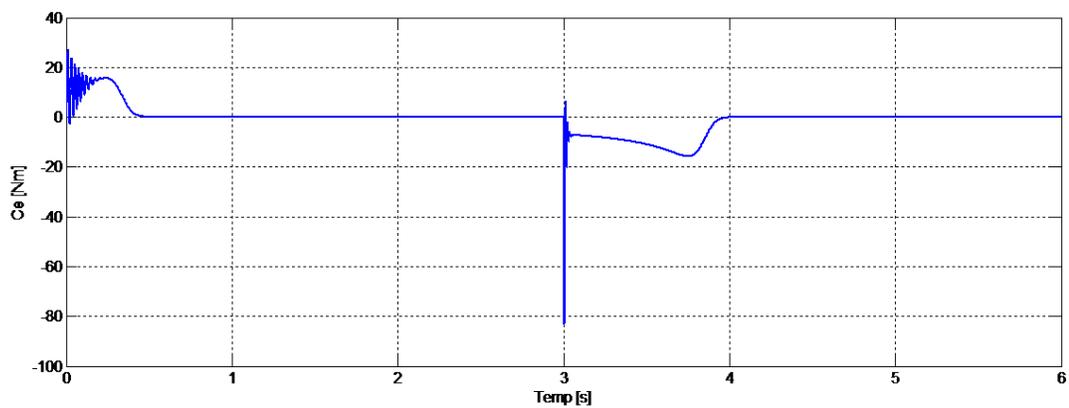
IV.3.2.variables de vitesse, de couple et de courant

- Freinage à contre courant à vide. $C_r=0(\text{Nm})$.

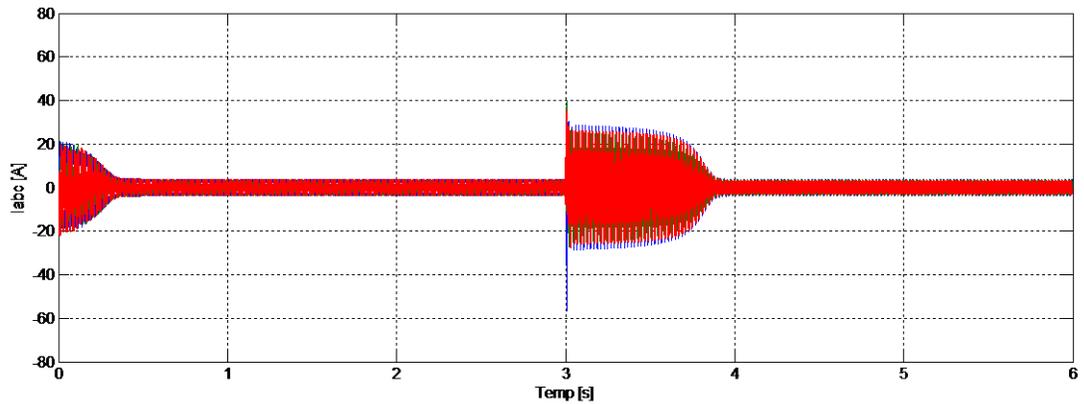
Le moteur fonctionne à vide. L'inversion des phases a lieu à l'instant $t=3\text{s}$. Aucun échauffement n'est à redouter, si bien qu'aucun rhéostat n'est inséré avec les enroulements statoriques.



a. Comportement de la vitesse



b. Comportement du couple

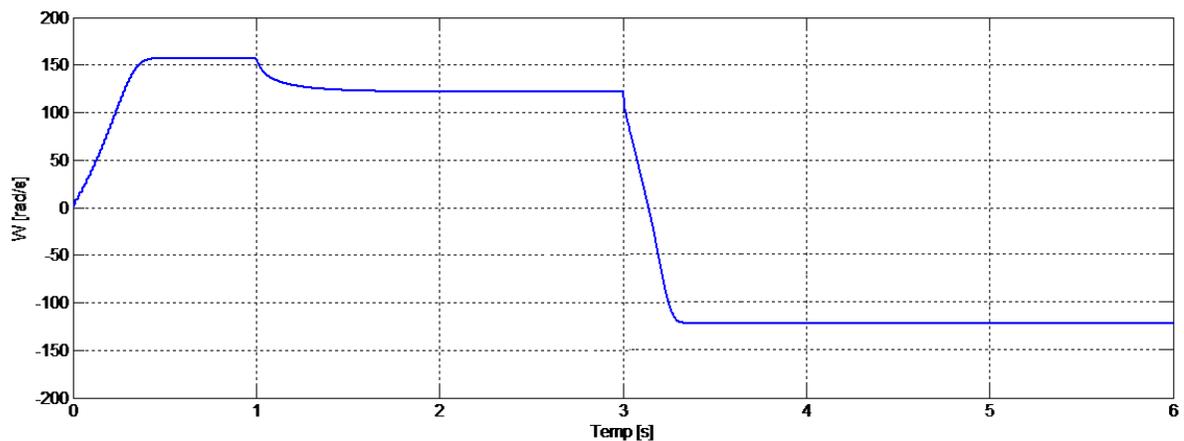


c. Comportement du courant (03 phases)

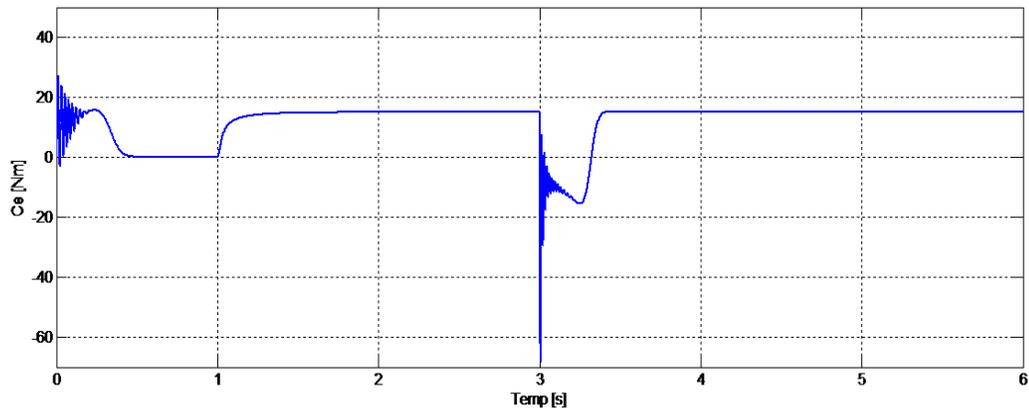
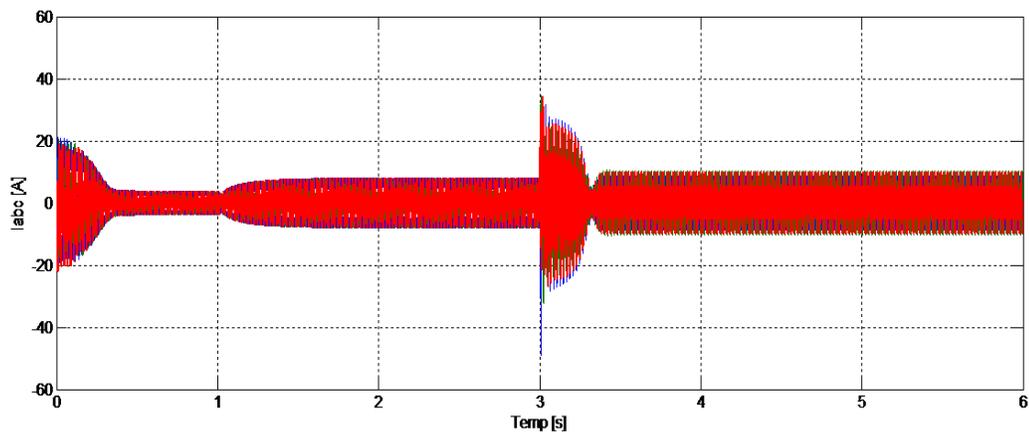
Figure.IV.4 : Résultats de la simulation du freinage à contre courant à vide

On voit qu'au moment de l'inversion des phases, le courant statorique augmente de manière très importante (jusqu'à presque 40A). C'est seulement après une seconde environ que le courant reprend sa valeur normale. Entre temps, le couple électromagnétique s'est inversé bien que la machine continue à tourner dans le même sens. Cela freine la machine et, si aucun dispositif n'est prévu pour couper l'alimentation au moment où la vitesse s'annule, le moteur va redémarrer dans l'autre sens. On remarquera la faible valeur du couple électromagnétique en régime permanent parce que la machine fonctionne à vide (absence de charge mécanique). Après inversion du sens de rotation le courant reprend la même valeur qu'avant le freinage en raison de la symétrie de rotation de la machine.

