

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche scientifique



Université Mohamed Khider Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrique
Filière : Électrotechnique
Option : Réseaux électriques

Réf:.....

**Mémoire de Fin d'Etudes
En vue de l'obtention du diplôme:**

MASTER

Thème

***Analyse harmonique de l'asymétrie rotorique
dans les machines asynchrones***

**Présenté par :
BENHISSEN Mohamed Lamine**

Soutenu le : 05 Juin 2017

Devant le jury composé de :

Mr	CHRIEAT Ahmed	Professeur	Président
Mr	GHOOGAL Adel	M.C.A	Encadreur
Mr	YAHIA Khaled	M.C.A	Examineur

Année universitaire : 2016 / 2017

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la recherche scientifique



Université Mohamed Khider Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrique
Filière : Électrotechnique
Option : Réseaux électriques

Mémoire de Fin d'Etudes
En vue de l'obtention du diplôme:

MASTER

Thème

***Analyse harmonique de l'asymétrie rotorique
dans les machines asynchrones***

Présenté par :

BENHISSEN Mohamed Lamine

Avis favorable de l'encadreur :

GHOOGAL Adel

Signature

Avis favorable du Président du Jury

CHRIEAT Ahmed

Signature

Cachet et signature



Université Mohamed Khider Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrique
Filière : Électrotechnique
Option : Réseaux électriques

Thème :

Analyse harmonique de l'asymétrie rotorique dans les machines asynchrones

Proposé par : BENHISSEN Mohamed Lamine

Dirigé par : GHOGGAL Adel

RESUMES (Français et Arabe)

Résumé : L'objectif de ce mémoire est d'effectuer une étude numérique par simulation des effets dus à l'asymétrie rotorique dans les machine asynchrone a cage. Ces asymétries peuvent être dues primordialement par les imperfections de construction (fabrication). En deuxième degrés ces asymétries peuvent être la conséquence des défauts de cassures des barres rotorique. Le modèle Simulink est exploité pour ce but, ce modèle tient compte de la structure multi-enroulements de la cage rotorique. Nous avons simulé aussi quelques défauts fréquents afin de tester l'efficacité de modèle.

Mot clé : l'asymétrie rotorique, machine asynchrone a cage, cassures des barres rotorique, multi-enroulements

ملخص : الهدف من هذه المذكرة هو إجراء دراسة المحاكاة العددية للأثار الناجمة عن عدم تماثل الدّوار في المحرّك غير المتزامن . يمكن أن يكون سبب هذه الاختلالات بأغلبية ساحقة عيوب البناء (التصنيع). من الدرجة الثانية هذه الاختلالات يمكن تكون نتيجة لعيوب كسر قضبان الدوار. يتم استخدام نموذج المحاكاة لهذا الغرض، يأخذ هذا النموذج في الاعتبار بنية متعدد اللغات من القفص الدوار. قمنا أيضا بمحاكاة بعض الاعطال الشائعة لاختبار كفاءة النموذج.

الكلمات المفتاحية : عدم تماثل الدّوار, المحرّك غير المتزامن, لعيوب كسر قضبان الدوّارة بنية متعدد اللغات

Le mémoire contient par ordre d'apparition:

- Dédicaces
- Remerciements
- Liste des Tableaux
- Liste des Figures
- Liste des abréviations
- Résumés (bilingue)

Sommaire :

- * Introduction générale
- * Chapitre 1, 2, 3...
(Chaque chapitre commence par une Introduction et se termine par une conclusion)
- * Conclusion générale et perspectives
- * Bibliographie
- * Annexe

Type d'écriture:

- Times new Roman 12
- Les titres en Gras
- Interligne 1.5
- Formules et Figures sont numérotées par chapitre :
exp. Fig. n°Chap. n°figure (Fig. I.1) ou (Equ. I.1)

Remarques :

- Eviter le glaçage de la page de garde.
- Respecter le contenu par ordre d'apparition.
- Ecrire les résumés bilingues dans une seule page...

- عدم تجليد الصفحة الأولى
- احترام المحتوى المذكور أعلاه
- كتابة ملخص للمذكرة باللغتين
(العربية والفرنسية) و في صفحة
واحدة... الخ

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

﴿وقل أعمالوا فسیرى الله عملکم ورسوله والمؤمنون وستردون﴾

﴿إلى عالم الغیب والشهادة فینبئکم بما كنتم تعملون﴾

سورة التوبة الآية: 106

دعاء

الحمد لله حمدا كثيرا، نحمده بكرة وأصيلا على كل النعم

ولا يسعنا في ختام هذه المرحلة إلا السجود شكرا لله والدعاء دوما: اللهم لا

تجعلنا نصاب بالغرور إذا نجحنا، ولا باليأس إذا أخفقنا

اللهم إذا أعطيتنا نجاحا فلا تأخذ تواضعنا، وإذا أعطيتنا تواضعا

فلا تأخذ اعتزازنا بكرامتنا..

اللهم إننا نعوذ بك من علم لا ينفع وقلب لا يخشع ونفس لا تشيع ومن دعاء لا

يستجاب له..

أمين يا رب العالمين

Dédicace :

DEDICACE

Je dédie ce modeste travail.

A ma mère avec toute mon affection.

A mon père avec toute ma reconnaissance.

A mes frères et mes sœurs

A ma famille

A toute mes amies

Benhissen Mohamed Lamine

Remerciements :

REMERCIEMENTS

Je remercie Allah le tout puissant qui me donne la force à chaque fois de concrétiser mes rêves et de réaliser mes projets.

Je tiens à remercier tous ceux qui ont participé à la réussite de mon travail :

Pour commencer, mes remerciements s'adressent naturellement à Monsieur GHOGGAL Adel "docteur à l'université de Biskra" d'avoir bien voulu m'encadrer et pour toutes les idées et l'aide qu'il m'a procurés pendant toute la durée de ce mémoire, ainsi que pour son grand encouragement.

Ensuite, je tiens à remercier vivement Monsieur CHRIEAT Ahmed "professeur à l'université de Biskra" pour l'intérêt qu'il a porté au travail effectué en acceptant la présidence du jury.

Je tiens à présenter mes respectueux et vifs remerciements à Monsieur YAHIA Khaled "docteur à l'université de Biskra" de m'avoir honoré en acceptant de faire partie du jury de soutenance.

Je ne peux oublier l'ensemble des personnes que j'ai côtoyées pendant mon cursus d'études, qu'elles trouvent ici mes remerciements les plus distingués. Je remercie l'ensemble de ma famille et également tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'aboutissement de ce travail. J'ai pu apprécier la disponibilité, les conseils ainsi que la gentillesse de mon ami BENKHEIRA Adel, Je ne peux lui être que très reconnaissant. Enfin je ne pourrais terminer ces remerciements sans une pensée à l'ensemble de mes enseignants, qu'ils trouvent ici, dans ces lignes, l'expression de ma profonde gratitude.

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre III : Simulation du modèle de la machine asynchrone

Tableau III.1 :	Amplitudes des harmoniques de fréquence en (dB), pour différent nombre de barres cassées	61
------------------------	--	-----------

LISTE DES FIGURES

Chapitre I : Etat de l'art sur le diagnostic des défauts de la MAS

Fig.I.1:	Eléments de constitution d'une MAS à cage d'écureuil.....	3
Fig.I.2:	Stator en cours de bobinage.....	4
Fig.I.3:	Stator (vue d'ensemble).....	4
Fig.I.4:	Rotor à barres d'aluminium.....	5
Fig.I.5:	Rotor à barres de cuivre.....	5
Fig.I.6:	Rotor à cage d'écureuil (vue d'ensemble).....	5
Fig.I.7:	Cage d'écureuil en aluminium.....	5
Fig.I.8:	Diagramme des différents concepts de maintenance.....	7
Fig.I.9:	Causes externes et internes de défauts de la machine asynchrone.....	10
Fig.I.10:	Représentation de l'excentricité statique et dynamique dans la MAS.....	12
Fig.I.11:	Dimension du roulement à bille.....	13
Fig.I.12:	Représentation des différents défauts statoriques possible.....	14
Fig.I.13:	Exemples de dégâts dus au défaut de court-circuit statorique d'un MAS.....	14
Fig.I.14:	Mesures vibratoires sur la machine asynchrone.....	15
Fig.I.15:	Représentation temporelle vers fréquentielle.....	18

Chapitre II : Modélisation du moteur asynchrone

Fig.II.1:	Structure multi-enroulements du rotor.....	21
Fig.II.2:	Circuit équivalent du rotor à cage d'écureuil.....	21
Fig.II.3:	Circuit électrique équivalent de la cage rotorique.....	21
Fig.II.4:	Champ produit par une maille rotorique.....	29

Chapitre III :

Simulation du modèle de la machine asynchrone

Fig.III.1:	Schéma de simulation du modèle de la machine asynchrone à cage.....	33
Fig.III.2:	Les courants statorique (a), et son zoom on régime permanent(b).....	34
Fig.III.3:	Vitesse de rotation de la machine (Etat sain).....	35
Fig.III.4:	Couple électromagnétique de la machine.....	36

Liste des Figures :

Fig.III.5:	Courants de deux mailles rotorique (a) et le zoom dans le régime permanent (b).....	36
Fig.III.6:	Flux totalisée statorique (a), et son zoom en régime permanent.....	37
Fig.III.7:	Mesure du flux axial.....	38
Fig.III.8:	Mesure du flux radial.....	38
Fig.III.9:	Courant de neutre de la machine (Etat saine).....	39
Fig.III.10:	Spectre de courant statorique (a), Spectre de courant rotorique (b), Spectre de Couple électromagnétique (c), spectre de vitesse de rotation (d). (Etat sain).....	40
Fig.III.11:	Les courants statorique (a), et son zoom on régime permanent(b). (Avec une alimentation déséquilibrée).....	41
Fig.III.12:	Spectre de courants statorique (alimentation déséquilibrée).....	42
Fig.III.13:	Les Flux statorique (a), et son zoom on régime permanent(b). (Avec une alimentation déséquilibrée).....	42
Fig.III.14:	Courant de neutre et son zoom de la machine : en charge ($C_r=1.5N.m$) (Cas d'une alimentation déséquilibrée).....	43
Fig.III.15:	Stratégie de la commande MLI.....	44
Fig.III.16:	Schéma bloque de la MAS associée à un onduleur de tension.....	45
Fig.III.17:	Les tensions V_{abc} de la sortie de l'onduleur a MLI.....	45
Fig.III.18:	La tension de phase V_a de l'onduleur à MLI.....	45
Fig.III.19.a:	Courant statorique I_{s1} de MAS.....	46
Fig.III.19.b:	Zoom de I_{s1} en [1.75s - 2.6s].....	46
Fig.III.20:	Courant d'une maille rotorique I_{r1}	46
Fig.III.21:	Vitesse de rotation de la MAS avec onduleur.....	47
Fig.III.22:	Couple électromagnétique de la MAS avec onduleur.....	47
Fig.III.23:	Spectre de courant statorique $I_s 1$ (a), et zoom de la fondamentale.....	48
Fig.III.24:	Courant rotorique dans la barre 1.....	49
Fig.III.25:	Influence de la rupture de la barre 1 sur les barres adjacentes (a) et son zoom (b).....	50
Fig.III.26:	Influence de la rupture de la barre 1 sur les barres adjacentes (2 et 27)	51
Fig.III.27:	Courant statorique pendant la rupture d'une barre puis de deux barres.	52
Fig.III.28:	Modulation du courant statorique pendant larupture d'une barre puis de deux barres (Agrandissement).....	52

Liste des Figures :

Fig.III.29:	Vitesse de rotation avec état sain.....	53
Fig.III.30:	Vitesse de rotation avec défaut sur trois barres cassées.....	53
Fig.III.31:	Les oscillations de couple électromagnétique avec l'augmentation de rupture des barres.....	55
Fig.III.32:	Courant statorique dans le régime permanent.....	56
Fig.III.33:	Courant statorique dans le régime permanent (Après la réduction de la valeur de la charge).....	56
Fig.III.34:	Spectre du courant statorique pour un moteur sain en charge.....	58
Fig.III.35:	Spectre du courant statorique et son zoom (b) -Moteur en charge avec une barre cassée.....	59
Fig.III.36.a:	Spectre du courant statorique pour un moteur en charge avec deux barres adjacentes cassées.....	59
Fig.III.36.b:	Spectre du courant statorique pour un moteur en charge avec deux barres adjacentes cassées (zoom autour du fondamental).....	60
Fig.III.37:	Spectre du courant statorique pour un moteur en charge avec trois barres adjacentes cassées.....	60
Fig.III.38:	Spectre du courant statorique pour quatre barres cassées. (La quatrième barre se trouve à $\pi/2$ de la première).....	61
Fig.III.39:	Spectre du courant statorique pour un moteur en charge avec deux barres cassées espacées entre eux de $\pi/2$ (la barre 1 et 7).....	61
Fig.III.40:	Spectre du courant statorique pour un moteur marche à vide, avec trois barres adjacentes cassées.....	62
Fig.III.41:	Spectre de courant statorique pour un moteur avec deux barre cassées....	63
Fig.III.42:	Spectre du courant statorique pour un moteur avec une barre cassée pour différentes charge.....	64
Fig.III.43:	Spectre du courant statorique pour un moteur avec deux barres cassées pour différentes charge.....	65
Fig.III.44:	Vitesse de rotation fixe (a). spectre de courant statorique avec vitesse constant (b).....	66

LISTE DES ABREVIATIONS

Ω	: Surface enfermée par un contour.
μ_0	: Perméabilité magnétique de l'air.
ϕ	: Flux magnétique.
L_{BA}	: Inductance mutuelle entre l'enroulement B et A .
L_b	: Inductance de fuite d'une barre rotorique.
L_e	: Inductance de fuite d'un segment d'anneau de court-circuit.
L_{mr}	: Inductance de magnétisation d'une maille rotorique.
L_{Am}	: Inductance de magnétisation d'une phase statorique.
L_{fA}	: Flux de fuite d'une phase statorique.
ψ_{BA}	: Flux mutuelle total entre deux enroulements A et B
F	: Force magnétomotrice.
g	: Epaisseur de l'entrefer, ou fonction d'entrefer.
g_0	: Epaisseur de l'entrefer de la machine symétrique
r	: Rayon moyen de l'entrefer de la machine symétrique.
r_s	: Résistance d'une phase statorique
R_b	: Résistance d'une barre rotorique.
R_e	: Résistance d'un anneau de court-circuit.
$[R_s]$: Matrice des résistances statoriques.
$[R_r]$: Matrice des résistances rotoriques.
$[R]$: Matrice globale des résistances de la machine.
$[V_s]$: Matrice des tensions statoriques.
$[V_r]$: Matrice des tensions rotoriques.
$[I_s]$: Matrice des courants statoriques.

Liste des Abréviations :

$[I_r]$: Matrice des courants rotoriques.
Ω_r	: Vitesse mécanique du rotor.
ω_s	: Pulsation statorique.
φ	: Ouverture angulaire.
θ_r	: Position mécanique du rotor
J	: Densité de courant.
J_T	: Moment d'inertie totale.
$I_{s\max}$: Courant statorique maximale
i	: Courant électrique.
l	: Longueur active de la machine.
p	: Nombre de paires de pôles.
N_s	: Nombre de spires.
N_b	: Nombre de barres rotoriques.
f_s	: Fréquence d'alimentation.
f_r	: Fréquence rotorique.
f_b	: Fréquence caractéristique du défaut de barres.
f_{bille}	: Fréquence de vibration relative aux défauts de billes.
$f_{b.int}$: Fréquence de vibration relative au défaut de bague intérieure.
$f_{b.ext}$: Fréquence de vibration relative au défaut de bague extérieur.
f_{ecc}	: Fréquence d'ordre supérieur caractéristique du défaut d'excentricité.
f_{brc}	: Fréquence caractéristique du défaut de roulement.
f_{ST}	: Fréquence caractéristique du défaut statorique.
FFT	: Transformation de fourie rapide
MAS	: Machine asynchrone
BD	: Le diamètre d'un élément roulant.
PD	: La distance entre les centres des billes diamétralement opposées.

Liste des Abréviations :

RESUME

Résumé : L'objectif de ce mémoire est d'effectuer une étude numérique par simulation des effets dus à l'asymétrie rotorique dans les machine asynchrone a cage. Ces asymétries peuvent être dues primordialement par les imperfections de construction (fabrication). En deuxième degrés ces asymétries peuvent être la conséquence des défauts de cassures des barres rotorique. Le modèle Simulink est exploité pour ce but, ce modèle tient compte de la structure multi-enroulements de la cage rotorique. Nous avons simulé aussi quelques défauts fréquents afin de tester l'efficacité de modèle.

Mot clé : l'asymétrie rotorique, machine asynchrone a cage, cassures des barres rotorique, multi-enroulements

ملخص : الهدف من هذه المذكرة هو إجراء دراسة المحاكاة العددية للأثار الناجمة عن عدم تماثل الدوار في المحرك غير المتزامن . يمكن أن يكون سبب هذه الاختلالات بأغلبية ساحقة عيوب البناء (التصنيع) من الدرجة الثانية هذه الاختلالات يمكن أن تكون نتيجة لعيوب كسر قضبان الدوار. يتم استخدام نموذج المحاكاة لهذا الغرض، يأخذ هذا النموذج في الاعتبار بنية متعدد اللفات من القفص الدوار. قمنا أيضا بمحاكاة بعض الاعطال الشائعة لاختبار كفاءة النموذج.

الكلمات المفتاحية : عدم تماثل الدوار, المحرك غير المتزامن, لعيوب كسر قضبان الدوار, بنية متعدد اللفات.

SOMMAIRE

DEDICACE	I
REMERCIEMENTS	II
LISTE DES TABLEAUX	III
LISTE DES FIGURES	IV
LISTE DES ABREVIATIONS	V
RESUME	VI

INTRODUCTION GENERALE	1
------------------------------------	---

Chapitre I : Etat de l'art sur le diagnostic des défauts de la MAS

I.1 Introduction :	3
I.2 Présentation du système a étudier :	3
I.2.1 Constitution de la machine asynchrone a cage.....	3
I.2.1.A Le stator :	4
I.2.1.B Le rotor :	4
I.2.2 Principe de fonctionnement de la machine asynchrone	6
I.3 Concepts et défénition :	6
I.3.1 Le diagnostic	7
I.3.2 La maintenance	7
I.3.2.1 Maintenance corrective.....	8
I.3.2.2 Maintenance préventive.....	8
I.3.2.2.1 Maintenance préventive systématique	8
I.3.2.2.2 Maintenance préventive conditionnelle.....	8
I.3.2.2.2 Maintenance prévisionnelle (prédictive)	9
I.3.3 La surveillance	9
I.4 Origine des défauts dans le moteur à cage d'écureuil.....	9
I.5 Principaux défauts de la machine asynchrone à cage	10
I.6 Présentation des défauts :	11
I.6.1 Défauts rotorique :	11
I.6.1.1 Cassure des barres :	11
I.6.1.2 Défauts d'excentricité :	11

I.6.1.3 Défauts de roulement :	12
I.6.2 Défauts statorique :	13
1.7 Méthode de diagnostic et de détection des défauts dans la machine asynchrone :	15
I.7.1 Méthodes sans modèle	15
I.7.1.1 Diagnostic par analyse des vibrations mécaniques :	15
I.7.1.2 Diagnostic par mesure du flux magnétique axial de fuite	16
I.7.1.3 Diagnostic par l'analyse des tensions statorique induites	16
I.7.1.4 Diagnostic par mesure du couple électromagnétique	16
I.7.1.5 Diagnostic par mesure de la puissance instantanée	17
I.7.1.6 Diagnostic par analyse du courant statorique	17
I.7.1.7 Diagnostic par analyse du vecteur de Park	17
I.7.1.8 Diagnostic par utilisation des techniques d'intelligence artificielle	17
I.7.2 Technique de traitement de signal utilisées dans le diagnostic	18
I.7.2.1 Transformée de Fourier rapide (FFT)	18

Chapitre II : Modélisation du moteur asynchrone

II.1 Introduction	20
II.2 Modèle multi-enroulements	20
II.2.1 Equations des tensions	21
II.2.2 Equations mécanique	25
II.2.3 Système d'équations global	25
II.3 Calcule des Inductances : Cas générale	27
a) Inductances statoriques	27
b) Inductances rotoriques	29
c) Inductances mutuelles entre enroulements statoriques et rotoriques	31
II.4 Conclusion :	32

Chapitre III : Simulation du modèle de la machine asynchrone

III.1. Introduction :	33
III.2 Simulation du modèle de la machine asynchrone :	33
III.2.1 Simulation de la machine avec l'état sain :	34
III.2.1.1 L'évolution des courants statorique :	34
III.2.1.2 L'évolution du la vitesse de la rotation :	34
III.2.1.3 L'évolution du couple électromagnétique :	35

III.2.1.4 L'évolution des courants rotorique :	36
III.2.1.5 L'évolution du flux statorique :	37
III.2.1.6 L'évolution du courant neutre :	38
III.2.2 Simulation de la machine avec déséquilibre de tension :	40
III.2.2.1 Définition :	40
III.2.2.2 Effets de l'alimentation de déséquilibré de tension :	40
III.2.2.3 Résultats de simulation d'un déséquilibre de tension :	41
III.2.2.3.1 L'évolution des courants statorique :	41
III.2.2.3.2 L'évolution du flux statorique :	42
III.2.2.3.3 L'évolution du courant neutre :	43
III.2.2.4 Les conséquences des grandeurs homopolaires :	43
III.2.3 Simulation d'une machine asynchrone alimentée par un onduleur	44
III.2.3.1 Définition	44
III.2.3.2 Onduleur de tension triphasé :	44
III.2.3.3 Commande MLI :	44
III.2.3.4 Résultats de simulation d'un MAS-onduleur (sain)	45
III.2.4 Simulation des défauts d'asymétrie rotorique	49
III.2.4.1 Simulation de la rupture de barres au rotor	49
III.2.4.2 Détection des défauts rotorique par l'analyse spectrale (FFT)	57
III.2.4.2.1 Effet du nombre de barres cassées sur les harmonique $(1\pm 2.k.g)fs$	57
III.2.4.2.2 L'ffet de la charge sur les raies (les harmoniques) $(1\pm 2.k.g)fs$	63
III.2.4.2.2 L'ffet des oscillations de vitesse sur les les harmoniques $(1\pm 2.k.g)fs$	63
III.3 Conclusion :	66
CONCLUSION GENERALE	67
ANNEXE	68
BIBLIOGRAPHIE	69

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Durant ce dernier siècle, l'accroissement optimal de la compétitivité mondiale en matière de production dans un contexte international très concurrentiel a poussé les industriels à chercher comment assurer et à maîtriser la disponibilité et la sûreté de fonctionnement de leurs outils de production. Ces exigences en matière de sûreté de fonctionnement ont fait émerger une nouvelle science de l'ingénieur qui est la surveillance des équipements industriels. Cette dernière englobe la détection et le diagnostic des défaillances. La détection d'une défaillance a pour but principal d'améliorer et d'augmenter la disponibilité des systèmes afin de réduire les coûts de la maintenance et d'éviter un arrêt brusque de la production. Par contre le diagnostic de défauts a pour rôle la localisation (déterminer quelle partie du système est affectée) et l'identification de ce défaut (quantification du défaut). Actuellement le domaine de diagnostic est devenu un outil essentiel de la maintenance corrective et par conséquent, les entreprises équipées par des systèmes de surveillance ont tendance de plus en plus à automatiser la procédure de maintenance.

La machine asynchrone, de par sa construction, est la machine la plus robuste et la moins chère du marché. Cette machine est largement utilisée dans la plupart des entraînements électriques dans plusieurs domaines industriels, notamment pour des applications à vitesse constante ou à vitesse variable. Comme toute autre machine, la machine asynchrone n'est pas à l'abri d'un dysfonctionnement. Elle peut être affectée par des défauts électriques ou mécaniques au niveau du stator, ou du rotor, ou les deux en même temps. Les causes des défauts peuvent être dues à un simple problème de fabrication ou à une utilisation non conforme de la machine. Parfois le milieu dans lequel la machine est utilisée peut être responsable à la détérioration de la machine (milieu corrosif, milieu chimique,...). De ce fait, un arrêt brusque dû à une anomalie quelconque peut engendrer des pertes financières (pertes de production, la remise en état de l'outil de production, les retards de livraison) et matériels inévitables. Par conséquent, il est recommandé de détecter de façon précoce un défaut afin d'y remédier dans des délais les plus brefs et minimiser les effets induits (arrêt d'une chaîne de production, pertes de produits, etc...). Ceci a poussé la majorité des industriels à doter leurs chaînes de production par des systèmes sophistiqués de détection et de diagnostic de défauts. Ces deux dernières fonctions ont pour objectif d'une part l'amélioration de la sécurité des êtres humains et des biens et d'autre part l'augmentation des gains de productivité résultant de l'accroissement de la disponibilité des équipements et d'une gestion efficace des opérations de

Introduction Générale :

maintenance. Un système de surveillance n'a pas pour vocation de remplacer l'homme mais pour l'aider dans sa prise de décision finale [1].

Durant maintenant plus d'une vingtaine d'années, les exigences de sûreté de fonctionnement et de productivité des installations industrielles ont motivé, dans leur domaine applicatif respectif, un effort important de recherche et de développement pour la détection et le diagnostic des défauts.

Le travail réalisé dans le cadre de ce mémoire présente la détection des défauts statorique et rotorique dans la machine asynchrone. Les outils d'analyse et diagnostic de défaut sont à base de l'utilisation du spectre par le biais de la transformée de Fourier (FFT). Pour mener cette étude, le mémoire est structuré en trois chapitres :

Dans le premier chapitre nous présentons d'abord les éléments de constitution de ce type de machine, la maintenance et ses types. Les différents types des défauts de la machine asynchrone ainsi que les différentes méthodes de diagnostic.

Un deuxième chapitre sera consacré à la formulation mathématique du modèle de la machine asynchrone triphasée à cage avec la modélisation des inductances entre enroulements de la machine, dans le cas général.

Pour le troisième chapitre on présente les résultats de simulation de la machine dans différentes conditions de fonctionnement : la machine à l'état sain et avec défaut. Nous allons également présenter une analyse détaillée des différents défauts rotoriques et statoriques.

CHAPITRE I :
ETAT DE L'ART SUR LE
DIAGNOSTIC DES DEFAUTS DE
LA MAS

Chapitre I : Etat de l'art sur le diagnostic des défauts de la MAS

I.1 Introduction :

Dans ce chapitre, on essaye de décrire le comportement du système à étudier à savoir à la machine asynchrone triphasée à cage d'écurail, et quelque définitions sur la diagnostic et la maintenance. Après avoir citer les différents défauts pouvant survenir dans la machine et leurs causes, nous avons également essayé parler brièvement les techniques de base couramment utilisées dans le domaine du diagnostic des défaut

I.2 Présentation du système a étudier :

I.2.1 Constitution de la machine asynchrone a cage :

La machine asynchrone souvent appelée machine à induction, comporte deux parties essentielles, l'une fixe appelée stator portant un bobinage triphasé logé dans les encoches et relié à la source d'alimentation et l'autre mobile ou rotor qui peut être soit bobiné soit à cage d'écurail. Ces deux parties sont coaxiales et séparées par un entrefer (Figure. I.1).

Dans ce chapitre, on considère le cas d'une machine asynchrone à cage d'écurail. Toutefois, on admette que sa structure est électriquement équivalente à celle d'un rotor bobiné dont les enroulements sont en court-circuit [1].

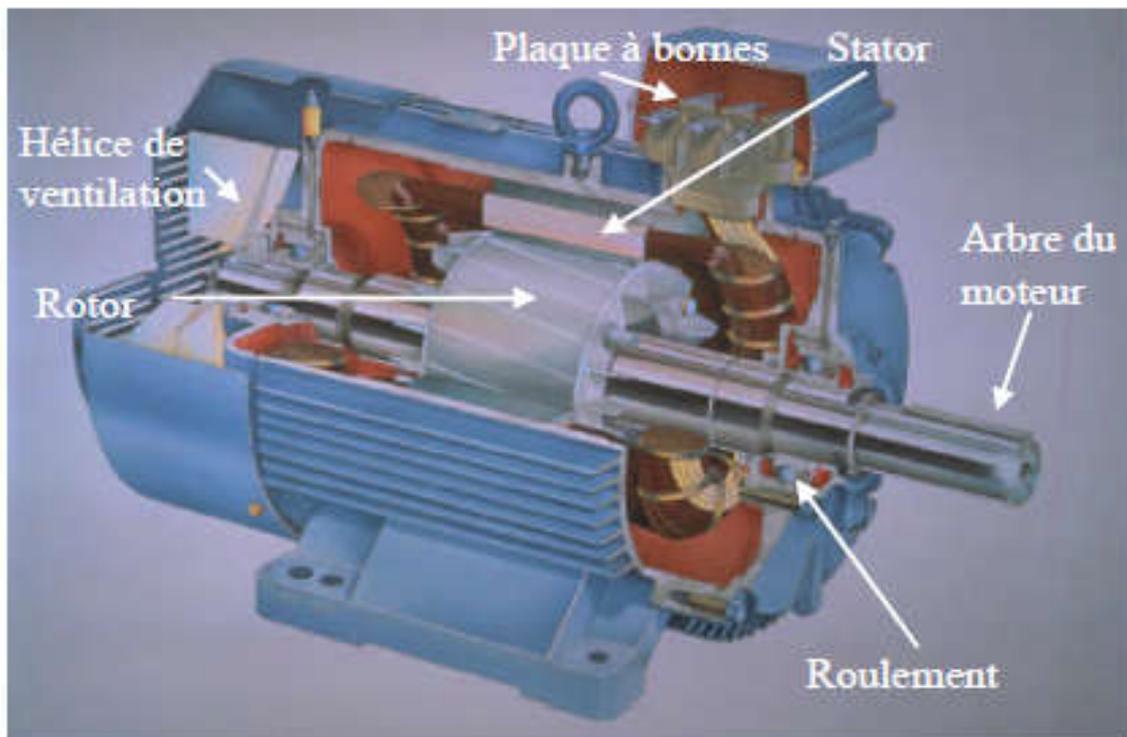


Fig.I.1: Eléments de constitution d'une MAS à cage d'écurail

Chapitre I : Etat de l'art sur le diagnostic des défauts de la MAS

I.2.1.A Le stator :

Il est constitué d'une couronne de tôles minces (0,35 mm) empilées [2], caractérisées par des pertes allant de 1,6 à 2,3W/kg à 50 Hz [3]. Cette couronne est serrée dans une carcasse. Débouchant à l'intérieur de l'anneau ainsi formé, des encoches contiennent un enroulement triphasé. Cet enroulement peut être bipolaire, tétra polaire, etc. (Figures I.2 et I.3)

Les entrées et les sorties des trois phases aboutissent à une plaque à bornes.

