

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement

Supérieur et de la Recherche

Scientifique

Université A. MIRA – BEJAIA

Faculté de Technologie

Département de Génie électrique

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

En vue de l'obtention du diplôme de Master en électrotechnique

Option

Machines électriques

Thème



ETUDE D'UN MOTEUR ASYNCHRONE A CAGE AVEC DIFFERENTS DEFAUTS

Présenté par :

KINZI RAMTANE

IZEM DJAHID

Encadré par :

Y. IMAOUCHENE

D. AOUZELLAG

Année universitaire 2019-2020

Remerciement

Avant tout nous remercions DIEU le tout puissant de nous avoir donné le courage, la volonté, la patience et la santé durant toutes ces années.

Nous tenons à remercier sincèrement et particulièrement Mr Y.IMAOUCHEN en tant que promoteur, qui a été toujours à notre écoute et notre disposition tout au long de la réalisation de ce projet de fin d'étude(2ème Année Master LMD),ainsi que pour ses conseils et sa bonne humeur et sans qui ce mémoire n'aurait jamais vu le jour.

Nous tenons à remercier Mr D.AOUZELLAG (notre Co-promoteur) qui a mise à notre disposition tous les moyens nécessaires pour un bon déroulement de notre travail.

Nous remercions également tous les membres du jury pour avoir bien voulu évaluer et examiner notre travail.

Enfin, tous nos respects sont adressés à nos chers parents qui nous ont encouragés et soutenu beaucoup durant nos études.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail.

À ma mère avec toute mon affection.

À mon père avec toute ma reconnaissance.

À mes frères et mes sœurs.

À ma fiancée.

À tous mes amis.

À la mémoire défunt monsieur : Mammeri Salem.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail.

À ma mère avec toute mon affection.

À mon père avec toute ma reconnaissance.

À mes frères et mes sœurs.

À ma fiancée.

À tous mes amis.

SOMMAIRE

Sommaire

- Liste des figures
- Liste des symboles et d'abréviations

Introduction générale.....	1
Chapitre I : Etude d'un moteur asynchrone à cage avec des différents défauts	
I.1 Introduction	2
I.2 Constitution de la machine asynchrone à cage	2
I.2.1 Stator	2
I.2.2 Rotor à cage d'écureuil	3
I.2.3 Paliers.....	4
I.3 Principe de fonctionnement de la machine asynchrone à cage d'écureuil	4
I.4 Etude Statistique	4
I.5 Différentes défaillances d'une machine asynchrone	5
I.5.1 Défauts électriques dans la machine asynchrone à cage.....	5
I.5.1.1 Défauts statoriques	5
I.5.1.2 Défauts rotoriques.....	6
I.5.2 Défauts mécaniques dans les machines asynchrones.....	7
I.5.2.1 Excentricités statique et dynamique	7
I.5.2.2 Défaut de roulement	8
I.5.2.3 Défauts de flasque	8
I.5.2.4 Défauts de l'arbre	8
I.6 Causes des défauts	9
I.7 Méthodes de diagnostic des défauts basées sur l'analyse spectrale des signaux	9
I.7.1 Diagnostic par mesure des vibrations mécaniques	9
I.7.2 Diagnostic par mesure du flux magnétique axial de fuite.....	9
I.7.3 Diagnostic par l'analyse des tensions statoriques induites.....	10
I.7.4 Diagnostic par mesure du couple électromagnétique	10
I.7.5 Diagnostic par mesure de la puissance instantanée	10
I.7.6 Diagnostic par mesure des courants statoriques	10
I.8 Conclusion	11
Chapitre II : Modélisation de la machine asynchrone à cage d'écureuil	
II.1 Introduction	12
II.2 Description de la machine asynchrone à cage d'écureuil.....	12
II.3 Hypothèses simplificatrices d'étude.....	13

Sommaire

II.4 Modèle de la MAS triphasée dans le repère naturel (abc).....	13
II.4.1 Equations électriques.....	13
II.4.2 Equations magnétiques.....	14
II.4.3 Equation du couple électromagnétique.....	16
II. 4.4 Equation mécanique.....	16
II.5 Modélisation et simulation et interprétations des résultats de la MAS dans le model naturel.....	17
II.5.1 Simulation et interprétations des résultats de la MAS dans le model naturel	17
II.5.2 Calcul des spectres des courant statoriques du MAS dans le model (abc).....	19
II.6 Modèle de la MAS selon le système d'axes (d,q,0)	20
II.6.1 Transformation de Park	20
II.6.2 Modèle de la MAS lié au système d'axes (d,q,0).....	21
II.6.2 .1 Equations de la tension.....	22
II.6.2.2 Equations des flux	22
II.6.2.3 Equation du couple électromagnétique.....	23
II.6.2.4 Equation mécanique.....	23
II.6.3 Simulation et interprétations des résultats de la MAS dans le système d'axe (d,q,0) ..	24
II.7 Conclusion	26
Chapitre III : Modèle de la MAS en présence d'un défaut statorique dans le repère (abc)	
III.1 Introduction.....	29
III.2 Modélisation et simulation du MAS en tenant compte d'un court-circuit entre spires dans une phase statorique	29
III.2.1 Mise en équation	30
III.2.2 Modèle du MAS avec défaut dans le repère naturel (abc)	30
III.2.3 Equations magnétiques.....	31
III.2.4 Equation du couple électromagnétique	33
III.2.5 Equation mécanique	33

Sommaire

III.2.6 Simulation et interprétations des résultats du MAS en présence d'un court-circuit entre spire dans la phase statorique (as).....	33
III.2.6.1 Résultats de simulation d'un court-circuit de 10% entre spire dans la phase statorique (a)	34
III.2.6.2 Résultats de simulation d'un court-circuit de 25 % entre spire dans la phase statorique (a).....	36
III.2.6.3 Résultats de simulation d'un court-circuit de 50 % entre spire dans la phase statorique (a)	39
III.2.6.4 Analyse spectrale des courants statoriques de la MAS dans le model (abc) en présence d'un défaut de court-circuit dans la phase (as).....	42
III.3 Influence de la connexion du neutre à la terre dans le cas d'un court-circuit total d'une phase.....	44
III.3.1. Simulation sur logiciel PSim.....	44
III.3.2 Interprétation des résultats.....	45
III.3.3 Analyse spectrale des courants statoriques	47
III.4 Résultats de simulation de l'influence de la connexion de neutre dans le cas d'un circuit ouvert d'une phase	48
III.4.1 Simulation sur le logiciel PSim.....	48
III.4.2 Interprétations des résultats	48
III.4.3 Analyse spectrale des courants statoriques	50
III.5 Conclusion.....	50
Conclusion générale.....	52
➤ Références bibliographiques	
➤ ANNEXE	

LISTE DES FIGURE

LISTE DES FIGURES

Figure I. 1 Vue éclatée de la machine asynchrone triphasée à cage	2
Figure I. 2 Photo d'un circuit magnétique statorique et d'un stator du MAS[4]	3
Figure I. 3 Rotor à cage d'écureuil [5]	3
Figure I. 4 Proportions des défauts dans les MAS de moyenne puissance	4
Figure I. 5 Répartition des pannes sur les MAS de faible et moyenne puissance.....	5
Figure I. 6 Différents court-circuit dans un stator de la machine asynchrone.....	6
Figure I. 7 Différents défauts statoriques	6
Figure I. 8 Défauts du rotor à cage : a) Rupture de barres ; b) Rupture d'anneau de court-circuit	7
Figure I. 9 Représentation des excentricités : Statique(a) ; Dynamique(b) ; Mixte(c)	8
Figure I. 10 Constitution d'un roulement à billes	8
Figure II. 1 Représentation électrique d'un moteur asynchrone triphasée	13
Figure II. 2 Allure du couple électromagnétique	18
Figure II. 3 Allure de la vitesse de rotation.....	19
Figure II. 4 Allure des courants statoriques	20
Figure II. 5 Allure des courants rotoriques	20
Figure II. 6 Spectre du courant de la phase statorique (a).....	21
Figure II. 7 Spectre du courant dans la phase statorique (b)	21
Figure II. 8 Position des axes dq0 par rapport aux axes de la machine	23
Figure II. 9 Allure du couple électromagnétique	26
Figure II. 10 Allure de la vitesse de rotation.....	26
Figure II. 11 Allures des courants statoriques.....	27
Figure II. 12 Allures des courants rotoriques	27
Figure III. 1 Modèle général d'un court-circuit entre spires dans la phase as	29
Figure III. 2 Allure du couple électromagnétique 10%.....	35
Figure III. 3 Allure de la vitesse électrique de rotation 10%	35
Figure III. 4 Allures des courants dans les quatre phases statoriques 10%.....	36
Figure III. 5 Allures des courants rotoriques 10%	36
Figure III. 6 Allure du couple électromagnétique 25%.....	38
Figure III. 7 Allure de la vitesse rotorique électrique 25%.....	38
Figure III. 8 Allure des courants dans les quatre phases statoriques 25%	39
Figure III. 9 Allure des courants rotoriques 25%.....	39
Figure III. 10 Allure du couple électromagnétique 50%.....	41
Figure III. 11 Allure de la vitesse rotorique électrique 50%.....	41
Figure III. 12 Allures des courants dans les quatre phases statoriques 50%.....	42
Figure III. 13 Allures des courants rotoriques 50%	42
Figure III. 14 Spectre du courant de la phase statorique (a) lors d'un court-circuit dans la phase (a) à 50%	43
Figure III. 15 Spectre du courant de la phase statorique (b) lors d'un court-circuit dans la phase (a) à 50%	44
Figure III. 16 Schéma bloc global de simulation du MAS sans ou avec connexion des deux dans le cas d'un défaut de court-circuit total de la phase (as)	44

Figure III. 17 Allures des courants statoriques	45
Figure III. 18 Allure du couple électromagnétique	46
Figure III. 19 Allure de la vitesse de rotation électrique.....	46
Figure III. 20 Spectres des courants des trois phases statoriques (a) en absence de défauts ...	47
Figure III. 21 Spectres des courants des trois phases statoriques en présence d'un défaut de court-circuit total d'une phase avec neutre de l'enroulement statorique lié au neutre de la source.....	47
Figure III. 22 Schéma bloc global de simulation du MAS avec/sans la connexion des deux neutres de l'enroulement statorique et de la source dans le cas d'un défaut de circuit ouvert de la phase a	48
Figure III. 23 Allures des courants dans les trois phases statoriques.....	49
Figure III. 24 Allure du couple électromagnétique	49
Figure III. 25 Figure III.25 : Allure de la vitesse de rotation électrique	50
Figure III. 26 Spectres des courants des trois phases statoriques (a) en présence d'un défaut de court-circuit d'une phase avec neutre de l'enroulement statorique lié au neutre de la source	50

Liste des symboles et d'abréviations

Liste des symboles et d'abréviations

MAS : moteur asynchrone à cage d'écureuil

v_s : Tension statorique

v_r : Tension rotorique

i_s : Courant statorique

i_r : Courant rotorique

i_{rd} : Courant directe rotorique

i_{rq} : Courant en quadrature rotorique

i_{sd} : Courant directe statorique

i_{sq} : Courant en quadrature statorique

ϕ_s : Flux statorique

ϕ_r : Flux rotorique

θ : Angle du stator entre A et d

θ_r : Angle du rotorique entre a et d

P : Nombre de paire de pôle

g : Glissement

C_r : Couple résistant

C_{em} : Couple électromagnétique

r_s : Résistance statorique

r_r : Résistances rotorique

N_{as} : Nombre de spires de la phase a statorique

$[M_{sr}]$: Matrice des inductances mutuelle entre le stator et le rotor

$[M_{rs}]$: Matrice des inductances mutuelle entre le rotor et le stator

L_s : Inductance cyclique statorique

L_r : Inductance cyclique rotorique

l_{ms} : Inductance mutuelle statorique

l_{mr} : Inductance mutuelle rotorique

l_{fs} : Inductance de fuite statorique

l_{fr} : Inductance de fuite rotorique

J : Moment d'inertie.

K_f : Coefficient de frottement visqueux

$[L_{ss}]$; Matrice des inductances statoriques

$[L_{rr}]$; Matrice des inductances rotoriques

μ : Nombre de spire en court-circuit par rapport aux nombre de spires l'enroulement de la phase

Ω : Vitesse de rotation mécanique

INTRODUCTION

GENERALE

Introduction générale

Les moteurs asynchrones à cage d'écureuil sont les plus utilisés dans l'industrie. Ils possèdent en effet plusieurs avantages : simplicité, robustesse, prix peu élevé et entretien facile. Certaines utilisations des moteurs asynchrones ne tolèrent pas les pannes intempestives. Ces pannes peuvent être dues aux moteurs et être d'origine mécanique (excentricité du rotor) ou électrique (court-circuit du bobinage statorique, rupture de barre ou l'anneau, cassure de dents, etc.)[01].

Dans ce contexte, le mémoire comportera trois chapitres principaux :

Le premier chapitre décrira les éléments de construction du moteur asynchrone (MAS) et son principe de fonctionnement. Ensuite, nous présenterons les différents types de défauts qui peuvent apparaître sur un MAS. Enfin, nous terminerons ce chapitre par les différentes méthodes de diagnostic basées sur l'analyse spectrale des signaux.

Le deuxième chapitre sera consacré à la modélisation et à la simulation du MAS dans les deux repères réel (abc) et virtuel (d,q,0), avec une alimentation triphasée purement sinusoïdale, à vide et en charge. Les résultats de simulation sur l'environnement MATLAB/Simulink seront affichés et commentés.

Le troisième chapitre sera consacré à la présentation des modèles du MAS dans le repère (abc) en présence d'un défaut de court-circuit entre spires d'une phase statorique. Ensuite, on étudiera d'autres cas avec logiciel PSIM, le premier cas concernera l'influence du neutre lors d'un court-circuit total d'une phase, et le deuxième cas intéressera l'influence du neutre dans le cas d'un circuit ouvert d'une phase. Afin d'analyser les courants statoriques dans le domaine fréquentiel pour surveiller l'évaluation des harmoniques grâce à l'analyse spectrale, les résultats de simulation obtenus seront affichés et commentés.

Enfin, une conclusion générale et quelques perspectives seront présentées.

CHAPITRE I

Chapitre I : Etude d'un moteur asynchrone à cage avec des différents défauts

I.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous traitons le sujet de la machine asynchrone triphasée à cage d'écureuil avec et sans défaut grâce à une étude bibliographique détaillée. Ensuite, et après avoir rappelé les éléments qui constituent la machine, nous avons détaillé les causes des défauts et les méthodes de diagnostic des défauts basés sur l'analyse spectrale des signaux afin de les appliquer dans les chapitres suivants.

I.2. Constitution de la machine asynchrone à cage

Un moteur asynchrone triphasé à cage est généralement appelé un moteur à induction, qui est un dispositif électromécanique composé d'un stator et d'un rotor. Le stator est une pièce fixe et l'enroulement connecté à la source d'alimentation est situé sur le stator. Le rotor est une pièce mobile montée sur l'arbre rotatif, comme le montre la figure I.1[2].

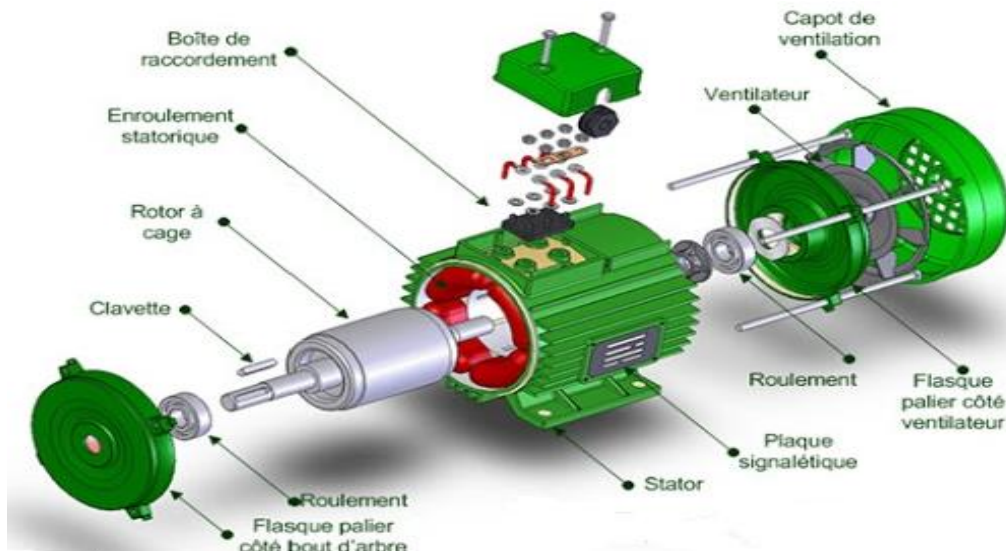


Figure I. 1 : Vue éclatée de la machine asynchrone triphasée à cage

I.2.1 Stator

Le stator est la partie fixe "statique" du moteur. Le stator est formé d'une carcasse ferromagnétique qui contient trois enroulements. Le passage du courant dans les trois enroulements crée un champ magnétique à l'intérieur du stator. Sur les moteurs triphasés, il y a trois enroulements alimentés chacun par une phase. Pour le moteur asynchrone, le stator est l'inducteur, celui qui crée le champ magnétique [3].

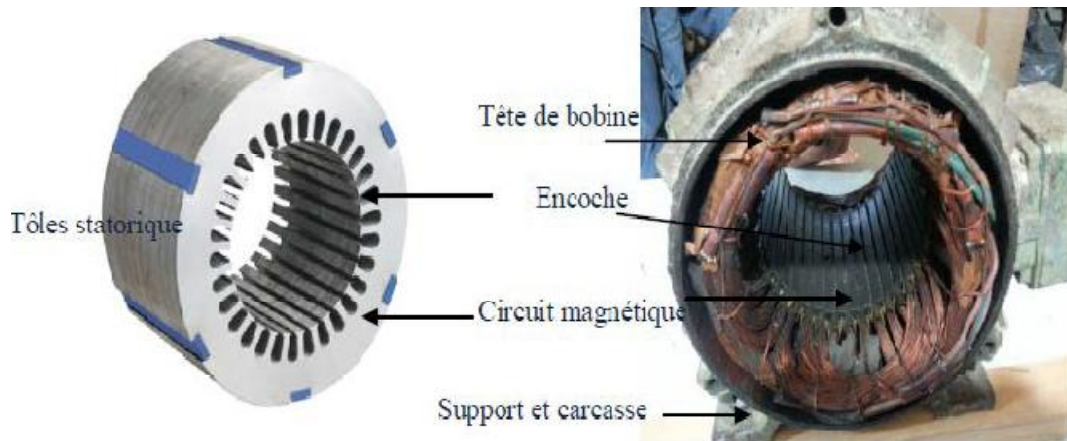


Figure I. 2 :Photo d'un circuit magnétique statorique et d'un stator du MAS[4]

I.2.2 Rotor à cage d'écureuil

Le rotor d'une machine asynchrone à cage, comme le stator, est constitué de tôles empilées et est généralement du même matériau. Dans les petites machines, les panneaux sont coupés en une seule pièce et assemblés sur un arbre. Sur les machines plus grandes, chaque couche se compose de plusieurs sections et monté sur l'axe. Généralement, les encoches du rotor sont inclinées par rapport à l'axe vertical pour réduire les harmoniques d'ordre élevé de l'espace et réduire la réactance liée à la position du changement d'angle rotor / stator.

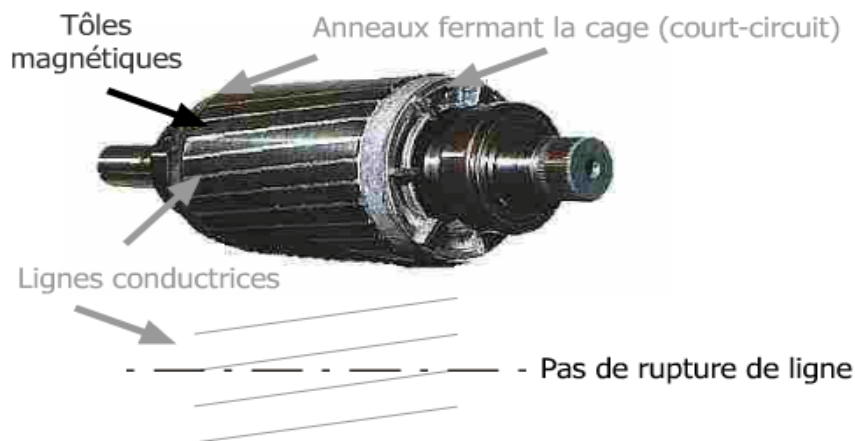


Figure I. 3 : Rotor à cage d'écureuil [5]

Au lieu des conducteurs, placés la bande dans une encoché (cuivre ou aluminium) court-circuitée par deux anneaux, qui ont moins de résistance. On peut utiliser des rotors à double cage ou à cage profonde, qui peuvent tous deux être utilisés pour améliorer les performances de démarrage (un faible appel du courant et un grand couple de démarrage).

Chapitre I : Etude d'un moteur asynchrone à cage avec des différents défauts

I.2.3 Paliers

Les paliers qui supportent et font tourner l'arbre du rotor se composent de brides et de roulements à billes qui sont insérés à chaud dans l'arbre. La bride en fonte est fixée sur le carter du stator avec des boulons ou des tiges de serrage [6].

I.3 Principe de fonctionnement de la machine asynchrone à cage d'écureuil

Les courants statoriques créent un champ magnétique tournant dans le stator. La fréquence de rotation de ce champ est imposée par la fréquence des courants statoriques, c'est-à-dire que sa vitesse de rotation est proportionnelle à la fréquence de l'alimentation électrique. La vitesse de ce champ tournant est appelée vitesse de synchronisme.

L'enroulement au rotor est donc soumis à des variations de flux (champ magnétique). Une force électromotrice induite apparaît qui crée des courants rotoriques. Ces courants sont responsables de l'apparition d'un couple qui tend à mettre le rotor en mouvement afin de s'opposer à la variation de flux : loi de Lenz-Faraday. Le rotor se met donc à tourner pour tenter de suivre le champ statorique [7].

I.4 Etude Statistique

En 1988, une compagnie allemande d'assurance du système industriel a mené une étude statistique sur les pannes de moteurs asynchrones de moyenne puissance (50 kW à 200 kW), dont les résultats sont présentés à la figure I.4 [8].

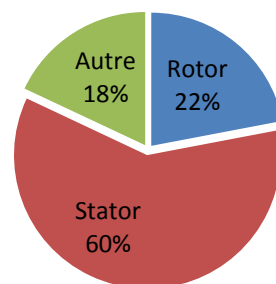


Figure I. 4 : Proportions des défauts dans les MAS de moyenne puissance

D'autre part, la même étude a montré qu'entre 1973 et 1988, les pannes de stator sont passées de 78% à 60% et les pannes de rotor sont passées de 12% à 22%. Ces changements sont dus à l'amélioration des isolants pendant cette période [6].

