

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Mémoire de Fin d'Études

Présenté à

L'Université Echahid Hamma Lakhdar d'El Oued

Faculté de Technologie

Département de Génie Electrique

En vue de l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

En Commande Electrique

Présenté par

KADRINE Abderrahmane

Thème

Utilisation du Courant Statorique pour la Détection

Des Défauts dans les Machines Electriques

Soutenu le 25/05/2016. Devant le jury composé de :

M .BESSOUS Nouredine

Maitre assistant

Président

Mme .HALEM Noura

Maitre assistant

Rapporteur

M .SERHOUD Hicham

Maitre assistant

Examineur

Année Universitaire 2015/2016

A ma famille

A mes amis

REMERCIEMENTS

C'est à mon Dieu que j'adresse en premier lieu mes remerciements.

Je remercie tout d'abord le Docteur HALEM Noura, pour ses aides et pour ses encouragements sincères pour la finalisation de ce mémoire.

Je remercie vivement Professeur ZOUZOU Salah Eddine de l'université de Biskra (Directeur de Laboratoire LGEB), pour ses aides.

ملخص

تضمن هذا العمل دراسة تجريبية ومحاكاة تكسر القضبان في القفص الدوار في الماكنة الكهربائية اللامتزامة، وذلك باستخدام تقنية التحليل الطيفي للتيار الكهربائي في الساكن. محاكاة تكسر القضبان في المحرك الحثي تهدف أساسا إلى التحقق من تأثير تكسر القضبان على السلوك الكهربائي للماكنة خاصة في بقية القضبان في الجزء الدوار.

RESUME

Ce travail est consacré à l'étude expérimentale et à la simulation des cassures de barres dans la cage rotorique de la machine asynchrone triphasée en utilisant la technique d'analyse spectrale du courant statorique.

La simulation des barres cassées dans la machine asynchrone a le but de vérifier l'effet de cassure de barres rotoriques sur le comportement électrique de la machine asynchrone.

ABSTRACT

This work is devoted to experimental study and simulation of broken rotor bars in the rotor three-phase asynchronous machine (Induction machine) using the technique of spectral analysis of the stator current.

The simulation of broken bars in the asynchronous machine aims to verify the rotor bars breaking effect on the electrical behavior of the asynchronous machine. (Induction machine)

SOMMAIRE

SOMMAIRE

Sommaire	VI
Liste des figures	X
Liste des symboles	XIII
Introduction générale	1
Chapitre I : Généralités sur le diagnostic des défauts de la machine asynchrone	4
I.1 Introduction	4
I.2 Notion sur la sûreté de fonctionnement	4
I.2.1 La maintenance	5
I.2.2 La surveillance et le diagnostic	5
I.2.3 Défaillance et panne	6
I.3 Constitution du moteur asynchrone triphasé à cage	7
I.3.1 Stator	7
I.3.2 Rotor.....	8
I.3.3 Les paliers	9
I.4 Les principaux défauts dans la machine asynchrone	9
I.4.1 Défauts rotoriques	9
I.4.1.1 Causes	9
I.4.1.2 Types	9
I.4.1.2.1 Cassure de barres dans les machines asynchrones	9
I.4.1.2.2 Ruptures d'anneaux	10
I.4.2 Défauts statoriques	10
I.4.2.1 Défauts d'isolant dans un enroulement	11
I.4.2.2 Court-circuit entre spires	12
I.4.2.3 Court-circuit entre phases	12
I.5 Méthodes de diagnostic des défauts basés sur l'analyse spectrale des Signaux	13
I.5.1 Diagnostic par mesure des vibrations mécaniques	13
I.5.2 Diagnostic par mesure du Flux magnétique axial de fuite	13
I.5.3 Diagnostic par l'analyse des tensions statoriques induites	14

I.5.4	Diagnostic par mesure du couple électromagnétique	14
I.5.5	Diagnostic par mesure de la puissance instantanée	14
I.5.6	Diagnostic par mesure du courant statorique	14
I.6	Signatures spectrales des défauts dans le spectre du courant statorique ...	15
I.6.1	Défauts statoriques	15
I.6.2	Défauts rotoriques	15
I.6.3	Cassure de barres rotoriques	15
I.6.4	Excentricité d'entrefer	15
I.6.4.1	L'excentricité statique	16
I.6.4.2	L'excentricité dynamique	16
I.6.4.3	L'excentricité mixte	16
I.6.5	Défauts au niveau des roulements	18
I.7	Conclusion	19
Chapitre II : Modèle de la machine asynchrone dédié à la simulation du défaut		21
II.1	Introduction	21
II.2	Modèle multi-enroulements de la machine asynchrone	22
II.2.1	Calcul des inductances	23
II.2.1.1	Inductances statoriques	23
II.2.1.2	Inductances rotoriques	24
II.2.1.3	Inductance mutuelle stator-rotor	26
II.2.2	Mise en équations	29
II.2.2.1	Equations de tensions au stator	29
II.2.2.2	Equations de tensions au rotor	30
II.2.2.3	Equation globale des tensions	31
II.2.3	Expression du couple électromagnétique	36
II.3	Pris en compte du défaut dans le modèle	38
II.4	Conclusion	39
Chapitre III : Détection des défauts rotoriques par la technique MCSA		43
III.1	Introduction	43
III.2	Ruptures de barres dans les machines asynchrones	43
III.2.1	Étude analytique du défaut	43

III.3	Analyse spectrale du courant statorique	46
III.3.1	La Transformée de Fourier Rapide	46
III.4	Résultats et discussion	47
III.4.1	Résultats de simulation	47
III.4.2	Résultats expérimentaux	51
III.5	Conclusion	57
	Conclusion générale	58
	Bibliographie	60
	Annexe	63

LISTE DES FIGURES

LISTE DES FIGURES

Chapitre I: Généralités sur le diagnostic des défauts de la machine asynchrone	4
I.1 Surveillance	6
I.2 Structure de la machine asynchrone triphasée à cage	7
I.3 Durée de vie en fonction de la température de fonctionnement [5]	11
I.4 Types d'excentricité: (a) rotor concentré; (b) excentricité statique; (c) excentricité dynamique	17
I.5 Dimension du roulement à bille	18
 Chapitre II: Modèle de la machine asynchrone dédié à la simulation du défaut	 29
II.1 Structure du rotor	24
II.2 Induction magnétique produite par une maille rotoriques	25
II.3 Flux mutuel phase statorique-boucle rotorique	27
II.4 Schéma électrique équivalent des mailles rotoriques	30
II.5 Schéma équivalent de la cage rotorique pour a. Etat sain, b. Avec une barre rompue	38
 Chapitre III: Détection des défauts rotoriques par la technique MCSA	 43
III.1 Schéma de fonctionnement pour une machine saine et avec défaut	44
III.2 Le courant statorique de la machine saine (simulation)	48
III.3 Le courant dans une barre rotorique de la machine saine	48
III.4 Le courant rotorique dans la barre cassée (barre 1)	49
III.5 Le courant rotorique dans la barre adjacente (barre 2)	50
III.6 Le courant rotorique dans la barre adjacente (barre 28)	50
III.7 Le banc d'essai	51
III.8 Le rotor du moteur avec 2 barres cassées	51
III.9 Les tensions d'alimentation	52
III.10 Le courant statorique de la machine saine en pleine charge	52
III.11 Le courant statorique de la machine saine en pleine charge, avec une barre	53
III.12 Le courant statorique de la machine saine en pleine charge, avec deux barres	53

III.13 Spectre logarithmique du courant statorique de la machine saine en pleine53

III.14 Spectre logarithmique du courant statorique de la machine en pleine charge, avec une
seule barre rompue54

III.15 Spectre logarithmique du courant statorique de la machine en pleine charge, avec deux
barres rompues54

III.16 Spectre linéaire du courant statorique de la machine saine en pleine charge55

III.17 Spectre linéaire du courant statorique de la machine en pleine charge, avec deux barres
rompues55

III.18 Spectre linéaire du courant statorique de la machine saine en pleine charge56

III.19 Spectre linéaire du courant statorique de la machine en pleine charge, avec une seule
barre rompue56

III.20 Spectre linéaire du courant statorique de la machine en pleine charge, avec deux barres
rompues57

LISTE DES SYMBOLES

LISTE DES SYMBOLES

B_s : Induction magnétique dans l'entrefer créée par le courant statorique.

B_k : Induction magnétique dans l'entrefer produite par une maille rotoriques k.

i_{bk} : Courant dans la barre k.

i_{rk} : Courant dans la maille k.

i_e : Courant dans l'anneau de court- circuit.

i_{ek} : Courant dans une portion d'anneau.

i_a, i_b, i_c : Courants statoriques.

v_a, v_b, v_c : Tensions statoriques.

i_{ds}, i_{qs} : Composantes biphasées du courant statorique.

ϕ_s : Flux magnétique par pole créé par le courant statorique.

ϕ_{rk} : Flux principale créé par une maille rotoriques.

ψ_{sa} : Flux magnétique total créé par i_a et traversant l'enroulement de la phase "a".

ψ_{ds}, ψ_{qs} : Composantes biphasés du flux statorique.

F_m : La force magnéto motrice de la phase "a".

[R], [L] : Matrices globales des résistances et des inductances avant la transformation de Park.

[R_{tr}], [L_{tr}] : Matrices globales des résistances et des inductances après la transformation du Park.

μ_0 : Perméabilité magnétique du vide (de l'air).

θ_r : Position du rotor.

ω_s : Pulsation statorique.

ω_r : Vitesse électrique de rotation.

a : Angle électrique entre deux barres toriques.

σ : La force radiale créée par le champ d'entrefer.

f_b : La fréquence caractéristique d'un défaut au niveau d'une bille du roulement.

$f_{b.int}$: La fréquence caractéristique d'un défaut au niveau de la bague intérieure du roulement.

$f_{b.ext}$: La fréquence caractéristique d'un défaut au niveau de la bague extérieure du roulement.

MCSA: Motor Current Signature Analysis

INTRODUCTION GÉNÉRALE

INTRODUCTION GENERALE

Les espaces industriels de plus en plus complexes, doivent être constamment performants avec un souci constant de sécurité optimale aussi bien pour les personnes que pour le matériel et les divers équipements. Ces contraintes objectives doivent être gérées pour maintenir une rentabilité optimale de la production.

Ceci exige la mise en œuvre de systèmes de prévision et de détection anticipée de défauts, sachant qu'aucun système n'est à l'abri d'une défaillance dont les conséquences seraient préjudiciables à tous les niveaux. Ainsi, depuis quelques années, il est devenu possible de créer des systèmes de supervision et de diagnostic grâce à l'apport considérable de l'outil informatique et du matériel numérique. Le rôle est de signaler la présence des dysfonctionnements dans le processus et à tous les niveaux

Actuellement, la plupart des équipements industriels sont à base de machines asynchrones triphasées, du fait de leur robustesse et de leur faible coût. Cependant, bien que robustes, ces machines ne sont pas infaillibles. Les principaux défauts recensés sont les courts circuits entre spires des bobinages du stator (dus aux vieillissements des isolants), les dégradations des anneaux au rotor et tous les problèmes de barres (ruptures ou imperfections).

A la suite de ce qui précède, le mémoire est organisé en trois chapitres.

Le premier recense les différents défauts des machines asynchrones d'une manière plus ou moins brève, on y trouve des techniques de détection et de diagnostic des défauts choisies parmi quelques travaux de doctorats.

Le deuxième chapitre est consacré à la présentation du modèle de la machine asynchrone pour la simulation des ruptures de barres où nous présentons le développement du modèle multi enroulements dans une approche analytique.

Dans le troisième chapitre, nous validons modèle par simulation et nous avons présenté les résultats de la machine saine et avec défauts. Les résultats expérimentaux seront confrontés dans le but de valider les résultats de simulation.

Enfin une conclusion clôture notre travail.

**GÉNÉRALITÉS SUR LE
DIAGNOSTIC DES DÉFAUTS
DE LA MACHINE
ASYNCHRONE**

Chapitre I

GENERALITES SUR LE DIAGNOSTIC DES DEFAUTS DE LA MACHINE ASYNCHRONE

I. Introduction

Caractérisée par sa robustesse, son coût absolument bas, son entretien moins fréquent, le manque de collecteurs, sa puissance massique élevée ..., la machine asynchrone demeure la plus utilisée dans presque tous les secteurs industriels. Elle présente beaucoup d'autres avantages par rapport aux autres types de machines électriques. C'est à cause de ces avantages que nous avons choisi la machine asynchrone pour notre étude.

La surveillance est un moyen d'assurer le bon fonctionnement de ce type de machine. Le diagnostic est une partie de la surveillance qui a pour objectif de trouver les causes des dysfonctionnements. Dans ce contexte nous représenterons dans ce premier chapitre un ensemble des notions de base concernant la maintenance et le diagnostic. Puis, nous explorons rapidement les différents constituants de la machine asynchrone à cage. Nous rappellerons les divers défauts qui peuvent affectés la machine asynchrone. Nous verrons par la suite les différentes méthodes utilisées en diagnostic ainsi que les diverses techniques de traitement du signal pouvant être utilisés pour la détection des défauts.

I.2. Notion de sûreté de fonctionnement

La sûreté de fonctionnement peut être définie par l'aptitude d'une entité à satisfaire une ou plusieurs fonctions requises dans des conditions données. Elle est scientifiquement caractérisable par l'étude statique et dynamique des systèmes du point de vue prévisionnel, opérationnel et expérimental, en tenant compte des aspects de probabilités et de conséquences liées aux défaillances. La démarche "sûreté de fonctionnement" s'appuie sur quelques notions de base, qui se sont précisées au cours de l'évolution de cette discipline, et qui continuent à s'affiner. La sûreté de fonctionnement possède, comme toute science, ses propres concepts terminologiques. Parcourir ce vocabulaire de base est donc une introduction nécessaire à cette discipline [1].

I.2.1. La maintenance

La notion de maintenance revêt une importance particulière dans le contexte de la sûreté de fonctionnement. Elle englobe en effet les concepts liés à la surveillance et au diagnostic auxquels nous nous intéressons plus particulièrement. Nous donnons ci-après quelques définitions relatives à ce terme [2].

- ❖ **Maintenance**: ensemble des 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.
- ❖ **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 de dégradation du bien ou du service.
- ❖ **Maintenance corrective**: ensemble des activités réalisées après la défaillance d'un bien, ou la dégradation de sa fonction, pour lui permettre d'accomplir une fonction requise, au moins provisoirement. La maintenance corrective comprend en particulier : la localisation de la défaillance et son diagnostic, la remise en état avec ou sans modification, le contrôle du bon fonctionnement.
- ❖ **Maintenance curative**: activités de maintenance corrective ayant pour objet de rétablir un bien dans un état spécifié ou de lui permettre d'accomplir une fonction requise. Le résultat des activités réalisées doit présenter un caractère permanent. Ces activités peuvent être : des réparations, des modifications ou des améliorations ayant pour objet de supprimer la ou les défaillances.

I.2.2. La surveillance et le diagnostic

La tâche principale d'un ingénieur est de garantir la fiabilité, la disponibilité et la sûreté des systèmes industriels. Les définitions de ces caractéristiques sont [3]:

- **Fiabilité**: c'est l'aptitude d'un système à accomplir sa mission dans des conditions données d'utilisation.
- **Disponibilité**: c'est l'aptitude d'un système à fonctionner lorsqu'on le sollicite.
- **Supervision**: les variables mesurées sont comparées à des valeurs de référence et le résultat est affiché et lu par l'opérateur.

- **Protection automatique:** dans le cas d'une anomalie dangereuse, la tâche du moniteur est de déclencher automatiquement des actions préventives. Ces actions ont pour objectif de garantir la sûreté de l'opérateur et du système.
- **Diagnostic:** consiste à détecter de façon précoce un défaut avant qu'il ne conduise à une défaillance.

