

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 électromécanique

Option *Electromécanique*

Thème

Etude et diagnostic de la MAS à cage dans les régimes normal et dégradé

Présenté par :

BOULKALEM HAFID Y. IMAOUCHENE

BOULAICHE IDIR D. AOUZELLAG

Encadré par :

Année universitaire 2020-2021

Remerciements

Avant tout nous remercions DIEU le tout puissant de nous avoir donné le courage, la volonté, la patience et la santé pour mener ce travail.

Nous tenons à remercier infiniment notre promoteur Mr Yacine IMAOUCHEN pour sa patience et ses conseils précieux qui m'ont été très utiles. Et notre Co-promoteur : Mr Djamel Aouzellag, d'avoir accepté de parrainer ce travail, ainsi que pour son soutien scientifique et moral. Permettez-nous de vous exprimer nos reconnaissances et nos remerciements les plus sincères.

Nous remercions également les membres du jury qui nous ont honorés en acceptant de juger et d'enrichir ce modeste travail.

Nos remerciements sont destinés aussi à toute notre famille, et tous nos amis pour leur aide et leur soutien.

Dédicaces

Je dédie ce mémoire

A mes chers parents. Ma mère, qui m'a encouragé à aller de l'avant et

Qui m'a donné tout son amour pour reprendre mes études, et

Mon très cher père est la plus belle perle du monde

Pour leur patience, leur amour, leur soutien et leurs

Encouragements.

A tout ma famille pour l'amour et le respect qu'ils m'ont toujours accordé.

A mes frères.

Je leur souhaite tout le succès... tout le bonheur

A mes amis et mes camarades

Pour une sincérité si merveilleuse ...jamais oubliable, en leur souhaitant

Tout le succès ...tout le bonheur.

Sans oublier tous les professeurs que ce soit du

Primaire, du moyen, du secondaire ou de l'enseignement supérieur.

A toute personne

Qui m'a aidé à franchir un horizon dans ma vie.

BOULAICHE IDIR

Dédicaces

Je dédie ce mémoire

A mes chers parents. Ma mère, qui m'a encouragé à aller de l'avant et

Qui m'a donné tout son amour pour reprendre mes études.

Mon très cher père est la plus belle perle du monde

Pour leur patience, leur amour, leur soutien et leurs

Encouragements.

A mon défunt grand père, parti à l'éternité, mais qui a été toujours présent dans mon cœur,

Je lui rends un grand hommage.

A tout ma famille pour l'amour et le respect qu'ils m'ont toujours accordé.

A mes frères et ma sœur.

Je leur souhaite tout le succès... tout le bonheur

A mes amis et mes camarades

Pour une sincérité si merveilleuse ...jamais oubliable, en leur souhaitant

Tout le succès ...tout le bonheur.

Un grand merci pour le groupe « LA FAMIGLIA » pour leur soutien

Sans oublier tous les professeurs que ce soit du

Primaire, du moyen, du secondaire ou de l'enseignement supérieur.

A toute personne

Qui m'a aidé à franchir un horizon dans ma vie.

BOULKALEM HAFID

Table des matières

Table des matières

➤ Liste des figures.....	I
➤ Liste des symboles et d'abréviations.....	IV
Introduction générale	1
Chapitre I : Etude d'un moteur asynchrone à cage avec des différents défauts	
I.1 Introduction	2
I.2 Définition de la machine asynchrone.....	2
I.3 Constitution du moteur asynchrone.....	2
I.3.1 Stator	3
I.3.2 Rotor à cage	4
I.3.3 Parties mécaniques	4
I.3.4 Circuit magnétique	4
I.3.5 Roulement mécanique.....	5
I.4 Défaillance de la machine asynchrone	6
I.4.1 Défauts internes et externes	6
I.4.2 Défaillance mécanique	8
I.4.3 Défaillance des roulements	8
I.4.4 Défauts statoriques	9
I.4.5 Défaillances rotoriques.....	11
I.5 Etude statistique des défaillances de la machine asynchrone	12
I.5.1 Défauts statoriques	14
I.5.2 Défauts rotoriques	14
I.6 Techniques de diagnostic des machines asynchrones.....	15
I.6.1 Diagnostic par mesure du flux magnétique axial de fuite.....	15
I.6.2 Diagnostic par analyse des courants statoriques.....	15
I.6.3 Diagnostique par l'analyse vibratoire	16

I.6.4 Diagnostic par mesure du couple électromagnétique.....	16
I.6.5 Diagnostic par mesure de la puissance instantanée.....	17
I.6.6 Diagnostic par l'analyse des tensions statoriques induites.....	17
I.6.7 Surveillance des fluctuations de la vitesse	17
I.7 Conclusion	17
Chapitre II : Modélisation de la machine asynchrone à cage d'écureuil	
II.1 Introduction :.....	18
II.2 Description de la machine asynchrone à cage d'écureuil	18
II.3 Hypothèses simplificatrices d'étude	18
II.4 Modèle de la MAS triphasée dans le repère naturel (abc)	19
II.4.1 Equations électriques	19
II.4.2 Equations magnétiques	20
II.4.3 Equation du couple électromagnétique	21
II.4.4 Equation mécanique	22
II.5 Modélisation et simulation des résultats de la MAS dans le repère naturel abc	22
II.5.1 Simulation et interprétations des résultats	22
II.6 Modèle de la MAS selon le système d'axes (d.q.0)	24
II.6.1 Transformation de Park.....	24
II.6.2 Modèle de la MAS lié au système d'axes (dqo)	25
II.6.2.1 Equations de la tension :	26
II.6.2.2 Equations des flux	26
II.6.2.3 Equation du couple électromagnétique.....	27
II.6.2.4 Equation mécanique.....	27
II.6.3 Simulation et interprétations des résultats de la MAS dans le système d'axes (dqo) .	27
II.7 Analyse spectral dans le repère (abc)	29
II.7.1 Analyse spectral de courant statorique de la phase 1 (as).....	29
II.7.2 Analyse spectral du couple et de la vitesse	30
II.8 Conclusion.....	31
Chapitre III : Modèle de la MAS en présence des défauts rotorique et statorique	

III.1 Introduction	32
III.2 Paramètres de rotor de la machine étudié	32
III.3 Modèle de la MAS étudié dans le repère réel.....	35
III.3.1 Equations électriques	35
III.3.2 Equations magnétiques	36
III.3.3 Equation du couple électromagnétique	38
III.3.4 Equation mécanique	38
III.3.5 Modèle complet de la MAS étudiée	38
III.3.6 Simulation et interprétations des résultats de la MAS étudié dans le repère réel.....	39
III.4 Modèle du MAS en présence de défaut au rotor	41
III.4.1 Simulation et interprétation des résultats du MAS en cas de défaut au rotor	42
III.4.2 Analyse spectrale des résultats obtenus en présence de défauts rotorique	44
III.5 Modélisation et simulation de la MAS en tenant compte d'un court-circuit entre spires dans une phase statorique	48
III.5.1 Mise en équation	48
III.5.2 Modèle du MAS avec défaut dans le repère naturel (abc)	49
III.5.3 Equations magnétiques.....	50
III.5.4 Equation du couple électromagnétique	52
III.5.5 Simulation du MAS en présence d'un court-circuit entre spire au stator	52
III.5.6 Analyse spectrale des résultats de simulation de la MAS dans le model (abc) en présence d'un défaut au stator	56
III.6 Conclusion.....	59
Conclusion Générale	61
➤ Reference bibliographiques.....	VI
➤ Annexe.....	IX
➤ Résumé	

LISTE DES FIGURES

Liste des figures

Figure I.1 Eléments de constitution d'une machine asynchrone	3
Figure I.2 Vue schématique en perspective du stator.....	3
Figure I.3 Vue schématique en perspective du rotor.....	4
Figure I.4 Structure d'un roulement à billes.....	5
Figure I.5 Causes interne de défauts de la machine asynchrone triphasée à cage.....	7
Figure I.6 Causes externes de défauts de la machine asynchrone triphasée à cage.....	7
Figure I.7 Différents défauts statoriques.....	9
Figure I.8 Défauts du rotor à cage : a) Rupture de barres ;(b) Rupture d'anneau de court-circuit.....	12
Figure I.9 Répartition des causes des défauts pour une machine asynchrone.....	12
Figure I.10 Facteurs aggravants le défaut.....	13
Figure I.11 Répartition des défauts.....	13
Figure I.12 Répartition des défauts statoriques.....	14
Figure I.13 Répartition des défauts rotoriques.....	14
Figure II.1 Schéma de principe de la machine asynchrone.....	18
Figure II.2 Allure du couple électromagnétique.....	23
Figure II.3 Allure de la vitesse de rotation.....	23
Figure II.4 Allure des courants rotoriques.....	24
Figure II.5 Allure des courants statoriques.....	24
Figure II.6 Position des axes dq0 par rapport aux axes de la machine.....	25
Figure II.7 Allure du couple électromagnétique.....	28
Figure II.8 Allure de vitesse de rotation.....	28
Figure II.9 Allure des courants rotoriques.....	29
Figure II.10 Allure des courants statorique.....	29

Figure II.11 Spectre du courant statorique à l'état sain.....	30
Figure II.12 Spectre du Couple à l'état sain.....	30
Figure II.13 Spectre de vitesse à l'état sain.....	31
Figure III.1 a) Schéma d'enroulement d'une cage; b) un secteur d'un polygone des phases des courants de barre et une section du diagramme de phases actuel.....	32
Figure III.2 Cage d'écureuil avant et après l'ajout des proportions des anneaux aux barres rotoriques.....	33
Figure III.3 Enroulement rotorique ramené à l'enroulement statorique.....	35
Figure III.4 Allure de couple électromagnétique.....	39
Figure III.5 Allure de la vitesse rotorique	40
Figure III.6 Allure de courant statorique	40
Figure III.7 Allures des courants de trois barres rotoriques adjacentes.....	41
Figure III.8 Schéma équivalent de la cage rotorique en présence de défaut de rupture de barres ; (a) une barre, (b) deux barres adjacente.....	41
Figure III.9 Evolution du couple électromagnétique lors de rupture d'une barre ensuite de 2 barres de la cage.....	42
Figure III.10 Evolution de la vitesse rotoriques lors de rupture d'une barre ensuite de 2 barres de la cage.....	43
Figure III.11 Evolution du courant d'une phase statorique lors de rupture d'une barre ensuite de 2 barres de la cage.....	43
Figure III.12 Evolution des courants de trois barres rotoriques adjacentes lors de rupture d'une barre ensuite de 2 barres de la cage.....	44
Figure III.13 Spectre du courant d'une phase statorique ; état sain(a), cassure d'un barre(b),cassure deux barres (c).....	45
Figure III.14 Spectre du couple électromagnétique ;État sain (a), cassure d'une barre(b), cassures de deux barres (c)	46

Figure III.15 Spectre de la vitesse rotorique ; état sain(a), cassure d'une barre(b), cassure de deux barres.....	47
Figure III.16 Modèle général d'un court-circuit entre spires dans la phase.....	48
Figure III.17 Allures des couples électromagnétiques en présence de court-circuit dans la phase statorique A de (a) 5%, (b) 10% et (c) 25.....	53
Figure III.18 Allures des vitesses rotoriques en présence de court-circuit en phase A de (a)5%, (b)10%, et (c) 25%	54
Figure III.19 Allures des courants statoriques en présence de court-circuit en phase A de (a)5%, (b) 10%, et (c) 25%.....	55
Figure III.20 Allures des courants des trois barres rotoriques adjacentes en présence de court-circuit en phase A de (a)5%, (b)10%, et (c) 25%.....	56
Figure III.21 Spectres du courant statorique lors d'un défaut de court-circuit de (a) 5%, (b) 10% et (c) 25% des spires d'une seule phase statorique.....	57
Figure III.22 Spectres du couple électromagnétique lors d'un défaut de court-circuit de (a)5%, (b)10%, et (c) 25% des spires d'une seule phase statorique.....	58
Figure III.23 Spectres de la vitesse de rotation lors d'un défaut de court-circuit de (a)5%,(b) 10%, et (c) 25% des spires d'une seule phase statorique.....	59

Liste des symboles et d'abréviations

Liste des symboles et d'abréviations

MAS : Machine asynchrone à cage d'écureuil

$[\mathbf{v}_s]$; $[\mathbf{v}_r]$: Vecteurs des tensions statorique et rotorique en (V)

$[\mathbf{i}_s]$; $[\mathbf{i}_r]$: Vecteurs des courants statorique et rotorique en(A)

i_{sd} ; i_{sq} : Courants direct et en quadrature statoriques en (A)

i_{rd} ; i_{rq} : Courants direct et en quadrature rotoriques en (A)

i_{cc} : Courant court-circuit dans la phase « a » en (A)

$[\Phi_s]$; $[\Phi_r]$: Vecteurs des flux statorique et rotorique en (Wb)

θ ; θ_r : Angle statorique entre A et d et angle rotorique entre a et A en (rd), respectivement

p : Nombre de pair de pôle

g : Glissement

f : Fréquence d'alimentation en (Hz)

C_r ; C_{em} : Couples résistant et électromécanique en (N.m)

r_s ; r_r : Résistances statorique et rotorique en (Ω)

$[R_s]$; $[R_r]$: Matrices des résistances statoriques et rotoriques en (Ω)

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

$[M_{sr}]$; $[M_{rs}]$: Matrices des inductances mutuelles entre stator / rotor et entre rotor / stator en (H)

l_{ms} ; l_{mr} : Inductances mutuelles statoriques et rotoriques en (H)

l_{fs} ; l_{fr} : Inductances de fuite statorique et rotorique en (H)

J : Moment d'inertie des parties tournantes en (kg.m^2)

k_f : Coefficient de frottement visqueux en (N.m.s/rd)

$[L_{ss}]$; $[L_{rr}]$: Matrices des inductances statorique et rotorique en (H)

μ : Nombre de spire en court-circuit par rapport aux nombre de spires de la phase (a)

Ω_s ; Ω_r : Vitesses du champ statorique et de la vitesse de rotation rotorique en (rd/s)

Nb : Nombre de barres de la cage rotorique

$[\mathbf{v}_{rr}]$: Vecteur des tensions rotorique en (V)

$[\Phi_{rr}]$: Vecteur du flux rotorique en (Wb)

I_{an} ; I_{bar} : Courants d'anneau et de barre en (A)

I'_r : Courant du rotor ramené au stator en (A)

$r_{\text{bar}} ; r_{\text{an}}$: Résistance de fuite d'une seule barre rotorique et du segment d'anneau entre 2 barres voisines en (Ω)

$[r_{\text{rr}}]$: Matrice des résistances d'une barre et de deux portions des deux (02) anneaux ramenées à la barre en (Ω)

$l_{\text{bar}} ; l_{\text{an}}$: Inductances de fuite d'une seule barre rotorique et du segment de l'anneau entre deux barres voisines en (H)

$[l_{\text{rr}}]$: Matrice des Inductances de fuite rotorique d'une barre et de deux portions des 2 anneaux ramenées à la barre en (H)

$m_s ; m_r$: Nombre de phases statorique et rotorique

$N_s ; N_r$: Nombres de spires d'une phase statorique et d'une phase rotorique

$K_{\text{bs}} ; K_{\text{br}}$: Coefficients de bobinage statorique et rotorique

K_{rs} : Rapport de transformation des courants rotoriques

K_{sqr} : Coefficient d'inclinaison du rotor par rapport au stator

$[L_{\text{rbar}}]$: Matrice des inductances rotoriques en (H)

l_{mb} : Maximum des inductances de magnétisation au rotor en (H)

M_{sb} : Maximum d'inductance mutuelle stator /rotor en(H)

$[M_{\text{sbar}}] ; [M_{\text{bars}}]$: Matrices des inductances de couplage entre stator / rotor et entre rotor /stator en (H)

INTRODUCTION

GENERALE

Introduction générale

En 1889, l'allemand Michael Dolivo-Dobrowolski a réalisé la première machine asynchrone triphasée à cage d'écureuil. Cette dernière domine assez largement le domaine utilisation de la machine électrique, grâce à plusieurs avantages qu'elle présente par rapport aux autres types. Elle est la plus simple à fabriquer, la moins coûteuse, la moins exigeante en termes d'entretien, présente un taux de défaillance très faible, fabriquée en grande quantité et dans une très grande échelle des puissances, conserve sans modification ses parties constitutives essentielles et elle a aussi l'avantage d'être standardisée [2]

Toutes ces qualités justifient le regain d'intérêt de l'industrie vis-à-vis de ce type de machine. 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.).

Dans ce contexte, le mémoire comportera trois chapitres. En premier chapitre, nous avons présenté la constitution de la machine asynchrone (MAS) et aussi ses différentes défaillances qui peuvent se produire. Par la suite, nous donnerons un état de l'art sur les méthodes de diagnostic basées sur l'analyse spectrale des signaux dans les machines asynchrones.

Le deuxième chapitre sera consacré à la modélisation de la MAS, après une description de la machine, nous élaborons un modèle de la MAS triphasée dans les repères naturel (abc) et virtuel (d,q,0) et une comparaison entre les résultats de simulations de ces dernier repères. Ensuite, et les résultats des simulations en utilisant l'environnement MATLAB/Simulink seront présentés et commentés. Enfin, une analyse spectrale à état sain sera faite et commenté.

Le troisième chapitre détaillera le modèle réel dans les cas d'une machine asynchrone où l'enroulement rotorique ne sera pas ramené à l'enroulement statorique à l'état sain et en cas de rupture d'une et deux barres adjacentes. Ensuite, nous étudierons un modèle en présence d'un défaut de court-circuit entre spires d'une phase statorique. Afin d'analyser les grandeurs obtenues par ces simulations dans le domaine fréquentiel, nous aurons utilisé l'analyse spectrale basée sur la transformée de Fourier. Enfin, nous avons terminé par une conclusion générale afin de faire une synthèse sur les différents points discutés dans ce mémoire et l'exposition de quelques perspectives de recherche.

CHAPITRE I

CHAPITRE II

I.1 Introduction

Ce chapitre détaillera l'aspect théorique de la machine asynchrone triphasé (MAS). En premier lieu, les différents éléments de la machine seront discutés, par la suite, une deuxième partie sera dédiée à une étude détaillée sur les défauts qui peuvent survenir sur celles-ci. Une dernière partie sera consacrée pour les différentes techniques de diagnostic des défauts de la MAS en se basant sur l'analyse spectrale des signaux qui seront exploités dans les chapitres qui suivent.

I.2 Définition de la machine asynchrone

Les moteurs asynchrones sont largement utilisés (on estime que 80% des moteurs de la planète sont des moteurs asynchrones) à cause de leur robustesse et leur coût qui est inférieur à celui des autres machines [2].

Il existe deux types de machines asynchrones :

- a) **Moteur à induction** : L'induit d'un rotor ordinaire n'est pas alimenté, le courant qui le traverse est issue d'une autre armature. Alors, le principe de fonctionnement de ce type se base sur l'interaction entre des courants statoriques de l'inducteur et des courants rotoriques de l'induit. On reconnaît généralement trois types de rotor : le rotor massif, le rotor bobiné (rotor à bague) et rotor à cage d'écureuil.
- b) **Moteur à collecteur** : Ce moteur est de type série, dans lequel le courant d'armature rotorique est le même que le courant statorique. Ses inconvénients sont : son prix qui est élevé et il est moins robuste par rapport au moteur à induction de même puissance à cause du système balais/collecteur.

Dans la suite de notre travail, on s'intéressera seulement à l'étude d'un moteur à asynchrone à induction à cage d'écureuil.

I.3 Constitution du moteur asynchrone

La machine asynchrone à cage, appeler aussi moteur à induction comprend une partie mobile qui est le rotor, constitué de tôles d'acier au silicium et comportant des encoches dans lesquelles on place l'enroulement, le stator est fixe ; on y trouve l'enroulement relié à la source.

Les éléments de construction d'une machine asynchrone à cage d'écureuil sont illustrés dans la figure I.1.

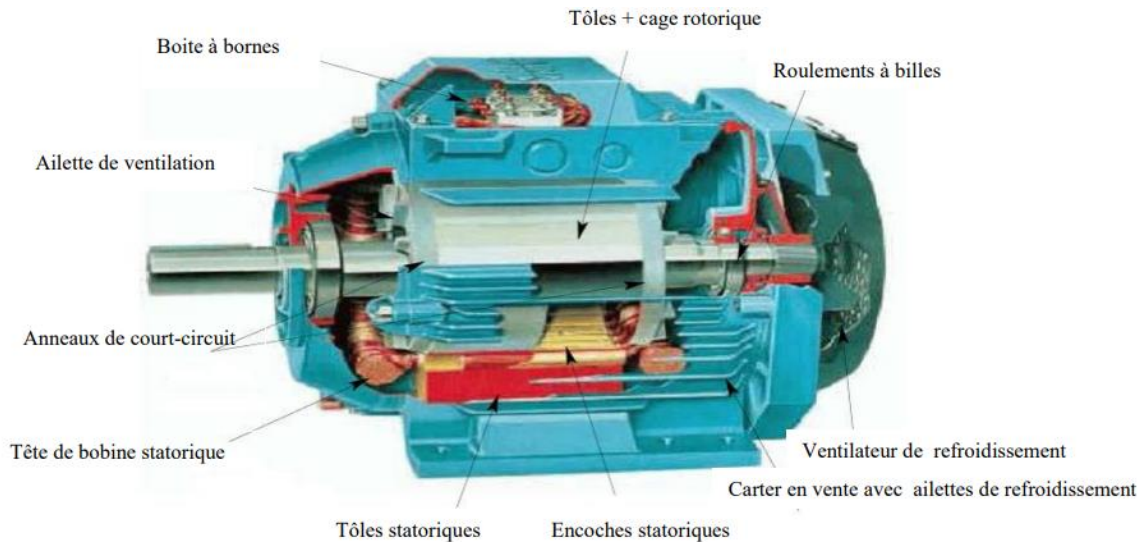


Figure I.1 : Eléments de constitution d'une machine asynchrone à cage [2]

I.3.1 Stator

Il est constitué des bobines réparties dans les fentes du circuit magnétique. Le circuit magnétique est constitué d'un empilement de tôles, où la coupe est parallèle à l'axe de la machine [3]. La figure I.2 présente le stator et ses composants.

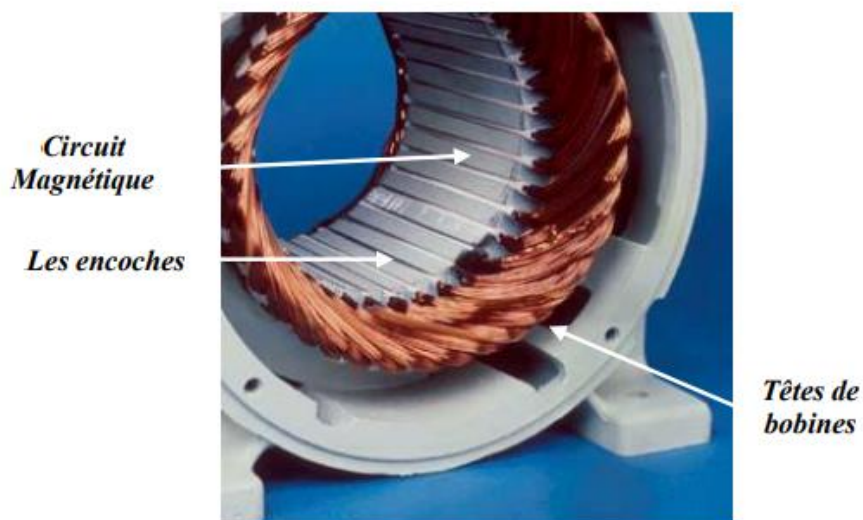


Figure I.2 : Vue schématique en perspective du stator [3]

I.3.2 Rotor à cage

Le rotor a une forme d'une cage, simplement composée d'une tige carrée ou cylindrique, où l'on peut constater que son couple de démarrage est très faible. Le circuit rotorique est constitué de tiges conductrices régulièrement réparties entre deux conducteurs, les couronnes métalliques qui forment les extrémités rappellent la forme d'une cage écureuil ; bien sûr, cette cage est insérée dans le circuit magnétique similaire à un moteur à rotor bobiné [4]. La figure(I.3) présente le rotor à cage.

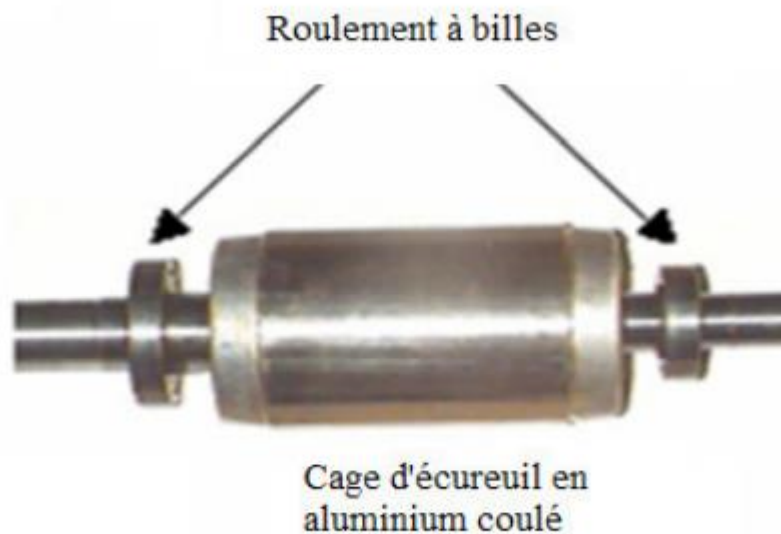


Figure I.3 : Rotor de la machine asynchrone à cage

I.3.3 Parties mécaniques

La carcasse joue un rôle de soutien. Elle agit comme une enveloppe et offre une protection contre l'environnement extérieur. Le ventilateur son but est d'extraire les pertes internes et pour s'assurer que les enroulements se refroidissent.

L'arbre est le mécanisme de transmission, il comprend une partie qui est le centre, ce dernier est utilisé comme support du corps du rotor et l'extrémité de l'arbre est fixée avec un demi-accouplement. Il est généralement en acier moulé ou en acier forgé [5].

I.3.4 Circuit magnétique

Sa fonction est de guider la ligne d'induction magnétique et de maintenir conducteur, conduction thermique du conducteur à la zone de refroidissement (Canaux de ventilation, entrefer).

Donc, il doit présenter à la fois des propriétés magnétiques, des caractéristiques mécaniques déterminées et une bonne conductivité thermique.