La répartition des pannes dans les différentes parties du moteur est comme illustré sur la figure I.5[8]:

Chapitre I : Etude d'un moteur asynchrone à cage avec des différents défauts

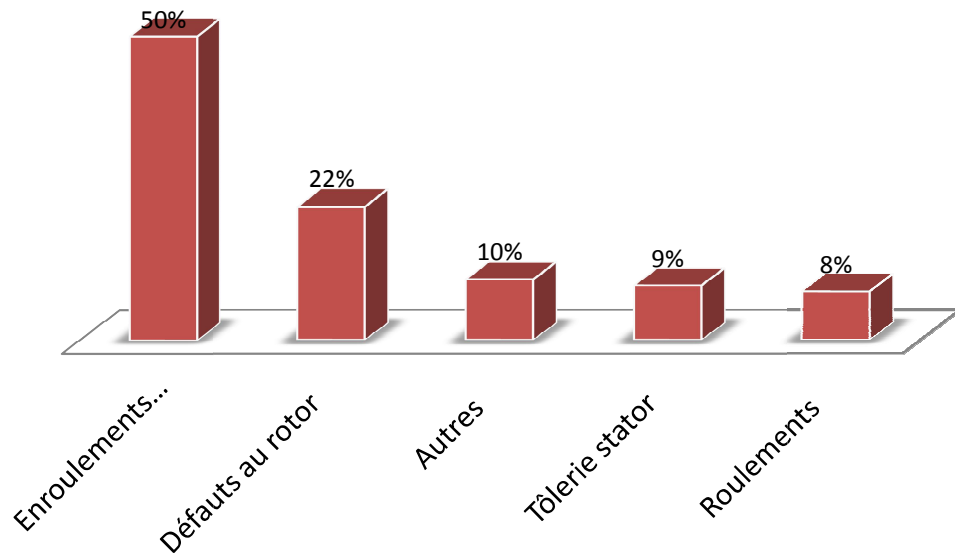


Figure I. 5 : Répartition des pannes sur les MAS de faible et moyenne puissance

I.5 Différentes défaillances d'une machine asynchrone

La machine asynchrone est considérée comme étant robuste. Néanmoins, pendant leur fonctionnement cette MAS peut être exposé à différents défauts nocives qui sont généralement de nature thermique, électrique, mécanique, environnementale, dynamique, résiduelle, comme elle peut avoir des défauts de fabrication [9].

I.5.1 Défauts électriques dans la machine asynchrone à cage

I.5.1.1 Défauts statoriques

La dégradation de l'isolation électrique engendre des défauts de court-circuit illustrés par la figure I.6. On peut clarifier les différents défauts possibles de court-circuit comme les montre la figure I.7 par [9]:

- des défauts inter-spores qui apparaissent à l'intérieur des encoches statoriques ;
- les défauts entre une phase et le neutre ;
- les défauts entre une phase et la carcasse métallique de la machine ou entre deux phases statoriques.

Chapitre I : Etude d'un moteur asynchrone à cage avec des différents défauts



Figure I.6 : Différents court-circuit dans un stator de la machine asynchrone

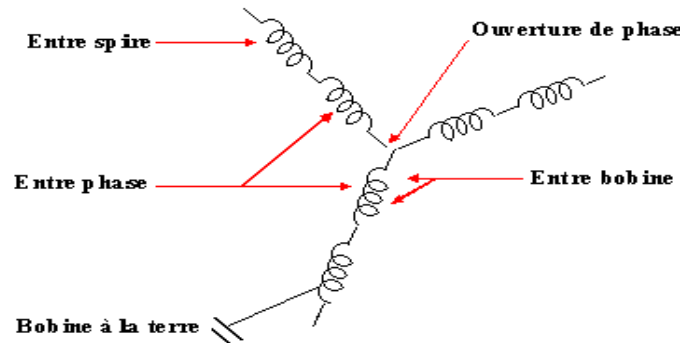


Figure I. 7 : Différents défauts statoriques

I.5.1.2 Défauts rotoriques

❖ *Rupture de barres*

La cassure de barre est l'un des défauts les plus fréquents au rotor de grande puissance (Figure I.8). Une barre cassée, signifie que le courant dans cette barre est nul [6]. La détérioration des barres réduit la valeur moyenne de couple électromagnétique et augmente l'amplitude de l'oscillation, ce qui engendre des vibrations mécaniques et un fonctionnement anormal de la machine [8].

❖ *Ruptures d'anneaux*

Les ruptures d'anneaux peuvent être dues à des bulles de coulées ou aux dilatations différentielles entre les barres et les anneaux (Figure I.8). La rupture d'une portion d'anneau déséquilibre la répartition des courants dans les barres rotoriques et de ce fait, engendre un effet de modulation d'amplitude sur les courants statoriques similaire à celui provoqué par la cassure de barres [6].

Chapitre I : Etude d'un moteur asynchrone à cage avec des différents défauts

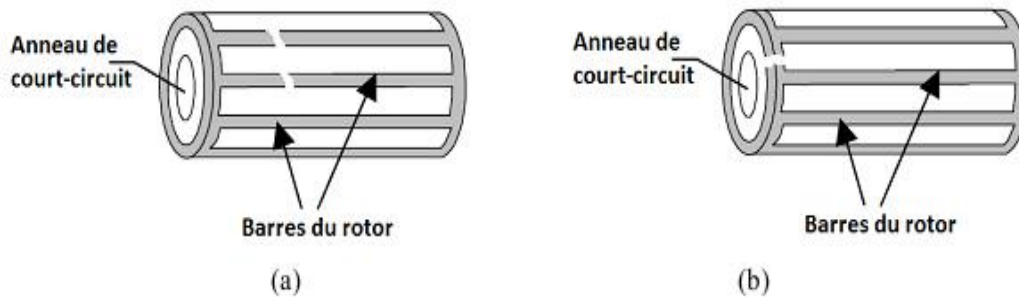


Figure I. 8 : Défauts du rotor à cage : a) Rupture de barres ;
(b) Rupture d'anneau de court-circuit

I.5.2 Défauts mécaniques dans les machines asynchrones

I.5.2.1 Excentricités statique et dynamique

Parfois, la machine électrique peut être soumise à un décentrement du rotor, se traduisant par des oscillations de couple (décalage entre le centre de rotation de l'arbre et le centre du rotor). Ce phénomène est appelé excentricité (statique et/ou dynamique) dont l'origine peut être liée à un positionnement incorrect des paliers lors de l'assemblage, à un défaut roulement (usure), à un défaut de charge, ou à un défaut de fabrication (usinage) [10].

Trois cas d'excentricité sont généralement distingués [11]:

- **l'excentricité statique**, le rotor est déplacé du centre de l'alésage stator mais tourne toujours autour de son axe ;
- **l'excentricité dynamique**, le rotor est positionné au centre de l'alésage mais ne tourne plus autour de son axe ;
- **l'excentricité qu'on pourrait qualifier de 'mixte'**, associant les deux cas précédemment cités.

Ce défaut modifie les comportements magnétique et mécanique de la machine. En effet, l'augmentation de l'excentricité dans l'entrefer induit une augmentation des forces électromagnétiques qui agissent directement sur l'armature statorique ainsi que l'enroulement correspondant, ce qui engendre une dégradation de son isolation. D'autre part, cette augmentation peut avoir comme conséquence des frottements entre le stator et le rotor en raison des forces d'attraction magnétique qui déséquilibrent le système. Ceci donne naissance à des niveaux de vibration considérables dans les enroulements [10].

Chapitre I : Etude d'un moteur asynchrone à cage avec des différents défauts

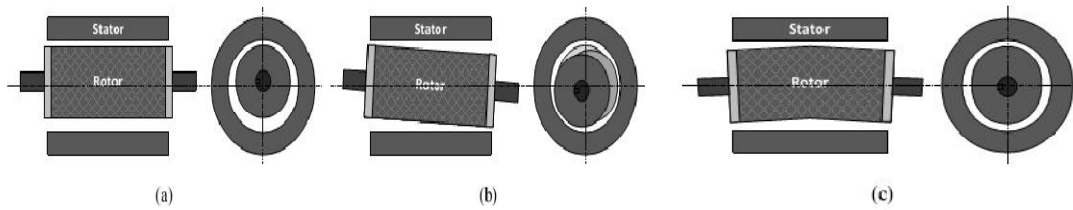


Figure I. 9 : Représentation des excentricités : Statique(a) ; Dynamique(b) ; Mixte(c)

I.5.2.2 Défaut de roulement

Les roulements à billes sont constitués de deux bagues, extérieure et intérieure, entre lesquelles existe un ensemble de billes ou de rouleaux tournants (Figure. I.10). Nous pouvons distinguer les types de défauts suivants [9] :

- Défaut de bague extérieure ;
- Défaut de bague intérieure ;
- Défaut de billes.

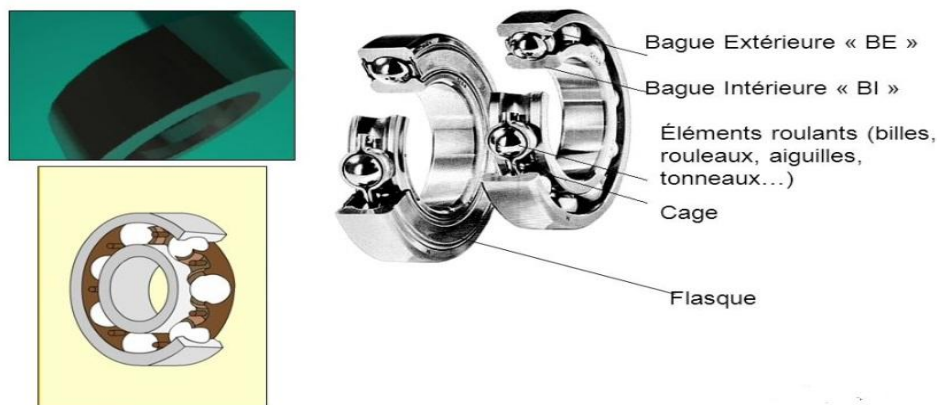


Figure I. 10 : Constitution d'un roulement à billes

I.5.2.3 Défauts de flasque

Les défauts créés par les flasques sont le plus généralement causés à l'étape de fabrication. Un mauvais positionnement des flasques provoque un désalignement des roulements à billes, ce qui induit une excentricité [9].

I.5.2.4 Défauts de l'arbre

L'arbre de la machine peut laisser paraître une fissure due à l'utilisation d'un mauvais matériau lors de sa construction, cette fissure peut mener à une fracture nette de l'arbre provoquant un arrêt de la machine asynchrone [9].

Chapitre I : Etude d'un moteur asynchrone à cage avec des différents défauts

I.6 Causes des défauts

Les causes des défauts sont multiples, elles peuvent être classées en trois groupes [6] :

- les générateurs de pannes ou initiateurs de défauts : surchauffe du moteur, défaut électrique (court-circuit), survoltage d'alimentation, problème d'isolation électrique, usure des éléments mécaniques (roulements à billes), rupture de fixations, etc. ;
- les amplificateurs de défauts : surcharge fréquente, vibrations mécaniques environnement humide, échauffement permanent, mauvais graissage et vieillissement ;
- les vices de fabrication et les erreurs humaines : défauts de fabrication, composants défectueux, protections inadaptées, mauvais dimensionnement de la machine, etc.

I.7 Méthodes de diagnostic des défauts basées sur l'analyse spectrale des signaux

Pour effectuer le diagnostic d'une installation industrielle, les opérateurs de maintenance analysent un certain nombre de signaux issus de la machine. En effet, l'évolution temporelle et le contenu spectral de ces signaux, peuvent être exploités pour détecter et localiser les anomalies qui affectent le bon fonctionnement de la machine. D'après la littérature [12], les principales techniques du diagnostic utilisées pour obtenir des informations sur l'état de santé de la machine sont les suivantes :

I.7.1 Diagnostic par mesure des vibrations mécaniques

Le diagnostic des défauts en utilisant les vibrations mécaniques est la méthode la plus utilisée dans la pratique. Ces forces sont proportionnelles au carré de l'induction magnétique [13].

La force magnétomotrice contient les effets des asymétries du stator ou du rotor, en plus la perméance dépend de la différence de l'entrefer (à cause des ouvertures des encoches statoriques et rotoriques et l'excentricité). De ce fait, l'analyse spectrale des signaux de vibrations mécaniques, permet la détection aussi bien les défauts électriques que mécaniques. Les spectres des signaux de vibration provenant du moteur défectueux sont comparés aux signaux enregistrés lorsque le moteur est en bon état. Les vibrations de la machine peuvent être captées par les accéléromètres [14].

I.7.2 Diagnostic par mesure du flux magnétique axial de fuite

Dans une machine idéale et sans défaut, les courants et les tensions statoriques sont équilibrés, ce qui annule le flux de fuite axial. La présence d'un défaut quelconque, provoque des déséquilibres électrique et magnétique au niveau du stator ce qui donne naissance à des flux de fuite axial de valeurs dépendent au degré de sévérité du défaut [13]. Si on place une bobine

Chapitre I : Etude d'un moteur asynchrone à cage avec des différents défauts

autour de l'arbre de la machine, elle sera le siège d'une force électromotrice induite. L'analyse spectrale de la tension induite dans cette bobine peut être exploitée pour détecter les différents défauts [13].

I.7.3 Diagnostic par l'analyse des tensions statoriques induites

Cette technique, est basée sur l'exploitation du contenu fréquentielle de la tension induite, par le flux rotorique, dans les enroulements statoriques pendant la déconnexion du moteur de réseau. La rupture d'une barre affectée directement la tension induite dans les enroulements statoriques. En utilisant cette approche, les effets du non – idéalité de la source (déséquilibres et présence des harmoniques) ainsi que la non – linéarité des caractéristiques magnétiques de la machine peuvent être évités[14].

I.7.4 Diagnostic par mesure du couple électromagnétique

Cette technologie peut détecter les défauts de rotor dans les bobines de stator et les défauts de court-circuit entre les spires. Le couple électromagnétique généré dans le moteur provient de l'interaction entre le champ magnétique du stator et le champ magnétique du rotor. Par conséquent, toute défaillance du stator ou du rotor affectera directement le couple électromagnétique [15]. L'analyse spectrale (mesure ou estimation) du signal de couple peut fournir des informations sur la santé du moteur [13].

I.7.5 Diagnostic par mesure de la puissance instantanée

La puissance instantanée est la somme des produits des courants est des tensions dans les trois phases statoriques. Donc, le niveau des informations, apportées par cette grandeur, est plus grand que celui apportées par le courant d'une seule phase. Ceci présente l'avantage de cette méthode par rapport aux autres [16], [17].

I.7.6 Diagnostic par mesure des courants statoriques

Parmi tous les signaux utilisables, les courants statoriques se sont avérés être les uns des plus intéressants, car, il est très facile d'accès et il nous permet de détecter aussi bien des défauts électromagnétiques que des défauts purement mécaniques. Cette technique est dénommée dans la littérature "MotorCurrent Signature Analysais" (MCSA) [13][18]. Les défauts de la machine asynchrone se traduisent dans le spectre du courant statorique soit par [19]:

- ❖ L'apparition des raies spectrales dont les fréquences sont directement liées à la fréquence de rotation de la machine, aux fréquences des champs tournants et aux

Chapitre I : Etude d'un moteur asynchrone à cage avec des différents défauts

paramètres physiques de la machine (nombre d'encoche rotorique et nombre de paires de pôles) ;

- ❖ La modification de l'amplitude des raies spectrales, déjà présentes dans le spectre du courant.

La surveillance via le courant statorique nécessite une bonne connaissance des défauts et leurs signatures. En effet, afin de faire le diagnostic des défauts statoriques d'une machine asynchrone, nous cherchons sur le spectre du courant des phases statoriques l'apparition de pics d'amplitudes correspondant à des fréquences exprimées par l'expression suivante :

$$f_{st} = f_s \cdot \left[k \pm n \frac{(1-g)}{P} \right]_{k=1,3,5}^{n=1,2,3...} \quad (I.1)$$

avec : f_{st} : Fréquence caractéristique du défaut de court-circuit ; f_s : Fréquence du champ tournant (secteur d'alimentation) ; P : Nombre de paire de pôles ; g : Glissement.

Dans les chapitres suivants, nous utiliserons cette méthode, pour détecter des défaillances dans le moteur asynchrones à cage d'écureuil étudié, puisque c'est très facile d'accès et ils nous permettent de détecter les défauts électromagnétiques et les défauts mécaniques. Nous sommes intéressés spécifiquement au défaut des courants statoriques (court-circuit entre spires, ouverte d'une phase statorique et court-circuit total d'une phase statorique) la surveillance par analyse spectrale du moteur.

I.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons d'abord présenté la machine asynchrone à cage d'écureuil et son principe de fonctionnement. Ensuite, nous avons exposé les différentes défaillances qu'on peut trouver sur la machine asynchrone (excentricité, court-circuit, rupture des barres, etc.). Ensuite, en faisant un rappel des méthodes de diagnostic de la machine asynchrone à cage d'écureuil, nous avons vu que la détection d'un défaut qu'il soit statorique ou rotorique, s'effectue majoritairement par l'analyse spectrale des courants statoriques.

Dans le chapitre suivant, nous passerons à la modélisation et à la simulation d'un moteur asynchrone à cage d'écureuil en utilisant les repères suivants : réel (ABC) et virtuel (d.q.o).

CHAPITRE II

Chapitre II : Modélisation de la machine asynchrone à cage d'écureuil

II.1 Introduction

Afin de modéliser la machine asynchrone à cage d'écureuil triphasée (MAS), dans un premier lieu on donnera de manière explicite le modèle mathématique de la MAS (Equations électriques, magnétiques et mécanique) dans le repère naturel (abc), qui basé sur la non application de la matrice de Park, cela signifie que les variables qui définissent l'état électromagnétique des enroulements de la machine restent sous forme naturelle.

Ensuite, dans un deuxième lieu, on réduira le modèle dans le repère biphasé (d,q,o) en se basant sur la transformation de Park qui rapporte les équations électriques statorique et rotorique pour deux enroulements équivalents biphasés et orthogonaux. Cependant, la modélisation d'une telle machine électrique est indispensable pour l'étude et la maîtrise de son fonctionnement.

Par ailleurs, nous étudierons dans un premier temps la MAS directement alimentée par une source triphasée et équilibrée. Enfin, des résultats de simulations seront présentés et commentés.

II.2 Description de la machine asynchrone à cage d'écureuil

La machine électrique est constituée d'un stator et d'un rotor mobile, le stator possède trois enroulements couplés en étoile ou en triangle qui est alimentée par un système triphasé de tensions, il en résulte la création d'un champ magnétique dans l'entrefer de la machine [20].

Le rotor est constitué de tôles empilées et habituellement du même matériau, Dans les petits moteurs, les tôles sont découpées dans une seule pièce et assemblées sur un arbre, Dans les plus gros moteurs, chaque tôle est constituée de plusieurs sections montées sur un moyeu. Dans le cas des rotors à cage d'écureuil, les encoches peuvent être semi-ouvertes ou fermées. Les enroulements sont constitués de barres court-circuitées par un anneau placé à chaque extrémité du rotor. Les conducteurs sont généralement réalisés par coulage d'un alliage d'aluminium, ou par des barres massives de cuivre ou, à l'occasion, en laiton préformés et frettés dans les tôles du rotor. Il n'y a généralement pas, ou très peu, d'isolation entre les barres rotorique et les tôles magnétiques. Leur résistance est suffisamment faible pour que les courants ne circulent pas dans les tôles, sauf lorsqu'il ya une rupture de barre.

Chapitre II : Modélisation de la machine asynchrone à cage d'écuréuil

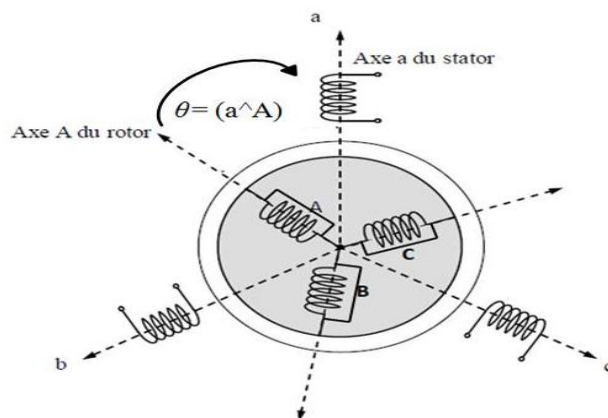


Figure II.1 Représentation électrique d'un moteur asynchrone triphasé

II.3 Hypothèses simplificatrices d'étude

La modélisation de la MAS s'appuie sur un certain nombre d'hypothèses simplificatrices, qui sont [21]:

- Le circuit magnétique est non saturé ;
- Les pertes (par hystérésis et courants de Foucault) sont négligées ;
- Les forces magnétomotrices créées par chacune des phases des deux armatures sont à répartition sinusoïdale, la f.m.m est variable, les inductances propres sont des constantes et les inductances mutuelles entre deux enroulements sont des fonctions sinusoïdales de l'angle entre leurs axes magnétiques ;
- Les résistances ne varient pas avec la température et l'effet de peau est négligé ;
- La machine est de constitution symétrique ;
- L'entrefer est d'épaisseur uniforme et l'effet d'encoche est négligeable.