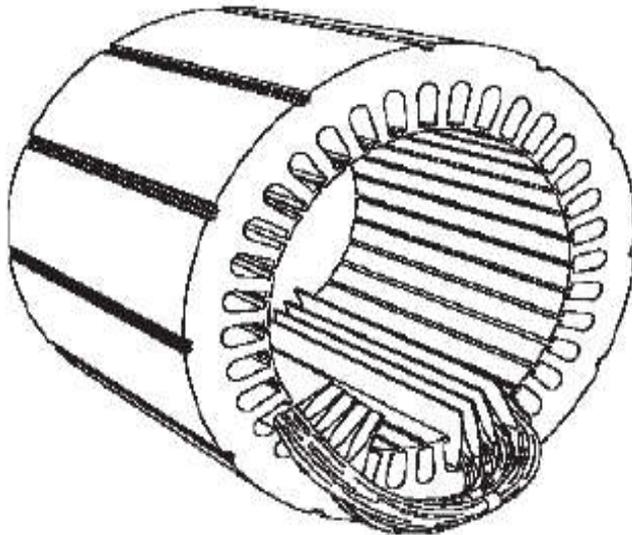


Fig.I.2 : Stator en cours de bobinage

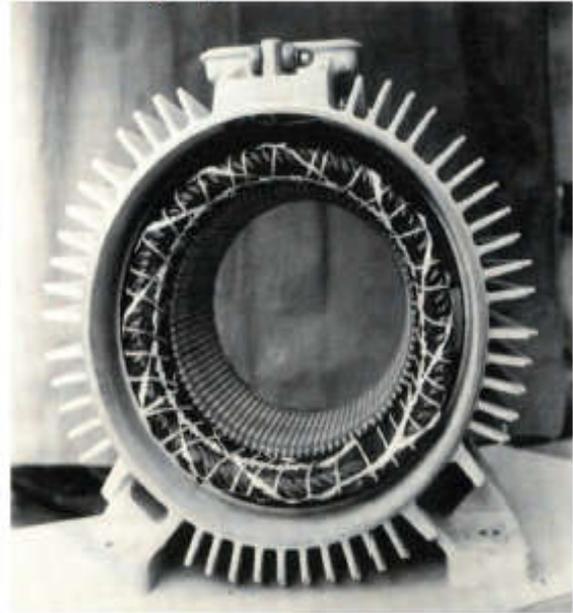


Fig.I.3 : Stator (vue d'ensemble)

I.2.1.B Le rotor :

Nous n'étudions ici que les machines dites à cage d'écureuil.

Les rotors à cage d'écureuil des machines asynchrones sont constitués par un cylindre en disques de tôles empilées, percées de trous sur la périphérie pour former des encoches. Ces encoches, fermées ou semi fermées, sont destinées à recevoir les barres rotoriques en cuivre nu ou en aluminium coulé sous pression à une température voisine de 735°C.

Les cages en cuivre sont faites avec des barres d'égale longueur, enfilées dans les encoches et rivées ou brasées sur deux anneaux en cuivre, disposés de part et d'autre du rotor. La brasure au cuivre est faite au chalumeau, par soudure à l'arc électrique ou par chauffage inductif.

Les rotors à cage d'écureuil en aluminium se généralisent de plus en plus. La coulée d'aluminium produit non seulement le remplissage des encoches, mais elle forme également

Chapitre I : Etat de l'art sur le diagnostic des défauts de la MAS

les deux anneaux du rotor qui court-circuitent toutes les barres. La cage est souvent dotée d'ailettes de ventilation.

La construction de la cage en barres est actuellement réservée aux moteurs de grande puissance (Figures I.4 et I.5). Les moteurs de petites et moyennes puissances ont des cages en aluminium (Figures I.6 et I.7) (puissance inférieure à 20kW).

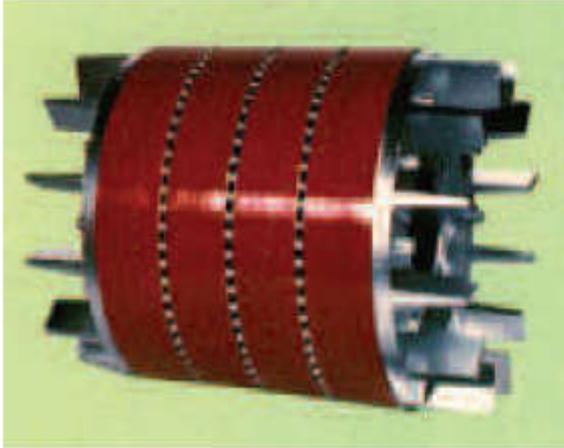


Fig. I.4 : Rotor à barres d'aluminium



Fig. I.5 : Rotor à barres de cuivre

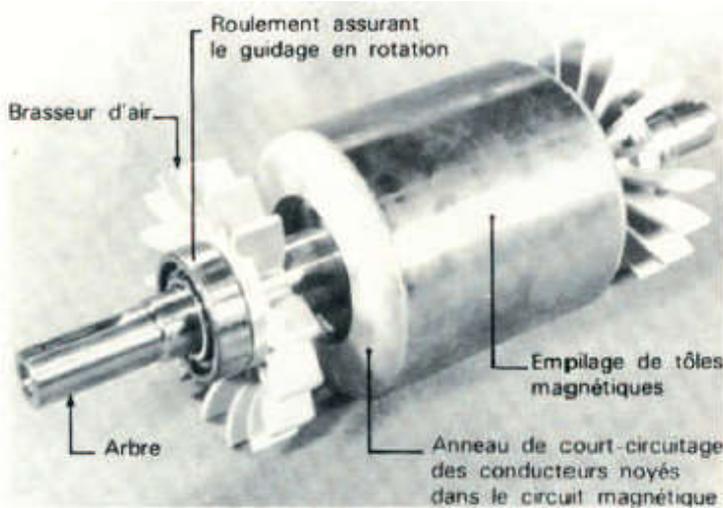


Fig. I.6 : Rotor à cage d'écureuil (vue d'ensemble)

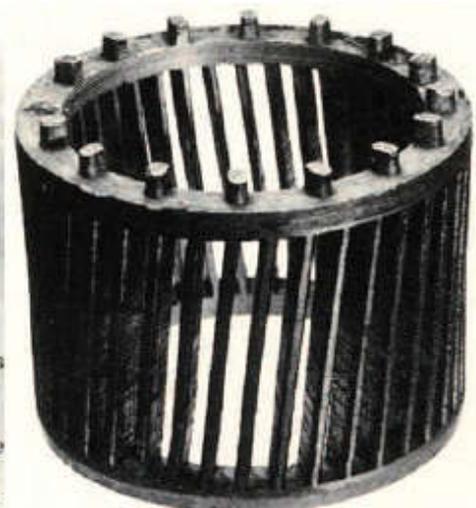


Fig. I.7 : Cage d'écureuil en aluminium

Le stator et le rotor sont séparés par un entrefer très faible, de l'ordre de (0,2 à 3 mm suivant la puissance) [3].

I.2.2 Principe de fonctionnement de la machine asynchrone :

Le principe de fonctionnement de la machine asynchrone est basé entièrement sur les lois de l'induction; la machine asynchrone est considérée comme un transformateur à champ

Chapitre I : Etat de l'art sur le diagnostic des défauts de la MAS

magnétique tournant dont le stator étant comparable à l'enroulement primaire et le rotor à l'enroulement secondaire en court-circuit.

Ce fonctionnement est reposé sur le principe de l'interaction électromagnétique du champ tournant, créé par le courant triphasé fourni à l'enroulement statorique par le réseau, et des courants induits dans l'enroulement rotorique lorsque les conducteurs de ce dernier sont coupés par le champ tournant.

Lorsque le rotor tourne à une vitesse N_s différente du synchronisme, l'application de la loi de FARADAY à un des enroulements rotoriques montre que celui-ci devient le siège d'une force électromotrice qui étant court-circuité sur les enroulements va donner naissance à un courant dont l'intensité est limitée par l'impédance de ce dernier. L'interaction entre ce courant et le champ glissant va donner naissance à des forces s'exerçant sur les brins du rotor dont le moment par rapport à l'axe de rotation constituera le couple de la machine. Lorsque le champ est sinusoïdal, sa vitesse de rotation est:

$$n_1 = \frac{f}{p} \quad (I.1)$$

Où f : est la fréquence d'alimentation.

p : représente le nombre de paire de pôles

L'interaction électromagnétique des deux parties de la machine n'est possible que lorsque la vitesse du champ tournant (n_1) diffère de celle du rotor (n), c'est à dire lorsque $n \neq n_1$, car dans le cas contraire, c'est à dire lorsque $n = n_1$, le champ serait immobile par rapport au rotor et aucun courant ne serait induit dans l'enroulement rotorique.

Le rapport : $g = \frac{n_1 - n}{n_1}$ est appelé glissement de la machine asynchrone [1].

I.3 Concepts et définition :

Le mot *diagnostic* peut avoir plusieurs interprétations selon le contexte et le domaine d'application. Le diagnostic des procédés industriels a pour objet de trouver la cause d'une défaillance ou d'un défaut. La définition de ce dernier, adoptée par les instances internationales de normalisation (AFNOR, CEI), (Association Française de Normalisation), est la suivante:

Chapitre I : Etat de l'art sur le diagnostic des défauts de la MAS

I.3.1 Le diagnostic

Est l'identification de la cause probable de la (ou des) défaillance(s) à l'aide d'un raisonnement logique fondé sur un ensemble d'informations provenant d'une inspection, d'un contrôle ou d'un test [4].

La responsabilité de garantir la disponibilité des systèmes repose sur la maintenance. D'après la norme AFNOR la maintenance est définie ainsi :

I.3.2 La maintenance [5]

La maintenance est définie comme étant toutes les activités destinées à maintenir ou à rétablir un bien dans un état ou dans des conditions données de sûreté de fonctionnement, pour accomplir une fonction requise. Ces activités sont une combinaison d'activités techniques, administratives et de management.

Maintenir, c'est donc effectuer des opérations (dépannage, graissage, visite, réparation, amélioration...etc.) qui permettent de conserver le potentiel du matériel, pour assurer la continuité et la qualité de la production. Bien maintenir, c'est assurer ces opérations pour que le coût global soit optimum. La figure représente le diagramme des différents concepts de maintenance et les événements associés.

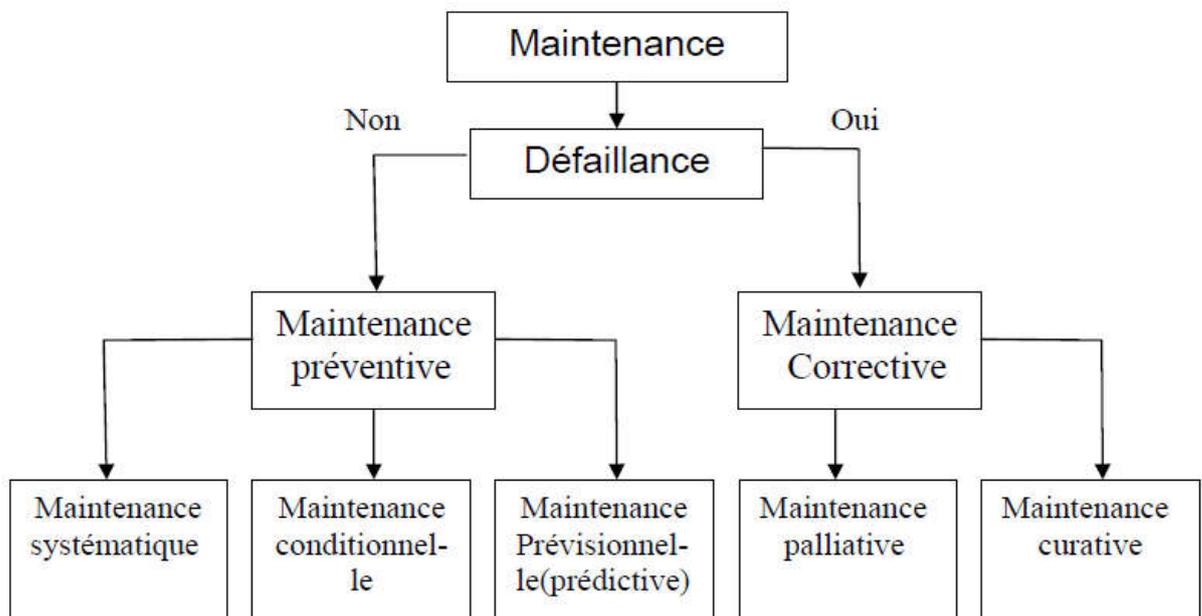


Fig I.8: Diagramme des différents concepts de maintenance

I.3.2.1 Maintenance corrective

Ensemble des activités réalisées après la défaillance du bien, ou la dégradation de sa fonction pour lui permettre d'accomplir une fonction requise, au moins provisoirement : ces

Chapitre I : Etat de l'art sur le diagnostic des défauts de la MAS

activités comportent notamment la localisation de la défaillance et son diagnostic, la remise en état avec ou sans modification, le contrôle du bon fonctionnement.

I.3.2.2 Maintenance préventive

Maintenance ayant pour objet de réduire la probabilité de défaillance ou de dégradation d'un bien ou d'un service rendu. Les activités correspondantes sont déclenchées selon un échéancier établi à partir d'un nombre prédéterminé d'usage (maintenance systématique), et/ou des critères prédéterminés significatifs de l'état de dégradation du bien ou du service (maintenance conditionnelle)

But de la maintenance préventive

- ❖ Augmenter la durée de vie des matériels
- ❖ Diminuer la probabilité des défaillances en service
- ❖ Diminuer les temps d'arrêt en cas de révision ou de panne
- ❖ Prévenir et aussi prévoir les interventions coûteuses de maintenance corrective.
- ❖ Permettre de décider la maintenance corrective dans de bonnes conditions
- ❖ Éviter les consommations anormales d'énergie, de lubrifiant, de pièces détachées, etc.
- ❖ Améliorer les conditions de travail du personnel de production
- ❖ Diminuer le budget de maintenance
- ❖ Supprimer les causes d'accidents graves [6].

I.3.2.2.1 La maintenance préventive systématique :

Ce type de maintenance comprend l'ensemble des actions destinées à restaurer, en totalité ou partiellement, la marge de résistance des matériels non défaillants. Ces tâches sont décidées en fonction du temps ou de la production, sans considération de l'état des matériels à cet instant.

I.3.2.2.2 La maintenance préventive conditionnelle :

Alternative à la maintenance systématique, fait l'objet d'une demande croissante dans un grand nombre d'applications industrielles. Cette maintenance est basée sur la surveillance en continu de l'évolution du système, afin de prévenir un dysfonctionnement avant qu'il n'arrive. Elle n'implique pas la connaissance de la loi de dégradation. La décision d'intervention préventive est prise lorsqu'il y a évidence expérimentale du défaut imminent,

Chapitre I : Etat de l'art sur le diagnostic des défauts de la MAS

ou approche d'un seuil de dégradation prédéterminé. Elle impose donc des traitements en ligne, au moins une partie. Pour accomplir ces fonctions, la maintenance nécessite de connaître l'état de fonctionnement des systèmes. La surveillance donne une réponse aux besoins d'information de la maintenance, sa définition est la suivante.

I.3.2.2.3 Maintenance prévisionnelle (prédictive) :

C'est une maintenance préventive subordonnée à l'analyse de l'évolution surveillée de paramètres significatifs de la dégradation du bien. Elle permet de planifier les interventions.

I.3.3 La surveillance

Est un dispositif passif, informationnel qui analyse l'état du système et fournit des indicateurs. La surveillance consiste notamment à détecter et classer les défaillances en observant l'évolution du système puis à le diagnostiquer en localisant les éléments défaillants et en identifiant les causes premières. La surveillance se compose donc de deux fonctions principales qui sont la détection et le diagnostic.

I.4 Origine des défauts dans le moteur à cage d'écureuil

Les origines des défauts peuvent être diverse [7] [8], recensons d'après l'organigramme de la figure (I.8) les origines : mécaniques, électriques, thermiques et environnementales.

Il est clair que, les défauts externes sont provoqués, soit par l'environnement de l'utilisation de la machine, soit par les tensions d'alimentation et la charge mécanique, alors que les défauts internes de la machine sont causés par les constituants de la machine (circuits magnétiques rotorique et statorique, bobinages statoriques, entrefer mécanique, cage rotorique,...).

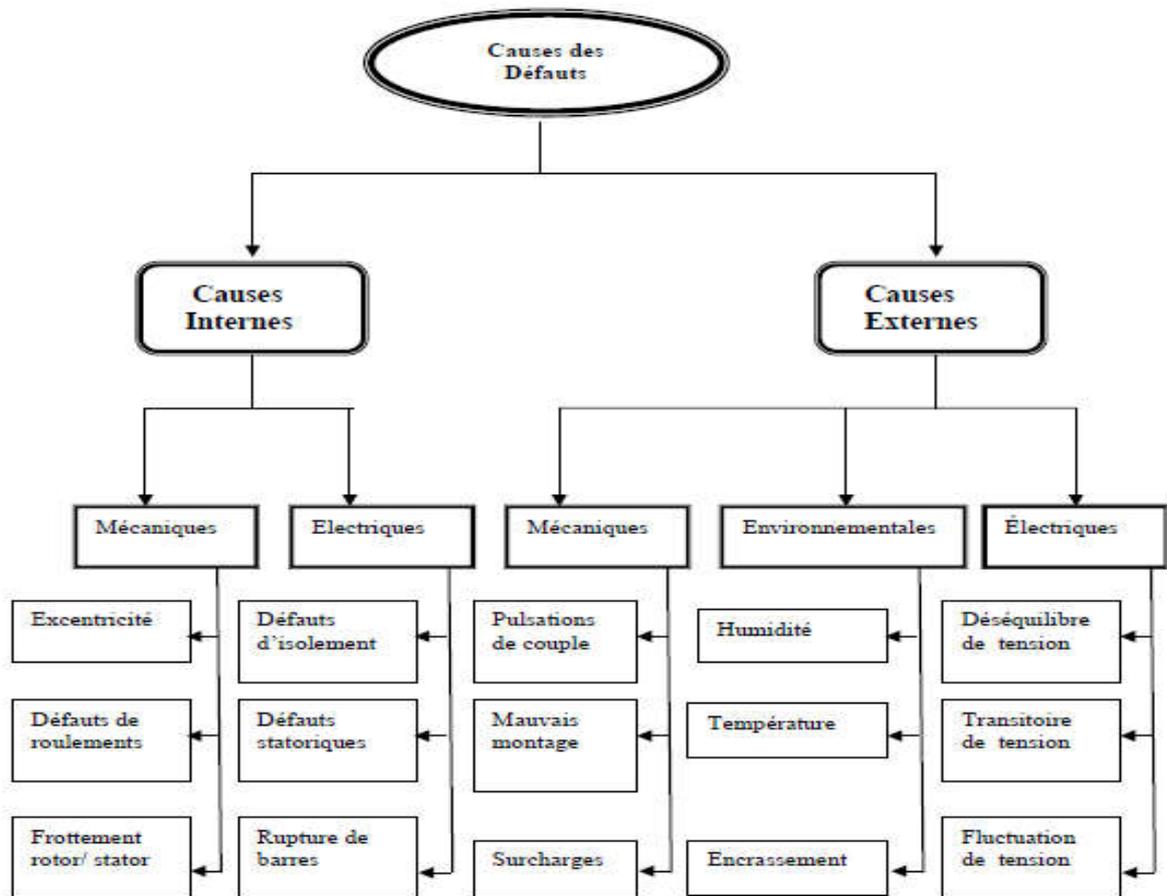


Fig I.9 : Causes externes et internes de défauts de la machine asynchrone [7].

I.5 Principaux défauts de la machine asynchrone à cage

Comme nous l'avons souligné plus haut, les machines asynchrone au cours de leurs vies, sont souvent soumises à des contraintes de différentes natures qui peuvent conduire à certain nombre de défauts. Ces derniers peuvent provenir de la partie fixe (stator) ainsi que de la partie mobile (rotor).

De nombreuse classification existe dans la littérature, notons par exemple [8], qui recense les défauts majeurs suivants :

Défauts statoriques dues à la rupture ou au court-circuit d'une ou plusieurs spires de l'enroulement statorique.

- ❖ Défaut de roulements à bille.
- ❖ Défauts de cassure des barres rotoriques ou de segments des anneaux rotoriques.
- ❖ Arbre déformé (excentricité) qui peut provoquer un frottement entre le rotor et le stator provoquant ainsi un endommagement grave du circuit magnétique.

Chapitre I : Etat de l'art sur le diagnostic des défauts de la MAS

Tous ces défauts produisent un des symptômes ou plus que nous allons énumérer comme suit:

- Déséquilibre des tensions et courants de ligne.
- Augmentation des pulsations de couple
- Diminution du couple moyen.
- Augmentation des pertes et réduction du rendement
- Échauffement excessif

I.6 Présentation des défauts :

I.6.1 Défauts rotorique :

I.6.1.1 Cassure des barres :

La rupture des barres rotorique d'une machine asynchrone est un des défauts les plus couramment étudiés, en raison de sa simplicité de réalisation. Ce défaut induit des modifications dans les courants statorique et entraîne donc l'apparition d'harmonique caractéristiques dans le spectre de ce signal. En effet, lors du défaut d'une rupture de barre, des harmoniques de flux sont produites et induisent des harmoniques de courant dans l'enroulement statorique aux fréquences autour de la fréquence fondamentales f_s telles que [9]:

$$f_b = (1 \pm 2.k.g)f_s \quad \text{Avec } k = 1,2,3,\dots \quad (\text{I.2})$$

g : glissement,

f_s : Fréquence d'alimentation statorique

I.6.1.2 Défauts d'excentricité :

La variation d'épaisseur de l'entrefer entraîne des variations dans la densité du flux d'entrefer.

Les enroulements statorique sont électriquement modifiés, ce qui entraîne des effets dans le spectre des courants [9]. Il existe deux types d'excentricité:

- ❖ **Excentricité statique:** déformation du corps du stator, positionnement incorrecte du rotor,
- ❖ **Excentricité dynamique:** le centre du rotor n'est plus confondu avec le centre de rotation.

Chapitre I : Etat de l'art sur le diagnostic des défauts de la MAS

L'apparition des deux types d'excentricité au même temps est généralement appelée: **excentricité mixte**.

L'excentricité dans la machine à induction augmente l'apparition des composantes additionnelles dans le spectre du courant, leurs fréquences sont données par des composantes fréquentielles suivantes:

$$f_{exc} = f_s \left(1 \pm k \cdot \frac{(1-g)}{p} \right) \quad \text{avec } k=1,2,3\dots\text{ect} \quad (\text{I.3})$$

P : nombre de paire de pôles.

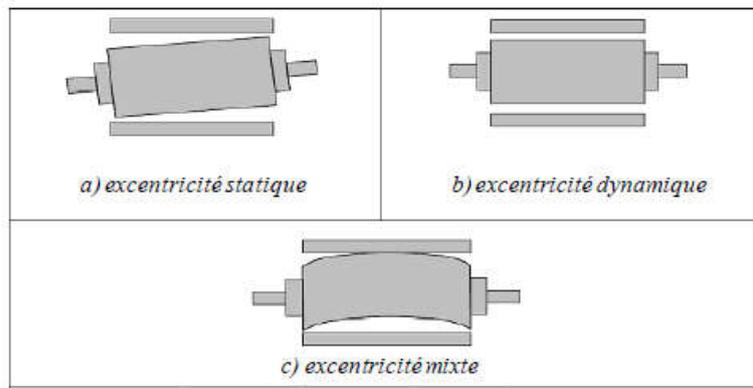


Fig.I.10: Représentation de l'excentricité statique et dynamique dans la machine asynchrone

I.6.1.3 Défauts de roulement :

Les roulements se composent généralement de deux bagues, une intérieure et autre extérieure entre lesquelles existe un ensemble de billes ou de rouleaux tournants (figure I.4). En fonctionnement normal la défaillance est due à la fatigue commence par des petites fissures situées au-dessous des surfaces du chemin de roulement et de l'élément roulant, qui se propage graduellement sur la surface. Tout changement de l'uniformité du roulement produit des vibrations qui génèrent dans le courant statorique des raies spectrales de fréquences [10].

$$f_{brc} = |f_s - k \cdot f_v| \quad (\text{I.4})$$

Où $k=1,2,3, \dots$ est un entier et f_v est l'une des fréquences caractéristiques des vibrations.

Les fréquences caractéristiques des vibrations dépendent de l'élément du roulement affecté par un défaut et sont liées aux paramètres du roulement. Les fréquences des vibrations qui caractérisent les défauts des roulements à bille sont:

Chapitre I : Etat de l'art sur le diagnostic des défauts de la MAS

❖ **Défauts au niveau d'une bille :**

$$f_{bille} = \frac{PD}{BD} f_{rot} \cdot \left[1 - \left(\frac{BD}{PD} \cos(\beta) \right)^2 \right] \quad (I.5)$$

❖ **Défauts sur la bague intérieure :**

$$f_{b.int} = \frac{n_b}{2} f_{rot} \left[1 + \frac{BD}{PD} \cos(\beta) \right] \quad (I.6)$$

❖ **Défauts sur la bague extérieure :**

$$f_{b.ext} = \frac{n_b}{2} f_{rot} \left[1 - \frac{BD}{PD} \cos(\beta) \right] \quad (I.7)$$

Où BD le diamètre d'un élément roulant, PD la distance entre les centres des billes diamétralement opposées, n_b est le nombre d'éléments roulants, β angle de contact des billes avec les bagues du roulement et f_{rot} est la fréquence de rotation du rotor [10]

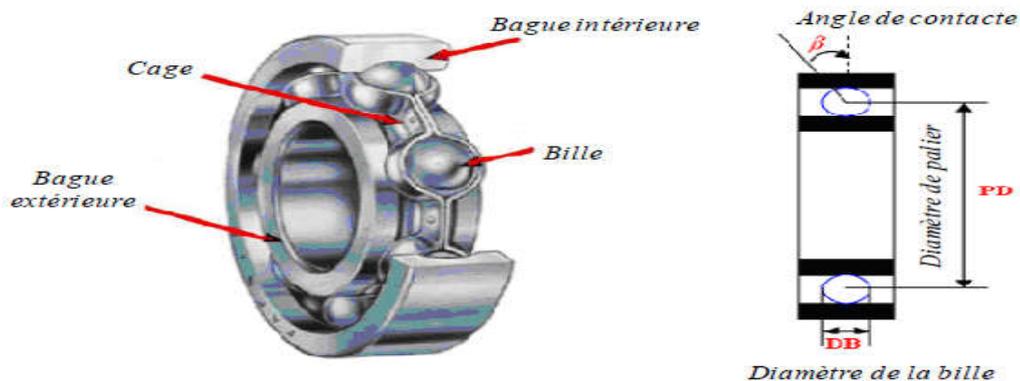


Fig.I.11 : Dimension du roulement à bille.

I.6.2 Défauts statorique :

L'apparition d'un défaut au niveau des circuits électriques statorique de la machine asynchrone peut avoir des origines diverses. On peut citer à titre d'exemple, les défauts de type court-circuit inter-spires qui apparaissent à l'intérieur des encoches statoriques. Ce type de défauts peut être causé par une dégradation des isolants des spires du bobinage statorique.