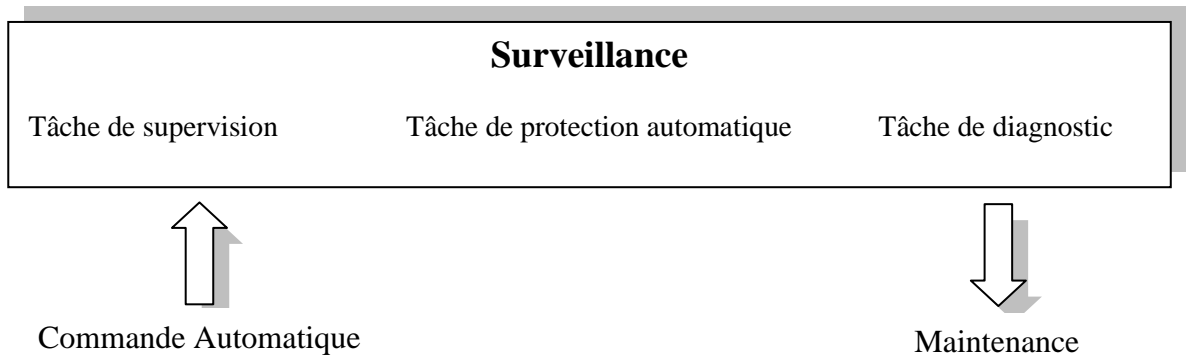


Figure I.1. Surveillance [3].

I.2.3. Défaillance et panne

Enfin, pour finir ce parcours non exhaustif du vocabulaire lié à la sûreté de fonctionnement, il serait utile de définir avec précision les termes de défaillance et panne [2].

- **Défaillance:** cessation de l'aptitude d'une entité à accomplir une fonction requise. Après défaillance d'une entité, cette entité est en état de panne. Une défaillance est un passage d'un état à un autre par opposition à une panne qui est un état.
- **Défaillance partielle:** défaillance à la suite de laquelle le bien ne peut accomplir qu'une partie des fonctions requises ou ne peut les accomplir qu'avec des performances limitées.
- **Défaillance complète:** défaillance qui entraîne l'inaptitude totale de l'entité à accomplir toutes les fonctions requises.
- **Panne:** état d'une entité inapte à accomplir une fonction requise dans des conditions données d'utilisation.
- **Panne complète:** panne résultant d'une défaillance complète.

Il est clair que dès l'apparition d'une défaillance, caractérisée par la cessation d'une entité à accomplir sa fonction, celle-ci est déclarée en panne. Par conséquent, une panne résulte toujours d'une défaillance.

I.3. Constitution d'une machine asynchrone triphasée à cage

Comme déjà signalé au début de ce chapitre. Le système considéré dans ce travail est donc le moteur asynchrone triphasé à cage d'écureuil. La fonction de ce système est d'assurer la conversion de l'énergie électrique fournie par le réseau en énergie mécanique de rotation avec un niveau de performances donné. Si la fonction de ce système n'est plus assurée, avec les performances demandées, suite à un incident quelconque, le système est alors jugé défaillant. Dans ce paragraphe, on se propose de donner quelques informations sur les constituants de cette machine et de leurs fonctions [4].

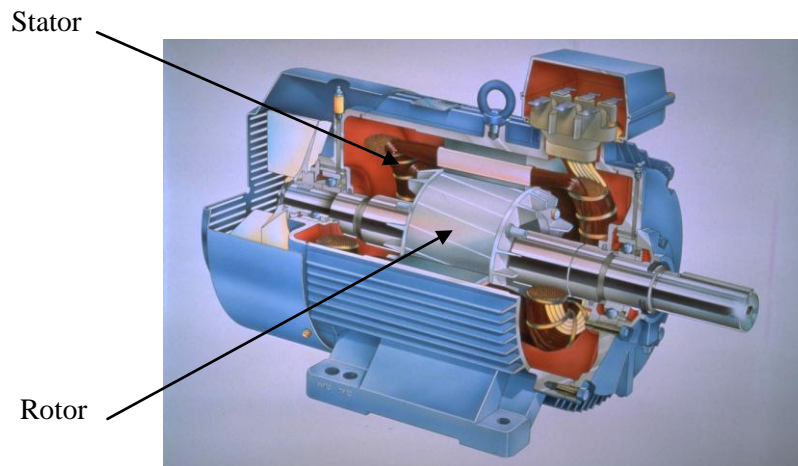


Figure I.2. Structure de la machine asynchrone triphasée à cage.

I.3.1. Le stator

C'est une partie fixe connectée à l'alimentation électrique, il est constitué principalement d'un circuit magnétique formé d'un empilage de tôles (matériau ferromagnétique) dans lesquelles sont découpées des encoches parallèles à l'axe de la machine. Ces tôles sont habituellement recouvertes de vernis pour limiter l'effet de courant de Foucault. Donc, la fonction du circuit magnétique est d'assurer le logement et le maintien des conducteurs statoriques dans les encoches. En plus, il garantit la circulation du flux magnétique avec minimum de pertes.

Le stator comporte aussi des enroulements (bobinages) répartis dans les encoches du circuit magnétique. Le bobinage statorique peut se décomposer en deux parties : les conducteurs

d'encoches et les têtes de bobines. La fonction des conducteurs d'encoches assurer la production d'un champ magnétique tournant à répartition sinusoïdale dans l'entrefer, lorsque ils sont parcourus par un ensemble de courants sinusoïdaux triphasés équilibrés. Ce champ magnétique est à l'origine de la conversion électromagnétique. Les têtes de bobines permettent, quant à elles, la fermeture des courants en organisant la circulation judicieuse des courants d'un conducteur d'encoche à l'autre. L'isolation entre les conducteurs et le fond des encoches, ainsi qu'entre les groupes de bobines s'effectue à l'aide des matériaux diélectriques de différents types selon les machines asynchrones.

Le stator comprend également une boîte à bornes à laquelle est reliée l'alimentation électrique. Tous ces composants statoriques sont englobés dans le carter; qui présente une protection contre l'environnement extérieur et assure la fixation de la machine ainsi que le support et le centrage des flasques. Généralement, on trouve sur le carter des ailettes qui permettent le refroidissement de la machine [2], [4].

I.3.2. Le rotor

C'est une partie tournante, qui permet de mettre en rotation la charge mécanique. Le rotor est constitué d'un arbre qui est généralement fabriqué en acier moulé, il permet la transmission de l'énergie mécanique produite vers la charge. Ses extrémités présentent un support pour les bagues intérieures des roulements à billes. L'arbre de la machine asynchrone assure le support et le centrage d'un circuit magnétique rotorique formé des tôles d'acier, tout comme le stator. Il a comme fonction d'assurer le logement des conducteurs rotoriques et de garantir la circulation du flux magnétique.

Les rotors des machines asynchrones peuvent être de deux types : bobinés ou à cage. Les enroulements des rotors bobinés sont construits de la même façon que les enroulements statoriques. Les phases rotoriques sont alors disponibles grâce à un système bagues – balais positionné sur l'arbre de la machine. En ce qui concerne les rotors à cage, les enroulements rotoriques sont constitués des barres de cuivre ou d'aluminium. Ces barres sont court-circuitées à chaque extrémité par des anneaux de court-circuit fabriqués aussi en cuivre ou en aluminium. En générale, les conducteurs rotoriques ont comme fonction d'assurer la production de l'énergie mécanique par interaction entre le champ tournant créé par leurs courants induits et le champ tournant produit par les courant statoriques.

Les rotors des machines asynchrones comportent aussi un ventilateur afin d'améliorer le refroidissement [2], [4].

I.3.3. Les paliers

Ce sont des organes mécaniques permettant la mise en rotation du rotor et assurant le maintien des différents sous-ensembles. Les paliers maintiennent le rotor et assurent sa libre rotation. Ils sont constitués des flasques et des roulements à billes. Les flasques moulés en fonte sont fixés sur le carter statorique, ils assurent le support et le centrage des bagues extérieures des roulements à billes. Ces derniers insérés à chaud sur l'arbre garantissent le guidage en rotation du rotor [2].

I.4. Les principaux défauts dans la machine asynchrone

I.4.1 Défauts rotoriques

I.4.1.1. Causes

Les causes qui peuvent entraîner des défauts dans le rotor sont [5]:

- Thermique (Surcharge,...)
- Électromagnétique (Force En $B^2(T)$...)
- Résiduel (Déformation,...)
- Dynamique (Arbre De Transmission,...)
- Environnemental (Agression,...)

I.4.1.2. Types

I.4.1.2.1. Cassure de barres dans les machines asynchrones

La cassure ou rupture de barre est un des défauts les plus fréquents au rotor. Elle peut se situer soit au niveau de son encoche soit à l'extrémité qui la relie à l'anneau de court-circuit. La détérioration des barres réduit la valeur moyenne du couple électromagnétique et augmente l'amplitude des oscillations, qui elles-mêmes provoquent des oscillations de la vitesse de rotation, ce qui engendre des vibrations mécaniques et donc, un fonctionnement anormal de la machine. La grande amplitude de ces oscillations accélère la détérioration de la machine. Ainsi, le couple diminue sensiblement avec le nombre de barres cassées induisant un effet cumulatif de la défaillance. L'effet d'une cassure de barre croît rapidement avec le nombre de barres cassées [5].

I.4.1.2.2. Ruptures d'anneaux

La rupture d'une portion de l'anneau de court-circuit dans une machine asynchrone à cage, est un défaut qui apparaît aussi fréquemment que la cassure de barres. Ces ruptures peuvent être dues à des bulles de coulées ou aux dilatations différentielles entre les barres et les anneaux. Comme il est difficile de le détecter, ce défaut est généralement groupé, voire confondu, avec la rupture de barres dans les études statistiques. Ces portions d'anneaux de court-circuit véhiculent des courants plus importants que ceux des barres rotoriques. De ce fait, un mauvais dimensionnement des anneaux, une détérioration des conditions de fonctionnement (température, humidité,...) ou une surcharge de couple et donc de courants, peuvent entraîner leur cassure. La rupture d'une portion d'anneau déséquilibre la répartition des courants dans les barres rotoriques et de ce fait, engendre un effet de modulation d'amplitude sur les courants statoriques similaire à celui provoqué par la cassure de barres [5].

I.4.2. Défauts statoriques

L'armature statorique, munie de son bobinage est une partie de la machine qui subit beaucoup de contraintes et dont les effets sont plus importants à cause de la complexité de la structure et la fragilité de certaines parties telles que les isolants. Pour le stator, les défaillances sont principalement dues à un problème [5]:

- ❖ **Thermique:** l'isolation est conçue pour avoir une certaine durée de vie à la température nominale. Toutefois, si la température augmente au-dessus de cette température de fonctionnement, la durée de vie raccourcit rapidement (Fig. I-4). Cette augmentation de la température peut être due à une variation de tension ou de déséquilibre, à la répétition des démarrages dans un court laps de temps, à des surcharges, à une mauvaise ventilation ou alors à une haute température ambiante.
- ❖ **Electrique:** Une tension supérieure à la valeur nominale ou de hautes valeurs de dV/dt du à l'ouverture et la fermeture des interrupteurs du convertisseur statique, vont conduire à la dégradation du diélectrique assurant l'isolation des bobines. La présence d'un fort champ électrique interne conduira à des décharges partielles dans les cavités de l'isolant. Il en résulte des spots carbonisés dans l'isolation. Ces spots causent des déformations du champ électrique (augmentation dans la région du défaut).
- ❖ **Mécanique:** les démarrages répétitifs de machine ont pour conséquence d'augmenter la température dans le cuivre (bobinage statorique et cage). Cet effet cyclique provoque des dilatations et contractions répétitives de l'isolant. Cela pourrait entraîner des fissures dans

l'isolant qui peuvent se propager et provoquer un début de court-circuit interne. Les efforts mécaniques sur les tôles et les conducteurs ont des composantes alternatives qui provoquent des vibrations de la structure. Ces vibrations provoquent l'érosion et l'abrasion de l'isolant entraînant leur détérioration. Une modélisation assez fine de ces phénomènes est présentée dans.

- ❖ **Environnemental:** La présence d'humidité ou de produits chimiques dans l'air ambiant peut détériorer la qualité de l'isolation et conduire à défaut d'enroulement. Le début de la dégradation entraîne des courants de fuites qui accélèrent la détérioration de l'isolant jusqu'au court-circuit franc. Une autre conséquence est la création de l'ozone et les oxydes d'azote qui peuvent se combiner avec l'humidité pour former de l'acide nitrique, qui détruit l'isolant.

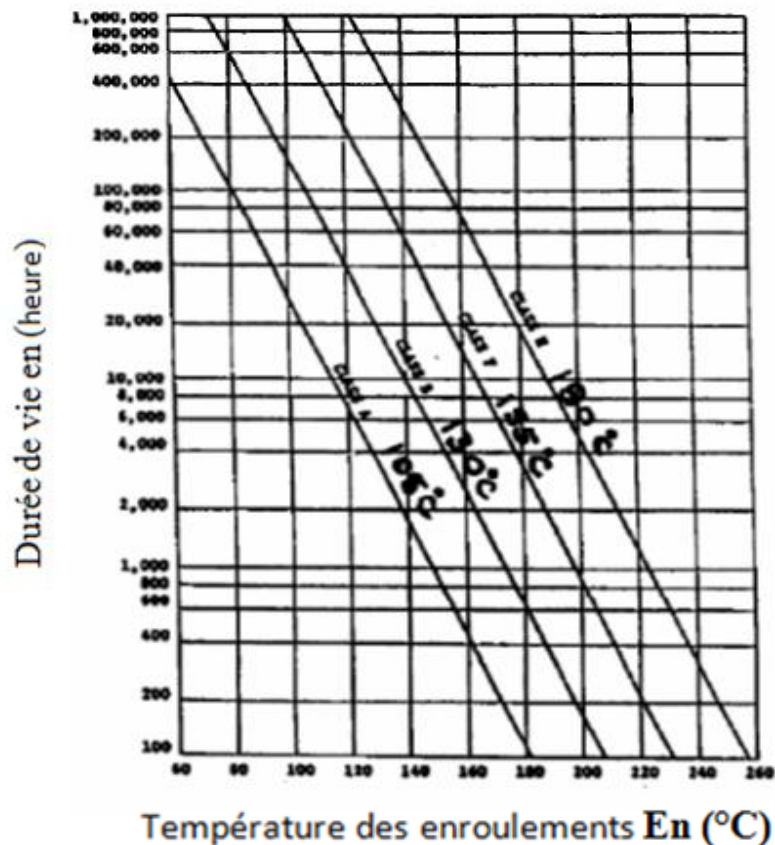


Figure I.3. Durée de vie en fonction de la température de fonctionnement [5].

I.4.2.1. Défauts d'isolant dans un enroulement

La dégradation des isolants dans les enroulements peut provoquer des courts-circuits. En effet, les différentes pertes (Joule, fer, mécanique,...) engendrent une augmentation de la

température des différents constituants du moteur. Or les matériaux d'isolation ont une limite de température, de tension et mécanique. Dans ce cas, un court-circuit peut apparaître dans l'enroulement concerné. Les différentes causes pour ce type de défaut sont [5]:

- dégradation de l'isolant à la fabrication.
- tension de l'enroulement supérieure à la limite du matériau d'isolation.
- courant élevé dans l'enroulement dû à un court-circuit, un défaut du convertisseur, une surcharge.
- vibrations mécaniques.
- vieillissement naturel des isolants. Tous les matériaux isolants ont une durée de vie limitée. Même dans une utilisation normale, l'isolant finit naturellement par se dégrader.
- fonctionnement dans un environnement sévère.

Lorsque le défaut de l'isolant se crée sur une spire, le courant de défaut circule entre le cuivre de cette spire et la tôle du stator (défaut phase - masse). Il peut aussi circuler entre deux spires d'une même phase si l'isolant qui les sépare est détérioré (défaut entre-spires).

I.4.2.2. Court-circuit entre spires

Un court-circuit entre spires de la même phase est un défaut assez fréquent. Ce défaut a pour origine un ou plusieurs défauts d'isolant dans l'enroulement concerné. Il entraîne une augmentation des courants statoriques dans la phase affectée, une légère variation de l'amplitude sur les autres phases, modifie le facteur de puissance et amplifie les courants dans le circuit rotorique dans le cas des machines asynchrones. Ceci a pour conséquence une augmentation de la température au niveau du bobinage et, de ce fait, une dégradation accélérée des isolants, pouvant provoquer ainsi, un défaut en chaîne (apparition d'un 2ème court-circuit) [5].

I.4.2.3. Court-circuit entre phases

Ce type de défaillance peut arriver en tout point du bobinage, cependant les répercussions ne seront pas les mêmes selon la localisation. Cette caractéristique rend difficile une analyse de l'incidence de ce défaut sur le système.

L'apparition d'un court-circuit proche de l'alimentation entre phases, induirait des courants très élevés qui conduiraient à la fusion des conducteurs d'alimentation et/ou à la disjonction par les protections [5].