. Freinage à contre courant en charge. $C_r=15(Nm)$



a. Comportement de la vitesse

**b. Comportement de couple****c. Comportement de courant****Figure.IV.5** : Résultats de la simulation du freinage à contre courant en charge

On note que dans le mode d'application du freinage par contre-courant en mode de charge, les mêmes changements de vitesse se produisent que dans le cas du mode à vide.

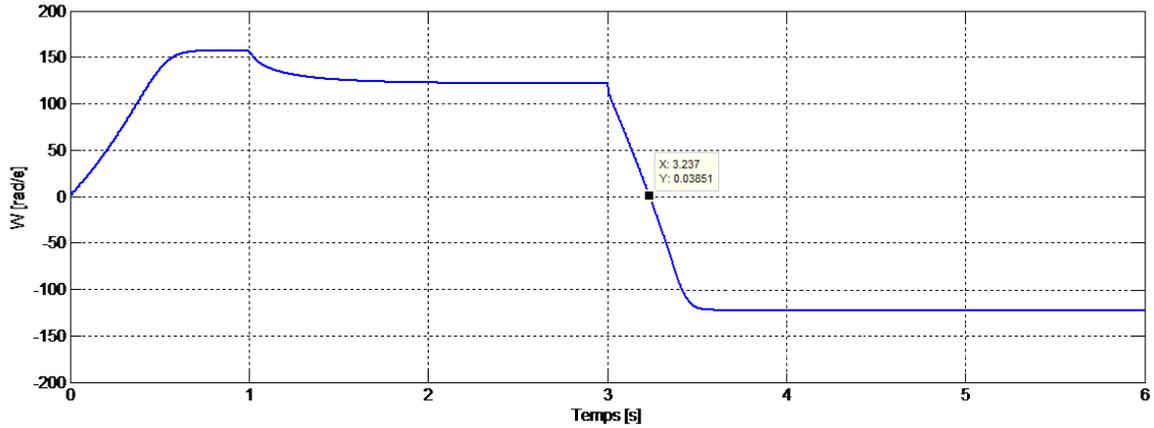
Le couple est négatif juste après l'application du freinage et, après un temps de retard, redevient positif (dans le même sens de rotation que la machine) avec la même valeur (égale au couple résistant) qu'avant l'application du freinage.

Le courant est toujours maximal moment de l'application du freinage.

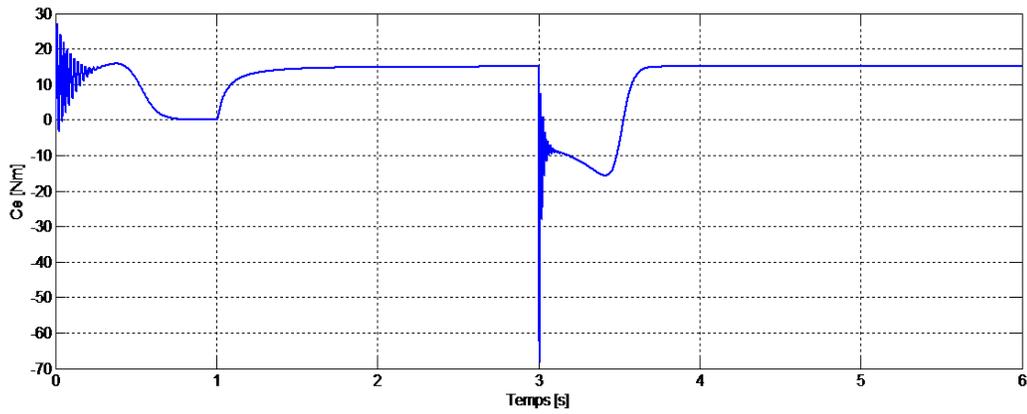
IV.3.3. Etude de l'influence du moment d'inertie sur la dynamique du freinage

Nous menons une étude paramétrée en vue de voir quantitativement l'influence de la valeur du moment d'inertie J sur le temps de freinage de la machine. Les résultats sont présentés successivement pour différentes valeurs du moment d'inertie.

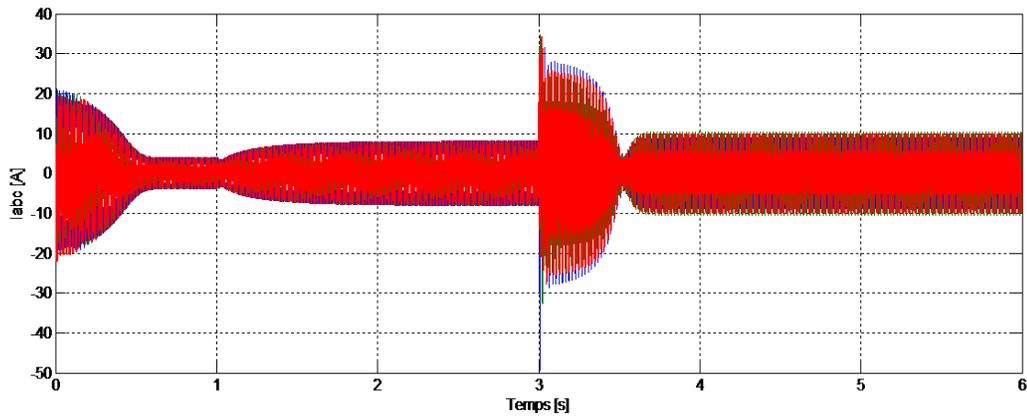
- $J=50 \cdot 10^{-3}(\text{kg.})$ $Cr=15(\text{Nm})$



a. Comportement de la vitesse



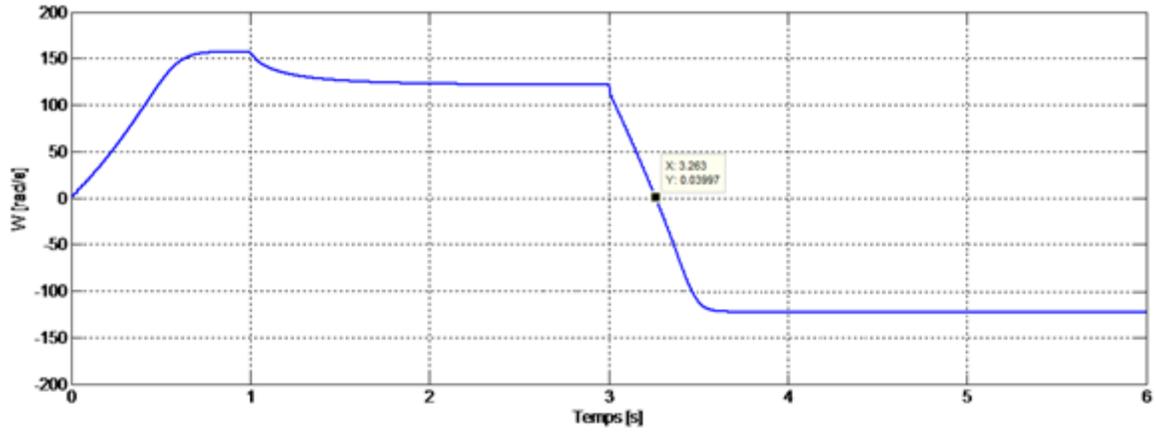
b. Comportement de couple



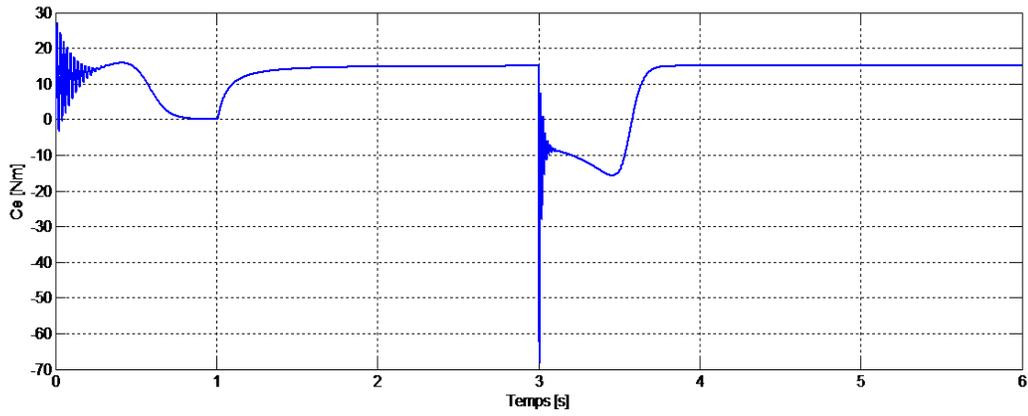
c. Comportement de courant

Figure.IV.6 : Résultats de la simulation du freinage à contre courant à ($J=50 \cdot 10^{-3}(\text{kg.})$)