On peut citer aussi les courts circuits qui apparaissent entre une phase et le neutre, entre une phase et la carcasse métallique de la machine ou entre deux phases statoriques. Les courts-circuits entre spires est donc le défaut le plus fréquemment rencontré au stator, la fréquence caractéristique de ce défaut est [11] :

Chapitre I : Etat de l'art sur le diagnostic des défauts de la MAS

$$f_{ST} = f_s \left[\frac{n}{p} (1 - g) \pm k \right] \quad (I.8)$$

avec $n=1, 2, 3, \dots$ et $k=1, 3, 5, \dots$

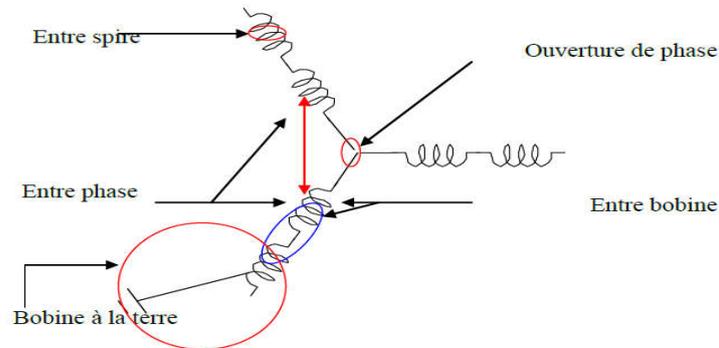


Fig.I.12 : Représentation des différents défauts statoriques possible



Fig.I.13 : Exemples de dégâts dus au défaut de court-circuit statorique d'un moteur asynchrone.

1.7 Méthode de diagnostic et de détection des défauts dans la machine asynchrone :

1.7.1 Méthodes sans modèle

Ces méthodes sont basées soit sur le traitement de signaux issus de capteurs de grandeurs X physiques affectées par les défauts ou soit par des systèmes experts mettant en œuvre des techniques d'intelligence artificielle. Puisque les allures temporelles ne donnent pas beaucoup d'information, on est obligé d'aller vers les techniques de traitement de signal.

Les méthodes se basant sur l'analyse des signaux d'acquisition ont l'avantage d'être indépendante des fluctuations internes du système. Ainsi, l'information contenue dans les signaux n'est pas affectée par une éventuelle erreur de modélisation [1].

Chapitre I : Etat de l'art sur le diagnostic des défauts de la MAS

Plusieurs techniques de traitement de signal ont été utilisées depuis longtemps pour analyser le contenu spectral des différents signaux issus des machines électriques tels que: les courants, les puissances, le couple, la vitesse, le flux, les vibrations,...etc. Dans ce qui suit, on présente brièvement les transformées de Fourier rapide (FFT)

I.7.1.1 Diagnostic par analyse des vibrations mécaniques :

Le diagnostic des défauts en utilisant les vibrations mécaniques est la méthode la plus utilisée dans la pratique [12]. D'après [13], [14], [15], les forces radiales, créées par le champ d'entrefer, provoquent des vibrations dans la machine asynchrone. Ces forces sont proportionnelles au carré de l'induction magnétique.

$$\sigma(\theta, t) = \frac{B_s^2(\theta, t)}{2\mu_0} \quad (I.9)$$

La distribution de l'induction magnétique dans l'entrefer est le produit de la force magnétomotrice F_{mm} et de la perméance (P).

$$\Psi_s = F_{mm} \cdot P \quad (I.10)$$

Les vibrations de la machine peuvent être captées par des accéléromètres placés sur les paliers selon les directions axiale, verticale et radiale. Les spectres des signaux de vibrations issus du moteur avec défaut sont comparés avec ceux de références enregistrées lorsque la machine était en bon état. Cette méthode permet la détection aussi bien des défauts électriques que mécaniques puisque la force magnétomotrice contient les effets des asymétries du stator ou du rotor et la perméance dépend de la variation de l'entrefer. Cependant, le coût des capteurs de vibration qui est relativement élevé, ainsi que les difficultés rencontrées dans la connexion de ces capteurs (problème d'accessibilité) représentent les limites et les inconvénients de cette méthode.

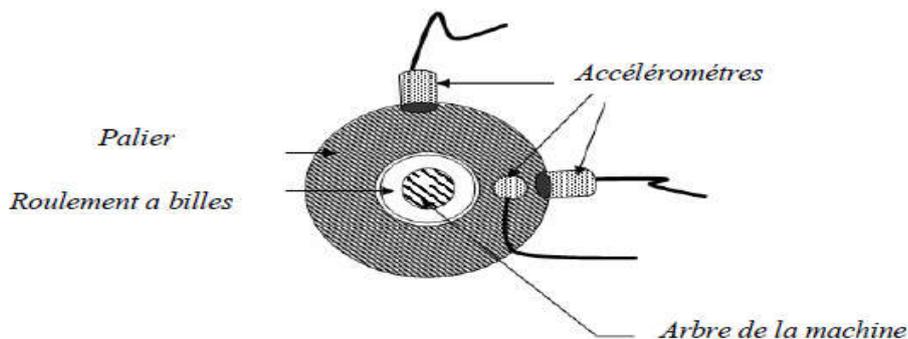


Fig.I.14: Mesures vibratoires sur la machine asynchrone.

Chapitre I : Etat de l'art sur le diagnostic des défauts de la MAS

I.7.1.2 Diagnostic par mesure du flux magnétique axial de fuite

Dans une machine idéale sans défauts, les courants et les tensions statorique sont équilibrés, ce qui annule le flux de fuite axial. La présence d'un défaut quelconque, provoque un déséquilibre électrique et magnétique au niveau du stator ce qui donne naissance à des flux de fuite axial de valeurs dépendantes du degré de sévérité du défaut. Si on place une bobine autour de l'arbre de la machine, elle sera le siège d'une force électromotrice induite. Le contenu spectral de la tension induite dans cette bobine, peut être exploité pour détecter les différents défauts [16].

I.7.1.3 Diagnostic par l'analyse des tensions statorique induites

Cette technique est basée sur l'exploitation du contenu fréquentiel de la tension induit par le flux rotorique dans les enroulements statorique pendant la déconnexion de la machine du réseau. En utilisant cette approche, les effets de non idéalité de la source (déséquilibres et présence des harmoniques) ainsi que le non linéarité des caractéristiques magnétiques de la machine peuvent être évitées [17]

I.7.1.4 Diagnostic par mesure du couple électromagnétique

Le couple électromagnétique développé dans la machine, provient de l'interaction entre les champs statorique et celui rotorique. Par conséquence, tout défaut, soit au niveau du stator ou au rotor, affecte directement le couple électromagnétique [18].

L'analyse spectrale du signale du couple (mesuré ou estimé), donne des informations sur l'état de santé de la machine [16].

I.7.1.5 Diagnostic par mesure de la puissance instantanée

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

L'utilisation de la puissance instantanée pour la détection des défauts dans la machine asynchrone a fait l'objet de nombreux travaux [19], [20].

I.7.1.6 Diagnostic par analyse du courant statorique

Parce qu'il est facilement accessible, et vue sa capacité de détecter aussi bien les défauts électromagnétiques que mécaniques, l'analyse du courant statorique occupe une place privilégiée dans le diagnostic par analyse des signaux. Cette technique est connue sous l'abréviation MCSA (Motor Current Signature Analysé). La MCSA était l'objet de plusieurs

Chapitre I : Etat de l'art sur le diagnostic des défauts de la MAS

travaux de recherche, elle consiste à affecter à chaque défaut une signature spectrale le caractérisant. Dans le même contexte, il a été démontré que la sévérité du défaut est fonction de l'amplitude des composantes fréquentielles qu'il génère, et notamment, des raies déjà présentes dans le moteur sain (harmoniques d'espace) [21].

I.7.1.7 Diagnostic par analyse du vecteur de Park

Deux versions d'analyse par cette méthode à savoir:

La première utilise les grandeurs biphasées ids et iqs, qui sont calculées à partir des trois courants d'alimentation, pour l'obtention de la courbe de lissajou: $i_q = f(i_d)$. Le changement de l'épaisseur et de la forme de cette courbe donne une information sur le défaut [16].

La deuxième est appelée Vecteur de Park Etendu, qui est basée sur l'analyse spectrale du module du vecteur de Park $\left(\sqrt{i_d^2(t) + i_q^2(t)}\right)$. Elle présente beaucoup d'avantages quant à la détection des défauts statoriques ou rotoriques et même les défauts de roulement [16].

I.7.1.8 Diagnostic par utilisation des techniques d'intelligence artificielle

En dépit des diverses techniques mentionnées précédemment, ces dernières années, la surveillance et la détection de défaut des machines électriques se sont éloignées des techniques traditionnelles pour s'orienter vers des techniques dites d'intelligence artificielle (IA). Ces méthodes sont basées sur la connaissance a priori du système et utilisent un ensemble de règles et de faits (données manipulées par les règles) qui constituent ce qu'on appelle la base de connaissance. Parmi ces méthodes, on peut citer [09]:

- ❖ logique floue,
- ❖ réseaux neuronaux,
- ❖ reconnaissance des formes.

I.7.2 Technique de traitement de signal utilisées dans le diagnostic

I.7.2.1 Transformée de Fourier rapide (FFT)

Considérons le signal $X(t)$ à temps continu. Si X est à énergie finie, sa transformée de Fourier à la fréquence f est la suivante [22] :

$$X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)e^{-2\pi ft} dt \quad (\text{I.11})$$

Son inverse est donnée par:

Chapitre I : Etat de l'art sur le diagnostic des défauts de la MAS

$$x(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} X(f) e^{-2\pi f t} df \quad (I.12)$$

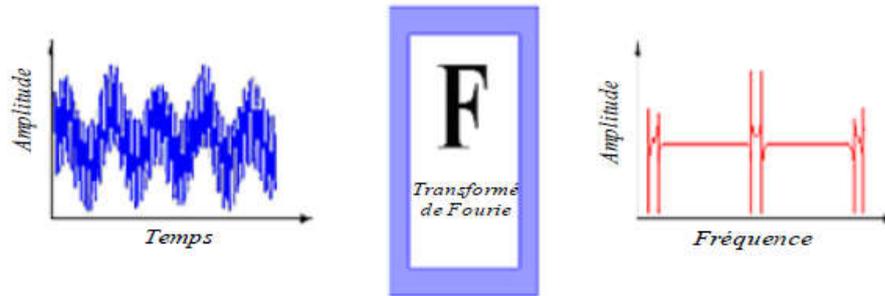


Fig.I.15 : Représentation temporelle vers fréquentielle

Sa transformée de Fourier discrète de N points avec une période d'échantillonnage T est donnée par:

$$x\left(\frac{f}{NT}\right) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{k=N-1} x(kT) e^{-\frac{2\pi f k T}{NT}} \quad (I.13)$$

et sa relation inverse est donnée par :

$$x(kT) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{k=N-1} x\left(\frac{f}{NT}\right) e^{-j\frac{2\pi f k T}{NT}} \quad (I.14)$$

La transformée de Fourier rapide (FFT) est un algorithme de calcul rapide de la transformée de Fourier discrète. L'algorithme de base de cette transformée utilise un nombre de points N égal à une puissance de 2, ce qui permet d'obtenir un gain en temps de calcul, par rapport à un calcul avec la transformée de Fourier discrète, de $\frac{N}{\log_2(N)}$.

Cette transformation fait clairement ressortir le contenu fréquentiel du signal $x(t)$. En effet, la FFT décompose le signal $x(t)$ sur une base de vecteurs propres sinusoïdaux $\{e^{2\pi f k T}\}_{f \in R}$. Malheureusement, ceci convient pour des signaux stationnaires dont les propriétés statistiques sont invariantes dans le temps. Cependant, en pratique la grande majorité des signaux rencontrés sont non stationnaires et la notion de décomposition sur une somme infinie d'exponentielles complexes propres à la FFT s'avère inadéquate.

Chapitre I : Etat de l'art sur le diagnostic des défauts de la MAS

I.8 Conclusion

Ce chapitre a eu pour objectif d'introduire les différents concepts relatifs au diagnostic des défauts et de présenter les différentes méthodes proposées dans ce domaine. Bien qu'il existe dans la littérature plusieurs méthodes, Dans cette mémoire nous avons consacré notre étude sur l'analyse spectrale car elle semblerait être la méthode la plus fiable et la plus simple à mettre en œuvre.

Nous avons également fait état des différents défauts auxquels les machines sont exposées avec une description de leurs causes de genèses et de leurs impacts sur les performances des machines.

Au niveau de quelques travaux, le point a été mis sur la nécessité d'avoir un modèle optimal afin de pouvoir diagnostiquer au mieux la machine. La modélisation de cette dernière est donc un enjeu de taille. Ce sujet fera l'intérêt du prochain chapitre.

CHAPITRE II :
MODELISATION DU MOTEUR
ASYNCHRONE

II.1 Introduction

Tant dans le domaine du diagnostic que dans celui de la commande des machines électriques, il est intéressant de disposer de modèles capables de représenter le comportement du système en présence de déséquilibres structurels. La mise au point d'une procédure de diagnostic à base de modèle analytique pour la machine asynchrone recouvre un certain nombre de problèmes qui doivent être résolus. L'un de ces problèmes est le problème de la synthèse de modèles décrivant le comportement de la machine.

Ceci non pas d'une façon moyenne comme pour la commande, mais d'une façon plus exacte en intégrant certains paramètres pour décrire le plus précisément possible le comportement de la machine.

Pour cela il fallut s'orienter vers des modèles plus sophistiqués (modèles de type circuit, modèle multi enroulements) pour une description adaptée aux défauts, que ce soit pour une simulation plus réaliste ou pour une utilisation dans la méthode de détection [23].

II.2 Modèle multi-enroulements

L'objectif est avant tout de posséder un modèle de la machine asynchrone qui met en évidence l'influence des défauts étudiés sur les grandeurs mesurables de la machine, principalement les courants, afin d'étudier les phénomènes mise en jeu, deux approches sont possibles, la première s'appuie sur la distribution des champs et des courants en tout point de la machine, et permet de simuler son fonctionnement en régime de défaut, cette méthode coûteuse en temps de calcul, et nécessite la connaissance des paramètres géométriques et des caractéristiques des matériaux relatifs au moteur asynchrone, la seconde approche consiste à modéliser le rotor de la machine par des mailles reliées entre elles électriquement et couplées magnétiquement, c'est à cette dernière que nous nous sommes intéressés afin de disposer d'une modèle mathématique où les paramètres mesurables apparaissent explicitement et ne nécessitent pas d'outils de calcul complexes[23]. On introduit dans notre étude le modèle de la machine asynchrone où on considère le stator a des constitutions symétrique pour permettre d'avoir une force magnétomotrice sinusoïdale dans l'entrefer et le rotor à une structure, telle que représentée en figure(II.2).

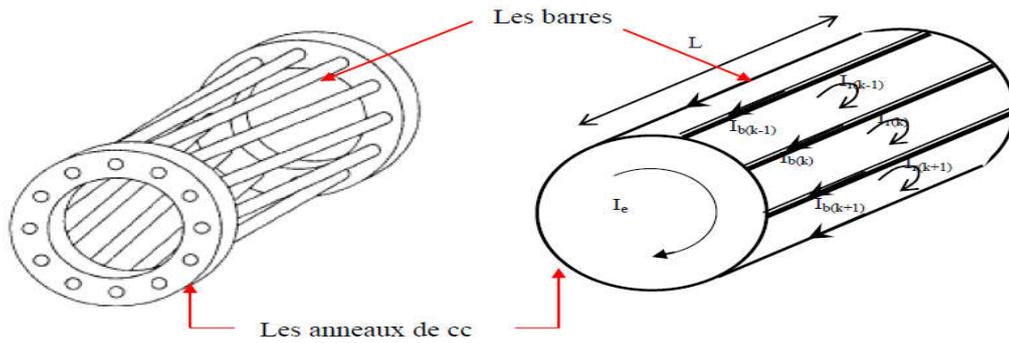


Figure.II.1 : Structure multi-enroulements du rotor.

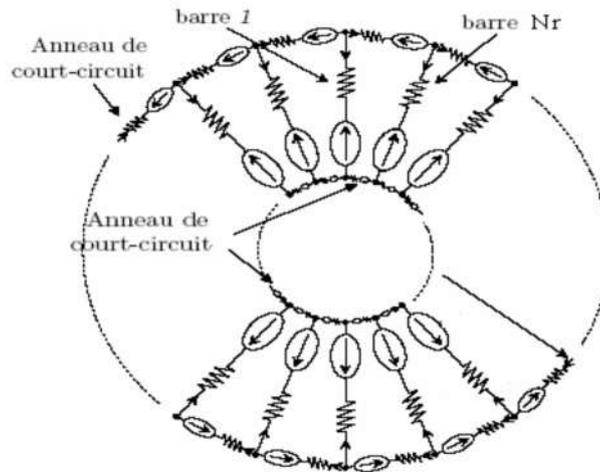


Figure.II.2 : Circuit équivalent du rotor à cage d'écureuil.

II.2.1 Equations des tensions

La figure II.3 montre le circuit électrique équivalent d'une maille rotorique, là où les barres rotoriques et les portions d'anneaux de court-circuit sont représentées par leurs résistances et inductances de fuite correspondantes.

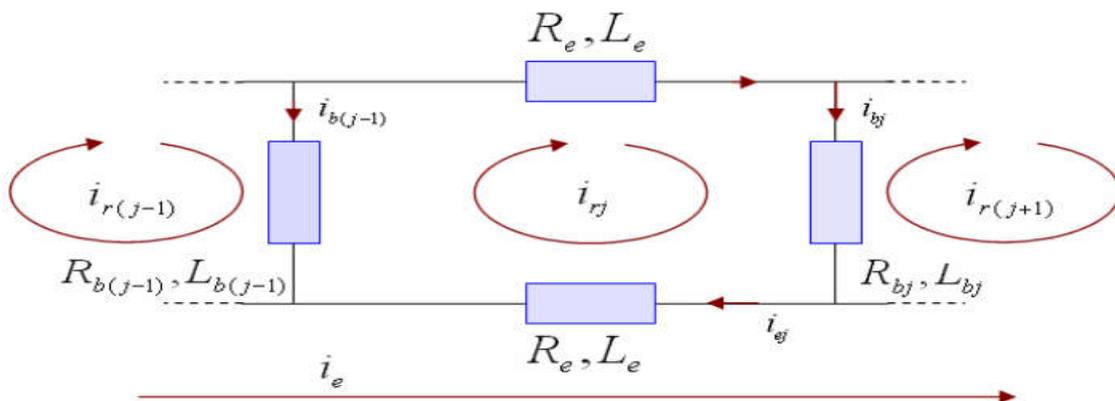


Figure.II.3 : Circuit électrique équivalent de la cage rotorique.

En faisant référence à la figure II.2, les équations des tensions des trois phases statoriques et des $(N_b + 1)$ mailles rotoriques seront :

$$[V_s] = [R_s][I_s] + \frac{d[\psi_s]}{dt} \quad (II.1)$$

$$[V_r] = [R_r][I_r] + \frac{d[\psi_r]}{dt} \quad (II.2)$$

Où $[\psi_s]$ et $[\psi_r]$ représentent les vecteurs regroupant les flux totaux à travers les enroulements statoriques et rotoriques respectivement. $[I_s]$ et $[I_r]$ sont les courants correspondants :

$$[\psi_s] = [L_{ss}][I_s] + [L_{sr}][I_r] \quad (II.3)$$

$$[\psi_r] = [L_{rs}][I_s] + [L_{rr}][I_r] \quad (II.4)$$

$$[V_s] = [V_{sA} \quad V_{sB} \quad V_{sC}] \quad (II.5)$$

$$[V_r] = [V_{r1} V_{r2} \dots V_{rNb} V_{re}]^T \quad (II.6)$$

$$[I_s] = [i_{sA} \quad i_{sB} \quad i_{sC}]^T \quad (II.7)$$

$$[I_r] = [i_{r1} i_{r2} \dots i_{rNb} i_{re}]^T \quad (II.8)$$

Tel que i_{rj} et i_{re} sont respectivement les courants de la $j^{\text{ème}}$ maille rotorique et de l'anneau de court-circuit. V_{rj} et V_{re} sont les tensions correspondants avec, pour un rotor à cage (mailles court-circuitées), $V_{re} = 0$ et $V_{rj} = 0$; $j = 1, 2, \dots, N_b$

Les matrices des résistances sont des matrices symétriques. $[R_s]$ est une matrice 3×3 , tandis que $[R_r]$ possède $(N_b + 1) \times (N_b + 1)$ éléments qu'on peut reconstituer à partir des lois relatives aux circuits électriques.

Soit dans ce cas:

$$[R_s] = r_s [I] \quad (II.9)$$

$$[R_r] = \begin{bmatrix} R_{r1} + R_{rN_b} + 2R_e & -R_{r1} & 0 & \cdots & -R_{rN_b} & \vdots & -R_e \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & -R_{r(j-1)} & R_{rj} + R_{r(j-1)} + 2R_e & -R_{rj} & 0 & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -R_{rN_b} & 0 & \cdots & \cdots & R_{r(N_b-1)} + R_{rN_b} + 2R_e & \vdots & -R_e \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ -R_e & \cdots & \cdots & \cdots & -R_e & \vdots & N_b R_e \end{bmatrix} \quad (II.10)$$

Avec : $[I]$ matrice identité, r_s la résistance d'une phase statorique, R_{rj} la résistance de la $j^{ème}$ barre rotorique et R_e la résistance d'un segment d'anneau de court-circuit.

Comme le montrent les expressions (II.11) et (II.12), les matrices des inductances statoriques et rotoriques sont des matrices 3×3 et $(N_b + 1) \times (N_b + 1)$ respectivement, exprimées en diagonale par les inductances propres de chaque enroulement, et dans le reste, par les inductances mutuelles entre enroulements (phases statoriques ou mailles rotoriques).

Les expressions détaillées des éléments de chaque matrice seront exposées par la suite.

$$[L_{ss}] = \begin{bmatrix} L_A & L_{AB} & L_{AC} \\ L_{BA} & L_B & L_{BC} \\ L_{CA} & L_{CB} & L_c \end{bmatrix} \quad (II.11)$$

$$[L_{rr}] = \begin{bmatrix} L_{mr} + 2(L_b + L_e) & L_{r1r2} - L_b & \cdots & L_{r1r(N_b-1)} & L_{r1rN_b} - L_b & \vdots & -L_e \\ L_{r2r1} - L_b & L_{mr} + 2(L_b + L_e) & \cdots & L_{r2r(N_b-1)} & L_{r2rN_b} & \vdots & -L_e \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ L_{r(N_b-1)r1} & L_{r(N_b-1)r2} & \cdots & L_{mr} + 2(L_b + L_e) & L_{r(N_b-1)rN_b} - L_b & \vdots & -L_e \\ L_{rN_b r1} - L_b & L_{rN_b r2} & \cdots & L_{rN_b r(N_b-1)} - L_b & L_{mr} + 2(L_b + L_e) & \vdots & -L_e \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ -L_e & -L_e & -L_e & -L_e & -L_e & \vdots & N_b L_e \end{bmatrix} \quad (II.12)$$

Quant à $[L_{sr}]$, elle comporte $3 \times (N_b + 1)$ éléments qui constituent les inductances mutuelles entre les phases statoriques et les mailles rotoriques. Et elle est donnée par :

$$[L_{sr}] = \begin{bmatrix} L_{Ar1} & L_{Ar2} & \cdots & L_{Ar(N_b-1)} & L_{ArN_b} & 0 \\ L_{Br1} & L_{Br2} & \cdots & L_{Br(N_b-1)} & L_{BrN_b} & 0 \\ L_{Cr1} & L_{Cr2} & \cdots & L_{Cr(N_b-1)} & L_{CrN_b} & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{II.13})$$

Là où L_{Arj} représente l'inductance mutuelle entre la phase statorique A et la $j^{\text{ème}}$ maille rotorique. Pour ce qui est de $[L_{rs}]$, elle est une matrice $(N_b + 1) \times 3$ qu'on obtient de la même façon en posant à la place des L_{Arj} les inductances mutuelles L_{rjA} . De même pour les phases B et C. L'inductance mutuelle entre chaque phase statorique et l'anneau de court-circuit est négligée du fait qu'ils peuvent être assimilés à des bobines à axes perpendiculaires.

En regroupant les équations (II.1) et (II.2) dans une même équation matricielle, nous aboutissons à :

$$[V] = [R][I] + \frac{d([L][I])}{dt} \quad (\text{II.14})$$

ce qui donne :

$$[V] = [R][I] + [I] \frac{d\theta_r}{dt} \cdot \frac{d[L]}{d\theta_r} + [L] \frac{d[I]}{dt} \quad (\text{II.15})$$

$$[V] = [R][I] + [I] \Omega_r \cdot \frac{d[L]}{d\theta_r} + [L] \frac{d[I]}{dt} \quad (\text{II.16})$$

tel que :

$$[V] = \begin{bmatrix} [V_s] \\ [V_r] \end{bmatrix}, \quad [I] = \begin{bmatrix} [I_s] \\ [I_r] \end{bmatrix} \quad (\text{II.17})$$

$$[R] = \begin{bmatrix} [R_s] & 0 \\ 0 & [R_r] \end{bmatrix}, \quad (\text{II.18})$$

$$[L] = \begin{bmatrix} [L_{ss}] & [L_{sr}] \\ [L_{rs}] & [L_{rr}] \end{bmatrix}, \quad (\text{II.19})$$

$$\Omega_r = \frac{d\theta_r}{dt}, \quad (\text{II.20})$$

θ_r est la position angulaire du rotor mesurée par rapport à une référence de phase fixe par rapport au stator, elle est appelée aussi angle mécanique. Tandis que Ω_r représente la vitesse mécanique de l'arbre de la machine.

II.2.2 Equations mécanique

Selon l'application à laquelle est désigné le moteur, il est possible de définir l'équation mécanique du mouvement associé.

$$J_T \cdot \frac{d\Omega_r}{dt} + f_v \Omega_r = C_e - C_r, \quad (\text{II.21})$$

C_e est le couple électromagnétique, C_r le couple résistant, f_v le coefficient de frottement visqueux et J_T le moment d'inertie total des parties tournantes.

Pour un circuit magnétique linéaire, la co-énergie est égale à l'énergie emmagasinée.

De ce fait vient :

$$C_e = \left[\frac{\partial W_{co}}{\partial \theta_r} \right]_{(I_s, I_r \text{ const})}, \quad (\text{II.22})$$

Avec :

$$W_{co} = \frac{1}{2} \cdot [I]^T \cdot [L] \cdot [I] \quad (\text{II.23})$$

ce qui donne finalement l'expression du couple électromagnétique

$$C_e = \frac{1}{2} \cdot [I]^T \cdot \frac{d[L]}{d\theta_r} \cdot [I] \quad (\text{II.24})$$

Si $[L_{ss}]$ et $[L_{rr}]$ sont constantes, et $[L_{rr}] = [L_{rs}]$, on obtient l'équation suivante du couple

$$C_e = \frac{1}{2} \cdot [I_s]^T \cdot \frac{d[L_{sr}]}{d\theta_r} \cdot [I_r] \quad (\text{II.25})$$

II.2.3 Système d'équations global

Nous pouvons regrouper ces équations dans une représentation matricielle unique pour aboutir à [24]:

$$\begin{bmatrix} [V] \\ -C_r \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left([R] + \Omega_r \frac{d[L]}{d\theta_r} \right) & 0 & 0 \\ -\frac{1}{2} [I]^T \frac{d[L]}{d\theta_r} & f_v & 0 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [I] \\ \Omega_r \\ \theta_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} [L] & 0 & 0 \\ 0 & J_T & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I} \\ \dot{\Omega}_r \\ \dot{\theta}_r \end{bmatrix}, \quad (\text{II.26})$$

et une forme condensée :

$$[U] = [B][X] + [A] \begin{bmatrix} \dot{X} \end{bmatrix} \quad (\text{II.27})$$

où le vecteur $\begin{bmatrix} \dot{X} \end{bmatrix}$ peut être écrit comme suit :

$$\begin{bmatrix} \dot{X} \end{bmatrix} = [A]^{-1} \cdot [U] - [A]^{-1} \cdot [B][X] \quad (\text{II.28})$$

Nous faisons, ainsi, apparaître le vecteur d'état $[X]$ et le vecteur $[U]$ contenant les grandeurs externes à la machine tel que :

$$[U] = \begin{bmatrix} [V] \\ -C_r \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\text{II.29})$$

$$[X] = \begin{bmatrix} [I] \\ \Omega_r \\ \theta_r \end{bmatrix} \quad (\text{II.30})$$

Avec la définition des matrices A et B donnée par:

$$[A] = \begin{bmatrix} \left([R] + \Omega_r \frac{d[L]}{d\theta_r} \right) & 0 & 0 \\ -\frac{1}{2} [I]^T \frac{d[L]}{d\theta_r} & f_v & 0 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{II.31})$$

$$[B] = \begin{bmatrix} [L] & 0 & 0 \\ 0 & J_T & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{II.32})$$

On se retrouve ainsi face à un système d'équations différentielles régissant le fonctionnement de la machine. Pour parvenir à la solution, une méthode numérique doit être

mise en œuvre, la méthode explicite de Runge Kutta s'avère la plus utilisée dans ces cas. Bien avant ça, nous devons définir les matrices A et B de manière à traduire l'état interne de la machine, à savoir, état sain ou état de défaut.