I.5. Méthodes de diagnostic des défauts basées sur l'analyse spectrale des signaux

Pour effectuer le diagnostic d'une installation industrielle, les opérateurs de maintenance analysent un certain nombre de signaux issus de la machine. En effet, l'évolution temporelle et le contenu spectral de ces signaux, peuvent être exploités pour détecter et localiser les anomalies qui affectent le bon fonctionnement de la machine. D'après la littérature, les principales techniques du diagnostic utilisées pour obtenir des informations sur l'état de santé de la machine sont les suivantes [6]:

I.5.1. Diagnostic par mesure des vibrations mécaniques

Le diagnostic des défauts en utilisant les vibrations mécaniques est la méthode la plus utilisée dans la pratique. 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.

$$\sigma(\theta, t) = \frac{B_s^2(\theta, t)}{2\mu_0} \quad (\text{I.1})$$

La distribution de l'induction magnétique dans l'entrefer, est le produit de la F.m.m (Fm) et de la perméance (P).

$$B = Fm.P \quad (\text{I.2})$$

La force magnétomotrice contient les effets des asymétries du stator ou du rotor, en plus la perméance dépend de la variation de l'entrefer (à cause des ouvertures des encoches statoriques et rotoriques, l'excentricité). De ce fait, l'analyse spectrale des signaux de vibrations mécaniques, permet la détection aussi bien les défauts électriques que mécaniques. Les spectres des signaux de vibrations, issus du moteur avec défaut, sont comparés avec ceux enregistrés lorsque le moteur est en bon état. Les vibrations de la machine peuvent être captées par des accéléromètres [6].

I.5.2. Diagnostic par mesure du Flux magnétique axial de fuite

Dans une machine idéale et sans défaut, les courants et les tensions statoriques sont équilibrés, ce qui annule le flux de fuite axial. La présence d'un défaut quelconque, provoque un déséquilibre électrique et magnétique au niveau du stator ce qui donne naissance à des flux de fuite axial de valeurs dépendent au degré de sévérité du défaut. Si on place une bobine autour de l'arbre de la machine, elle sera le siège d'une force électromotrice induite. L'analyse

spectrale de la tension induite dans cette bobine peut être exploitée pour détecter les différents défauts [6].

I.5.3. Diagnostic par l'analyse des tensions statoriques induites

Une nouvelle technique a été proposée pour la détection des défauts rotoriques dans les machines asynchrones. Cette technique, est basée sur l'exploitation du contenu fréquentielle de la tension induite, par le flux rotorique, dans les enroulements statoriques pendant la déconnexion du moteur de réseau. La rupture d'une barre va affecter directement la tension induite dans les enroulements statoriques. En utilisant cette approche, les effets du non – idéalité de la source (déséquilibres et présence des harmoniques) ainsi que la non – linéarité des caractéristiques magnétiques de la machine peuvent être évités [6].

I.5.4. Diagnostic par mesure du couple électromagnétique

Cette technique, permet de détecter aussi bien les défauts rotoriques que les défauts de court-circuit entre spires dans les bobines statoriques. Le couple électromagnétique développé dans les machines électriques, provient de l'interaction entre le champ statorique et celui rotorique. Par conséquent, tous défauts, soit au niveau du stator ou au rotor, affectent directement le couple électromagnétique. L'analyse spectrale du signal du couple (mesuré ou estimé), donne des informations sur l'état de santé du moteur [6].

I.5.5. Diagnostic par mesure de la puissance instantanée

L'utilisation de la puissance instantanée pour la détection des défauts dans les moteurs asynchrones, fait l'objet des nombreux travaux. La puissance instantanée est la somme des produit des courants est des tensions dans les trois phases statoriques. Donc, le niveau des informations, apportées par cette grandeur, est plus grand que celui apportées par le courant d'une seule phase. Ceci présente l'avantage de cette méthode par apport aux autres [6].

I.5.6. Diagnostic par mesure du courant statorique

Parmi tout les signaux utilisables, le courant statorique s'est avéré être l'un des plus intéressants, car, il est très facile d'accès et il nous permet de détecter aussi bien des défauts électromagnétiques que des défauts purement mécaniques. Cette technique est dénommée dans la littérature "Motor Current Signature Analysis" (MCSA). Les défauts de la machine asynchrone se traduisent dans le spectre du courant statorique par [6], [7]:

- ✓ L'apparition des raies spectrales dont les fréquences sont directement liées à la fréquence de rotation de la machine, aux fréquences des champs tournants et aux paramètres physiques de la machine (nombre d'encoche rotorique et nombre de paires de pôles).
- ✓ La modification de l'amplitude des raies spectrales, déjà présentes dans le spectre du courant.

La surveillance via le courant statorique nécessite une bonne connaissance des défauts et leurs signatures.

I.6. Signatures spectrales des défauts dans le spectre du courant statorique

I.6.1. Défauts statoriques

Les défauts statoriques les plus courants sont la mise en court circuit d'une ou plusieurs spires de son bobinage, la fréquence caractéristique de ce défaut est:

$$f_{cs} = f_s \left\{ \frac{n}{p} (1-g) \pm k \right\} \quad (I.3)$$

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

I.6.2. Défauts rotoriques

L'analyse du spectre du courant statorique en régime permanent, fournit des indications sur les défaillances rotoriques telles que les ruptures de barres, d'anneaux de court-circuit ou l'excentricité d'entrefer.

I.6.3. Cassure de barres rotoriques

Une asymétrie rotorique générée par la présence de barres rotoriques cassées produit des raies spectrales autour de la fréquence fondamentale f_s telles que :

$$f_{brc} = f_s (1 \pm 2kg) \quad (I.4)$$

L'amplitude de ces composantes spectrales est proportionnelle à la sévérité du défaut.

I.6.4. Excentricité d'entrefer

Les effets des défauts mécaniques se manifestent généralement au niveau de l'entrefer par des défauts d'excentricité. L'excentricité d'une machine électrique est un phénomène qui évolue dans le temps et qui existe dès sa fabrication. La présence d'un certain niveau d'excentricité

est normale dans les machines électriques. Des fabricants et utilisateurs spécifient un niveau admissible maximum de 5%, tandis que dans d'autres cas, un niveau maximum de 10% de la largeur d'entrefer est toléré

Trois catégories d'excentricité sont généralement distinguées:

I.6.4.1. L'excentricité statique

Généralement due à un désalignement de l'axe de rotation du rotor par rapport à l'axe du stator. Elle résulte d'un défaut de centrage des flasques et se manifeste même dans des machines fabriquées récemment en raison des méthodes de fabrication et d'assemblage [22] (voir figure I.4.b).

I.6.4.2. L'excentricité dynamique

Ce type d'excentricité est causé par une déformation du cylindre rotorique, une déformation du cylindre statorique ou la détérioration des roulements à billes. Elle correspond au décalage du centre de rotation du rotor par rapport au centre géométrique du stator, avec en plus, une rotation du centre du rotor autour du centre géométrique de ce stator (voir figure I.5.c).

I.6.4.3. L'excentricité mixte

En réalité, les excentricités statiques et dynamiques ont tendance à co-exister. Un niveau inhérent d'excentricité statique existe toujours, même dans des machines de fabrication récentes. Cela provoque des efforts réguliers d'attraction magnétiques non compensés dans une seule direction, et avec le temps cela peut conduire à la flexion d'un arbre et la dégradation de roulement ..., tout cela entamant une excentricité dynamique. Sans détection précoce, l'excentricité devient suffisamment grande pour développer des forces radiales déséquilibrées qui peuvent créer un frottement entre le stator et le rotor, ce qui mène à une panne très grave de la machine.

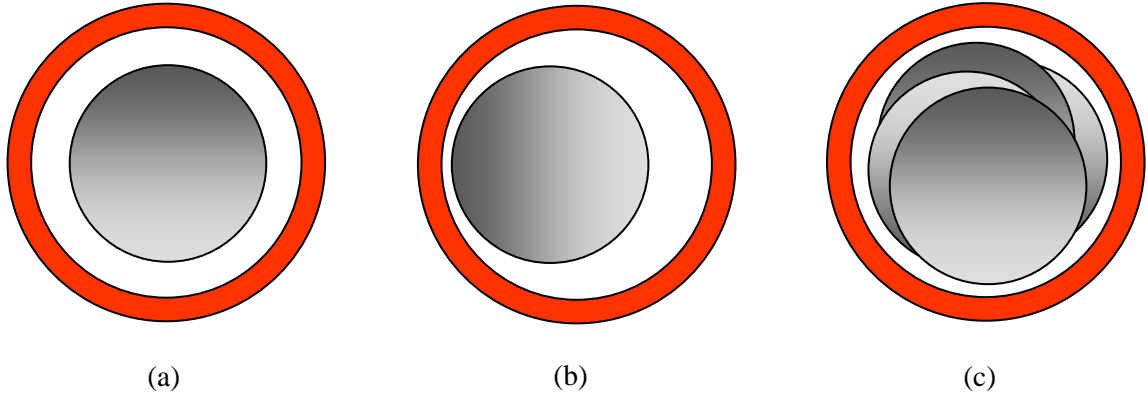


Figure I.4. Types d'excentricité: (a) rotor concentré; (b) excentricité statique; (c) excentricité dynamique [4].

$$f_{\text{exc}} = f_s \left[1 \pm k \frac{(1-g)}{p} \right] \quad (\text{I.5})$$

Avec : $k = 1, 2, 3, \dots$

La détection des excentricités est aussi possible en surveillant les harmoniques principales d'encoches du courant et certaines de leurs composantes spectrales latérales. Cette méthode nécessite la connaissance du nombre d'encoches rotoriques N_e . Les fréquences des composantes spectrales d'encoches et de celles associées aux excentricités d'entrefer dynamiques sont les suivantes :

$$f_{\text{enc+exc}} = f_s \left[(k N_e \pm n_d) \frac{(1-g)}{p} \pm n_w \right] \quad (\text{I.6})$$

$n_d = 0$, dans le cas d'une excentricité statique et $n_d = 1$, dans le cas d'une excentricité dynamique.

N_e est le nombre d'encoches rotoriques.

$k=1, 2, 3, \dots$ et $n_w=1, 3, 5, 7, \dots$ (l'ordre de l'harmonique de la Fmm du stator)

La présence d'une excentricité statique, modifie l'amplitude des harmoniques principales d'encoches du courant statorique, tandis que celle d'une excentricité dynamique fait apparaître de nouvelles raies spectrales.

I.6.5. Défauts au niveau des roulements

Puisque les éléments roulants du roulement supportent le rotor, quelque soient les défauts dans les roulements, ils vont produire des mouvements radiaux entre le rotor et le stator dans la machine. Par conséquent, des variations d'entrefer génèrent dans le courant statorique des raies spectrales de fréquence:

$$f_{\text{roul}} = |f_s \pm kf_v| \quad (\text{I.7})$$

D'où : $k = 1, 2, \dots$,

f_v est l'une des fréquences caractéristiques des vibrations (f_b , $f_{b. \text{int}}$ ou $f_{b. \text{ext}}$)

Les fréquences caractéristiques des vibrations dépendent de l'élément du roulement affecté par un défaut et sont liées sur les paramètres physiques du roulement.

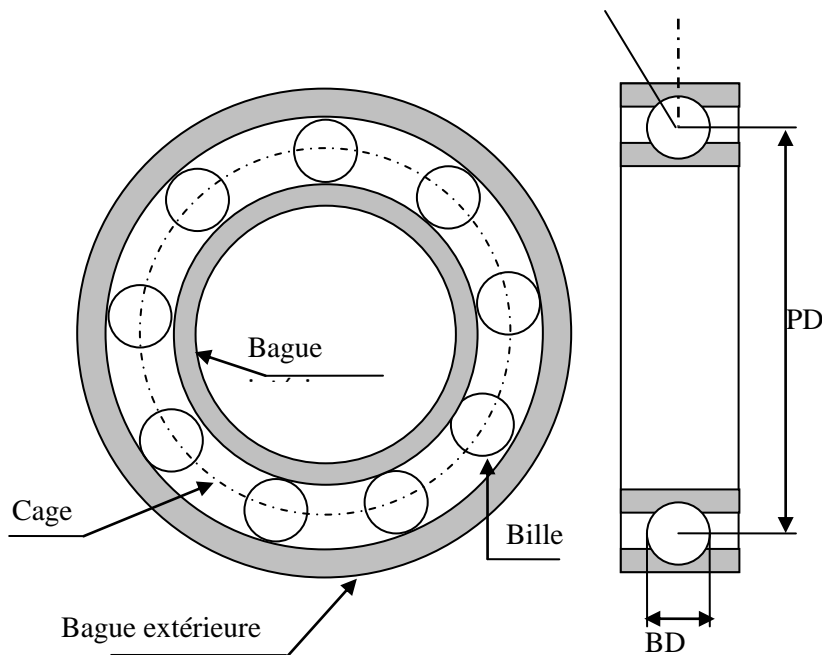


Figure I.5. Dimension du roulement à bille.

Les fréquences de vibration qui caractérisent les défauts des roulements à bille sont :

- *Défaut au niveau d'une bille :*

$$f_b = \frac{PD}{BD} f_{\text{rot}} \left[1 - \left(\frac{BD}{PD} \cos \beta \right)^2 \right] \quad (\text{I.8})$$

- *Défaut sur la bague intérieure :*

$$f_{b.int} = \frac{n_b}{2} f_{rot} \left[1 + \frac{BD}{PD} \cos \beta \right] \quad (I.9)$$

- *Défaut sur la bague extérieure :*

$$f_{b.ext} = \frac{n_b}{2} f_{rot} \left[1 - \frac{BD}{PD} \cos \beta \right] \quad (I.10)$$

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

Pour des dimensions courantes, c'est-à-dire que le nombre de billes est de 6 à 12, les fréquences de vibrations peuvent être approximés par :

$$f_{b.int} = 0.6 n_b f_{rot} \quad (I.11)$$

$$f_{b.ext} = 0.4 n_b f_{rot} \quad (I.12)$$

I.7. Conclusion

Dans cette partie nous avons présenté des termes et des notions très importantes en diagnostic des machines électriques, tels que les défauts qui peuvent affecter la machine asynchrone, leurs causes et leurs signatures, ainsi que les techniques de diagnostic utilisées. Notre travail est consacré à l'étude et à la simulation des cassures de barres dans la cage rotorique d'un moteur asynchrone. Pour cela, il faut disposer d'un bon modèle mathématique, décrivant le comportement de la machine à l'état sain et avec défaut. Ceci fait l'objet du chapitre suivant. Ainsi une étude expérimental sera introduit dans le 3^{ème} chapitre.

Chapitre II

MODELE DE LA MACHINE ASYNCHRONE DEDIE A LA SIMULATION DU DEFAUT

Chapitre II

MODELE DE LA MACHINE ASYNCHRONE DEDIE A LA SIMULATION DU DEFAUT

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. Il est bien connu qu'une machine asynchrone présente des défauts d'équilibrage au stator comme au rotor. Ces défauts peuvent être de type constructif c'est-à-dire qu'ils existent dès leur conception (excentricité...) ou se produire au cours de leur fonctionnement (courts circuits, circuits ouverts, rupture de barres de la cage...). De très nombreux travaux ont donc été effectués dans ce domaine, en particulier sur les moteurs asynchrones triphasés à cage, ces modèles sont de plusieurs types.

La mise au point d'une procédure de diagnostic à base de modèles analytiques pour la machine asynchrone recouvre un certain nombre de problèmes qui doivent être résolus. L'un de ces problèmes, et de loin le plus délicat, est 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. En un premier temps, les méthodes classiques d'étude de ce type de machines ont utilisé des modèles simples (modèle abc et dq) négligeant un certain nombre de phénomènes. Ces modèles sont fréquemment affectés par les transformations et le changement d'axe de référence, ce qui conduit à des interprétations théoriques qui ne peuvent pas être utilisées pour analyser des effets localisés tels que les barres cassées dans le rotor de la machine en les distinguant des effets provenant d'autres incidents. D'autre part, ces modèles sont imprécis et ne décrivent qu'un fonctionnement sain de la machine. Ainsi, il a fallu s'orienter vers des modèles plus sophistiqués (modèle de type circuits, 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.

La modélisation décrite dans ce chapitre a pour objet de permettre la représentation d'une rupture de barres pour une machine asynchrone à cage. Dans cette perspective, on a développé un modèle basé sur un circuit maillé représentant la cage rotorique qui permet la simulation des barres cassées. Il doit permettre de restituer les phénomènes physiques dus à ces défauts. Dans ce chapitre, nous avons privilégié l'approche analytique pour notre étude afin de disposer d'un modèle mathématique ne nécessitant pas d'outils de calculs complexes avec des relations où les paramètres mesurables apparaissent explicitement [3]. Par ailleurs, on obtient des relations qui nous permettent de calculer les inductances propres et mutuelles du stator et du rotor qui interviennent explicitement dans le modèle.