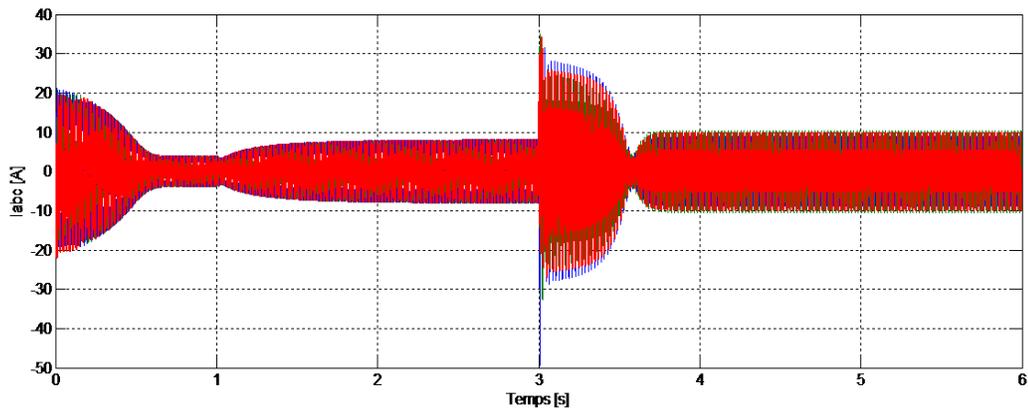
- $J=55 \cdot 10^{-3}(\text{kg.})$ $Cr=15(\text{Nm})$



a. Comportement de la vitesse



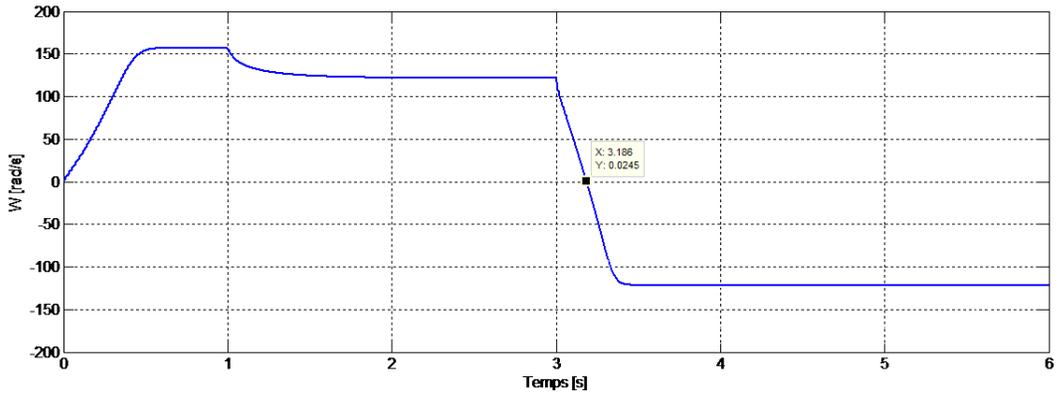
b. Comportement de couple



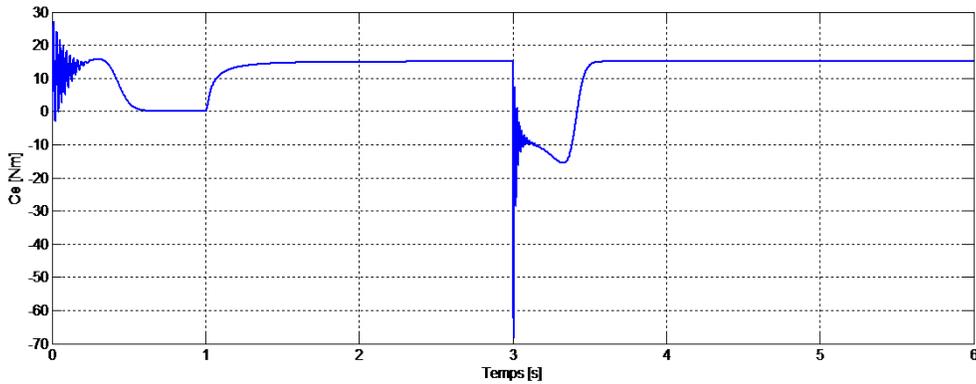
c. Comportement de courant

Figure.IV.7 : Résultats de la simulation du freinage à contre courant à ($J=55 \cdot 10^{-3}(\text{kg.})$)

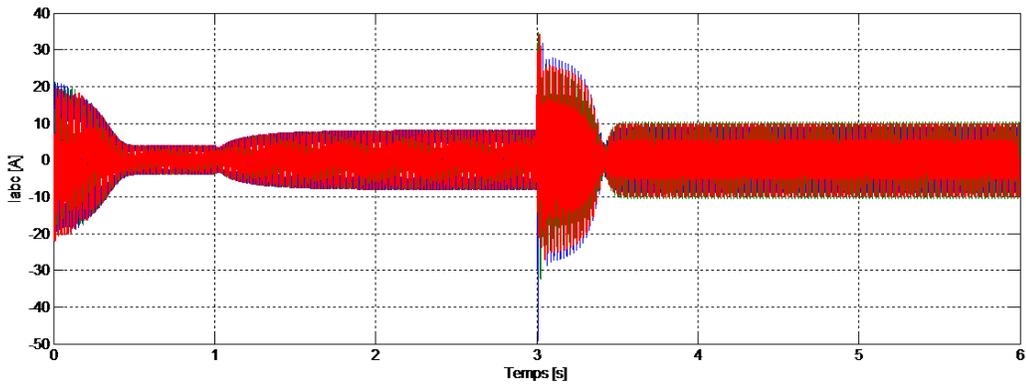
- $J=40 \cdot 10^{-3}(\text{kg.})$ $Cr=15(\text{Nm})$



a. Comportement de vitesse



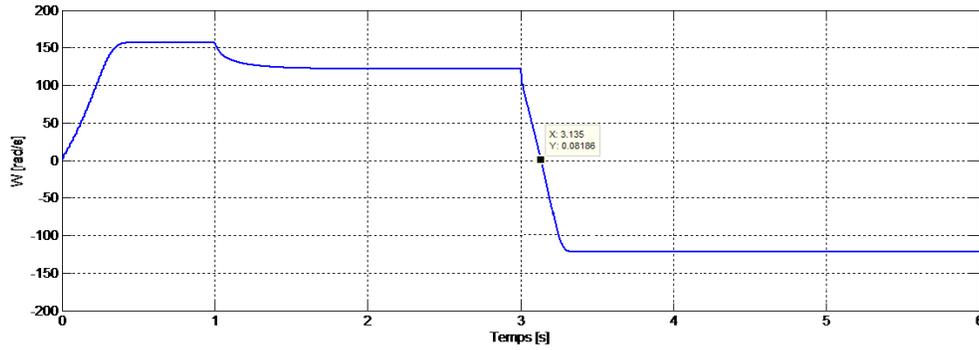
b. Comportement de couple



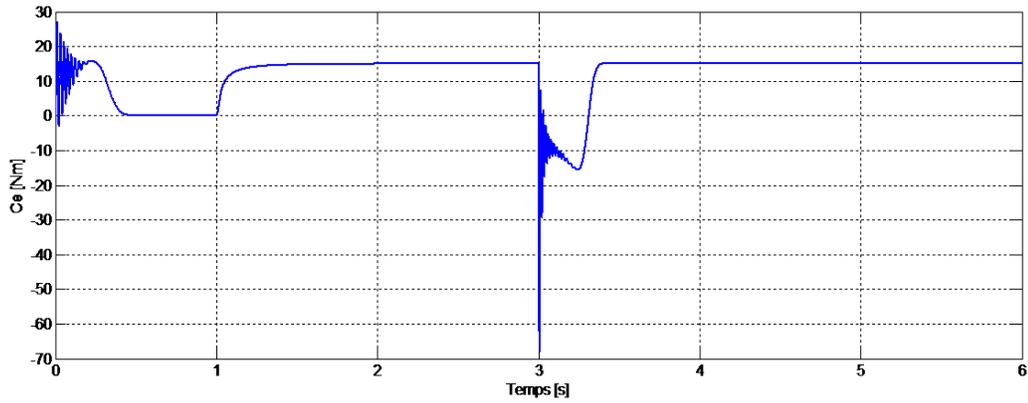
c. Comportement de courant

Figure.IV.8 : Résultats de la simulation du freinage à contre courant à ($J=40 \cdot 10^{-3}(\text{kg.})$)