II.3 Calcule des Inductances : Cas générale

a) Inductances statoriques

En premier temps, on suppose que les enroulements statoriques sont idéalement distribués autour du périphérique de l'entrefer de sorte que l'induction résultante puisse être supposée sinusoïdale. Dans ce cas, l'expression de la FMM de la première phase statorique A sera [25]:

$$F_A(\varphi) = \frac{2N_s}{\pi \cdot p} \cdot i_A \cos(p\varphi), \quad (\text{II.33})$$

N_s est le nombre total des tours de chaque phase, p le nombre de paires de pôles, φ un angle décrivant une position particulière dans l'espace ; cet angle est mesuré par rapport à une référence fixe par rapport au stator, i_A et le courant traversant la phase A . La densité du flux radial créée dans l'entrefer tiendra l'expression:

$$B_A(\varphi) = \frac{2\mu_0 N_s}{\pi g_0 p} \cdot i_A \cos(p\varphi), \quad (\text{II.34})$$

Où μ_0 désigne la perméabilité magnétique de l'air, et g_0 l'épaisseur de l'entrefer de la machine symétrique (entrefer constant).

Sachant que :

$$d\phi = B_A d_s \quad (\text{II.35})$$

Par intégration de l'expression (II.35) autour d'un intervalle polaire, nous obtenons l'expression du flux magnétique dans l'entrefer par pôle tel que :

$$\phi = \int_0^1 dz \int_{-\frac{\pi}{2p}}^{\frac{\pi}{2p}} B_A(\varphi) r d\varphi, \quad (\text{II.36})$$

Etant donné que l'entrefer de la machine est supposé uniforme, et qu'on néglige toute asymétrie axiale, l'expression (II.36) se réduit à:

$$\phi = \frac{4\mu_0 N_s r l}{\pi \cdot g_0 \cdot p^2} \cdot i_A, \quad (\text{II.37})$$

Où r désigne le rayant moyen de l'entrefer de la machine symétrique, et l la longueur effective de la machine.

Le flux total traversant l'enroulement de la phase A dû au courant est donné par.

$$\psi_A = \phi \cdot N_s = \frac{4\mu_0 N_s^2 r l}{\pi \cdot g_0 \cdot p^2} \cdot i_A, \quad (\text{II.38})$$

L'inductance de magnétisation et le flux par unité de courant. Par conséquent, elle est égale à :

$$L_{Am} = \frac{\psi_A}{i_A} = \frac{4\mu_0 N_s^2 r l}{\pi \cdot g_0 \cdot p^2}, \quad (\text{II.39})$$

L'inductance totale dans la phase A est égale à la somme de l'inductance de magnétisation et l'inductance de fuite correspondant au flux de fuite d'encoches, au flux de fuite des têtes de bobines...etc. Son expression est :

$$L_A = L_{Am} + L_{fA} \quad (\text{II.40})$$

Les enroulements statoriques étant identiques et symétriques, ce qui fait que :

$$L_A = L_B = L_c \quad (\text{II.41})$$

Et du fait qu'ils sont décalés de $2\pi/3$, les inductances mutuelles entre enroulements statoriques auront pour valeurs :

$$\begin{aligned} L_{AB} = L_{BA} &= L_{Am} \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) = \frac{-L_{Am}}{2} \\ L_{BC} = L_{CB} &= L_{Am} \cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) = \frac{-L_{Am}}{2} \\ L_{AC} = L_{CA} &= L_{Am} \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) = \frac{-L_{Am}}{2} \end{aligned} \quad (\text{II.42})$$

b) Inductances rotoriques

En définissant les flux rotoriques qui entrent en jeux, et en faisant référence à la représentation équivalente du rotor, il sera possible de donner l'expression des différentes inductances.

La figure II.4 représente, en fonction de l'ouverture angulaire φ' dans un référentiel lié au rotor, l'allure de l'induction magnétique dans l'entrefer, supposée radiale, produite par une maille rotorique. Cela en admettant que les barres rotoriques sont identiques, régulièrement décalées et séparées l'une de l'autre par un angle $a_r = 2\pi / N_b$ (rad).

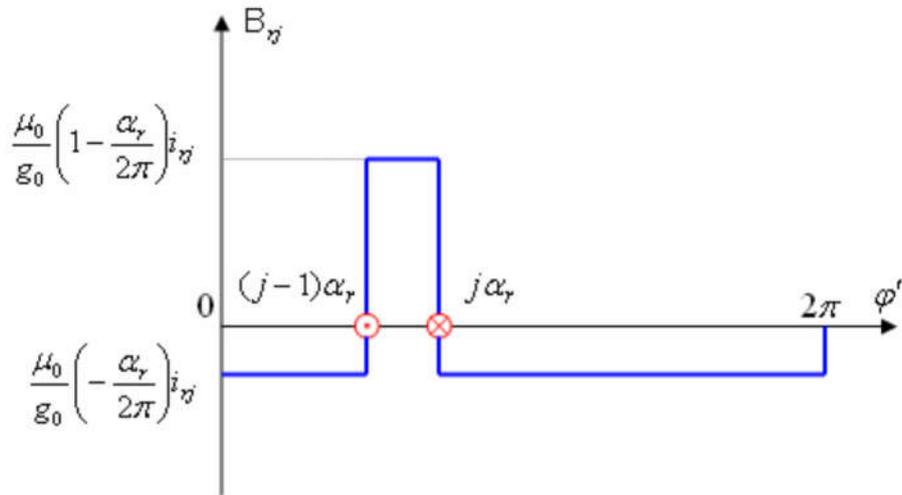


Figure.II.4 : Champ produit par une maille rotorique.

Chaque maille rotorique est considérée comme étant une bobine à une spire parcourue par un courant i_{rj} , et qui sera le siège d'un flux propre ψ_{rjrj} tel que :

$$\psi_{rjrj} = \int_0^1 dz \int_{(j-1)a_r}^{ja_r} \frac{\mu_0 r}{g_0} \left(1 - \frac{a_r}{2\pi}\right) i_{rj} d\varphi', \tag{II.43}$$

Il en résulte que:

$$\psi_{rjrj} = \frac{\mu_0 r l}{g_0} \left(1 - \frac{a_r}{2\pi}\right) a_r \cdot i_{rj}, \tag{II.44}$$

Par conséquent, l'inductance de magnétisation est égale à :

$$L_{mrj} = \frac{\psi_{rjrj}}{i_{rj}} = \frac{2\pi\mu_0 (N_b - 1) r l}{g_0 \cdot N^2}, \tag{II.45}$$

L'inductance totale de la $j^{\text{ème}}$ maille rotorique s'obtient par la sommation de l'inductance de magnétisation de cette maille et les inductances de fuite des deux barres et des deux portions d'anneau de court-circuit formant la maille. Son expression sera :

$$L_{rj} = L_{mrj} + L_{bj} + L_{b(j+1)} + 2L_e = L_{mrj} + 2(L_b + L_e), \quad (\text{II.46})$$

Les mailles rotoriques sont magnétiquement couplées par l'intermédiaire du flux rotorique d'entrefer. Le flux traversant la $k^{\text{ème}}$ maille rotorique, produit par le courant i_r circulant $j^{\text{ème}}$ dans la maille rotorique est donné par :

$$\psi_{rjrk} = \int_0^1 dz \int_{(k-1)a_r}^{ka_r} \frac{\mu_0 r}{g_0} \left(\frac{-a_r}{2\pi} \right) i_{rj} d\phi', \quad (\text{II.47})$$

avec $k \neq j$, d'où :

$$\psi_{rjrk} = \frac{\mu_0 r l}{g_0} \left(\frac{-a_r}{2\pi} \right) a_r \cdot i_{rj}, \quad (\text{II.48})$$

De ce fait, l'expression de L_{rkrj} sera donnée par :

$$L_{rkrj} = \frac{\psi_{rkrj}}{i_{rj}},$$

Tenant compte des inductances de fuites, il est possible de déduire les expressions des inductances mutuelles entre la $j^{\text{ème}}$ maille et les autres mailles du circuit rotorique.

$$L_{r(j+1)j} = \frac{\psi_{r(j+1)rj}}{i_{rj}} - L_{b(j+1)} = \frac{-2\pi\mu_0 r l}{g_0 \cdot N_b^2} - L_b, \quad (\text{II.49})$$

$$L_{r(j-1)j} = \frac{\psi_{r(j-1)rj}}{i_{rj}} - L_{bj} = \frac{-2\pi\mu_0 r l}{g_0 \cdot N_b^2} - L_b, \quad (\text{II.50})$$

Et pour les mailles non adjacentes on obtient:

$$L_{rkrj} = \frac{\psi_{rkrj}}{i_{rj}} = \frac{-2\pi\mu_0 r l}{g_0 \cdot N_b^2}, \quad (\text{II.51})$$

c) Inductances mutuelles entre enroulements statoriques et rotoriques

Sachant que :

$$\varphi = \varphi' + \theta_r = \varphi' + \Omega_r t, \quad (\text{II.52})$$

Le champ magnétique dans l'entrefer dû au courant i_A s'écrit en fonction de φ' de la manière suivante:

$$B_A(\varphi') = \frac{2\mu_0 N_s}{\pi \cdot g_0 \cdot p} \cdot i_A \cos[p(\varphi' + \Omega_r t)], \quad (\text{II.53})$$

Le flux parcourant la maille r_j sera :

$$\psi_{rjA} = \int_0^1 dz \int_{(j-1)a}^{ja} B_A(\varphi') r d\varphi', \quad (\text{II.54})$$

Et tenant compte de (II.53), il résulte:

$$\psi_{rjA} = M \cdot i_A \cos \left[p \left(\frac{(2j-1)\pi}{N_b} + \Omega_r t \right) \right] \quad (\text{II.55})$$

Avec :

$$M = \frac{4\mu_0 N_s r l}{\pi \cdot g_0 \cdot p^2} \sin \left(\frac{\pi \cdot p}{N_b} \right), \quad (\text{II.56})$$

Les inductances mutuelles entre la $j^{\text{ème}}$ maille rotorique et les phases statoriques seront données par :

$$L_{rjA} = \frac{\psi_{rjA}}{i_A} = M \cos \left[p \left(\frac{(2j-1)\pi}{N_b} + \Omega_r t \right) \right] \quad (\text{II.57})$$

$$L_{rjB} = \frac{\psi_{rjB}}{i_B} = M \cos \left[p \left(\frac{(2j-1)\pi}{N_b} + \Omega_r t \right) - \frac{2\pi}{3} \right] \quad (\text{II.58})$$

$$L_{rjC} = \frac{\psi_{rjC}}{i_C} = M \cos \left[p \left(\frac{(2j-1)\pi}{N_b} + \Omega_r t \right) - \frac{4\pi}{3} \right] \quad (\text{II.59})$$

II.4 Conclusion :

Nous avons présenté dans ce chapitre la modélisation et le calcul relativement précis des inductances. Ce que nous avons vu dans ce chapitre constitue ce qu'il y a d'essentiel pour nous permettre d'effectuer l'étude à venir.

Dans le chapitre prochain nous présenterons les résultats des simulations pour les cas suivants :

- ❖ Etude a l'état sain
- ❖ Etude avec déséquilibre de tension
- ❖ Etude avec des barres cassées
- ❖ MAS alimenté par onduleur de tension

CHAPITRE III :
SIMULATION DU MODELE DE LA
MACHINE ASYNCHRONE

Chapitre III : Simulation du modèle de la machine asynchrone

III.1.Introduction :

Dans ce chapitre, on considère la simulation du modèle multi-enroulements, permettant de représenter les différentes courbes du courant statorique, du courant dans les barres rotoriques, du couple et de la vitesse. La simulation est effectuée dans différentes conditions de fonctionnement : la machine à l'état sain et avec défaut. Ensuite, on présente une analyse détaillée des différents défauts rotoriques et statoriques. Cette analyse a pour objectif d'analyser les phénomènes observés sur les grandeurs électriques et mécaniques du moteur, tels que les oscillations du couple et de la vitesse, ainsi que la modulation de l'enveloppe du courant statorique.

III.2 Simulation du modèle de la machine asynchrone :

Une fois le modèle de la machine asynchrone à cage établi, nous pouvons aborder l'aspect lié à la simulation de celle-ci en utilisant MATLAB-SIMILINK. Cela permet de mettre en évidence la performance de la machine asynchrone dans le cas sain et dans le cas d'un défaut.

Pour observer la performance de ce modèle simulé, on exécute le programme pour un mode opératoire sous un couple résistant de 1.5 N.m et ($t_f=10$ s).

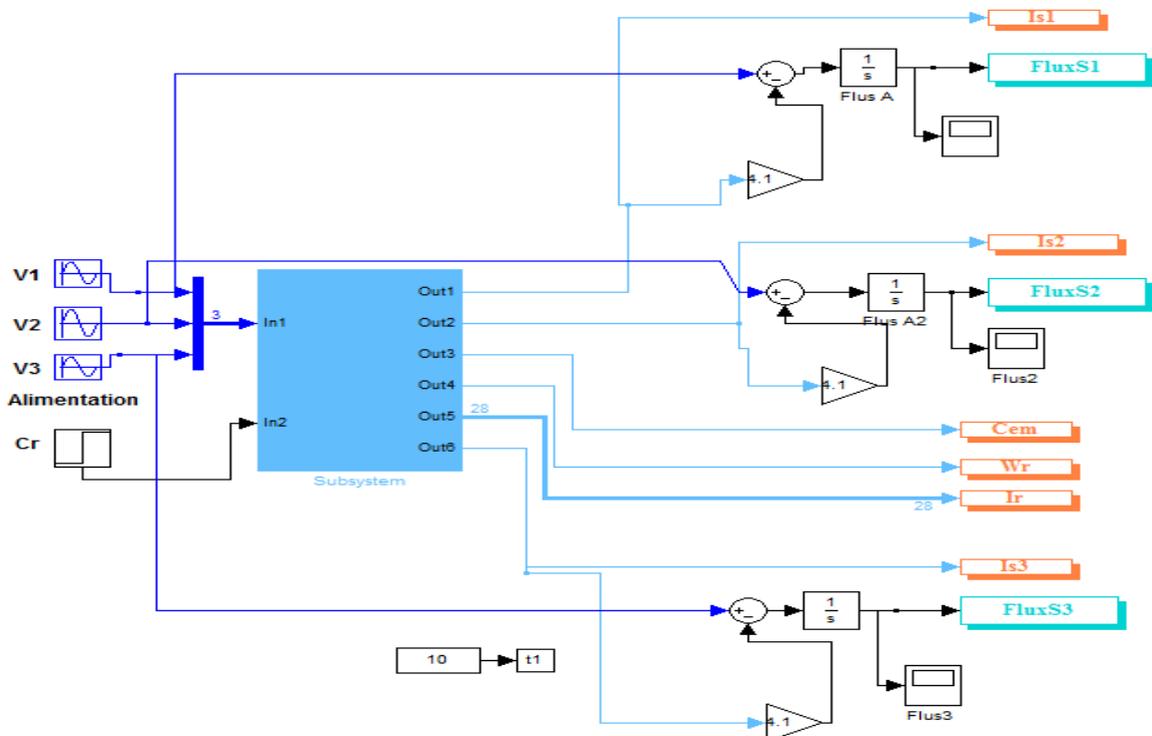


Figure.III.1 : Schéma de simulation du modèle de la machine asynchrone à cage

Chapitre III : Simulation du modèle de la machine asynchrone

III.2.1 Simulation de la machine avec l'état sain :

III.2.1.1 L'évolution des courants statorique :

Dans la fig.III.2 du courant statorique on remarque, le courant de démarrage atteint presque la valeur 5 fois le courant nominal, après le régime transitoire, le courant rotorique stabilise à la valeur correspondant

On remarque aussi que toutes les valeurs de module des courants statorique égales dans le régime permanent.

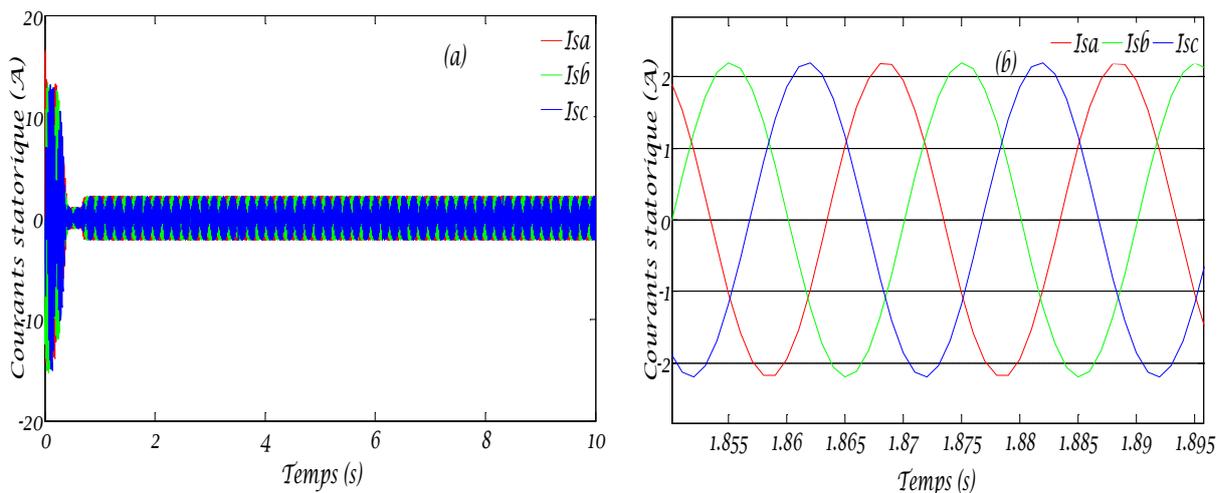


Fig.III.2: Les courants statorique (a), et son zoom on régime permanent(b).

(Machine en charge ($C_r=1.5$ N.m) –Etat sain)

A travers la figure (Fig.III.2), nous avons acquis ces valeurs :

$$\text{- Pour le déphasage : } \varphi = \frac{t}{T} \cdot 2\pi \Rightarrow \varphi = \frac{0.006666}{0.02} \cdot 360^\circ \Rightarrow \varphi = 120^\circ \quad (\text{III.1})$$

$$\text{- Pour la fréquence : } f_{st} = \frac{1}{T} \Rightarrow f_{st} = \frac{1}{0.02} \Rightarrow f_{st} = 50\text{Hz} \quad (\text{III.2})$$

- **Pour le module :** Il est la plus grande valeur du courant dans le régime permanente

$$I_{s \max} = 2.2(A)$$

III.2.1.2 L'évolution du la vitesse de la rotation :

L'allure de la courbe de la vitesse est similaire à celle d'un système du deuxième ordre. Lors de l'application d'une charge la vitesse diminue (Fig.III.3).

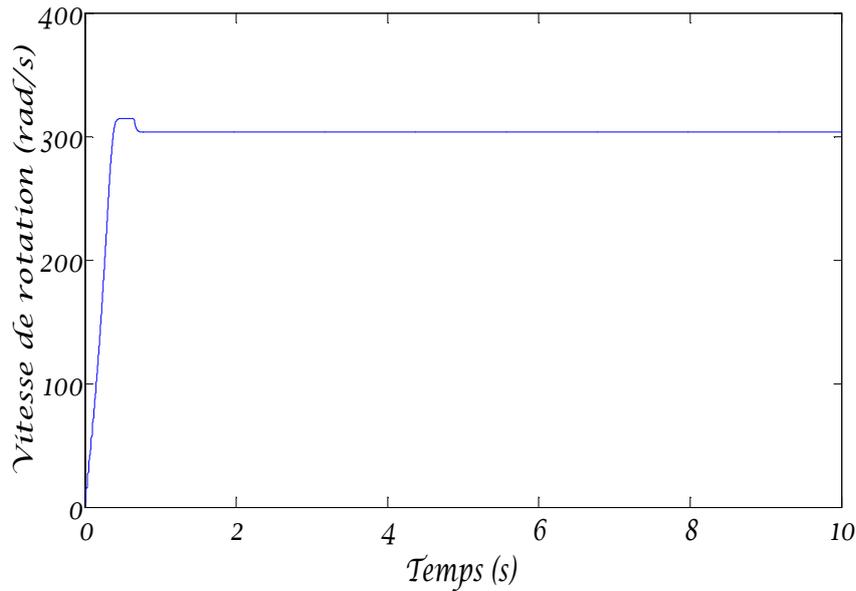


Fig.III.3: Vitesse de rotation de la machine : en charge $C_r=1.5N.m$ -(Etat sain)

A travers la figure (Fig.III.3), Nous trouvons la valeur de glissement :

$$g = \frac{N_s - N_r}{N_s} \Rightarrow g = 3.5\% \quad (III.3)$$

Avec :

$$N_s = \frac{f_{st} \cdot 60}{P} \Rightarrow \frac{50 \cdot 60}{1} \Rightarrow N_s = 3000 \text{tr} / s \quad (III.4)$$

$$N_r = \frac{\omega_r \cdot 60}{2\pi} \Rightarrow N_r = \frac{3000 \cdot 60}{3.14 \cdot 2} \Rightarrow N_r \approx 2895 \text{rad} / s \quad (III.5)$$

Où :

f_{st} : est la fréquence d'alimentation.

p : représente le nombre de paire de pôles ($p=1$)

N_r : Vitesse rotorique.

N_s : vitesse de synchronisme (vitesse du champ tournant).

III.2.1.3 L'évolution du couple électromagnétique :

Quant au couple électromagnétique, il est fortement pulsatoire, pendant le régime transitoire ce qui explique le bruit engendré par la partie mécanique (Fig.III.4).

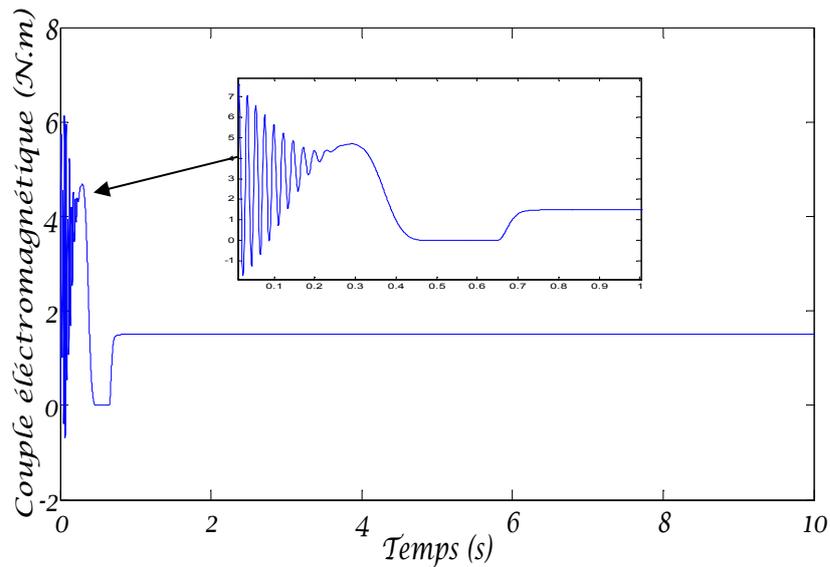


Fig.III.4: Couple électromagnétique de la machine : en charge $C_r=1.5\text{N.m}$ -Etat saine

III.2.1.4 L'évolution des courants rotorique :

Au démarrage de la machine les courants rotorique est presque 8 fois supérieur au courant nominal (Fig.III.5). Par-ce-que le rotor il est court-circuité, qui est due au besoin du moteur pour vaincre l'inertie du moteur et de la charge (courant de la force) .Après le régime transitoire, le courant rotorique stabilise à la valeur correspondant. Cela confirme qu'il est valeur acceptable.

On remarque aussi que toutes les valeurs du module des courants rotoriques sont égales au régime permanent (Ceci explique l'état de santé de l'appareil).

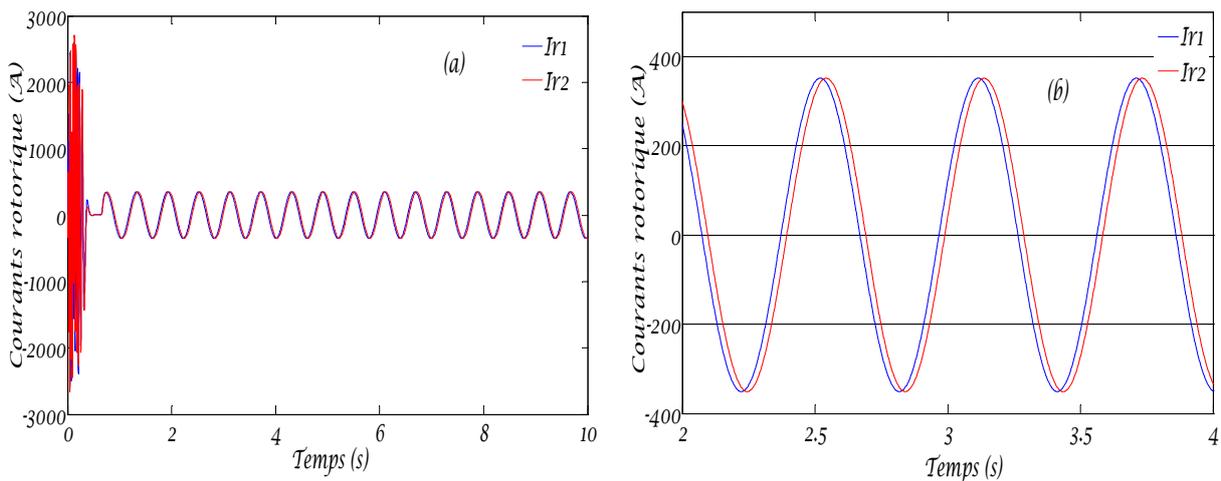


Fig.III.5: Courants de deux mailles rotorique (a) et le zoom dans le régime permanent (b).
(Machine en charge ($C_r=1.5\text{ N.m}$) –Etat sain)

Chapitre III : Simulation du modèle de la machine asynchrone

A travers la figure (Fig.III.5), nous avons acquis ces valeurs :

- **Pour le déphasage** : avec la même rotation (III.1), on trouve que $\varphi = 13.29^\circ$
- **Pour le module** : $I_{r_{\max}} = 342.5(A)$

III.2.1.5 L'évolution du flux statorique :

A travers la figure (fig.III.6), il est clair que toutes les valeurs de flux statorique sont égales.

Cette valeur a une forme sinusoïdale, Sa forme similaire à la forme de la source d'alimentation (tension).

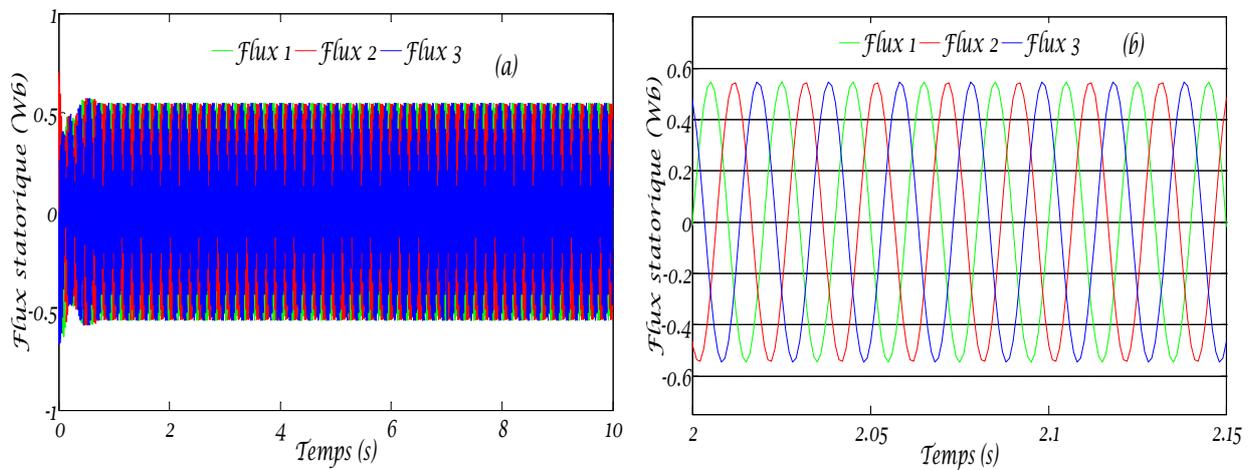


Fig.III.6: Flux totalisée statorique (a), et son zoom en régime permanent.

(Machine en charge ($C_r=1.5$ N.m) –Etat sain)

Pour confirmer que la valeur flux statorique est une grandeur physique réelle. Nous avons trouvé dans certaines publications, que la valeur de Flux magnétique est l'une des méthodes importantes de diagnostic. Cependant, la méthode utilisée dans notre travail consiste à estimer le flux à partir de grandeur mesurable (courants, tensions). On peut trouver dans la littérature dans méthode se basant sur la mesure directe de flux tel que :

- **Diagnostic par mesure du Flux magnétique axial de fuite [26] [27].**

Dans le cas idéal de fonctionnement, les courants et les tensions statoriques de la machine sont équilibrés. Mais lors d'un défaut quelconque, il entraîne un déséquilibre électrique et magnétique dans la partie statorique, ce qui provoque l'apparition des flux de fuite axial de valeurs liées au degré de sévérité du défaut. La (fig.III.7) spectacles comment analyser ce flux axial.