En régime établie l'induction à chaque point du circuit est variable. L'origine de cette variation est électrique (onde magnétique créé par un circuit électrique pour un stator où un rotor).

Les pertes fer, hystérésis et par courants de Foucault sont relativement importantes. Dans ce type de circuit, on utilise des tôles de faible épaisseur, à grades perméabilité et à pertes magnétiques réduite [2].

I.3.5 Roulement mécanique

Le roulement à billes est un organe de base dans la machine asynchrone qui joue le rôle d'interface mécanique entre le stator et le rotor. En plus, il représente l'élément de maintien de l'axe de la machine permettant de garantir une bonne rotation du rotor. La majorité des machines électriques utilisent les roulements à billes ou à rouleaux. Le roulement à billes est le plus utilisé dans le monde industriel parce qu'il a le meilleur rapport performance-prix [6] :

- Deux bagues concentriques en acier, appelées bague intérieure et bague extérieure, y compris le chemin de roulement (la surface sur laquelle l'objet "roule" faire défiler) ;
- Des corps roulants, billes ou rouleaux généralement en acier, permettant le mouvement des deux bagues avec un frottement minimal ;
- La cage (polyamide, tôle d'acier, laiton ou résine).

La figure I.4 illustre les composants du roulement.

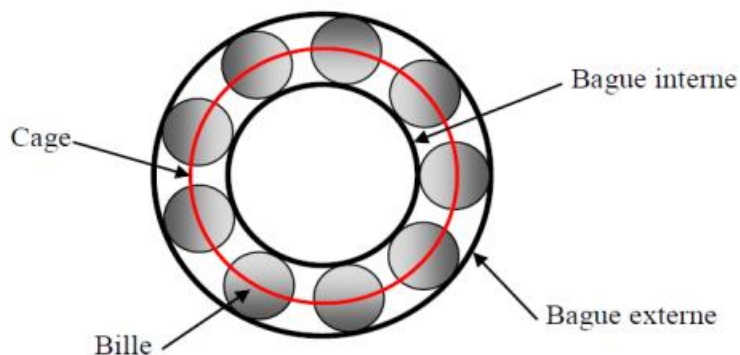


Figure I.4 : Structure d'un roulement à billes [2]

I.4 Défaillance de la machine asynchrone

Passons brièvement en revue les différents défauts des moteurs asynchrones triphasés à cage et leurs origines ne prétendent pas à l'exhaustivité. Ces anomalies apparaissent dans différentes parties de la machine.

I.4.1 Défauts internes et externes

Il existe deux principaux types de défauts : les défauts internes et les défauts externes. Et nous avons constaté que la défaillance interne de la machine est causée par la composition de la machine (circuits magnétiques rotorique et statorique, bobinage statorique, entrefer, cage d'écureuil rotorique, etc.) et les défauts externes sont causés par la tension d'alimentation et la charge mécanique, quel que soit l'environnement d'utilisation de la machine.

Selon les organigrammes des figures (I.5 - I.6), la source du défaut est divers, nous utilisons la citation comme indication de l'origine du type [2] :

- Machines : Mauvaise fabrication, vibration de la machine, force de déséquilibre électromagnétique, force centrifuge, fluctuation de charge ;
- Électrique : Dégradation de l'isolation, décharge partielle, étincelles ;
- Dissipation thermique : Pertes de cuivre, absence de refroidissement global ou partiel ;
- Environnement : Humidité, ozone, poussière.

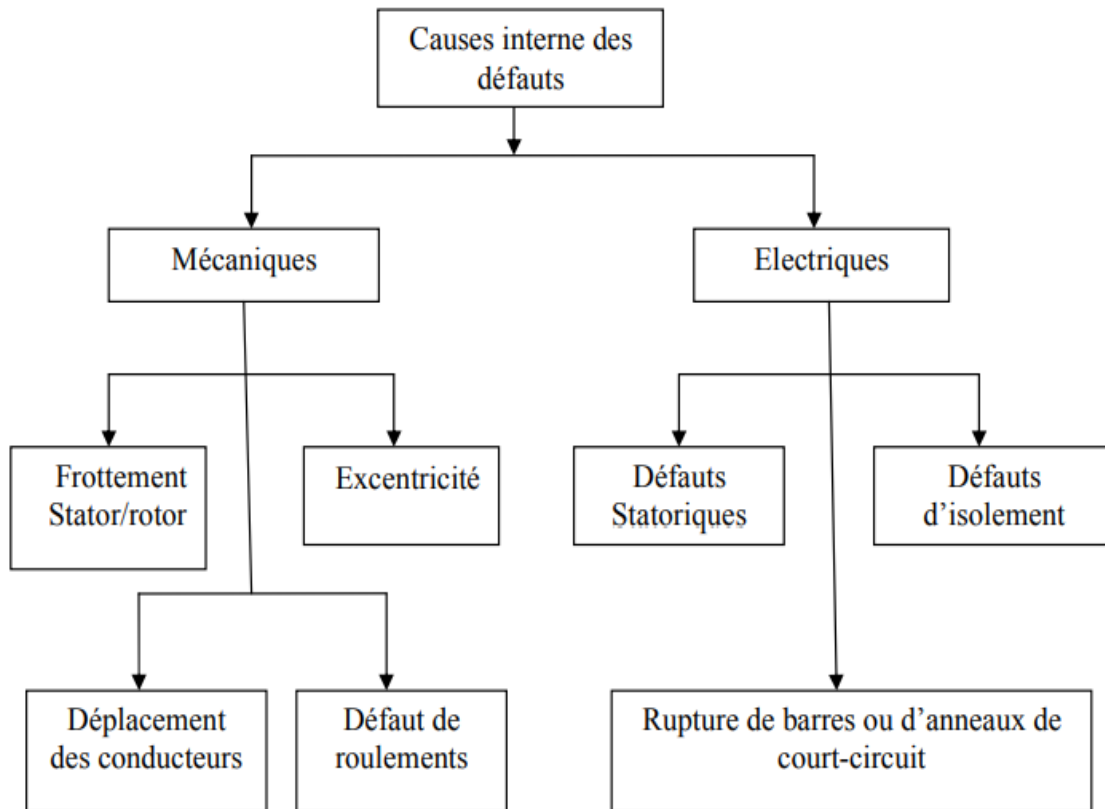


Figure I.5 : Causes interne de défauts de la machine asynchrone triphasée à cage

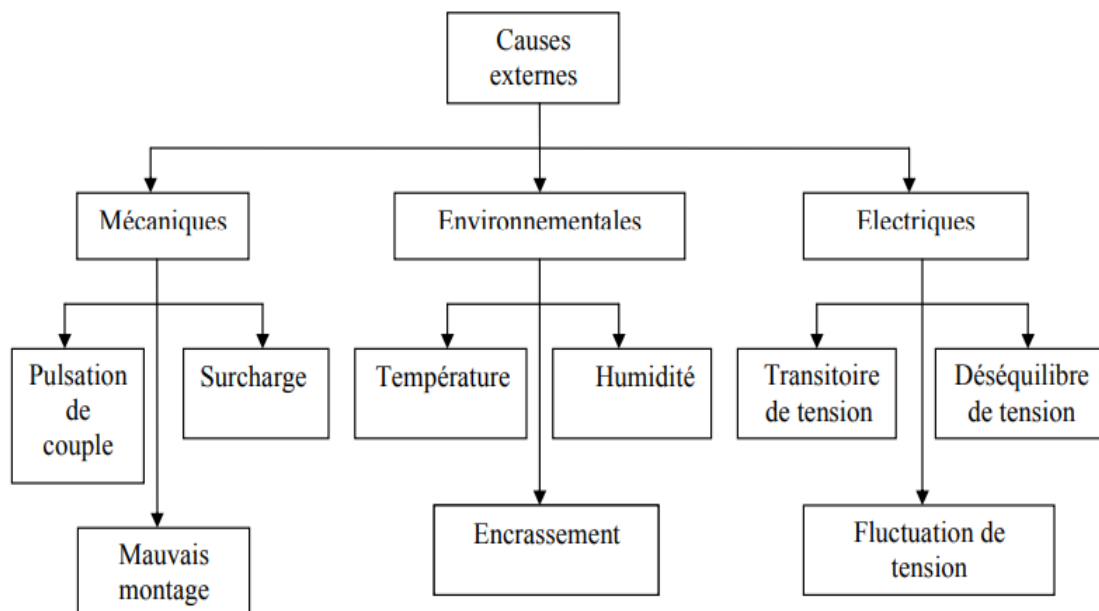


Figure I.6 : Causes externes de défauts de la machine asynchrone triphasée à cage

I.4.2 Défaillance mécanique

De manière générale, la défaillance mécanique est la plus courante de tous les défauts du moteur asynchrone. Ces défaillances peuvent apparaître dans roulements à billes, brides et même arbres moteurs.

a) Défaillance du flasque

Les défauts les plus courants causés par les brides des moteurs asynchrones causés par l'étape de fabrication. En fait, une mauvaise position de la bride peut conduire au désalignement du roulement à billes provoque l'excentricité de l'arbre de la machine.

b) Défaillance de l'arbre

La fissure de l'arbre à cause de mauvais matériel lors de la fabrication avec de temps, il peut causer la rupture de l'arbre qui provoque arrêt total de la machine.

D'autre pression s'exerce une pression sur l'arbre comme l'excentricité statique, dynamique ou mixte, ce qui provoque une fatigue supplémentaire. Analyse fréquentielle du courant l'absorption ou une simple analyse visuelle de l'arbre de la machine permet de détecter ces défaillances [2].

I.4.3 Défaillance des roulements

Les roulements à billes sont les composants de base des moteurs asynchrones et jouent un rôle important est considéré comme l'interface mécanique entre le stator et le rotor.

De plus, il représente également l'élément de maintenance pour s'assurer que le rotor tourne correctement. Il ne représente que 40 à 50 % des pannes des MAS [7].

Les raisons suivantes peuvent endommager le roulement [2] :

- ❖ Contamination du roulement par des particules extérieures : poussières, sable, etc. ;
- ❖ Corrosion causée par la pénétration d'eau, d'acide, etc. ;
- ❖ Une lubrification insuffisante peut entraîner une surchauffe et une usure des roulements ;
- ❖ Mauvais alignement du rotor ;
- ❖ Température de fonctionnement élevée ;
- ❖ Le courant électrique traverse le roulement et provoque un arc ;
- ❖ Installation incorrecte du roulement ; en appuyant incorrectement le roulement sur l'arbre.

I.4.4 Defaults statoriques

La dégradation d'isolation qui cause la majorité de défaillance statorique de la machine asynchrone qui représente 40% à 60% des pannes ou défaillance total de la machine asynchrone.

Les causes les plus fréquentes des défauts d'enroulements statoriques sont [8] :

- ❖ Vieillissement naturel des isolants. Tous les matériaux isolants ont une durée de vie limitée. Même dans une utilisation normale, l'isolant finit naturellement par se dégrader ;
- ❖ Échauffement excessif du noyau et des enroulements du stator ;
- ❖ Fissures dans la tôle, de fixation, et des jonctions ;
- ❖ Mauvaise connexion des têtes des enroulements ;
- ❖ Fonctionnement dans un environnement sévère, contamination provoquée par l'humidité et la saleté ;
- ❖ Courant élevé dans l'enroulement dû à un court-circuit, un défaut du convertisseur, une surcharge ;
- ❖ Décharges électriques ;
- ❖ Tension de l'enroulement supérieure à la limite du matériau d'isolation ;
- ❖ Fuites dans les systèmes de refroidissement.

Les défauts qui sont les plus récurrents, localisés au niveau du stator, peuvent être définis comme suit : défaut d'isolant, court-circuit entre spires, court-circuit entre phases, court-circuit entre phase et armature, déséquilibre d'alimentation, défaut de circuit magnétique.

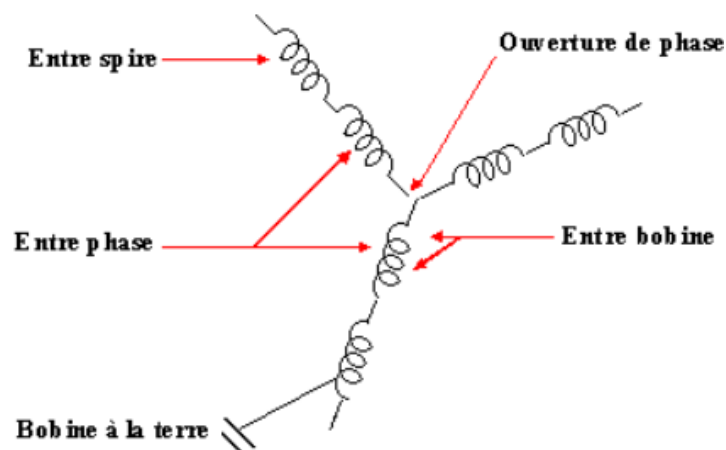


Figure I.7 : Différents défauts statoriques [9]

a) Défaits d'isolant dans un enroulement

La majorité des causes qui cause les courts circuits est dégradation d'isolation. En effet, diverses pertes entraînent la température de chaque partie du moteur. Cependant, les matériaux isolants ont des limitations mécaniques, de température et de tension. Dans ce cas, les enroulements associés peuvent être court-circuités.

Lorsqu'un défaut d'isolement se produit sur un tour, le courant de défaut est le cuivre de la bobine et la tôle du stator (défaut phase-terre). Si l'isolant qui les sépare est endommagé (défaut spire), il peut également circuler entre deux spires d'une même phase. Dans le cas d'enroulements à deux couches, une même encoche peut contenir deux conducteurs de phases différentes. Dans une même zone, la dégradation simultanée des isolants des deux bobines conduit à un contact électrique entre deux spires de deux phases différentes (défaillance entre phases).

Lorsqu'un défaut d'isolement se produit sur une spire, le courant de défaut est le cuivre de la bobine et la tôle du stator (défaut phase-terre). Si l'isolant qui les sépare est endommagé (défaut spire), il peut également circuler entre deux spires d'une même phase. Dans le cas d'enroulements à deux couches, une même fente peut contenir deux conducteurs de phases différentes. Dans une même zone, la dégradation simultanée des isolants des deux bobines conduit à un contact électrique entre deux spires de deux phases différentes (défaillance entre phases). Ce type de défaut peut également exister dans le bobinage monocouche de la tête de bobine, où deux conducteurs de phases différentes peuvent entrer en contact. Par conséquent, la topologie du circuit est affectée par ces défauts [8].

b) Court-circuit entre spires de la même phase

La surchauffe causée par un court-circuit entre les spires est causée par court-circuit, quels moteurs tombent presque toujours en panne en quelques minutes. Donc, chaque augmentation de 10°C additionnel augmente la détérioration de l'enroulement deux fois plus rapidement que dans un fonctionnement à température normale [2].

Les défauts de court-circuit entre spires en phase sont plus fréquents dans les moteurs asynchrones [2]. Ce type de défaut est provoqué par un ou plusieurs défauts d'isolement [10].

c) Défaillances de circuit magnétique

Les tôles du circuit magnétique sont feuilletées et isolées les unes des autres, mais elles peuvent être court-circuitées. La cause la plus fréquente de défaillance du circuit magnétique

est généralement liée à de graves défaillances d'excentricité statique et/ou dynamique, qui peuvent provoquer un contact frontal entre le stator et le rotor pour détruire le circuit magnétique, ou un court-circuit. Le matériau en feuille est localement fortement chauffée, de sorte que la projection d'objets étrangers dans l'entrefer entraînera l'usure du matériau en feuille et les court-circuitera [11].

I.4.5 Défaillances rotoriques

a) Excentricité

L'influence des défauts mécaniques se manifeste généralement dans l'entrefer en raison de défauts d'excentricité. L'excentricité motrice est un phénomène évoluer dans le temps et survivre de sa fabrication. Un certain degré d'existence l'excentricité est normale dans le moteur. Des fabricants et utilisateurs spécifient un niveau admissible maximum de 5%, tandis que dans d'autres cas, un niveau maximum de 10% de la largeur d'entrefer est toléré [12].

b) Rupture de barres et d'anneau de court-circuit

Pour les machines asynchrones à cage d'écureuil, le défaut est attribué à tige cassée ou anneau de court-circuit. Les barres cassées ou cassées sont l'une des défaillances de rotor les plus courantes. Il peut être dans son encoche ou à l'extrémité où il est connecté à la bague de court-circuit. Des barres ou des pièces de bague cassées peuvent être causées par exemple par une surcharge mécanique (démarrage fréquent, etc.), une surchauffe locale ou encore des défauts de fabrication (bulles d'air ou mauvaise soudure). La détérioration des barres réduit la valeur moyenne du couple électromagnétique et augmente l'amplitude des oscillations, qui elles-mêmes provoquent des oscillations de la vitesse de rotation, ce qui engendre des vibrations mécaniques et donc, un fonctionnement anormal de la machine. La grande amplitude de ces oscillations accélère la détérioration de la machine [13].

Ainsi, le couple diminue sensiblement avec le nombre de barres cassées induisant un effet cumulatif de la défaillance. L'effet d'une cassure de barre croît rapidement avec les nombres des barres cassées [14].

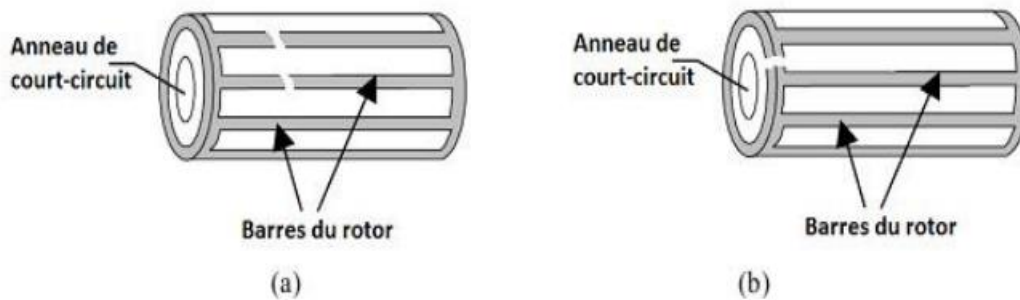


Figure I.8 : Défauts du rotor à cage : a) Rupture de barres ;
 (b) Rupture d'anneau de court- circuit [9]

I.5 Etude statistique des défaillances de la machine asynchrone

Plusieurs études statistiques ont été menées pour quantifier l'impact de chaque méthode. Les types et pourcentages de défaillances de la fiabilité des machines ont été cités dans plusieurs documents. D'une étude à l'autre, les résultats obtenus sont encore très différents [9].

Cependant, toutes les études classent les défaillances des roulements comme plus fréquemment, suivi d'une défaillance du stator et enfin d'une défaillance de la cage du rotor [9].

La principale source de défaillance provient des machines ; la deuxième cause de défaillance est la surchauffe du moteur a aggravé le vieillissement des composants ; la troisième cause de défaillance de référence est le court-circuit causé par une rupture d'isolation.

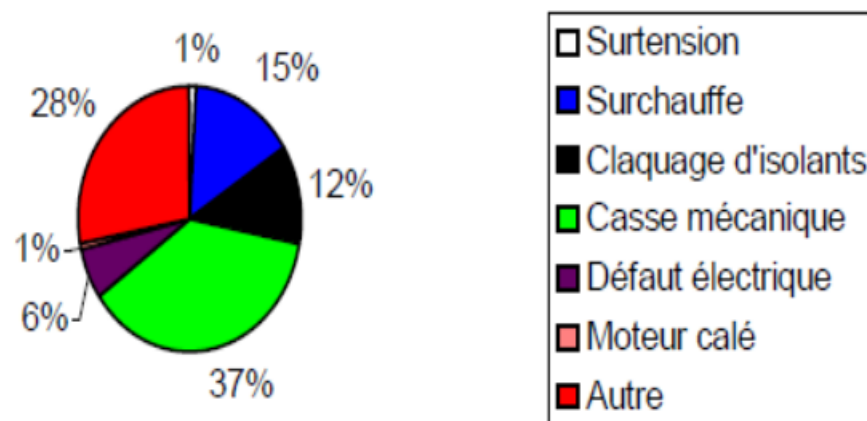


Figure I.9 : Répartition des causes des défauts pour une machine asynchrone [15]

La figure(I.9) précise les conditions qui aggravent le défaut : la première source d'aggravation provient de l'usure des éléments avec l'âge et la durée de service. Cette usure est renforcée par les différentes conditions de fonctionnement (surchauffe, humidité, exposition, etc.). En règle générale, toute différence par rapport au point de fonctionnement nominal contribue à aggraver le défaut naissant voir à le faciliter.

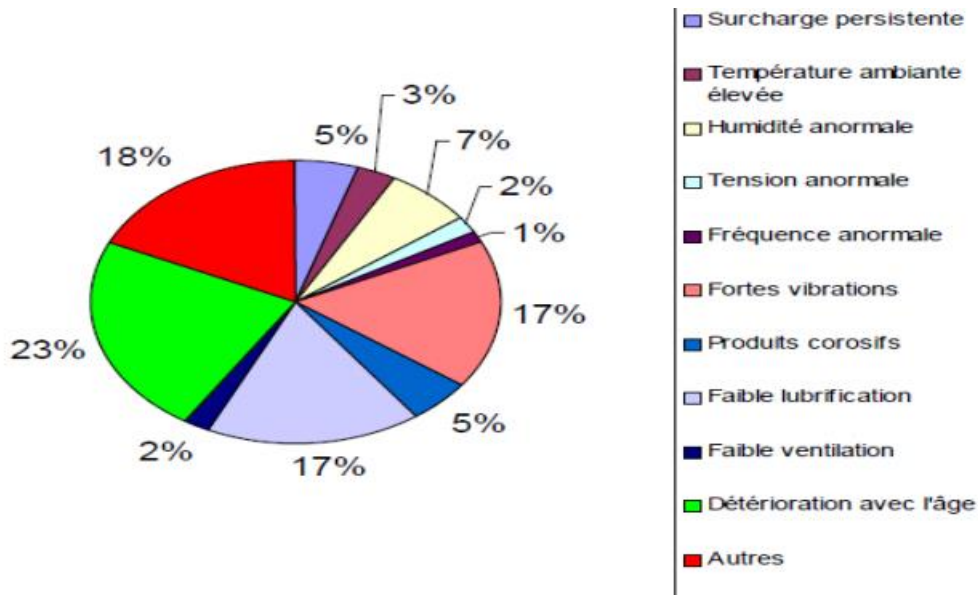


Figure I.10 : Facteurs aggravants le défaut [15]

Une étude conduite pour IEEE [17] a établi une statistique des différents défauts pouvant se produire sur une machine asynchrone.

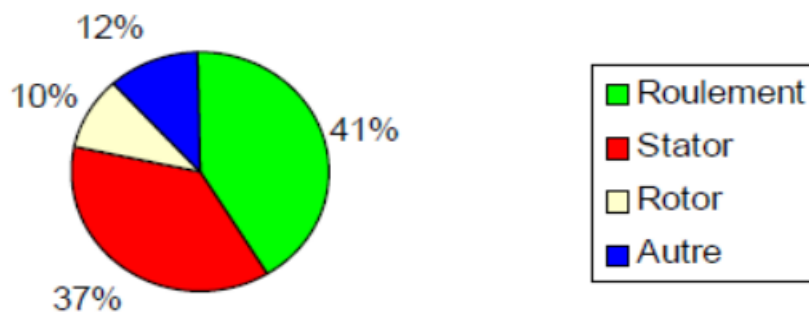


Figure I.11 : Répartition des défauts [2]

I.5.1 Défaits statoriques

La majeure partie des défauts au stator des machines asynchrones est due à des défauts d'isolement (Figure I.12)

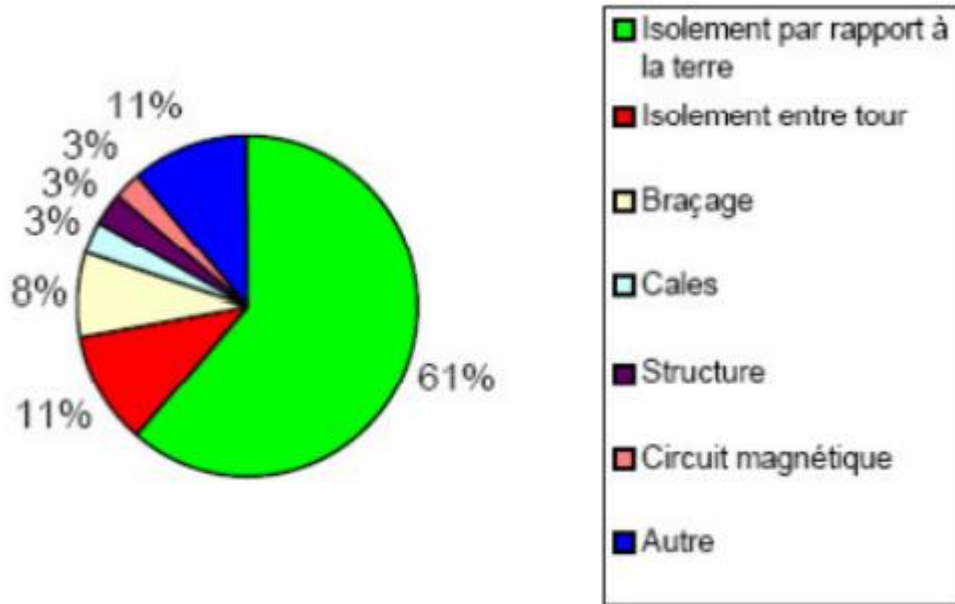


Figure I.12 : Répartition des défauts statoriques [1]

A signaler que ces statistiques ne sont pas détaillées par type de branches industrielles ; par conséquent, elles peuvent avoir des significations différentes selon qu'on parle d'industries. Comme nous ne sommes intéressés que par ce défaut statorique.

I.5.2 Défaits rotoriques

La majorité des défauts au rotor est au niveau de la cage. La seconde source de défauts provient d'une déformation de l'axe du rotor (figure I.13).