II.2. Modèle multi-enroulements de la machine asynchrone

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 mis en jeu, deux approches sont possibles.

La première s'appuie sur la distribution des champs et des courants en tout points de la machine. Cette méthode nécessite un temps de calcul très important, ainsi qu'une connaissance rigoureuse des paramètres géométriques et des caractéristiques de la machine. La seconde approche retenue ici, consiste à interpréter la machine du point de vue de la théorie des circuits. Un simple modèle de circuits pourrait être utilisé pour représenter chaque enroulement du stator ou chaque barre du rotor ainsi que le champ magnétique qui les lie. Partant de ce concept et pour pouvoir nous concentrer sur la simulation des ruptures de barres ; nous avons modélisé le rotor par des mailles reliées entre elles électriquement et couplées magnétiquement, où une maille est constituée de deux barres et deux portions d'anneaux qui les relient comme représenté la figure II.1.

Mais il est évident qu'un système électromagnétique nécessite des compétences tant dans l'approche des phénomènes physiques pour leur modélisation que dans le calcul numérique. D'où l'importance du choix des hypothèses d'étude et des objectifs du modèle, car ils conditionnent la complexité du travail à réaliser et l'utilisation d'outils appropriés. Pour cette raison nous avons été amenés à faire quelques hypothèses simplificatrices fortes mais généralement admises [8]:

- ❖ Perméabilité relative du fer très grande;
- ❖ Entrefer lisse et constant – effets d'excentricité négligeables – champ radial ;
- ❖ Distribution sinusoïdale de la force magnétomotrice statorique;
- ❖ Pas de saturation – effets pelliculaires nuls – courants de Foucault négligeables hors des barres rotoriques.

Avec ces hypothèses, et en supposant un stator sain de constitution symétrique, nous avons calculé, les différents paramètres du modèle.

II.2.1. Calcul des inductances

II.2.1.1. Inductances statoriques

Nous supposons que l'enroulement statorique triphasé est à distribution idéale autour du périphérique de l'entrefer. Par conséquent, le champ résultant a une forme sinusoïdale.

L'expression de la F.m.m de la phase "a" est donnée par la relation suivante :

$$F_m(\theta) = \frac{2N_s i_a}{p\pi} \cos(\theta) \quad (\text{II.1})$$

θ : est un angle électrique décrivant une position dans l'espace.

D'où l'induction créée dans l'entrefer :

$$B_s(\theta) = \frac{2\mu_0 N_s i_a}{e p \pi} \cos(\theta) \quad (\text{II.2})$$

Le flux magnétique dans l'entrefer, par pôles, est obtenu par intégration de l'expression (II.2) autour d'un intervalle polaire le long de la machine :

$$\phi_s = \iint_s B_s dS = \int_0^l dz \int_{-\frac{\pi}{2p}}^{\frac{\pi}{2p}} B_s R d\theta \quad (\text{II.3})$$

On obtient :

$$\phi_s = \frac{4\mu_0 N_s R l}{\pi e p^2} i_a \quad (\text{II.4})$$

Le flux magnétique total traversant l'enroulement de la phase "a" dû au courant i_a :

$$\Psi_{sa} = N_s \phi_s = N_s i_a \frac{2\mu_0 N_s R l}{e p^2 \pi} \int_{-\frac{\pi}{2p}}^{\frac{\pi}{2p}} \cos(\theta) d\theta = L_{sp} i_a \quad (\text{II.5})$$

L'inductance principale (magnétisante) de la phase "a" statorique est donc donnée par :

$$L_{sp} = L_{ms} = \frac{4\mu_0 N_s^2 R l}{e \pi p^2} \quad (\text{II.6})$$

L'inductance totale (propre) de la phase "a", est égale à la somme de l'inductance de magnétisation et l'inductance de fuite :

$$L_{as} = L_{sp} + L_{sf} \quad (\text{II.7})$$

Puisque les enroulements statoriques sont symétriques, les inductances des trois phases sont égales $L_{as} = L_{bs} = L_{cs} = L_s$. L'inductance mutuelle entre les phases statoriques est définie par la relation suivante :

$$M_s = -\frac{L_{sp}}{2} \quad (\text{II.8})$$

II.2.1.2. Inductances rotoriques

La figure II.1 illustre la structure du rotor par son schéma électrique équivalent.

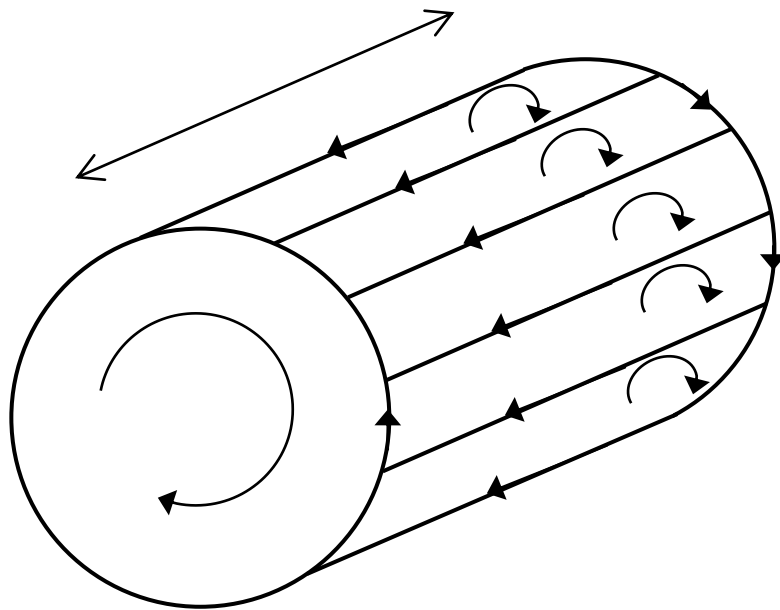


Figure II.1. Structure du rotor.

Le rotor a été décomposé en circuits élémentaires (mailles) constitués de deux barres reliées à chaque extrémité par deux portions d'anneaux. Cette topologie des circuits rotoriques nous permettra d'envisager la rupture de n'importe quelle barre ou de portion d'anneaux.

Pour notre étude nous travaillons avec les courants de mailles, où i_{rk} le courant de la $k^{\text{ème}}$ boucle rotorique et i_{bk} le courant de la $k^{\text{ème}}$ barre, de sorte que :

$$i_{bk} = i_{rk} - i_{r(k+1)} \quad (\text{II.9})$$

La figure II.2 représente en fonction de θ , l'allure de l'induction magnétique, supposée radiale, produite par une maille rotorique "K" dans l'entrefer.

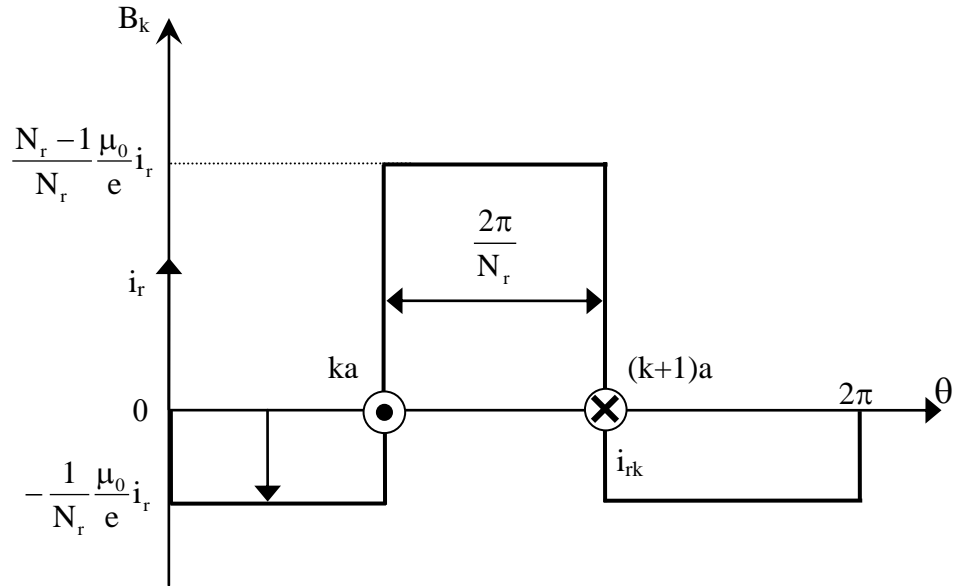


Figure II.2. Induction magnétique produite par une maille rotoriques.

Chaque maille rotorique, considérée comme une bobine à une seule spire, parcourue par un courant i_{rk} , est le siège d'un flux principale exprimé par :

$$\phi_{rk} = \int_0^1 dz \int_{ka}^{(k+1)a} \left(\frac{N_r - 1}{N_r} \frac{\mu_0}{e} R i_{rk} \right) d\theta = \frac{N_r - 1}{N_r^2} \mu_0 \frac{2\pi R l}{e} i_{rk} \quad (\text{II.10})$$

Et par suite, l'inductance principale d'une maille rotorique est :

$$L_{ip} = \frac{N_r - 1}{N_r^2} \mu_0 \frac{2\pi}{e} Rl \quad (\text{II.11})$$

L'inductance de la $k^{\text{ème}}$ maille rotorique est égale à la somme de son inductance principale, des inductances de fuite des deux barres et des inductances de fuite des deux portions d'anneaux de court circuit fermant la maille k . Donc l'expression est donnée par :

$$L_{ir} = L_{ip} + 2L_b + 2L_e \quad (\text{II.12})$$

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

$$\phi_{ijrk} = \int_0^1 dz \int_{j_a}^{(j+1)_a} \left(-\frac{1}{N_r} \frac{\mu_0}{e} R i_{rk} \right) d\theta \quad (\text{II.13})$$

Donc, l'inductance mutuelle entre mailles rotoriques non adjacentes, est exprimée par la relation :

$$M_{ir} = -\frac{1}{N_r^2} \frac{2\pi\mu_0}{e} Rl \quad (\text{II.14})$$

L'inductance mutuelle entre la $k^{\text{ème}}$ maille et les mailles adjacentes est donnée par :

$$M_{rk(k-1)} = M_{rk(k+1)} = M_{ir} - L_b \quad (\text{II.15})$$

II.2.1.3. Inductance mutuelle stator-rotor

La figure 2.3 indique les bases géométriques de l'expression du flux mutuel entre l'enroulement d'une phase « n » au stator (représenté par une spire diamétrale) et un circuit élémentaire « k » au rotor.

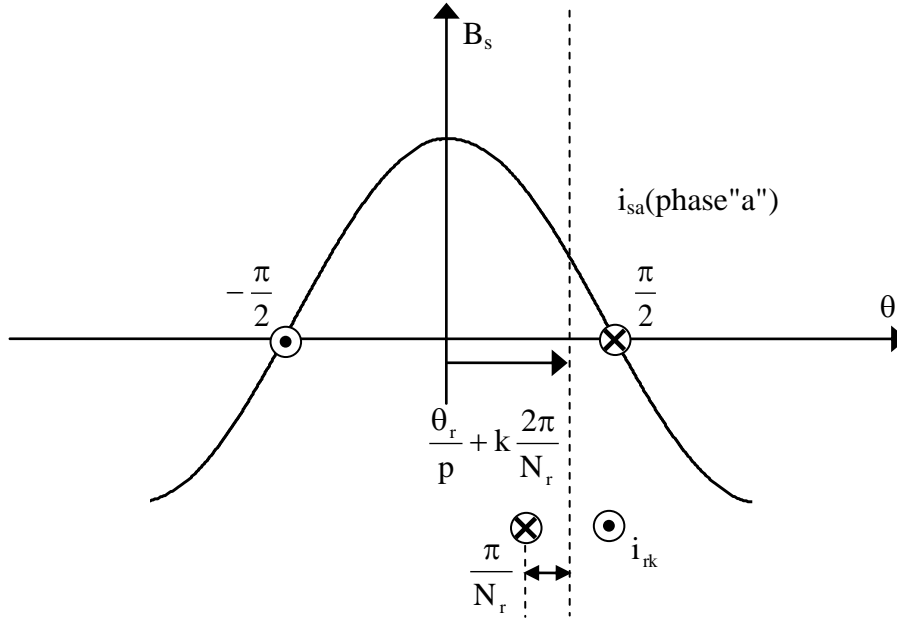


Figure II.3. Flux mutuel phase statorique-boucle

$$B_s = \frac{2}{\pi} \mu_0 \frac{N_s}{e} i_{sn} \cos\left(p\theta - n \frac{2\pi}{3}\right) \quad (\text{II.16})$$

Avec : $n = \{0,1,2\}$

D'où le flux traversant la maille k , produit par le courant i_{sn} est donnée par :

$$\phi_{snrk} = - \int_{\frac{\theta_r + k \frac{2\pi}{N_r} - \frac{\pi}{N_r}}{\frac{\theta_r + k \frac{2\pi}{N_r} + \frac{\pi}{N_r}}} B_s(\theta) R l d\theta \quad (\text{II.17})$$

L'intégrale de l'équation ci-dessus conduit à :

$$\phi_{snrk} = - \frac{2}{\pi} \frac{\mu_0}{e} N_s R l i_{sn} \frac{1}{p} \left[\sin\left(p\theta - n \frac{2\pi}{3}\right) \right]_{\frac{\theta_r + k \frac{2\pi}{N_r} - \frac{\pi}{N_r}}{\frac{\theta_r + k \frac{2\pi}{N_r} + \frac{\pi}{N_r}}} \quad (\text{II.18})$$

L'expression de l'inductance mutuelle stator-rotor est tirée donc de celle du flux par l'expression suivante :

$$M_{snrk} = -L_{sr} \cos(p\theta_r - n \frac{2\pi}{3} + ka) \quad (\text{II.19})$$

Avec :

$$L_{sr} = \frac{4\mu_0 N_s R l}{e p^2 \pi} \sin\left(\frac{a}{2}\right) \quad (\text{II.20})$$

$a = p \frac{2\pi}{N_r}$, est l'angle électrique entre deux mailles rotoriques.

Le tableau suivant, résume les expressions de toutes les inductances de la machine asynchrone à cage.

Tableau II.1. Inductances de la machine asynchrone à cage.

Inductances	Expressions
L'inductance principale d'une phase statorique.	$L_{sp} = L_{ms} = \frac{4\mu_0 N_s^2 R l}{e \pi p^2}$
L'inductance mutuelle entre phases statoriques.	$M_s = -\frac{L_{sp}}{2}$
L'inductance totale d'une phase statorique.	$L_{as} = L_{bs} = L_{cs} = L_s = L_{sp} + L_{sf}$
L'inductance principale d'une maille rotorique.	$L_{rp} = \frac{N_r - 1}{N_r^2} \mu_0 \frac{2\pi}{e} R l$
L'inductance mutuelle entre mailles rotoriques non adjacentes.	$M_{rr} = -\frac{1}{N_r^2} \frac{2\pi \mu_0}{e} R l$
L'inductance mutuelle entre mailles rotoriques adjacentes.	$M_{rk(k-1)} = M_{rk(k+1)} = M_{rr} - L_b$
L'inductance mutuelle entre une maille rotorique et une phase statorique "a".	$M_{snrk} = -L_{sr} \cos(p\theta_r - n \frac{2\pi}{3} + ka)$ <p>Avec : $L_{sr} = \frac{4\mu_0 N_s R l}{e p^2 \pi} \sin\left(\frac{a}{2}\right)$</p>

II.2.2. Mise en équations

Le but est d'effectuer une simulation numérique. Les équations devront donc être aussi simples que possible. Nous allons voir aussi qu'il est possible de prendre en compte des défauts sans que cela ne nécessite de reformuler systématiquement toute la mise en équation de la machine et de son environnement.