Fig.III.7 : Mesure du flux axial [27].

- **Diagnostic par mesure du Flux magnétique radial de fuite [28].**

La mesure du flux magnétique extérieur s'effectue à l'aide d'un capteur bobiné. Celui-ci est placé sur le côté de la machine, à égale distance des extrémités de la culasse et à une distance x de l'axe, comme indiqué sur la (Fig.III.8).

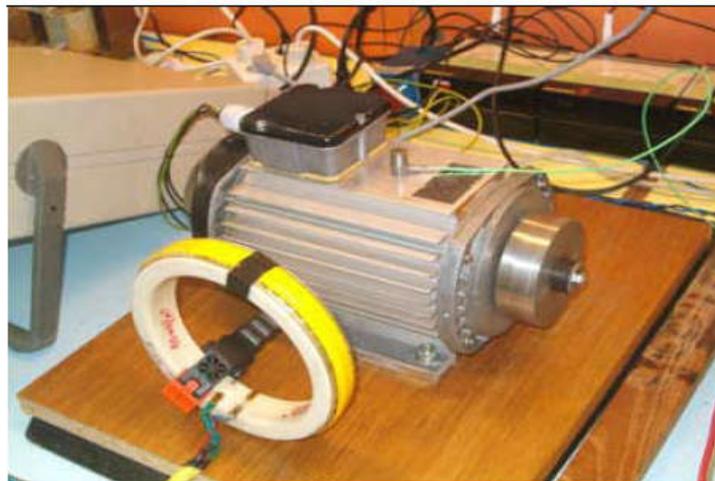


Fig.III.8 : Mesure du flux radial

III.2.1.6 L'évolution du courant neutre :

Comme nous voyons dans la fig(II.9), pour la valeur courant de neutre, dans le cas de moteur sain qu'ils sont considérés comme inexistantes (très faible).

Dégradés qui affectent toute la courbe, causée par les algorithmes du programme erreurs.

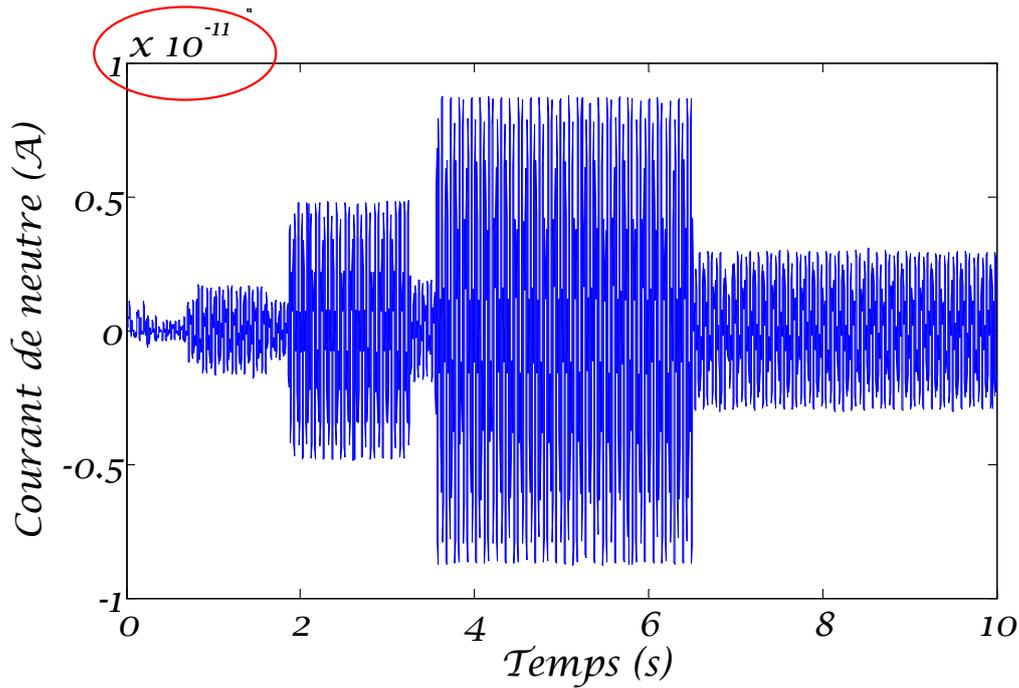
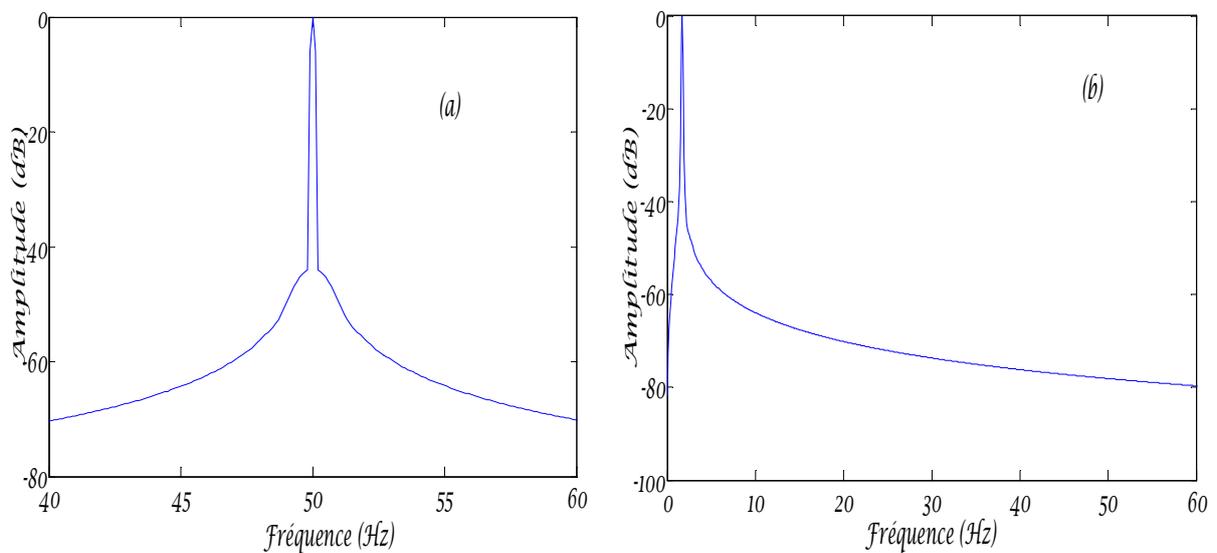


Fig.III.9 : Courant de neutre de la machine : en charge ($C_r=1.5N.m$)-Etat saine

Nous présentons sur la (fig.III.10.a et b), les spectres du courant statorique et rotorique, d'un moteur sain en charge nominale ($g = 3.5 \%$). C'est évident qu'on n'observe aucune raie latérale $(1 \pm 2k.g).f_s$ (les harmoniques de fréquence).

Nous remarquons aussi dans les (fig.III.10.c et d), le spectre de la vitesse ou du couple, manque d'apparence les harmoniques de fréquence $2k.g.f_s$ qui marquent évidemment la présence du défaut.



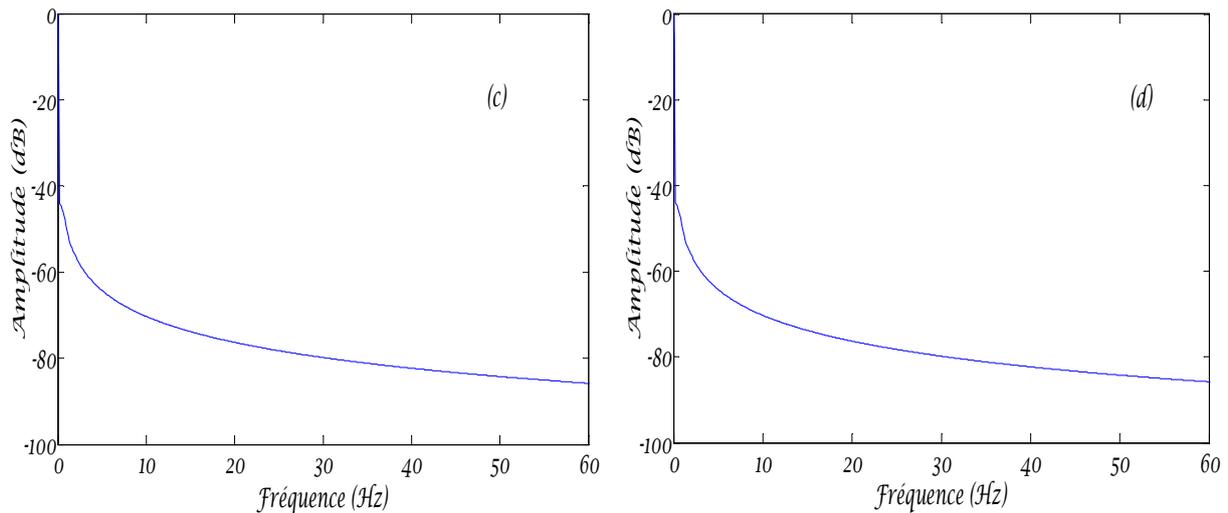


Fig.III.10: Spectre de courant statorique (a), Spectre de courant rotorique (b), Spectre de Couple électromagnétique (c), spectre de vitesse de rotation (d). (M en charge (Cr=1.5 N.m) –Etat sain)

III.2.2 Simulation de la machine avec déséquilibre de tension :

III.2.2.1 Définition :

Lorsque les trois signaux ne sont pas identiques en amplitude et ou ne sont pas décalées d'un angle de 120° les unes par rapport aux autres, on parlera de déséquilibre du système (voir figure III.2). La méthode des composantes symétriques est l'outil principal pour décrire le déséquilibre en tension et en courant dans les systèmes triphasés [29]

III.2.2.2 Effets de l'alimentation de déséquilibré de tension :

Le déséquilibre de tension conduit à un déséquilibre de courant à travers les équipements triphasés [30]. Comme les équipements qui sont particulièrement sujet au déséquilibre de tension (machines tournants, redresseurs triphasés) sont connectées en triangle, seulement la composante inverse qui affecte ces équipement, la composante homopolaire ne conduit pas à un changement du courant de charge.

Le déséquilibre d'une installation triphasée peut entraîner un dysfonctionnement des appareils bas tensions connectés :

- Mauvais fonctionnement d'un appareil alimenté par une tension très faible
- Destruction d'un appareil alimenté par une tension trop élevée

Les machines tournantes ont une impédance inverse faible par rapport à l'impédance directe, le courant additionnel résultant conduira à des pertes supplémentaires, donc

Chapitre III : Simulation du modèle de la machine asynchrone

échauffement supplémentaire des machines. Les composantes inverses créeront dans la machine un champ tournant en sens inverse du sens de rotation normal, d'où un couple de freinage parasite et des pertes supplémentaires qui provoquent aussi l'échauffement de ces machines [31].

III.2.2.3 Résultats de simulation d'un déséquilibre de tension :

III.2.2.3.1 L'évolution des courants statorique :

Les figure (III.11.a et b) montrer que lorsque les tensions de l'alimentation sont déséquilibrées, Il est logique de trouver les courants statorique seront déséquilibrés.

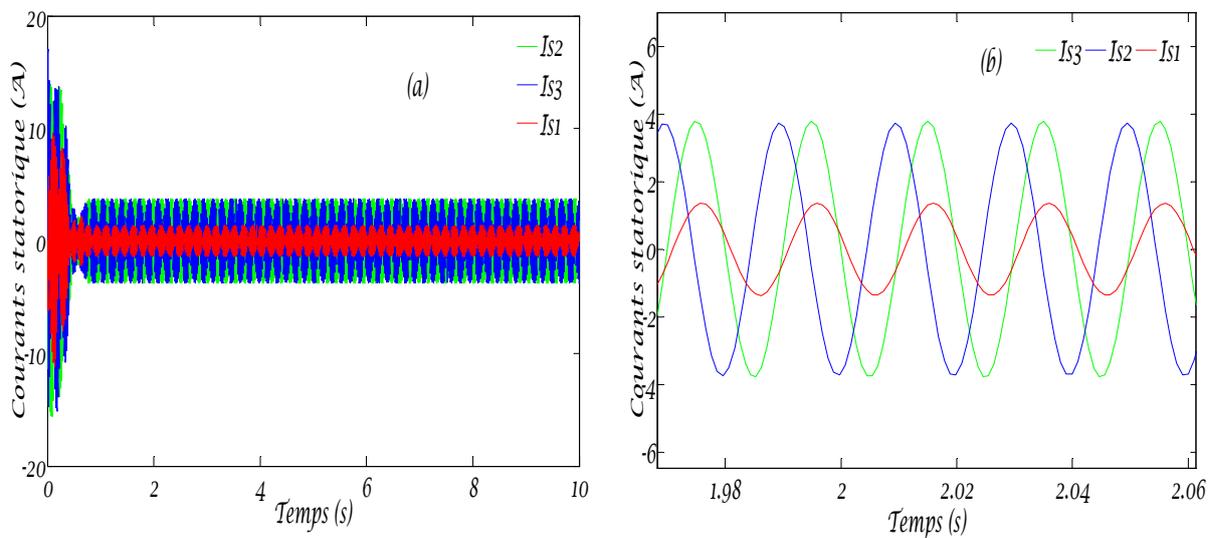


Fig.III.11: Les courants statorique (a), et son zoom on régime permanent(b).
(Avec une alimentation déséquilibrée)

Ce qui est montré dans les figures (II.12), complètement différent d'après ce que nous avons vu dans la figure (III.10), Là où nous voyons des oscillations dans le spectre de courant statorique

Lorsqu'une déséquilibre de l'alimentation de la machine on remarque l'apparition de raies latérale qui montrent la présence des harmoniques de fréquence $3.k.f_s$ sur le spectre du courant statorique de la machine fonctionnant à moyenne charge de 1.5N.m. comme 150(Hz) et 450(Hz) avec $K=1,3,5....$ ect.

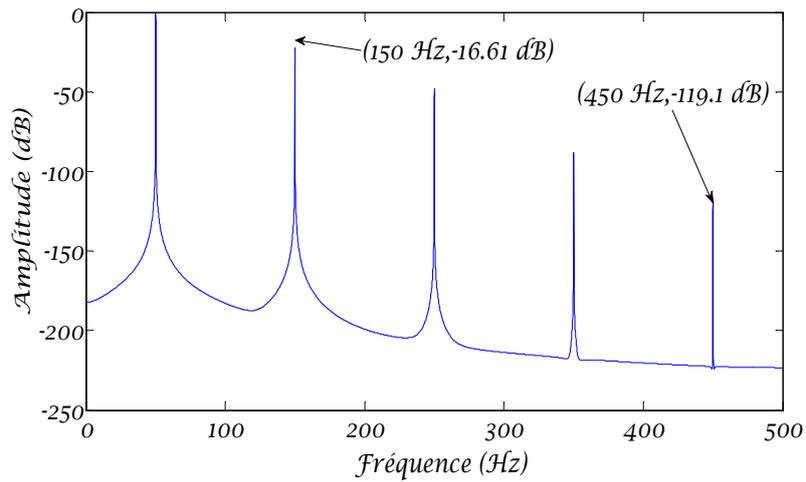


Fig.III.12: Spectre de courants statorique -alimentation déséquilibrée.

Souvent élude la question, est-ce que la relation $C_r=C_e$ au régime permanent est-elle toujours vérifiée ?

L'augmentation de la charge augmente le coefficient de la force de friction (glissement), Ceci augmente le couple électromagnétique pour surmonter cette force, et vice versa Ceci indique qu'il existe une corrélation directe entre eux.

De cela, nous n'en déduisons que la relation ($C_r=C_e$), toujours Vérifié dans le système permanent.

Grâce à la forme (fig.III.13), il est clair pour nous que toutes les valeurs de flux ne sont pas égales. Et on voit aussi que la seule valeur qui a déformé est la valeur Flux 1.

De cela nous déduisons que le déséquilibre au niveau d'une phase affecte le flux de cette phase seulement et non plus les autres phases.

III.2.2.3.2 L'évolution du flux statorique :

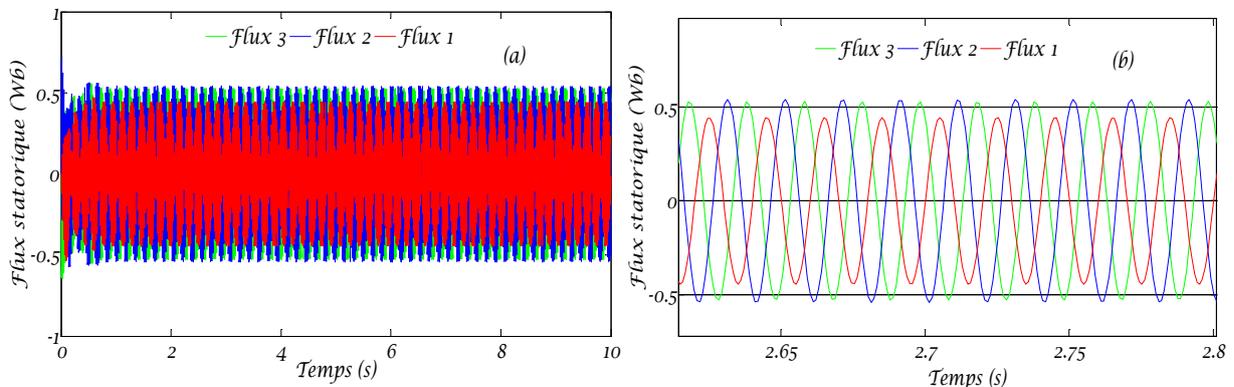


Fig.III.13: Les Flux statorique (a), et son zoom on régime permanent(b).

(Avec une alimentation déséquilibrée)

Chapitre III : Simulation du modèle de la machine asynchrone

On peut dire aussi sur la performance du moteur :

- ❖ Elle n'est pas stable et n'est pas efficace pour ce faire la tâche requise avec tension déséquilibrée.
- ❖ Diminution la durée de vie de la machine.
- ❖ Peut détruire la machine, si l'alimentation de tension déséquilibrée est trop élevée.

III.2.2.3.3 L'évolution du courant neutre :

Nous constatons dans la fig(III.14), que malgré l'existence d'une valeur courant de neutre mais il est faible par rapport à la valeur des courants statoriques et rotorique

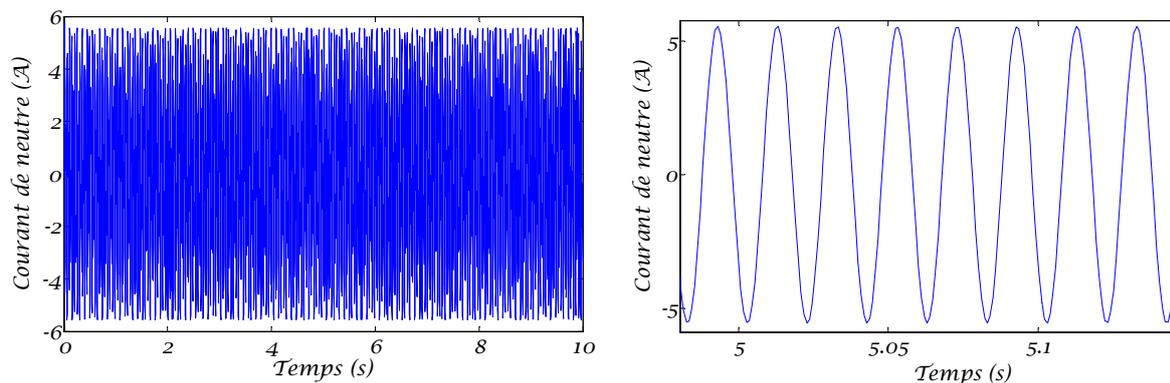


Fig.III.14 : Courant de neutre et son zoom de la machine : en charge ($Cr=1.5N.m$)
(Cas d'une alimentation déséquilibrée)

III.2.2.4 Les conséquences des grandeurs homopolaires :

- ❖ En ce qui concerne courant de neutre $I_n = 0$
- ❖ Les modules de courant et des tensions statorique est égales.
- ✚ Le module du courant résiduel est le triple du courant homopolaire $|I_r| = 3 \cdot |I_0|$ avec :

$$|I_0| = I_{s1} = I_{s2} = I_{s3}$$

- ✚ Le module de la tension résiduelle est le triple de la tension homopolaire. $|V_r| = 3 \cdot |V_0|$

avec : $|V_0| = V_{s1} = V_{s2} = V_{s3}$

- ❖ Le déphasage: $\varphi(V_{s1}, V_{s2}) = \varphi(V_{s1}, V_{s3}) = \varphi(V_{s2}, V_{s3}) = 120^\circ$

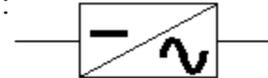
Ces relations ne sont pas atteintes dans ce que nous avons vu dans le cas d'une alimentation déséquilibrée, Voilà ce que provoque l'échauffement de ces machines.

III.2.3 Simulation d'une machine asynchrone alimentée par un onduleur

Dans cette partie nous présenterons la simulation de la machine constituée d'un onduleur de tension contrôlés par la technique MLI.

III.2.3.1 Définition

L'onduleur de tension est un convertisseur statique qui permet de fournir une tension alternative d'amplitude et de fréquence réglables à partir d'une source de tension continue, c'est un convertisseur continu- alternatif, il est symbolisé par [32]:



III.2.3.2 Onduleur de tension triphasé :

L'onduleur triphasé en pont est constitué de trois cellules de commutation. Trois des six interrupteurs K_i sont simultanément conducteurs, les trois autres sont bloqués. Deux interrupteurs d'une même verticale sont commandés en complémentarité pour ne pas court-circuiter la source de tension, ce qui va donner des tensions simples triphasées qui sont obtenues de façon composée sur les trois bornes de sortie [33].

III.2.3.3 Commande MLI :

Dans notre travail, l'onduleur est commandé par la technique de Modulation de la largeur d'Impulsion (MLI). Elle consiste à imposer aux bornes du moteur des tensions, hachées à fréquence fixe, évoluant en fonction des références de tension. A l'aide d'un signal triangulaire appelé porteuse, ces tensions sont modulées en largeur d'impulsion afin de déterminer les instants de commutation et la durée de conduction de chaque interrupteur de l'onduleur. A chaque instant, l'un des deux interrupteurs de chaque bras est en conduction et l'autre est bloqué [34] [35] [36].

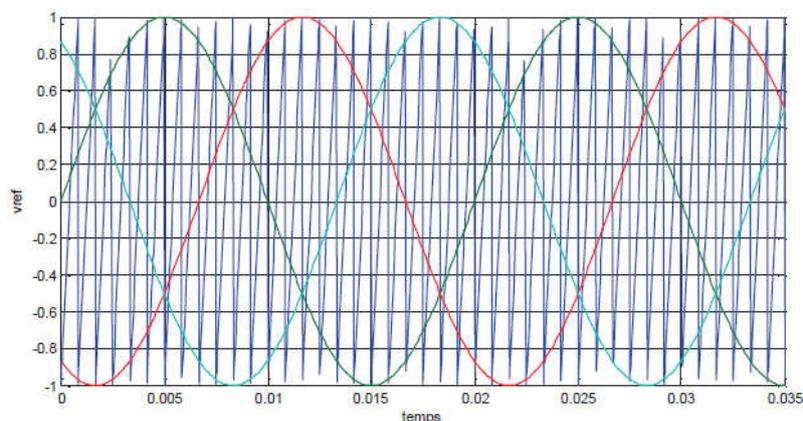


Fig.III.15 : Stratégie de la commande MLI

Chapitre III : Simulation du modèle de la machine asynchrone

III.2.3.4 Résultats de simulation d'un MAS-onduleur (sain)

La simulation présentée par la suite est réalisée sur un moteur asynchrone alimenté par un onduleur commandé selon le principe de la MLI. Avec les valeurs de la fréquence de la porteuse $f_p = 1000\text{Hz}$ et un temps de simulation de 10s. Les résultats de simulation sont obtenus avec modèle de MAS dans l'état sain.

A l'instant $t=2\text{s}$ en charge la machine avec un couple résistant de 3 Nm

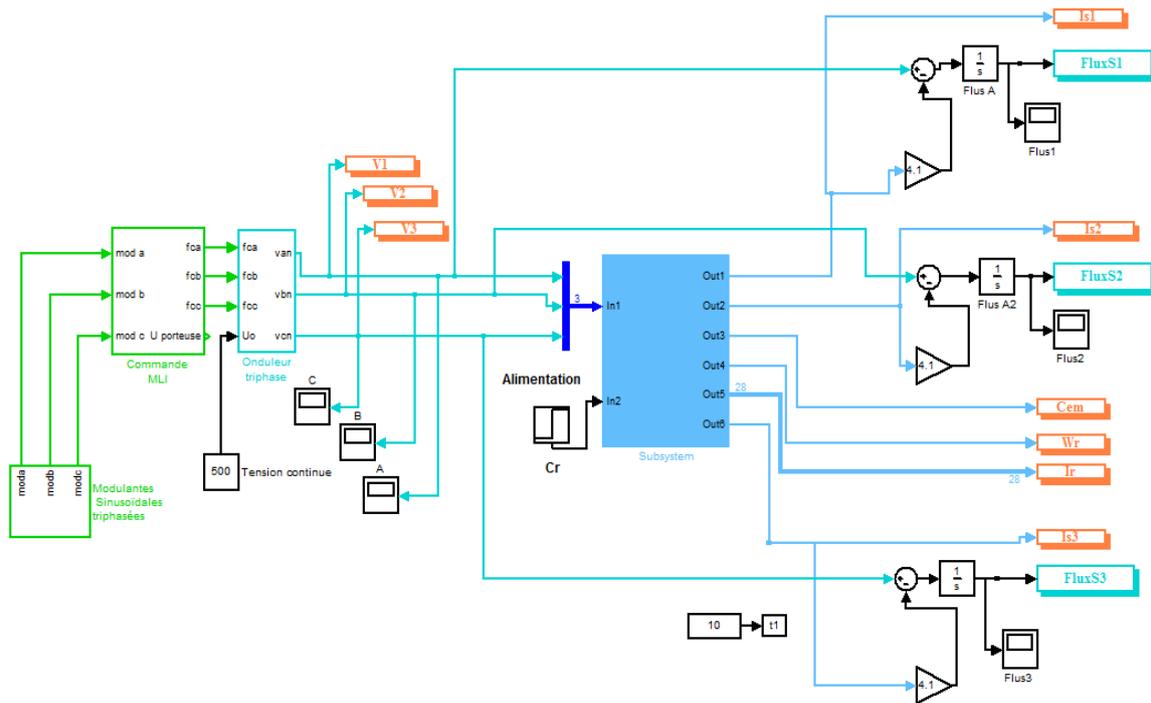


Fig.III.16 : Schéma bloqué de la machine asynchrone associée à un onduleur de tension

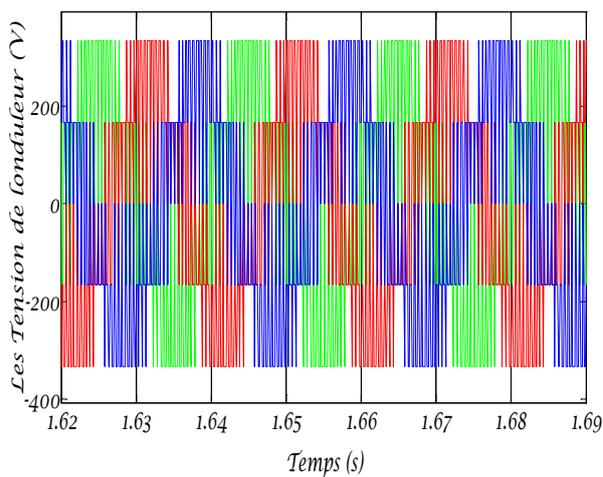


Fig.III.17 : Les tensions V_{abc} de la sortie de l'onduleur à MLI

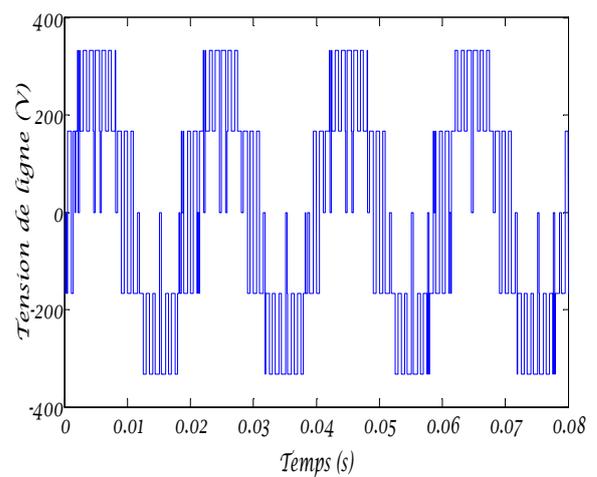


Fig.III.18 : La tension de phase V_a de l'onduleur à MLI

Chapitre III : Simulation du modèle de la machine asynchrone

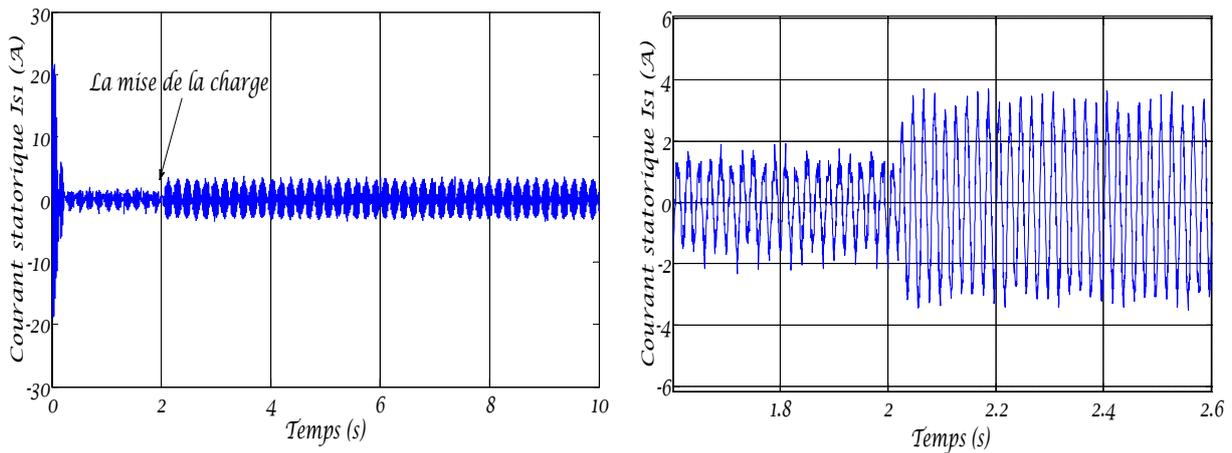


Fig.III.19.a : Courant statorique I_{s1} de MAS. **Fig.III.19.b:** Zoom de I_{s1} en [1.75s - 2.6s]

La figure (III.19.a.b) montre le courant statorique d'un moteur asynchrone alimenté par un onduleur de tensions. On remarque une augmentation du courant statorique (I_{s1}) de la valeur 1.76A à la valeur 3.795A à l'instant de $t=2$ s.