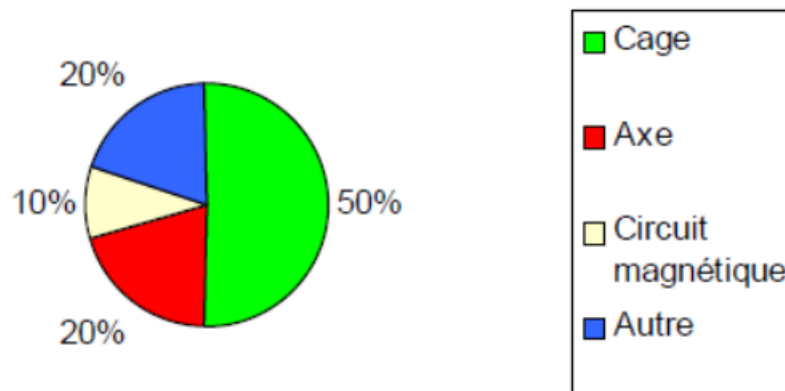


Figure I.13 : Répartition des défauts rotoriques [1]

Ces deux défaillances sont dues à des contraintes de fonctionnement excessives qui provoquent la déformation de la cage.

I.6 Techniques de diagnostic des machines asynchrones

Il existe une variété de techniques de diagnostic et de détection de défauts. Ces derniers sont basées sur l'observation et la mesure, comme le site de mesure magnétisme, bruit, vibration, courant, etc. D'autres personnes surveillent et comparaison des caractéristiques électromécaniques et des moteurs sains (courant statorique, couple électromagnétique et vitesse mécanique).

I.6.1 Diagnostic par mesure du flux magnétique axial de fuite

En pratique, on utilise les sondes à effet Hall qui permet de capter de flux axial de fuite dans le moteur. Mais, l'exemple de base est d'enrouler une bobine autour de l'arbre de la machine, qui sera le lieu de la force électromotrice induite associée au flux de fuite axial.

Les circuits électriques et magnétiques ne se sont jamais toujours 100% parfait à cause de défaut de fabrication et de tolérances qui cause la fuite de flux magnétique. Son contenu spectral est cohérent avec celui contenu dans le stator. Les harmoniques sont directement liées au courant du rotor [16].

I.6.2 Diagnostic par analyse des courants statoriques

Les courants statoriques sont plus intéressants parce que sont très facile à accéder et à analyser qui nous permet de détecter les defaults électromagnétique et mécanique. Cette technique est dénommée dans la littérature "Motor Current Signature Analysis" (MCSA) [17]. Les défauts de la MAS se traduisent dans le spectre du courant statorique soit par [18] :

- L'apparition des raies spectrales dont la fréquence de synchronisme, et aux celles des champs tournants et aux paramètres physiques de la machine (nombre d'encoches rotoriques et nombre de paires de pôles) ;
- La modification de l'amplitude des raies spectrales, déjà présenté 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 MAS par exemple, 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 :

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

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

Pour la détection de barres cassées par la mesure des courants statoriques. En effet, il est bien connu qu'un traitement approprié de ces signaux fait apparaître des composantes dans leurs spectres aux fréquences :

$$f_b = f_s(1 \pm 2.g) \quad (I.2)$$

En effet, lorsqu'une barre est cassée, des harmoniques de flux correspondant sont produits et induisent des harmoniques de courant dans l'enroulement statorique aux fréquences :

$$f_b = f_s(1 \pm 2.g) \quad (I.3)$$

Avec : f_b : Fréquence caractéristique du défaut de cassure de barre rotorique

De plus les amplitudes des raies dans ces bandes latérales du fondamental augmentent avec le nombre de barres défailantes [24].

Dans les chapitres suivants, nous utiliserons cette méthode, pour détecter des défaillances dans le moteur asynchrone à cage d'écureuil dans les deux régimes sein et dégradé, 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, et court-circuit total d'une phase statorique) la surveillance par analyse spectrale du moteur.

I.6.3 Diagnostique par l'analyse vibratoire

Les techniques les plus fréquentées et utilisées pour détecter les pannes de moteurs est l'analyse vibratoire qui est classée parmi technique mécanique.

L'utilisation de l'analyse vibratoire pour diagnostiquer les défauts est la méthode la plus connue en pratique, par exemple dans les unités opérationnelles de la SONATRACH et de la SONELGAZ [19].

I.6.4 Diagnostic par mesure du couple électromagnétique

Cette technique peut nous montrer les défauts de rotor dans les bobines de stator et les défauts dans les bobines de stator court-circuit entre les virages. L'interaction entre le champ magnétique du stator et le champ magnétique du rotor se génère le couple électromagnétique.

Par conséquent, toute défaillance du stator ou du rotor s'influent sur le couple électromagnétique [20].

I.6.5 Diagnostic par mesure de la puissance instantanée

La somme des produits des courants est des tensions dans les trois phases statoriques nous donne la puissance instantanée. Donc, le niveau des informations, apportées par cette grandeur, est plus grand que celui apportées par le courant d'une seule phase. Ceci présente efficacité de cette méthode par rapport aux autres [21].

I.6.6 Diagnostic par l'analyse des tensions statoriques induites

Cette technologie est basée sur l'utilisation de la composante fréquentielle de la tension induite pour faire passer flux du rotor dans l'enroulement du stator lorsque le moteur est déconnecté le circuit ouvert du bus affecte directement la tension induite dans le stator. En utilisant cette méthode, la non-idéalité de la source (la présence de balourds et d'harmoniques) et l'influence de la non-linéarité des caractéristiques magnétiques de la machine peuvent être évitées [9].

I.6.7 Surveillance des fluctuations de la vitesse

Le défaut est détecté en mesurant la fluctuation de la période de rotation du moteur. Cette méthode est la plus utiliser à cause quelle nous permet de détecter la défaillance du rotor, la défaillance des roulements et le désalignement de l'arbre. Cependant, étant donné que les machines fonctionnent généralement à des vitesses et des couples de charge variables, l'instrument de mesure doit être capable de faire la distinction entre les changements de vitesse causés par le couple de charge et les changements de vitesse causés par une défaillance du rotor [22].

I.7 Conclusion

L'objectif de ce chapitre est de présenter la machine asynchrone à cage d'écureuil et sa constitution. Ainsi, nous avons cité les différentes défaillances qu'on peut rencontrer sur la machine asynchrone (excentricité, court-circuit, rupture des barres, etc.). Ensuite, nous avons indiqué les méthodes les plus utilisées fréquemment pour le diagnostic de ce type de machine.

Le deuxième chapitre sera consacré à la modélisation et à la simulation d'un MAS dans les repères naturel (ABC) et virtuel (dqo) et interprétation des résultats des simulations dans ces deux repères, à la fin une analyse spectrale à faire et commenter.

II.1 Introduction :

La modélisation d'une machine électrique est une phase primordiale de son développement. Elle est indispensable pour l'étude et la maîtrise de son fonctionnement.

Dans ce chapitre, il sera question de modélisation de la MAS. Dans un premier lieu, on donnera de manière explicite le modèle mathématique de la machine asynchrone (Equations électriques, magnétiques et mécaniques) dans son référentiel triphasé (abc). Puis, on réduira l'ordre du système par une transformation dite de PARK. Cette transformation modélise la MAS dans un nouveau référentiel (dqo). En dernier lieu, on présentera la simulation numérique des différentes grandeurs de la MAS à cage d'écureuil d'une puissance de 15kW et les résultats de l'analyse spectrale des signaux de cette machine à l'état sain.

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

La machine électrique contient deux parties une partie mobile qui est le rotor et une partie fixe qui est le stator. Ce dernier est alimenté par un réseau de tension triphasé équilibré.

La partie mobile dans notre cas est le rotor à cage d'écureuil qui est constitué de barreaux de cuivre ou d'aluminium reliés aux deux extrémités par deux couronnes conductrices. Ce modèle (en forme de cage d'écureuil) peu coûteux et très robuste est le plus répandu mais il ne permet pas l'accessibilité [23]. Cet enroulement est ramené aux bobinages triphasés statoriques, comme illustrer sur la figure II.1.

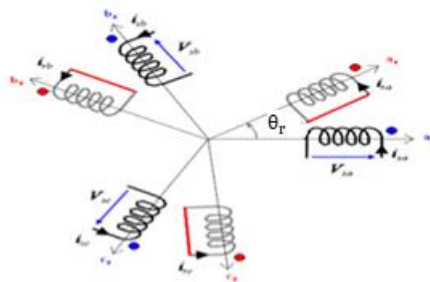


Figure II.1 : Schéma de deux enroulements statorique et rotorique de la MAS [2]

II.3 Hypothèses simplificatrices d'étude

La modélisation de la MAS s'appuie sur un certain nombre d'hypothèses simplificatrices, qui sont [9]:

- 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 fmm 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:

Pour stator :

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

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

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

Pour le rotor :

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

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

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

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

$$[v_s] = \begin{bmatrix} v_{as} \\ v_{bs} \\ v_{cs} \end{bmatrix}; [v_r] = \begin{bmatrix} v_{ar} \\ v_{br} \\ v_{cr} \end{bmatrix}; [i_s] = \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix}; [i_r] = \begin{bmatrix} i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix}; [\Phi_s] = \begin{bmatrix} \Phi_{as} \\ \Phi_{bs} \\ \Phi_{cs} \end{bmatrix}; [\Phi_r] = \begin{bmatrix} \Phi_{ar} \\ \Phi_{br} \\ \Phi_{cr} \end{bmatrix}$$

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 :

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

II.4.2 Equations magnétiques

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

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

Avec : Matrices des inductances statoriques et rotoriques, respectivement :

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

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

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 ; Matrices des inductances de couplage entre stator et le rotor et inversement :

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

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

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

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

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

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 :

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

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

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

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

On peut réécrire le système d'équations (II.10) sous la forme d'un système d'équations différentielles :

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

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

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

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 :

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

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 :

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

II. 4.4 Equation mécanique

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

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

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 des résultats de la MAS dans le repère naturel abc

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

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

II.5.1 Simulation et interprétations des résultats

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

Lors du démarrage à vide, le couple électromagnétique passe par un régime transitoire. Il présente des oscillations qui atteignent une valeur maximale de 190 (N.m), après il revient à une valeur très faible (presque nulle) pour compenser les pertes par frottements et par ventilations, et ce en régime établi (ou permanent), puis avec effet de la charge à l'instant $t=1$ (s), on remarque une croissance dans le couple magnétique avec une valeur de 100(N.m).

La vitesse rotorique passe aussi par un régime transitoire d'une durée de 0.4(s) qui atteint une valeur maximale de 157 (rad/s) et ce temps représente le temps de réponse de la machine, puis elle se stabilise à 0.58(s) au voisinage de la vitesse de synchronisme d'une valeur 157 (rad/s) ou 1499(tr/min), puis à application du couple de charge on remarque une décroissance avec oscillations jusqu'à une valeur de 153 (rad/s) ou 1461 (tr/min).

Les courants de phases statoriques ont une forme sinusoïdale et de même amplitude présentent des dépassements excessifs induisant de fort appel de courant, qui sont d'une valeur efficace égal 346(A), mais ils disparaissent au bout de quelques alternances (0.48s) pour donner lieu à des formes sinusoïdales d'amplitude constante d'une valeur efficace égale 7(A) au régime

permanent. Puis à l'instant $t=1$ (s) où on a mis la charge on voit une augmentation de courant statorique éteint la valeur efficace de 28(A).

Au démarrage, les courants rotoriques passent par un régime transitoire dont la valeur efficace atteint 346(A). Puis, ils diminuent et prennent une forme sinusoïdale en régime permanent pour s'annuler par la suite. Puis à l'instant $t=1$ (s) où on a mis la charge on voit une augmentation de courant rotorique éteint la valeur efficace de 32 (A).

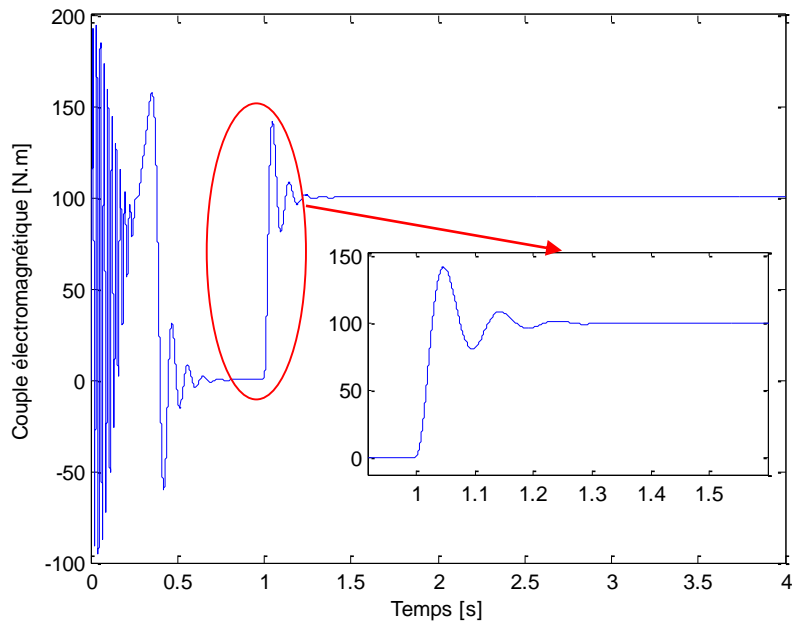


Figure II.2 : Allure du couple électromagnétique

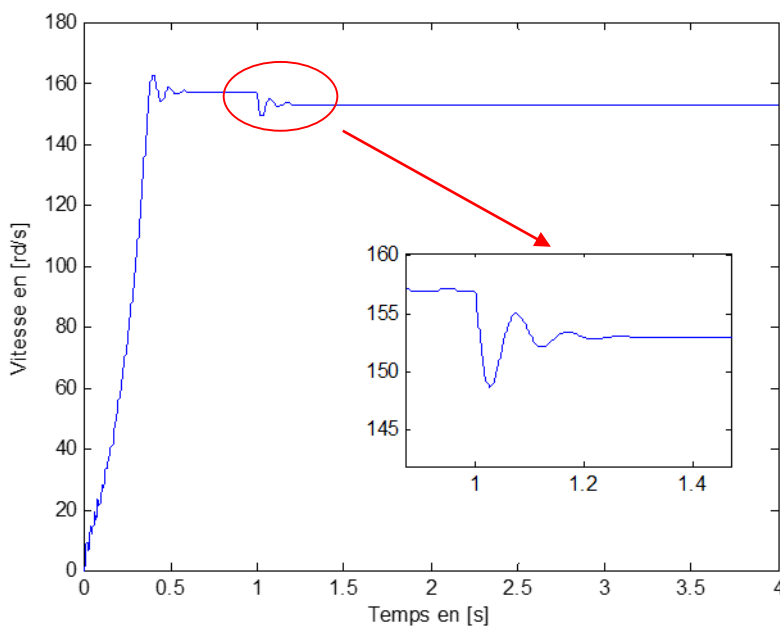


Figure II.3 : Allure de la vitesse de rotation

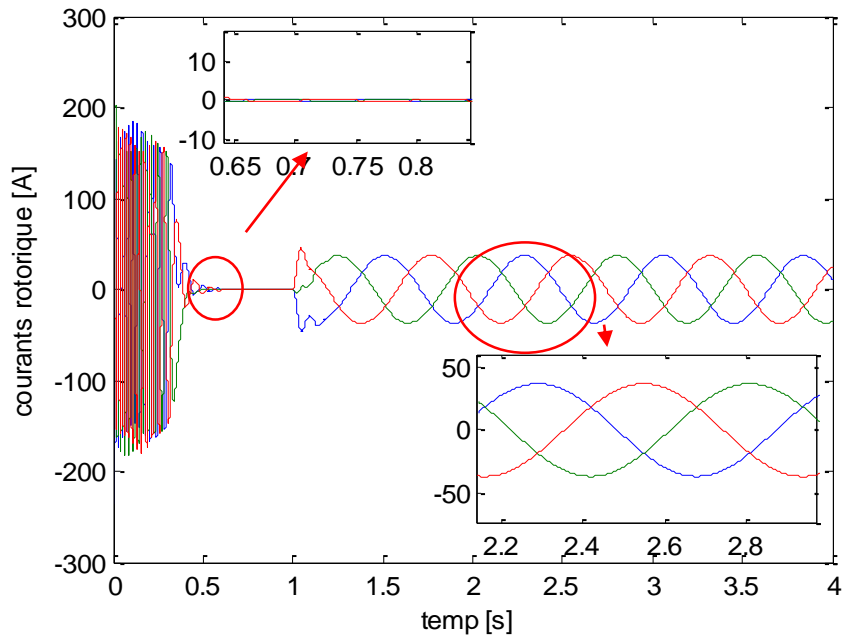


Figure II.4 : Allures des courants rotoriques

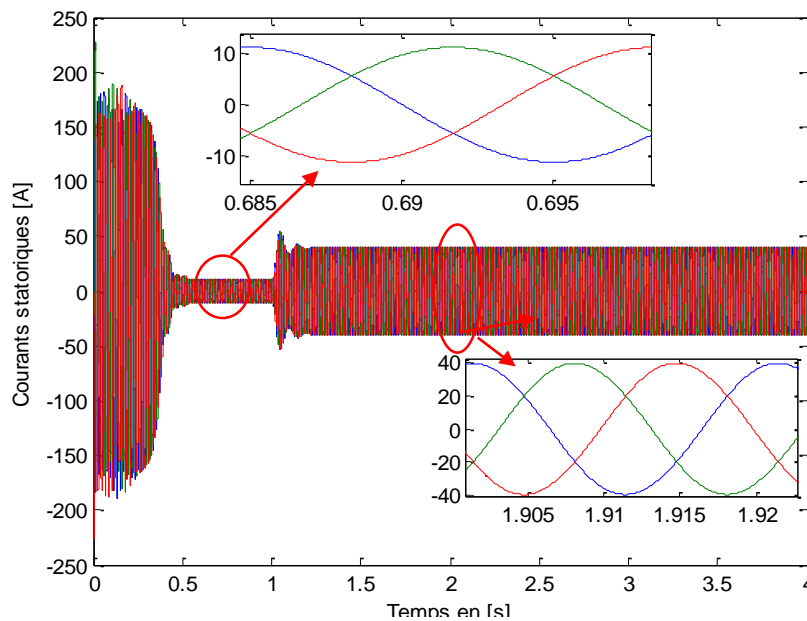


Figure II.5 : Allures des courants statoriques

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 ayant 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 (dq0) et l'inverse sont respectivement comme suit :

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

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

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

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

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

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 :

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

II.6.2 Modèle de la MAS lié au système d'axes (dqo)

La MAS triphasée est représenté schématiquement par la figure II.6 :

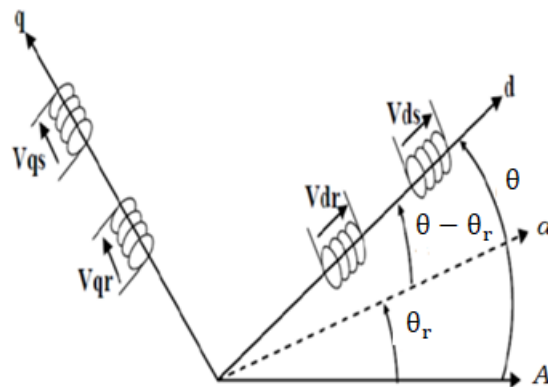


Figure II.6 : Position des axes dqo par rapport aux axes de la machine [9]

Avec : θ_r : Angle du rotor entre a et A ; θ : Angle du stator entre A et d ; $\theta - \theta_r$: Angle du rotor entre a et d

II.6.2.1 Equations de la tension :

Pour le stator

$$\begin{cases} [v_{sd}] = [R_s][i_{sd}] + \frac{d\Phi_{sd}}{dt} - \omega_s[\Phi_{sq}] \\ [v_{sq}] = [R_s][i_{sq}] + \frac{d\Phi_{sq}}{dt} + \omega_s[\Phi_{sd}] \end{cases} \quad (\text{II.21})$$

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

Pour le rotor :

$$\begin{cases} [v_{rd}] = [R_r][i_{rd}] + \frac{d\Phi_{rd}}{dt} - (\omega_s - \omega_r)[\Phi_{rq}] \\ [v_{rq}] = [R_r][i_{rq}] + \frac{d\Phi_{rq}}{dt} + (\omega_s - \omega_r)[\Phi_{rd}] \end{cases} \quad (\text{II.22})$$

Où : $\begin{bmatrix} v_{rd} \\ v_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}$: Tension rotorique (rotor en court-circuit) ; $\omega_r = P\Omega_r$: Vitesse angulaire électrique et mécanique du rotor et nombre de paires de pole.

II.6.2.2 Equations des flux

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

$$\begin{cases} \Phi_{sd} = L_s i_{sd} + L_m i_{rd} \\ \Phi_{sq} = L_s i_{sq} + L_m i_{rq} \\ \Phi_{rd} = L_r i_{rd} + L_m i_{sd} \\ \Phi_{rq} = L_r i_{rq} + L_m i_{sq} \end{cases} \quad (\text{II.23})$$

A partir du système d'équations (II.23) on peut calculer :

$$\begin{cases} i_{sd} = \frac{\Phi_{sd} L_r - \Phi_{rd} L_m}{L_s L_r - (L_m)^2} \\ i_{sq} = \frac{\Phi_{sq} L_r - \Phi_{rq} L_m}{L_s L_r - (L_m)^2} \\ i_{rd} = \frac{\Phi_{rd} L_s - \Phi_{sd} L_m}{L_s L_r - (L_m)^2} \\ i_{rq} = \frac{\Phi_{rq} L_s - \Phi_{sq} L_m}{L_s L_r - (L_m)^2} \end{cases} \quad (\text{II.24})$$

En utilisant le système d'équations (II.24), on peut réécrire les systèmes d'équations (II.21) et (II.22) sous cette forme :

$$\begin{cases} v_{sd} = k_1 \Phi_{sd} - k_2 \Phi_{rd} + \frac{d\Phi_{sd}}{dt} - \omega_s \Phi_{sq} \\ v_{sq} = k_1 \Phi_{sq} - k_2 \Phi_{rq} + \frac{d\Phi_{sq}}{dt} + \omega_s \Phi_{sd} \\ 0 = k_3 \Phi_{rd} - k_4 \Phi_{sd} + \frac{d\Phi_{rd}}{dt} - (\omega_s - \omega_r) \Phi_{rq} \\ 0 = k_3 \Phi_{rq} - k_4 \Phi_{sq} + \frac{d\Phi_{rq}}{dt} + (\omega_s - \omega_r) \Phi_{rd} \end{cases} \quad (\text{II.25})$$

$$\text{Où : } k_1 = \frac{r_s L_r}{L_s L_r - (L_m^2)} ; k_2 = \frac{r_s L_m}{L_s L_r - (L_m^2)} ; k_3 = \frac{r_r L_s}{L_s L_r - (L_m^2)} ; k_4 = \frac{r_r L_m}{L_s L_r - (L_m^2)}.$$

II.6.2.3 Equation du couple électromagnétique

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

$$C_{em} = \frac{P L_m}{L_s L_r - (L_m^2)} (\Phi_{rd} \Phi_{sq} - \Phi_{rq} \Phi_{sd}) \quad (\text{II.26})$$

II.6.2.4 Equation mécanique

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

$$J \frac{d\Omega_r}{dt} = C_{em} - C_r - K_f \cdot \Omega_r \quad (\text{II.27})$$

A partir les expressions (II.25), (II.26) et (II.27), on obtient le modèle de la MAS sous la forme d'un système d'équations différentielles suivant (format Cauchy) :

$$\begin{cases} \frac{d\Phi_{sd}}{dt} = v_{sd} - k_1 \Phi_{sd} + k_2 \Phi_{rd} + \omega_s \Phi_{sq} \\ \frac{d\Phi_{sq}}{dt} = v_{sq} - k_1 \Phi_{sq} + k_2 \Phi_{rq} - \omega_s \Phi_{sd} \\ \frac{d\Phi_{rd}}{dt} = -k_3 \Phi_{rd} + k_4 \Phi_{sd} + (\omega_s - \omega_r) \Phi_{rq} \\ \frac{d\Phi_{rq}}{dt} = -k_3 \Phi_{rq} + k_4 \Phi_{sq} - (\omega_s - \omega_r) \Phi_{rd} \end{cases} \quad (\text{II.28})$$

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

Dans cette partie, nous avons réalisé un bloc de simulation de la MAS dans le model (dqo) sous l'environnement MATLAB/Simulink, à partir d'un développement mathématique précédent des équations électriques et mécanique et transformation de Park (directe et inverse), où la MAS est alimenté par une source purement sinusoïdale et équilibrée, suivi d'une visualisation des grandeurs (courants statoriques et rotoriques, vitesse de rotation et couple électromagnétique). Ainsi, les résultats sont affichés et commentés.

Les figures (II.7 à II.10) montrent les résultats de simulation lors démarrage à vide de la MAS, puis l'introduction d'une charge nominale de 100Nm à t =1s. D'après les résultats, qu'on a obtenus dans la simulation (dqo), on remarque les résultats se sont identiques avec les résultats de simulation dans le repère (abc). Vitesse de rotation, couple électromagnétique, courants réels statoriques et rotorique, sont représentés dans les figures (II.2 à II.5) et les figures (II.7 à II.10), respectivement.