En étudiant la topologie du circuit électrique, nous cherchons alors l'ensemble des équations différentielles indépendantes régissant l'évolution des courants, et cela nous conduit à la forme classique :

$$\frac{d}{dt}[\mathbf{I}] = -[\mathbf{L}]^{-1}[\mathbf{R}][\mathbf{I}] + [\mathbf{L}]^{-1}[\mathbf{V}] \quad (\text{II.21})$$

II.2.2.1. Equations de tensions au stator

$$[\mathbf{V}_{abc}] = [\mathbf{R}_s][\mathbf{i}_{abc}] + \frac{d}{dt}[\boldsymbol{\phi}_{abc}] \quad (\text{II.22})$$

D'où :

$$[\boldsymbol{\phi}_{abc}] = [\mathbf{L}_s][\mathbf{i}_{abc}] + [\mathbf{M}_{sr}][\mathbf{i}_{rk}] \quad (\text{II.23})$$

Avec :

$$[\mathbf{v}_{abc}] = [v_a \quad v_b \quad v_c]^T, \text{ le vecteur de tensions statoriques.}$$

$$[\mathbf{i}_{abc}] = [i_a \quad i_b \quad i_c]^T, \text{ le vecteur de courants statoriques.}$$

$$[\mathbf{i}_{rk}] = [i_{r0} \quad i_{r1} \quad \dots \quad i_{rk} \quad \dots \quad i_{r(N_r-1)}]^T, \text{ le vecteur de courants dans les mailles rotoriques.}$$

$$[\boldsymbol{\phi}_{abc}] = [\phi_a \quad \phi_b \quad \phi_c]^T, \text{ le vecteur de flux statoriques.}$$

$[\mathbf{R}_s]$: matrice des résistances statoriques.

$$[\mathbf{R}_s] = \begin{bmatrix} r_s & 0 & 0 \\ 0 & r_s & 0 \\ 0 & 0 & r_s \end{bmatrix} \quad (\text{II.24})$$

$[\mathbf{L}_s]$: matrice des inductances statoriques.

$$[\mathbf{L}_s] = \begin{bmatrix} L_{as} & M_s & M_s \\ M_s & L_{bs} & M_s \\ M_s & M_s & L_{cs} \end{bmatrix} \quad (\text{II.25})$$

$[\mathbf{M}_{sr}]$: matrice des inductances mutuelles entre phases statoriques et mailles rotoriques.

$$[\mathbf{M}_{sr}] = \begin{bmatrix} \cdots & L_{sr} \cos(\theta_r + ka) & \cdots \\ \cdots & L_{sr} \cos(\theta_r + ka - \frac{2\pi}{3}) & \cdots \\ \cdots & L_{sr} \cos(\theta_r + ka - \frac{4\pi}{3}) & \cdots \end{bmatrix} \quad (\text{II.26})$$

Où : $k=0, 1, 2, \dots, N_r-1$

II.2.2.2. Equations de tensions au rotor

La figure (II.4), représente le schéma équivalent de la cage rotorique.

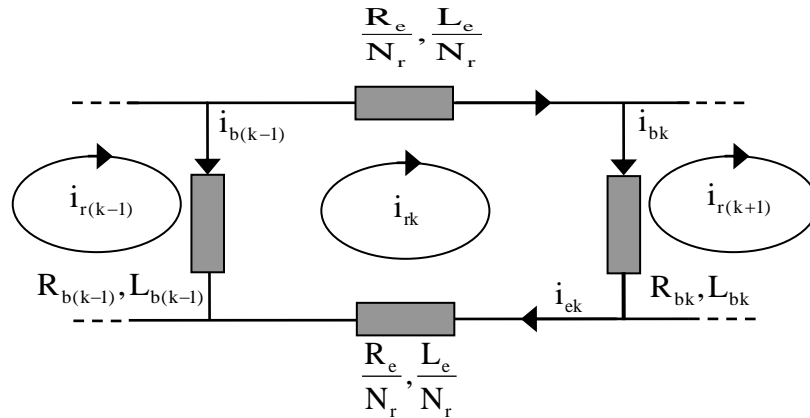


Figure II.4. Schéma électrique équivalent des mailles rotoriques.

Sachant que :

$$i_{ek} = i_{rk} - i_e \quad (\text{II.27})$$

L'équation de tension pour une maille "k" de la cage rotorique est donnée par :

$$R_{bk}i_{r(k-1)} + \left(2\frac{R_e}{N_r} + R_{b(k-1)} + R_{bk}\right)i_{rk} - R_{bk}i_{r(k+1)} - \frac{R_e}{N_r}i_e + \frac{d}{dt}\phi_{rk} = 0 \quad (\text{II.28})$$

Avec :

$$\begin{aligned} \phi_{rk} = & \left(L_{\text{tp}} + 2L_b + 2\frac{L_e}{N_r}\right)i_{rk} - M_{\text{rr}} \sum_{\substack{j=0 \\ j \neq k}}^{N_r-1} i_{rj} - L_b(i_{r(k-1)} + i_{r(k+1)}) - \frac{L_e}{N_r}i_e \\ & - L_{\text{sr}} \left[\cos(\theta_r + ka) \quad \vdots \quad \cos\left(\theta_r + ka - \frac{2\pi}{3}\right) \quad \vdots \quad \cos\left(\theta_r + ka - \frac{4\pi}{3}\right) \right] [i_{\text{abc}}] \end{aligned} \quad (\text{II.29})$$

Il faut compléter le système d'équations des circuits du rotor par celle de l'anneau de court-circuit, on a alors :

$$\frac{R_e}{N_r} \sum_{k=0}^{N_r-1} i_{rk} + \frac{L_e}{N_r} \sum_{k=0}^{N_r-1} \frac{d}{dt} i_{rk} - R_e i_e - L_e \frac{d}{dt} i_e = 0 \quad (\text{II.30})$$

II.2.2.3. Equation globale des tensions

L'équation globale des tensions est donnée par :

$$[V] = [R][I] + [L] \frac{d[I]}{dt} + \frac{d[L]}{dt} [I] \quad (\text{II.31})$$

Avec :

$[V] = [v_a \quad v_b \quad v_c \quad \vdots \quad 0 \quad 0 \dots \dots \quad 0 \quad \vdots \quad 0]^T$, le vecteur global des tensions ($N_r+4 \times 1$), il contient les trois tensions statoriques et les N_r tensions des mailles rotoriques, ainsi que la tension de l'anneau de court-circuit.

$[I] = [i_a \quad i_b \quad i_c \quad \vdots \quad i_{r0} \quad i_{r1} \quad \dots \quad i_{rk} \quad \dots \quad i_{r(N_r-1)} \quad \vdots \quad i_e]^T$, le vecteur global des courants ($N_r+4 \times 1$), il contient les trois courants statoriques et les N_r courants des mailles rotoriques, ainsi que le courant de l'anneau de court-circuit.

$$[\mathbf{R}] = \begin{bmatrix} [\mathbf{R}_s] & \vdots & [0] \\ \cdots & \vdots & \cdots \\ [0] & \vdots & [\mathbf{R}_r] \end{bmatrix}, \text{ la matrice globale des résistances.}$$

Avec :

$[\mathbf{R}_r]$: la matrice des résistances rotoriques.

$$[\mathbf{R}_r] = \begin{bmatrix} R_{b0} + R_{b(N_r-1)} + 2\frac{R_e}{N_r} & -R_b & 0 & \cdots & -R_{b(N_r-1)} & \vdots & -\frac{R_e}{N_r} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & R_{b(k-1)} & R_{bk} + R_{b(k-1)} + 2\frac{R_e}{N_r} & -R_{bk} & 0 & \vdots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -R_{b(N_r-1)} & 0 & \cdots & -R_{b(N_r-1)} & R_{b(N_r-1)} + R_{b(N_r-2)} + 2\frac{R_e}{N_r} & \vdots & -\frac{R_e}{N_r} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ -\frac{R_e}{N_r} & \cdots & \cdots & \cdots & -\frac{R_e}{N_r} & \vdots & R_e \end{bmatrix} \quad (\text{II.32})$$

$$[\mathbf{L}] = \begin{bmatrix} [\mathbf{L}_s] & \vdots & [\mathbf{M}_{sr}] \\ \cdots & \vdots & \cdots \\ [\mathbf{M}_{sr}]^T & \vdots & [\mathbf{L}_r] \end{bmatrix}, \text{ la matrice globale des inductances.}$$

Avec :

$[\mathbf{L}_r]$: matrice des inductances rotoriques.

$$[\mathbf{L}_r] = \begin{bmatrix} L_{rp} + 2L_b + 2\frac{L_e}{N_r} & M_{rr} - L_b & M_{rr} & \cdots & M_{rr} - L_b & \vdots & -\frac{L_e}{N_r} \\ M_{rr} - L_b & L_{rp} + 2L_b + 2\frac{L_e}{N_r} & M_{rr} - L_b & M_{rr} & \cdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ M_{rr} - L_b & M_{rr} & \cdots & M_{rr} - L_b & L_{rp} + 2L_b + 2\frac{L_e}{N_r} & \vdots & -\frac{L_e}{N_r} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ -\frac{L_e}{N_r} & \cdots & \cdots & \cdots & -\frac{L_e}{N_r} & \vdots & L_e \end{bmatrix} \quad (\text{II.33})$$

$$\frac{d[\mathbf{L}]}{dt} = \begin{bmatrix} [0] & \vdots & \frac{d[\mathbf{M}_{sr}]}{dt} \\ \cdots & \vdots & \cdots \\ \frac{d[\mathbf{M}_{sr}]^T}{dt} & \vdots & [0] \end{bmatrix}, \text{ la dérivée de la matrice globale des inductances.}$$

On remarque que la matrice $[M_{sr}]$ dépend du temps, ce qui nécessite l'inversion de la matrice inductance $[L]$, de dimension N_r+4 , à chaque pas de calcul. Pour rendre cette matrice constante, on applique la transformation de Park sur les équations de tensions statoriques. Le repère de Park doit être lié au rotor.

La matrice de Park modifiée est définie par :

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (\text{II.34})$$

La dérivée de la matrice de Park :

$$\frac{d[P(\theta)]}{dt} = -\sqrt{\frac{2}{3}} \omega \begin{bmatrix} 0 & \sin \theta & \cos \theta \\ 0 & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ 0 & \sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (\text{II.35})$$

La matrice globale de Park de dimension $(N_r+1) \times (N_r+1)$.

$$[T] = \begin{bmatrix} [P(\theta)] & \vdots & [0] \\ \dots\dots\dots & \vdots & \dots\dots \\ [0]^T & \vdots & [1] \end{bmatrix} \quad (\text{II.36})$$

$$[T]^{-1} = \begin{bmatrix} [P(\theta)]^{-1} & \vdots & [0] \\ \dots\dots\dots & \vdots & \dots\dots \\ [0]^T & \vdots & [1] \end{bmatrix} \quad (\text{II.37})$$

$[1]$: est la matrice identité de dimension $(N_r+1) \times (N_r+1)$.

Sachant que :

$$[V] = [T][V_{tr}], \text{ avec : } [V_{tr}] = [v_{ds} \quad v_{qs} \quad \vdots \quad 0 \quad 0 \quad \dots\dots \quad 0 \quad \vdots \quad 0]^T$$

$$[\mathbf{I}] = [\mathbf{T}][\mathbf{I}_{tr}], \quad \text{avec : } [\mathbf{I}_{tr}] = [i_{ds} \quad i_{qs} \quad \vdots \quad i_{r0} \quad i_{r1} \quad i_{r2} \quad \cdots \quad i_{rk} \quad \cdots \quad i_{r(N_r-1)} \quad \vdots \quad i_e]^T$$

$$\text{Avec : } \begin{cases} v_{ds} = \sqrt{\frac{2}{3}} v_m \cos(\omega_s - \omega_r)t \\ v_{qs} = \sqrt{\frac{2}{3}} v_m \sin(\omega_s - \omega_r)t \end{cases} \quad (\text{II.38})$$

L'équation (II.31) devient :

$$[\mathbf{T}][\mathbf{V}_{tr}] = [\mathbf{R}][\mathbf{T}][\mathbf{I}_{tr}] + [\mathbf{L}]d \frac{[\mathbf{T}][\mathbf{I}_{tr}]}{dt} + \frac{d[\mathbf{L}]}{dt}[\mathbf{T}][\mathbf{I}_{tr}] \quad (\text{II.39})$$

$$\Leftrightarrow [\mathbf{V}_{tr}] = \left(\underbrace{[\mathbf{T}]^{-1}[\mathbf{R}][\mathbf{I}_{tr}]}_A + \underbrace{[\mathbf{T}]^{-1}[\mathbf{L}] \frac{d[\mathbf{T}]}{dt}}_B + \underbrace{[\mathbf{T}]^{-1} \frac{d[\mathbf{L}]}{dt}[\mathbf{T}]}_C \right) [\mathbf{I}_{tr}] + \underbrace{[\mathbf{T}]^{-1}[\mathbf{L}][\mathbf{T}]}_D \frac{d[\mathbf{I}_{tr}]}{dt}$$

(II.40)

Les termes A, B, C et D sont données par :

$$A = [\mathbf{T}]^{-1}[\mathbf{R}][\mathbf{T}] = \begin{bmatrix} [\mathbf{P}(\theta)]^{-1}[\mathbf{R}_s][\mathbf{P}(\theta)] & \vdots & [0] \\ \dots & \vdots & \dots \\ [0] & \vdots & [\mathbf{R}_r] \end{bmatrix} \quad (\text{II.41})$$

$$B = [\mathbf{T}]^{-1}[\mathbf{L}] \frac{d[\mathbf{T}]}{dt} = \begin{bmatrix} [\mathbf{P}(\theta)]^{-1}[\mathbf{L}_s] \frac{d[\mathbf{P}(\theta)]}{dt} & \vdots & [0] \\ \dots & \vdots & \dots \\ [\mathbf{M}_{sr}]^T \frac{d[\mathbf{P}(\theta)]}{dt} & \vdots & [0] \end{bmatrix} \quad (\text{II.42})$$

$$C = [\mathbf{T}]^{-1} \frac{d[\mathbf{L}]}{dt}[\mathbf{T}] = \begin{bmatrix} [0] & \vdots & [\mathbf{P}(\theta)]^{-1} \frac{d[\mathbf{M}_{sr}]}{dt} \\ \dots & \vdots & \dots \\ \frac{d[\mathbf{M}_{sr}]^T}{dt} [\mathbf{P}(\theta)] & \vdots & [0] \end{bmatrix} \quad (\text{II.43})$$

$$D = [\mathbf{T}]^{-1}[\mathbf{L}][\mathbf{T}] = \begin{bmatrix} [\mathbf{P}(\theta)]^{-1}[\mathbf{L}_s][\mathbf{P}(\theta)] & \vdots & [\mathbf{P}(\theta)]^{-1}[\mathbf{M}_{sr}] \\ \dots & \vdots & \dots \\ [\mathbf{M}_{sr}]^T [\mathbf{P}(\theta)] & \vdots & [\mathbf{L}_r] \end{bmatrix} \quad (\text{II.44})$$

La mise en équation du modèle de la machine, conduit à un système complet de dimension $N_r + 3$

$$\begin{bmatrix} v_{ds} \\ v_{qs} \\ \dots \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ \dots \\ 0 \end{bmatrix} = [L_{tr}] \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ \dots \\ i_{r0} \\ \vdots \\ i_{rk} \\ \vdots \\ i_{r(N_r-1)} \\ \dots \\ i_e \end{bmatrix} + [R_{tr}] \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ \dots \\ i_{r0} \\ \vdots \\ i_{rk} \\ \vdots \\ i_{r(N_r-1)} \\ \dots \\ i_e \end{bmatrix} \quad (\text{II.45})$$

$[L_{tr}]$ et $[R_{tr}]$ sont les matrices globales des résistances et des inductances obtenues après la transformation de Park.