II.4 Modèle de la MAS triphasée dans le repère naturel (abc)

II.4.1 Equations électriques

Les équations des tensions de la MAS dans le repère (abc) sont données comme suit:

Chapitre II : Modélisation de la machine asynchrone à cage d'écreuil

Pour le stator :

$$\begin{cases} v_{as} = r_s i_{as} + \frac{d\varphi_{as}}{dt} \\ v_{bs} = r_s i_{bs} + \frac{d\varphi_{bs}}{dt} \\ v_{cs} = r_s i_{cs} + \frac{d\varphi_{cs}}{dt} \end{cases} \quad (\text{II.1.a})$$

On peut réécrire le système d'équations (II.1.a) sous la forme matricielle suivante :

$$[v_s] = [R_s][i_s] + \frac{d}{dt}[\varphi_s] \quad (\text{II.1.b})$$

Pour le rotor :

$$\begin{cases} v_{ar} = r_r i_{ar} + \frac{d\varphi_{ar}}{dt} \\ v_{br} = r_r i_{br} + \frac{d\varphi_{br}}{dt} \\ v_{cr} = r_r i_{cr} + \frac{d\varphi_{cr}}{dt} \end{cases} \quad (\text{II.2.a})$$

On peut réécrire aussi le système d'équations (II.2.a) sous la forme matricielle suivante :

$$[v_r] = [R_r][i_r] + \frac{d}{dt}[\varphi_r] \quad (\text{II.2.b})$$

Les vecteurs des tensions, courants, flux (statoriques et rotoriques) sont :

$$[v_s] = \begin{bmatrix} v_{as} \\ v_{bs} \\ v_{cs} \end{bmatrix} ; [v_r] = \begin{bmatrix} v_{ar} \\ v_{br} \\ v_{cr} \end{bmatrix} ; [i_s] = \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} ; [i_r] = \begin{bmatrix} i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix} ; [\varphi_s] = \begin{bmatrix} \varphi_{as} \\ \varphi_{bs} \\ \varphi_{cs} \end{bmatrix} ; [\varphi_r] = \begin{bmatrix} \varphi_{ar} \\ \varphi_{br} \\ \varphi_{cr} \end{bmatrix}.$$

Les matrices des résistances statorique et rotorique sont données comme suit:

$$[R_s] = \begin{bmatrix} r_{as} & 0 & 0 \\ 0 & r_{bs} & 0 \\ 0 & 0 & r_{cs} \end{bmatrix} ; [R_r] = \begin{bmatrix} r_{ar} & 0 & 0 \\ 0 & r_{br} & 0 \\ 0 & 0 & r_{cr} \end{bmatrix}$$

Les enroulements statoriques et rotoriques étant symétriques, on aura :

$$r_{as} = r_{bs} = r_{cs} = r_s ; r_{ar} = r_{br} = r_{cr} = r_r$$

Chapitre II : Modélisation de la machine asynchrone à cage d'écurueil

II.4.2 Equations magnétiques

Les expressions des flux statorique et rotorique sont données par la forme matricielle suivante :

$$\begin{cases} [\varphi_s] = [L_{ss}][i_s] + [M_{sr}][i_r] \\ [\varphi_r] = [L_{rr}][i_r] + [M_{rs}][i_s] \end{cases} \quad (\text{II.3})$$

Avec :

La matrice des inductances statoriques qui s'écrit :

$$[L_{ss}] = \begin{bmatrix} l_{fs} + l_{ms} & -\frac{l_{ms}}{2} & -\frac{l_{ms}}{2} \\ -\frac{l_{ms}}{2} & l_{fs} + l_{ms} & -\frac{l_{ms}}{2} \\ -\frac{l_{ms}}{2} & -\frac{l_{ms}}{2} & l_{fs} + l_{ms} \end{bmatrix} \quad (\text{II.4})$$

Et la matrice des inductances rotoriques qui s'écrit :

$$[L_{rr}] = \begin{bmatrix} l_{fr} + l_{mr} & -\frac{l_{mr}}{2} & -\frac{l_{mr}}{2} \\ -\frac{l_{mr}}{2} & l_{fr} + l_{mr} & -\frac{l_{mr}}{2} \\ -\frac{l_{mr}}{2} & -\frac{l_{mr}}{2} & l_{fr} + l_{mr} \end{bmatrix} \quad (\text{II.5})$$

Où : l_{fs} et l_{fr} : Inductances de fuite statorique et rotorique, respectivement ; l_{ms} et l_{mr} : Inductances de magnétisation au stator et au rotor, respectivement.

Les matrices des inductances de couplage entre stator et le rotor et inversement $[M_{sr}]$ et $[M_{rs}]$ s'écrivent :

$$[M_{sr}] = [M_{rs}]^t = l_m \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta_r) & \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r) & \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r) \end{bmatrix} \quad (\text{II.6})$$

On pose : $l_m = l_{ms} = l_{mr}$: Maximum de l'inductance mutuelle entre phase du stator et la phase

Chapitre II : Modélisation de la machine asynchrone à cage d'écreuil

correspondent du rotor.

En introduisant les expressions des flux (II.3) dans les équations des tensions du stator et du rotor (II.1.b) et (II.2.b), on obtient :

$$\begin{cases} [v_s] = [R_s][i_s] + \frac{d}{dt}([L_{ss}][i_s] + [M_{sr}][i_r]) \\ [v_r] = [R_r][i_r] + \frac{d}{dt}([L_{rr}][i_r] + [M_{rs}][i_s]) \end{cases} \quad (\text{II.7})$$

On peut réécrire le système (II.7) sous la forme suivante :

$$\begin{cases} [v_s] = [R_s][i_s] + [L_{ss}] \frac{d}{dt}([i_s]) + [M_{sr}] \frac{d}{dt}([i_r]) + \frac{d([M_{sr}])}{dt} [i_r] \\ [v_r] = [R_r][i_r] + [M_{rs}] \frac{d}{dt}([i_s]) + \frac{d([M_{rs}])}{dt} [i_s] + [L_{rr}] \frac{d}{dt}([i_r]) \end{cases} \quad (\text{II.8})$$

Comme les inductances mutuelles stator/rotor ne dépendent pas du temps mais de θ_r , on établit un changement de variable, d'où l'équation (II.8) devient :

$$\begin{cases} [v_s] = [R_s][i_s] + [L_{ss}] \frac{d}{dt}([i_s]) + [M_{sr}] \frac{d}{dt}([i_r]) + \frac{d\theta_r}{dt} \frac{d([M_{sr}])}{d\theta_r} [i_r] \\ [v_r] = [R_r][i_r] + [M_{rs}] \frac{d}{dt}([i_s]) + \frac{d\theta_r}{dt} \frac{d([M_{rs}])}{d\theta_r} [i_s] + [L_{rr}] \frac{d}{dt}([i_r]) \end{cases} \quad (\text{II.9})$$

$$\text{Où : } \frac{d}{dt}([M_{sr}]) = \frac{d\theta_r}{dt} \frac{d}{d\theta_r}([M_{sr}]) = \frac{d\theta_r}{dt} \frac{d}{d\theta_r}([M_{sr}]) = \omega_r \frac{d}{d\theta_r}([M_{sr}]) .$$

Le système d'équations (II.9) devient :

$$\begin{cases} [v_s] = [R_s][i_s] + [L_{ss}] \frac{d}{dt}([i_s]) + [M_{sr}] \frac{d}{dt}([i_r]) + \omega_r \frac{d([M_{sr}])}{d\theta_r} [i_r] \\ [v_r] = [R_r][i_r] + [M_{rs}] \frac{d}{dt}([i_s]) + \omega_r \frac{d([M_{rs}])}{d\theta_r} [i_s] + [L_{rr}] \frac{d}{dt}([i_r]) \end{cases} \quad (\text{II.10})$$

On peut réécrire le système (II.10) sous la forme suivante:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} [i_s] = [L_{ss}]^{-1} \left\{ [v_s] - [R_s][i_s] - [M_{sr}] \frac{d}{dt}([i_r]) - \omega_r \frac{d([M_{sr}])}{d\theta_r} [i_r] \right\} \\ \frac{d}{dt} [i_r] = [L_{rr}]^{-1} \left\{ [v_r] - [R_r][i_r] - [M_{rs}] \frac{d}{dt}([i_s]) - \omega_r \frac{d([M_{rs}])}{d\theta_r} [i_s] \right\} \end{cases} \quad (\text{II.11})$$

Les dérivées de l'inductance mutuelle entre le stator et le rotor sont:

Chapitre II : Modélisation de la machine asynchrone à cage d'écreuil

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

II.4.3 Equation du couple électromagnétique

Le couple électromagnétique développé par le moteur asynchrone est obtenu grâce à la co-énergie. Aussi, rappelons que de manière générale celui-ci s'écrit :

$$C_{em} = \frac{p}{2} \begin{bmatrix} [i_s] \\ [i_r] \end{bmatrix}^t \left\{ \frac{d}{d\theta_r} \begin{bmatrix} [L_{ss}] & [M_{sr}] \\ [M_{rs}] & [L_{rr}] \end{bmatrix} \right\} \begin{bmatrix} [i_s] \\ [i_r] \end{bmatrix} \quad (\text{II.13})$$

Où p est le nombre de paires de pôles. Sachant que les matrices $[L_{ss}]$ et $[L_{rr}]$ sont indépendantes de la position, l'expression du couple électromagnétique se réduit à :

$$C_{em} = p [i_s]^t \left\{ \frac{d}{d\theta_r} [M_{sr}] \right\} [i_r] \quad (\text{II.14})$$

II.4.4 Equation mécanique

L'équation fondamentale du mouvement de la machine est donnée par:

$$J \frac{d\Omega_r}{dt} = C_{em} - C_r - K_f \Omega_r \quad (\text{II.15})$$

avec: $\Omega_r = \frac{\omega_r}{p}$: Vitesses de rotation mécanique et électrique, respectivement ; J : Moment d'inertie des masses tournantes ; C_r : Couple résistant ; K_f : Coefficient de frottement visqueux.

II.5. Modélisation et simulation et interprétations des résultats de la MAS dans le model naturel

Le modèle du MAS dans le repère réel (abc) à implémenter sous MATLAB/Simulink est le suivant :

Chapitre II : Modélisation de la machine asynchrone à cage d'écreuil

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} [i_s] = [L_{ss}]^{-1} \left\{ [v_s] - [R_s][i_s] - [M_{sr}] \frac{d}{dt} ([i_r]) - p\Omega_r \frac{d([M_{sr}])}{d\theta_r} [i_r] \right\} \\ \frac{d}{dt} [i_r] = [L_{rr}]^{-1} \left\{ [v_r] - [R_r][i_r] - [M_{rs}] \frac{d}{dt} ([i_s]) - p\Omega_r \frac{d([M_{rs}])}{d\theta_r} [i_s] \right\} \\ \frac{d\Omega_r}{dt} = \frac{1}{J} \left\{ p[i_s]^t \left\{ \frac{d}{d\theta_r} [M_{sr}] \right\} [i_r] - C_r - k_f \Omega_r \right\} \end{cases} \quad (II.16)$$

II.5.1 Simulation et interprétations des résultats de la MAS dans le model naturel

Nous avons réalisé un bloc de simulation de la MAS dans le model (abc) sous l'environnement Matlab/Simulink, à partir d'un développement mathématique des équations électriques et mécaniques, ensuite la MAS est alimenté par une source purement sinusoïdale et équilibrée, suivi d'une visualisation des composants (courants statoriques et rotoriques, vitesse rotation et couple), ainsi que les résultats sont affichés et commentés.

La MAS alimentée par un système triphasé de tension (220V-50Hz), lors d'un démarrage à vide, suivi de l'application d'une charge nominale à l'instant $t = 1$ s d'une valeur de 100N.m, les figures (II.2 à II.5) représenté les résultats de simulation.

Lors du démarrage à vide, le couple électromagnétique, sur la figure II.2, passe par un régime transitoire. Il présente des oscillations qui atteignent une valeur maximale de 927.5N.m. Après il revient à une valeur très faible (presque nulle) pour compenser les pertes par frottements et par ventilations.

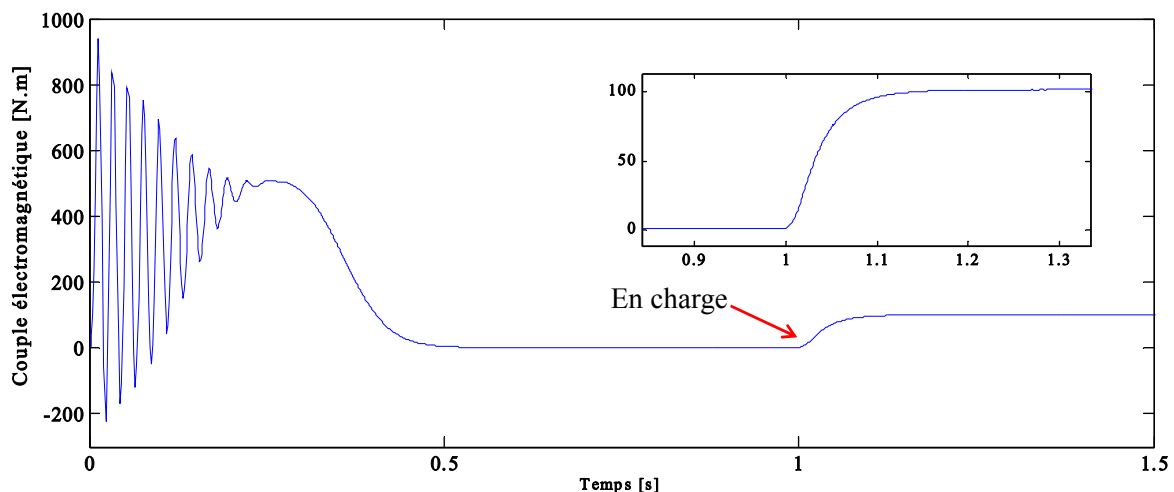


Figure II.2 : Allure du couple électromagnétique

La vitesse rotorique, sur la figure II.3, passe aussi par un régime transitoire d'une durée de 0.55s qui représente le temps de réponse de la machine, puis elle se stabilise au voisinage de la vitesse de synchronisme d'une valeur 314 rad/s.

Chapitre II : Modélisation de la machine asynchrone à cage d'écureuil

Au démarrage, les courants statoriques sur la figure II.4 passent par un régime transitoire d'une valeur très élevée par rapport au courant nominal de la machine. Puis, ils diminuent et prennent une forme sinusoïdale au régime permanent pour atteindre la valeur efficace de 10.6A.

L'application d'une charge à la machine à l'instant $t = 1$ s provoque une perturbation qui sera compensée par l'accroissement de couple électromagnétique, il atteint une valeur établie de 101.6N.m. Les courants du statoriques augmente et tend vers une valeur efficace de 27.8A, alors que les courants rotoriques prennent la valeur de 25.24A. Pour la vitesse, on constate qu'elle chute jusqu'à 306rad/s.

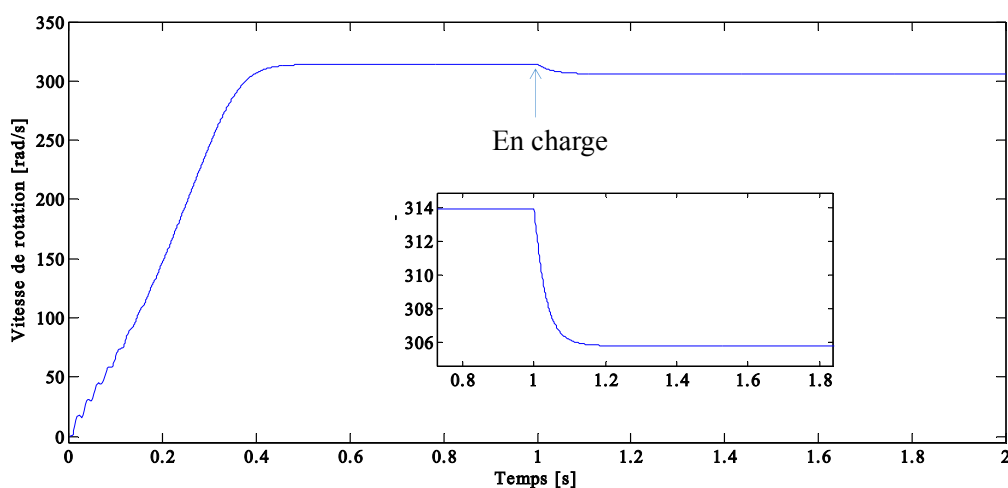


Figure II.3 : Allure de la vitesse de rotation

Chapitre II : Modélisation de la machine asynchrone à cage d'écureuil

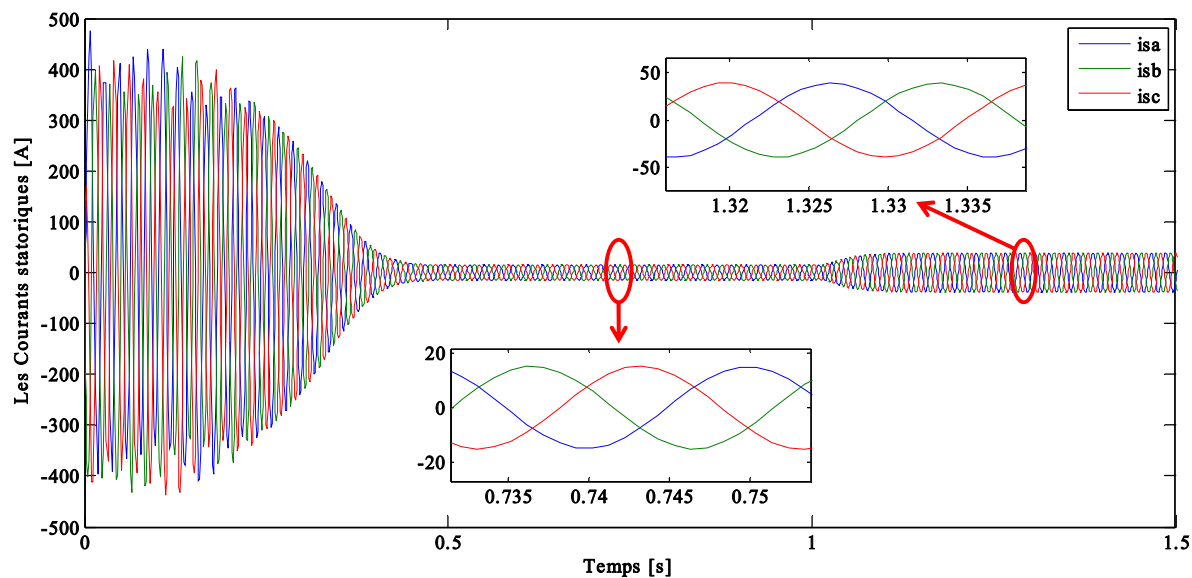


Figure II.4 : Allure des courants statoriques

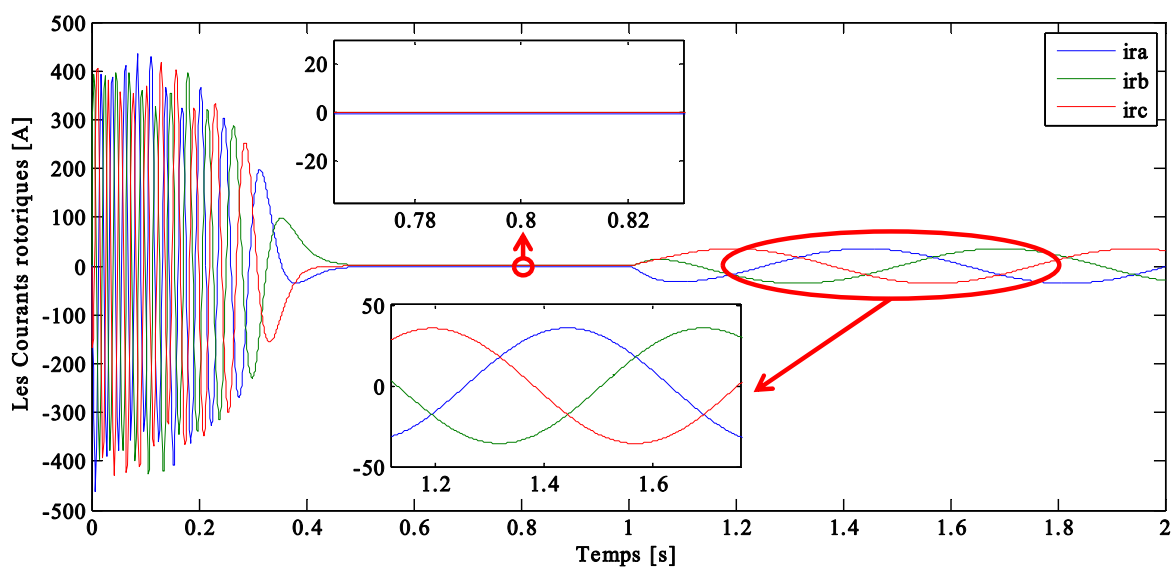


Figure II.5 : Allure des courants rotoriques

II.5.2 Calcul des spectres des courant statoriques du MAS dans le model (abc)

Une analyse spectrale des deux courants statoriques d'un moteur sain fait apparaître un pic dont la fréquence est égale à la fréquence fondamentale 50 Hz, comme la montre les figures II.6 et II.7.

Chapitre II : Modélisation de la machine asynchrone à cage d'écreuil

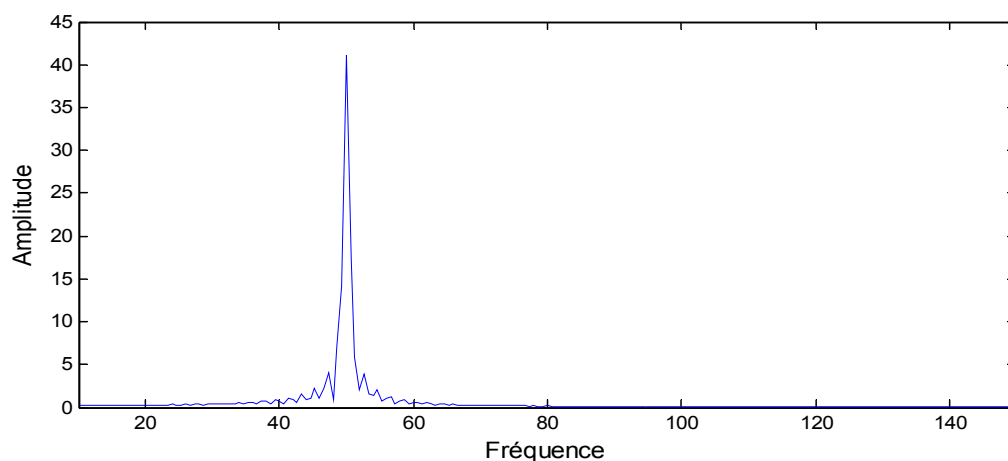


Figure II.6 : Spectre du courant de la phase statorique (a)

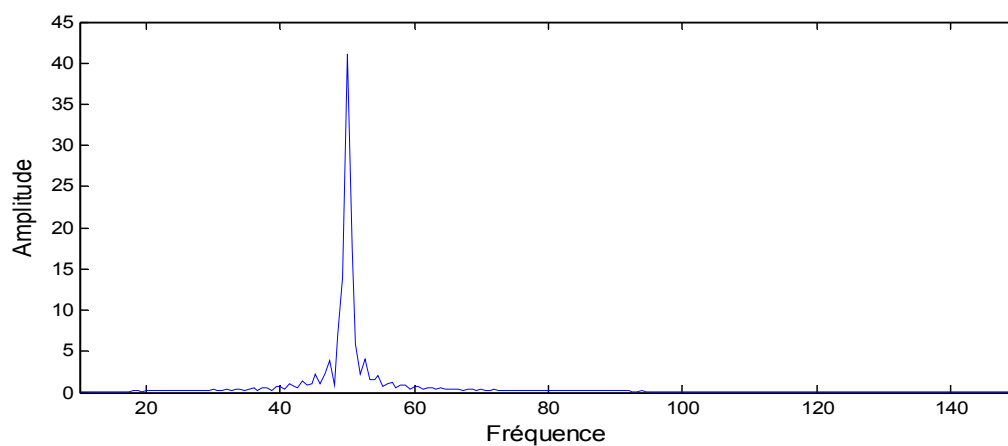


Figure II.7 : Spectre du courant dans la phase statorique (b)

II.6 Modèle de la MAS selon le système d'axes (d.q.0)

II.6.1 Transformation de Park

La modélisation de la MAS passe par la transformation d'un système triphasé au système biphasé et inversement, avec la création d'un champ électromagnétique tournant avec des forces magnétomotrices égales. Pour cela, on applique les matrices de passage de Park directe et inverse suivantes :

Les matrices de Park de passage d'un système triphasé statorique ABC à un système virtuel (d,q,0) et l'inverse sont respectivement comme suit :

Chapitre II : Modélisation de la machine asynchrone à cage d'écreuil

$$[A_s] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix} \quad (\text{II.17})$$

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

Les matrices de Park de passage d'un système triphasé rotorique abc à un système virtuel (d,q,o) et l'inverse sont respectivement comme suit :

$$[A_r] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} \cos(\theta_r) & \cos(\theta_r + \frac{4\pi}{3}) & \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta_r) & -\sin(\theta_r + \frac{4\pi}{3}) & -\sin(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix} \quad (\text{II.19})$$

$$[A_r]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta_r) & -\sin(\theta_r) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.20})$$

On a choisi le facteur $\sqrt{\frac{2}{3}}$ pour les valeurs inchangées des puissances et du couple électromagnétique.