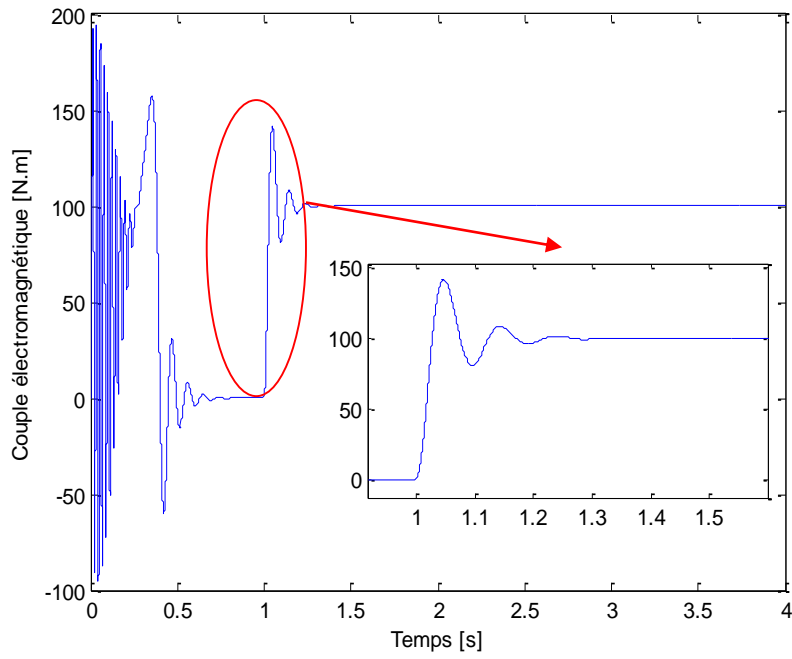


Figure II.7 : Allure du couple électromagnétique

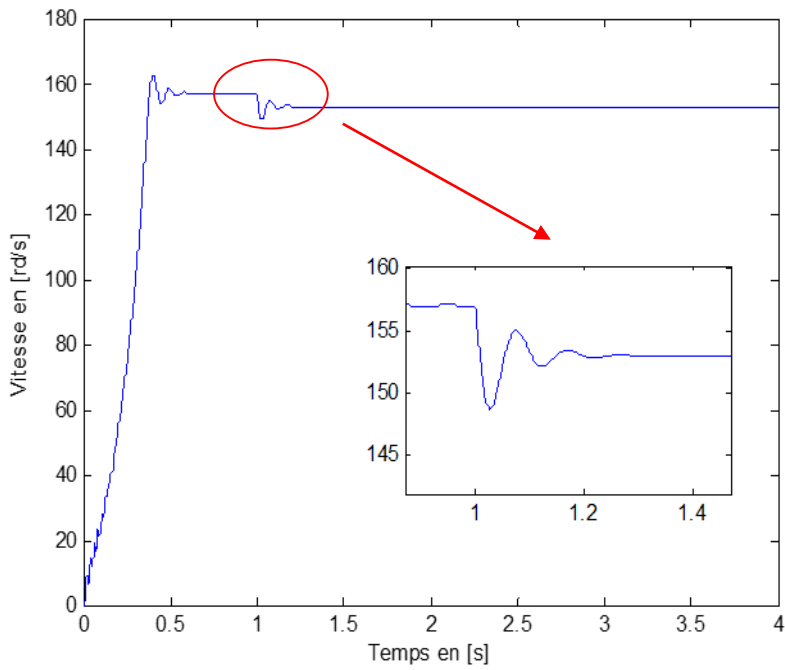


Figure II.8 : Allure de la vitesse de rotation

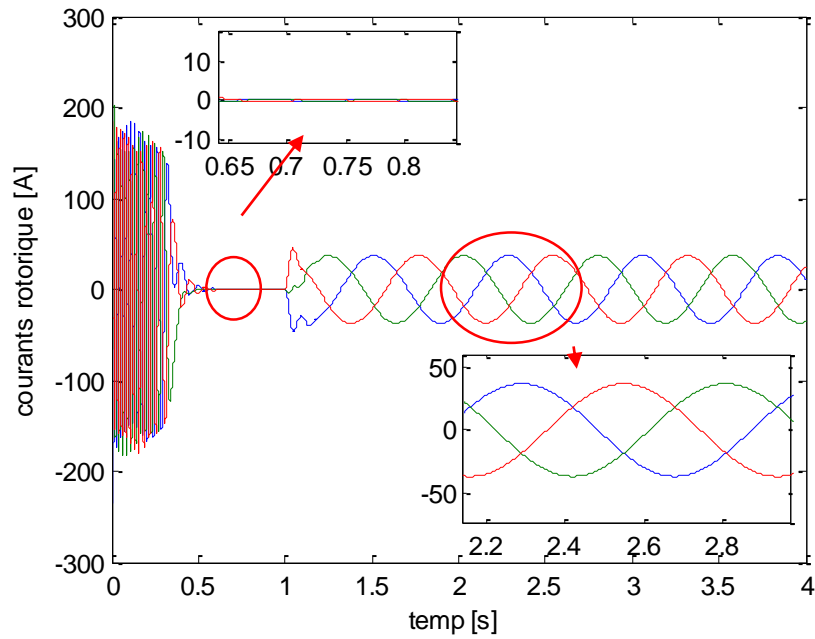


Figure II.9 : Allures des courants rotoriques

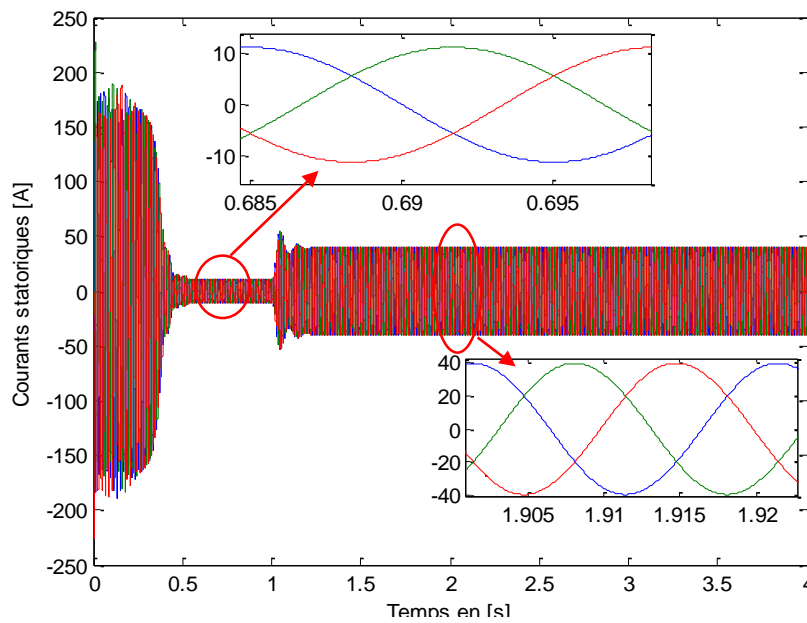


Figure II.10 : Allures des courants statoriques

II.7 Analyse spectral dans le repère (abc)

II.7.1 Analyse spectral de courant statorique de la phase 1 (as)

Une analyse spectrale du courant d'une phase statorique de la MAS dans l'état sain en régime permanent est effectuée, et nous avons remarqué un pic dont la fréquence est égale à la fréquence synchronisme 50 Hz, comme la montre la figure (II.11).

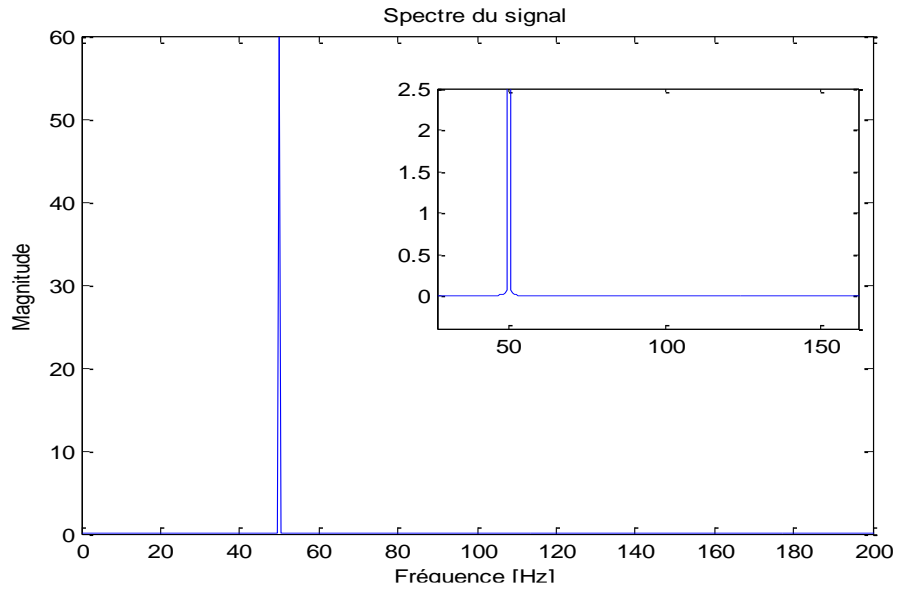


Figure II.11 : Spectre du courant d'une phase statorique de la MAS à l'état sain

II.7.2 Analyse spectral du couple et de la vitesse

Une analyse spectrale du couple et de la vitesse de la MAS dans l'état sain est établie en régime permanent. Sur les spectres montrés dans les figures (II.12) et (II.13), nous relevons la présence de la composante fréquentielle continue, confirmant ainsi qu'avec les considérations prises, ces grandeurs sont des signaux continus.

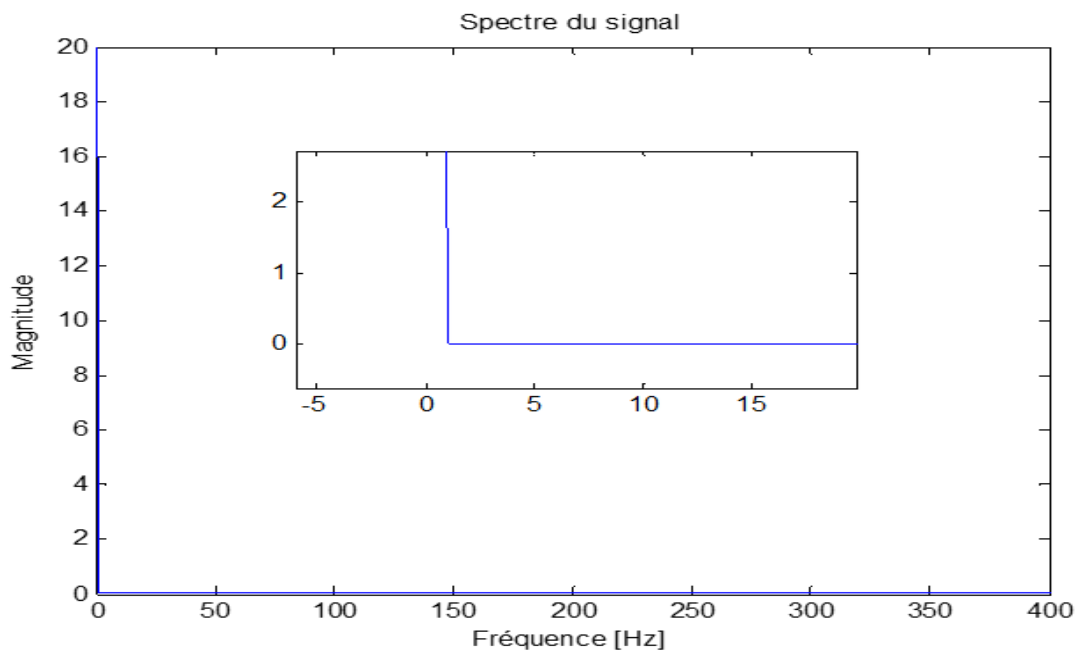


Figure II.12 : Spectre du couple électromagnétique à l'état sain

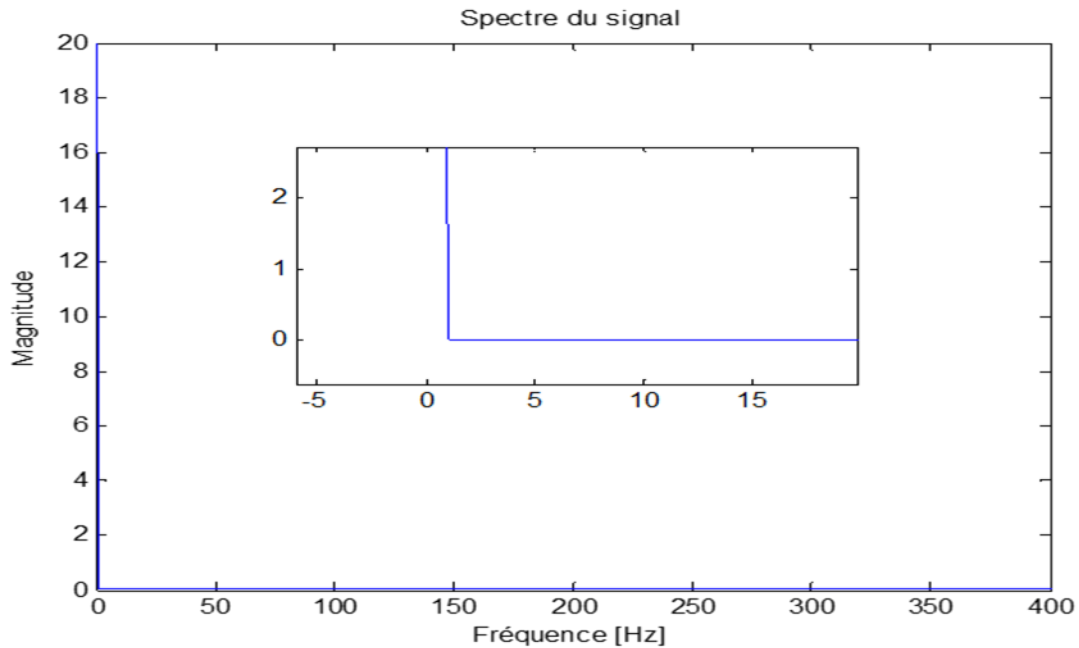


Figure II.13 : Spectre de la vitesse à l'état sain

II.8 Conclusion

Dans ce chapitre, tout en adoptant quelques hypothèses simplificatrices, les machines asynchrones sont modélisées dans deux référentiels naturel (abc) et virtuel ($dq0$).

A l'aide de logiciel MATLAB/Simulink, nous avons simulé la MAS dans les repères naturel et virtuel (transformation Concordia suivie par la matrice de rotation de Park) pour faire une étude caractéristique de la MAS directement alimentée par une source sinusoïdale équilibrée. Nous avons remarqué que les résultats de simulation dans les repères abc et $dq0$ sont identiques pour les deux modèles. Ainsi, le model dans le repère naturel nous permettra d'effectuer des nouvelles simulations avec la présence de défauts (régime dégradé). Par ailleurs, l'analyse spectrale nous permettra de faire une comparaison des résultats de ces simulations dans le dernier chapitre, car nous avons besoin de cette dernière pour mieux comprendre l'influence de défauts sur les grandeurs de la machine asynchrone à cage d'écureuil.

CHAPITRE III

III.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous consacrons cette étude à la modélisation, et à la simulation de la MAS en présence des différents défauts au rotor et au stator dans le repère réel. Le premier défaut traitera la cassure d'une ou plusieurs barres adjacentes, et l'autre défaut sera un court-circuit entre spires d'une phase statorique. A la fin, nous traiterons les résultats de simulation par analyse spectrale pour suivre l'évolution du défaut, et les changements sur les grandeurs du courant, vitesse et couple électromagnétique

III.2 Paramètres de rotor de la machine étudié

On peut présenter la cage d'écureuil comme un enroulement polyphasé dont le nombre de paires de pôles est égal au nombre de paires de pôles du champ tournant. Si Nb est le nombre de barres de la cage, l'angle du déphasage des F.E.M. (ainsi que l'angle de déphasage des courants) des barres voisines égal à l'angle électrique α_p , où l'angle mécanique est :

$$\alpha = \frac{2.\pi}{Nb} \tag{III.1}$$

La figure (III.1) illustre un enroulement simplifié de la cage (a) et des phases (b) des courants de barres et d'anneau pour l'enroulement de la cage. Les barres sont numérotées de 1 à Nb, les courants des barres et d'anneaux sont notés respectivement, où les flèches indiquant les directions positives.

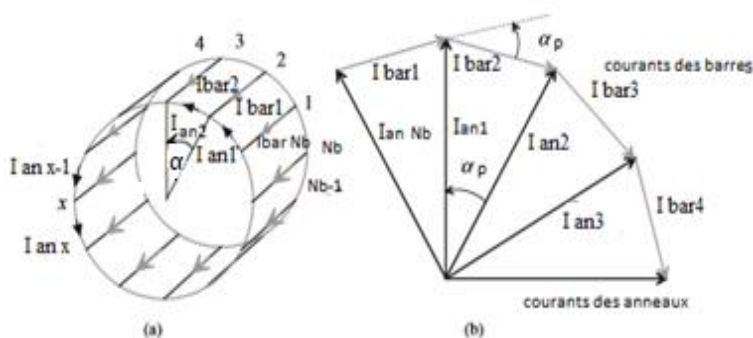


Figure III. 1 : a) Schéma d'enroulement d'une cage ; b) un secteur d'un polygone des phases des courants de barre et une section du diagramme de phases actuel [24]

La figure III.1 illustre un diagramme de phase de courant pour les barres du rotor, elle est construite de telle manière que le déphasage angulaire des courants dans les barres est α_p .

D'après la figure III.1.a et en appliquant la première loi de Kirchhoff à chaque point de connexion de la barre et de l'anneau, on peut écrire :

$$I_{an,x} = I_{bar,x} + I_{an,x-1} \tag{III.2}$$

Avec : $x^{i\text{ème}}$ barre ; $x^{i\text{ème}}$ et $(x-1)^{i\text{ème}}$ portions d'anneau.

Le déphasage entre les courants des deux segments d'anneau est égal à αp . La barre est constituée d'un seul enroulement dans une phase rotorique, où le nombre de spires $N_r = \frac{1}{2}$. Le courant qui circule dans une barre est le courant d'une phase rotorique. Maintenant, la valeur efficace du courant induit dans une barre est I_{bar} comme on le voit sur la figure (III.1.b), on obtient le courant dans l'anneau comme suit :

$$I_{an} = \frac{I_{bar}}{2 \cdot \sin\left(\frac{p\pi}{Nb}\right)} \tag{III.3}$$

On écrit les expressions de la résistance et de l'inductance de fuite du rotor d'une barre rotorique avec l'ajout de la proportion des anneaux de court-circuit comme suit :

$$r_{rr} = r_{bar} + \frac{r_{an}}{2 \cdot \sin^2\left(\frac{p\pi}{Nb}\right)} \tag{III.4}$$

$$l_{rr} = l_{bar} + \frac{l_{an}}{2 \cdot \sin^2\left(\frac{p\pi}{Nb}\right)} \tag{III.5}$$

Où : r_{bar} et l_{bar} : Résistance et inductance de fuite d'une seule barre, respectivement ; r_{an} et l_{an} : Résistance et inductance de fuite, respectivement du segment de l'anneau entre deux barres voisines. La figure III.2 illustre la cage d'écureuil avant et après l'ajout des proportions des anneaux aux barres rotoriques.

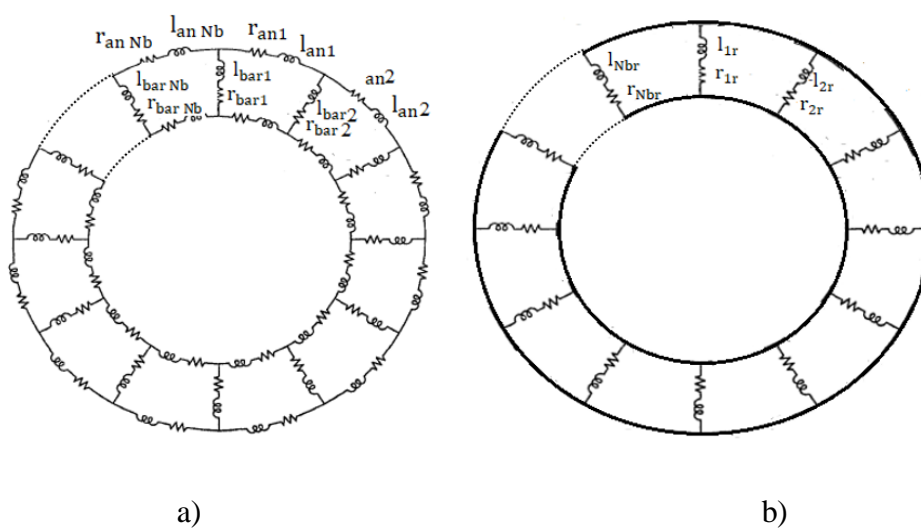


Figure III.2 : Cage d'écureuil avant et après l'ajout des proportions des anneaux aux barres rotoriques

Le nombre de spires effectives de la bobine dans un stator est $m_s K_{bs} N_s$ et dans le rotor $m_r K_{br} N_r$. Dans le rotor à cage, on prend généralement le coefficient de bobinage $K_{br} = 1$ et le nombre de spire $N_r = \frac{1}{2}$ dans une phase rotorique. Le courant du rotor I'_r , ramené au stator et circulant dans l'enroulement statorique doit produire une liaison de courant égale au courant réel rotorique lorsqu'il circule dans le rotor. Ainsi, on écrit les deux forces magnétomotrices comme suit :

$$m_s K_{bs} N_s I'_r = m_r K_{sqr} K_{br} N_r I_r \quad (\text{III.6})$$

Avec : m_s ; m_r : Nombres de phases statorique et rotorique, respectivement ; K_{sqr} : Coefficient d'inclinaison du rotor par rapport au stator ; K_{bs} ; K_{br} : Coefficients de bobinage statorique et rotorique, respectivement ; N_s ; N_r : Nombres de spires des phases statorique et rotorique, respectivement.

Le rapport de cette transformation des courants devient :

$$K_{rs} = \frac{I_r}{I'_r} = \frac{m_s K_{bs} N_s}{m_r K_{sqr} K_{br} N_r} = \frac{m_s K_{bs} N_s}{m_r \cdot 1 \cdot K_{sqr} \cdot \frac{1}{2}} = \frac{2 \cdot m_s \cdot K_{bs} \cdot N_s}{m_r \cdot K_{sqr}} \quad (\text{III.7})$$

En utilisant la conservation de puissances active ($m_s \cdot I_r'^2 \cdot r_r = m_r \cdot I_r^2 \cdot r_{rr}$), on obtient l'expression de la résistance et inductance de fuite du rotor ramenée au stator :

$$r_r = \frac{m_r \cdot I_r'^2 \cdot r_{rr}}{m_s \cdot I_r'^2} \quad (\text{III.8})$$

On pose :

$$K_{rs} = \frac{I_r}{I'_r} \quad (\text{III.9})$$

On réécrit l'expression de la résistance du rotor ramenée au stator comme suit :

$$r_r = \frac{N_b}{m_s} \cdot \left[\frac{I_r}{I'_r} \right]^2 \cdot r_{rr} = \frac{m_r}{m_s} K_{rs}^2 \cdot r_{rr} = \frac{m_r}{m_s} \cdot \left[\frac{2 \cdot m_s K_{bs} N_s}{m_r \cdot K_{sqr}} \right]^2 \cdot r_{rr} = \frac{4 \cdot m_s \cdot (K_{bs} \cdot N_s)^2}{m_r \cdot K_{sqr}^2} \cdot r_{rr} \quad (\text{III.10})$$

En utilisant le même développement, on obtient l'inductance du rotor ramenée au stator :

$$l_r = \frac{4 \cdot m_s \cdot (K_{bs} \cdot N_s)^2}{m_r \cdot K_{sqr}^2} \cdot l_{rr} \quad (\text{III.11})$$

En posant : $\rho = \frac{4 \cdot m_s \cdot (K_{bs} \cdot N_s)^2}{m_r \cdot K_{sqr}^2}$, on obtient les expressions de la résistance et de l'inductance de fuite ramenées au stator comme suit :

$$\begin{cases} r_r = \rho \cdot r_{rr} \\ l_r = \rho \cdot l_{rr} \end{cases} \quad (\text{III.12})$$

N.B. : La modélisation et la simulation de la MAS dans le repère réel avec les grandeurs ramenées au stator sont déjà réalisées dans le 2^{ème} chapitre et les différents paramètres sont donnés dans l'annexe 1.

La figure III.3 montre l'enroulement rotorique ramené à l'enroulement statorique.

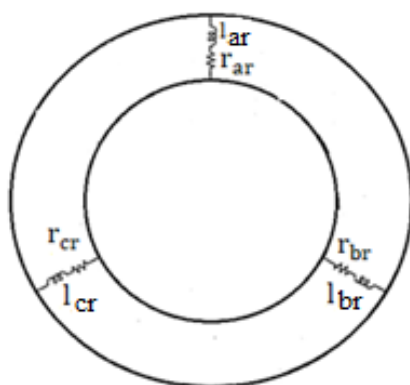


Figure III.3 : Enroulement rotorique ramené à l'enroulement statorique

III.3 Modèle de la MAS étudié dans le repère réel

Dans cette partie de mémoire, on modélisera la MAS dans le repère réel sans ramener les grandeurs rotoriques aux grandeurs statoriques, où les nombres de phases statorique et rotorique sont égales à trois et à $m_r = \frac{N_b}{p}$ (nombre de phases rotoriques), respectivement.