La matrice $[L_{tr}]$ est donnée par :

$$\begin{bmatrix} L_s - M_s & 0 & \vdots & \sqrt{\frac{3}{2}}L_{sr} & \sqrt{\frac{3}{2}}L_{sr} \cos(\hat{\alpha}) & \dots & \dots & \sqrt{\frac{3}{2}}L_{sr} \cos((N_r - 1)\hat{\alpha}) & \vdots & 0 \\ 0 & L_s - M_s & \vdots & 0 & \sqrt{\frac{3}{2}}L_{sr} \sin(\hat{\alpha}) & \dots & \dots & \sqrt{\frac{3}{2}}L_{sr} \sin((N_r - 1)\hat{\alpha}) & \vdots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \sqrt{\frac{3}{2}}L_{sr} & 0 & \vdots & L_{rp} + 2L_b + 2\frac{L_e}{N_r} & M_{rr} - L_b & 0 & \dots & M_{rr} - L_b & \vdots & -\frac{L_e}{N_r} \\ \sqrt{\frac{3}{2}}L_{sr} \cos(\hat{\alpha}) & \sqrt{\frac{3}{2}}L_{sr} \sin(\hat{\alpha}) & \vdots & M_{rr} - L_b & L_{rp} + 2L_b + 2\frac{L_e}{N_r} & M_{rr} - L_b & M_{rr} & \dots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \sqrt{\frac{3}{2}}L_{sr} \cos((N_r - 1)\hat{\alpha}) & \sqrt{\frac{3}{2}}L_{sr} \sin((N_r - 1)\hat{\alpha}) & \vdots & M_{rr} - L_b & M_{rr} & \dots & M_{rr} - L_b & L_{rp} + 2L_b + 2\frac{L_e}{N_r} & \vdots & -\frac{L_e}{N_r} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \vdots & -\frac{L_e}{N_r} & \dots & \dots & \dots & -\frac{L_e}{N_r} & \vdots & L_e \end{bmatrix} \quad (\text{II.46})$$

La matrice $[R_{tr}]$ est donnée par :

$$\begin{bmatrix}
 r_s & \omega_r(M_s - L_s) & \vdots & 0 & -\omega_r L_{sr} \sqrt{\frac{3}{2}} \sin(a) & \dots & \dots & -\omega_r L_{sr} \sqrt{\frac{3}{2}} \sin((N_r - 1)a) & \vdots & 0 \\
 \omega_r(L_s - M_s) & r_s & \vdots & \omega_r L_{sr} \sqrt{\frac{3}{2}} & \omega_r L_{sr} \sqrt{\frac{3}{2}} \cos(a) & \dots & \dots & \omega_r L_{sr} \sqrt{\frac{3}{2}} \cos((N_r - 1)a) & \vdots & 0 \\
 \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\
 0 & 0 & \vdots & R_{b0} + R_{b(N_r-1)} + 2\frac{R_e}{N_r} & -R_{b0} & 0 & \dots & -R_{b(N_r-1)} & \vdots & -\frac{R_e}{N_r} \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots & \vdots \\
 \vdots & \vdots & \vdots & 0 & -R_{b(k-1)} & R_{bk} + R_{b(k-1)} + 2\frac{R_e}{N_r} & -R_{bk} & 0 & \vdots & \vdots \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots & \vdots \\
 0 & 0 & \vdots & -R_{b(N_r-1)} & 0 & \dots & -R_{b(N_r-2)} & R_{b(N_r-1)} + R_{b(N_r-2)} + 2\frac{R_e}{N_r} & \vdots & -\frac{R_e}{N_r} \\
 \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\
 0 & 0 & \vdots & -\frac{R_e}{N_r} & \dots & \dots & \dots & -\frac{R_e}{N_r} & \vdots & R_e
 \end{bmatrix}$$

(II.47)

A ces équations, on ajoute les équations électromagnétiques afin d'avoir la vitesse électrique de rotation et la position θ_r du rotor.

$$\frac{d}{dt} \omega_m = \frac{1}{J} (C_e - C_r - k_0 \omega_m) \tag{II.48}$$

$$\frac{d}{dt} \theta_r = \omega_r \tag{II.49}$$

II.2.3. Expression du couple électromagnétique

Il faut d'abord, trouver les expressions des composantes biphasées ψ_{ds} et ψ_{qs} du flux statorique.

On a :

$$\begin{bmatrix} \psi_{odqs} \\ \phi_{kr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [P(\theta)]^{-1} & [0] \\ [0] & [1] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [L_s] & [M_{sr}] \\ [M_{sr}]^T & [L_r] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [P(\theta)]^{-1} & [0] \\ [0] & [1] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{odqs} \\ i_{kr} \end{bmatrix} \tag{II.50}$$

$$\Leftrightarrow \begin{bmatrix} \psi_{dqs} \\ \psi_{kr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [P(\theta)]^{-1} [L_s] [P(\theta)] & [P(\theta)]^{-1} [M_{sr}] \\ [M_{sr}]^T [P(\theta)] & [L_r] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{dq} \\ i_{kr} \end{bmatrix} \tag{II.51}$$

On aura :

$$\psi_{dqs} = [P(\theta)]^{-1} [L_s] [P(\theta)] i_{dqs} + [P(\theta)] [M_{sr}] i_{kr} \tag{II.52}$$

Après le calcul on obtient :

$$(II.53) \quad \begin{cases} \psi_{ds} = (L_s - M_s) i_{ds} + \sqrt{\frac{3}{2}} L_{sr} \sum_{k=0}^{N_r-1} i_{rk} \cos(ka) \\ \psi_{qs} = (L_s - M_s) i_{qs} + \sqrt{\frac{3}{2}} L_{sr} \sum_{k=0}^{N_r-1} i_{rk} \sin(ka) \end{cases}$$

Or, pour un moteur alimenté par une source triphasée, la puissance instantanée s'écrit :

$$(2.54) \quad \begin{aligned} P_s(t) &= [\mathbf{V}_{abc}]^T [\mathbf{i}_{abc}] \\ &= ([\mathbf{P}(\theta)] [\mathbf{V}_{dq_s}]^T [\mathbf{P}(\theta)]) [\mathbf{i}_{dq_s}] \\ &= [\mathbf{V}_{dq_s}]^T [\mathbf{i}_{dq_s}] \end{aligned}$$

Les équations de tensions dans un repère lié au rotor sont données par :

$$(II.55) \quad \begin{cases} v_{ds} = r_s i_{ds} + \frac{d\psi_{ds}}{dt} - \omega_r \psi_{qs} \\ v_{qs} = r_s i_{qs} + \frac{d\psi_{qs}}{dt} + \omega_r \psi_{ds} \end{cases}$$

En remplaçant les tensions v_{ds} et v_{qs} dans l'expression (2.54), on obtient :

$$(II.56) \quad P_{sa}(t) = r_s (i_{ds}^2 + i_{qs}^2) + \left(i_{ds} \frac{d\psi_{ds}}{dt} + i_{qs} \frac{d\psi_{qs}}{dt} \right) + \omega_r (\psi_{ds} i_{qs} - \psi_{qs} i_{ds})$$

Le troisième terme, représente la puissance électromagnétique transmise au rotor à travers l'entrefer par l'intermédiaire du champ tournant. Donc le couple électromagnétique est :

$$(II.57) \quad T_e = P(\psi_{ds} i_{qs} - \psi_{qs} i_{ds})$$

En remplaçant ψ_{ds} et ψ_{qs} par leurs expressions, on obtient :

$$T_e = \sqrt{\frac{3}{2}} PL_{sr} \left\{ i_{qs} \sum_{k=0}^{N_r-1} i_{rk} \cos(ka) - i_{ds} \sum_{k=0}^{N_r-1} i_{rk} \sin(ka) \right\} \quad (\text{II.58})$$

II.3. Pris en compte du défaut dans le modèle

Il est assez difficile de décrire exactement la succession des phénomènes physiques entrant en jeu lors d'une rupture d'une barre. Les fissures apparaissent dans les barres ou les anneaux, tout comme les problèmes de soudure entre ces deux éléments, et ont pour effet d'augmenter la résistance équivalente des éléments défectueux. Par contre, ce type de défaut ne modifie ni les valeurs des inductances propres et mutuelles de ces éléments, ni les connexions avec les autres circuits. Donc avec le modèle multi enroulement, la modélisation d'un tel défaut consiste à modifier uniquement la résistance R_b sans que cela nécessite une nouvelle mise en équation.

D'autre étude modélise la cassure d'une barre par l'annulation du courant qui la traverse. Les matrices des inductances et des résistances sont modifiées de tel façon que : si la barre k est rompue, le courant i_{bk} dans cette barre s'annule. Dans ce cas, le courant dans la maille $(k-1)$ devient égal au courant dans la maille (k) , c'est-à-dire, $(i_{r(k-1)} = i_{rk})$ (figure II.5).

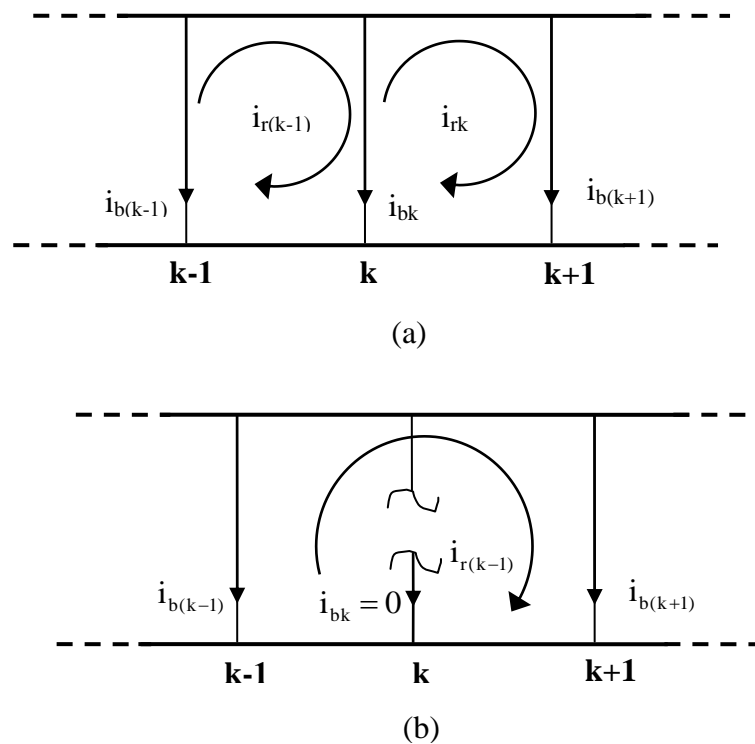


Figure II.5. Schéma équivalent de la cage rotorique :

a. Etat sain, **b.** Avec une barre rompue.

II.4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le développement mathématique d'un modèle multi-enroulement qui tient compte de la structure du rotor. Le choix d'un tel modèle nous est imposé par l'objectif de pouvoir simuler une rupture de barre ou d'une portion d'anneau de court-circuit au rotor. Pour cela, nous avons cherché à représenter toutes les barres du rotor. Ce modèle est pratique en ce sens que l'introduction du défaut se réduit à une simple augmentation de la résistance de la barre dont on veut simuler la rupture. Ce modèle nous a conduits à un système de rang très élevé. Le passage à un modèle diphasé équivalent en utilisant la transformation de Park nous a permis la réduction de l'ordre du système. Grâce à ce modèle nous avons pu faire une économie notable sur le temps de simulation.

Chapitre III

DÉTECTION DES

DÉFAUTS ROTORIQUES

PAR LA TECHNIQUE

MCSA

Chapitre III

DÉTECTION DES DÉFAUTS ROTORIQUES PAR LA TECHNIQUE MCSA

III.1. Introduction

Plusieurs techniques sont développées pour effectuer la tâche de diagnostic. La plupart de ces techniques se basent sur la comparaison des grandeurs de la machine à l'état sain et avec les mêmes grandeurs à l'état avec défaut. On cite par exemple la comparaison entre l'allure de la vitesse de rotation d'une machine saine avec celui de la même machine défaillante. Généralement pour cet exemple, la détection de défaut est de déterminer par l'apparition des ondulations dans l'allure de la vitesse de la machine avec défaut. Cette technique, n'est plus fiable car ces ondulations peuvent être causées par des autres facteurs qui ne sont pas des défauts, et même s'il y a des défauts, on ne peut pas dans ce cas distinguer clairement le type de défaut. Alors, dans ce contexte, Nous présenterons dans ce chapitre, l'analyse spectrale du courant statorique (simulation et expérimental) de la machine saine et avec défaut, en utilisant la transformé de Fourier rapide (Fast Fourier Transform FFT). Nous montrerons comment cette méthode permet de détecter les signatures de défaut de barre cassées. Nous montrerons aussi, l'influence de nombre de barres cassées.

III.2. Ruptures de barres dans les machines asynchrones

La cassure ou rupture de barre est un des défauts les plus fréquents au rotor. Elle peut se situer soit au niveau de son encoche soit à l'extrémité qui la relie à l'anneau de court-circuit. La détérioration des barres réduit la valeur moyenne du couple électromagnétique et augmente l'amplitude des oscillations, qui elles-mêmes provoquent des oscillations de la vitesse de rotation, ce qui engendre des vibrations mécaniques et donc, un fonctionnement anormal de la machine. La grande amplitude de ces oscillations accélère la détérioration de la machine. Ainsi, le couple diminue sensiblement avec le nombre de barres cassées induisant un effet cumulatif de la défaillance. L'effet d'une cassure de barre croît rapidement avec le nombre de barres cassées.

III.2.1. Étude analytique du défaut

La cause des raies dues au défaut rotorique de barre cassée dans l'analyse du courant statorique de la machine peut s'expliquer de la manière suivante :

- ✚ En conditions normales de fonctionnement (Figure III.1) le système triphasé crée un champ tournant dans l'entrefer qui peut être direct. Ce champ tournant, direct, dans l'entrefer induit un courant dans les barres rotoriques d'une fréquence proportionnelle au glissement du rotor g . Les barres rotoriques génèrent alors un champ tournant résultant direct. Pour une machine saine il n'y aura pas de champ tournant résultant inverse.

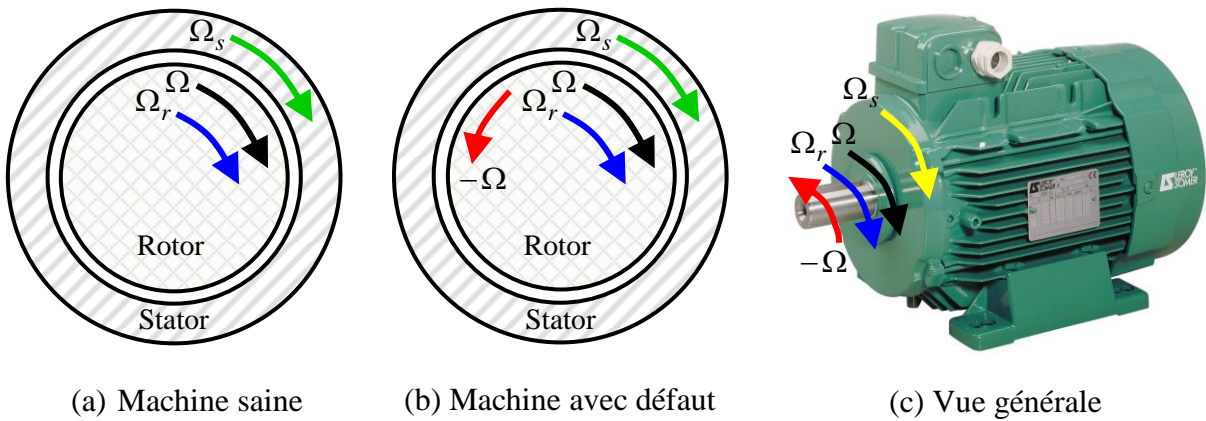


Figure III.1. Schéma de fonctionnement pour une machine saine et avec défaut.

Le fonctionnement de la machine saine est donc décrit par les relations suivantes (voir figure III.1.a):

- Vitesse synchrone: $\Omega_s = \frac{2\pi f_s}{p}$.
- Vitesse rotorique: $\Omega_r = \Omega_s (1 - s)$.
- Vitesse de glissement: $\Omega = \Omega_s - \Omega_r = g \Omega_s$, $g = \frac{\Omega_s - \Omega_r}{\Omega_s}$.

Si la machine présente un défaut de cassure de barres rotoriques (voir figure II.1.b), une dissymétrie au rotor apparaît. Dans ce cas, il se crée en plus du champ rotorique direct, un champ inverse qui tourne à la vitesse $-g \Omega_s$, créée par le déséquilibre des courants dans les

barres. Cela est dû au fait que les courants rotoriques peuvent être associés à un système direct du courant de valeur efficace I_d^r et à un système inverse de valeur efficace I_i^r . L'interaction de ce champ avec celui issu du bobinage statorique crée des ondulations de couple et aussi induit au stator des forces électromotrices de fréquences f_s et $(1-2s)f_s$, l'apparition de courants statoriques comportant ces composantes [4].