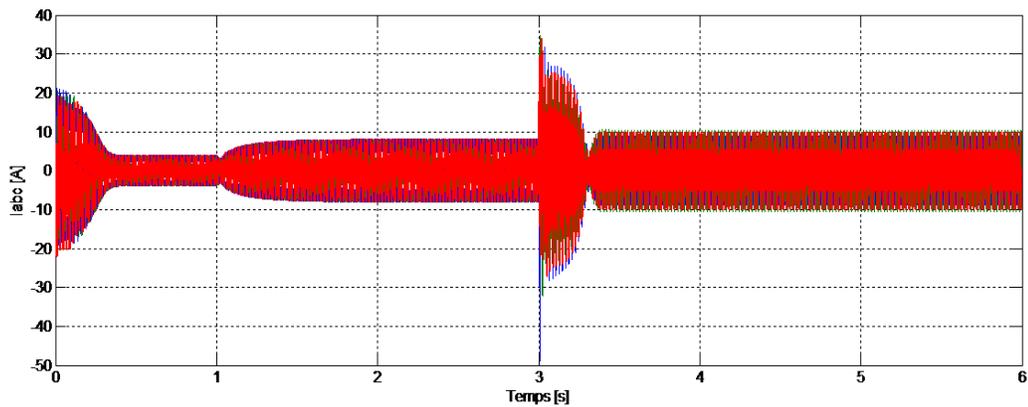
- $J=30 \cdot 10^{-3}(\text{kg.})$ $C_r=15(\text{Nm})$



a. Comportement de vitesse



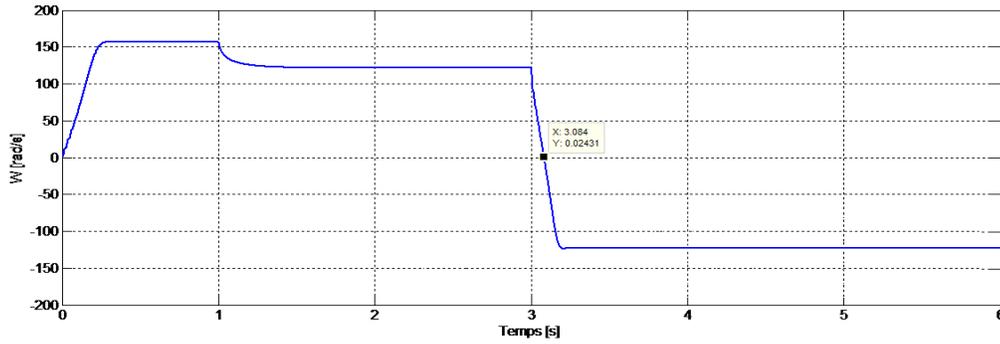
b. Comportement de couple



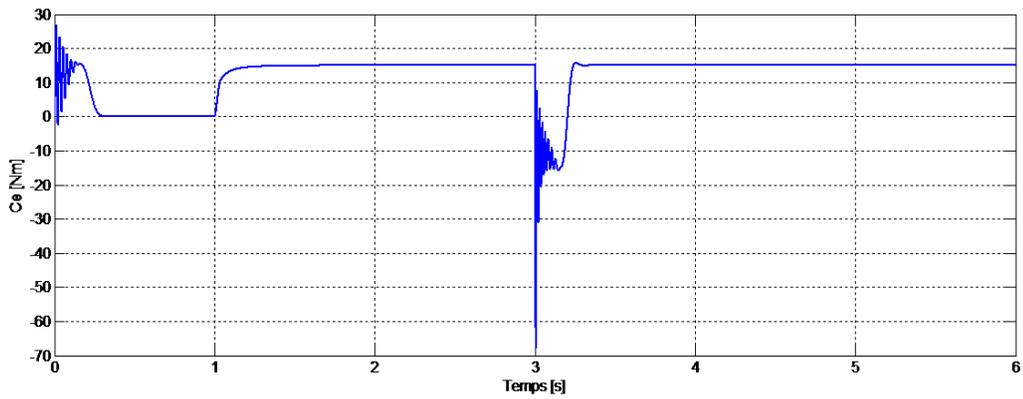
c. Comportement de courant

Figure.IV.9 : Résultats de la simulation du freinage à conter courant à ($J=30 \cdot 10^{-3}(\text{kg.})$)

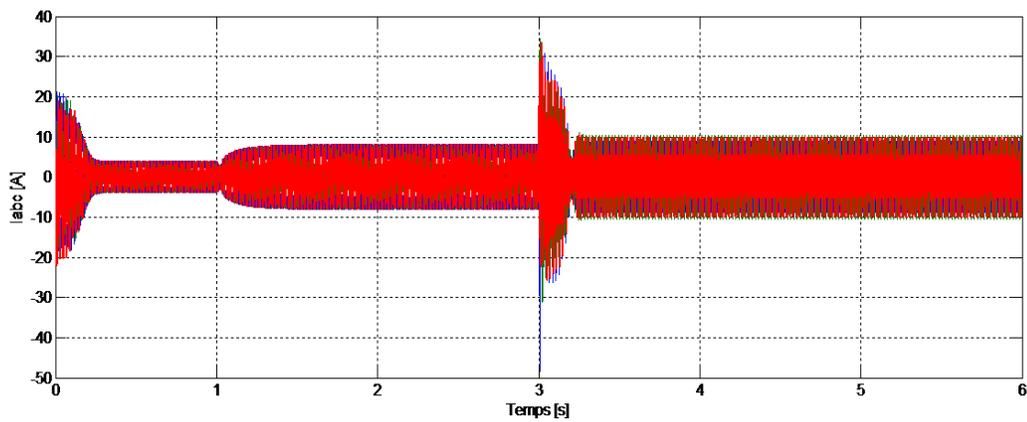
- $J=20 \cdot 10^{-3}(\text{kg.})$ $Cr=15(\text{Nm})$



a. Comportement de vitesse



b. Comportement de couple



c. Comportement de courant

Figure.IV.10 : Résultats de la simulation du freinage à contre courant à ($J=20 \cdot 10^{-3}(\text{kg.})$)

Nous remarquons, de manière générale, l'influence « retardante » de l'inertie du moteur sur la dynamique du freinage. Les courants augmentent avec la valeur du moment d'inertie, les vitesses baissent alors que les temps de freinage (temps entre le moment de l'application du freinage et l'annulation de la vitesse) s'allongent.

La figure IV.11 résume cette étude. On y voit que le temps de freinage augmente linéairement avec la valeur du moment d'inertie de la machine. On perçoit donc l'intérêt de l'utilisation de matériaux électrotechniques de qualité afin de réduire à la fois les volumes et les masses des parties tournantes de la machine afin de réduire les temps de freinage.

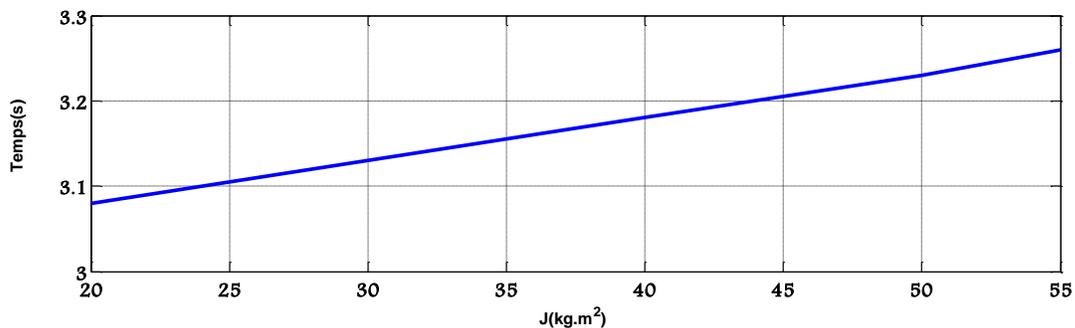


Figure.IV.11 : Temps de freinage vs moment d'inertie

IV.4. Freinage par injection de courant d'un moteur asynchrone

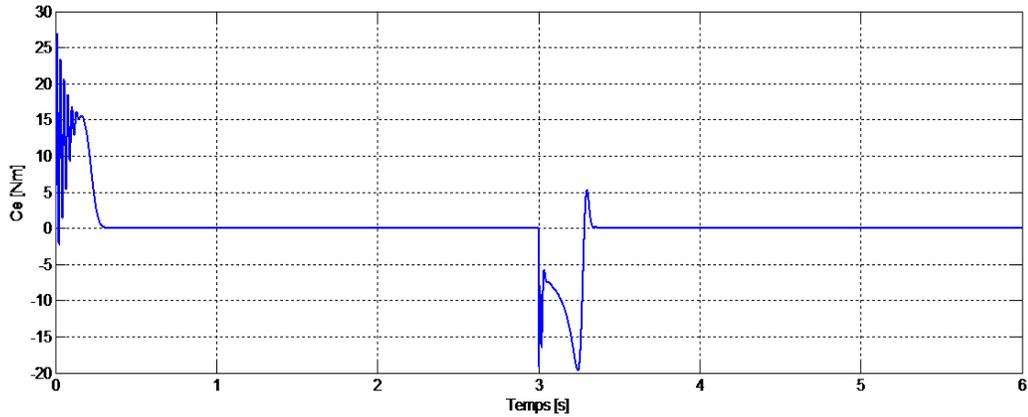
IV.4.1. Modelé Simulink de freinage par injection de courant d'un moteur asynchrone

L'opération consiste, comme il a été expliqué dans le chapitre II du mémoire, à couper l'alimentation des trois phases du stator et à injecter un courant continu dans l'une d'elles.