III.3.1 Equations électriques

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

Pour stator

$$\begin{cases} v_{as} = r_{as}i_{as} + \frac{d\Phi_{as}}{dt} \\ v_{bs} = r_{bs}i_{bs} + \frac{d\Phi_{bs}}{dt} \\ v_{cs} = r_{cs}i_{cs} + \frac{d\Phi_{cs}}{dt} \end{cases} \quad (\text{III.13.a})$$

On réécrit le système d'équations (III.13.a) sous la forme matricielle suivante :

$$[v_s] = [R_s][i_s] + \frac{d}{dt}[\Phi_s] \quad (\text{III.13.b})$$

Pour le rotor à cage d'écurueil de Nb barres, on obtient :

$$\begin{cases} V_{1r} = r_{1r}i_{1r} + \frac{d\Phi_{1r}}{dt} \\ V_{2r} = r_{2r}i_{2r} + \frac{d\Phi_{2r}}{dt} \\ V_{3r} = r_{3r}i_{3r} + \frac{d\Phi_{3r}}{dt} \\ \vdots \\ V_{(Nb-1)r} = r_{(Nb-1)r}i_{(Nb-1)r} + \frac{d\Phi_{(Nb-1)r}}{dt} \\ V_{Nbr} = r_{Nbr}i_{Nbr} + \frac{d\Phi_{Nbr}}{dt} \end{cases} \quad (III.14)$$

On réécrit aussi le système d'équations (III.14) sous la forme matricielle suivante :

$$[v_{rr}] = [R_{rr}][i_{rr}] + \frac{d}{dt}[\Phi_{rr}] \quad (III.15)$$

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

$$[v_s] = \begin{bmatrix} v_{as} \\ v_{bs} \\ v_{cs} \end{bmatrix}; \quad [v_{rr}] = \begin{bmatrix} v_{1r} \\ v_{2r} \\ v_{3r} \\ \vdots \\ v_{(Nb-1)r} \\ v_{Nbr} \end{bmatrix}; \quad [i_s] = \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix}; \quad [i_{rr}] = \begin{bmatrix} i_{1r} \\ i_{2r} \\ i_{3r} \\ \vdots \\ i_{(Nb-1)r} \\ i_{Nbr} \end{bmatrix}; \quad [\Phi_s] = \begin{bmatrix} \Phi_{as} \\ \Phi_{bs} \\ \Phi_{cs} \end{bmatrix};$$

$$[\Phi_{rr}] = \begin{bmatrix} \Phi_{1r} \\ \Phi_{2r} \\ \Phi_{3r} \\ \vdots \\ \Phi_{(Nb-1)r} \\ \Phi_{Nbr} \end{bmatrix}.$$

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

$$[R_s] = \begin{bmatrix} r_{as} & 0 & 0 \\ 0 & r_{bs} & 0 \\ 0 & 0 & r_{cs} \end{bmatrix}; \quad [R_{rr}] = \begin{bmatrix} r_{1r} & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & r_{2r} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & r_{3r} & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & r_{Nbr} \end{bmatrix};$$

Les enroulements statoriques et rotoriques étant symétriques, on aura :

$$r_{as} = r_{bs} = r_{cs} = r_s; \quad r_{1r} = r_{2r} = \dots = r_{(Nb-1)r} = r_{Nbr} = r_{rr}$$

III.3.2 Equations magnétiques

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

$$\begin{cases} [\Phi_s] = [L_{ss}] \cdot [i_s] + [M_{sbar}] \cdot [i_{rr}] \\ [\Phi_{rr}] = [L_{rbar}] \cdot [i_{rr}] + [M_{bars}] \cdot [i_s] \end{cases} \quad (III.16)$$

Avec :

$$[L_{ss}] = \begin{bmatrix} l_{fs} + l_{ms} & -\frac{l_{ms}}{2} & -\frac{l_{ms}}{2} \\ -\frac{l_{ms}}{2} & l_{fs} + l_{ms} & -\frac{l_{ms}}{2} \\ -\frac{l_{ms}}{2} & -\frac{l_{ms}}{2} & l_{fs} + l_{ms} \end{bmatrix};$$

$$[L_{rbar}] = \begin{bmatrix} l_{rr} + l_{mb} & l_{mb} \cos\left(\frac{2\pi}{Nb}\right) & l_{mb} \cos\left(\frac{2.2\pi}{Nb}\right) & \dots & l_{mb} \cos\left(\frac{(Nb-1).2\pi}{Nb}\right) \\ l_{mb} \cos\left(\frac{2\pi}{Nb}\right) & l_{rr} + l_{mb} & l_{mb} \cos\left(\frac{2\pi}{Nb}\right) & \dots & l_{mb} \cos\left(\frac{(Nb-2).2\pi}{Nb}\right) \\ l_{mb} \cos\left(\frac{2.2\pi}{Nb}\right) & l_{mb} \cos\left(\frac{2\pi}{Nb}\right) & l_{rr} + l_{mb} & \dots & l_{mb} \cos\left(\frac{(Nb-3).2\pi}{Nb}\right) \\ l_{mb} \cos\left(\frac{3.2\pi}{Nb}\right) & l_{mb} \cos\left(\frac{2.2\pi}{Nb}\right) & l_{mb} \cos\left(\frac{2\pi}{Nb}\right) & \ddots & l_{mb} \cos\left(\frac{(Nb-4).2\pi}{Nb}\right) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ l_{mb} \cos\left(\frac{(Nb-1).2\pi}{Nb}\right) & l_{mb} \cos\left(\frac{(Nb-2).2\pi}{Nb}\right) & l_{mb} \cos\left(\frac{(Nb-3).2\pi}{Nb}\right) & \dots & l_{rr} + l_{mb} \end{bmatrix}$$

Matrices des inductances statoriques et rotoriques respectivement ; l_{fs} et l_{rr} : Inductances de fuite statorique et rotorique, respectivement ; l_{ms} et l_{mb} : Maximums des inductances de magnétisation au stator et au rotor, respectivement ;

$$[M_{sbar}] = [M_{bars}]^t = M_{sbar} \begin{bmatrix} \cos\left(\theta_r + \frac{\pi}{Nb}\right) & \cos\left(\theta_r + \frac{3\pi}{Nb}\right) & \cos\left(\theta_r + \frac{5\pi}{Nb}\right) & \dots & \cos\left(\theta_r + \frac{(2.Nb-1)\pi}{Nb}\right) \\ \cos\left(\theta_r + \frac{\pi}{Nb} - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_r + \frac{3\pi}{Nb} - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_r + \frac{5\pi}{Nb} - \frac{2\pi}{3}\right) & \dots & \cos\left(\theta_r + \frac{(2.Nb-1)\pi}{Nb} - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3} + \frac{\pi}{Nb}\right) & \cos\left(\theta_r + \frac{3\pi}{Nb} + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_r + \frac{5\pi}{Nb} + \frac{2\pi}{3}\right) & \dots & \cos\left(\theta_r + \frac{(2.Nb-1)\pi}{Nb} + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix}$$

: Matrices des inductances de couplage entre stator et le rotor et inversement.

Avec : M_{sb} : Maximum d'inductances mutuelle stator /rotor.

En introduisant les expressions des flux (III.16) dans les équations des tensions du stator et du rotor (III.13) et (III.15), on obtient :

$$\begin{cases} [v_s] = [R_s] \cdot [i_s] + \frac{d}{dt} ([L_{ss}] \cdot [i_s] + [M_{sbar}] \cdot [i_{rr}]) \\ [v_{rr}] = [R_{rr}] \cdot [i_{rr}] + \frac{d}{dt} ([L_{rbar}] \cdot [i_{rr}] + [M_{bars}] \cdot [i_s]) \end{cases} \quad (III.17)$$

On peut réécrire le système (III.17) sous la forme suivante :

$$\begin{cases} [v_s] = [R_s] \cdot [i_s] + [L_{ss}] \frac{d}{dt} ([i_s]) + [M_{sbar}] \frac{d}{dt} ([i_{rr}]) + \frac{d[M_{sbar}]}{dt} \cdot [i_{rr}] \\ [v_{rr}] = [R_{rr}] \cdot [i_{rr}] + [L_{rbar}] \frac{d}{dt} ([i_{rr}]) + [M_{bars}] \frac{d}{dt} ([i_s]) + \frac{d[M_{bars}]}{dt} \cdot [i_s] \end{cases} \quad (III.18)$$

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.18) devient :

$$\begin{cases} [v_s] = [R_s] \cdot [i_s] + [L_{ss}] \frac{d}{dt} ([i_s]) + [M_{sbar}] \frac{d}{dt} ([i_{rr}]) + \frac{d\theta_r}{dt} \cdot \frac{d[M_{sbar}]}{d\theta_r} \cdot [i_{rr}] \\ [v_{rr}] = [R_{rr}] \cdot [i_{rr}] + [L_{rbar}] \frac{d}{dt} ([i_{rr}]) + [M_{bars}] \frac{d}{dt} ([i_s]) + \frac{d\theta_r}{dt} \cdot \frac{d[M_{bars}]}{d\theta_r} \cdot [i_s] \end{cases} \quad (III.19)$$

$$\text{Où : } \frac{d[M_{sbar}]}{dt} = \frac{d\theta_r}{d\theta_r} \cdot \frac{d[M_{sbar}]}{dt} = \frac{d\theta_r}{dt} \cdot \frac{d[M_{sbar}]}{d\theta_r} = \omega_r \cdot \frac{d[M_{sbar}]}{d\theta_r}.$$

Le système d'équations (III.19) devient :

$$\begin{cases} [v_s] = [R_s] \cdot [i_s] + [L_{ss}] \frac{d}{dt} ([i_s]) + [M_{sbar}] \frac{d}{dt} ([i_{rr}]) + \omega_r \cdot \frac{d[M_{sbar}]}{d\theta_r} \cdot [i_{rr}] \\ [v_{rr}] = [R_{rr}] \cdot [i_{rr}] + [L_{rbar}] \frac{d}{dt} ([i_{rr}]) + [M_{bars}] \frac{d}{dt} ([i_s]) + \omega_r \cdot \frac{d[M_{bars}]}{d\theta_r} \cdot [i_s] \end{cases} \quad (\text{III.20})$$

Le système d'équations (III.20) devient :

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} ([i_s]) = [L_{ss}]^{-1} \{v_s - [R_s] \cdot [i_s] - [M_{sbar}] \frac{d}{dt} ([i_{rr}]) - \omega_r \cdot \frac{d[M_{sbar}]}{d\theta_r} \cdot i_{rr}\} \\ \frac{d}{dt} ([i_{rr}]) = [L_{rbar}]^{-1} \{v_{rr} - [R_{rr}] \cdot [i_{rr}] - [M_{bars}] \frac{d}{dt} ([i_s]) - \omega_r \cdot \frac{d[M_{bars}]}{d\theta_r} \cdot i_s\} \end{cases} \quad (\text{III.21})$$

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

$$\frac{d[M_{sbar}]}{d\theta_r} = \frac{d[M_{bars}]^t}{d\theta_r} = -M_{sbar} \begin{bmatrix} \sin\left(\theta_r + \frac{\pi}{Nb}\right) & \sin\left(\theta_r + \frac{3\pi}{Nb}\right) & \sin\left(\theta_r + \frac{5\pi}{Nb}\right) & \dots & \sin\left(\theta_r + \frac{(2.Nb-1)\pi}{Nb}\right) \\ \sin\left(\theta_r + \frac{\pi}{Nb} - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta_r + \frac{3\pi}{Nb} - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta_r + \frac{5\pi}{Nb} - \frac{2\pi}{3}\right) & \dots & \sin\left(\theta_r + \frac{(2.Nb-1)\pi}{Nb} - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \sin\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3} + \frac{\pi}{Nb}\right) & \sin\left(\theta_r + \frac{3\pi}{Nb} + \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta_r + \frac{5\pi}{Nb} + \frac{2\pi}{3}\right) & \dots & \sin\left(\theta_r + \frac{(2.Nb-1)\pi}{Nb} + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \quad (\text{III.22})$$

III.3.3 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 :

$$C_{em} = \frac{p}{2} [i_s]^t \left\{ \frac{d}{d\theta_r} \begin{bmatrix} L_{ss} & M_{sbar} \\ M_{bars} & L_{rbar} \end{bmatrix} \right\} [i_{rr}] \quad (\text{III.23})$$

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

$$C_{em} = p [i_s]^t \left\{ \frac{d}{d\theta_r} [M_{sbar}] \right\} [i_{rr}] \quad (\text{III.24})$$

III.3.4 Equation mécanique

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

$$C_{em} - C_r - K_f \cdot \Omega_r = J \frac{d\Omega_r}{dt} \quad (\text{III.25})$$

III.3.5 Modèle complet de la MAS étudiée

À partir des équations III.21, III.24 et III.25 et en prenant le vecteur des tensions rotoriques égal à zéro (puisque le rotor en court-circuit), on obtient un système d'équations différentielles $(3+Nb+1)$:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d}{dt}([i_s]) = [L_{ss}]^{-1} \{v_s - [R_s] \cdot [i_s] - [M_{sbar}] \frac{d}{dt}([i_{rr}]) - p \cdot \Omega_r \cdot \frac{d[M_{sbar}]}{d\theta_r} \cdot i_{rr}\} \\ \frac{d}{dt}([i_{rr}]) = [L_{rbar}]^{-1} \{-[R_{rr}] \cdot [i_{rr}] - [M_{bars}] \frac{d}{dt}([i_s]) - p \cdot \Omega_r \cdot \frac{d[M_{bars}]}{d\theta_r} \cdot i_s\} \\ \frac{d\Omega_r}{dt} = \frac{1}{J} \left(p \cdot [i_s]^t \left\{ \frac{d}{d\theta_r} [M_{sbar}] \right\} [i_{rr}] - C_r - K_f \cdot \Omega_r \right) \end{array} \right. \quad (III.26)$$

III.3.6 Simulation et interprétations des résultats de la MAS étudié dans le repère réel

On as réalisé un programme sous l'environnement MATLAB, à base de la méthode numérique « Runge Kutta 4 (RK-4) », qui permet de résoudre le système d'équations différentielles III.26, dans le but d'étudier le fonctionnement sain de la MAS avec les portions des anneaux de cage rotorique ramenées aux barres rotoriques. Les paramètres de la MAS étudiée, la tension d'alimentation et le couple de charge sont donnés dans l'annexe 2. D'après les résultats présentés dans les figures (III.4-III.6), on remarque que le couple, la vitesse et les courants statoriques sont identiques avec les résultats de simulation de la MAS en deuxième chapitre (fig.II.2, fig.II.3, fig.II.5) où l'enroulement rotorique est ramené à l'enroulement statorique. Toutefois, les courants rotoriques ne sont pas identiques, car dans le deuxième chapitre ce sont des courants de trois phases rotoriques ramenées aux bobinages statoriques (figure II.4), par contre ici ce sont des courants dans les trois barres voisines (figure III.7) où le nombre de spires dans chaque barre est égal à 0,5.

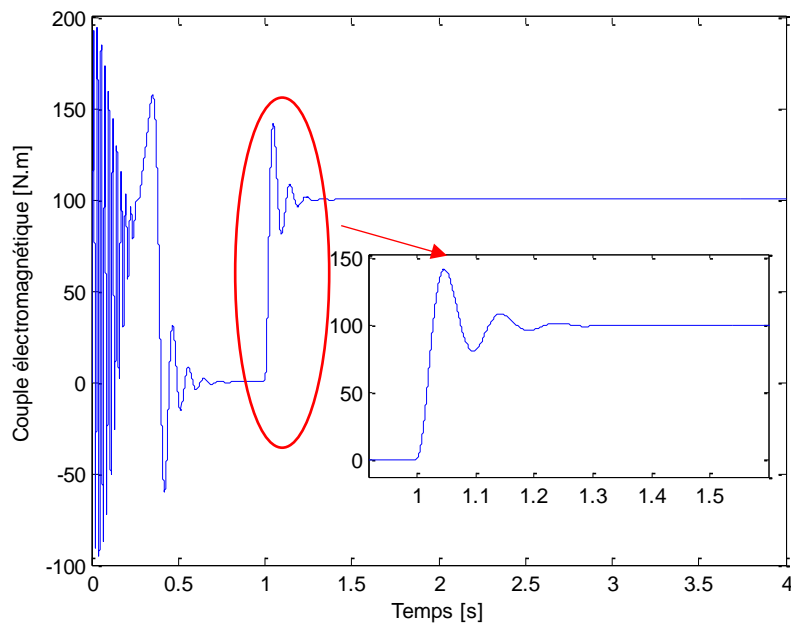


Figure III.4 : Allure du couple électromagnétique

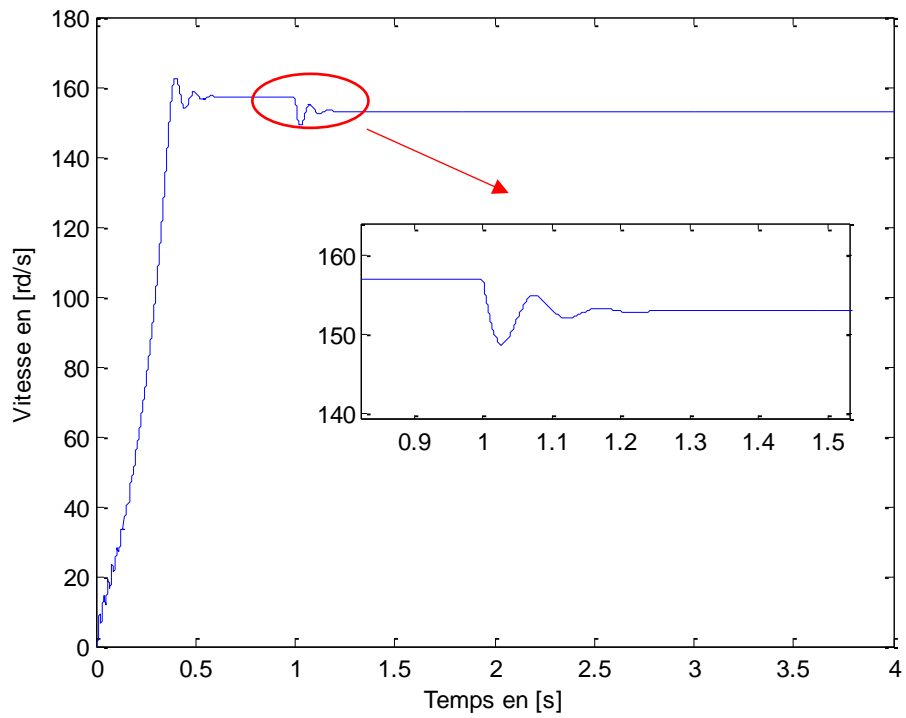


Figure III.5 : Allure de la vitesse de rotation

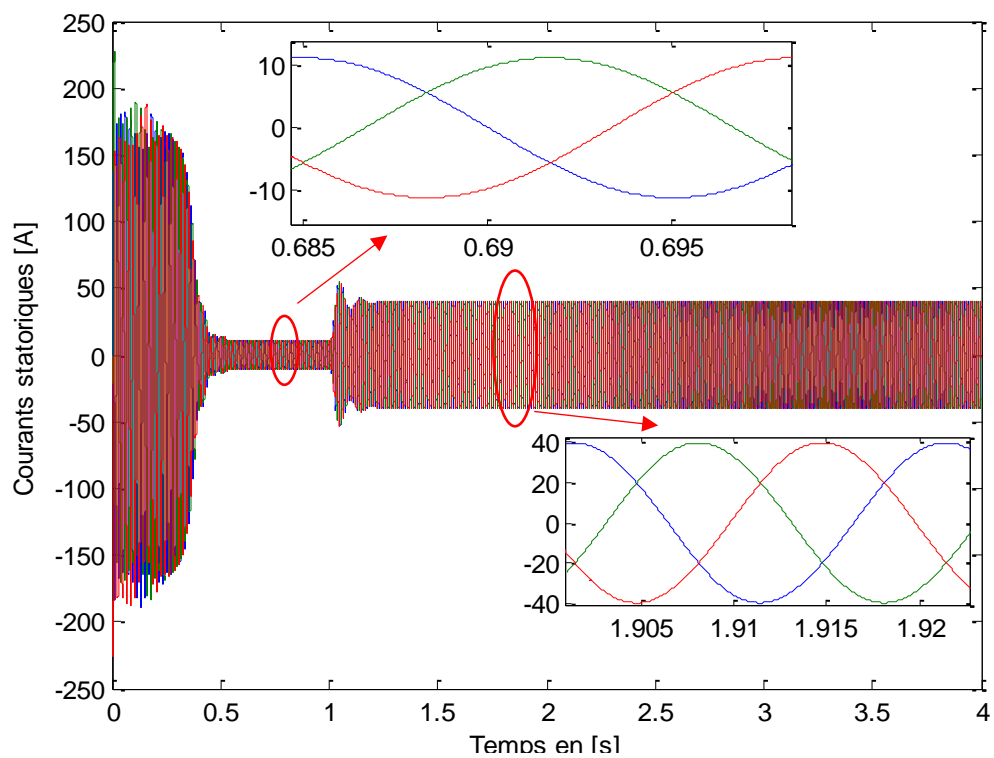


Figure III.6 : Allures des courants statoriques

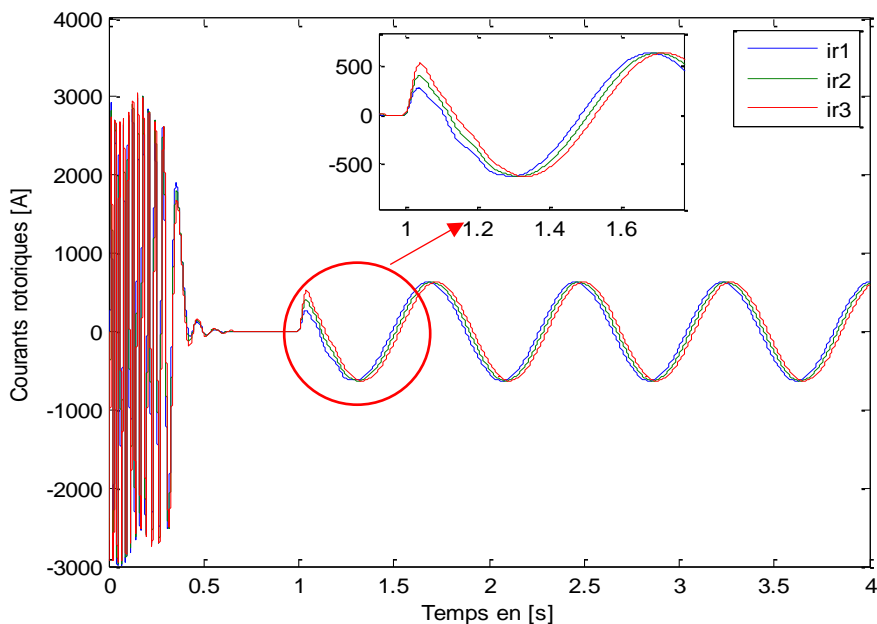


Figure III.7 : Allures des courants de trois barres rotoriques adjacentes

III.4 Modèle du MAS en présence de défaut au rotor

Le type de défaut que nous étudions est la rupture d'une et plusieurs barres rotoriques. La figure (III.4) représente un schéma de l'enroulement rotorique à la présence de la rupture d'une et deux barres. La méthode qu'on a adoptée pour la simulation des défauts rotoriques consiste à remplacer la valeur des résistances des barres défectueuses par une résistance de très grande valeur pour que le courant qui la traverse soit le plus proche possible de zéro en régime permanent. Alors, nous simulons la rupture de la première barre à l'instant $t = 2$ s et la deuxième barre à l'instant $t = 3$ s en augmentant ses résistances de 100 fois de sa valeur initiale.



Figure III.8 : Schéma équivalent de la cage rotorique en présence de défaut de rupture de barres ; (a) une barre, (b) deux barres adjacentes

III.4.1 Simulation et interprétation des résultats du MAS en cas de défaut au rotor

A l'aide de programme que nous avons fait sous l'environnement MATLAB, nous avons réalisés une simulation dans le but d'étudier le fonctionnement de la MAS étudiée en cas de défaut au rotor. Les paramètres de la MAS étudiée, la tension d'alimentation et le couple de charge sont les mêmes. En régime permanent et à partir de l'instant $t = 2s$, on remarque que la rupture d'une barre rotorique produit des oscillations de la vitesse de rotation (fig. III.9) et du couple (fig. III.10), une faible modulation de l'amplitude du courant de phase statorique (fig. III.11) et nous pouvons constater aussi sur la figure III.12 le courant de la première barre diminue jusqu'à s'annuler. A l'instant $t = 3s$, nous remarquons l'annulation de courant de la deuxième barre et une nette augmentation de la modulation d'amplitude du courant ainsi que les oscillations de la vitesse et du couple de la machine comme représenté sur les figures (III.9), (III.10), (III.11) et (III.12) respectivement. Ceci est dû à la rupture des deux barres rotoriques.

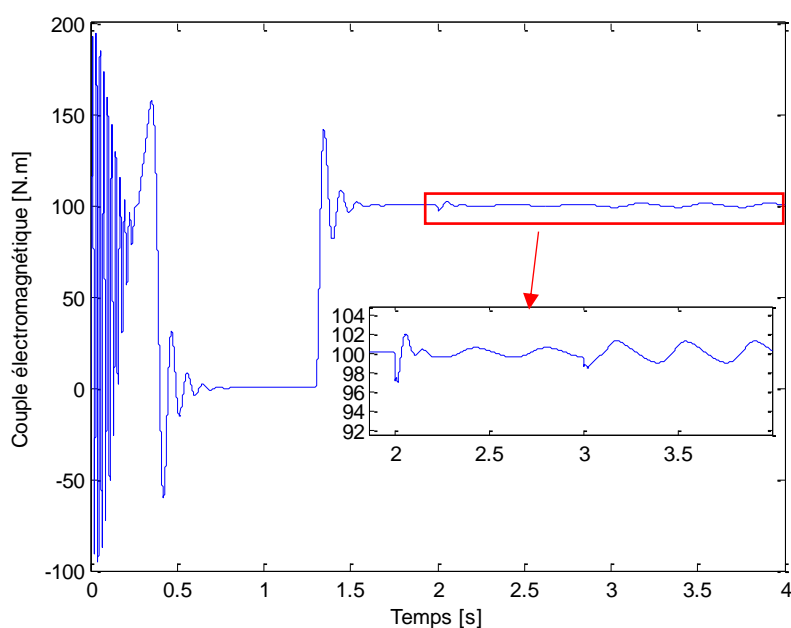


Figure III.9 : Evolution du couple électromagnétique

lors de rupture d'une barre ensuite de 2 barres de la cage

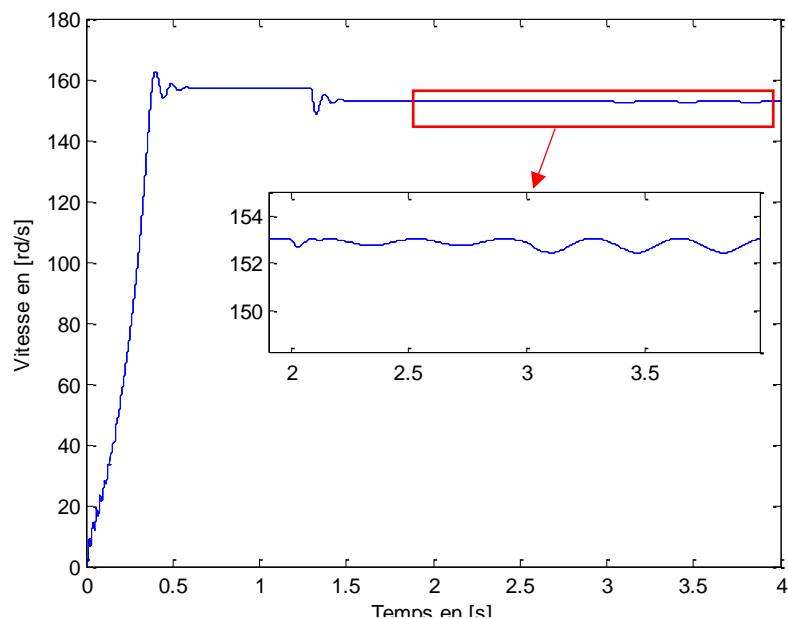


Figure III.10 : Evolution de la vitesse rotorique lors de rupture d'une barre ensuite de 2 barres de la cage

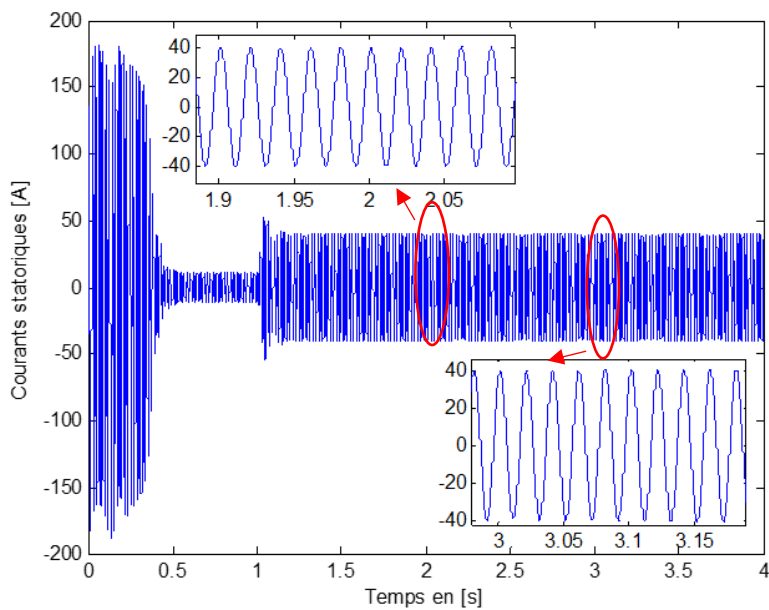


Figure III.11 : Evolution du courant d'une phase statorique lors de rupture d'une barre ensuite de 2 barres de la cage

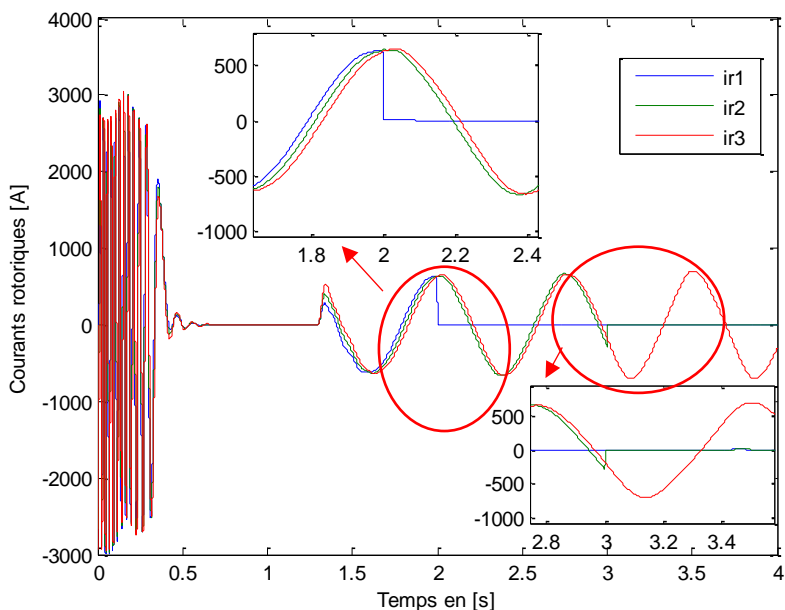


Figure III.12 : Evolution des courants de trois barres rotoriques adjacentes lors de rupture d'une barre ensuite de 2 barres de la cage

III.4.2 Analyse spectrale des résultats obtenus en présence de défauts rotorique

Lors de la rupture des barres, il est difficile d'analyser directement le courant statorique. Ce dernier ne présente en effet qu'une petite modulation presque invisible (figure III.11). Ainsi, l'analyse spectrale permet de mettre en évidence le défaut par calcul du spectre du signal. Nous présentons les spectres relatifs au courant statorique de phase A, couple et à la vitesse rotorique analysés en régime permanent et à charge nominale pour un glissement g :

$$g = \frac{N_s - N_r}{N_s} \tag{III.27}$$

avec : g : Glissement ; N_s : Vitesse de synchronisme ; N_r : Vitesse réel du rotor

En examinant les spectres des grandeurs, dans le cas de cassure de barres rotoriques, la situation devient différente de celle de l'état sain, des composantes fréquentielles caractéristiques du défaut à la fréquence $(1 \pm 2g)f$ constituant une modulation d'amplitude autour de la fréquence d'alimentation, soit 47.5 et 52.5 Hz (Figure III.13). Nous constatons une augmentation d'amplitude de ces modulations lorsque le défaut passe d'une barre à deux barres rotoriques cassées.