On obtient finalement le système d'équations de Park qui constitue ainsi un modèle électrique équivalent pour un référentiel lié au champ tournant :

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega_s \quad , \quad \frac{d\theta_r}{dt} = \omega_r$$

II.6.2 Modèle de la MAS lié au système d'axes (d,q,0)

La MAS triphasée est représentée schématiquement par la figure II.8.

Chapitre II : Modélisation de la machine asynchrone à cage d'écreuil

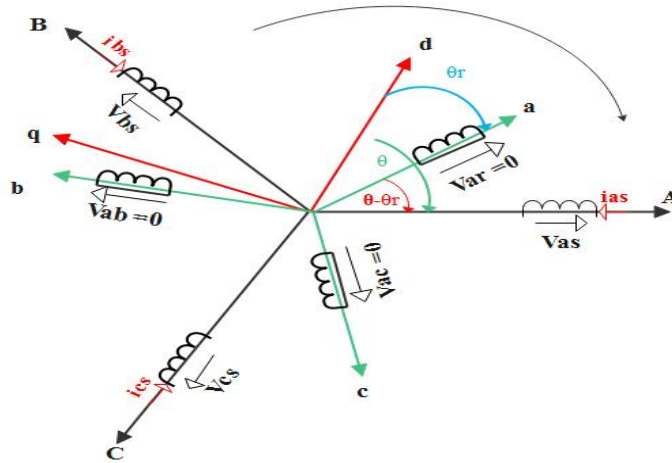


Figure II.8 : Position des axes dq0 par rapport aux axes de la machine

Avec: θ_r : Angle du rotor entre a et d; θ : est l'angle du stator entre A et d.

II.6.2.1 Equations de la tension :

Pour le stator :

$$\begin{cases} v_{sd} = r_s i_{sd} + \frac{d\phi_{sd}}{dt} - \omega_s \phi_{sq} \\ v_{sq} = r_s i_{sq} + \frac{d\phi_{sq}}{dt} + \omega_s \phi_{sd} \end{cases} \quad (\text{II.20})$$

(v_{sd}, v_{sq}) : Tensions statoriques ; $\omega_s = p\Omega_s$: Vitesses angulaire électrique et mécanique du synchronisme et nombre de paires de pôles.

Pour le rotor :

$$\begin{cases} v_{rd} = r_r i_{rd} + \frac{d\phi_{rd}}{dt} - (\omega_s - \omega_r) \phi_{rq} \\ v_{rq} = r_r i_{rq} + \frac{d\phi_{rq}}{dt} + (\omega_s - \omega_r) \phi_{rd} \end{cases} \quad (\text{II.21})$$

Où $\begin{bmatrix} v_{rd} \\ v_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}$: Tension rotoriques (rotor en court-circuit) ; $\omega_r = p\Omega_r$: Vitesses angulaires électrique et mécanique du rotor et nombre de paires de pôles.

II.6.2.2 Equations des flux

Les relations entre flux et courants sont données par le système suivant :

Chapitre II : Modélisation de la machine asynchrone à cage d'écreuil

$$\begin{cases} \varphi_{sd} = L_s i_{sd} + L_m i_{rd} \\ \varphi_{sq} = L_s i_{sq} + L_m i_{rq} \\ \varphi_{rd} = L_r i_{rd} + L_m i_{sd} \\ \varphi_{rq} = L_r i_{rq} + L_m i_{sq} \end{cases} \quad (\text{II.22})$$

A partir du système d'équations (II.22), on peut calculer :

$$\begin{cases} i_{sd} = \frac{\varphi_{sd} L_r - \varphi_{rd} L_m}{L_s L_r - L_m^2} \\ i_{sq} = \frac{\varphi_{sq} L_r - \varphi_{rq} L_m}{L_s L_r - L_m^2} \\ i_{rd} = \frac{\varphi_{rd} L_s - \varphi_{sd} L_m}{L_s L_r - L_m^2} \\ i_{rq} = \frac{\varphi_{rq} L_s - \varphi_{sq} L_m}{L_s L_r - L_m^2} \end{cases} \quad (\text{II.23})$$

En utilisant le système d'équations (II.23), on peut réécrire les systèmes d'équations (II.20) et (II.21) sous cette forme :

$$\begin{cases} v_{sd} = k_1 \varphi_{sd} - k_2 \varphi_{rd} + \frac{d\varphi_{sd}}{dt} - \omega_s \varphi_{sq} \\ v_{sq} = k_1 \varphi_{sq} - k_2 \varphi_{rq} + \frac{d\varphi_{sq}}{dt} + \omega_s \varphi_{sd} \\ 0 = k_3 \varphi_{rd} - k_4 \varphi_{sd} + \frac{d\varphi_{rd}}{dt} - (\omega_s - \omega_r) \varphi_{rq} \\ 0 = k_3 \varphi_{rq} - k_4 \varphi_{sq} + \frac{d\varphi_{rq}}{dt} + (\omega_s - \omega_r) \varphi_{rd} \end{cases} \quad (\text{II.24})$$

Où :

$$\begin{cases} k_1 = \frac{r_s L_r}{L_s L_r - L_m^2} \\ k_2 = \frac{r_s L_m}{L_s L_r - L_m^2} \\ k_3 = \frac{r_r L_s}{L_s L_r - L_m^2} \\ k_4 = \frac{r_r L_m}{L_s L_r - L_m^2} \end{cases}$$

II.6.2.3 Equation du couple électromagnétique

L'équation du couple électromagnétique en fonction des flux est donnée par l'expression suivant:

$$C_{em} = \frac{p L_m}{L_s L_r - L_m^2} (\varphi_{rd} \varphi_{sq} - \varphi_{rq} \varphi_{sd}) \quad (\text{II.25})$$

Chapitre II : Modélisation de la machine asynchrone à cage d'écreuil

II.6.2.4 Equation mécanique

L'équation fondamentale du mouvement de la machine est donnée par :

$$J \frac{d\Omega_r}{dt} = C_{em} - f \cdot \Omega_r - C_r \quad (II.26)$$

A partir des expressions (II.24), (II.25) et (II.26), on obtient le modèle de la MAS sous la forme d'un système d'équations différentielles suivant (format Cauchy) :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\varphi_{sd}}{dt} = v_{sd} - k_1 \varphi_{sd} + k_2 \varphi_{rd} + \omega_s \varphi_{sq} \\ \frac{d\varphi_{sq}}{dt} = v_{sq} - k_1 \varphi_{sq} + k_2 \varphi_{rq} - \omega_s \varphi_{sd} \\ \frac{d\varphi_{rd}}{dt} = -k_3 \varphi_{rd} + k_4 \varphi_{sd} + (\omega_s - p\Omega_r) \varphi_{rq} \\ \frac{d\varphi_{rq}}{dt} = -k_3 \varphi_{rq} + k_4 \varphi_{sq} - (\omega_s - p\Omega_r) \varphi_{rd} \\ \frac{d\Omega_r}{dt} = \frac{1}{J} \left[\frac{pL_m}{L_s L_r - L_m^2} (\varphi_{rd} \varphi_{sq} - \varphi_{rq} \varphi_{sd}) - f \cdot \Omega_r - C_r \right] \end{array} \right. \quad (II.27)$$

II.6.3 Simulation et interprétations des résultats de la MAS dans le système d'axes (d,q,0)

Nous avons réalisé un bloc de simulation de la MAS dans le modèle (d,q,0) sous l'environnement MATLAB/Simulink, à partir d'un développement mathématique des équations électriques et mécaniques et transformation de Park (directe et inverse), ensuite la MAS est alimentée par une source purement sinusoïdale et équilibrée, suivi d'une visualisation des composants (courants statoriques et rotoriques, vitesse rotation et couple électromagnétique). Ainsi que les résultats sont affichés et commentés.

Les figures (II.9 à II.12) montrent les résultats de simulation d'un démarrage en charge nominale de la MAS alimentée par un système triphasé de tension (220 V -50Hz) à l'instant $t = 1.0$ s d'une valeur de 100N.m.

D'après les résultats, qu'on a obtenus dans la simulation (d,q,0), on remarque que les résultats sont identiques avec les résultats de simulation du repère (abc). Vitesse, couple électromagnétique, courants statoriques et courants rotoriques sont représentés dans les figures (II.2 à II.5) et figures (II.9 à II.12), respectivement.

Chapitre II : Modélisation de la machine asynchrone à cage d'écureuil

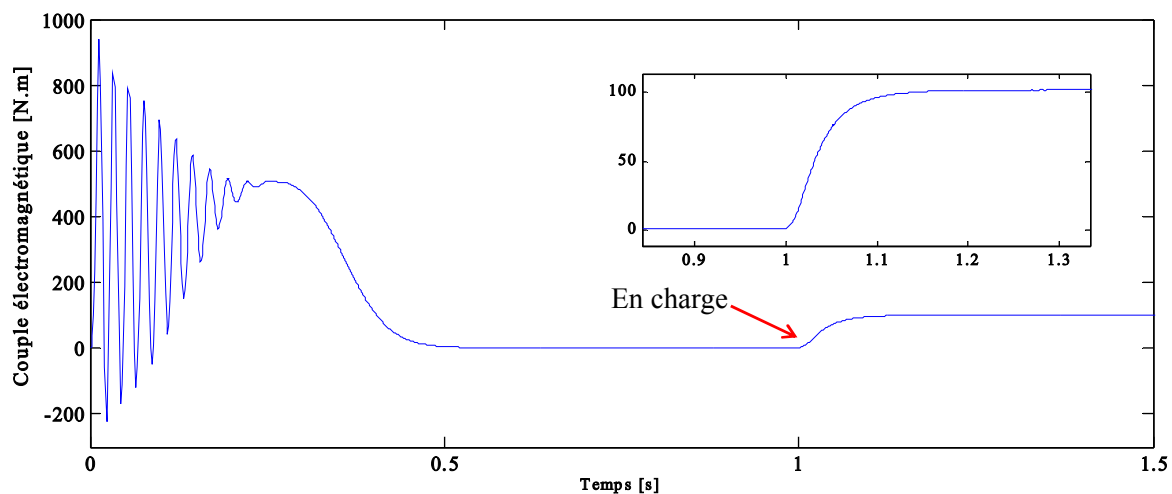


Figure II.9 : Allure du couple électromagnétique

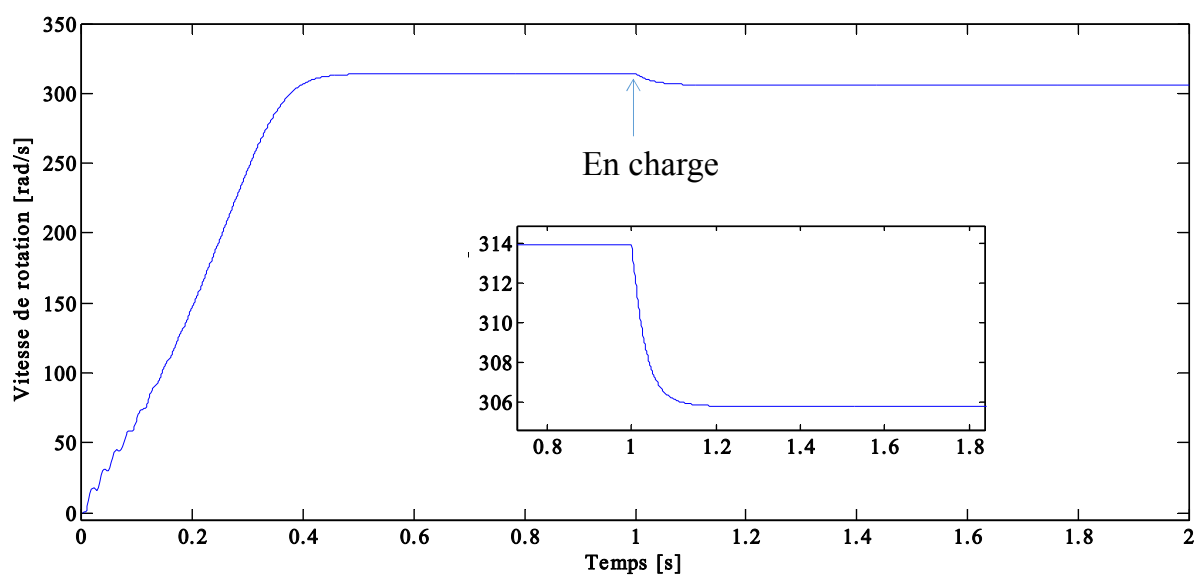


Figure II.10 : Allure de la vitesse de rotation

Chapitre II : Modélisation de la machine asynchrone à cage d'écurueil

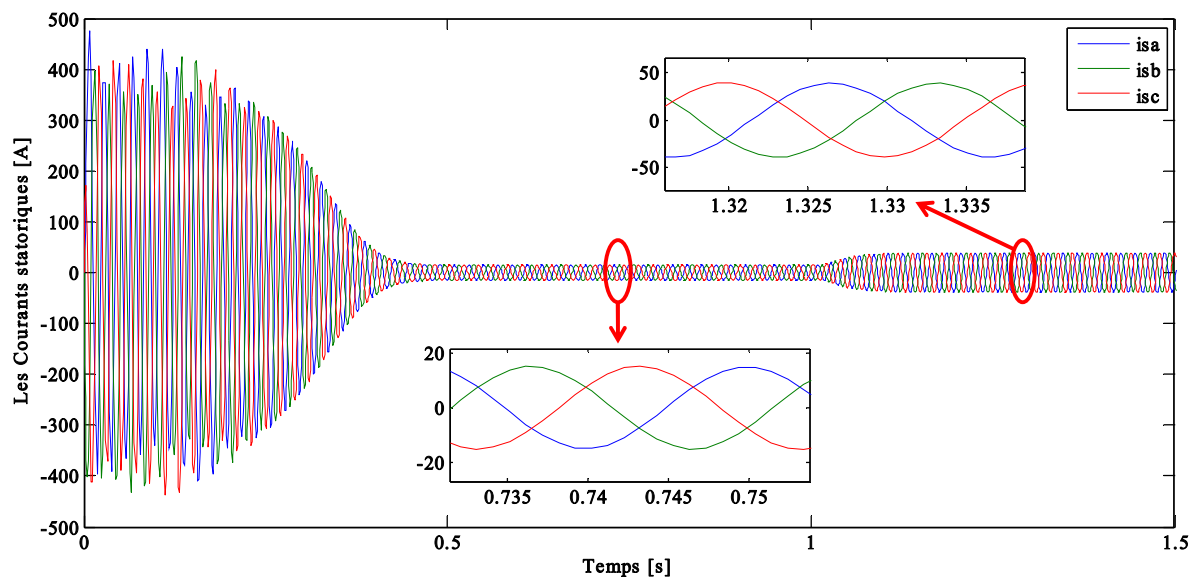


Figure II.11 : Allures des courants statoriques

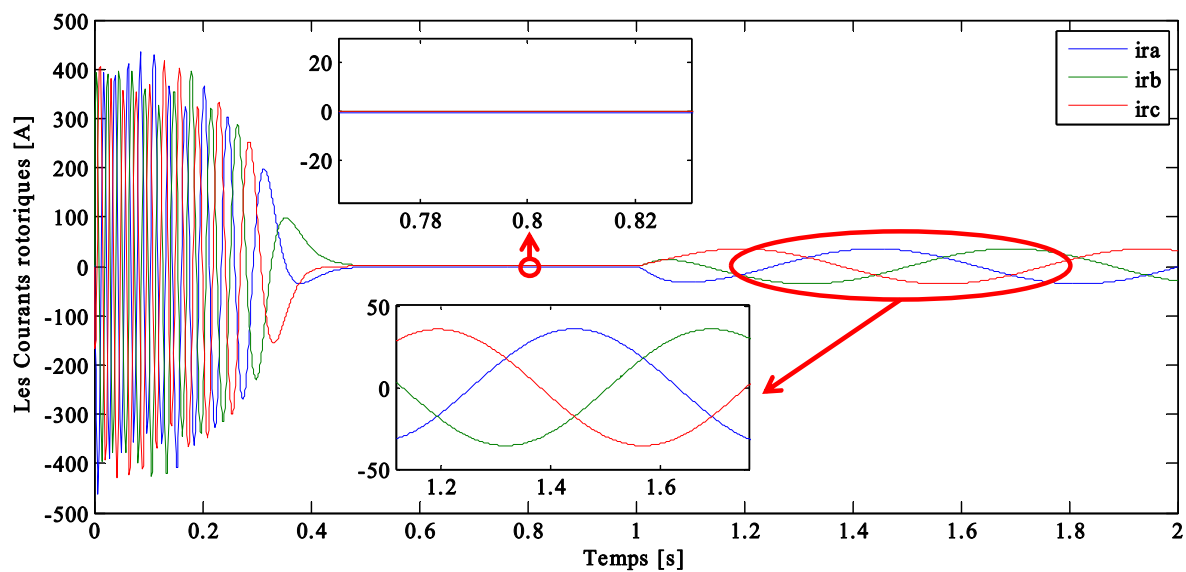


Figure II.12 : Allures des courants rotoriques

II.7 Conclusion

Dans ce chapitre, une description de la machine asynchrone avec une modélisation dans les deux repères naturel (abc) et virtuel (d,q,0) a été effectuée tout en adoptant certaines hypothèses simplificatrices.

Chapitre II : Modélisation de la machine asynchrone à cage d'écureuil

Une simulation de la MAS par le logiciel MATLAB/Simulink pour les modèles de Park et naturel sont élaborés, et cela pour faire une étude caractéristique de la MAS directement alimentée par une source sinusoïdale équilibrée. On a conclu que les résultats de simulation sont identiques pour les deux modèles, le model naturel nous permettra de nouvelles simulations (mode dégradé par exemple) de la MAS, l'inconvénient se régit sur le temps de simulation qui est assez grand.L'autre partie de l'analyse spectrale est extraite pour la comparée dans le chapitre suivant, car nous avons besoin de cette dernière pour mieux comprendre la source du défaut dans le chapitre suivant.

CHAPITRE III

III.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous étudions la machine asynchrone à cage d'écureuil avec des défauts. En premier lieu, nous traitons les défauts de court-circuit entre spires de la phase statorique à (10%, 25% et 50%), à l'aide de l'environnement MATLAB/Simulink. Après, nous passons à l'étude de l'influence du neutre relié à la terre dans le cas d'un défaut de court-circuit total d'une phase, et dans le cas d'un défaut d'ouverture d'une phase sur l'environnement PSIM. Nous traitons les résultats des simulations, et nous continuons avec l'application de l'analyse spectrale dans chacune des parties pour mieux détecter les défauts simulés.

III.2 Modélisation et simulation du MAS en tenant compte d'un court-circuit entre spires dans une phase statorique

L'objet de cette partie est la modélisation et la simulation d'un défaut entre spires comme étant un court-circuit qui indique une dégradation de l'isolant entre deux spires de l'enroulement d'une phase statorique. Le défaut d'isolation est modélisé par une résistance connectant deux points de la bobine, sa valeur dépend de la gravité du défaut.

L'enroulement statorique du MAS avec défaut entre spires est représenté dans la figure (III.1). Les parties a_{s1} et a_{s2} représentent les parties saine et défectueuse du bobinage de la phase (as), respectivement. Lorsque la résistance de défaut diminue vers zéro, le défaut entre spires évolue vers un défaut de court-circuit entre spires dans une phase.

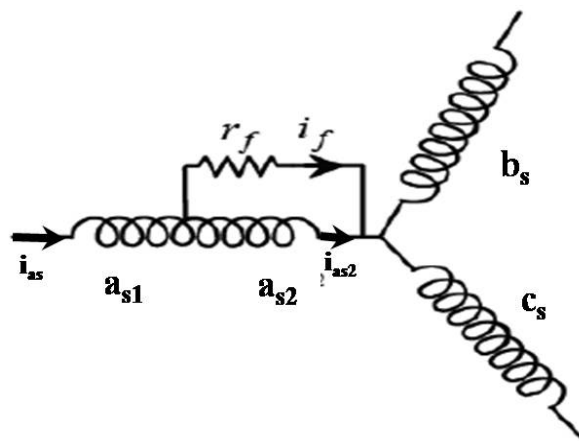


Fig. III.1 :Modèle général d'un court-circuit entre spires dans la phase as

Chapitre III : Modèle de la MAS en présence d'un défaut statorique dans le repère (abc)

III.2.1 Mise en équation

Avant de commencer d'écrire les équations électriques, nous avons cité des points à prendre en considération pour obtenir un système simple et convenable à implémenter :

- Le défaut est survenu au stator sur l'enroulement de la phase (as) ;
- La résistance ($r_f = 0$) représente une résistance de défaut;
- La tension de phase (as) est supposée égale à la somme des deux tensions v_{as1} et v_{as2} ;
- Le coefficient (μ) représente le nombre de spire en court-circuit par rapport au nombre de spires l'enroulement de la phase (as) :

$$\mu = \frac{N_{as2}}{N_{as1} + N_{as2}} = \frac{N_{as2}}{N_{as}} \quad (\text{III.1})$$

où : N_{as} : Nombre de spires par phase ; N_{as1} ; N_{as2} : Nombres de spires des deux parties de la phase en court-circuit.