Le schéma de la figure III.1.b décrit le phénomène dû à l'apparition du défaut rotorique. Sachant que:

$$\Omega_{défaut} = \Omega_r - g \Omega_s = \Omega_s (1-g) - g \Omega_s \Rightarrow \Omega_{défaut} = \Omega_s (1-2g) \quad (\text{III.2})$$

L'interaction des courants rotoriques avec le champ direct issu du rotor crée le couple électromagnétique. En cas de défauts rotoriques, le couple total peut se calculer par la relation:

$$C_{tot} = C_d^{sr} + C_i^{sr} = \pi \frac{r_e l_e e_m}{\mu_0} k^s I^s \left[k_d^r I_d^r \sin \varphi_{B_d^r} + k_i^r I_i^r \sin \left(2g\omega t - \varphi_{B_i^r} \right) \right] \quad (\text{III.3})$$

Avec: C_d^{sr} est le couple moyen dû à l'interaction du champ du stator et celui du rotor dans le sens direct, C_i^{sr} représente le couple de pulsation $2g\omega$ dû à l'interaction de champs stator et du rotor dans le sens inverse, k^s est le coefficient propre à chaque phase statorique, k_d^r est le coefficient global rotorique direct, k_i^r est le coefficient global rotorique inverse. $\varphi_{B_d^r}$ représente la phase de l'induction rotorique B_d^r en sens direct, et $\varphi_{B_i^r}$ est la phase de l'induction rotorique B_i^r en sens inverse.

Le couple total dans le cas d'une machine avec défaut peut aussi s'écrire sous la forme suivante:

$$C_{tot} = C_{const} + \Delta C \quad (\text{III.4})$$

Cette équation montre que le couple produit par la machine est composé de deux termes. Le premier est un couple constant dû au champ direct et le second est un couple pulsant dû au champ inverse de pulsation $2g\omega_s$. La fréquence d'oscillation sera donc de $2gf_s$ et engendrera une oscillation de vitesse à cette fréquence dont l'amplitude dépendra de l'inertie

de l'ensemble moteur-charge. Cette oscillation de vitesse va générer une variation de flux, donc une force électromotrice de fréquence fondamentale et des fréquences supplémentaires liées aux oscillations de vitesse. La vitesse se calcule par l'équation mécanique:

$$J \frac{d\Omega_r}{dt} = C_{tot} - C_r = C_i^{sr} \quad (III.5)$$

Où, J représente le moment d'inertie totale, C_r est le couple résistant (couple de charge).

$$\Omega_r = \frac{1}{J} \int C_i^{sr} dt + \Omega_0 \quad (III.6)$$

En calculant l'intégrale (III.6), on obtient:

$$\Omega_r = \Omega_0 + \Delta\Omega_r \cdot \cos(2s\omega_s t + \varphi) \quad (III.7)$$

Où: $\Delta\Omega_r = -\pi k^s I^s k_i^r I_i^r \frac{1}{2sJ} \cdot \frac{r_e l_e e_m}{\mu_0}$ représente l'amplitude d'oscillation de vitesse.

Ω_0 : est la valeur moyenne de Ω_r laquelle change avec le nombre de barres cassées

$$\varphi = \varphi_{B^s} - \varphi_{B_i^r}$$

La vitesse centrées sur Ω_0 supporte une pulsation égale à $2g\omega_s$ identique à celle du couple.

Cette variation de vitesse génère un flux additionnel dans l'entrefer à $(1+2g)f_s$ [9].

III.3. Analyse spectrale du courant statorique

Parmi les techniques plus utilisées pour analyser et traiter les différents signaux issus des machines électriques, on trouve la méthode basée sur la Transformée de Fourier Rapide (FFT).

III.3.1. La Transformée de Fourier Rapide

La transformée de Fourier Rapide $X(f)$ d'un signal $x(t)$ continu dans le temps est donnée

par :

$$X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) e^{-j\omega t} dt \quad (III.8)$$

Pour notre étude, les signaux à analyser sont les courants statoriques acquises à l'aide de la carte *dSpace* en utilisant des capteurs de courant. L'acquisition a été faite selon les paramètres suivants :

- La fréquence d'échantillonnage : $f_e = 10000\text{Hz}$;
- Le temps d'acquisition : $T_a = 10\text{ sec}$
- Le nombre des échantillons : $N_e = \frac{T_a}{T_e} = f_e \cdot T_a = 10000 \times 10 = 100000$ échantillons ;
- La résolution fréquentielle : $\Delta f = \frac{f_e}{N_e} = \frac{10000}{100000} = 0.1\text{Hz}$.

La résolution fréquentielle doit être de faible valeur pour un bon résultat. Les spectres dans ce chapitre sont visualisés dans une échelle logarithmique normalisée par rapport au maximum. Néanmoins, on va représenter une comparaison entre les échelles logarithmique et linéaire dont le but de choisir la meilleure visualisation qui reflète bien les changements provoqués par les défauts.

III.4. Résultats et discussion

III.4.1. Résultats de simulation

Après avoir défini le modèle de la machine asynchrone (chapitre II), nous avons implémenté le modèle au sein du logiciel MATLAB. La résolution des équations différentielles obtenues est réalisée par la méthode de Runge Kutta d'ordre 4.

Dans ce paragraphe, on va présenter seulement ; les courbes du courant statorique, du courant dans les barres toriques, pendant les différentes conditions de fonctionnement, à l'état sain et avec défaut.

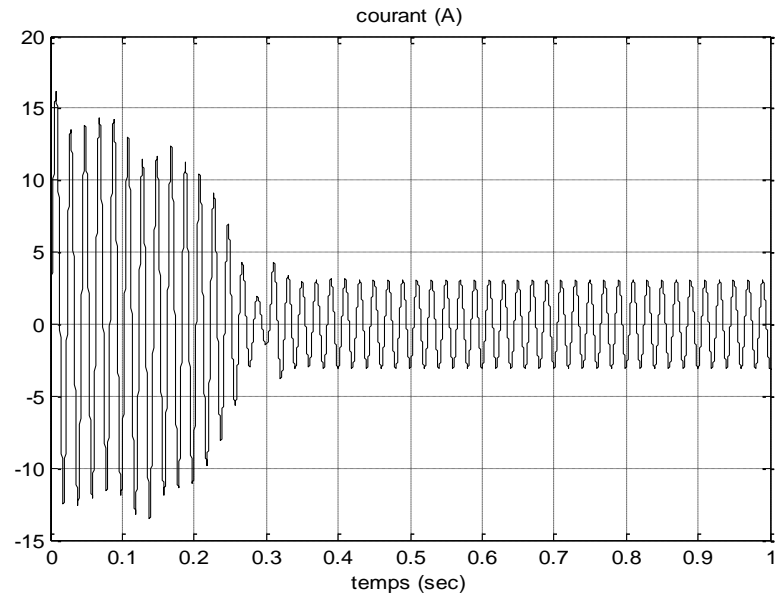


Figure III.2. Le courant statorique de la machine saine (simulation).

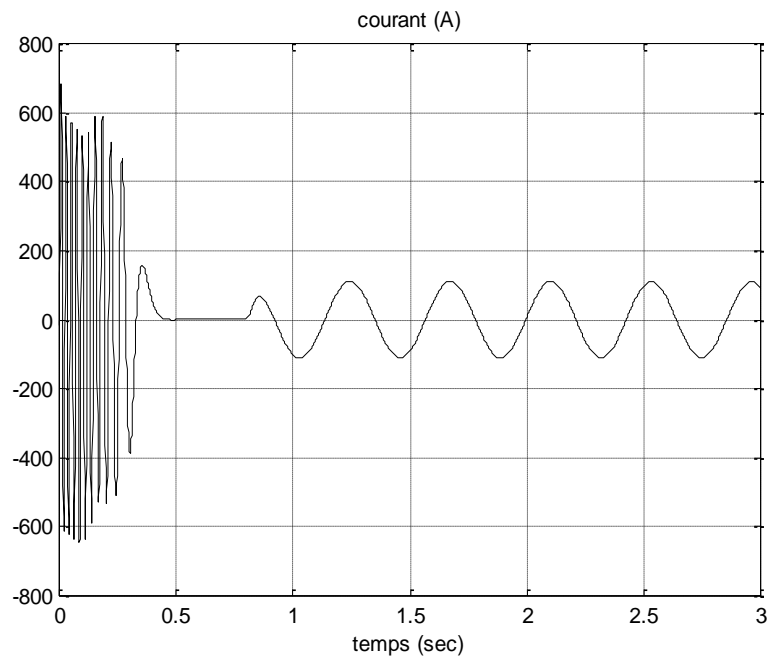


Figure III.3. Le courant dans une barre rotorique de la machine saine.

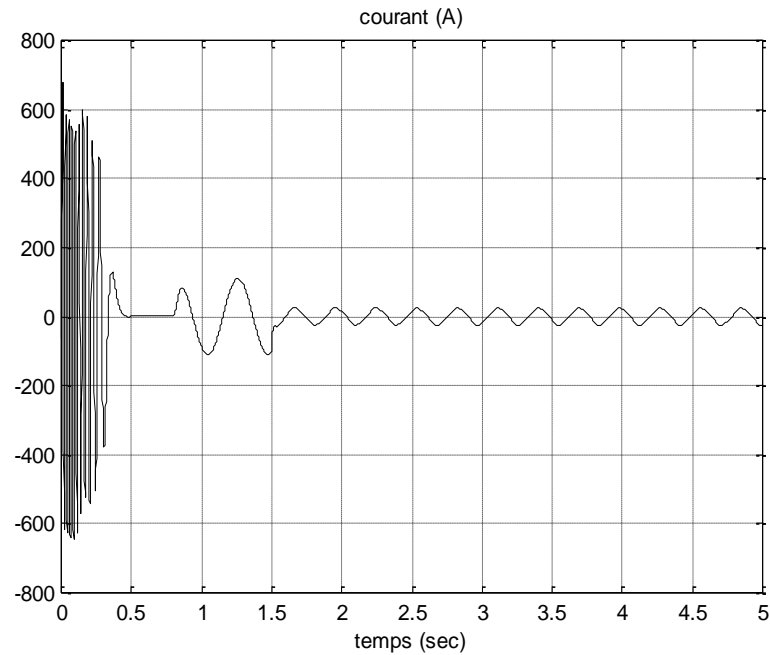


Figure III.4. Le courant rotorique dans la barre cassée (barre 1).

En réalité, le courant dans la barre rompue n'est jamais nul [10], [11]. Les barres ne sont pas isolées du circuit magnétique du rotor. Il existe toujours un courant qui passe par les tôles du rotor. En ce qui nous concerne, un accroissement de l'ordre de 11 fois la résistance initiale de la barre nous a permis d'aboutir à des résultats en concordance avec ceux obtenus expérimentalement.

À $t=1.5$ sec, nous simulons la rupture de la 15^{ème} barre en augmentant sa résistance de 11 fois. Le courant dans cette barre diminue fortement (figure III.4), entraînant une surintensité importante dans les barres adjacentes (figures III.5 et III.6).

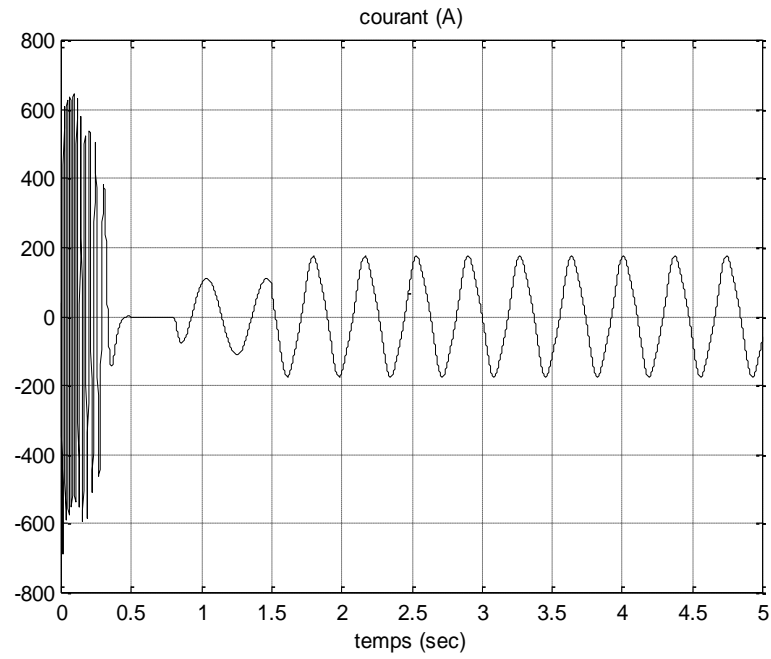


Figure III.5. Le courant rotorique dans la barre adjacente (barre 2).

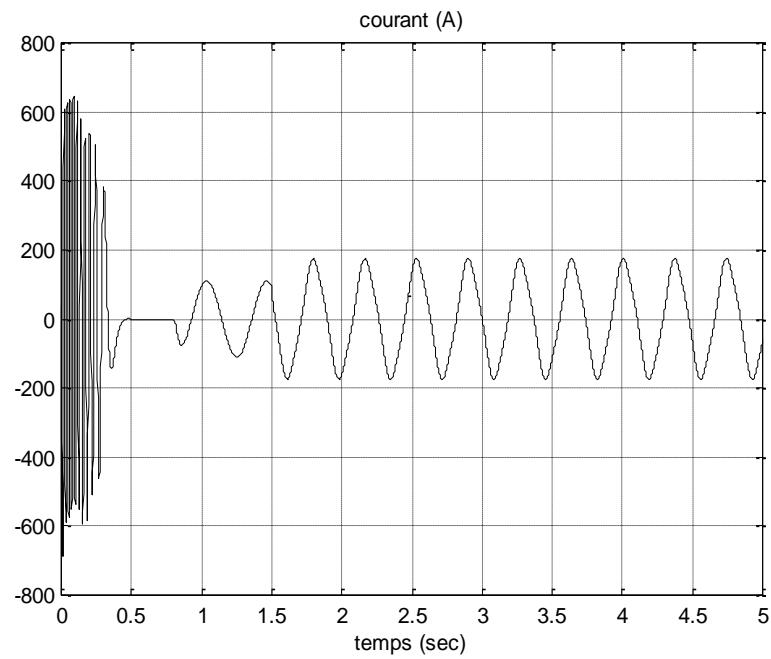


Figure III.6. Le courant rotorique dans la barre adjacente (barre 28).

III.4.2. Résultats expérimentaux

Les essais expérimentaux sont effectués au sein du Laboratoire de Génie Electrique de Biskra (LGEB) (figures III.7 et III.8). Le moteur triphasé asynchrone à cage utilisé est un moteur tétra polaire de 1.1 kW. Le stator est constitué de 48 encoches alors que le rotor se compose de 28 barres en Aluminium. Notre moteur est accouplé à une génératrice à courant continu de même puissance qui débite sur une charge résistive variable. Le moteur est alimenté en le branchant directement à une source triphasée variable. Le banc d'essai est équipé par un ensemble des instruments de mesure et des capteurs de tension, de courant et de couple. L'acquisition des signaux est effectuée par l'intermédiaire d'une carte dSpace.

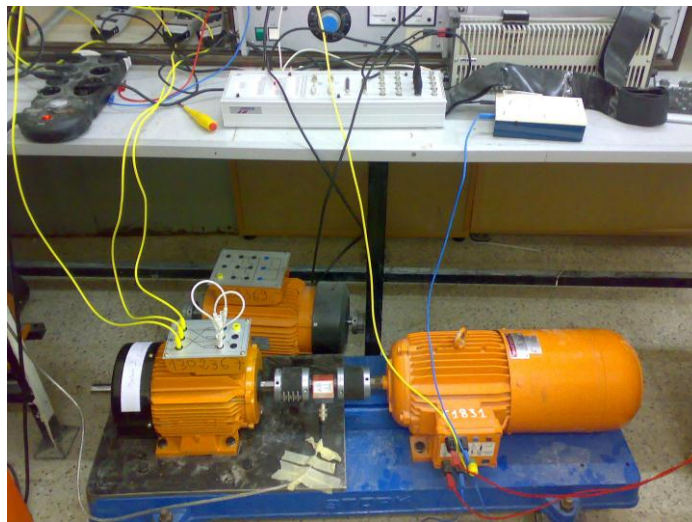


Figure III.7. Le banc d'essai.



Figure III.8. Le rotor du moteur avec 2 barres cassées.

L'arrivée du défaut se révélera dans le courant statorique par la modulation de son amplitude à la fréquence $2gf_s$. La visualisation de l'enveloppe du courant (figures III.10, III.11 et III.12), permet de mettre l'évènement en évidence, mais sans différenciation de type de défaut. Dans le but de faire une investigation, on a fait une comparaison entre le signal temporel du courant statorique de la machine saine avec celui de la machine avec une barre rotorique cassée.