Après analyse spectrale du couple et de la vitesse rotorique dans le cas d'une barre cassée, nous obtenons les spectres représentés sur les figures (III.14) et (III.15). Nous constatons une raie caractéristique du défaut à $2gf \approx 2.5$ Hz, en plus de la composante continue. De même,

l'amplitude de l'harmonique du défaut augmente lorsque le défaut passe d'une barre à deux barres rotoriques cassées

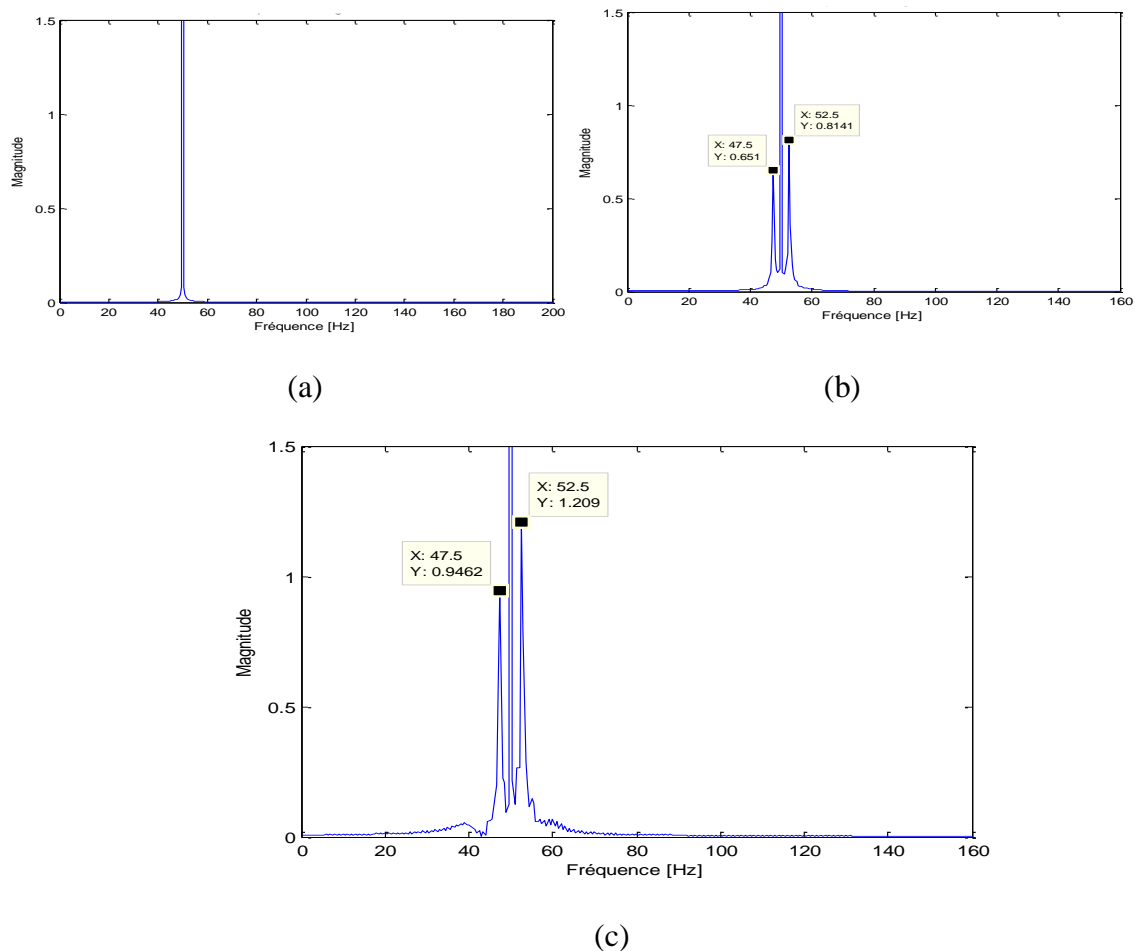


Figure III. 13 : Spectre du courant d'une phase statorique ; état sain(a), cassure d'un barre(b), cassure deux barres (c)

On remarque apparition des composantes fréquentielles caractéristique le défaut à la fréquence $(1 \pm 2g)f$ constituant une modulation d'amplitude autour de la fréquence d'alimentation, soit 47.5 et 52.5 Hz (Figure III.13). On constate une augmentation d'amplitude de ces modulations lorsque le défaut passe d'une barre à deux barres rotoriques cassées.

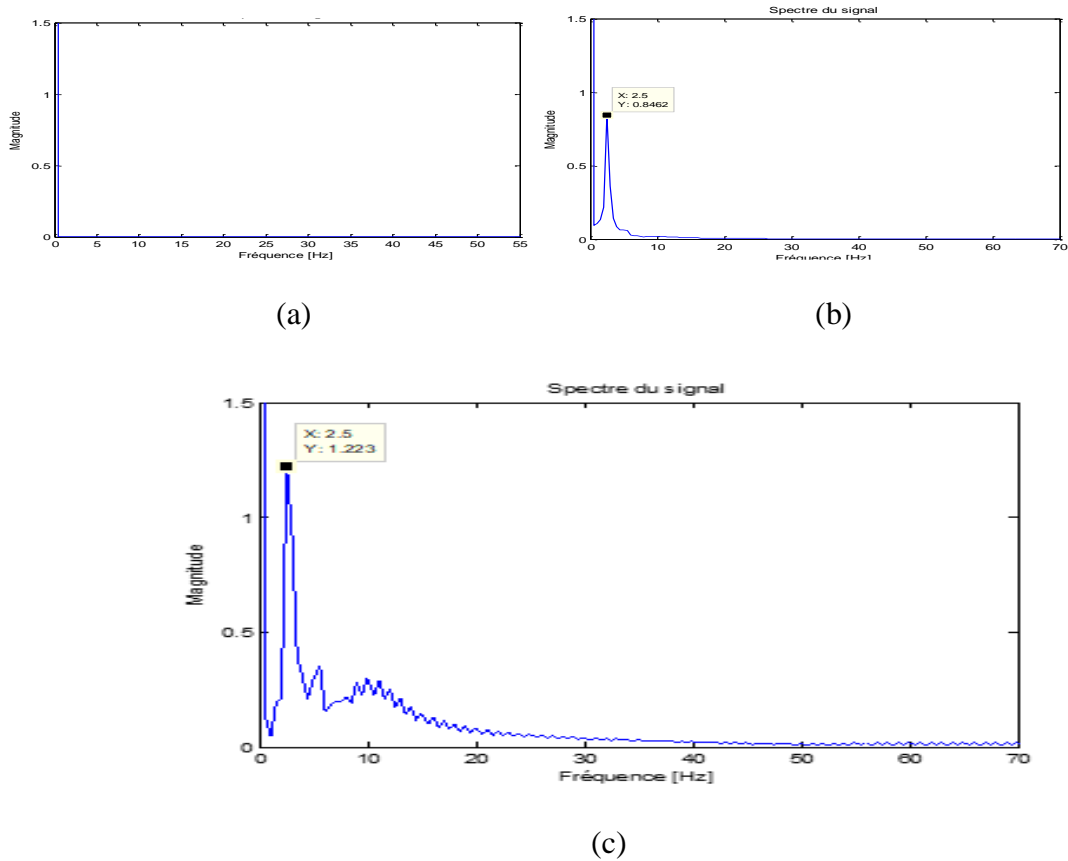


Figure III. 14 : Spectre du couple électromagnétique ;

État sain (a), cassure d'une barre(b), cassures de deux barres (c)

Après analyse spectrale du couple dans le cas d'une barre cassée, nous obtenons les spectres représentés sur les figures (III.14). Nous constatons une raie caractéristique du défaut à $2gf \approx 2.5$ Hz, en plus de la composante continue. De même, l'amplitude de l'harmonique du défaut augmente lorsque le défaut passe d'une barre à deux barres rotoriques cassées

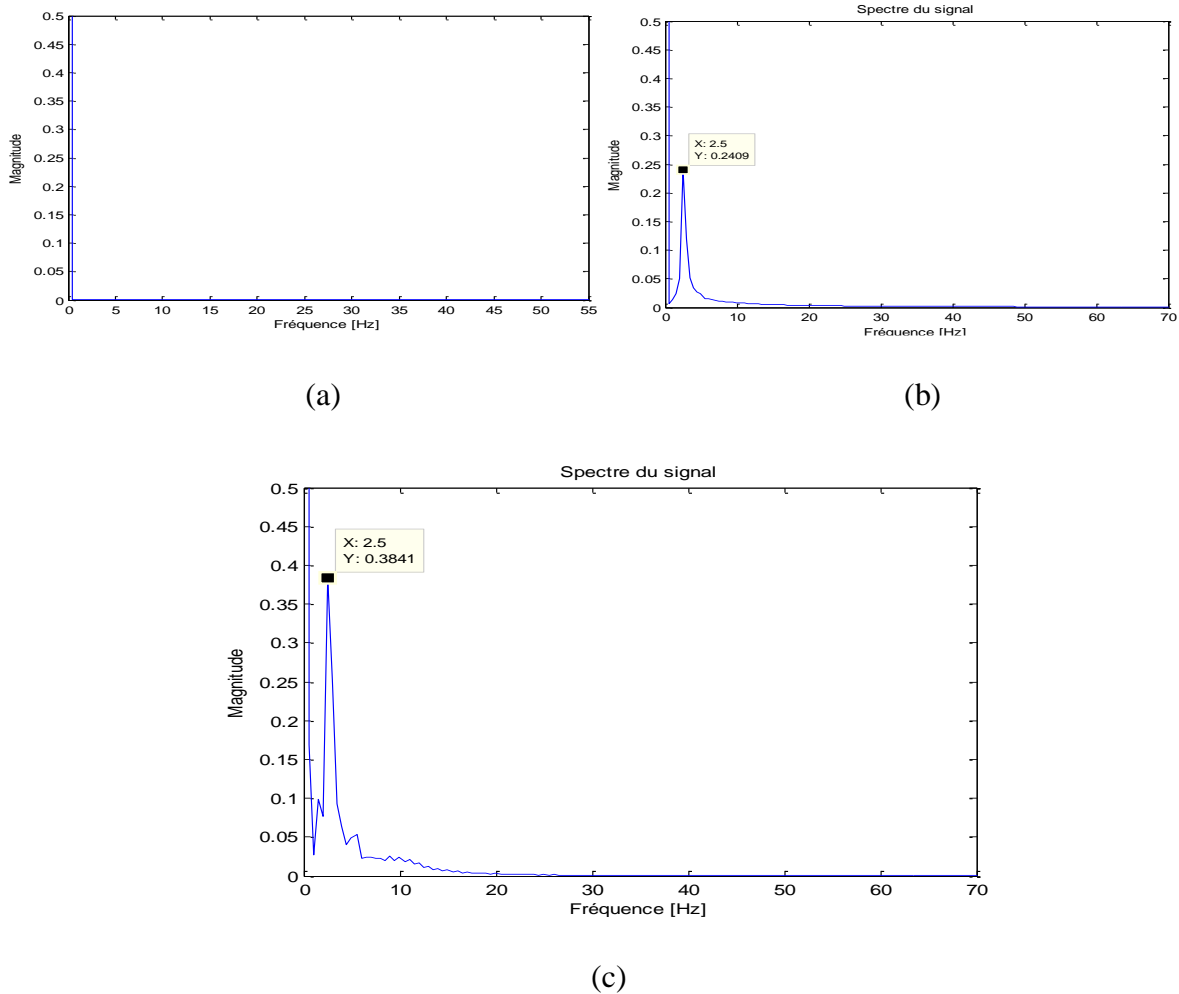


Figure III. 15 : Spectre de la vitesse rotorique ; état sain(a), cassure d’une barre(b), cassure de deux barres

Après analyse spectrale de la vitesse rotorique dans le cas d’une barre cassée, nous obtenons les spectres représentés sur les figures (III.15). Nous constatons une raie caractéristique du défaut à $2gf \approx 2.5$ Hz, en plus de la composante continue. De même, l’amplitude de l’harmonique du défaut augmente lorsque le défaut passe d’une barre à deux barres rotoriques cassées

III.5 Modélisation et simulation de la 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.16). Les parties as1 et as2 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.

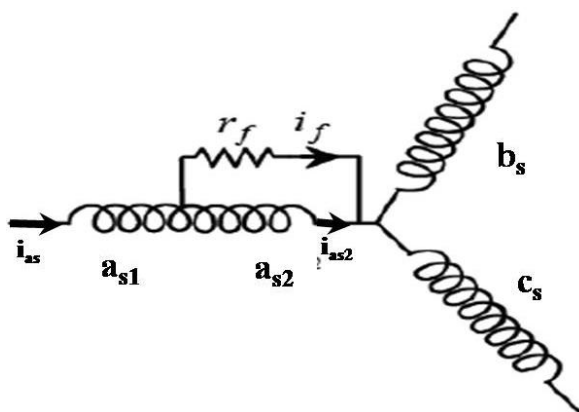


Fig. III.16 : Modèle général d'un court-circuit entre spires dans la phase [9]

III.5.1 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 où :

- 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 la 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 de l'enroulement de la phase (as) :

$$\mu = \frac{N_{as2}}{N_{as1} + N_{as2}} = \frac{N_{as2}}{N_{as}}$$

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

III.5.2 Modèle du MAS avec défaut dans le repère naturel (abc)

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

Pour stator

$$\begin{cases} v_{as1} = r_{as1}i_{as1} + \frac{d\Phi_{as1}}{dt} \\ v_{bs} = r_{bs}i_{bs} + \frac{d\Phi_{bs}}{dt} \\ v_{cs} = r_{cs}i_{cs} + \frac{d\Phi_{cs}}{dt} \\ v_{as2} = r_{as2}i_{as2} + \frac{d\Phi_{as2}}{dt} \end{cases} \quad (\text{III.27.a})$$

On réécrit le système d'équations (III.27.a) sous la forme matricielle suivante :

$$[v_s] = [R_s][i_s] + \frac{d}{dt}[\Phi_s] \quad (\text{III.27.b})$$

Pour le rotor à cage d'écurueil de Nb barres, on obtient :

$$\begin{cases} v_{1r} = r_{1r}i_{1r} + \frac{d\Phi_{1r}}{dt} \\ v_{2r} = r_{2r}i_{2r} + \frac{d\Phi_{2r}}{dt} \\ v_{3r} = r_{3r}i_{3r} + \frac{d\Phi_{3r}}{dt} \\ \vdots \\ v_{(Nb-1)r} = r_{(Nb-1)r}i_{(Nb-1)r} + \frac{d\Phi_{(Nb-1)r}}{dt} \\ v_{Nbr} = r_{Nbr}i_{Nbr} + \frac{d\Phi_{Nbr}}{dt} \end{cases} \quad (\text{III.28})$$

On réécrit aussi le système d'équations (III.28) sous la forme matricielle suivante :

$$[v_{rr}] = [R_{rr}][i_{rr}] + \frac{d}{dt}[\Phi_{rr}] \quad (\text{III.29})$$

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

$$[v_s] = \begin{bmatrix} v_{as} \\ v_{bs} \\ v_{cs} \end{bmatrix}; \quad [v_{rr}] = \begin{bmatrix} v_{1r} \\ v_{2r} \\ v_{3r} \\ \vdots \\ v_{(Nb-1)r} \\ v_{Nbr} \end{bmatrix}; \quad [i_s] = \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix}; \quad [i_{rr}] = \begin{bmatrix} i_{1r} \\ i_{2r} \\ i_{3r} \\ \vdots \\ i_{(Nb-1)r} \\ i_{Nbr} \end{bmatrix}; \quad [\Phi_s] = \begin{bmatrix} \Phi_{as} \\ \Phi_{bs} \\ \Phi_{cs} \end{bmatrix};$$

$$[\Phi_{rr}] = \begin{bmatrix} \Phi_{1r} \\ \Phi_{2r} \\ \Phi_{3r} \\ \vdots \\ \Phi_{(Nb-1)r} \\ \Phi_{Nbr} \end{bmatrix}.$$

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

$$[R_s] = \begin{bmatrix} r_{as1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & r_{bs} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r_{cs} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r_{as2} \end{bmatrix}; \quad [R_{rr}] = \begin{bmatrix} r_{1r} & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & r_{2r} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & r_{3r} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \ddots & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & r_{Nbr} \end{bmatrix};$$

$r_{as}=r_{bs}=r_{cs}=r_s$; $r_{1r} = r_{2r} = \dots = r_{(Nb-1)r} = r_{Nbr} = r_{rr}$, avec : $r_{as1} = (1 - \mu) \cdot r_{as}$; $r_{as2} = \mu \cdot r_{as}$

III.5.3 Equations magnétiques

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

$$\begin{cases} [\Phi_s] = [L_{ss}] \cdot [i_s] + [M_{sbar}] \cdot [i_{rr}] \\ [\Phi_{rr}] = [L_{rbar}] \cdot [i_{rr}] + [M_{bars}] \cdot [i_s] \end{cases} \quad (III.30)$$

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

$$L_{ss} = l_{fs} \begin{bmatrix} (1 - \mu)^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \mu^2 \end{bmatrix} + l_{ms} \begin{bmatrix} (1 - \mu)^2 & \frac{-(1-\mu)}{2} & \frac{-(1-\mu)}{2} & \mu(1 - \mu) \\ \frac{-(1-\mu)}{2} & 1 & \frac{-1}{2} & \frac{-\mu}{2} \\ \frac{-(1-\mu)}{2} & \frac{-1}{2} & 1 & \frac{-\mu}{2} \\ -\mu(1 - \mu) & \frac{-\mu}{2} & \frac{-\mu}{2} & \mu^2 \end{bmatrix} \quad (III.31)$$

Et la matrice des inductances rotoriques qui s'écrit :

$$[L_{rbar}] = \begin{bmatrix} l_{rr} + l_{mb} & l_{mb} \cos\left(\frac{2\pi}{Nb}\right) & l_{mb} \cos\left(\frac{2.2\pi}{Nb}\right) & \dots & l_{mb} \cos\left(\frac{(Nb-1).2\pi}{Nb}\right) \\ l_{mb} \cos\left(\frac{2\pi}{Nb}\right) & l_{rr} + l_{mb} & l_{mb} \cos\left(\frac{2\pi}{Nb}\right) & \dots & l_{mb} \cos\left(\frac{(Nb-2).2\pi}{Nb}\right) \\ l_{mb} \cos\left(\frac{2.2\pi}{Nb}\right) & l_{mb} \cos\left(\frac{2\pi}{Nb}\right) & l_{rr} + l_{mb} & \dots & l_{mb} \cos\left(\frac{(Nb-3).2\pi}{Nb}\right) \\ l_{mb} \cos\left(\frac{3.2\pi}{Nb}\right) & l_{mb} \cos\left(\frac{2\pi}{Nb}\right) & l_{mb} \cos\left(\frac{2\pi}{Nb}\right) & \ddots & \dots & l_{mb} \cos\left(\frac{(Nb-4).2\pi}{Nb}\right) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ l_{mb} \cos\left(\frac{(Nb-1).2\pi}{Nb}\right) & l_{mb} \cos\left(\frac{(Nb-2).2\pi}{Nb}\right) & l_{mb} \cos\left(\frac{(Nb-3).2\pi}{Nb}\right) & \dots & \dots & l_{rr} + l_{mb} \end{bmatrix} \quad (III.32)$$

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

$$[M_{sbar}] = [M_{bars}]^t = M_{sbar} \begin{bmatrix} (1 - \mu) \cos\left(\theta_r + \frac{\pi}{Nb}\right) & (1 - \mu) \cos\left(\theta_r + \frac{3\pi}{Nb}\right) & (1 - \mu) \cos\left(\theta_r + \frac{5\pi}{Nb}\right) & \dots & (1 - \mu) \cos\left(\theta_r + \frac{(2.Nb-1)\pi}{Nb}\right) \\ \cos\left(\theta_r + \frac{\pi}{Nb} - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_r + \frac{3\pi}{Nb} - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_r + \frac{5\pi}{Nb} - \frac{2\pi}{3}\right) & \dots & \cos\left(\theta_r + \frac{(2.Nb-1)\pi}{Nb} - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3} + \frac{\pi}{Nb}\right) & \cos\left(\theta_r + \frac{3\pi}{Nb} + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_r + \frac{5\pi}{Nb} + \frac{2\pi}{3}\right) & \dots & \cos\left(\theta_r + \frac{(2.Nb-1)\pi}{Nb} + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \mu \cos\left(\theta_r + \frac{\pi}{Nb}\right) & \mu \cos\left(\theta_r + \frac{3\pi}{Nb}\right) & \mu \cos\left(\theta_r + \frac{5\pi}{Nb}\right) & \dots & \mu \cos\left(\theta_r + \frac{(2.Nb-1)\pi}{Nb}\right) \end{bmatrix} \quad (III.33)$$

Avec : M_{sb} : Maximum d'inductances mutuelle stator /rotor.