III.2.2 Modèle du MAS avec défaut dans le repère naturel (abc)

Les équations des tensions au stator et au rotor sont données comme suit :

$$\begin{cases} v_{as1} = r_{as1} i_{as1} + \frac{d\phi_{as1}}{dt} \\ v_{as2} = r_{as2} i_{as2} + \frac{d\phi_{as2}}{dt} \\ v_{bs} = r_s i_{bs} + \frac{d\phi_{bs}}{dt} \\ v_{cs} = r_s i_{cs} + \frac{d\phi_{cs}}{dt} \end{cases} \quad (\text{III.2.a})$$

Et :

$$\begin{cases} v_{ar} = r_r i_{ar} + \frac{d\phi_{ar}}{dt} \\ v_{br} = r_r i_{br} + \frac{d\phi_{br}}{dt} \\ v_{cr} = r_r i_{cr} + \frac{d\phi_{cr}}{dt} \end{cases} \quad (\text{III.2.b})$$

On peut réécrire le système d'équations (III.2.a) et (III.2.b) sous la forme matricielle suivante :

$$\begin{cases} [v_s] = [R_s][i_s] + \frac{d}{dt}[\phi_s] \\ [v_r] = [R_r][i_r] + \frac{d}{dt}[\phi_r] \end{cases} \quad (\text{III.3})$$

Les vecteurs des tensions, courants, flux (statoriques et rotoriques) sont :

$$[v_s] = [v_{as1} \quad v_{as2} \quad v_{bs} \quad v_{cs}]^t ; [i_s] = [i_{as1} \quad i_{as2} \quad i_{bs} \quad i_{cs}]^t ; [v_r] = [v_{ar} \quad v_{br} \quad v_{cr}]^t$$

Chapitre III : Modèle de la MAS en présence d'un défaut statorique dans le repère (abc)

$$[\varphi_s] = [\varphi_{as1} \quad \varphi_{as2} \quad \varphi_{bs} \quad \varphi_{cs}]^t ; [\varphi_r] = [\varphi_{ar} \quad \varphi_{br} \quad \varphi_{cr}]^t.$$

Le coefficient μ introduit les différentes matrices des résistances statorique et rotorique sont données comme suit:

$$[R_s] = r_s \begin{bmatrix} (1-\mu) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \mu & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} ; \quad [R_r] = r_r \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Les enroulements statoriques et rotoriques étant symétriques, on aura :

$$r_{as} = r_{bs} = r_{cs} = r_s ; r_{ar} = r_{br} = r_{cr} = r_r ; \text{ Avec } : r_{as1} = (1-\mu).r_{as} ; r_{as2} = \mu.r_{as}$$

III.2.3 Equations magnétiques

Les expressions des flux statorique et rotorique sont données par la forme matricielle suivante :

$$\begin{cases} [\varphi_s] = [L_{ss}][i_s] + [M_{sr}][i_r] \\ [\varphi_r] = [L_{rr}][i_r] + [M_{rs}][i_s] \end{cases} \quad (III.4)$$

La matrice des inductances statoriques avec ce type de défaut statorique qui s'écrit :

$$[L_{ss}] = l_{fs} \begin{bmatrix} (1-\mu)^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \mu^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} + l_{ms} \begin{bmatrix} (1-\mu)^2 & \mu(1-\mu) & -\frac{(1-\mu)}{2} & -\frac{(1-\mu)}{2} \\ \mu(1-\mu) & \mu^2 & -\frac{\mu}{2} & -\frac{\mu}{2} \\ -\frac{(1-\mu)}{2} & -\frac{\mu}{2} & 1 & -\frac{1}{2} \\ -\frac{(1-\mu)}{2} & -\frac{\mu}{2} & -\frac{1}{2} & 1 \end{bmatrix} \quad (III.5)$$

Et la matrice des inductances rotoriques qui s'écrit :

$$[L_{rr}] = l_{fr} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} + l_{mr} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} & 1 & -\frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} & 1 \end{bmatrix} \quad (III.6)$$

Où : l_{fs} et l_{fr} : Inductances de fuite statorique et rotorique, respectivement ; l_{ms} et l_{mr} : Inductances de magnétisation au stator et au rotor, respectivement.

Les matrices des inductances de couplage entre stator et le rotor et inversement $[M_{sr}]$ et $[M_{rs}]$ s'écrivent :

Chapitre III : Modèle de la MAS en présence d'un défaut statorique dans le repère (abc)

$$[M_{sr}] = [M_{rs}]^t = l_m \cdot \begin{bmatrix} (1-\mu) \cdot \cos(\theta_r) & (1-\mu) \cdot \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & (1-\mu) \cdot \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) \\ \mu \cdot \cos(\theta_r) & \mu \cdot \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & \mu \cdot \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r) & \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r) \end{bmatrix} \quad (\text{III.7})$$

On pose : $l_m = l_{ms} = l_{mr}$: Maximum de l'inductance mutuelle entre phase du stator et la phase correspondant du rotor.

En introduisant les expressions des flux (III.4) dans les équations des tensions du stator et du rotor (III.2.b) et (III.2.b), on obtient :

$$\begin{cases} [v_s] = [R_s][i_s] + \frac{d}{dt}([L_{ss}][i_s] + [M_{sr}][i_r]) \\ [v_r] = [R_r][i_r] + \frac{d}{dt}([L_{rr}][i_r] + [M_{rs}][i_s]) \end{cases} \quad (\text{III.8})$$

On peut réécrire le système (III.8) sous la forme suivante :

$$\begin{cases} [v_s] = [R_s][i_s] + [L_{ss}] \frac{d}{dt}([i_s]) + [M_{sr}] \frac{d}{dt}([i_r]) + \frac{d([M_{sr}])}{dt} [i_r] \\ [v_r] = [R_r][i_r] + [M_{rs}] \frac{d}{dt}([i_s]) + \frac{d([M_{rs}])}{dt} [i_s] + [L_{rr}] \frac{d}{dt}([i_r]) \end{cases} \quad (\text{III.9})$$

Comme les inductances mutuelles stator/rotor ne dépendent pas du temps mais de θ_r , on établit un changement de variable, d'où l'équation (III.9) devient :

$$\begin{cases} [v_s] = [R_s][i_s] + [L_{ss}] \frac{d}{dt}([i_s]) + [M_{sr}] \frac{d}{dt}([i_r]) + \frac{d\theta_r}{dt} \frac{d([M_{sr}])}{d\theta_r} [i_r] \\ [v_r] = [R_r][i_r] + [M_{rs}] \frac{d}{dt}([i_s]) + \frac{d\theta_r}{dt} \frac{d([M_{rs}])}{d\theta_r} [i_s] + [L_{rr}] \frac{d}{dt}([i_r]) \end{cases} \quad (\text{III.10})$$

$$\text{Où : } \frac{d}{dt}([M_{sr}]) = \frac{d\theta_r}{d\theta_r} \frac{d}{dt}([M_{sr}]) = \frac{d\theta_r}{dt} \frac{d}{d\theta_r}([M_{sr}]) = \omega_r \frac{d}{d\theta_r}([M_{sr}]).$$

Le système d'équations (III.10) devient :

$$\begin{cases} [v_s] = [R_s][i_s] + [L_{ss}] \frac{d}{dt}([i_s]) + [M_{sr}] \frac{d}{dt}([i_r]) + \omega_r \frac{d([M_{sr}])}{d\theta_r} [i_r] \\ [v_r] = [R_r][i_r] + [M_{rs}] \frac{d}{dt}([i_s]) + \omega_r \frac{d([M_{rs}])}{d\theta_r} [i_s] + [L_{rr}] \frac{d}{dt}([i_r]) \end{cases} \quad (\text{III.11})$$

On peut réécrire le système (III.11) sous la forme Cauchy suivante:

Chapitre III : Modèle de la MAS en présence d'un défaut statorique dans le repère (abc)

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} [i_s] = [L_{ss}]^{-1} \left\{ [v_s] - [R_s][i_s] - [M_{sr}] \frac{d}{dt} ([i_r]) - \omega_r \frac{d([M_{sr}])}{d\theta_r} [i_r] \right\} \\ \frac{d}{dt} [i_r] = [L_{rr}]^{-1} \left\{ [v_r] - [R_r][i_r] - [M_{rs}] \frac{d}{dt} ([i_s]) - \omega_r \frac{d([M_{rs}])}{d\theta_r} [i_s] \right\} \end{cases} \quad (\text{III.12})$$

Les dérivées de l'inductance mutuelle entre le stator et le rotor sont:

$$\frac{d}{d\theta_r} [M_{sr}] = \frac{d}{d\theta_r} [M_{rs}]^t = -L_m \cdot \begin{bmatrix} (1-\mu) \cdot \sin(\theta_r) & (1-\mu) \cdot \sin(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & (1-\mu) \cdot \sin(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) \\ \mu \cdot \sin(\theta_r) & \mu \cdot \sin(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & \mu \cdot \sin(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta_r) & \sin(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta_r) \end{bmatrix} \quad (\text{III.13})$$

III.2.4 Equation du couple électromagnétique

Le couple électromagnétique développé par le MAS est obtenu grâce à la co-énergie. Aussi, on rappelle que de manière générale celui-ci s'écrit :

$$C_{em} = \frac{p}{2} \begin{bmatrix} [i_s] \\ [i_r] \end{bmatrix}^t \left\{ \frac{d}{d\theta_r} \begin{bmatrix} [L_{ss}] & [M_{sr}] \\ [M_{rs}] & [L_{rr}] \end{bmatrix} \right\} \begin{bmatrix} [i_s] \\ [i_r] \end{bmatrix} \quad (\text{III.14})$$

Sachant que les matrices $[L_{ss}]$ et $[L_{rr}]$ sont indépendantes de la position, l'expression du couple électromagnétique se réduit à :

$$C_{em} = p [i_s]^t \left\{ \frac{d}{d\theta_r} [M_{sr}] \right\} [i_r] \quad (\text{III.15})$$

III.2.5 Equation mécanique

L'équation fondamentale du mouvement de la machine est donnée par:

$$J \frac{d\Omega_r}{dt} = C_{em} - C_r - K_f \Omega_r \quad (\text{III.16})$$

III.2.6 Simulation et interprétations des résultats du MAS en présence d'un court-circuit entre spire dans la phase statorique (as)

Afin d'étudier le défaut de court-circuit entre-spices, des simulations ont été effectuées. Des courts circuits ont été pratiqués uniquement sur le bobinage de la phase as, le nombre de spires court-circuité varie de 10%, 25% et 50% du nombre total de spires appartenant à la même phase.

Nous avons réalisé un bloc de simulation de la MAS dans le model (abc) avec défaut sous l'environnement MATLAB/Simulink, à partir d'un développement mathématique des

Chapitre III : Modèle de la MAS en présence d'un défaut statorique dans le repère (abc)

équations électriques et mécanique, ensuite la MAS est alimentée par un système triphasé équilibré de tension (110V-50Hz), lors d'un démarrage à vide, suivi de l'application d'une charge à l'instant $t = 4$ s d'une valeur de 100 N.m, suivi d'une visualisation des composants (courants statoriques et rotoriques, vitesse rotation et couple) ainsi que les résultats sont affichés et commentés.

III.2.6.1 Résultats de simulation d'un court-circuit de 10% entre spiredans la phase statorique (a)

Lors du démarrage à vide, le couple électromagnétique, sur la figure III.2 passe par un régime transitoire. Il présente des oscillations qui atteignent une valeur maximale de 240 N.m, puis une diminution qui provoque des ondulations de couple dans l'intervalle $C_{em_max} = 13N.m$ et $C_{em_min} = -10N.m$, à partir $t=4s$, l'application de charger augmente la valeur du couple jusqu'à 101 N.m et provoque une diminution d'ondulation d'un pourcentage de $\Delta C_{em} = \frac{C_{em_max}-C_{em_min}}{C_{em_moy}} = \frac{108-95}{100} = 13\%$.

La vitesse rotorique, représente la figure III.3, passe aussi par un régime transitoire d'une durée de 1.8 s qui représente le temps de réponse de la machine, puis elle se stabilise au régime permanent, mais il y a une faible perturbation de pourcentage $\Delta\Omega_r = \frac{\Omega_{r_max}-\Omega_{r_min}}{\Omega_{r_moy}} = \frac{313.6817-313.6015}{313.6} = 0.025\%$ à cause de défaut au voisinage de la vitesse de synchronisme d'une valeur 313.6 rd/s. Ensuite, lorsque on applique une charge à $t=4$ s sa valeur diminue jusqu'à 267.4 rd/s, mais il y a toujours une légère perturbation $\Delta\Omega_r = \frac{\Omega_{r_max}-\Omega_{r_min}}{\Omega_{r_moy}} = \frac{267.4065-267.3647}{267.4} = 0.015\%$.

Au démarrage, les courants statoriques sur la figure III.4 passent par un régime transitoire des valeurs efficaces très élevées ($I_{sa1}=212$ A, $I_{sa2}=286.2$ A et $I_{sb}=141.4$ A et $I_{sc}=141.4$ A, puis ils diminuent et prennent une forme sinusoïdale au régime permanent pour atteindre les valeurs efficace ($I_{sa1}=44.6$ A, $I_{sb}=9.72$ A et $I_{sc}=9.7$ A, par contre le courant I_{sa2} augmente jusqu'à 506.3 A. Quand on applique une charge à $t=4$ s les courants statoriques augmentent ($I_{sa1}=103.9$ A, $I_{sb}=63.32$ A et $I_{sc}=63.3$ A) , mais I_{sa2} diminue jusqu'à 425.8 A.

Au démarrage les courants rotoriques représenté par la figure III.5 passent par un régime transitoire d'une valeur efficace 148.5 A. Ils diminuent et prennent une forme sinusoïdale au régime permanent pour atteindre la valeur efficace 7.1 A. Lorsque, on applique la charge sa

Chapitre III : Modèle de la MAS en présence d'un défaut statorique dans le repère (abc)

valeur efficace augmente jusqu'à 70.7 A, il y'a une perturbation à cause d'influence des courants statoriques.

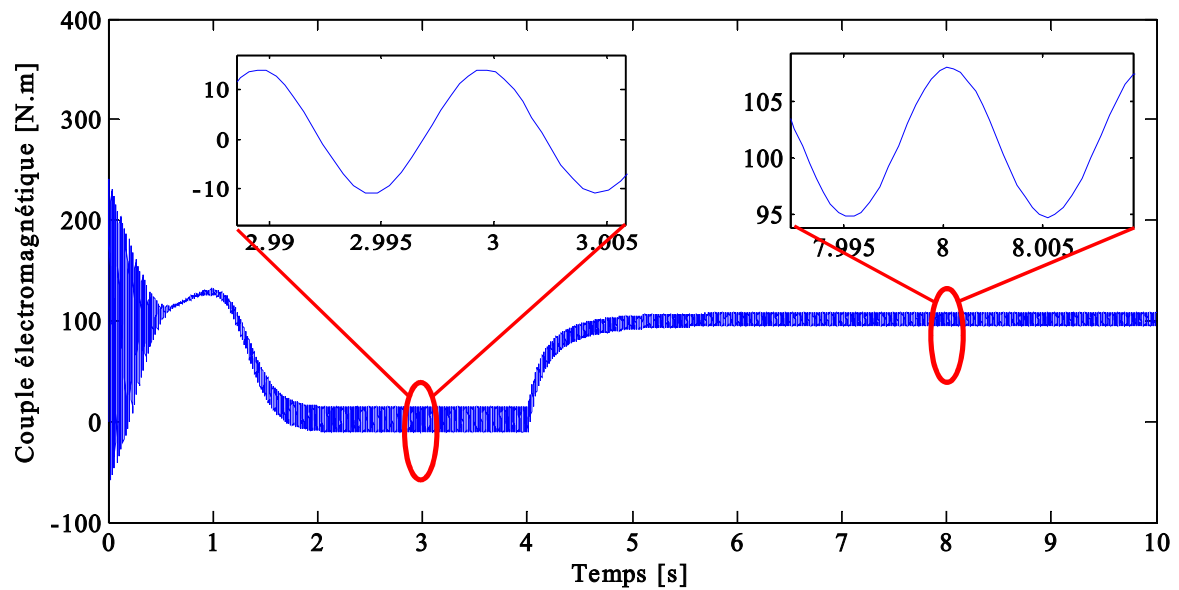


Figure III.2 : Allure du couple électromagnétique $\mu = 10\%$

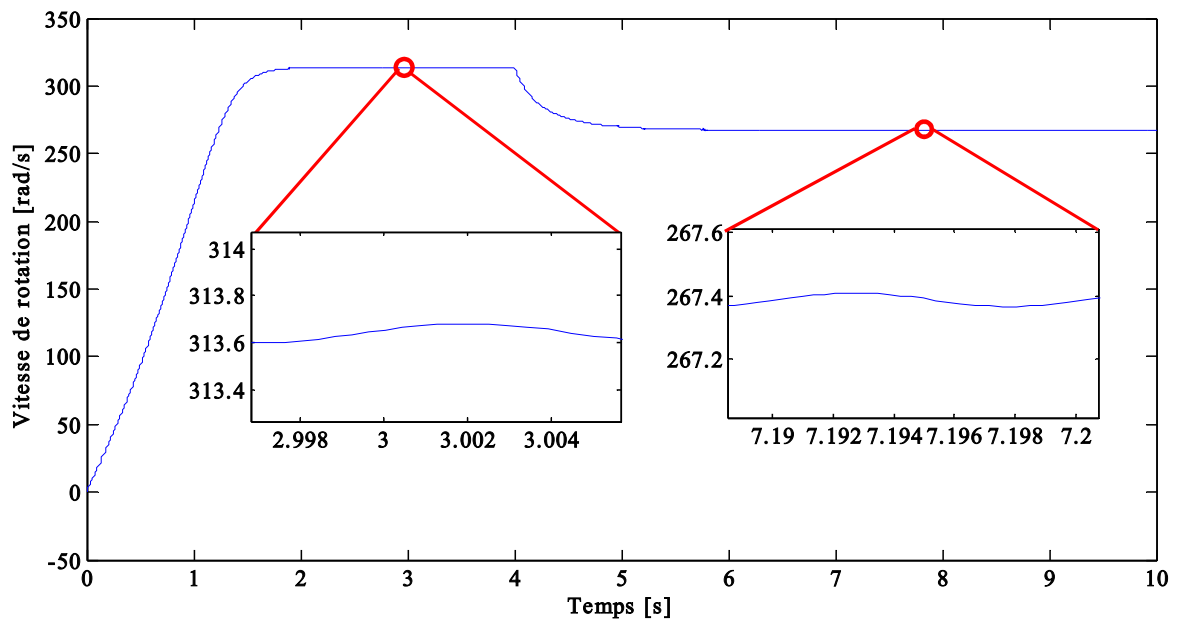


Figure III.3 : Allure de la vitesse électrique de rotation $\mu = 10\%$

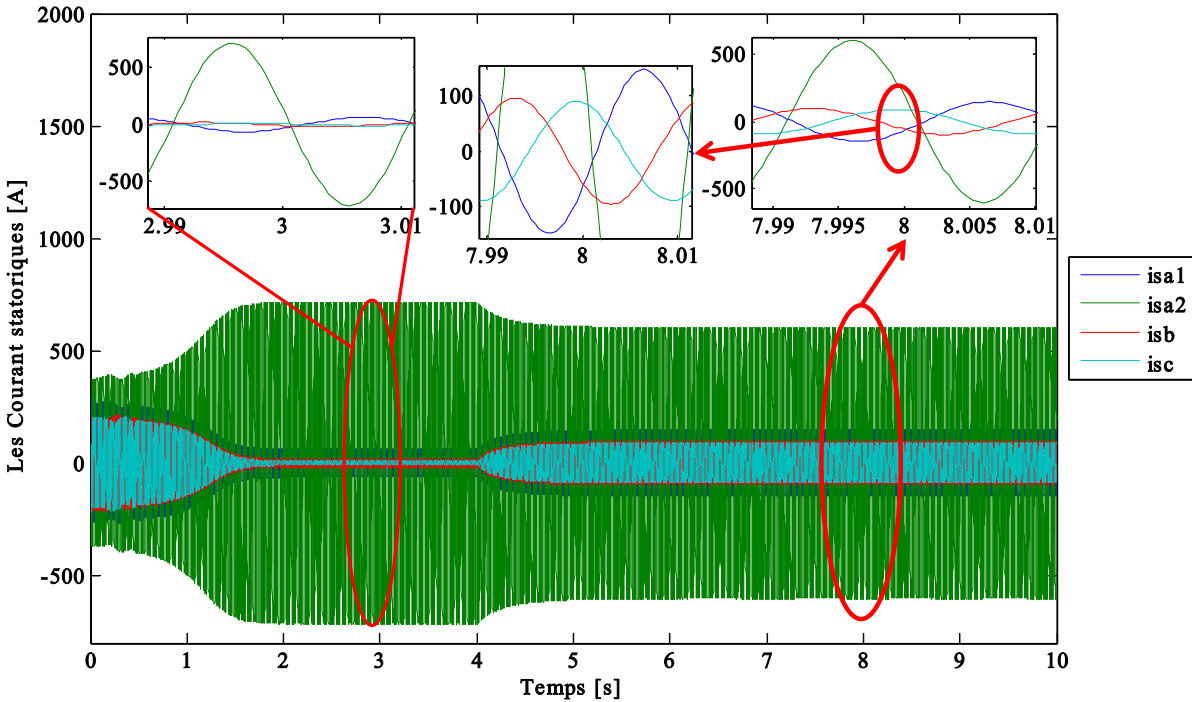


Figure III.4 : Allures des courants dans les quatre phases statoriques $\mu = 10\%$

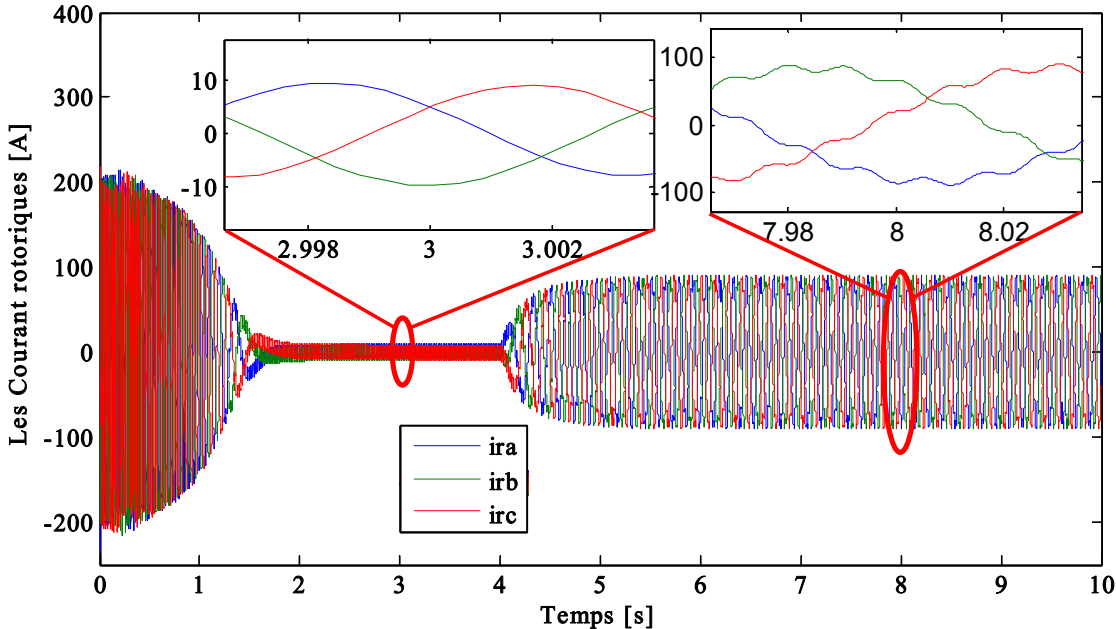


Figure III.5 : Allures des courants rotoriques $\mu = 10\%$

Chapitre III : Modèle de la MAS en présence d'un défaut statorique dans le repère (abc)

III.2.6.2 Résultats de simulation d'un court-circuit de 25 % entre spire dans la phase statorique (a)

Lors du démarrage à vide, le couple électromagnétique, sur la figure III.6 passe par un régime transitoire. Il présente des oscillations qui atteignent une valeur maximale de 240 N.m, puis une diminution qui provoque des ondulations de couple dans l'intervalle $C_{em_max} = 20 \text{ N.m}$ et $C_{em_min} = -19 \text{ N.m}$, à partir $t=4 \text{ s}$, l'application de la charge augmente la valeur de couple jusqu'à 103 N.m et provoque une diminution d'ondulation d'un pourcentage de $\Delta C_{em} = 16\%$.