On remarque aussi que le courant absorbé est presque sinusoïdal et qui présente des ondulations. Ces ondulations engendrent des harmoniques, et pour atténuer ces harmoniques il est préférable d'augmenter la fréquence d'échantillonnage.

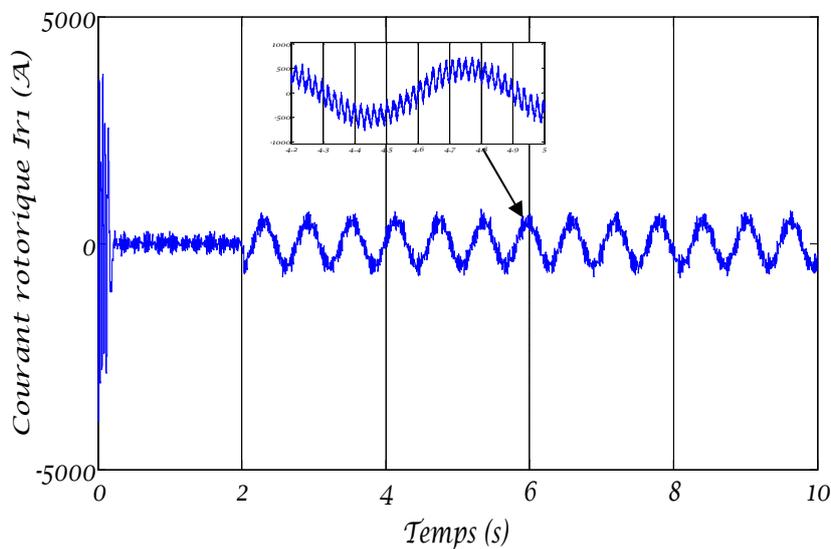


Fig.III.20 : Courant d'une maille rotorique I_{r1}

On remarque dans la figure (III.20) que le courant rotorique I_{r1} est presque sinusoïdal comme dans le cas de la (MAS) alimenté par une alimentation triphasée et qui présente des ondulations.

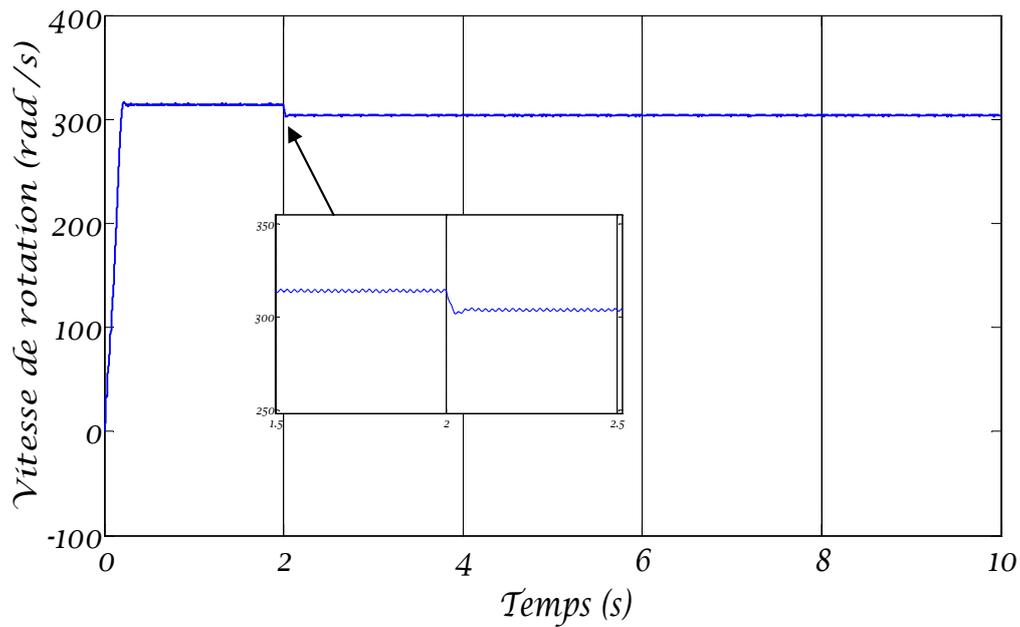


Fig.III.21 : Vitesse de rotation de la MAS avec onduleur

Nous remarquons dans la figure (III.21) que la forme de la vitesse change de la valeur 314.8 (rd/s) à la valeur 304.7 (rd/s) à l'instant d'application de la charge $t=2$ s. Et en régime permanent se stabilise à une valeur proche de la vitesse du synchronisme exactement comme dans le cas de la (MAS) alimenté par une alimentation triphasée.

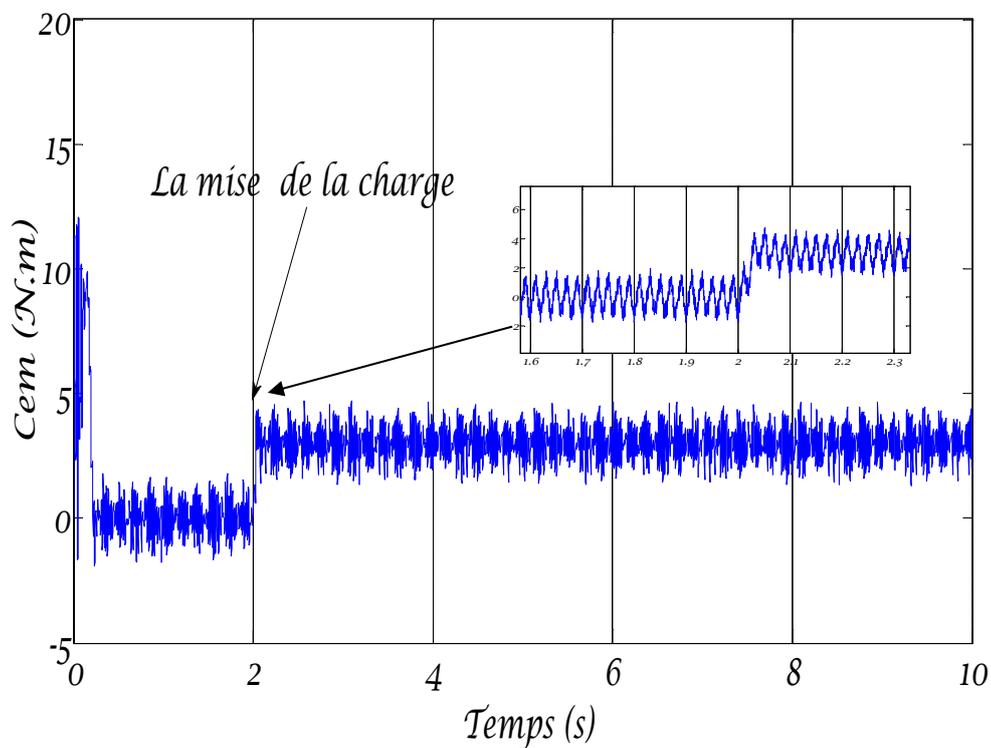


Fig.III.22 : Couple électromagnétique de la MAS avec onduleur

Chapitre III : Simulation du modèle de la machine asynchrone

Nous remarquons dans la figure (III.22) l'émergence d'ondulations et une augmentation de couple électromagnétique de la valeur 0 (Nm) à vide, à la valeur 3 (N.m) à l'instant de $t=2s$.

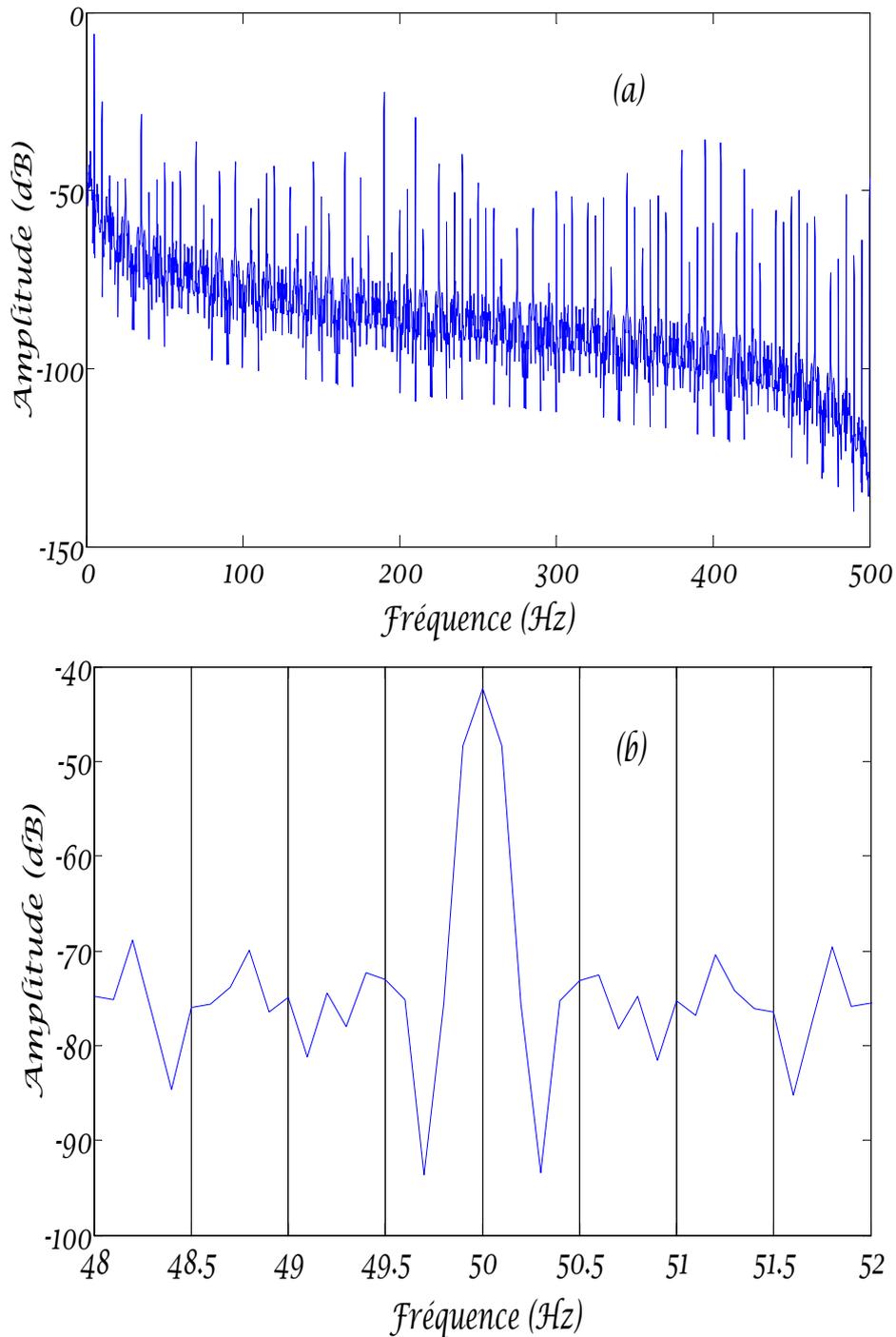


Fig.III.23 : Spectre de courant statorique I_{s1} (a), et zoom de la fondamentale de 50 Hz (b)

La figure (III.23) montre que lorsque le moteur asynchrone alimenté par un onduleur de tensions, on remarque l'apparition de raies latérales dans l'ensemble du spectre montrant la présence des harmoniques de fréquence sur le spectre du courant statorique de la machine

bien que le moteur dans l'état sain. Cela montre que l'onduleur contient des harmoniques de fréquence.

III.2.4 Simulation des défauts d'asymétrie rotorique

III.2.4.1 Simulation de la rupture de barres au rotor

Nous présentons sur les (fig III.24 à III.33) l'évolution temporelle des grandeurs de la MAS lorsque nous passons d'un fonctionnement sain à un fonctionnement défaillant. Pour analyser l'effet de la rupture de barre sur ces grandeurs, nous avons choisi de rendre la barre R_{b1} de la cage rotorique défaillante à l'instant $t = 2$ secondes en imposant une résistance de barre 30 fois supérieure à celle donnée pour un fonctionnement sain (cette valeur a été choisie de sorte que le courant qui traverse la barre défaillante soit le plus proche possible de zéro). Par la suite, nous avons créé un second défaut en augmentant la résistance de la barre R_{b2} à l'instant $t = 3$ secondes.

Notre simulation est faite d'abord d'après les indications suivantes :

À l'instant $t=2$ (s), nous avons simulé la rupture de la première barre. Le courant dans cette barre va diminuer fortement (fig III.24), entraînant une augmentation importante du courant dans les barres voisines (le courant presque annulé dans la barre 1 va se distribuer dans les autres barres d'après leur emplacement de celle rompue) (fig .III.25).

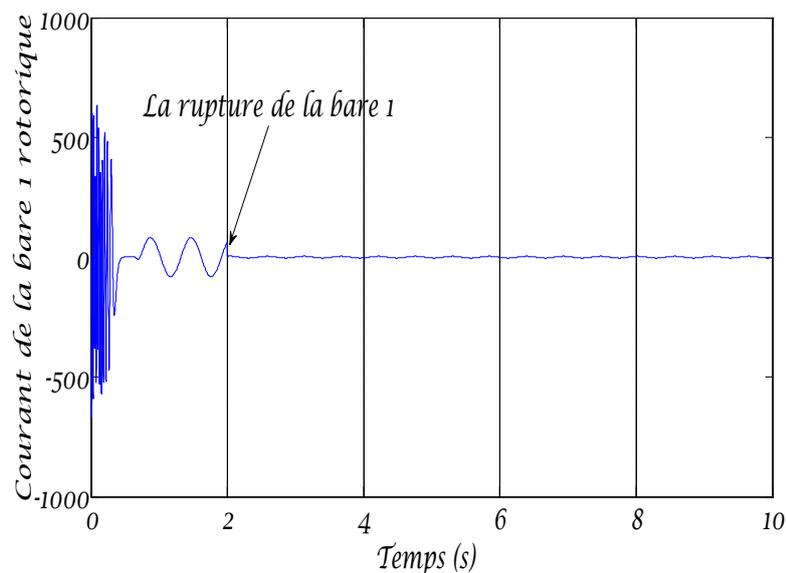


Fig.III.24 : Courant rotorique dans la barre 1.

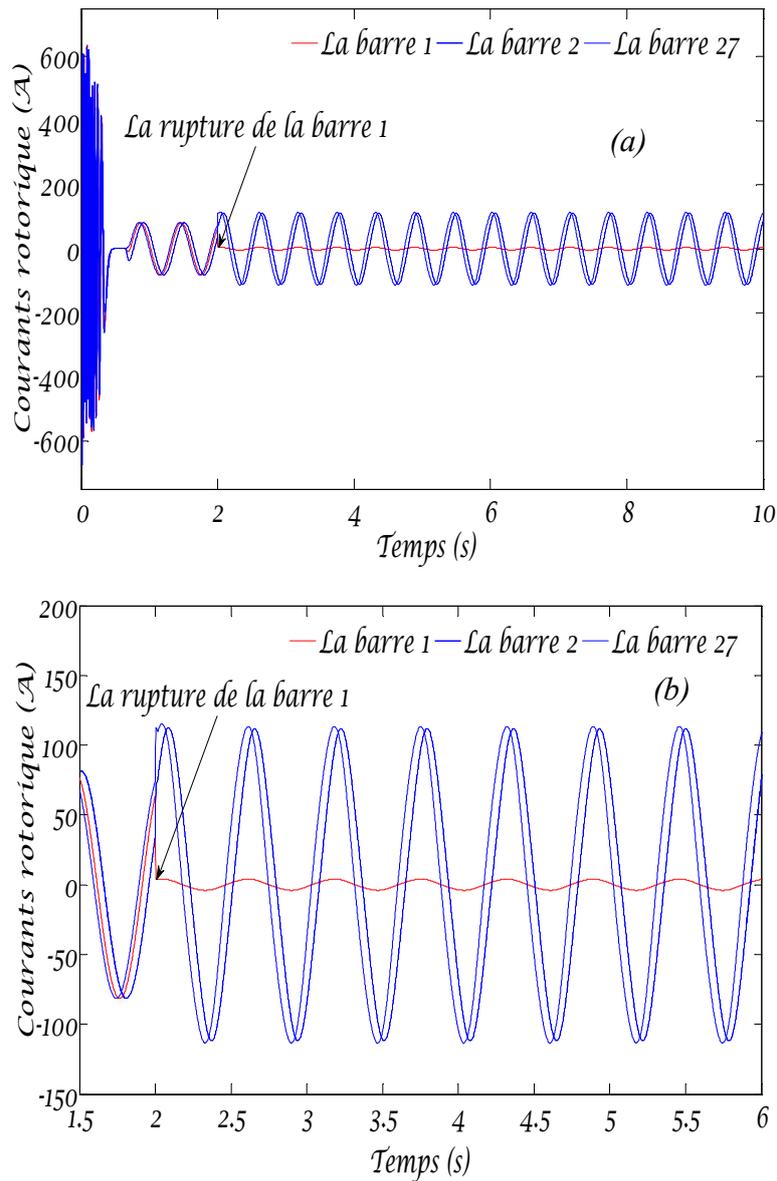


Fig.III.25 : Influence de la rupture de la barre 1 sur les barres adjacentes (a) et son zoom (b).

Les (fig III.25 et III.26) représentent l'évolution du courant dans la barre R_{b1} . Nous pouvons noter que l'amplitude du courant au niveau des barres rompues s'approche du zéro .considérant que le courant qui circulait dans la barre défaillante (barre R_{b1}) se partage dans les barres rotoriques adjacentes (R_{b2} et R_{b27}) .Donc voir que les barres voisines supportent des courants plus forts que les autres

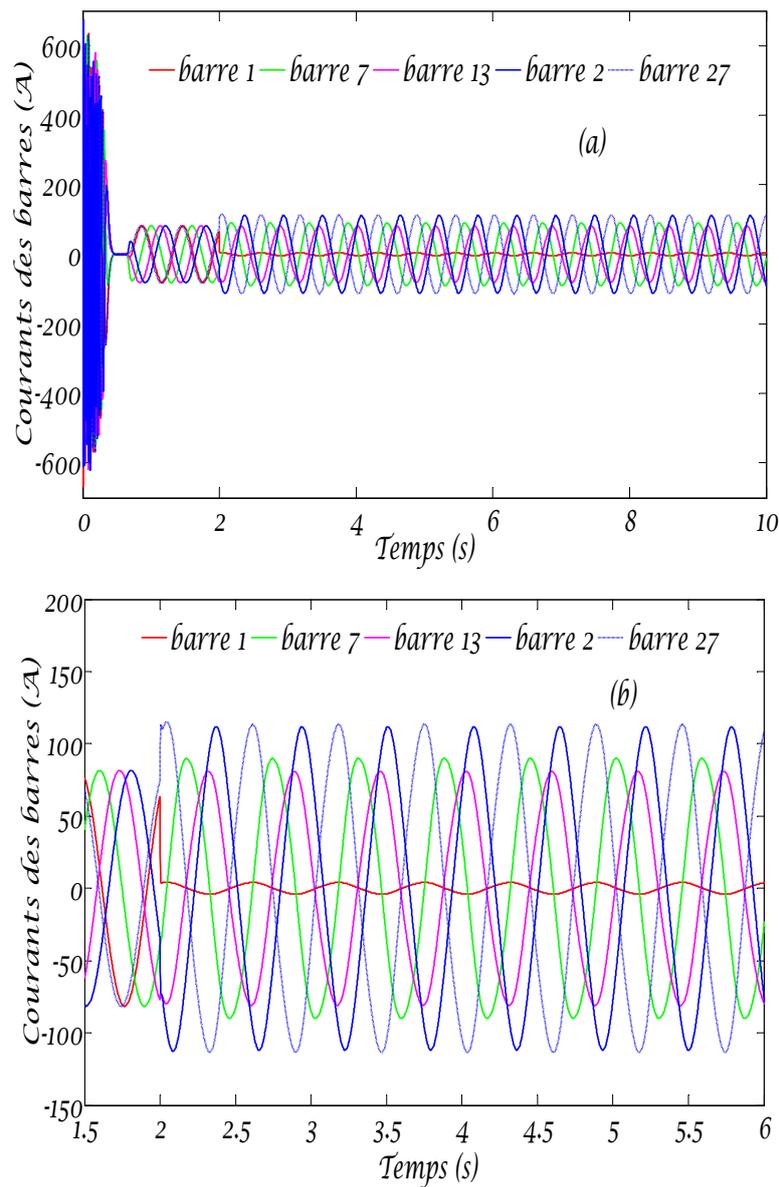


Fig.III.26 : Influence de la rupture de la barre 1 sur les barres adjacentes (2 et 27)

Les (fig.III.27 et III.28), représente l'évolution du courant absorbé par une phase statorique. Comme pour les deux grandeurs précédentes, le défaut rotorique induit une très légère modulation d'amplitude. Il faut attendre le second défaut (deux barres cassées) pour permettre de la visualiser clairement.

Nous avons représenté l'enveloppe de ce courant sur la (fig.III.28) Comme nous pouvons le voir, cette modulation reste très faible, trop faible pour permettre d'effectuer un diagnostic précis de l'état de la cage rotorique.

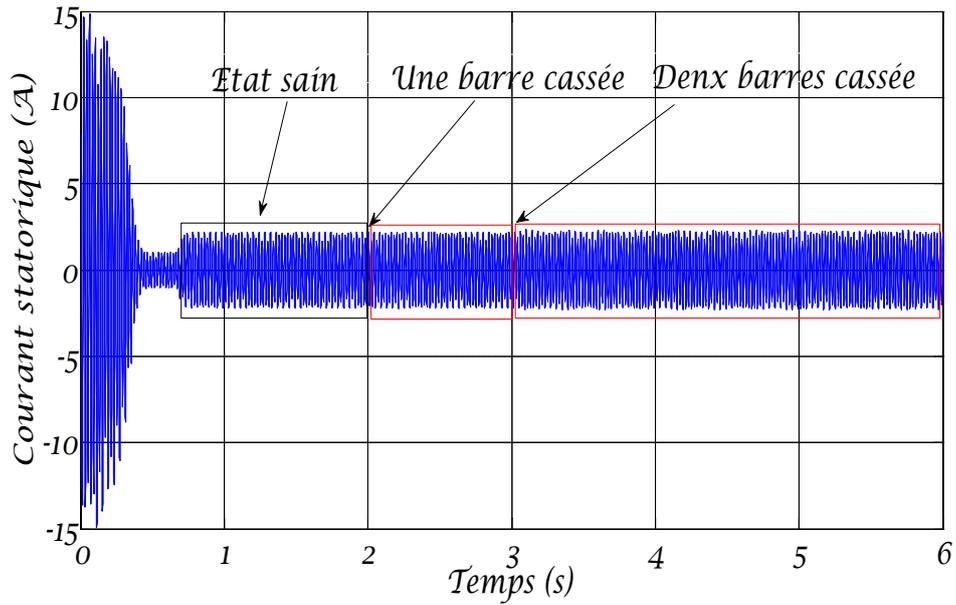


Fig.III.27 : Courant statorique pendant la rupture d'une barre puis de deux barres.

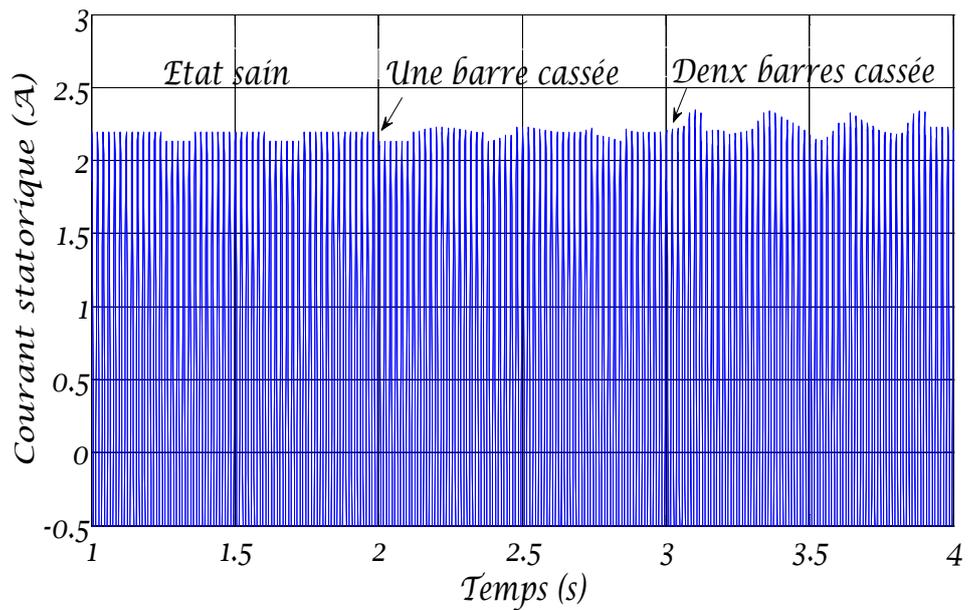


Fig.III.28 : Modulation du courant statorique pendant la rupture d'une barre puis de deux barres (Agrandissement).

En analysant le (fig III.29 et III.30), nous présentons l'évolution de la vitesse rotorique dans l'état sain et visualisons l'apparition d'une oscillation lorsque la rupture des barres rotorique.