En introduisant les expressions des flux (III.30) dans les équations des tensions du stator et du rotor (III.27.b) et (III.29), on obtient :

$$\begin{cases} [v_s] = [R_s] \cdot [i_s] + \frac{d}{dt} ([L_{ss}] \cdot [i_s] + [M_{sbar}] \cdot [i_{rr}]) \\ [v_{rr}] = [R_{rr}] \cdot [i_{rr}] + \frac{d}{dt} ([L_{rbar}] \cdot [i_{rr}] + [M_{bars}] \cdot [i_s]) \end{cases} \quad (III.34)$$

On peut réécrire le système (III.34) sous la forme suivante :

$$\begin{cases} [v_s] = [R_s] \cdot [i_s] + [L_{ss}] \frac{d}{dt} ([i_s]) + [M_{sbar}] \frac{d}{dt} ([i_{rr}]) + \frac{d[M_{sbar}]}{dt} \cdot [i_{rr}] \\ [v_{rr}] = [R_{rr}] \cdot [i_{rr}] + [L_{rbar}] \frac{d}{dt} ([i_{rr}]) + [M_{bars}] \frac{d}{dt} ([i_s]) + \frac{d[M_{bars}]}{dt} \cdot [i_s] \end{cases} \quad (III.35)$$

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.35) devient :

$$\begin{cases} [v_s] = [R_s] \cdot [i_s] + [L_{ss}] \frac{d}{dt} ([i_s]) + [M_{sbar}] \frac{d}{dt} ([i_{rr}]) + \frac{d\theta_r}{dt} \cdot \frac{d[M_{sbar}]}{d\theta_r} \cdot [i_{rr}] \\ [v_{rr}] = [R_{rr}] \cdot [i_{rr}] + [L_{rbar}] \frac{d}{dt} ([i_{rr}]) + [M_{bars}] \frac{d}{dt} ([i_s]) + \frac{d\theta_r}{dt} \cdot \frac{d[M_{bars}]}{d\theta_r} \cdot [i_s] \end{cases} \quad (III.36)$$

$$\text{Où : } \frac{d[M_{sbar}]}{dt} = \frac{d\theta_r}{d\theta_r} \cdot \frac{d[M_{sbar}]}{d\theta_r} = \frac{d\theta_r}{dt} \cdot \frac{d[M_{sbar}]}{d\theta_r} = \omega_r \cdot \frac{d[M_{sbar}]}{d\theta_r}.$$

Le système d'équations (III.36) devient :

$$\begin{cases} [v_s] = [R_s] \cdot [i_s] + [L_{ss}] \frac{d}{dt} ([i_s]) + [M_{sbar}] \frac{d}{dt} ([i_{rr}]) + \omega_r \cdot \frac{d[M_{sbar}]}{d\theta_r} \cdot [i_{rr}] \\ [v_{rr}] = [R_{rr}] \cdot [i_{rr}] + [L_{rbar}] \frac{d}{dt} ([i_{rr}]) + [M_{bars}] \frac{d}{dt} ([i_s]) + \omega_r \cdot \frac{d[M_{bars}]}{d\theta_r} \cdot [i_s] \end{cases} \quad (III.37)$$

On peut réécrire le système (III.37) sous la forme d'un système d'équations différentielles suivant :

$$\begin{cases} \left[\frac{d}{dt} ([i_s]) \right] = [L_{ss}]^{-1} \{ v_s - [R_s] \cdot [i_s] - [M_{sr}] \frac{d}{dt} ([i_r]) - \omega_r \cdot \frac{d[M_{sr}]}{d\theta_r} \cdot i_r \} \\ \left[\frac{d}{dt} ([i_r]) \right] = [L_{rr}]^{-1} \{ -[R_r] \cdot [i_r] - [M_{rs}] \frac{d}{dt} ([i_s]) - \omega_r \cdot \frac{d[M_{rs}]}{d\theta_r} \cdot i_s \} \end{cases} \quad (III.38)$$

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

$$\frac{d[M_{sbar}]}{d\theta_r} = \frac{d[M_{bars}]^t}{d\theta_r} = -M_{sbar} \begin{bmatrix} (1-\mu)\sin\left(\theta_r + \frac{\pi}{Nb}\right) & (1-\mu)\sin\left(\theta_r + \frac{3\pi}{Nb}\right) & (1-\mu)\sin\left(\theta_r + \frac{5\pi}{Nb}\right) & \dots & (1-\mu)\sin\left(\theta_r + \frac{(2.Nb-1)\pi}{Nb}\right) \\ \sin\left(\theta_r + \frac{\pi}{Nb} - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta_r + \frac{3\pi}{Nb} - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta_r + \frac{5\pi}{Nb} - \frac{2\pi}{3}\right) & \dots & \sin\left(\theta_r + \frac{(2.Nb-1)\pi}{Nb} - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \sin\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3} + \frac{\pi}{Nb}\right) & \sin\left(\theta_r + \frac{3\pi}{Nb} + \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta_r + \frac{5\pi}{Nb} + \frac{2\pi}{3}\right) & \dots & \sin\left(\theta_r + \frac{(2.Nb-1)\pi}{Nb} + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \mu\sin\left(\theta_r + \frac{\pi}{Nb}\right) & \mu\sin\left(\theta_r + \frac{3\pi}{Nb}\right) & \mu\sin\left(\theta_r + \frac{5\pi}{Nb}\right) & \dots & \mu\sin\left(\theta_r + \frac{(2.Nb-1)\pi}{Nb}\right) \end{bmatrix} \quad (III.39)$$

III.5.4 Equation du couple électromagnétique

L'expression du couple électromagnétique est donnée :

$$C_{em} = \frac{P}{2} \begin{bmatrix} i_s \\ i_{rr} \end{bmatrix}^t \left\{ \frac{d}{d\theta_r} \begin{bmatrix} L_{ss} & M_{sbar} \\ M_{bars} & L_{rbar} \end{bmatrix} \right\} \begin{bmatrix} i_s \\ i_{rr} \end{bmatrix} \quad (III.40)$$

Où :

$$C_{em} = P [i_s]^t \left\{ \frac{d}{d\theta_r} [M_{sbar}] \right\} [i_{rr}] \quad (III.41)$$

III.5.5 Simulation du MAS en présence d'un court-circuit entre spire au stator

Afin d'étudier le défaut de court-circuit entre-spices, des simulations du modèle développé ci-dessus ont été effectuées. Des courts-circuits front ont été pratiqués uniquement sur le bobinage de la phase as, en prenant la résistance de défaut ($r_f = 0$). Le nombre de spires court-circuitées varie de 5%, 10% et 25% du nombre total de spires appartenant à la même phase.

Nous observons, après simulation du défaut de court-circuit sur la phase "a", l'apparition d'ondulations sur la vitesse de rotation et dans le couple électromagnétique de la machine asynchrone, comme montré sur les figures III.17 et III.18. En effet, ce phénomène est dû au déséquilibre en amplitude des courants statoriques. Ce déséquilibre entre les courants au stator est entraîné principalement par la diminution de la résistance de la phase "a".

Afin de mieux comprendre le phénomène lié à un défaut de court-circuit entre spires au stator, nous avons réalisé plusieurs autres simulations en aggravant le nombre de spires court-circuitées de 5% à 10%, ensuite à 25% du nombre total des spires de la phase en défaut.

D'après les Figures (III.17-III.20) illustrent la conséquence de court-circuit entre spires dans une phase du stator où on note apparition des amplitudes les grandeurs de la MAS, et ces amplitudes augmentent avec la sévérité de défauts et présence d'un courant de court-circuit dans les courants statorique figure(III.19).

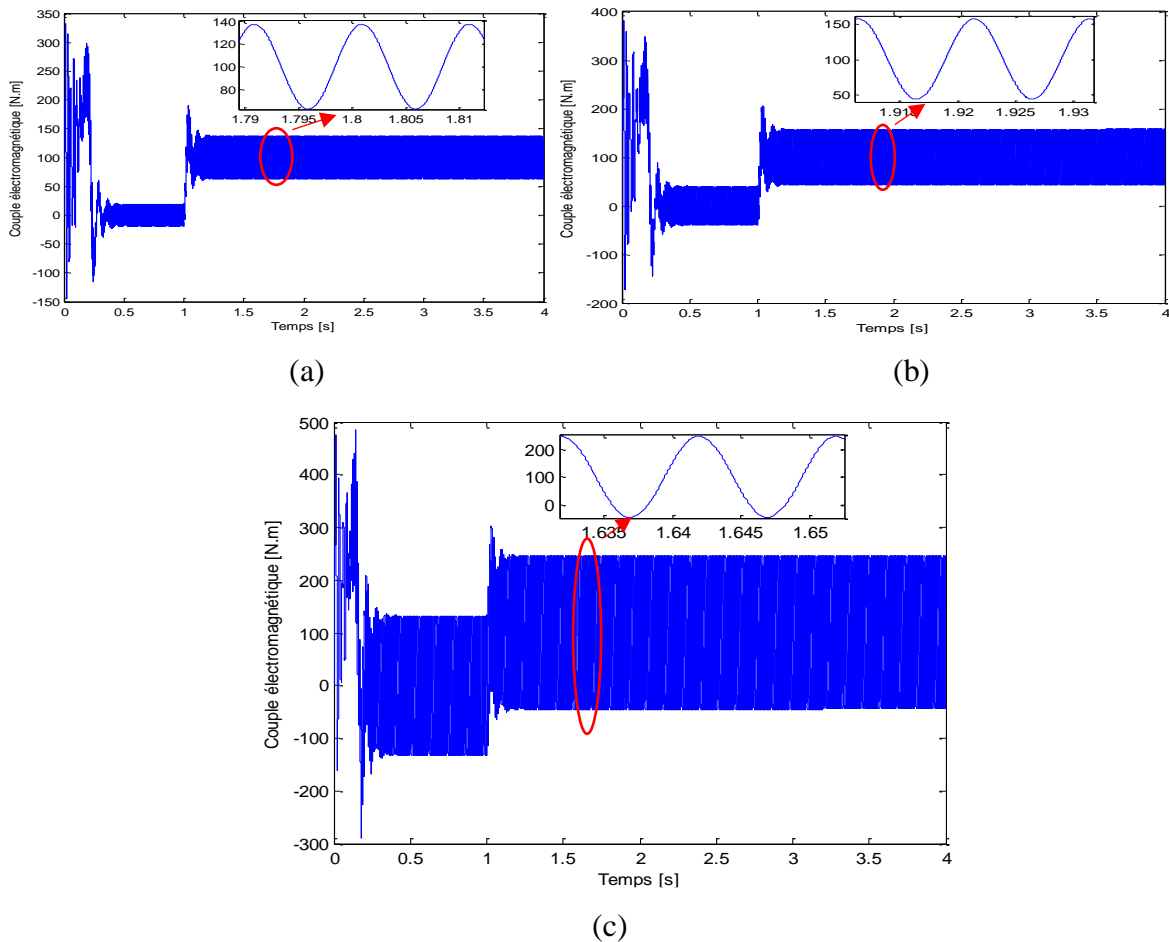


Figure III.17 : Allures des couples électromagnétiques

en présence de court-circuit dans la phase statorique A de (a) 5%, (b) 10% et (c) 25

Pour le cas de court-circuit 5% on remarque une ondulation de couple d'un pourcentage de

$$\Delta C_{em} = \frac{C_{em-max} - C_{em-min}}{C_{em-moy}} = \frac{135 - 65}{100} = 70\%.$$

Pour le cas de court-circuit 10 % on remarque une ondulation de couple d'un pourcentage de

$$\Delta C_{em} = \frac{C_{em-max} - C_{em-min}}{C_{em-moy}} = \frac{157 - 44}{100} = 113\%.$$

Pour le cas de court-circuit 25% on remarque une ondulation de couple d'un pourcentage de

$$\Delta C_{em} = \frac{C_{em-max} - C_{em-min}}{C_{em-moy}} = \frac{210 - (-20)}{100} = 230\%.$$

On remarque augmentation de pourcentage ondulation avec augmentation de défauts

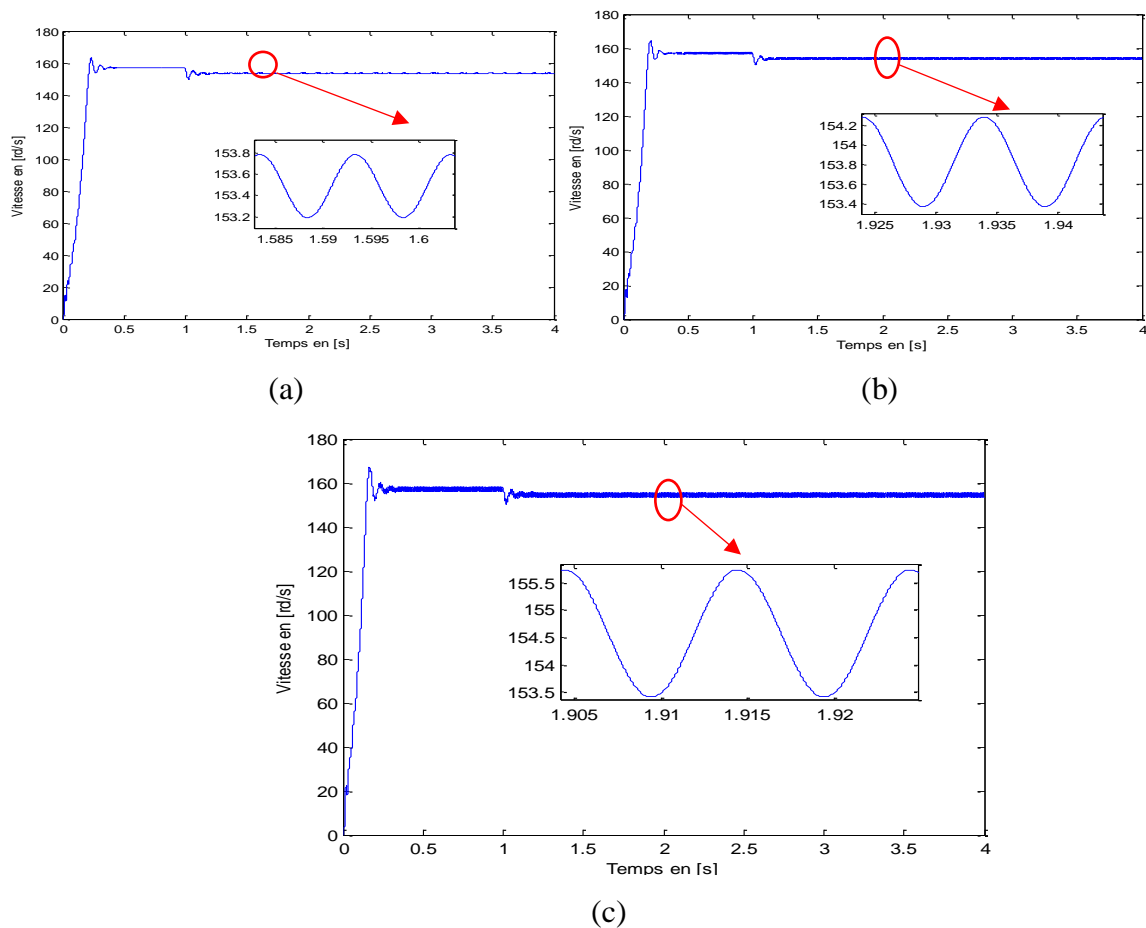


Figure III.18 : Allures des vitesses rotoriques

en présence de court-circuit en phase A de (a)5%, (b) 10%, et (c) 25%

Pour le cas de court-circuit 5% on remarque une ondulation de la vitesse d'un pourcentage de

$$\Delta\Omega_r = \frac{\Omega_{r-max} - \Omega_{r-min}}{\Omega_{r-moy}} = \frac{153.8 - 153.2}{153.5} = 0.4\%$$

Pour le cas de court-circuit 10% on remarque une ondulation de la vitesse d'un pourcentage

$$\text{de } \Delta\Omega_r = \frac{\Omega_{r-max} - \Omega_{r-min}}{\Omega_{r-moy}} = \frac{154.3 - 153.4}{153.85} = 0.58\%$$

Pour le cas de court-circuit 25% on remarque une ondulation de la vitesse d'un pourcentage

$$\text{de } \Delta\Omega_r = \frac{\Omega_{r-max} - \Omega_{r-min}}{\Omega_{r-moy}} = \frac{154 - 155.6}{154.8} = 1\%$$

On remarque augmentation de pourcentage ondulation avec augmentation de défauts

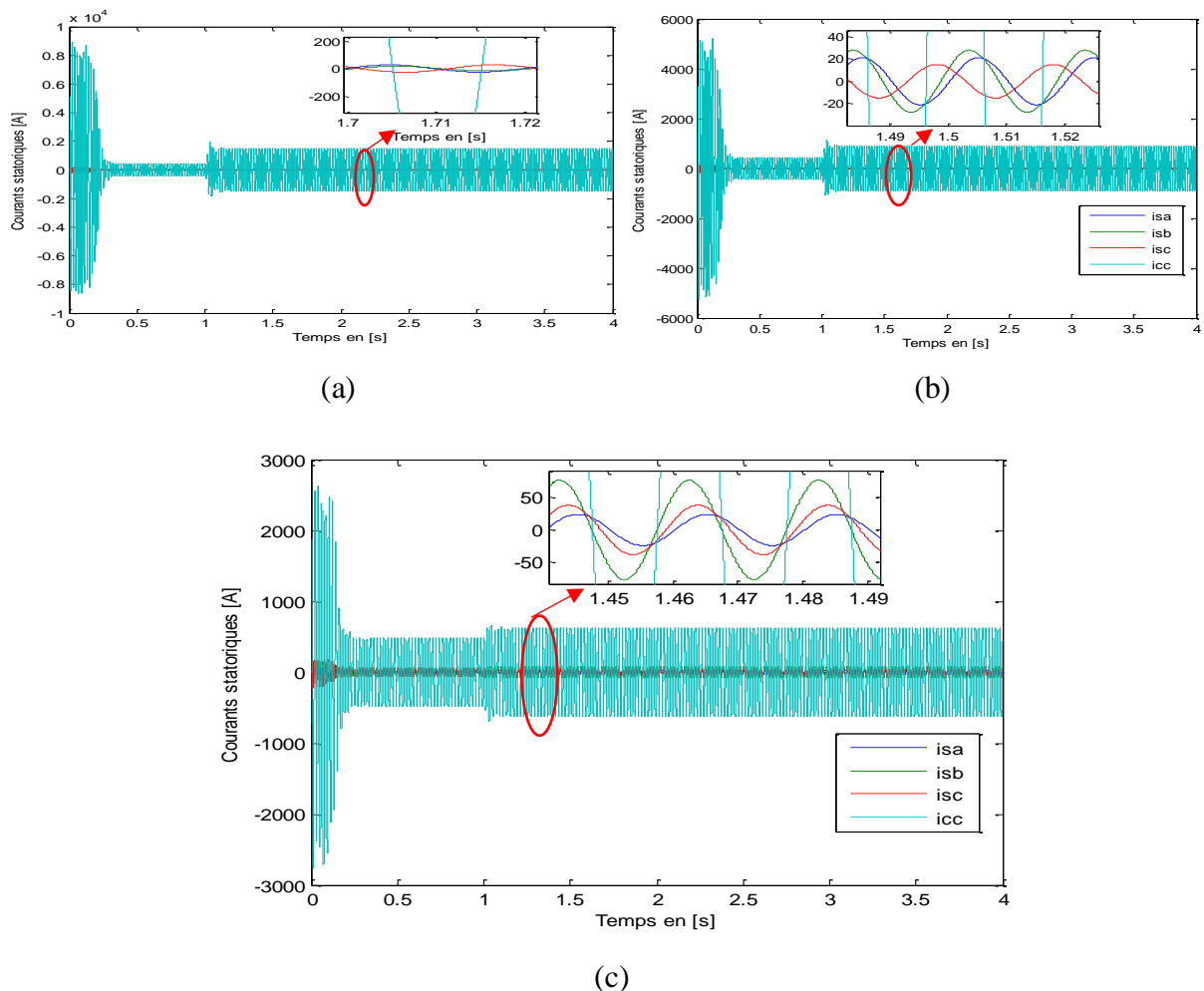


Figure III.19 : Allures des courants statoriques en présence de court-circuit en phase A de (a)5%, (b) 10%, et (c) 25%

Pour le cas de court-circuit 5% on remarque une ondulation de la vitesse d'un pourcentage de

$$\Delta I_s = \frac{I_{s-max} - I_{s-min}}{I_{s-moy}} = \frac{29 - (-25)}{2} = 2700\%$$

Pour le cas de court-circuit 10% on remarque une ondulation de la vitesse d'un pourcentage

$$\text{de } \Delta I_s = \frac{I_{s-max} - I_{s-min}}{I_{s-moy}} = \frac{30.75 - (-27.55)}{1.60} = 3643\%$$

Pour le cas de court-circuit 25% on remarque une ondulation de la vitesse d'un pourcentage

$$\text{de } \Delta I_s = \frac{I_{s-max} - I_{s-min}}{I_{s-moy}} = \frac{85 - (-80)}{2.5} = 6600\%$$

On remarque augmentation de pourcentage ondulation avec augmentation de défauts

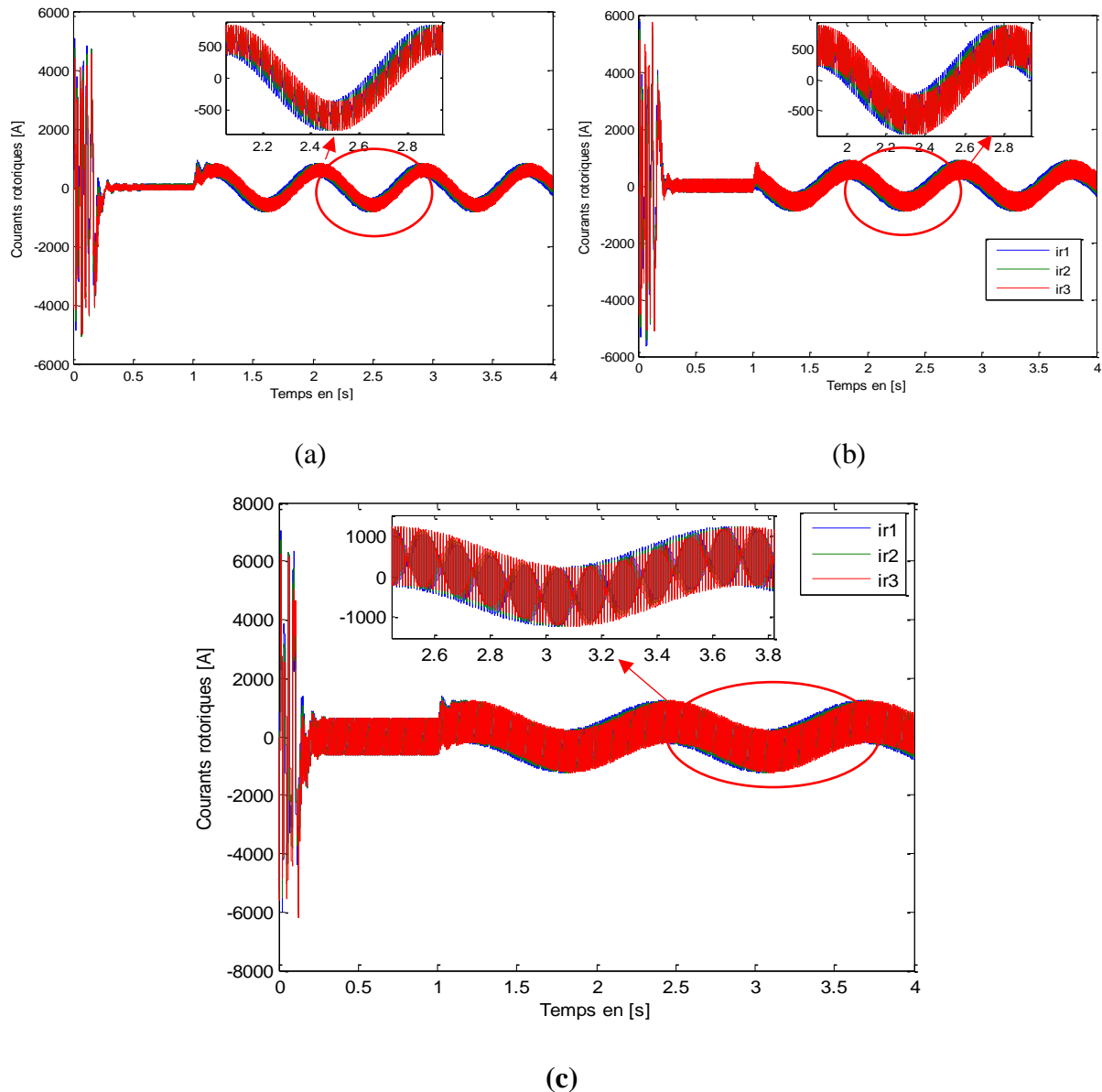


Figure III.20 : Allures des courants des trois barres rotoriques adjacentes en présence de court-circuit en phase A de (a)5%, (b)10%, et (c) 25%

Pour le cas de court-circuit 5% on remarque une ondulation de la vitesse d'un pourcentage de

$$\Delta I_r = \frac{I_{r-max} - I_{r-min}}{I_{r-moy}} = \frac{700 - (-500)}{100} = 1200\%$$

Pour le cas de court-circuit 10% on remarque une ondulation de la vitesse d'un pourcentage

$$\text{de } \Delta I_r = \frac{I_{r-max} - I_{r-min}}{I_{r-moy}} = \frac{800 - (-600)}{100} = 1400\%$$

Pour le cas de court-circuit 25% on remarque une ondulation de la vitesse d'un pourcentage

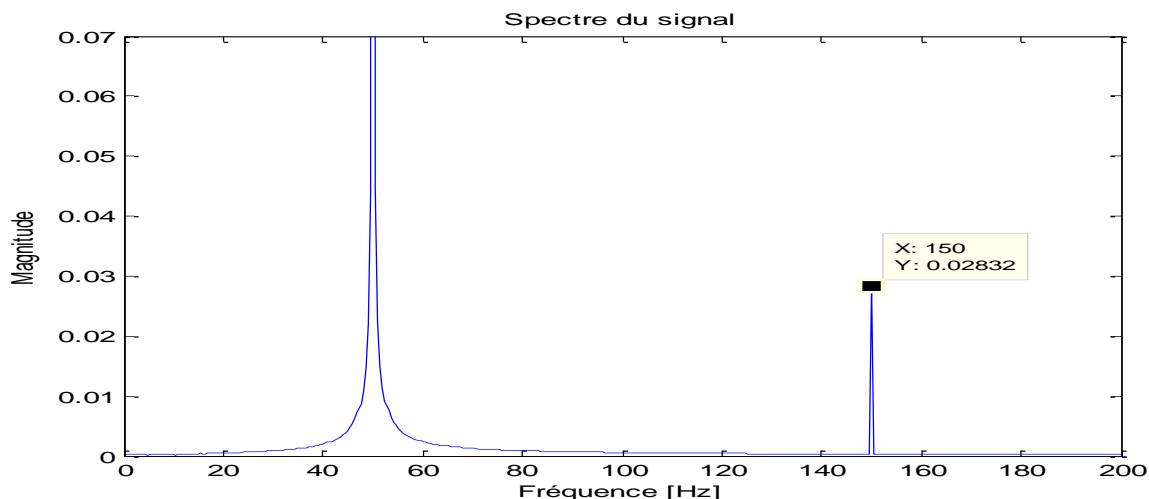
$$\text{de } \Delta I_r = \frac{I_{r-max} - I_{r-min}}{I_{r-moy}} = \frac{1000 - (-800)}{100} = 1800\%$$

On remarque augmentation de pourcentage ondulation avec augmentation de défauts

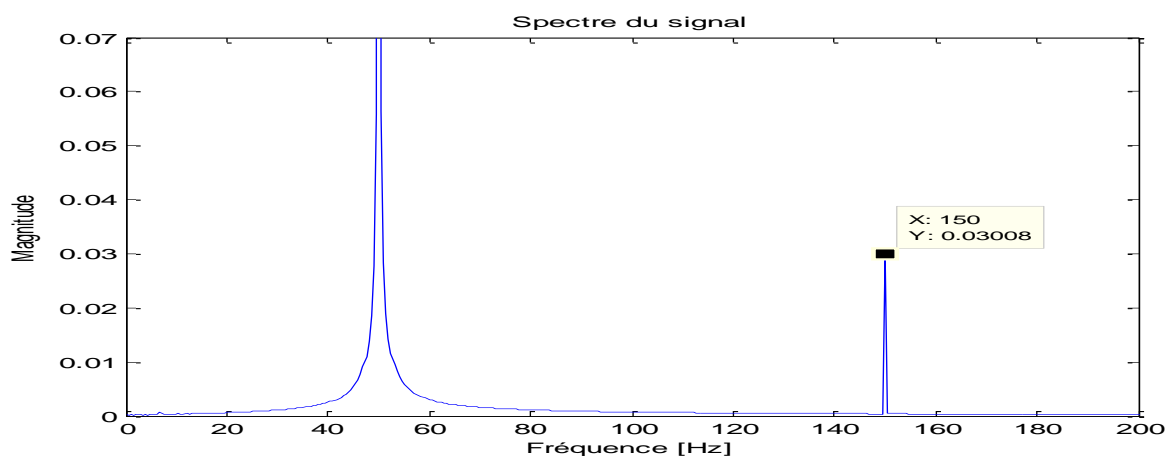
III.5.7 Analyse spectrale des résultats de simulation de la MAS dans le model (abc) en présence d'un défaut au stator

En examinant les spectres relatifs au courant d'une phase statorique obtenu lors des simulations en présence de défaut d'un court-circuit entre spires avec des taux de 5%, 10% et 25% présentés sur la figure (III.25), on observe deux harmoniques dans l'une est fondamentale (50 Hz) et l'autre à 150 Hz ($f+2f$) contrairement au spectre à l'état sain, sur la figure III.13(a), qui contient seulement la raie du fondamental. Pour les spectres du couple sur la figure (III.26) et ceux de la vitesse sur la figure (III.27), on remarque une composante à 100 Hz (deux fois la fréquence d'alimentation f).