La vitesse rotorique électrique, représentée la figure III.7, passe aussi par un régime transitoire d'une durée de 1.9 s qui représente le temps de réponse de la machine, puis elle se stabilise au régime permanent, mais il y'a une perturbation de pourcentage $\Delta \Omega_r = 0.038\%$ à cause de défaut au voisinage de la vitesse de synchronisme d'une valeur 313.6 rd/s. Ensuite, lorsque on applique une charge à $t=4 \text{ s}$ sa valeur diminue jusqu'à 265 rd/s, mais il y a toujours des perturbations $\Delta \Omega_r = 0.019\%$.

Au démarrage, les courants statoriques sur la figure III.8 passent par un régime transitoire d'une valeur efficace très élevée ($I_{sa1}=280.4 \text{ A}$, $I_{sa2}=278.2 \text{ A}$ et $I_{sb}=170.3 \text{ A}$ et $I_{sc}=169.95 \text{ A}$), puis ils diminuent et prennent une forme sinusoïdale au régime permanent pour atteindre les valeurs efficaces ($I_{sa1}=176.77 \text{ A}$, $I_{sb}=70.1 \text{ A}$ et $I_{sc}=69.95 \text{ A}$), par contre le courant I_{sa2} augmente jusqu'à 392.3 A. Quand on applique une charge à $t=4 \text{ s}$ les courants statoriques augmentent ($I_{sa1}=156.9 \text{ A}$, et $I_{sb}=71.3.7 \text{ A}$ et $I_{sc}=70.9 \text{ A}$), mais I_{sa2} diminue jusqu'à 388.9 A.

Au démarrage les courants rotoriques représentés par la figure III.9 passent par un régime transitoire d'une valeur efficace 150.95 A. Ils diminuent et prennent une forme sinusoïdale au régime permanent pour atteindre la valeur efficace 8.48 A. Lorsque on applique la charge sa valeur efficace augmente jusqu'à 70.8 A, il y'a une perturbation à cause d'influence des courants statoriques.

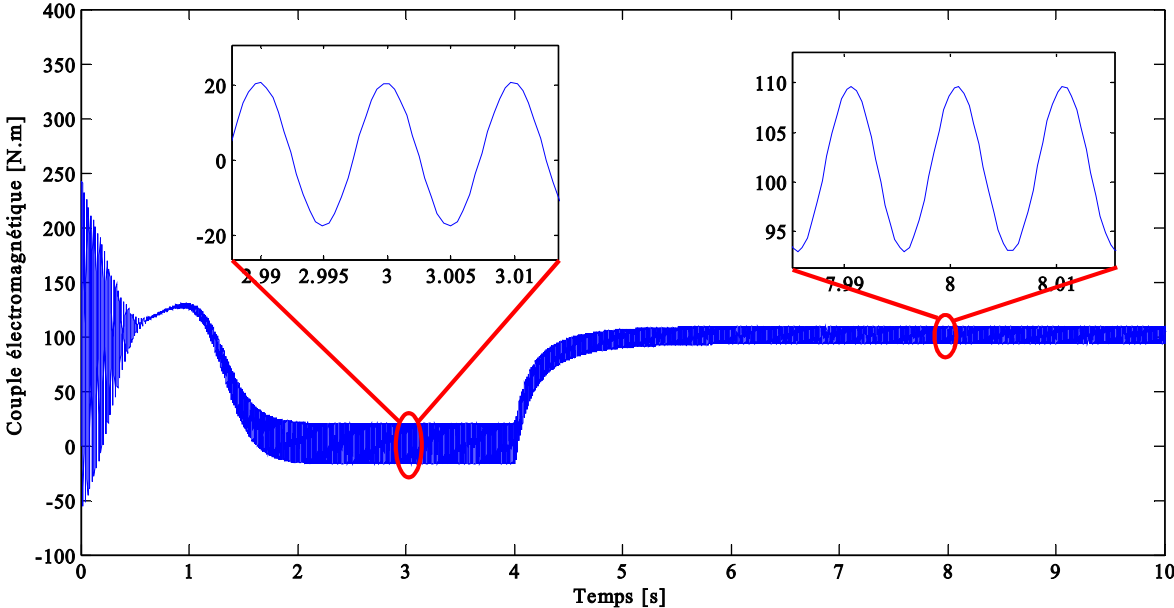


Figure III.6 : Allure du couple électromagnétique $\mu = 25\%$

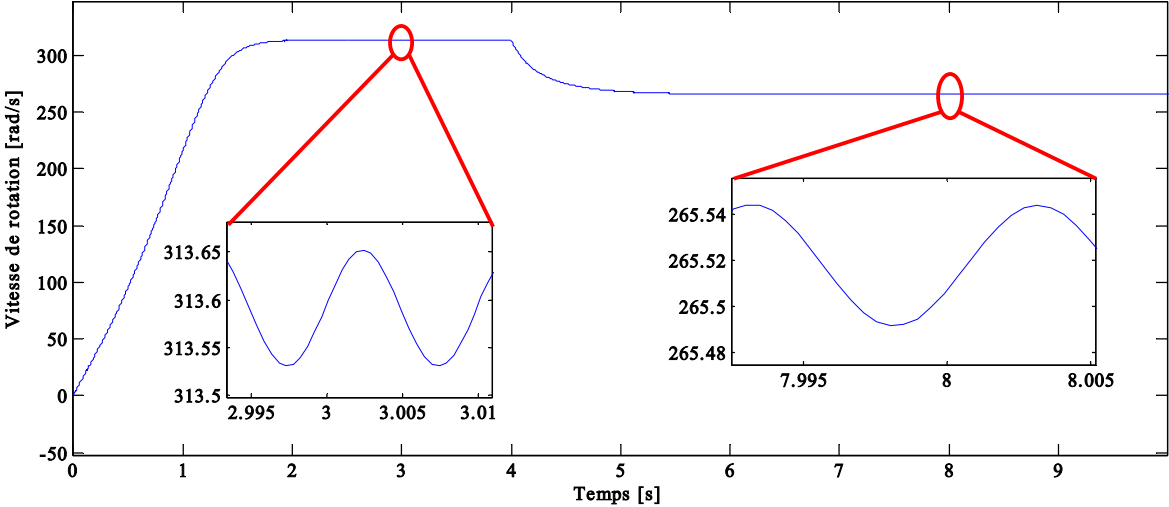


Figure III.7: Allure de la vitesse rotorique électrique $\mu = 25\%$

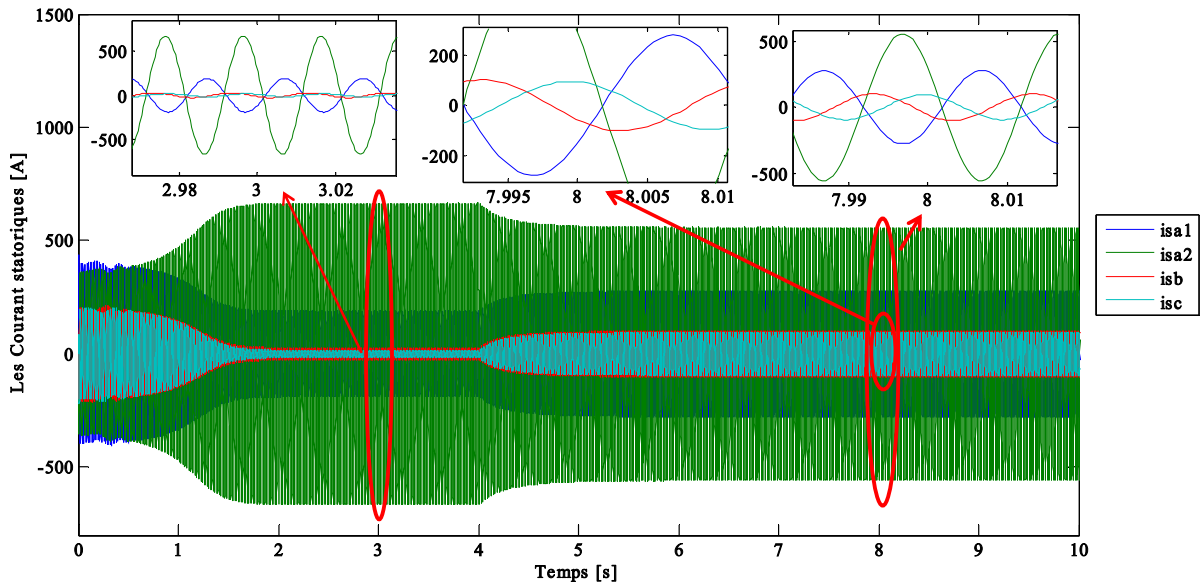


Figure III.8 : Allure des courants dans les quatre phases statoriques $\mu = 25\%$

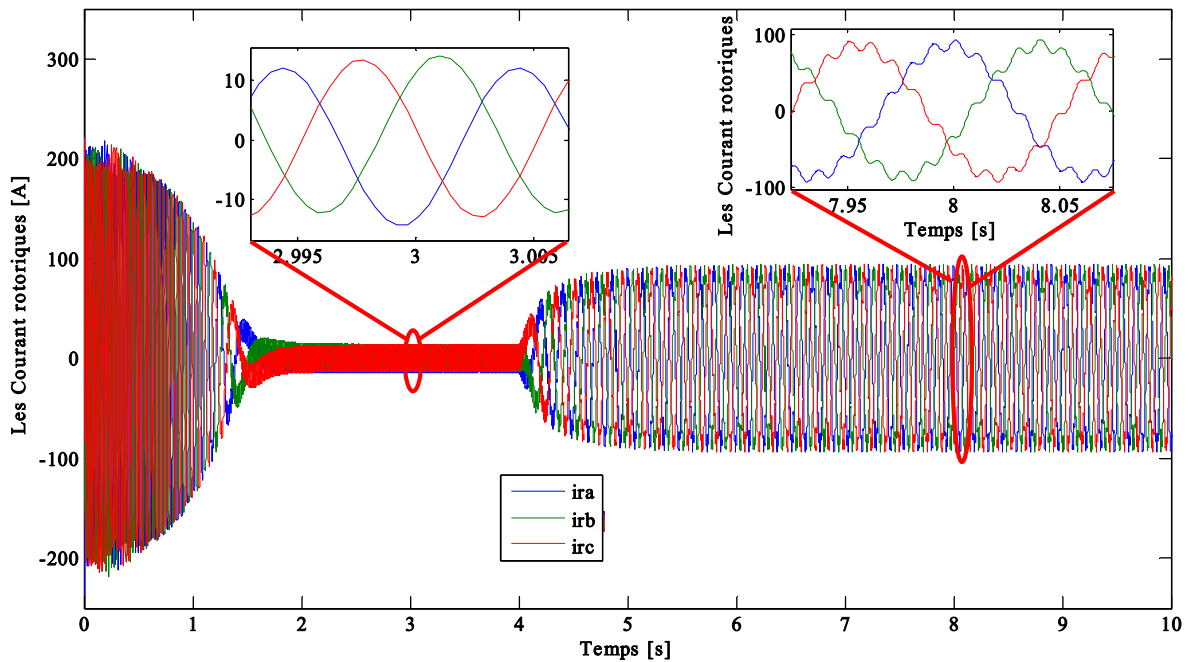


Figure III.9 : Allure des courants rotoriques $\mu = 25\%$

III.2.6.3 Résultats de simulation d'un court-circuit de 50 % entre spire dans la phase statorique (a)

Lors du démarrage à vide, le couple électromagnétique, sur la figure III.10 passe par un régime transitoire. Il présente des oscillations qui atteignent une valeur maximale de 240 N.m,

Chapitre III : Modèle de la MAS en présence d'un défaut statorique dans le repère (abc)

puis une diminution qui provoque des ondulations de couple dans l'intervalle $C_{em_max} = 2.5 \text{ N.m}$ et $C_{em_min} = -0.5 \text{ N.m}$, à partir $t=4 \text{ s}$, l'application de charge augmente la valeur couple jusqu'à 103 N.m provoque une diminution d'ondulation d'un pourcentage de $\Delta C_{em} = 17\%$.

La vitesse rotorique, représentée la figure III.11, passe aussi par un régime transitoire d'une durée de 1.95 s qui représente le temps de réponse de la machine, puis elle se stabilise au régime permanent, mais il y'a une perturbation de pourcentage $\Delta\Omega_r = 0.002 \%$ à cause de défaut au voisinage de la vitesse de synchronisme d'une valeur 313.66 rd/s . Ensuite, lorsque on applique une charge à $t=4 \text{ s}$ sa valeur diminue jusqu'à 269 rd/s , mais il y a toujours des perturbations $\Delta\Omega_r = 0.02 \%$.

Au démarrage, les courants statoriques sur la figure III.12 passent par un régime transitoire d'une valeur efficace très élevée ($I_{sa1}=629.4 \text{ A}$, $I_{sa2}=243.2 \text{ A}$ et $I_{sb}=134.35 \text{ A}$ et $I_{sc}=134.05 \text{ A}$), puis ils diminuent et prennent une forme sinusoïdale au régime permanent pour atteindre les valeurs efficace ($I_{sa1}=424.27 \text{ A}$, $I_{sb}=4.9 \text{ A}$ et $I_{sc}=4.85 \text{ A}$, par contre le courant I_{sa2} augmente jusqu'à 410.3 A . Quand on applique une charge à $t=4 \text{ s}$ les courants statoriques augmentent ($I_{sa1}=487.1 \text{ A}$, et $I_{sb}=53.75 \text{ A}$ et $I_{sc}=53.25 \text{ A}$), mais I_{sa2} diminue jusqu'à 353.6 A , ce moteur sera grillé si il n'est pas protégé.

Au démarrage les courants rotoriques représentés par la figure III.13 passent par un régime transitoire d'une valeur efficace 151.95 A . Ils diminuent et prennent une forme sinusoïdale au régime permanent pour atteindre la valeur efficace de 2.5 A . Lorsque, on applique la charge sa valeur efficace augmente jusqu'à 70.8 A , il y'a perturbation à cause de l'influence des courants statoriques.

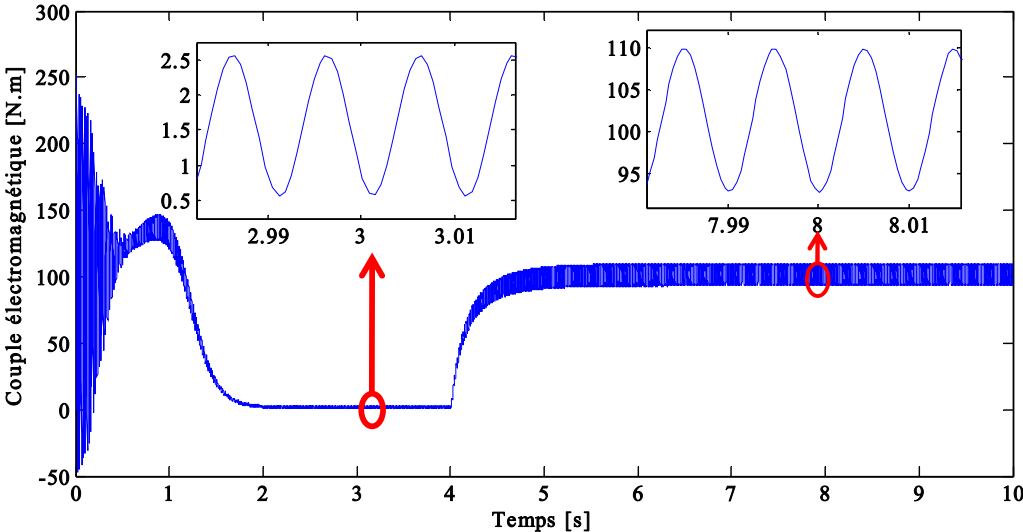


Figure III.10 : Allure du couple électromagnétique $\mu = 50\%$

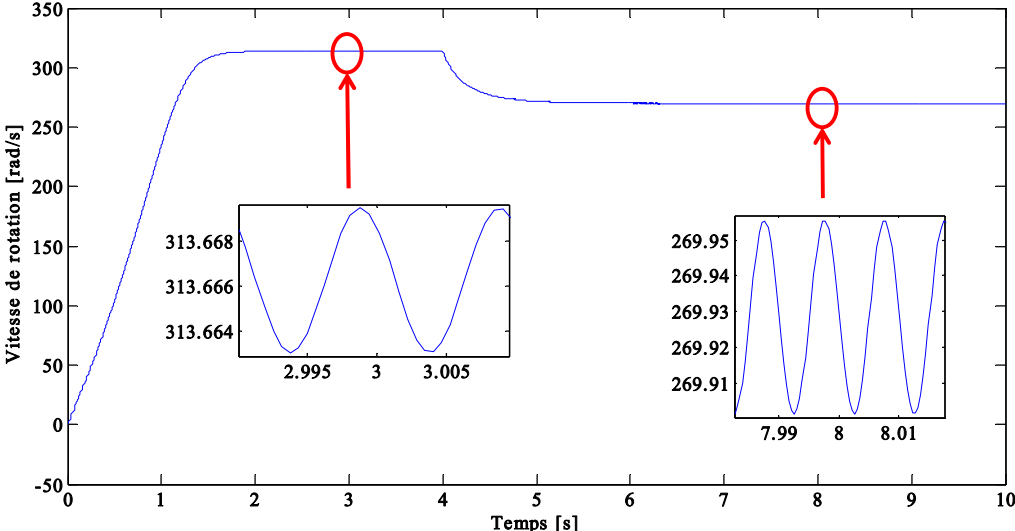


Figure III.11: Allure de la vitesse rotorique électrique $\mu = 50\%$

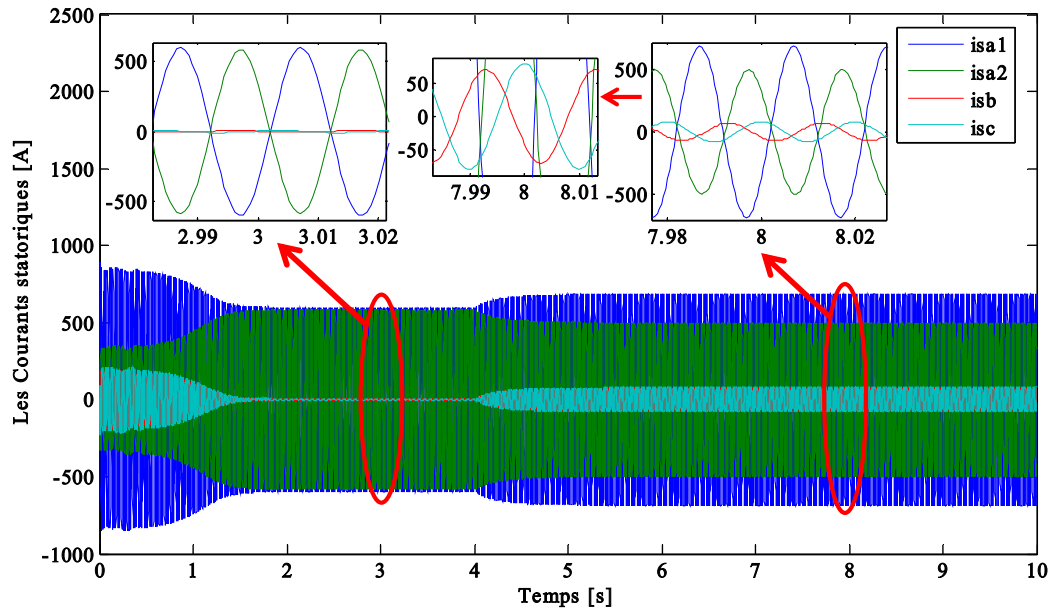


Figure III.12 : Allures des courants dans les quatre phases statoriques $\mu = 50\%$

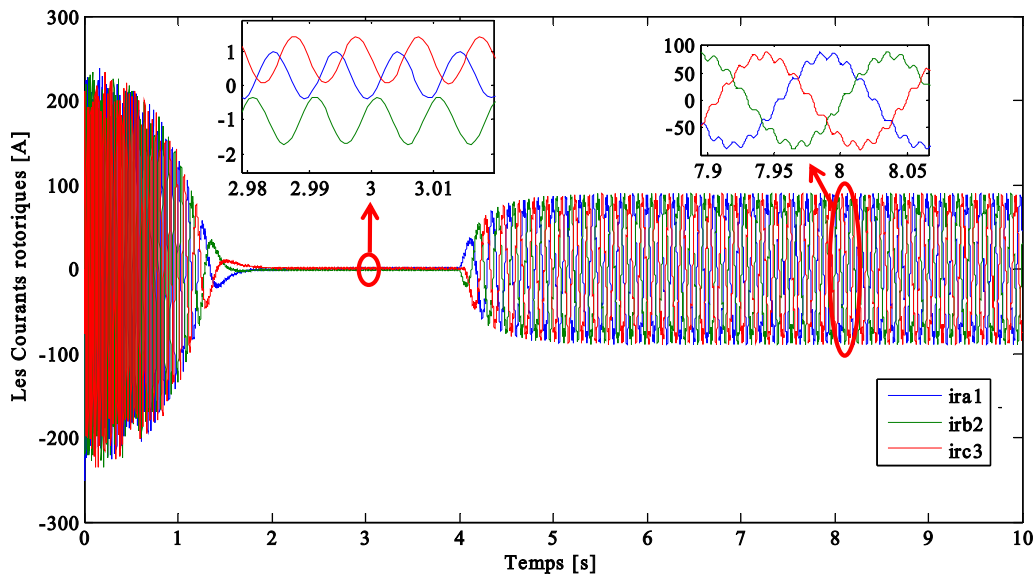


Figure III.13 : Allures des courants rotoriques $\mu = 50\%$

III.2.6.4 Analyse spectrale des courants statoriques de la MAS dans le model (abc) en présence d'un défaut de court-circuit dans la phase (as)

Comme nous avons constaté, il est parfois difficile de se contenter uniquement sur les résultats obtenus précédemment pour détecter un défaut. L'analyse directe des grandeurs électriques et électromécaniques reste imprécise pour l'étude des défauts. Dans ce qui suit, nous utilisons la transformée de Fourier Rapide (FFT), pour mieux quantifier les anomalies

Chapitre III : Modèle de la MAS en présence d'un défaut statorique dans le repère (abc)

introduites par les défauts en analysant particulièrement les raies de fréquences à proximité du fondamental. Une méthode basée sur l'analyse spectrale des signaux des courants statoriques constitue un meilleur outil permettant de détecter les défauts.