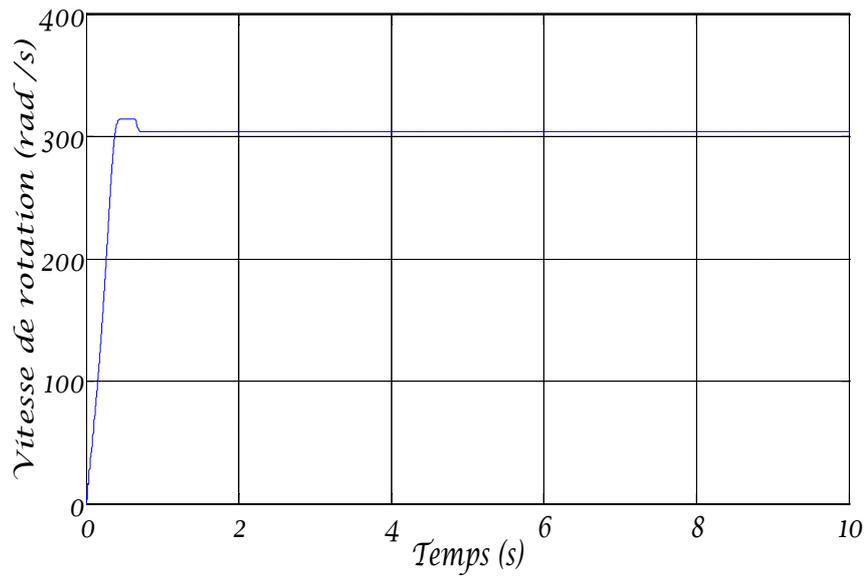


Fig.III.29 : Vitesse de rotation avec état sain.

$$W_{r_{moy}} = \frac{W_{r_{max}} + W_{r_{min}}}{2} = \frac{303.6 + 303.6}{2} \Rightarrow W_{r_{moy}} = 303.6(\text{rad/s}) \dots\dots\dots\text{I}$$

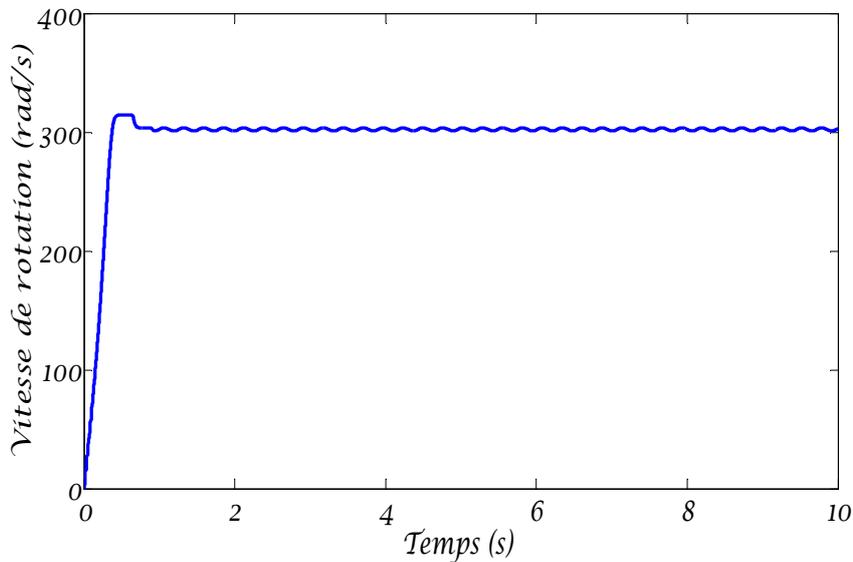


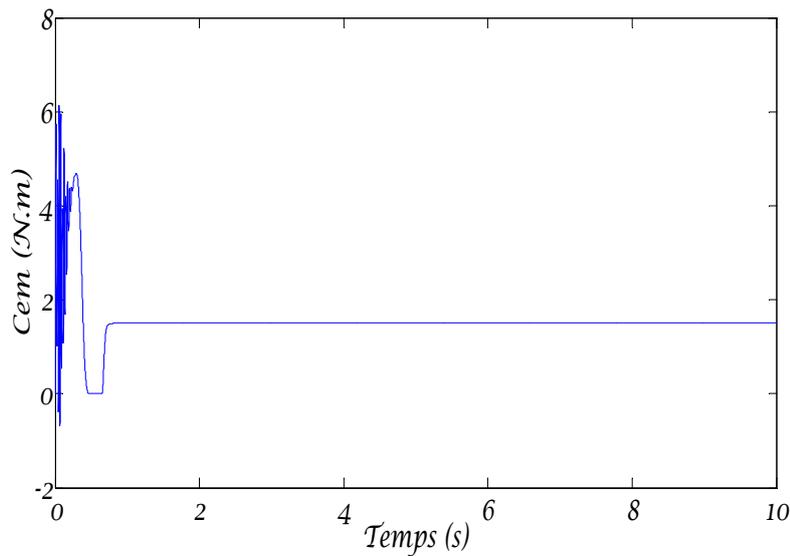
Fig.III.30 : Vitesse de rotation avec défaut sur trois barres cassées

$$W_{r_{moy}} = \frac{W_{r_{max}} + W_{r_{min}}}{2} = \frac{303.5 + 300.8}{2} \Rightarrow W_{r_{moy}} = 302.15(\text{rad/s}) \dots\dots\dots\text{II}$$

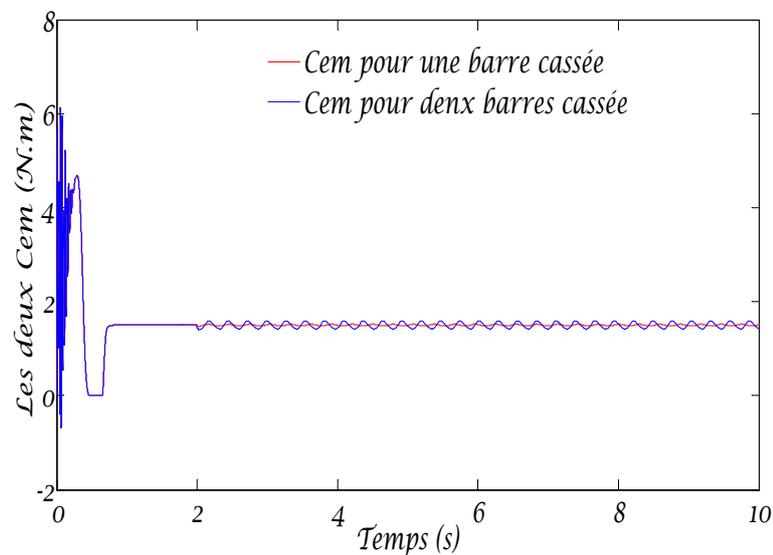
A travers les (figIII.29 et III.30) et les relations I et II, nous avons conclu que la valeur moyenne de la vitesse de rotation diminue en cas de défaut sur les barre.

Chapitre III : Simulation du modèle de la machine asynchrone

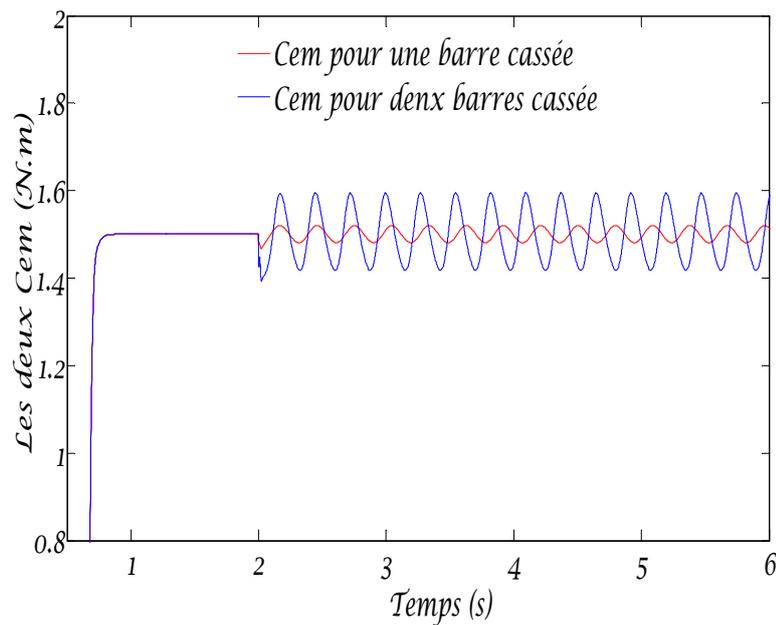
L'analyse du couple électromagnétique la (fig.III.31 a et b et c) montre une modification importante (présence d'une oscillation) de son allure lorsque les défauts rotoriques apparaissent. Nous apercevons qu'une légère modulation vient perturber l'évolution du couple lorsque la première barre est cassée. Nous remarquons aussi que cette modulation prend plus d'importance avec l'augmentation de ce défaut. Cette modulation d'amplitude a une fréquence identique à celle de la vitesse c'est-à-dire $2.k.g.f_s$ mais, comme nous pouvons le visualiser, il est relativement difficile de la discerner avec une simple analyse visuelle.



A : couples électromagnétique avec état sain



B : Ondulation des couples électromagnétique pendant la rupture d'une barre et de trois barres



C : Agrandissement de l'ondulation des couples

Fig.III.31: Les oscillations de couple électromagnétique avec l'augmentation de rupture des barres

Lorsque l'on considère dans la (Fig.III.32), Nous constatons que le moteur dans l'état de santé (sous un couple résistant de 1.5 N.m), consomme la quantité de courant de (2.197 A), Mais quand le défaut est survenue au moment 4s nous notons que la valeur de courant augment (2.427A), avec l'avènement des oscillations de la courant dans le régime permanent, Ceci est un danger pour le moteur et son performance.

Pour essayer de minimiser le risque pour le moteur, Nous avons la réduction de la valeur de la charge, qui a révélé que 1.35 N.m donnez-nous une valeur de courant en cas de défaut 2.193 A (Fig.III.33).Mais nous constatons que la valeur de courant diminue aussi dans l'état sain du moteur.

Cela confirme indirectement que la diminution de la valeur de la charge, accompagnée d'une diminution du couple moyen ce qui réduit les performances du moteur.

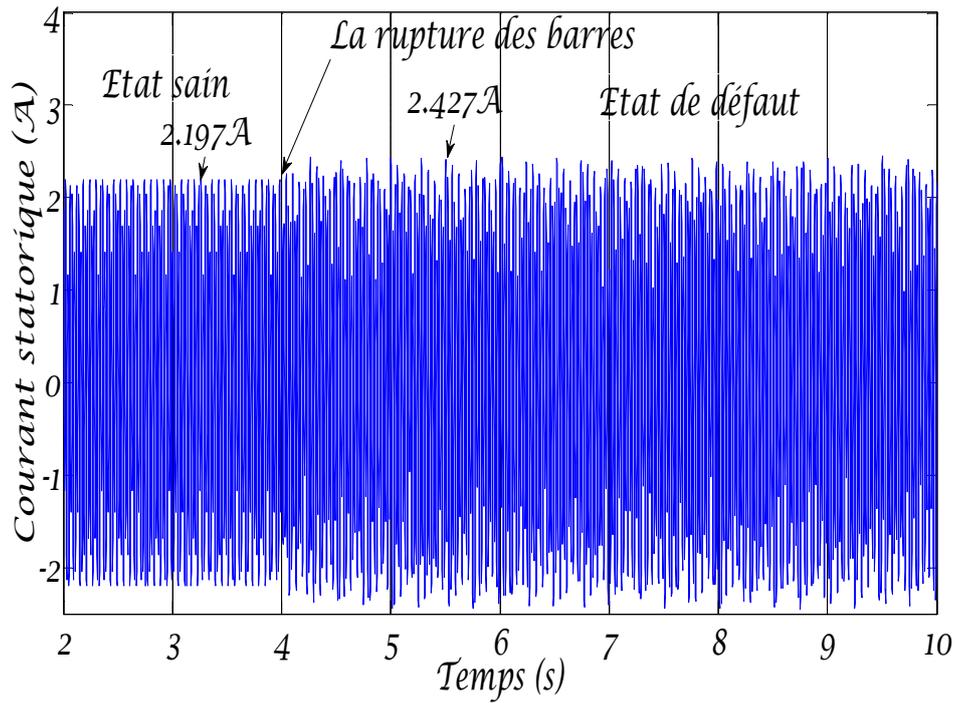


Fig.III.32 : Courant statorique dans le régime permanent

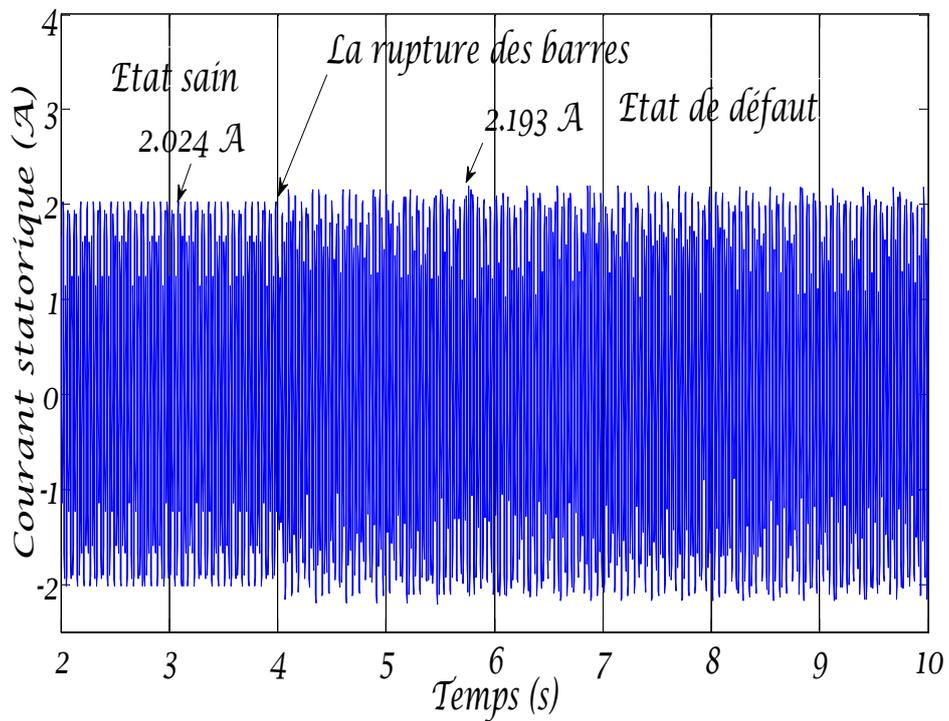


Fig.III.33 : Courant statorique dans le régime permanent

(Après la réduction de la valeur de la charge)

Chapitre III : Simulation du modèle de la machine asynchrone

III.2.4.2 Détection des défauts rotorique par l'analyse spectrale (FFT)

Les (fig.III.27 et III.28) nous montrent clairement que l'analyse directe du courant statorique, il s'avère très difficile puisque, comme nous voyons, la modulation de l'amplitude est très faible pour l'observer clairement et par conséquent donner un diagnostic parfait (de quel type de l'anomalie précis s'agit-il ?).

La pauvreté du signal temporel du courant, en renseignements nécessaires pour détecter les défauts en questions, nous amène au signal fréquentiel qui offre des informations précieuses sur sa composition. Nous avons montré précédemment qu'un défaut de barres rotoriques, se manifeste dans le spectre du courant statorique par l'apparition des raies autour du fondamental. Dans notre cas, nous avons utilisé la transformée de Fourier rapide. (FFT) qui s'avère plus commode.

La simulation des machines constituent une étape primordiale pour la mise au point d'une procédure de diagnostic, elles permettent la compréhension du fonctionnement sain et défectueux. Le type de défaut que nous étudions et la rupture de barres de la cage de la machine asynchrone

La simulation de ce type de défaillance consiste à augmenter artificiellement la valeur de la résistance de barre incriminée d'un facteur suffisant pour que le courant qui la traverse soit le plus proche possible de zéro en régime permanent.

Nous savons que la présence d'un défaut au sein de la cage rotorique fait apparaître des composantes additionnelles dans le spectre fréquentiel $(1 \pm 2.k.g)f_s$. Par conséquent, une comparaison entre les spectres obtenus avec un rotor sain et un rotor défaillant nous permettra de mieux discerner les composantes créées par le défaut rotorique [37].

III.2.4.2.1 Effet du nombre de barres cassées sur les harmoniques $(1 \pm 2kg)fs$

Nous présentons sur la (fig III.34), le spectre du courant statorique d'un moteur sain en charge nominale ($g = 3.5 \%$). C'est évident qu'on n'observe aucune raie latérale. Mais en réalité on observe même un degré d'asymétrie naturelle (de construction) qui donne naissance normalement à l'apparition des raies mais avec amplitudes faibles [35] [31] [38].

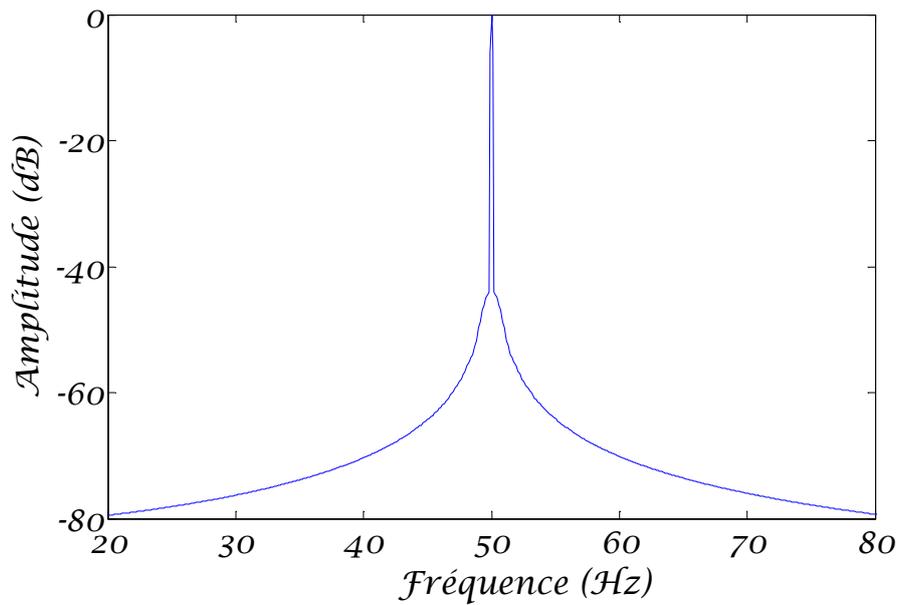
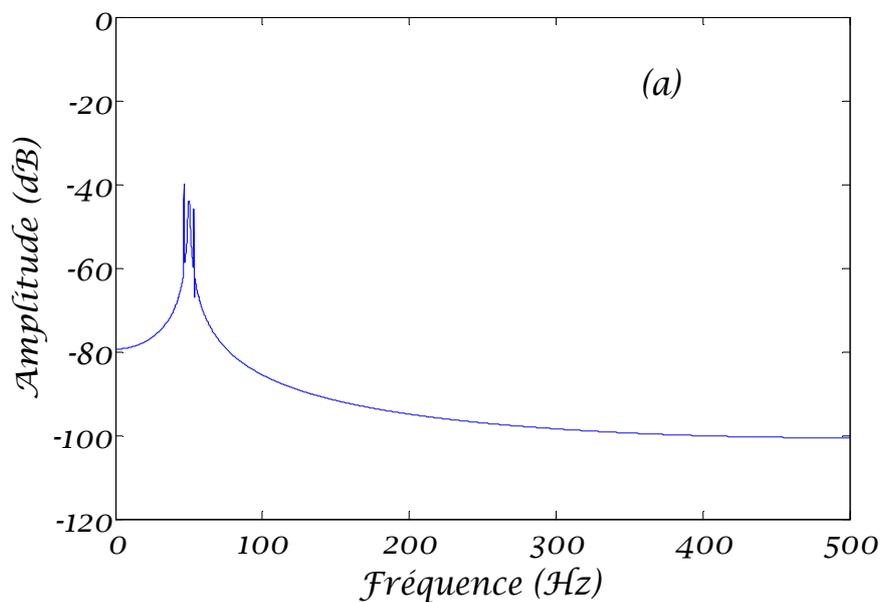


Fig.III.34 : Spectre du courant statorique pour un moteur sain en charge.

Le contenu spectral du courant statorique ne se limite pas seulement à la composante fondamentale de fréquence 50 Hz. En effet, les harmoniques d'espace contribuent à augmenter la richesse harmonique de ce signal. Nous pouvons remarquer la présence de plusieurs composantes dont les fréquences sont bien connues à ce jour (1±2kg).

La visualisation des raies dans le courant statorique permet d'expliquer le défaut lorsque une barre est rompue et d'obtenir plus d'information sur le défaut à partir des raies latérales aux fréquences [46.5 Hz et 53.5Hz] et avec amplitudes [-39.92dB et -44.23dB] (Fig III.35).



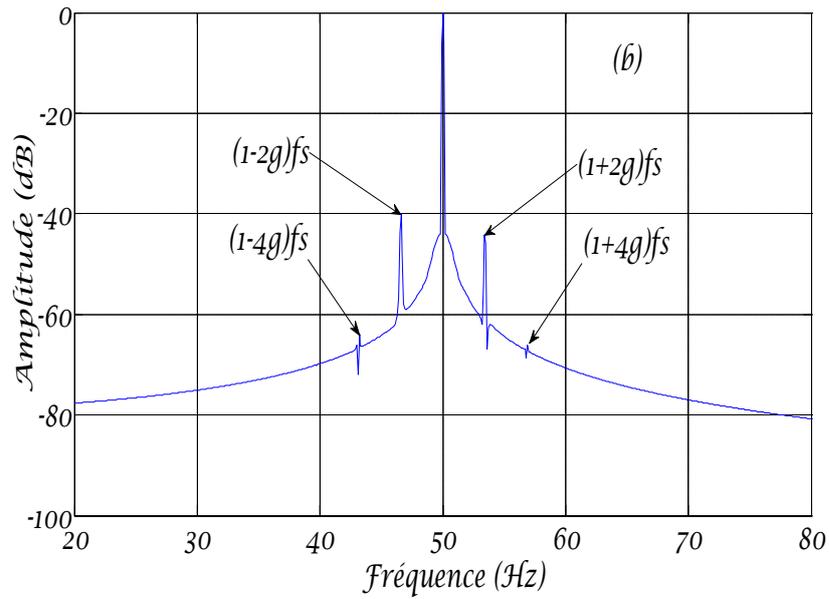


Fig.III.35: (a) Spectre du courant statorique et son zoom (b) -Moteur en charge avec une barre cassée.

Quand une deuxième barre adjacente est cassée, on remarque une augmentation de 07.93 dB sur la raie $(1-2g)fs$, et une augmentation de 07.13 dB sur la raie $(1+2g)fs$. On observe aussi, l'apparition des raies aux fréquences [42.6 Hz et 57.4 Hz] qui correspondent à $(1\pm 4g)fs$, et avec des amplitudes faibles [-54.44 dB et -63.2 dB] (fig. III.36 a et b)

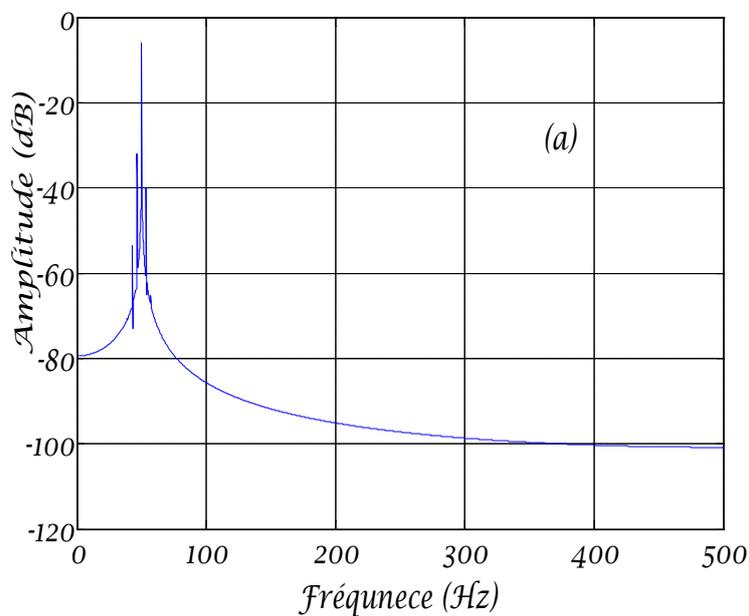


Fig.III.36.a : Spectre du courant statorique pour un moteur en charge avec deux barres adjacentes cassées

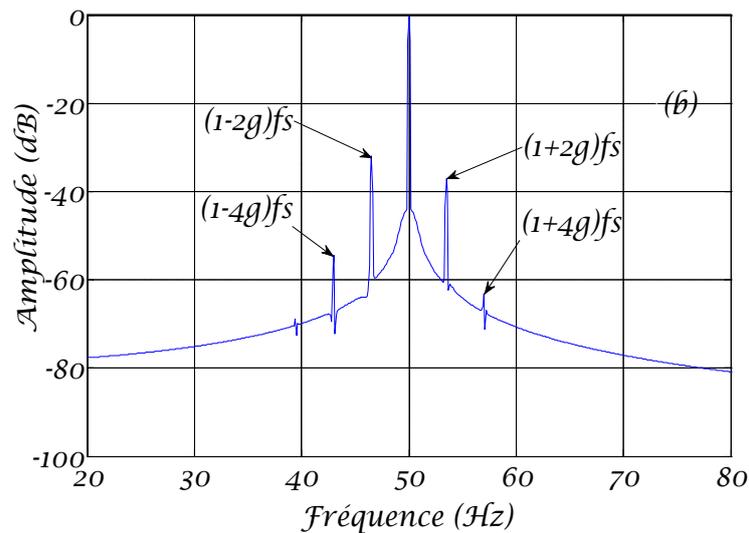


Fig.III.36.b : Spectre du courant statorique pour un moteur en charge avec deux barres adjacentes cassées (zoom autour du fondamental).

Quand la troisième barre est cassée, on constate une augmentation sur les amplitudes des harmoniques $(1\pm 2kg)fs$. On signale que les amplitudes des composantes $(1\pm 2kg)fs$, diminuent à chaque fois quand on s'éloigne du fondamentale (fig.III.37)

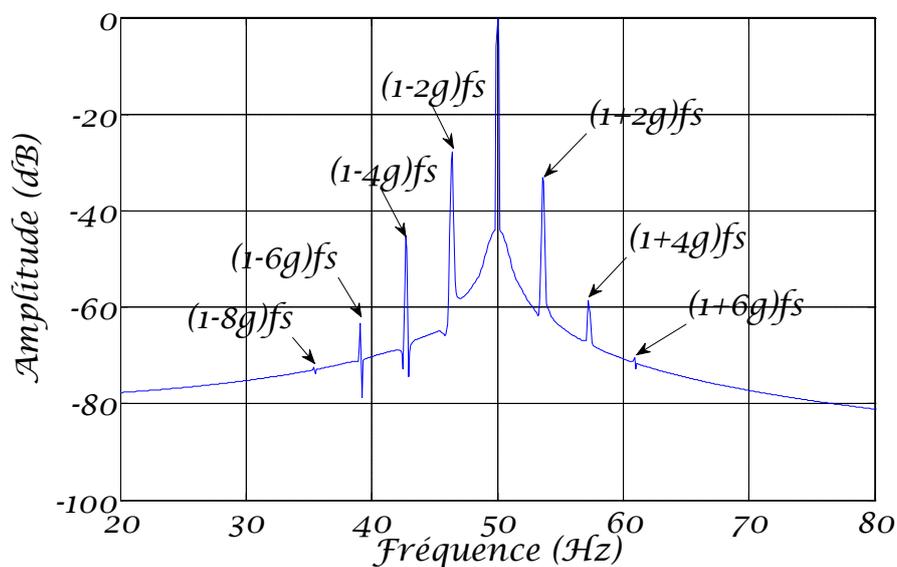


Fig.III.37 : Spectre du courant statorique pour un moteur en charge avec trois barres adjacentes cassées

La visualisation des (fig III.34, III.35, III.36 et III.37), nous attire l'attention que les amplitudes des raies $(1\pm 2kg) fs$ ont évolué encore après la rupture des barres adjacentes. Mais maintenant lors de la rupture de la quatrième barre, qui se situe à $\pi/2$ de la première barre. On constate une diminution de l'amplitude de l'ordre 3.5 dB sur les amplitudes des

Chapitre III : Simulation du modèle de la machine asynchrone

raies plutôt qu'une augmentation (fig. III.38). Ce qui a été confirmé par plusieurs publications et par [21] [39] [40] dans le cas de la rupture des barres non contiguës.

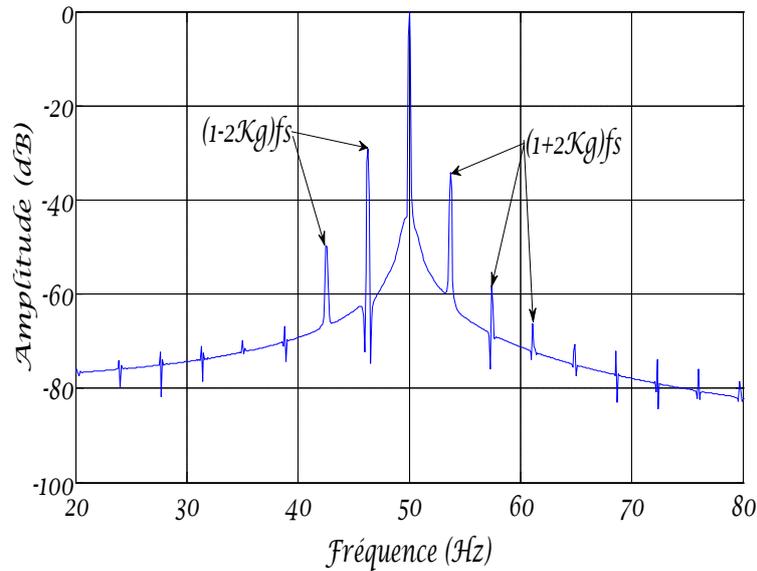


Fig.III.38 : Spectre du courant statorique pour quatre barres cassées. La quatrième barre se trouve à $\pi/2$ de la première.

D'autre part, si on met en évidence la visualisation du spectre du courant dans le cas où deux barres espacées électriquement de $\pi/2$ sont rompues (les barres 1 et 7). La remarque du signal issu de la simulation la (fig III.39) montre ici que les raies $(1\pm 2kg)fs$ ont des faibles amplitudes [-51.3 dB et -48.13 dB] par rapport à celles des barres adjacentes cassées. Mais c'est un cas échéant parce que le plus souvent la rupture de la première barre induit dans les barres adjacentes une augmentation aigüe du courant qui provoque leurs ruptures [41].