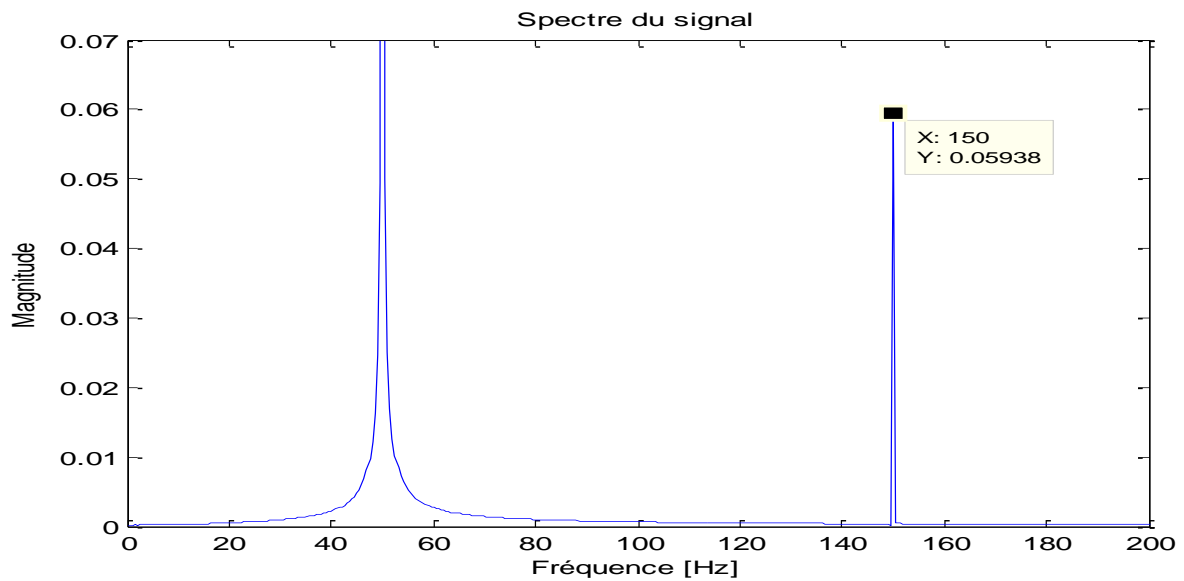
Pour les trois grandeurs, les amplitudes de ces composantes ($f+2f$) pour un défaut de 10% sont plus importantes que celles de 5% et celles de 25% sont plus importantes par rapport au cas de 10%. En effet, ces composantes fréquentielles sont prises comme un indice de diagnostic pour la détection des défauts statoriques, où l'on remarque que l'amplitude de ces raies dépend fortement de la gravité de ce défaut.



(a)



(b)



(c)

Figure III.21 : Spectres du courant statorique lors d'un défaut de court-circuit de (a) 5%, (b) 10% et (c) 25% des spires d'une seule phase statorique

on observe deux harmoniques dans l'une est fondamentale (50 Hz) et l'autre à 150 Hz ($f+2f$) contrairement au spectre à l'état sain, sur la figure III.13(a), qui contient seulement la raie du fondamental, et amplitude de les raie augmente avec la sévérité défauts .

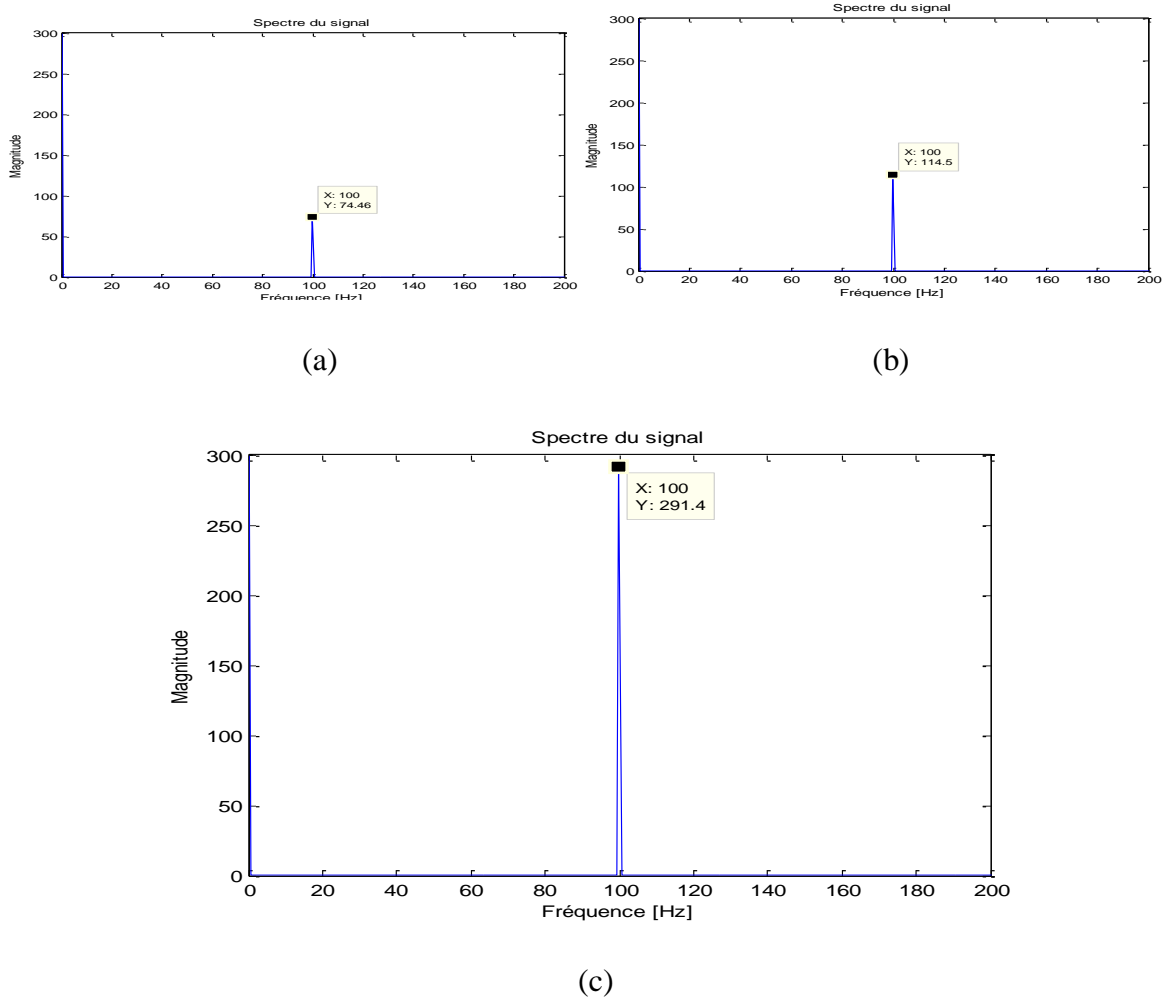


Figure III.22 : Spectres du couple électromagnétique lors d'un défaut de court-circuit de (a)5%, (b)10%, et (c) 25% des spires d'une seule phase statorique

Pour les spectres du couple sur la figure (III.26)), on remarque une composante à 100 Hz (deux fois la fréquence d'alimentation f), et amplitude de cette composante augmente avec augmentation de pourcentage de court-circuit.

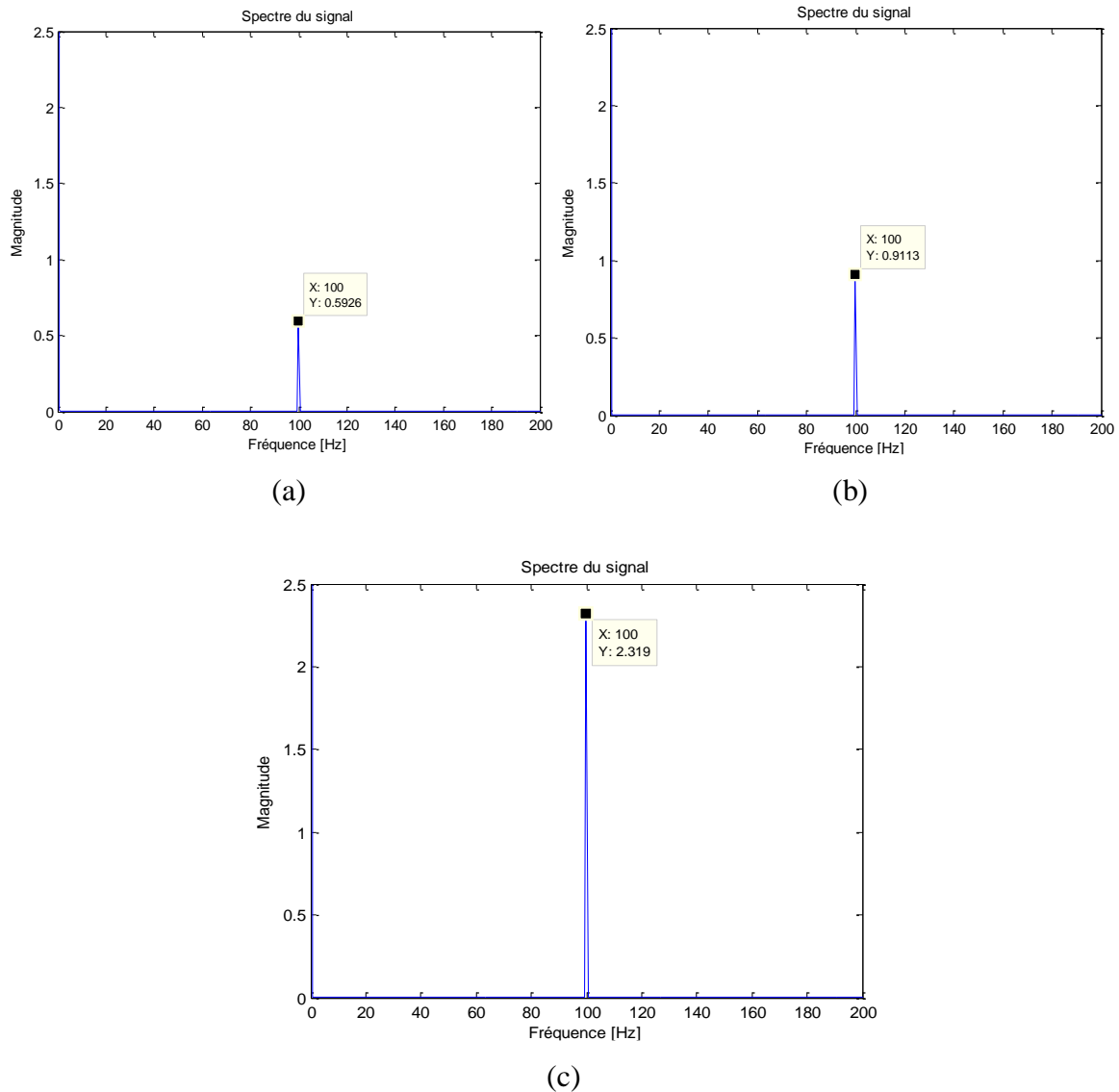


Figure III.23 : Spectres de la vitesse de rotation

lors d'un défaut de court-circuit de (a)5%,(b) 10%, et (c) 25% des spires d'une seule phase statorique

Pour les spectres de la vitesse sur la figure (III.27), on remarque une composante à 100 Hz (deux fois la fréquence d'alimentation f), et cette composante augmente avec le nombre de barres cassées.

III.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les paramètres de MAS à cage d'écureuil sans ramener les grandeurs rotoriques aux grandeurs statoriques et nous avons étudié le cas de fonctionnement de cette machine en cas sain et en présence de défauts, soit au rotor (cassure de barre et deux barres), soit au stator (court-circuit entre spires d'une phase).

Dans la première partie, le programme réalisé sous MATLAB à base de la méthode numérique « Runge Kutta 4 (RK-4) » permet de résoudre le système d'équations différentielles qui régit le modèle de la MAS. Nous avons présenté et discuté les résultats de simulation de la MAS à l'état sain dans le repère naturel (abc).

La deuxième partie est consacrée pour étude d'influence de défauts rotorique et statorique sur la MAS avec augmentation de sévérité défauts des résultats et des commentaires sont tirés.

À la fin de ce chapitre, une analyse spectrale par la transformer de Fourier a été appliquée sur les signaux des courants statoriques, vitesse et couple. Où nous avons remarqué des raies des harmoniques relatives aux présences défauts ou amplitudes de ces derniers sont liés avec la sévérité de ces défauts.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Cette étude a abordé le domaine de diagnostic et de détection des défauts de la machine asynchrone à cage d'écureuil, à savoir l'état de l'art sur les défauts, causes, effets et statistiques, la modélisation, la détection par analyse spectrale des grandeurs affectées par le défaut, et à visualiser les fréquences parasites constituant la signature d'un défaut dans les machines. Pour cela, nous avons présenté trois chapitres dans le but de mieux expliciter le travail réalisé.

Au début de ce travail, nous avons rappelé les différentes défaillances qui peuvent affecter le bon fonctionnement de la machine, ainsi que les causes de ces défauts, effets et statistiques de ces derniers. Puis, nous avons présenté un état de l'art des différentes techniques de surveillance des machines asynchrones.

Le deuxième chapitre était dédié à la modélisation et à la simulation de la MAS. Pour cela, nous avons commencé par la modélisation de la machine directement alimentée par une source triphasée et équilibrée dans le repère (dqo), et puis dans le repère naturel (abc). Pour laquelle, nous avons élaboré un schéma bloc de simulation à l'aide du logiciel MATLAB. Ceci, nous a permis de visualiser les différentes grandeurs de la machine (courants statoriques, couple électromagnétique, vitesse de rotation et les courants rotoriques) pour un fonctionnement à l'état sain dans les deux repères. Une comparaison entre les deux modèles est faite et les résultats des deux simulations sont identiques. Pour terminer, nous avons examiné les résultats de la simulation de la machine en fonctionnement à l'état sain dans le domaine fréquentiel afin de les comparer à ceux de la simulation en fonctionnements dégradés.

Dans le dernier chapitre, une étude faite sur une MAS où l'enroulement rotorique n'est pas ramener à l'enroulement statorique dans l'état sain et en présence de deux cas différents de défauts. On a élaboré deux programmes sous l'environnement MATLAB, à base de la méthode numérique « Runge Kutta 4 (RK4) », qui permet de résoudre les systèmes d'équations différentielles qui tiennent compte les ruptures des barres rotorique et les différents courts-circuits dans la première phase statorique. Le premier cas est la rupture d'une et deux barres rotoriques adjacentes, et le deuxième cas concerne un court-circuit franc entre spires de la même phase statorique avec des pourcentages différents. Le modèle de la machine en défaut, que nous avons développé, permettait ainsi d'effectuer des simulations et de comparer les résultats avec ceux dans le cas d'une machine à l'état sain. Après la simulation une analyse spectral était faite et examiné et des résultats sont tirés.

D'après les résultats obtenus, la grandeur la plus touchée avec ses défauts sont les courants qui sont très élevés par rapport à l'état sain, la vitesse, le couple et les courants rotorique sont moins touchés par ses défauts par rapport les courants statoriques.

Nous avons constaté que le défaut de court-circuit dans une phase provoque des graves perturbations dans les performances du dispositif (couple, vitesse rotorique, courants statoriques et rotoriques).

Enfin, nous avons fait l'analyse spectrale qui nous a permis de déterminer les harmoniques caractérisant les défauts étudiés.

Comme perspective, il nous semble important de recommander à mener une étude pratique sur l'ensemble des défauts que nous avons citée 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 d'ouverture de phase statorique, etc., bien qu'un moteur été déjà prêt à exploiter.

Références bibliographiques

- [1] Khemchane N, Tizzaoui A, « Technique de Diagnostic des Défauts Statorique d'un Moteur Asynchrone », Mémoire de Master d'Université Abderrahmane Mira Bejaia, 2017.
- [2] Chahmi A, « Intitulé Identification Paramétrique de La Machine Asynchrone Dédiée au Diagnostic », Thèse de Doctorat d'Université Des Sciences et de La Technologie D'Oran ,2017.
- [3] Khatir A, « Etude Comparative des Modèles des Machines Asynchrones Utilisés en Diagnostic des Défauts », Thèse de Doctorat d'Université De Sétif ,2009.
- [4] Ibrahim A, « Contribution au Diagnostic de Machines Electromécaniques : Exploitation des Signaux Electriques et de la Vitesse Instantanée », Thèse De Doctorat d'Université Jean Monnet, France, 2009.
- [5] Ondel O, « Diagnostic par Reconnaissance des Formes : Application à un Ensemble Convertisseur – Machine Asynchrone », Thèse De Doctorat d'Ecole Central De Lyon, 2006
- [6] Bachir S, « Contribution au Diagnostic de la Machine Asynchrone par Estimation Paramétrique », Thèse de Doctorat d'Ecole Doctoral des Sciences pour Ingénieurs et Aéronautique Poitiers, 2002.
- [7] Vaseghi B, « Contribution à L'étude des Machines Electriques en Présence de Défaut Entre-Spires Modélisation-Réduction du Courant de Défaut », Thèse de Doctorat d'Université de Lorraine, 2009.
- [8] Esfahani E. T, Wang S, Sundararajan V, « Multisensor Wireless System for Eccentricity and Bearing Fault Detection in Induction Motors », Ieee/Asme Transactions on Mechatronics, Vol. 19, N°3, Pp. 818-826, 2014
- [9] Kinzi. R, Izem. D, « Etude d'un Moteur Asynchrone à Cage avec Différents Défauts », Mémoire Master d'Université Abderrahmane Mira Bejaïa ,2020.
- [10] Bouzid M, Champenois G ,« an Efficient, Simplified Multiple-Coupled Circuit Model of the Induction Motor Aimed to Simulate Different Types of Stator Faults », Elsevier, Journal Of Mathematics And Computers In Simulation, Vol. 90, Pp 98- 115, 2013
- [11] Sahraoui M, « Etude Comparative des Méthodes de Diagnostic des Machines Asynchrones », Thèse de Doctorat d'Université de Biskra, 2010.
- [12] Wolbank T.M, Macheiner P, « Comparison of Different Methods to Detect Static Air Gap Asymmetry in Inverter Fed Induction Machines », Ieee Conference Publications, 7th

International Conference On Power Electronics And Drive Systems Peds'07, 27-30 Nov. 2007
Bangkok, Thaïlande, Pp. 675-680, 2007

[13] Toliyat H. A, Lipo T. A, « Transient Analysis of Cage Induction Machines under Stator, Rotor Bar and Ring Faults », IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 10, N°2, Pp. 241-247, 1995.

[14] Filippetti. F, Franceschini G, Tassoni C, Vas P, « Ai Techniques in Induction Machines Diagnosis- Including the Speed Ripple Effect », IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 34, N°1, Pp. 98-17-108, 1998

[15] Boumegoura T, « Recherche de Signature Electromagnétique des Défauts dans une machine Asynchrone et Synthèse d'observateur en Vue du Diagnostic », Thèse Doctorat d'Ecole Centrale De Lyon, 2001.

[16] Penman J, Sedding J, Lloyed H.G, Fink B.A, « Detection And Localisation of Interturn Short Circuits in the Stator Winding of Operating Motors, », Ieee Trans. On Energy Conversion, Vol. 9, No. 4, December 1994, Pp. 652-658.

[17] Filippetti F, Franceschini G, Tassoni C, Vas P `` Ai Techniques In Induction Machines Diagnosis Including The Speed Ripple Effect`` Ieee Transactions On Industry Applications, Vol. 34, N°1, Pp. 98-108, 1998

[18] Ghoggal A, «Diagnostic de la Machine Asynchrone Triphasé : Modèle Dédié à la Détection des Défauts », Thèse de Doctorat d'Université De Biskra ,2013.

[19] Legowsk S, «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

[20] Lebaroud A, « Modélisation et Techniques Orientées vers le Diagnostic de la Machine Asynchrone Associée à des Sources Variables », Thèse Doctorat d'Université Constantine ,2006.

[21] Sahraoui M, « Contribution à l'étude du Diagnostic de da Machine Asynchrone », Mémoire de Magister, Thèse Doctorat d'Université Mohamed Khider Biskra, 2003.

[22] Casimir R, « Diagnostic des Défauts des Machines Asynchrones par Reconnaissance des Formes »Thèse Doctorat, Ecole Doctoral de Lyon, 2003

[23] Lahcène N, « Diagnostic de Défauts du Rotor D'une Machine Asynchrone à Cage D'écureuil », Mémoire de Magister, Université de Laghouat, 2005

[24] Pyrhonen P, Tapani P, Hrabovcova V, « Design of Rotating Electrical Machines », 8 John Wiley & Sons, Ltd, Royaume Uni, 2008

[25]-I.P.Kopilov, « Conception des Machines Electriques », Edition Energie, Moscou, 1980

ANNEXE

Paramètres de la MAS étudiée (15 kW) [25]

Tension simple efficace : $V_s = 220 \text{ V}$;

Fréquence d'alimentation : $f_s = 50 \text{ Hz}$;

Résistances statorique et rotorique ramenée au stator: $r_s = 0,402 \text{ Ohm}$; $r_r = 0,196 \text{ Ohm}$;

Inductances de fuite statorique et rotorique ramenée au stator : $l_{fs} = 0.0023 \text{ H}$;

$l_{fr} = 0.0032 \text{ H}$;

Inductances propres statorique et rotorique ramenée au stator: $l_s = 0,0605 \text{ H}$; $l_r = 0,0614 \text{ H}$;

Inductance mutuelle: $l_m = 0,0582 \text{ H}$;

Inductances cycliques statorique et rotorique ramenée au stator : $L_s = 0,0896 \text{ H}$; $L_r = 0,0905 \text{ H}$;

Inductance mutuelle cyclique: $L_m = 0,0873 \text{ H}$;

Nombre de pair de pôle : $p = 2$;

Nombre de spires statoriques : $N_s = 112$;

Moment d'inertie: $J = 0,2 \text{ kg. m}^2$;

Coefficient de frottement: $f = 0,0005 \text{ N. m. s}$;

Couple de charge : $C_r = \begin{cases} 0 \text{ N.m} & \text{si } t < 1 \text{ s} \\ 100 \text{ N.m} & \text{si } t \geq 1 \text{ s et } t \leq 4 \text{ s} \end{cases}$

Paramètres de la MAS rotoriques avant de ramener le bobinage rotorique au stator

Inductance de fuite rotorique d'une barre et de deux portions des 2 anneaux ramenées à la barre:

$l_{rr} = 8.9095e - 07 \text{ H}$;

Nombre de spires d'une phase rotorique : $N_r = 0.5$;

Nombre de barres (Nb) : 38 ;

Résistance d'une barre et de deux portions des deux (02) anneaux ramenées à la barre :

$r_{rr} = 5.3913e - 05 \text{ Ohm}$;

Valeur maximale de la mutuelle rotorique : $l_{mb} = 1.2637e-06 \text{ H}$;

Valeur maximale de la mutuel statorique/rotorique : $M_{sbar} = 2.7120e-04 \text{ H}$

Résumé

Le travail présenté s'inscrit dans le cadre du diagnostic des moteurs asynchrones triphasés à cage d'écureuil, en utilisant des nouvelles techniques telles que l'analyse spectrale et analyse d'enveloppe.

Toutefois il est impossible de cerner, simultanément, toutes les combinaisons possibles des défauts pouvant apparaître sur ces moteurs. Néanmoins, l'examen de ces défauts au niveau du stator et du rotor peut révéler leur influence sur les grandeurs électriques et mécaniques de la machine. Pour ce faire, un modèle multi-barres au rotor est établi pour analyser au mieux le comportement de la machine en absence ou en présence de ces défaillances. Les grandeurs obtenues par simulation sont analysées dans le domaine fréquentiel afin de comparer entre le mode de fonctionnement normal et dégradé.

Mots-clés : Machine asynchrone triphasée à cage, défauts, diagnostic, surveillance, détection.

Abstract

The presented work concerns the diagnosis of three-phase squirrel-cage induction motors using various techniques such as spectral analysis and envelope analysis. It is obviously impossible to identify, simultaneously, all failures possibilities and combinations on these motors. Nevertheless, the examination of the stator and the rotor failures can reveal their influence on the electrical and mechanical quantities of the machine. For this reason, a multi-bar rotor model is established to better analyze the machine behaviors in the absence or presence of these failures. The quantities obtained by simulation are analyzed in the frequency domain in order to compare between the normal and degraded operating mode.

Keywords : Squirrel cage induction machine, failures, diagnosis, surveillance, detection