Les paramètres du moteur sont les suivants :

J (kg.)	p	M (H)	L _s (H)	L _r (H)	R _s (Ω)	R _r (Ω)
50.10 ⁻³	2	0.258	0.280	0.274	4.85	3.805

Tableau IV.II : Les paramètres de la MSA

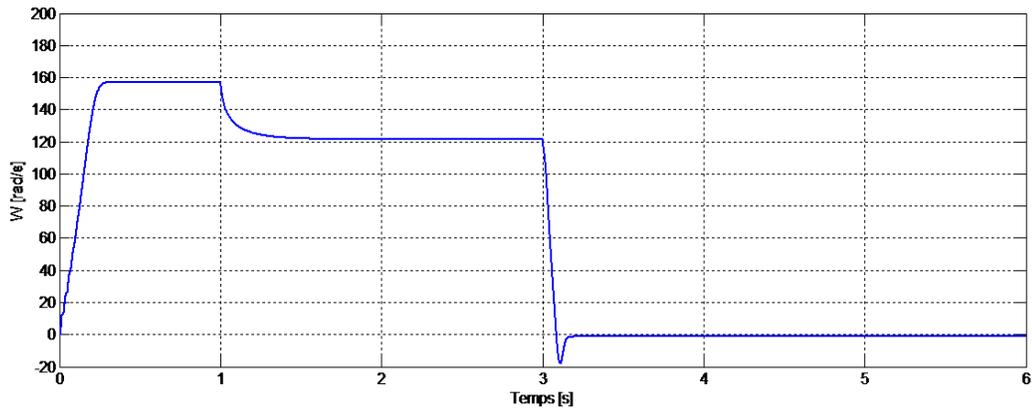


b. Comportement du couple

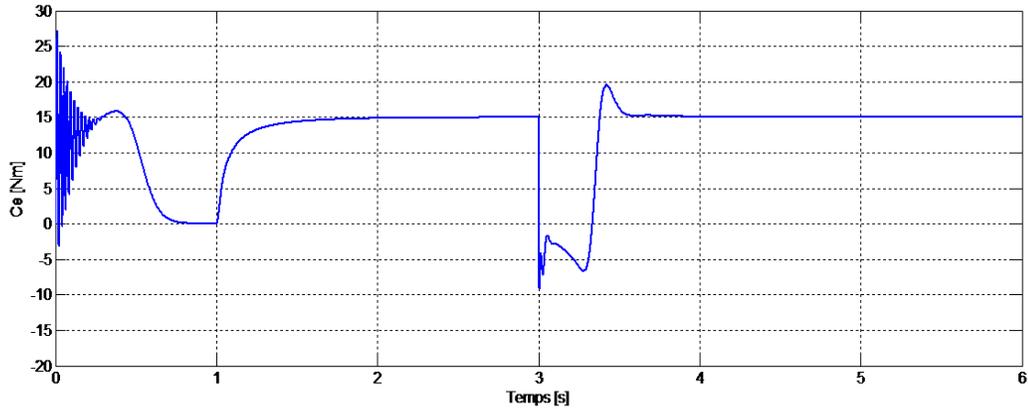
Figure.IV.13 : Résultats de la simulation du freinage par injection de courant continu à vide

On voit que lorsque le moteur a atteint sa vitesse normale (160rd/s) et au moment du courant d'injection, il se produit des turbulences de vitesse et de couple de sorte que la vitesse diminue progressivement jusqu'à atteindre zéro où elle se stabilise. Nous voyon l'intérêt de ce type de freinage : il n'y a pas de redémarrage de la machine dans le sens inverse.

Freinage par injection de courant en charge. $C_r=15$ Nm



a. Comportement de la vitesse



b. Comportement du couple

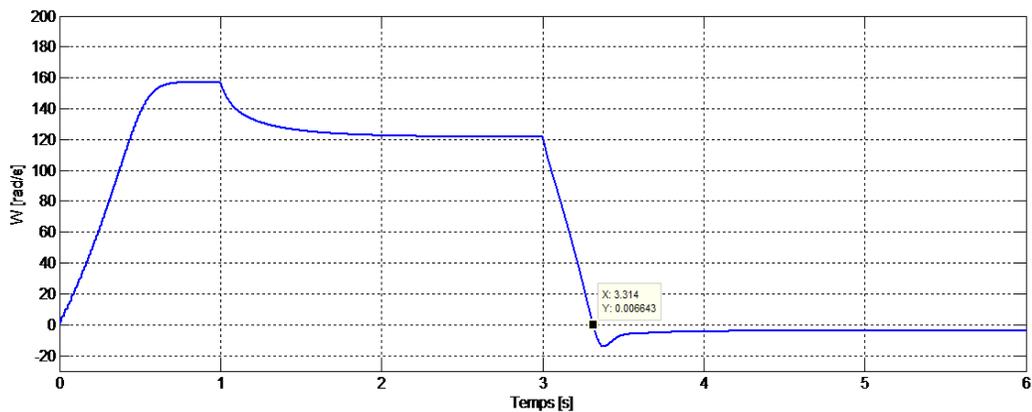
Figure.IV.14 : Résultats de la simulation du freinage par injection de courant continu en charge

Dans le freinage en charge on voit que lorsque le moteur est en position de chargement et au moment du courant d'injection, il y a, comme pour le cas à vide, des perturbations dans la vitesse et le couple. La vitesse diminue progressivement jusqu'à atteindre zéro et se stabilise.

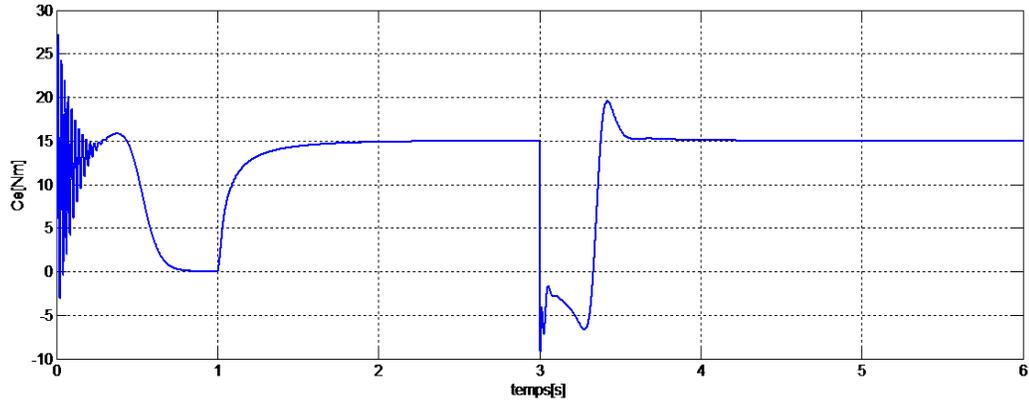
IV.4.3. Etude paramétrique en fonction de l'intensité du courant d'injection

Par cette étude, on essaie de faire apparaître l'influence de la valeur du courant d'injection sur la qualité du freinage, c'est à dire sur le temps de freinage. On étudie plusieurs cas pour différentes valeurs du courant d'injection.

- 1) $J=50 \cdot 10^{-3}(\text{kg.})$ $I=50 \text{ A}$ $C_r=15 \text{ Nm}$



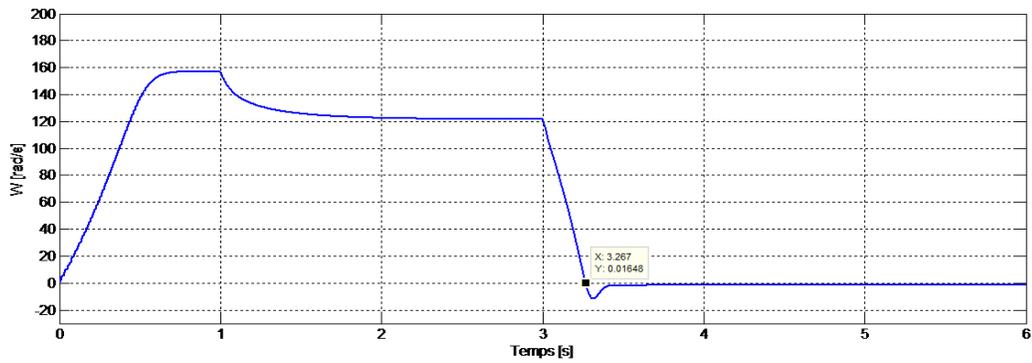
a. Comportement de la vitesse



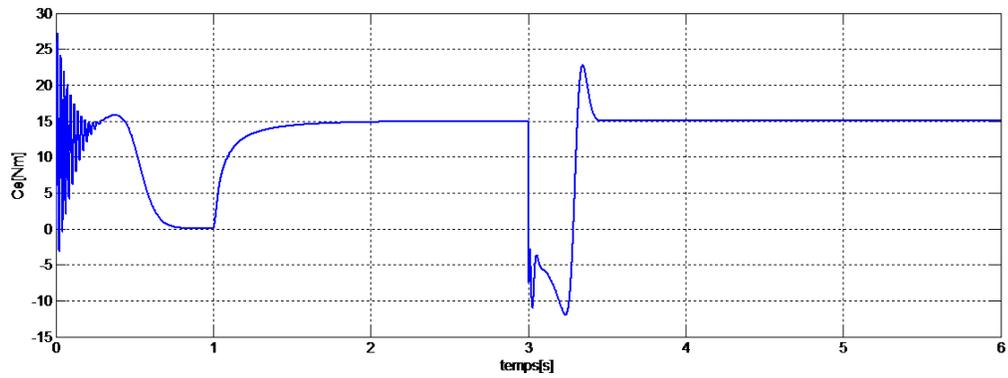
b. Comportement de couple

Figure.IV.15 : Résultats de la simulation du freinage par injection de courant à (I=50A)