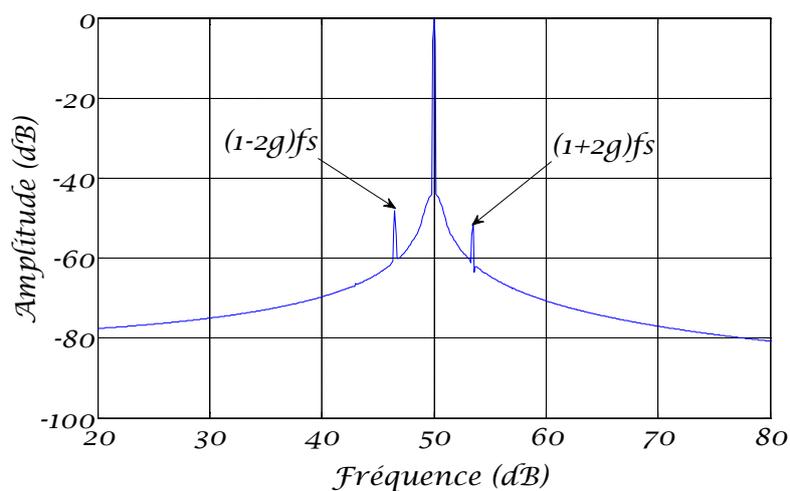


Fig.III.39 : Spectre du courant statorique pour un moteur en charge avec deux barres cassées espacées entre eux de $\pi/2$ (la barre 1 et 7).

Chapitre III : Simulation du modèle de la machine asynchrone

Pour récapituler tout ce qu'on a mentionné précédemment sur la conséquence du nombre de barres cassées et leurs positions mutuelles sur les amplitudes des composantes $(1\pm 2k)fs$.

D'après le (tab. II.1) et la (fig III.38), on peut affirmer que l'existence des raies $(1\pm 2k)fs$ est un signe flagrant du défaut et son amplitude marque le degré de sévérité

L'état du moteur	L'amplitude des composantes en dB			
	$(1-2g)fs$	$(1+2g)fs$	$(1-4g)fs$	$(1+4g)fs$
Sain	-	-	-	-
1 barre cassée	-39.88	-44.3	-63.73	-66.08
2 barres cassées	-32.93	-38.14	-58.52	-62.47
3 barres cassées	-28.43	-33.2	-49.42	-59.84
4 barres cassées	-31.90	-35.78	-51.90	-61.68

Tableau III.1 : Amplitudes des harmoniques de fréquence en (dB), pour différent nombre de barres cassées

Quand le moteur marche à vide, avec trois barres adjacentes cassées, C'est évident qu'on n'observe aucune raie latérale.

Diagramme (III.40) révèle que, malgré l'existence de défauts de cassures de barres dans la moteur mais il est quand il est dans un vide ces harmoniques ne peuvent être détectés

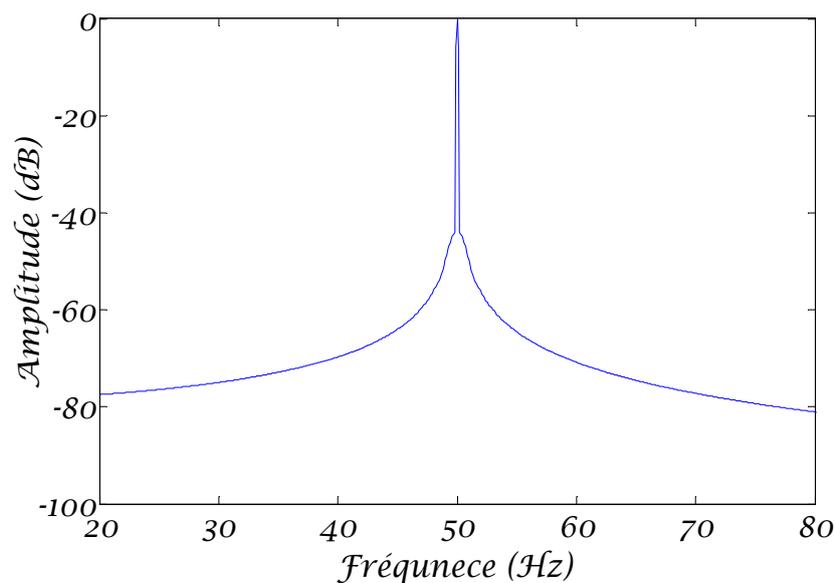


Fig.III.40 : Spectre du courant statorique pour un moteur marche à vide, avec trois barres adjacentes cassées

Chapitre III : Simulation du modèle de la machine asynchrone

III.2.4.2.2 L'effet de la charge sur les raies (les harmoniques) ($1 \pm 2g$)fs

La charge (le glissement g) a un grand effet sur le contenu spectral étudié. Nous remarquons, d'après les (fig. III.31 et III.32), l'évolution spectrale du courant statorique pour différentes valeurs du glissement.

Pour un glissement très faible (à vide), on ne peut pas détecter aucunes raies pour les harmoniques ($1 \pm 2g$)fs. En revanche, on remarque nettement l'accroissement des raies pour les glissements de $g = 0.016$ (mi – charge) et $g = 0.035$ (charge nominale).

Si on superpose les deux signaux dans la même visualisation (fig III.30) pour différents glissements, nous remarquons quand la charge s'affaiblit c'est à dire le glissement g chaque fois va tendre vers zéro l'analyse des signaux est alors plus difficile encore à remarquer les raies spectrales adjacentes avec un espacement faible qui va diminuer inversement proportionnel au glissement jusqu'à la disparition complète [42] [43] [44].

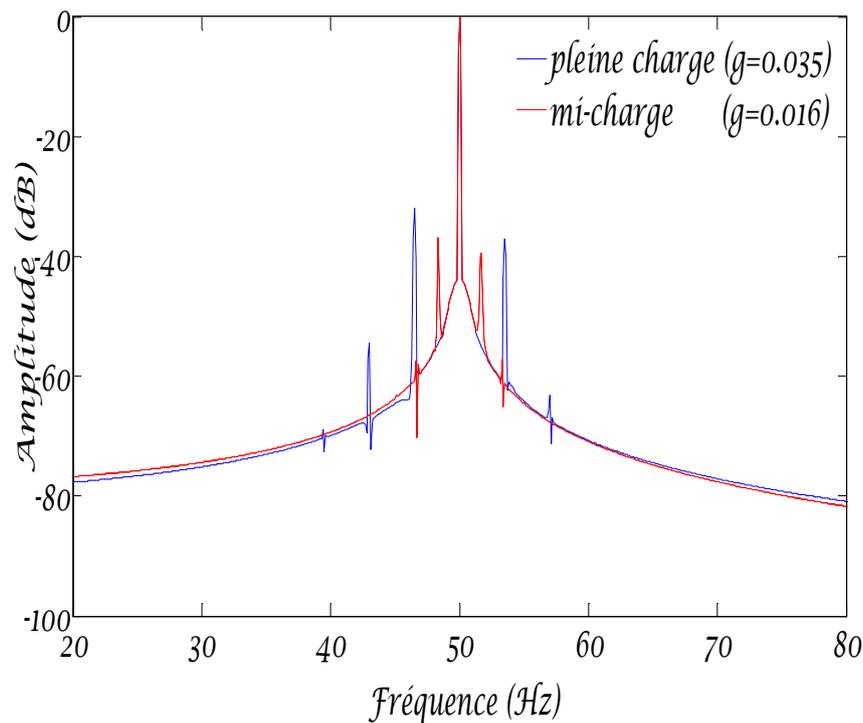
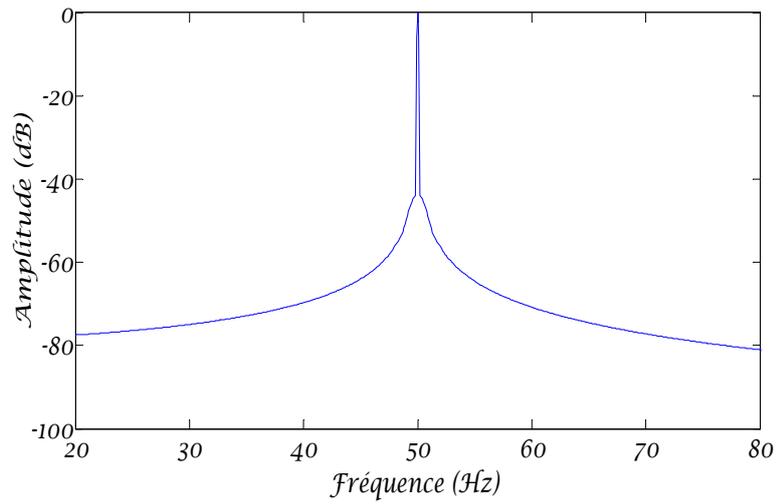
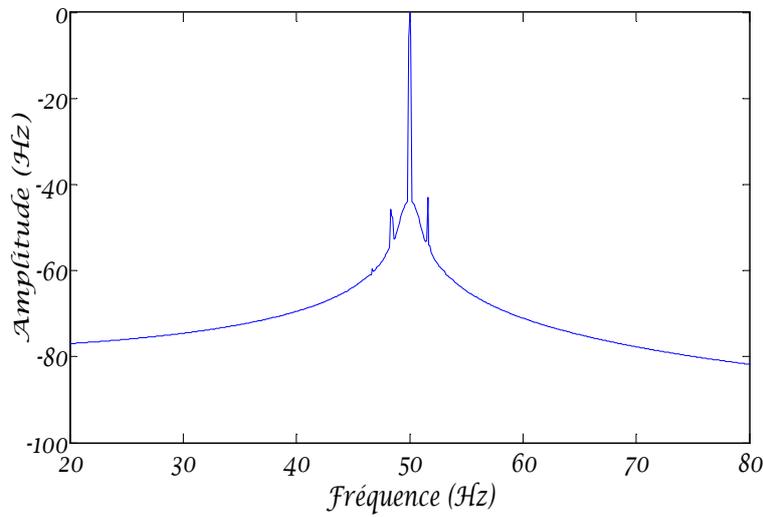


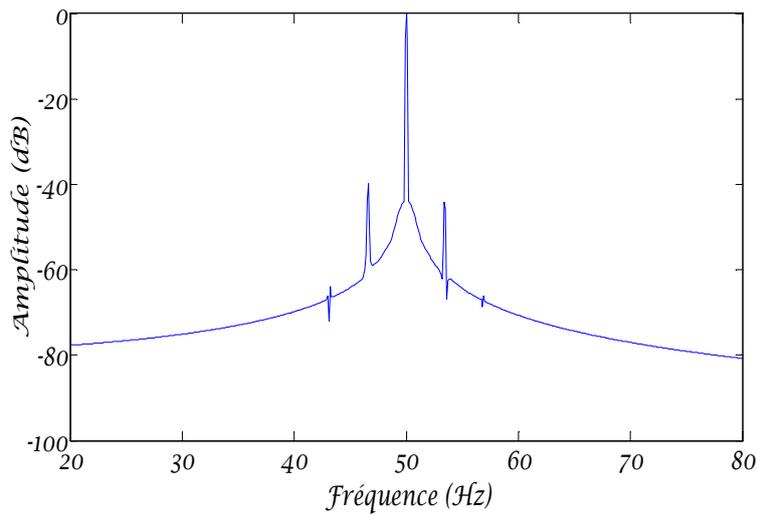
Fig.III.41 : Spectre du courant statorique pour un moteur avec deux barres cassées



a)-a vide

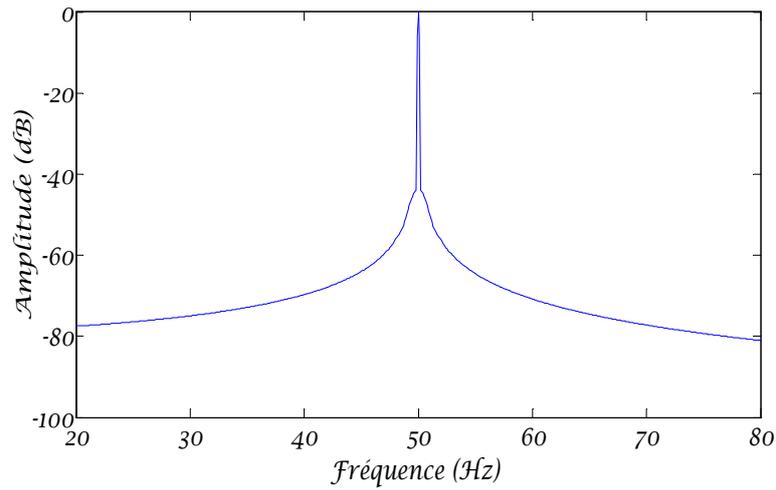


b)-mi-charge (g=0.016)

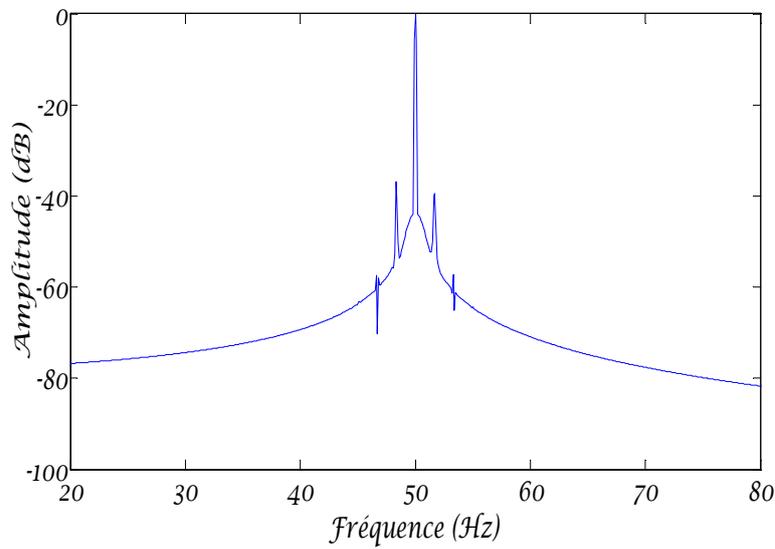


c)-charge nominale (g=0.035)

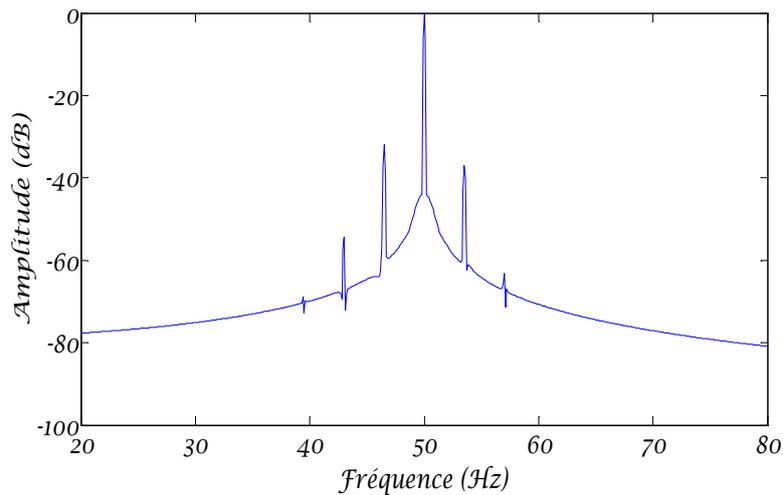
Fig.III.42 : Spectre du courant statorique pour un moteur avec une barre cassée pour différentes charge.



a)-a vide



b)-mi-charge ($g=0.016$)



c)-charge nominale ($g=0.035$)

Fig.III.43 : Spectre du courant statorique pour un moteur avec deux barres cassées pour différentes charge

Chapitre III : Simulation du modèle de la machine asynchrone

III.2.4.2.3 L'effet des oscillations de vitesse sur les harmoniques $(1+2g).f_s$

De nombreuses publications ont confirmé que les harmoniques de fréquences $(1+2g).f_s$, causée par oscillations de vitesse. Sur cela, nous allons faire une simulation avec une valeur de la vitesse constante (303.6 rad /s) .fig(III.44.a)

Lorsque on régler la valeur de la vitesse sur une valeur spécifique. La visualisation de (fig.III.44 .b), nous attire l'attention que amplitude de raie $(1+2g).f_s$ très diminué, avec le manque de l'harmonique de fréquence $(1+4g).f_s$. Cela confirme la validité de ces publications.

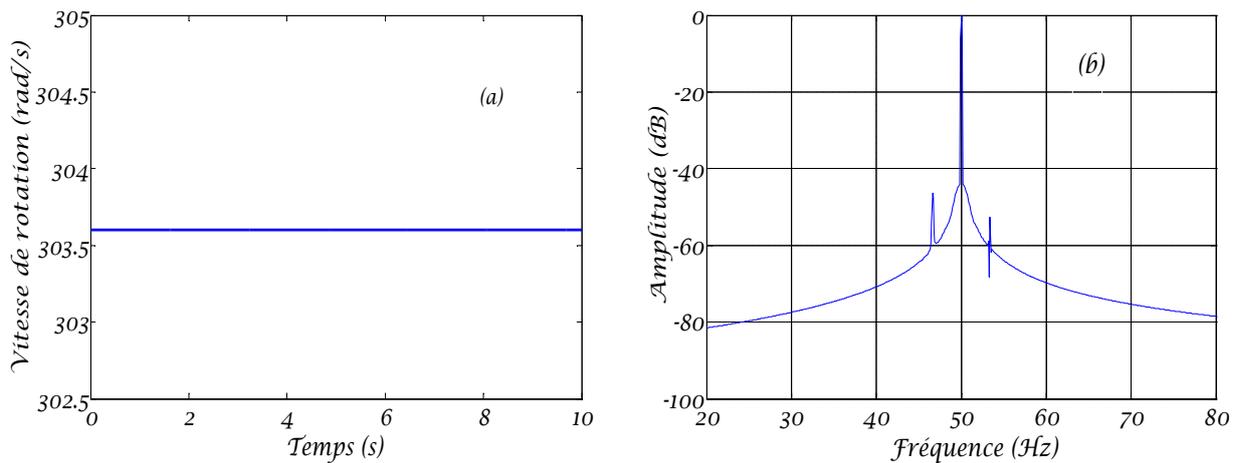


Fig.III.44 : Vitesse de rotation fixe (a). Spectre de courant statorique avec vitesse constant (b)

III.3 Conclusion :

Pour se rapprocher encore de la réalité, cette partie de la mémoire montre les résultats de simulation d'un machine asynchrone a cage dans différentes conditions de fonctionnement (sain, cassures des barres, MAS-onduleur, alimentation déséquilibré) pour détecter les défauts de ce modèle, et son impact sur les performances de la MAS.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Le diagnostic des machines électriques s'est fortement développé dans le monde industriel car la volonté d'obtenir une chaîne de production de plus en plus sûre devient, pour certaines applications, indispensable. Les chaînes de production doivent être dotées de systèmes de protection fiables car une défaillance, même la plus faible, peut mener à un dommage matériel. C'est pour éviter ces problèmes que la recherche, sur le plan mondial, s'emploie depuis plusieurs dizaines d'années à élaborer des méthodes de diagnostic. Celles-ci ont pour premier objectif de prévenir les utilisateurs d'un risque possible pouvant apparaître en un point particulier du système.

Le travail présenté dans ce mémoire s'inscrit dans le cadre du diagnostic des défauts dans les MAS triphasés. Nous avons focalisé notre étude sur les MAS à cage : d'une part, ce sont les plus utilisées actuellement, à raison de leur simplicité de construction, leur faible coût d'achat et de fabrication, leur robustesse mécanique ou encore leur quasi-absence d'entretien et leur fonctionnement à vitesse variable grâce à l'avancée de l'électronique de puissance; à tel point que nous les trouvons maintenant dans tous les domaines industriels.

Pour cela, n'oublions pas que l'arrêt non programmé ou le fonctionnement anormal de l'outil de production, et le non-respect des délais qui s'en suivent, engendrent en effet des coûts que les entreprises ne sont plus en état de supporter et elles peuvent perdre leurs noms dans un marché concurrentiel, ce qui influe directement sur leurs milieux économiques, et déclarer enfin leur faillite.

Dans cette étude, nous avons fait une simulation, pour observer les signaux de la machine dans l'état sain et en défaut (le couple, la vitesse, et les courants statoriques et rotorique, et les Flux statorique). Après on fait un simulation pour un machine asynchrone associée à un onduleur de tension. Ensuite, Nous avons effectué l'analyse spectrale du courant statorique, par la transformée de Fourier rapide (FFT) qui nous a offert la possibilité de détecter les défauts des ruptures des barres rotorique et son impact sur la performance du la MAS.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] : H.CHERIF, "Détection des défauts statorique et rotorique dans la machine asynchrone en utilisant l'analyse par FFT et ondelettes", Thèse de magister, Université de Biskra 'Algeria'-2014.
- [2] : H. Boyer; M. Norbert ; R. Philippe "Cours de construction du matériel électrique" Ed LA APITELLE. Tome 1. p 134, 3ième édition. 1981
- [3] : J. Chatelain " Machines électriques " Ed Dunod. Tome 1. Suisse. 1983.
- [4] : G. Zwingelstein, "Diagnostic des Défaillances ", Paris, Hermes, 1995.
- [5] : M.A. Abed, "Contribution à L'étude et au Diagnostic de la Machine Asynchrone", Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy-I, mars 2002.
- [6] : <C:\Users\hp CORE I5\Desktop\Les formes de Maintenance.html>
- [7] : G.K. Singh, S. AlKazzaz "Induction machine drive condition monitoring and diagnostic Research-a survey", Electric Power Systems Research, 64 ; 2003, p145-158
- [8] : P. Vas, "Parameter estimation, condition monitoring, and diagnosis of electrical machines", Clarendon Press, Oxford, 1993
- [9] : A. Menacer, "Contribution à l'identification des paramètres et des états d'une machine à induction pour diagnostic et développement de commande robuste: robustesse vis-à-vis de défauts", Thèse de doctorat, Université de Batna, Décembre 2007.
- [10] : R.Bousseksou "Modélisation analytique des machines Asynchrone application au diagnostic". Mémoire de Magister. Université Mentouri Constantine. Algérie 2007.
- [11] : S. Nandi, H.A. Toliyat, and Xiaodong Li, " Condition Monitoring and Fault Diagnosis of Electrical Motors-A Review", IEEE Transaction on Energy conversion , Vol. 20,No,4, December 2005 .
- [12] : H. Heno, and al. "A frequency-domain detection of stator winding faults in induction machines using an external flux sensor," IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 39, No. 5, pp. 1272–1279, Sep./Oct. 2003.
- [13] : J. R. Cameron and al. "Vibration and Current Monitoring for Detecting Airgap eccentricity in Large Induction Motors", I EE Proceedings, May 1986, pp. 155-163.
- [14] : W. R. Finley, M. M. Hodowanec, W. G. Holter, "An analytical approach to solving motor vibration problems," IEEE Transactions on Industry Application, Vol. 36, No. 5, pp. 1467-1480. Sept /Oct. 2000

Bibliographie :

- [15] : Caryn M. Riley, Student Member, IEEE, Brian K. Lin, Thomas G. Habetler, Senior Member, IEEE, and Randy R. Schoen, Member, IEEE, "A Method for Sensorless On-Line Vibration Monitoring of Induction Machines", Nov. /Dec. 1998.
- [16] : M. Sahraoui, " Etude comparative des méthodes de diagnostic des machines asynchrones," Thèse de Doctorat, Université de Biskra, Déc. 2010.
- [17] : A.Khatir. Etude comparative des modèles des machines asynchrones utilisés en diagnostic des défauts .Thèse de Magister .Université Ferhat Abbas de Sétif .Algérie 2009.
- [18] : J.S.Hsu, "Monitoring of Defects in Induction Motors Through Air-Gap Torque Observation", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 31, No.5, Sept./Oct. 1995, pp. 1016-1021.
- [19] : R. Maier, "Protection of Squirrel-Cage Motor Utilizing Instantaneous Power and Phase Information", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 28, No. 2, March/April 1992, pp. 376-380.
- [20] : S. E. Legowski, A and al., "Instantaneous Power as Medium for the Signature Analysis of Induction Motors". IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 32, No.4, July/August 1996, pp. 904-909.
- [21] : A. Ghoggal, "Diagnostic de la machine asynchrone triphasée: modèle dédié à la détection des défauts, " Thèse de Magistère, Université de Batna, Algérie, May 2005.
- [22] : E. Oran Brigham, "Fast Fourier transform and its applications," Prentice Hall, 1988.
- [23] : A.Dida, S.Torurqui " Simulation du moteur asynchrone à cage «Modèle multi enroulement» dédié au diagnostic des défauts ", P F E en Electrotechnique, Encadrés par Mr. A.Menacer, Biskra, 2004.
- [24] : H. Razik, G.Didier, "Notes de cours sur le diagnostic de la machine asynchrone," Notes de cours, I.U.F.M. de Lorraine, Maxeville, 7 janvier 2003.
- [25] : E. Ritchie, X. Deng, "Dunamic model of three-phase squirrel cage induction motors with rotor faults," in Proceeding of ICEM94, B.6 Modelling and Simulation, Paris, France, 1994, pp. 694-698.
- [26] : Sahraoui.Mohamed "Contribution aux diagnostics des machines asynchrones triphasées à cage " Université Mohamed Khider Biskra, 10/2003.
- [27] : Voitto. Kokko, "Condition monitoring of squirrel-cage motors by axial magnetic flux measurements" Department of Electrical Engineering, Optoelectronics and Measurement Techniques Laboratory, University of OULU 2003
- [28] : Delphine Thailly, Amine Yazidi,Humberto Henao, Gérard-André Capolino, Pierre Suau, " Diagnostic de machines électriques par analyse du champ magnétique de dispersion " ,le l'Université Picardie Jules Verne. REE N° 11 Décem 2006.pp 49-62.

Bibliographie :

- [29] : D.O.Abdeslam, "Techniques neuromimétiques pour la commande dans les systèmes électriques : application au filtrage actif parallèle dans les réseaux électriques basse tension" Thèse de doctorat de l'université de Haute-Alsace, Décembre 2005.
- [30] : M.H.J.Bollen, Y.H.Gu, "Signal Processing Of Power Quality Disturbances". John Wiley, 2006.
- [31] : Dr. LABAR Hocine "Etude des performances d'une machine asynchrone alimentée par une source de tension perturbée", UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA, 2010
- [32] : BENDEMMAGH Walid "Commande de la machine asynchrone par la cascade hyposynchrone à base des logiciels SIMPLORER et MATLAB" UNIVERSITE DE SETIF 1-Oct/ 2013
- [33] : Laroche Jacques "L'électronique de puissance, cours et exercices corrigés" Edition DUNOD, année 2005
- [34] : BENBRAHIM Amel "Commande Prédictive Généralisée d'une Machine Synchrone à Aimants Permanents" thèse Magistère Université de BATNA 2009
- [35] : KHOV Makara "Surveillance et diagnostic des machines synchrones à aimants permanents", Thèse Doctorat De L'université De Toulouse 2009.
- [36] : CHEMMOURI Boudjemaa "Commande Non-Lineaire D'une Machine Synchrone A Aimants Permanents", Diplôme D'ingénieur D'état En Génie Electrotechnique Université Mohamed Boudiaf De M'sila 2005.
- [37] : Allal Abderrahim "Grandeurs non invasives pour le diagnostic des machines asynchrones", Thèse Magistère-Université Farhat Abbas Setif –mai 2010
- [38] : Arezki Menacer Mohamed-Saïd Naït-Saïd A/Hamid Benakcha Saïd Drid "Stator current analysis of incipient fault into asynchronous motor rotor bars using fourier fast transform" Journal of Electrical Engineering, Vol. 55, N°. 5-6, 2004, 122-130.
- [39] : M. H. Benbouzid, "A Review of Induction Motors Signature Analysis as a Medium For Faults Detection", IEEE Transactions on Industrial Electronics, October 2000,.
- [40] : A.Maghraoui, A.Deboucha, "Diagnostic des défauts dans les moteurs asynchrones triphasés à cage". Université de Biskra 2006.
- [41] : Randy Supangat, Nesimi Ertugrul, Wen L. Soong, Douglas A. Gray, Colin Hansen and Jason Grieger "Broken rotor bar fault detection in induction motors using starting current analysis" School of Electrical and Electronic Engineering, University of Adelaide, Australia.
- [42] : SZABÓ Loránd , DOBAI Jenő Barna "Rotor faults detection in squirrel-cage induction motors by current signature analysis" - International Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics May /2004, Cluj-Napoca, Romani pp1-6.

Bibliographie :

- [43] : Dr. Hamid A. Toliyat “Condition monitoring and fault diagnosis of electrical machinery” Advanced Electric Machines & Power Electronics Laboratory Department of Electrical Engineering, Texas a & M University (USA) 2002.
- [44] : I. Ahmed, N. Ertugrul and W.L. Soong “A study on the detection of fault frequencies for condition monitoring of induction machines” School of Electrical and Electronics Engineering University of Adelaide, Australia.

ANNEXE

Annexe 1 : PARAMETRES DU MOTEUR UTILISE

- $g_0 = 0.00038m$
- $r = 0.0375m$
- $N_b = 27$
- $N_s = 193$
- $L_a = 0.0175mH$
- $L_b = 0.33 * 10^{-6} H$
- $L_e = \left(\frac{0.33 * 10^{-6}}{N_b} \right) H$
- $Mu = 4.\pi.10^{-7}$
- $R_s = 4.1\Omega$
- $R_b = 74 * 10^{-6} \Omega$
- $R_e = \left(\frac{74 * 10^{-6}}{N_b} \right) \Omega$
- $p = 1$
- $l = 0.06m$