Les figures (III.14 et III.15), représentent respectivement les spectres relatifs aux courants statoriques i_{sa1} et i_{sb} avec un court-circuit entre spires à 50%. On observe l'apparition du pic de défaut au côté gauche du fondamental la phase qui présente le défaut figure(III.14). En revanche, dans la figure (III.15) on remarque juste le pic d'amplitude à la fréquence fondamentale à 50Hz.

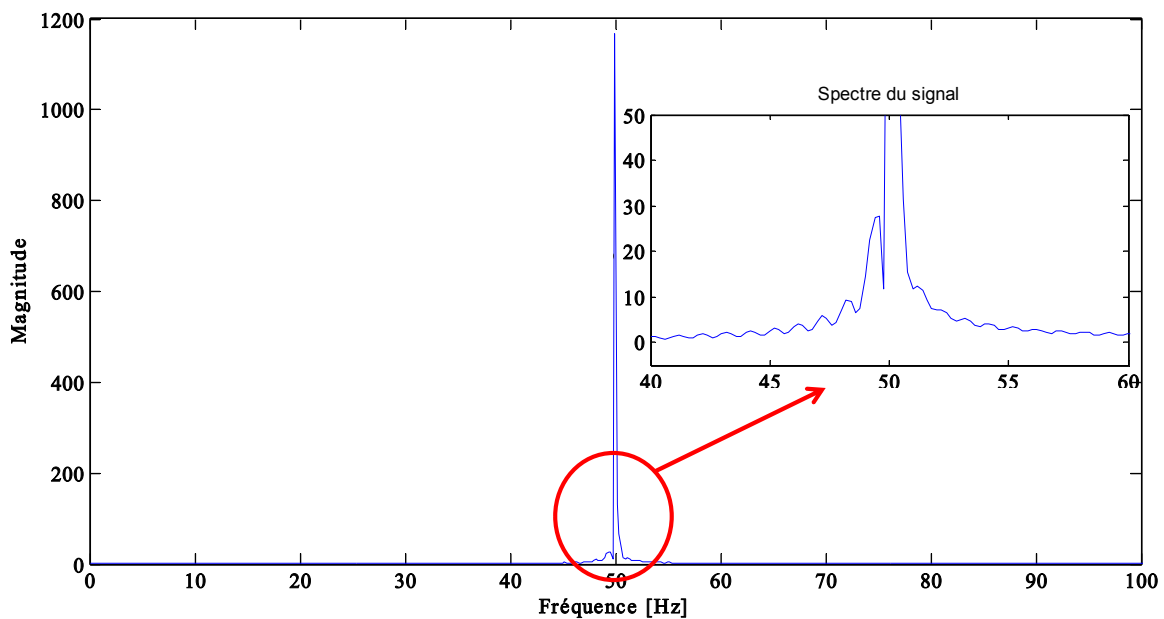


Figure III.14:Spectre du courant de la phase statorique (a) lors d'un court-circuit dans la phase (a) à $\mu=50\%$

III.3 Influence de la connexion du neutre à la terre dans le cas d'un court-circuit total d'une phase

III.3.1. Simulation sur logiciel PSim

Nous avons implémenté le modèle d'une MAS sur le logiciel PSim afin d'évaluer l'influence de la connexion du neutre du MAS au neutre de la source lors de la présence d'un défaut de court-circuit dans une phase. La structure du MAS, alimentée par un système triphasé équilibré de tension (220V - 50Hz), est présentée par la figure (III.16).

Chapitre III : Modèle de la MAS en présence d'un défaut statorique dans le repère (abc)

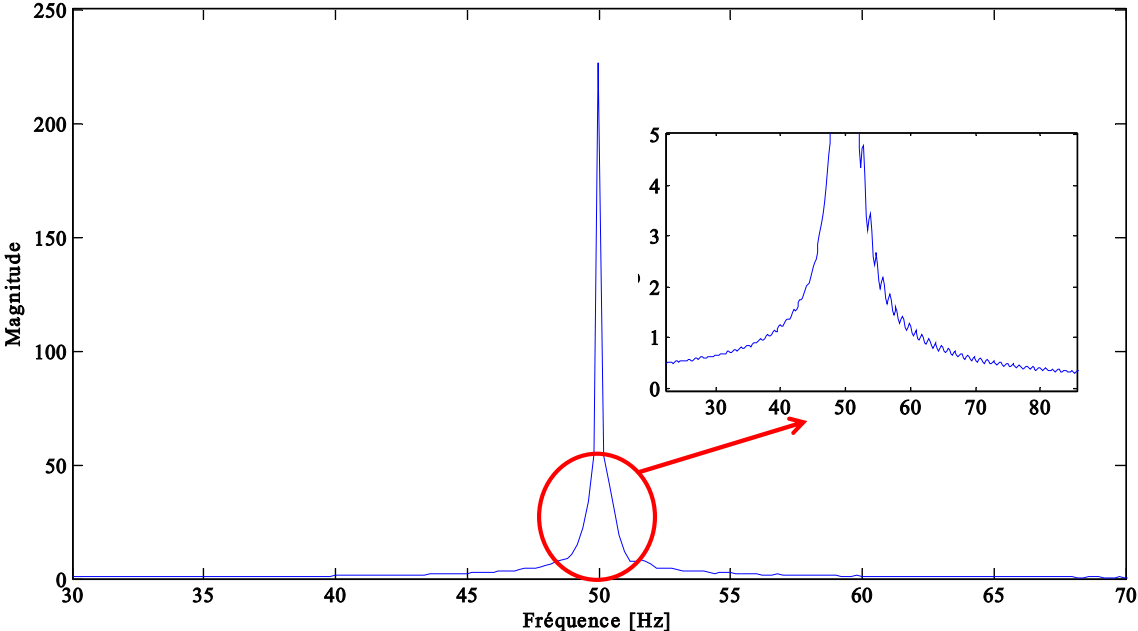


Figure III.15 : Spectre du courant de la phase statorique (b) lors d'un court-circuit dans la phase (a) à $\mu = 50\%$

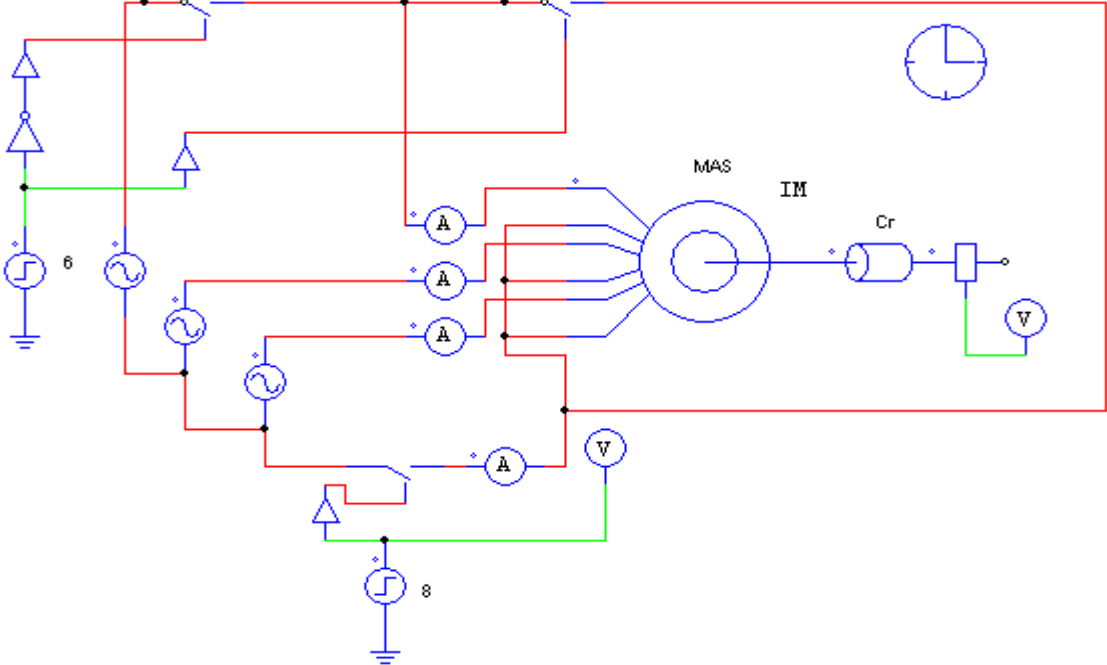


Figure III.16 : Schéma bloc global de simulation du MAS sans ou avec connexion des deux dans le cas d'un défaut de court-circuit total de la phase (as)

III.3.2 Interprétation des résultats

Les figures (III.17-III.19) présentent les résultats de simulation d'un démarrage du MAS en mode sain puis nous avons effectué une ouverture d'une phase(A) en court-circuit total à l'instant de $t=6s$ à $t=8s$ nous avons ouverture d'une phase (A) en court-circuit total d'une phase et le neutre de l'enroulement reliée avec le neutre de la source.

La figure (III.17) représentent les courants statoriques, à $t=6s$ ouverture de la phase a en court-circuit total les courants statoriques augmentent et prennent la valeur 127.2(A). Puis $t=8s$ en court-circuit total de la phase statoriquea, le neutre statorique est reliée au neutre de la source d'alimentation, les courants statoriques augmentent jusqu'à 176.7(A).

A $t=6(s)$ ouverture d'une phase (A) en court-circuit total la valeur couple électromagnétique 17 N.m et provoque des ondulations de $\Delta C_{em} = \frac{C_{em_max} - C_{em_min}}{C_{em_moy}} = \frac{81 - (-48)}{25} = 5,16\%$. suivie d'une diminution de la vitesse rotorique à une valeur de 2625(tr/min). A $t=8(s)$ le court-circuit total d'une phase et le neutre reliée la valeur de couple électromagnétique égale à 25N.m puis une légère diminution d'ondulation d'une valeur de 4,96% et une augmentation de la vitesse rotorique à une valeur de 2720 (tr/min), représenté dans les figures III.18 et III.19, respectivement.

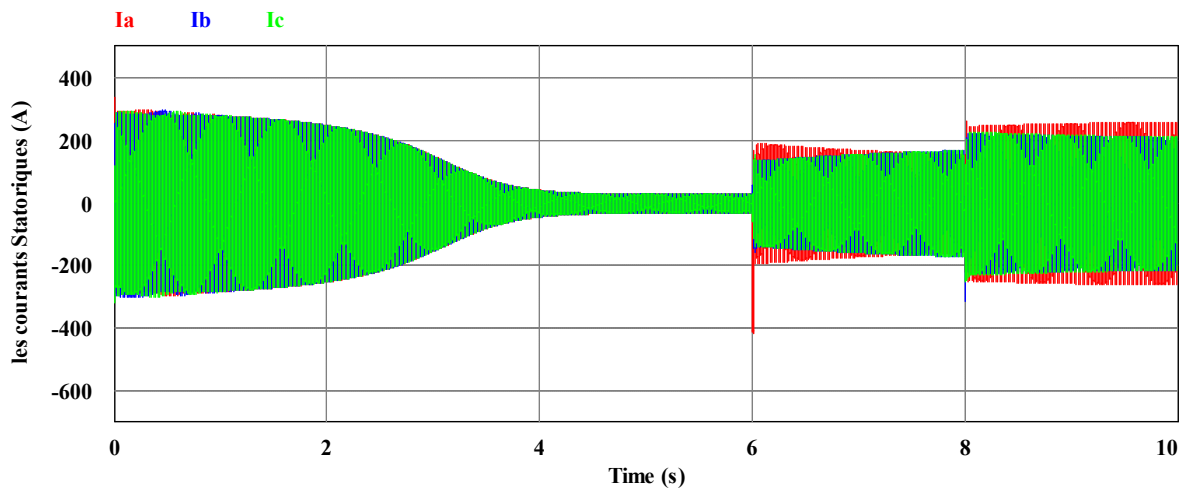


Figure III.17 : Allures des courants statoriques

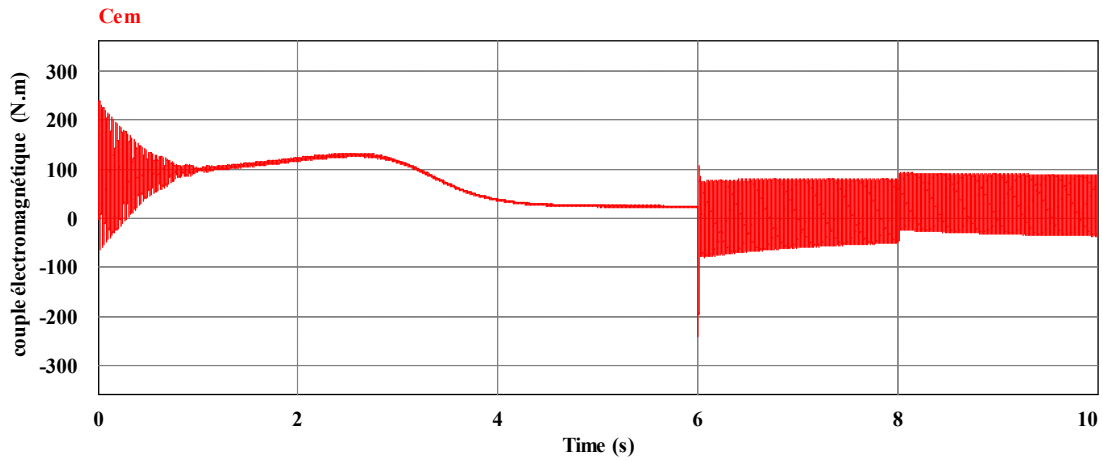


Figure III.18 : Allure du couple électromagnétique

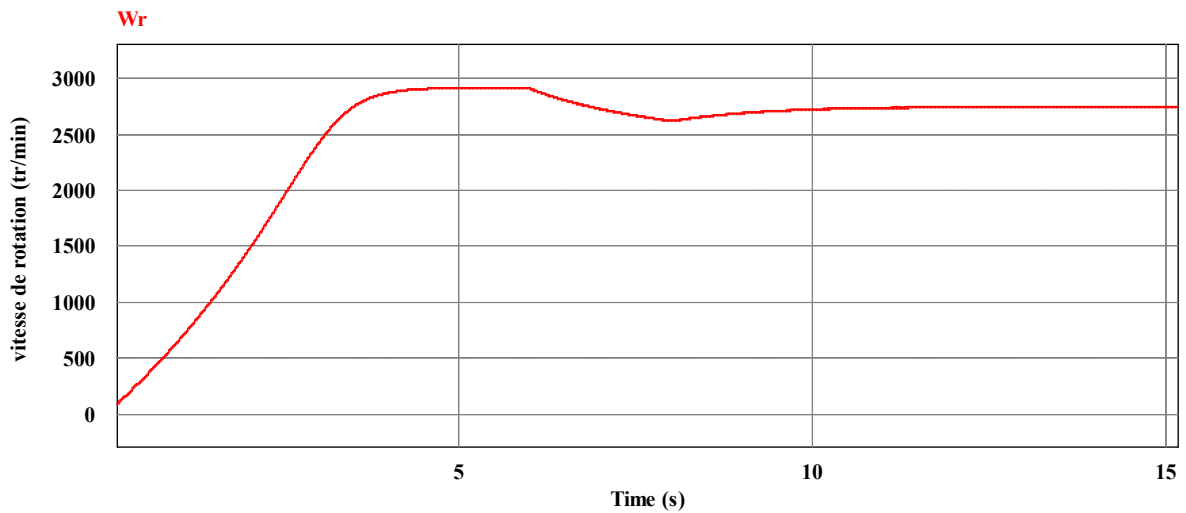


Figure III.19 : Allure de la vitesse de rotation électrique

III.3.3 Analyse spectrale des courants statoriques

L'analyse du spectre des courants statoriques d'un moteur sain révèle un pic d'amplitude à la fréquence fondamentale de 50 Hz, et les trois spectres sont identiques puisqu'il n'y a pas de défaut.

Chapitre III : Modèle de la MAS en présence d'un défaut statorique dans le repère (abc)

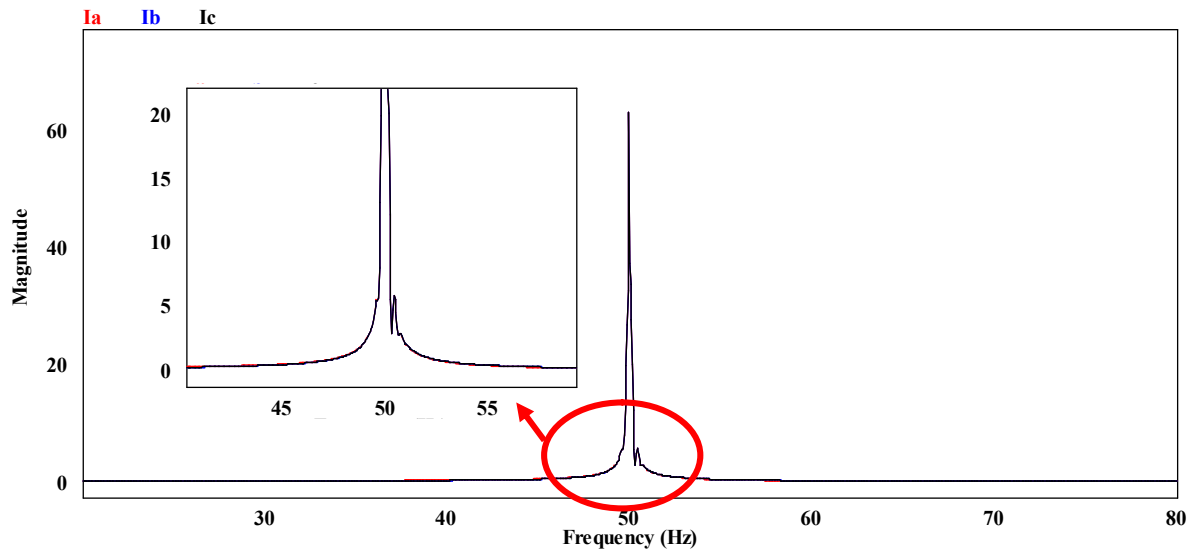


Figure III.20 : Spectres des courants des trois phases statoriques (a) en absence de défauts

D'après les résultats qu'on a obtenu sur la figure III.21, on remarque que la phase Ia qui porte le défaut présente des perturbations sous forme de pics d'amplitudes autour du fondamental de chacune des phases I_a , I_b et I_c , la cause principale de ces perturbations revient au court-circuit présent sur la phase (a).

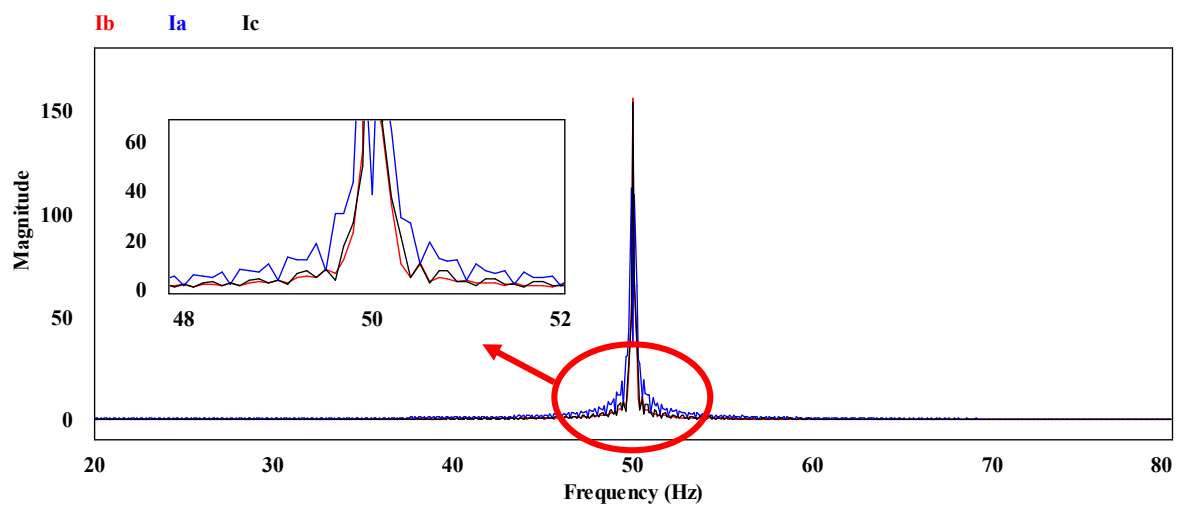


Figure III.21: Spectres des courants des trois phases statoriques en présence d'un défaut de court-circuit total d'une phase avec neutre de l'enroulement statorique lié au neutre de la source

III.4 Résultats de simulation de l'influence de la connexion de neutre dans le cas d'un circuit ouvert d'une phase

III.4.1 Simulation sur le logiciel PSim

Nous avons implanté le modèle d'un MAS sur le logiciel PSim afin d'évaluer l'influence de la connexion des deux neutres de l'enroulement statorique et de la source dans le cas d'un circuit ouvert de la phase a. Le MAS est alimenté par un système triphasé équilibré de tension (220V - 50Hz) et le schéma bloc est présenté par la figure (III.22).