2) $J=50 \cdot 10^{-3}(\text{kg.})$ $I=70 \text{ A}$ $Ce=15 \text{ Nm}$



a. Comportement de vitesse



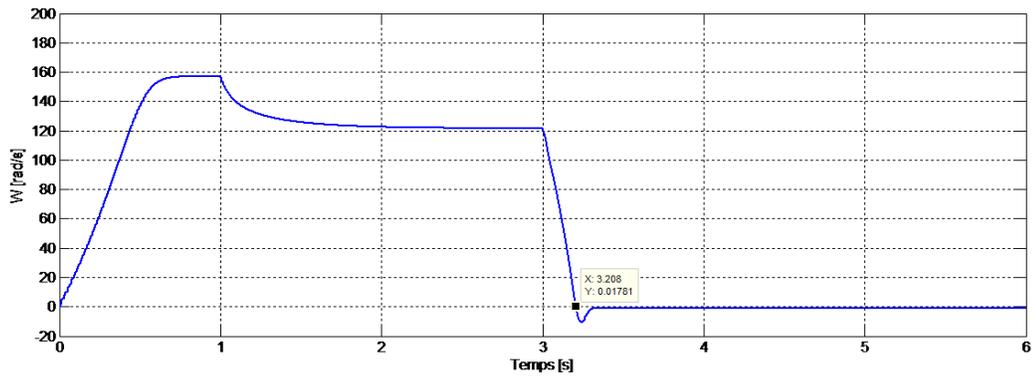
b. Comportement de couple

Figure.IV.16 : Résultats de la simulation du freinage par injection de courant à (I=70A)

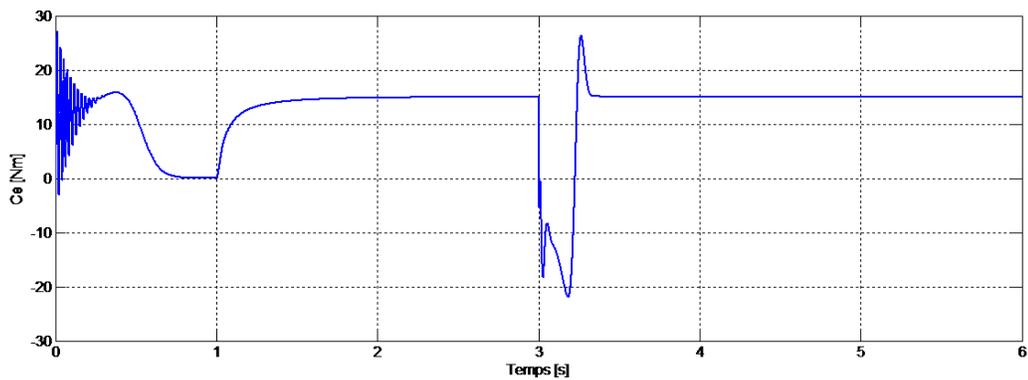
3) $J=50 \cdot 10^{-3}(\text{kg.})$

$I=100 \text{ A}$

$C_r=15 \text{ Nm}$



a. Comportement de vitesse



b. Comportement de couple

Figure.IV.17 : Résultats de la simulation du freinage par injection de courant à ($I=100\text{A}$)

Le résumé des quatre simulations précédentes peut se décliner sous la forme de la courbe qui donne le temps de freinage en fonction de la valeur du courant d'injection.

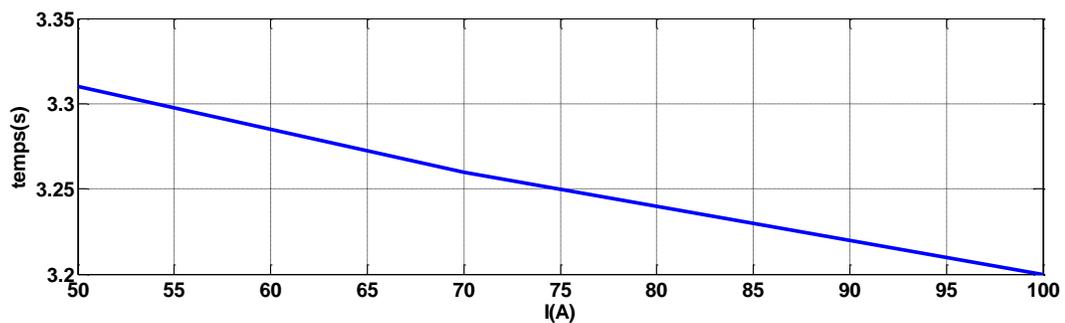


Figure.IV.18 : Temps de freinage vs intensité du courant d'injection

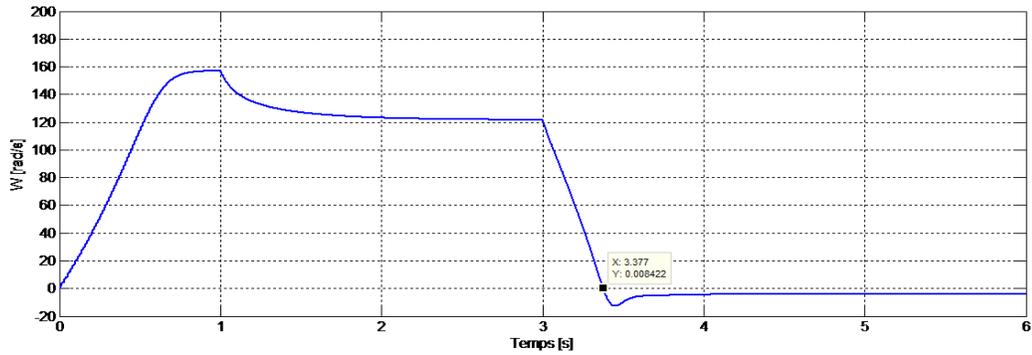
IV.4.4. Etude de l'influence du moment d'inertie sur la qualité du freinage

Pour différentes valeurs du moment d'inertie de la machine, nous étudions le temps mis par le moteur, après l'application du courant d'injection, pour s'arrêter complètement.

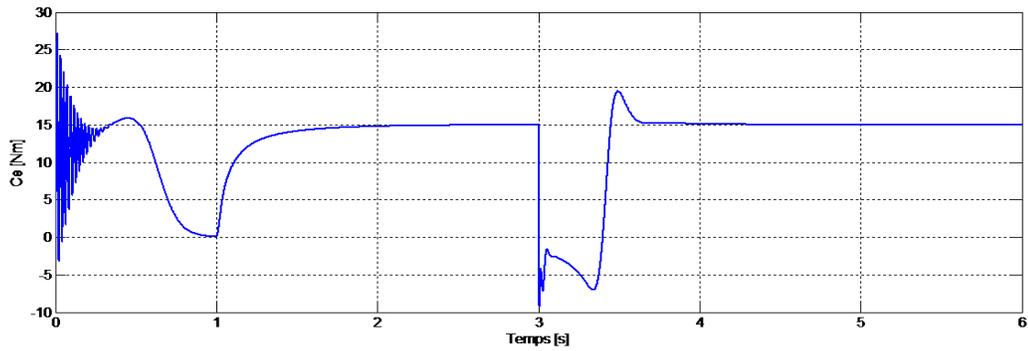
1er cas: $J=60 \cdot 10^{-3}(\text{kg.})$

$I=50 \text{ A}$

$C_r=15 \text{ Nm}$



a. Comportement de vitesse



b. Comportement de couple

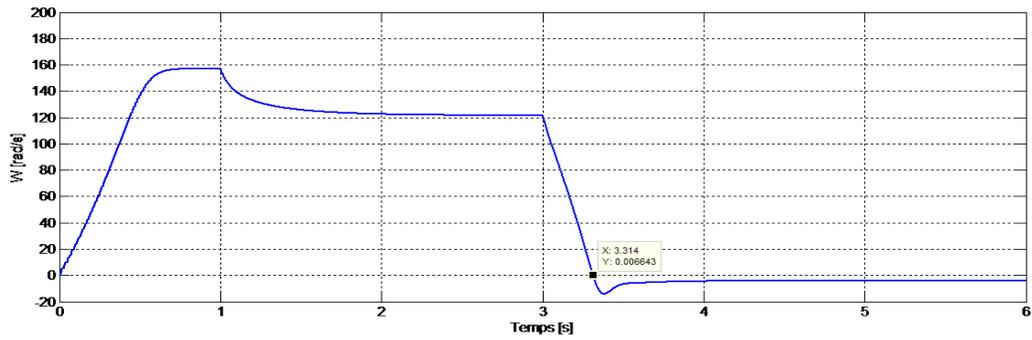
Figure.IV.19 : Résultats de la simulation du freinage par injection de courant à

$(J=60 \cdot 10^{-3}(\text{kg.}))$

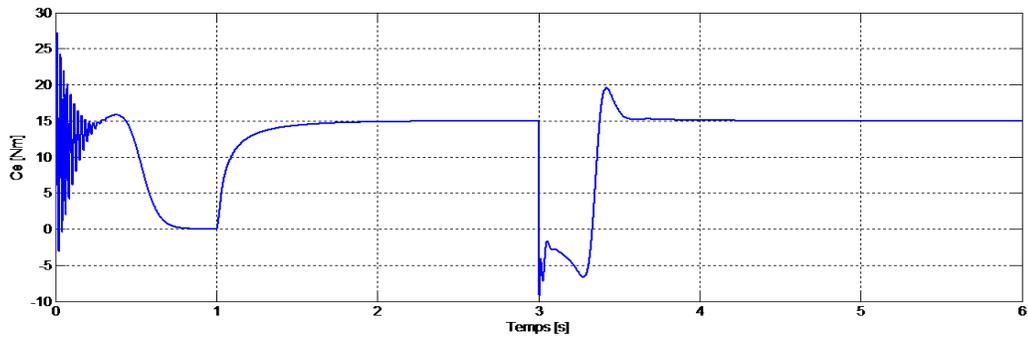
2ème cas : $J=50 \cdot 10^{-3}(\text{kg.})$

$I=50 \text{ A}$

$Cr=15 \text{ Nm}$



a. Comportement de vitesse



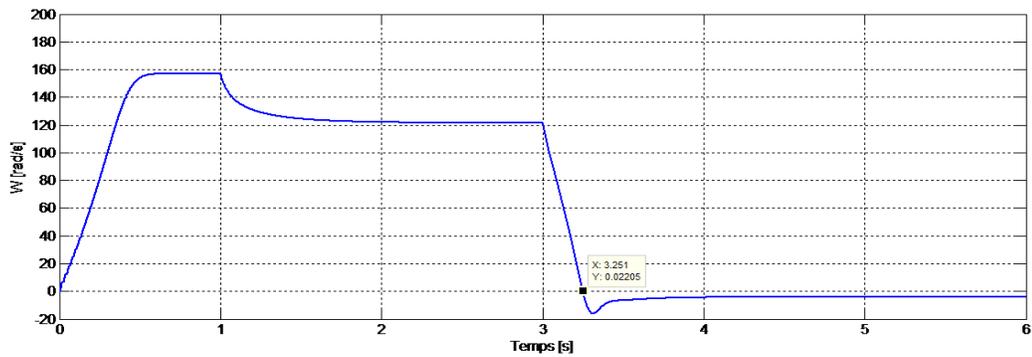
b. Comportement de couple

Figure.IV.20 : Résultats de la simulation du freinage par injection de courant à ($J=50 \cdot 10^{-3}(\text{kg.})$)

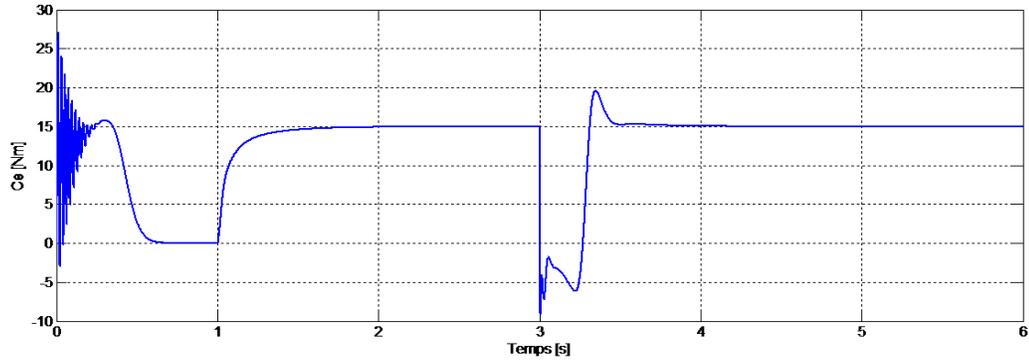
3ème cas) $J=40 \cdot 10^{-3}(\text{kg.})$

$I=50 \text{ A}$

$Cr=15 \text{ Nm}$



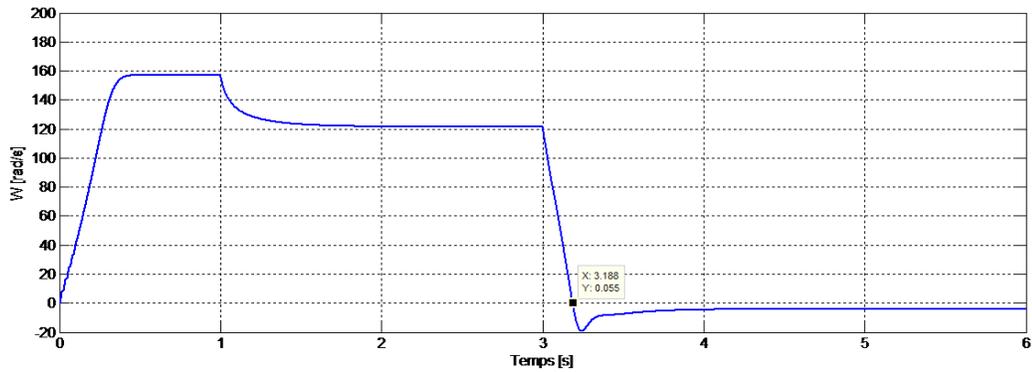
a. Comportement de vitesse



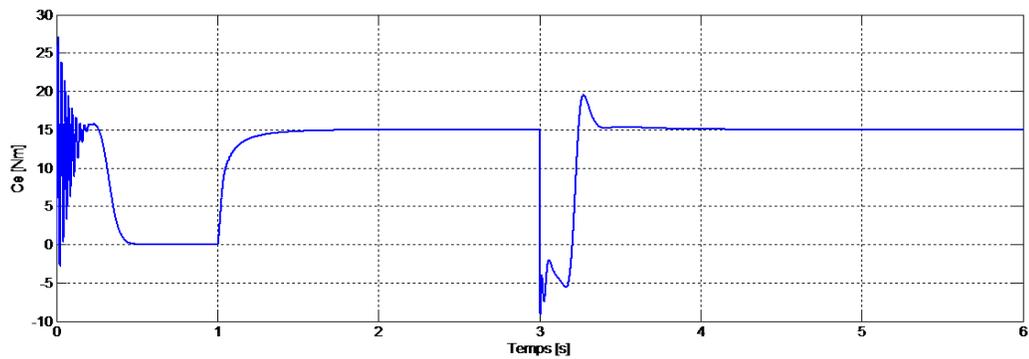
b. Comportement de couple

Figure.IV.21 : Résultats de la simulation du freinage par injection de courant à ($J=40 \cdot 10^{-3}$ (kg.))

4ème cas) $J=30 \cdot 10^{-3}$ (kg.) $I=50$ A $C_r=15$ Nm



a. Comportement de vitesse



b. Comportement de couple

Figure.IV.22 : Résultats de la simulation du freinage par injection de courant à ($J=30 \cdot 10^{-3}$ (kg.))

L'ensemble des résultats obtenus par les simulations précédentes peuvent se résumer dans la figure suivante qui donne les évolutions du temps de freinage en fonction de la valeur du moment d'inertie.

On peut y voir l'influence "retardante" du moment d'inertie de la machine sur la qualité et le temps de freinage ; d'où l'intérêt de l'utilisation de matériaux performants qui permettent de réduire les masses et les volumes et la valeur du moment d'inertie.