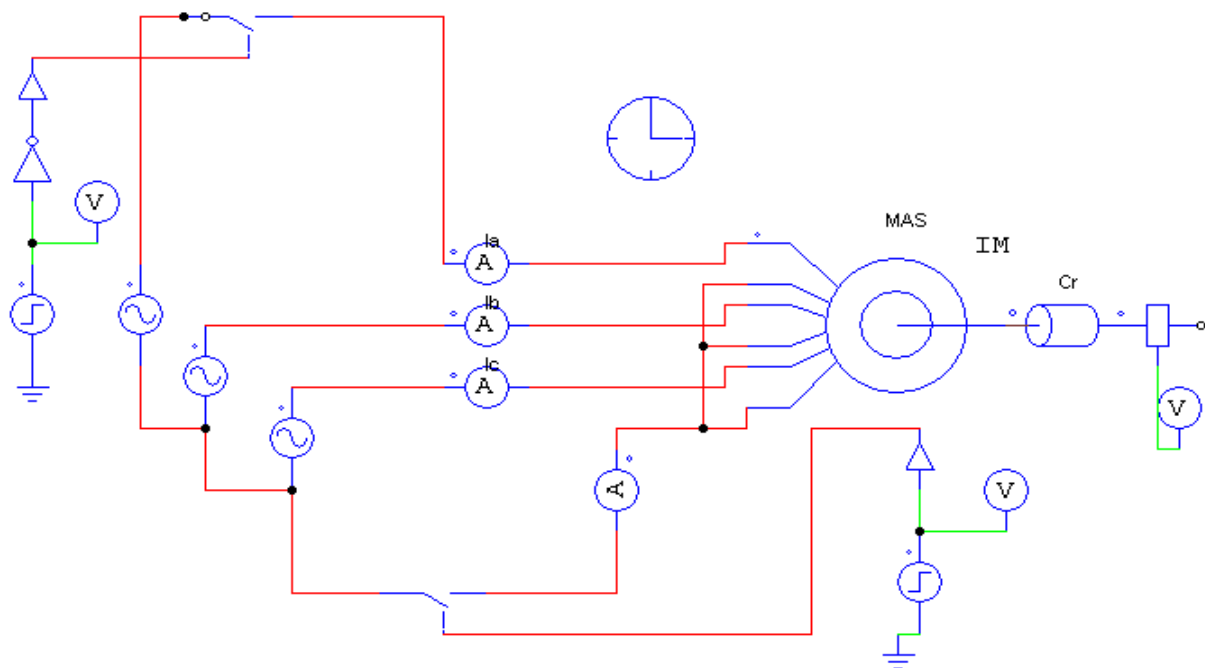


Figure III.22 Schéma bloc global de simulation du MAS avec/sans la connexion des deux neutres de l'enroulement statorique et de la source dans le cas d'un défaut de circuit ouvert de la phase a

III.4.2 Interprétations des résultats

Les figures (III.23 à III.25) présentent les résultats de simulation d'un démarrage du MAS en mode sain puis nous avons effectué une ouverture d'une phase à l'instant $t=6(s)$, $t=8(s)$ nous avons relié le neutre statorique au neutre de la source d'alimentation.

Les figures (III.23) représentent les courants statoriques, à $t=6(s)$ l'ouverture de la phase (a), les courants statoriques des phases (b) et phase (c) augmentent prenant une valeur efficace de 35.3A. Puis $t=8(s)$ en relia le neutre statorique au neutre de la source d'alimentation, les courants i_b , i_c diminuent jusqu'à 28.2A.

Chapitre III : Modèle de la MAS en présence d'un défaut statorique dans le repère (abc)

A $t = 6(s)$ ouverture de la phase (A) la valeur de couple électromagnétique égale à 39 N.m et provoque des ondulations de $\Delta C_{em} = \frac{C_{em_max} - C_{em_min}}{C_{em_moy}} = \frac{97 - (-19)}{25} = 4.6$. suivie d'une réduction de la vitesse rotorique à une valeur de 2908(tr/min). Puis à $t = 8(s)$ le neutre statorique est relié au neutre de la source d'alimentation, qui provoque à son tour une diminution de couple électromagnétique 32 N.m et les ondulations réduit d'une valeur de 2,5% et une augmentation de la vitesse rotorique à une valeur de 2919(tr/min), comme représenté dans la figure III.24 et la figure III.25, respectivement.

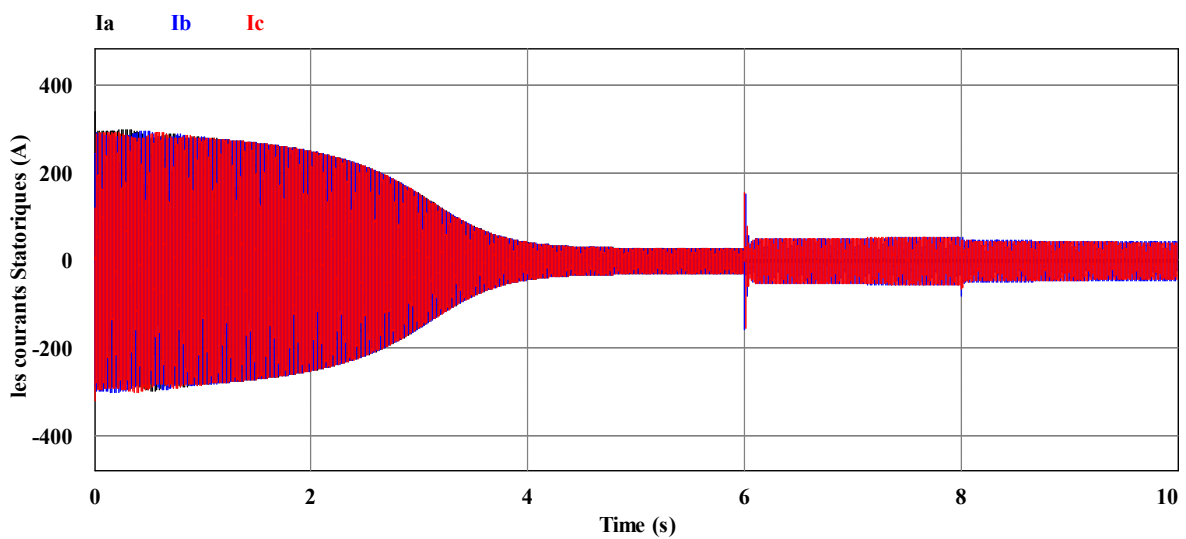


Figure III.23 : Allures descourants dans les trois phases statoriques

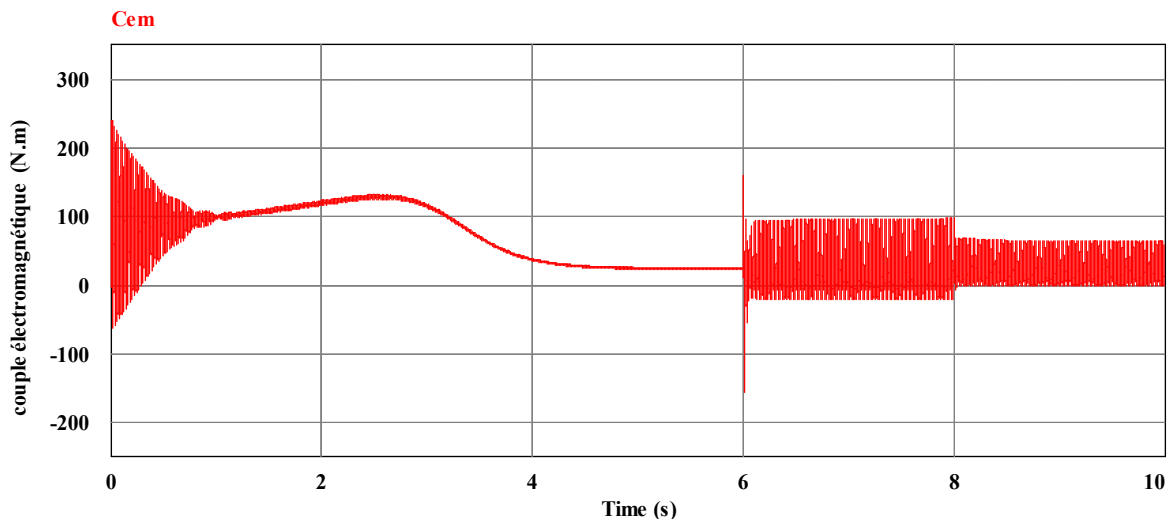


Figure III.24 : Allure du couple électromagnétique

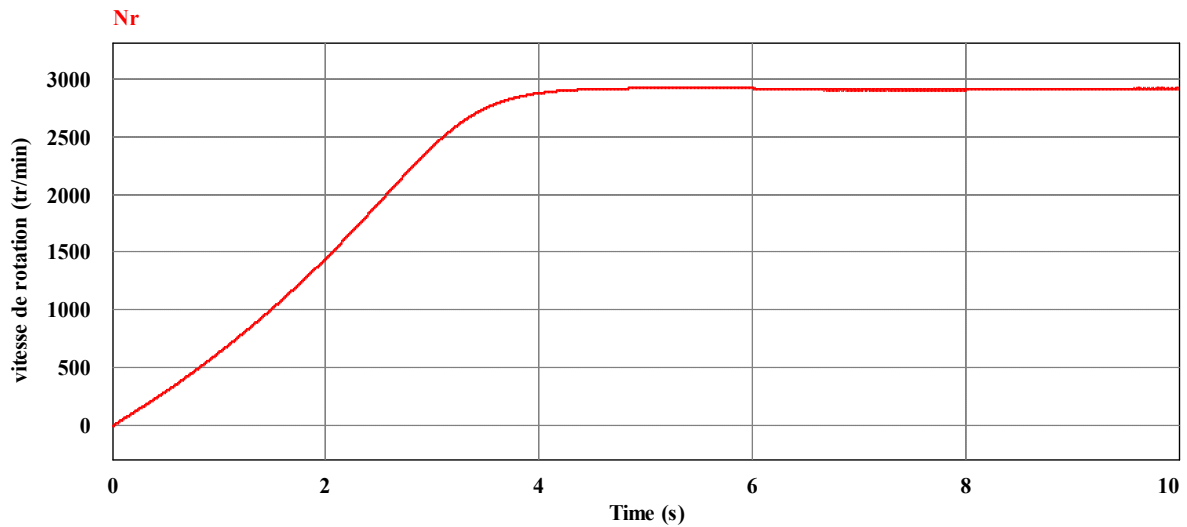


Figure III.25 : Allure de la vitesse de rotation électrique

III.4.3 Analyse spectrale des courants statoriques

Comme nous pouvons le voir sur la figure III.26, lorsqu'un défaut (circuit ouvert de la phase a) se produit, des raies autour de la fréquence fondamentale 50 Hz apparaissent, en comparaison aux spectres de la figure III.20 où il n'y a aucun de défaut.

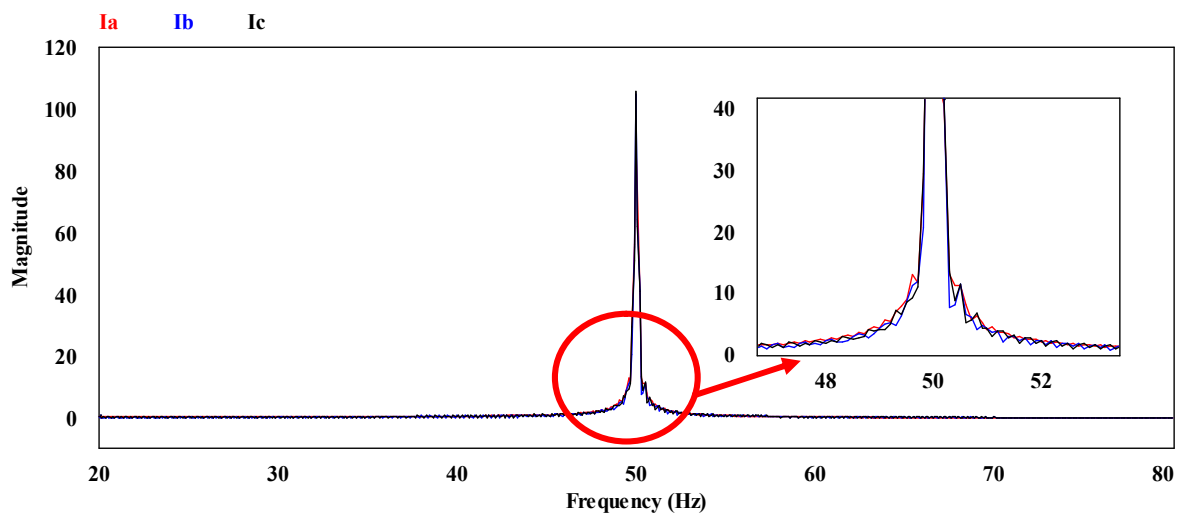


Figure III.26: Spectres des courants des trois phases statoriques (a) en présence d'un défaut de court-circuit d'une phase avec neutre de l'enroulement statorique lié au neutre de la source

III.5 Conclusion

L'apparition d'un défaut entraîne généralement un arrêt irréparable du moteur asynchrone, ce qui entraîne des coûts de maintenance considérables pour l'entreprise (dans le cas des moteurs de forte puissance) sans oublier la perte de production.

Chapitre III : Modèle de la MAS en présence d'un défaut statorique dans le repère (abc)

En effet, la surveillance et le diagnostic des machines asynchrones ont fait l'objet de nombreux travaux. Basé sur un logiciel de surveillance, l'analyse des caractéristiques spectrales du courant de ligne est la première tentative de détection des défauts du moteur.

Cependant, ce que nous avons conclu dans ce chapitre, c'est comment surveiller notre machine, comment extraire le défaut grâce à deux méthodes d'analyse soit l'analyse directe des courants statoriques ou bien une autre analyse plus précise, qui est l'analyse spectrale, et ce d'après les résultats qu'on a obtenu sur les défauts dans le cas d'un court-circuit de certain nombre de spires dans une phase statorique, dans le cas d'un circuit d'une phase statorique ouvert ou totalement court-circuité avec l'influence du neutre relié à la terre.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

Le moteur asynchrone est l'élément le plus utilisé et l'un des plus importants dans les systèmes électromécaniques, son suivi et son diagnostic font encore l'objet de plusieurs études [1].

Notre travail est basé sur la détection précoce des pannes dans le moteur asynchrone en utilisant une méthode de diagnostic par mesure des courants statoriques basée sur l'analyse spectrale car c'est la méthode la plus fiable pour détecter exactement le défaut dans la machine.

Au début de ce travail, nous avons rappelé les principaux éléments de constitution du moteur asynchrone à cage. Puis, nous avons présenté les différents défauts qui peuvent apparaître dans les moteurs asynchrones. Ainsi que les méthodes de diagnostic couramment utilisées.

Afin de mieux maîtriser le moteur, le second chapitre est consacré à la modélisation et la simulation du MAS. Pour cela, nous avons commencé par la modélisation de la machine directement alimentée par une source triphasée et équilibrée dans le repère (abc), puis une modélisation de la MAS dans le repère (d,q,0) est élaborée, pour terminer nous avons relevé les résultats de ces deux simulations sur l'environnement MATLAB/Simulink. Une comparaison entre les deux modèles est faite, les résultats de simulation sont identiques.

Dans le dernier chapitre, nous avons étudié trois cas différents de défaut, le premier cas le court-circuit entre spires de la phase statorique à (10%, 25% et 50%), deuxième cas l'influence de la connexion du neutre à la terre dans le cas d'un court-circuit total d'une phase et le dernier cas la connexion des deux neutres de l'enroulement statorique et de la source dans le cas d'un défaut de circuit ouvert de la phase (a), suivi d'une analyse des performances de la machine.

Lorsque le coefficient (μ), qui est le nombre de spires en court-circuit par rapport au nombre de spires de l'enroulement de la phase (a_s), est égal à 10%, 25% ou 50% et après simulation, les courants sont très élevés par rapport à l'état sain. En effet, le moteur est grillé si la protection de ce moteur est absente et de graves perturbations dans les performances de la machine sont constatées (couple, vitesse du rotorique). C'est pourquoi nous intervenons pour corriger les défauts avant que le problème ne survienne. Par la suite, nous avons constaté que l'ouverture d'une phase statorique ou un court-circuit total d'une phase, provoque chacun d'eux de graves perturbations dans les performances du dispositif (couple, vitesse rotorique, courants statoriques et rotoriques). Et quand le neutre du bobinage statorique est relié au neutre de la

Conclusion générale

source d'alimentation, ces perturbations diminuent. Ainsi la valeur du couple augmente, parce qu'elle dépend de la charge appliquée qui réduit à son tour la vitesse rotorique.

Enfin, nous avons utilisé un programme de transformée de Fourier rapide (FFT), qui nous a permis de déterminer les harmoniques caractérisant les défauts étudiés, c'est-à-dire défaut de court-circuit entre les bobines d'une phase statorique, et dans le cas du court-circuit total d'une phase statorique, ou circuit d'une phase statorique ouvert avec neutre relié à la source.

Comme perspective, il nous semble important de recommander à mener une étude pratique sur l'ensemble des défauts que nous avons cités dans le premier chapitre. Malheureusement, nous n'avons pas eu le temps à effectuer la partie pratique concernant les courts-circuits d'une même phase statorique, un défaut de rupture de barres au rotor, etc., malgré qu'un moteur était déjà prêt à exploiter. Cependant, notre projet a coïncidé avec la période du confinement, nous n'avons pas pu réaliser tout ça, et de faire une simulation complète suivie par des techniques avancées du traitement du signal afin de mieux trouver des solutions rapides et efficaces pour détecter les défaillances avant que le moteur tombe en panne.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] NEZLIOUI S. et YAKOUB. Y., « Diagnostic des défauts de court-circuit statorique d'une machine asynchrone », Mémoire d'Ingénieur d'état en électrotechnique, Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, 2012.
- [2] HAKIMA C. « Détection des défauts statorique et rotorique dans la machine asynchrone en utilisant l'analyse par FFT et ondelettes », Mémoire de Magister, Université de Biskra, 2014.
- [3] <https://www.astuces-pratiques.fr/electronique/le-moteur-asynchrone-principe-de-fonctionnement>, 2020, consulté le 06/8/2020
- [4] BAZI S., « Contribution à la Détection et au Diagnostic des Défauts dans un Système Machine à Induction-Convertisseur », Mémoire d'Ingénieur d'État en Électrotechnique, Université de Batna, 2016.
- [5] <https://www.tecnipass.com/cours-materiels-machines-moteur.asynchrone>, consulté le 05/09/2020.
- [6] GUETTAB A. « Effet de l'alimentation sur la détection des défauts dans une machine asynchrone à cage basée sur l'analyse de signal du courant », mémoire de Magister, université de Chlef, 2011.
- [7] KERROUM B., « Etude et Diagnostic de mauvais branchement d'un moteur à induction », Mémoire de master, Université Badji Mokhtar- Annaba, 2017.
- [8] S. BELHAMDI « Diagnostic des défauts de la machine asynchrone contrôlée par différents techniques de commande », Thèse de Doctorat de l'Université de Biskra, 2014.
- [9] BEZZIANE A., « Commande vectorielle de la machine asynchrone à rotor défaillant », mémoire de Magister, Université de Batna, 2003.
- [10] R. N. ANDRIAMALALA, H. RAZIK, L. BAGHLI, F-M. SARGOS, "Eccentricity Fault Diagnosis of a Dual-Stator Winding Induction Machine Drive Considering the Slotting Effects", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Volume 55, Issue 12, , pp. 4238 – 4251, 2008.
- [11] MOHAMED E. K. O. « Surveillance et diagnostic des défauts rotorique mécaniques de la machine asynchrone avec alimentation équilibrée ou déséquilibrée », thèse de Doctorat, Université de Lorraine, 2012.
- [12] BENHAMED A.D. et BRIK A. B. « Diagnostic des défauts rotoriques du moteur asynchrone triphasé par l'utilisation du modèle multi-enroulements » Mémoire de Master, Université d'El-Oued, 2017.
- [13] Khatir A., « Etude comparative des modèles des machines asynchrones utilisés en diagnostic des défauts », Mémoire de Magister, Université Ferhat Abbas de Sétif, 2009.

Références bibliographiques

- [14] Hsu J. S., «Monitoring of Defects in Induction Motors Through Air-Gap Torque Observation», IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 31, No.5, Sept./Oct. 1995, pp. 1016-1021.
- [15] Maier R., «Protection of Squirrel-Cage Motor Utilizing Instantaneous Power and Phase Information», IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 28, No. 2, March/April 1992, pp. 376-380.
- [16] Legowski S. E., et al., «Instantaneous Power as Medium for the Signature Analysis of Induction Motors». IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 32, No.4, July/August 1996, pp. 904-909.
- [17] Halem N., «Étude et Simulation du Modèle Multi-Enroulements de la Machine Asynchrone», Mémoire d'Ingénieur, Université de Biskra, Algérie, 2007.
- [18] Ghoggal A., «Diagnostic de la machine asynchrone triphasée: modèle dédié à la détection des défauts», Mémoire de Magister, Université de Batna, Algérie, 2005.
- [19] A. Bellini, F. Filippetti, G. Franceschini et C. Tassoni, «Towards a correct quantification of induction machines broken bars through input electric signals», ICEM'00, Finland, pp. 781-785, 28-30, 2000.
- [20] Sahraoui M., «Contribution à l'Étude du Diagnostic de la Machine Asynchrone », Mémoire de Magister, Université Mohamed Khider Biskra, 2003.
- [21] ACHATN., « étude et simulation de la machine asynchrone double étoile dans le repère abc en modes normal et dégrade », Mémoire de Master de l'Université de Bejaïa, 2018.

ANNEXE

Annexe

Tension simple nominale	$V_s = 220 \text{ V}$
Fréquence nominal	$f = 50 \text{ Hz}$
Vitesse nominale du champ statorique	$N_s = 1500 \text{ tr/min}$
Résistance statorique	$r_s = 0,21 \text{ Ohm}$
Résistance rotorique	$r_r = 0,22 \text{ Ohm}$
Inductance cycliques statorique	$L_s = 0,065 \text{ H}$
Inductance cycliques rotorique	$L_r = 0,065 \text{ H}$
Inductance mutuelle cyclique	$L_m = 0,064 \text{ H}$
Moment d'inertie	$J = 1 \text{ kg.m}^2$
Coefficient de frottement	$K_f = 0,01 \text{ N.m.s/rd}$
Nombre de paire de pôle	$P = 2$