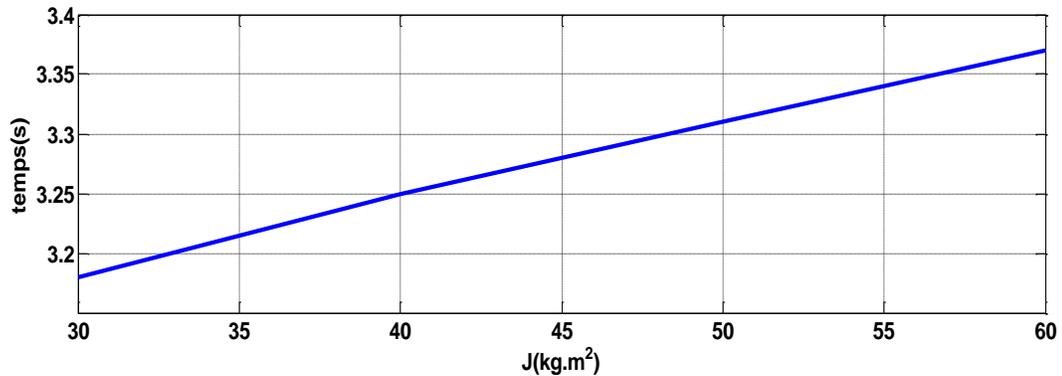


Figure.IV.23 : Temps de freinage vs moment d'inertie pour $I = 50\text{A}$

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Le démarrage et le freinage (en vue d'un arrêt programmé) des moteurs asynchrones sont deux phases essentielles de leur fonctionnement. Entre ces deux phases se situe le régime de fonctionnement nominal où, là aussi, des méthodes de commande de la vitesse, de plus en plus sophistiquées, sont mises en œuvre.

Dans ce travail de master, nous avons tenté d'étudier, de manière qualitative et quantitative, la phase de freinage des machines asynchrones et, à un degré moindre, celle du démarrage en raison des similitudes symétriques que ces deux phases présentent entre elles.

La phase de démarrage revêt de l'importance par rapport aux courants mis en jeu ainsi qu'au couple nécessaire pour effectuer un démarrage dans les conditions les plus optimales selon la nature du dispositif entraîné (démarrage en charge, à vide etc.).

La phase de freinage peut être plus cruciale encore selon le dispositif concerné. Dans les machines-outils de précision l'instant d'arrêt détermine de manière absolue la qualité de l'ouvrage.

Pour atteindre l'objectif souhaité nous avons développé des modèles analytiques de la machine asynchrone basés sur la transformée de Park. Les équations électromagnétiques obtenues sont couplées avec l'équation du principe fondamental de la dynamique, le terme de couplage étant l'expression analytique du couple dans le référentiel de Park. Après résolution, nous obtenons toutes les grandeurs de fonctionnement de la machine aussi bien électriques que mécaniques. S'agissant de l'étude du démarrage et du freinage, nous nous sommes intéressés aux trois grandeurs vitesse, couple et courant qui illustrent le comportement dynamique de la machine durant ces deux phases de fonctionnement.

L'outil MATLAB/SIMULINK a été d'un grand secours pour l'achèvement de cette étude puisqu'il a été utilisé pour la prise en charge de tous les calculs ainsi que l'affichage des différents résultats par post-processeur.

En raison de l'environnement sanitaire particulier que nous vivons actuellement (pandémie mondiale de COVID19) les modèles développés ont été appliqués à trois types de situation :

1. Moteur asynchrone dans la phase de démarrage

CONCLUSION GENERALE

2. Moteur asynchrone dans la phase de freinage par inversion du flux (à contre-courant)

3. Moteur asynchrone dans la phase de freinage par injection de courant continu dans le stator.

La caractéristique du couple électromagnétique en fonction du temps durant la phase de démarrage montre bien un aspect oscillatoire et de grande amplitude durant les premiers instant de démarrage. Une fois la vitesse nominale atteinte (à vide ou bien pour une charge donnée) le couple se stabilise à une valeur constante sans aucun aspect oscillatoire. Il est clair que cela répond à la caractéristique mécanique classique obtenue par les méthodes classiques telles le schéma équivalent ou bien le diagramme circulaire. Cela valide, à un certain degré, la justesse du modèle développé sous l'environnement MATLAB/SIMULINK.

Pour le freinage à contre-courant, on assiste, à l'instant initial, à une élévation très importante, à la fois du couple et du courant. Cela dénote d'un freinage très énergétique mais qu'on devra limiter par des résistances additionnelles au stator, en vue de protéger la machine contre les échauffements excessifs. Par ailleurs, si un système de blocage du moteur n'est pas prévu au moment où la vitesse s'annule, la machine va redémarrer dans le sens inverse. On voit que la méthode de freinage à contre-courant, si elle donne un freinage très énergétique, doit être accompagnée de beaucoup de précautions et de dispositifs annexes.

Le freinage par injection de courant continu dans le stator offre un certain nombre d'avantages non négligeables:

- Il n'y a pas de risque d'élévation du courant du stator pendant la phase de freinage
- Le moteur s'arrête au moment où la vitesse de rotation s'annule sans risque de redémarrer dans le sens inverse.

Par contre le système nécessite la production d'un courant continu (en général par redressement) et le freinage est d'autant plus énergétique que l'intensité du courant continu injecté est plus grande.

Nous voyons que chaque méthode présente ses avantages et ses inconvénients, comme toute autre chose dans la vie.

Les résultats obtenus montrent que les modèles développés sont tout à fait corrects et rendent compte du comportement dynamique du moteurs asynchrone durant la phase de freinage et de démarrage, pour différentes méthodes.

CONCLUSION GENERALE

Les conditions particulières dans lesquelles ce travail a été accompli, (crise sanitaire de la COVID19) ne nous ont pas permis d'accomplir une validation expérimentale, après identification, de machines existant au niveau du laboratoire d'électrotechnique de la faculté. La confrontation aux résultats d'autres travaux dans le domaine, nous confortent dans la qualité et validité de nos résultats.

Les modèles développés dans ce travail sont basés sur la transformée de Park et donc calculent des grandeurs électriques globales (courants, tensions ...). Comme prolongation et suite à ce travail, nous pensons qu'il serait intéressant de modéliser ces phases de freinage et aussi de démarrage de la machine asynchrone en calculant de grandeurs locales du champ. Cela nécessite l'utilisation de méthodes numériques telles que la méthode des éléments finis.

Bibliographie

- [1] C. CHEVASSU, G. VALENTIN, << MACHINES ASYNCHRONES Cours et Problèmes >>, Université Clermont Auvergne France 2020
- [2] W. BOUDJTAT, A. HIMOURA, << etude et simulation d'une machine asynchrone alimente par un onduleur de tension a commandé mli >> Université badji mokhtar-Annaba 2017
- [3] E. Gaucheron, << Les moteurs électriques >>, Cahier technique, Schneider Electric 2004
- [4] M KOSTINKO, L PIOTROVSKI « Machine électriques », Berti édition, 1993.
- [5] H. IFREK, T. HAOUCHINE, << Etudes thermiques du moteur asynchrone à cage d'écureuil >>, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2011.
- [6] M. ALLOUACHE, N. ANNOUN, << Étude et analyse de fonctionnement de TGBT cogénération ce vital >>, Université Abderrahmane mira de Bejaia 2017
- [7] Philippe LE BRUN, <<Variation de vitesse des machines asynchrones>> Lycée Louis ARMAND Bd de Strasbourg _NOGENT sur Marne
- [8] Athmane BIR <<Démarrages et Protection des Moteurs Asynchrones Triphasés >> UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU.2016
- [9] Horch Sofiane, LAOUEDJ Yamina, <<Etude sur les différents types de démarrage des machines asynchrone triphasé>>Universitaire Belhadj Bouchaib d'Ain-Temouchent 2015/2016
- [10] Livre ' guide des solutions d'automatisme 2008', p73, Siège social 35, rue Joseph Monier F-92500 Rueil-Malmaison France
- [11] K AKMOUSSI, N BELABBAS, << Essais de contrôle des moteurs asynchrones triphasés de puissance 3 kW, 1410 tr/mn fabriqués par Electro-Industries >> Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2013
- [12] N. Sghaier, M. Mbarek, << chapitre 4 Les procédés de Freinage >>, <https://studylibfr.com>
- [13] Cycle 5: Etude et modélisation des chaines de conversion électromécanique , <<Chapitre 3, Machines asynchrones (moteur et génératrice) Freinage des moteurs >>.
- [14] L. Hami, R. Rouibi, << Etude, caractérisation et commande d'une MAS >>, Université Badji Mokhtar Annaba 2018
-

Bibliographie

[15] F. NASRI, M. AYCHE, << ETUDE DES PROCEDES DES FREINAGES DES MOTEURS ASYNCHRONES TRIPHASES PAR LES AUTOMATES PROGRAMMABLES INDUSTRIELS (A.P.I.) >> Université Mohamed Boudiaf - M'sila 2006

[16] M. HADEF, << tp.la commande vectorielle d'un moteur asynchrone >> Université Mohamed Seddik Ben Yahia de Jijel 2019