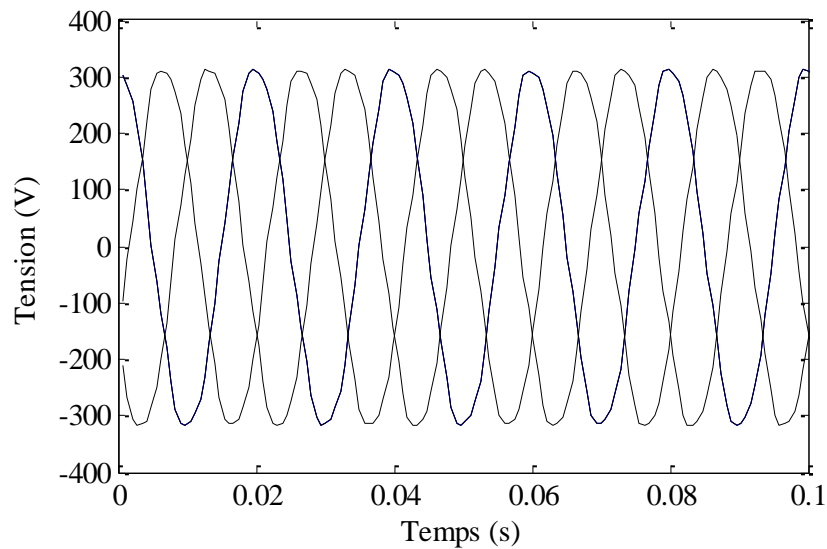


Figure III.9. Les tensions d'alimentation.

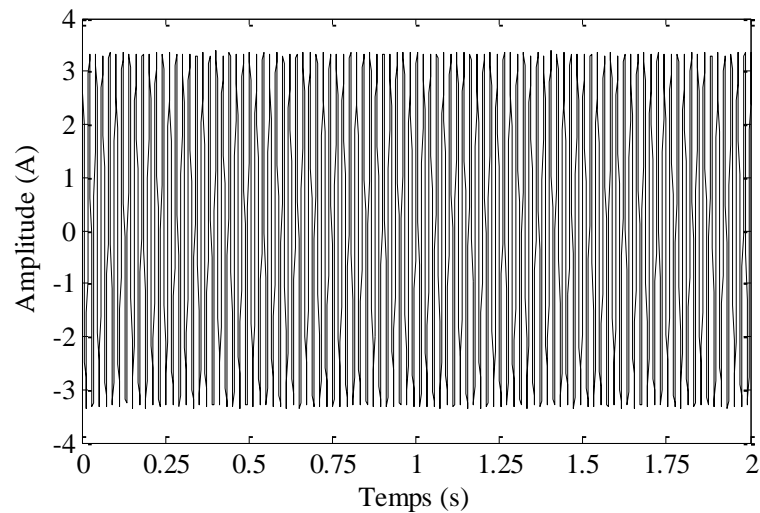


Figure III.10. Le courant statorique de la machine saine en pleine charge.

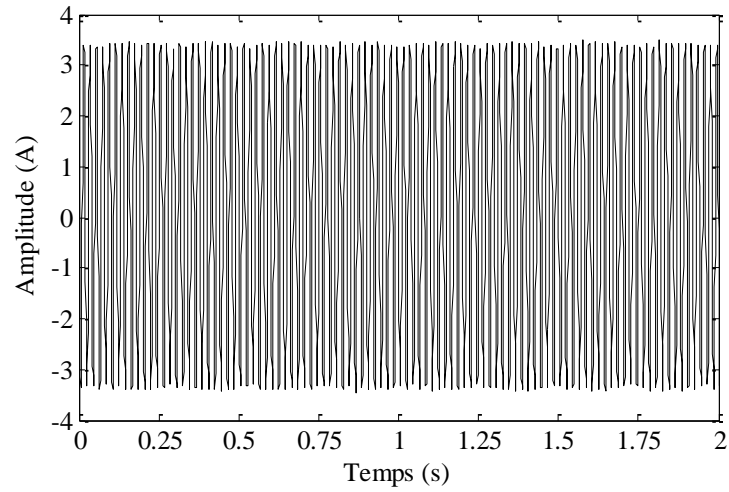


Figure III.11. Le courant statorique de la machine saine en pleine charge, avec une barre cassée.

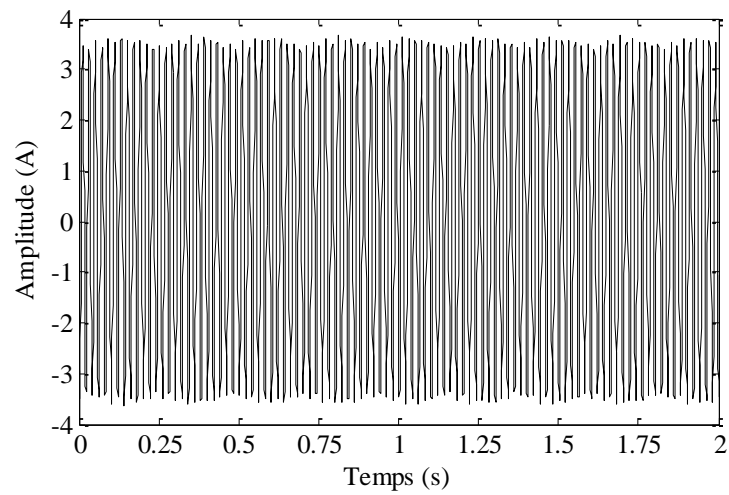


Figure III.12. Le courant statorique de la machine saine en pleine charge, avec deux barres cassées.

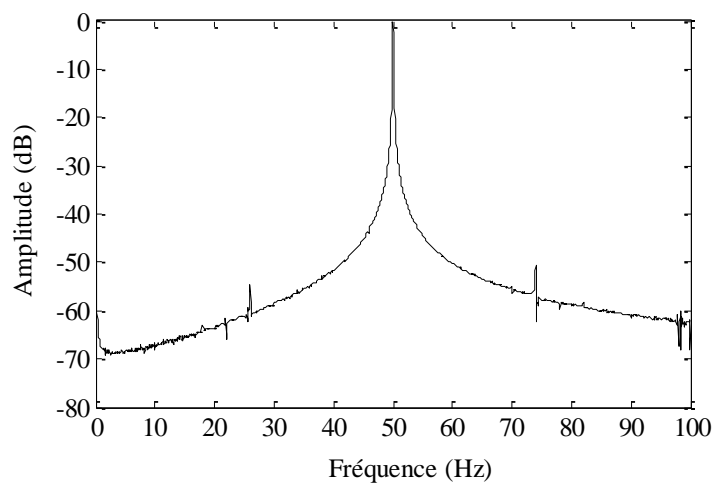


Figure III.13. Spectre logarithmique du courant statorique de la machine saine en pleine charge.

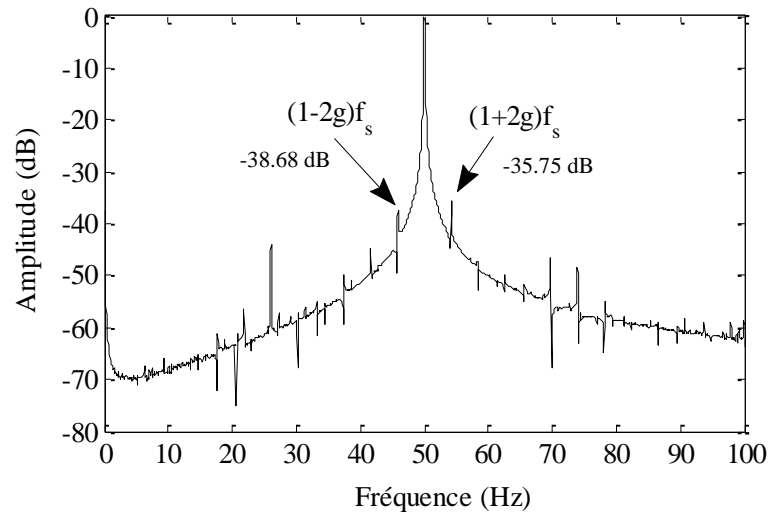


Figure III.14. Spectre logarithmique du courant statorique de la machine en pleine charge, avec une seule barre rompue.

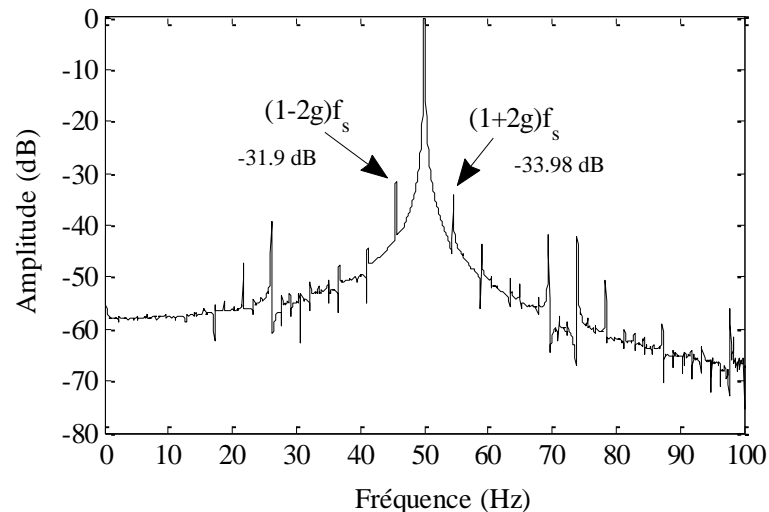


Figure III.15. Spectre logarithmique du courant statorique de la machine en pleine charge, avec deux barres rompues.

Les figures III.13, III.14 et III.15 représentent les spectres logarithmiques du courant statorique de la machine asynchrone (en pleine charge) à l'état sain et avec défaut, on peut clairement visualiser les indexes de défaut de cassure de barres, notant bien que l'amplitude d'harmonique de défaut augmente avec l'augmentation de nombre de barres rompues.

Pour les mêmes courants, les figures III.16, III.17, III.18, III.19 et III.20 montrent les spectres linéaires du courant statorique de la machine asynchrone (en pleine charge) à l'état sain et avec défaut, on peut conclure que les spectres logarithmiques servent facilement la détection des indexes de défaut.

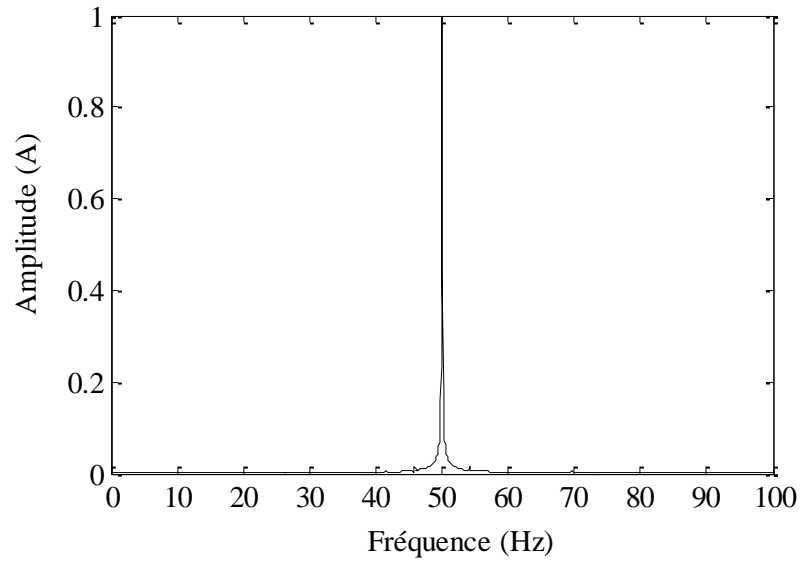


Figure III.16. Spectre linéaire du courant statorique de la machine saine en pleine charge.

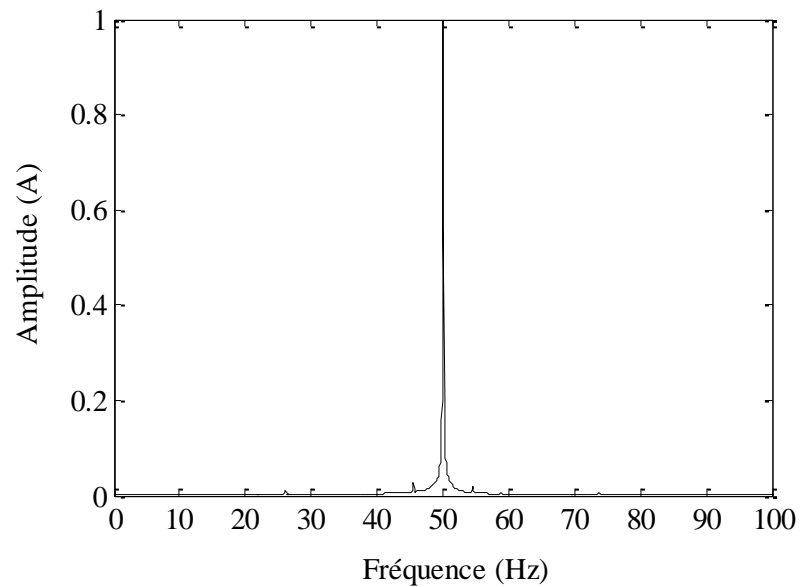


Figure III.17. Spectre linéaire du courant statorique de la machine en pleine charge, avec deux barres rompues.

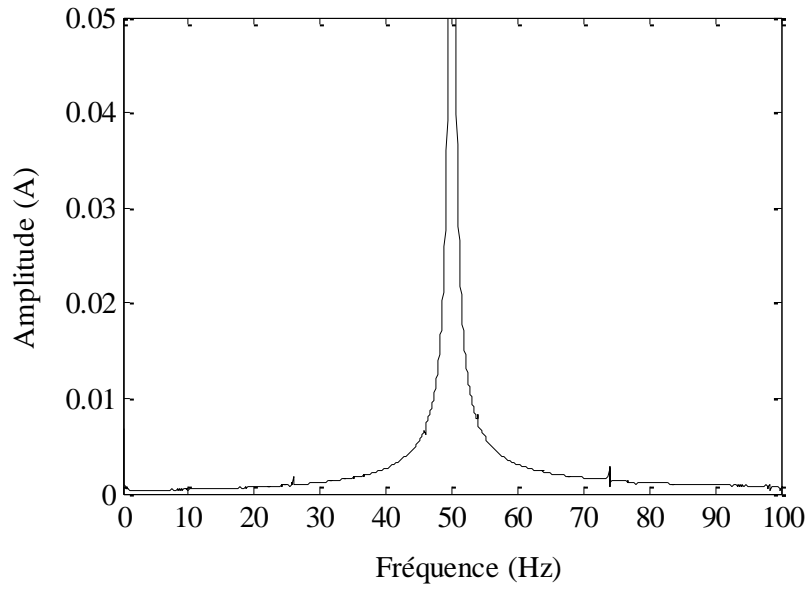


Figure III.18. Spectre linéaire du courant statorique de la machine saine en pleine charge.

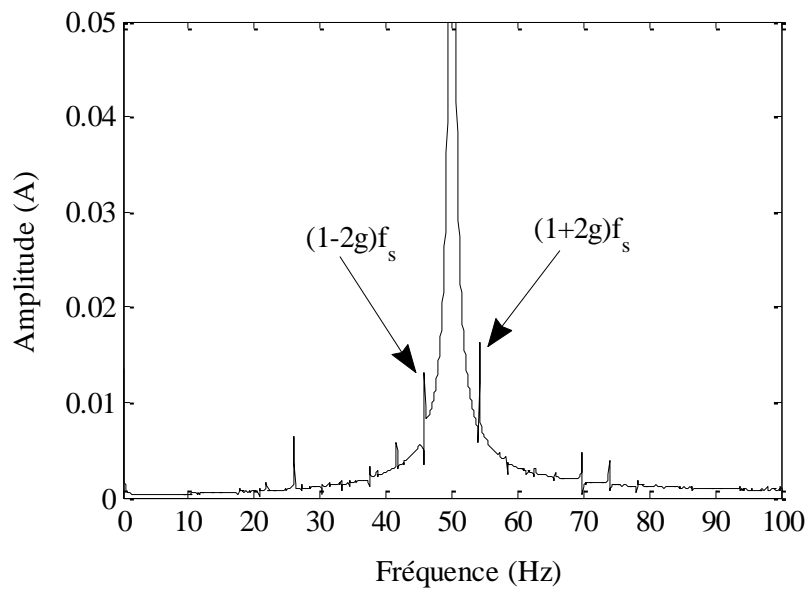


Figure III.19. Spectre linéaire du courant statorique de la machine en pleine charge, avec une seule barre rompue.

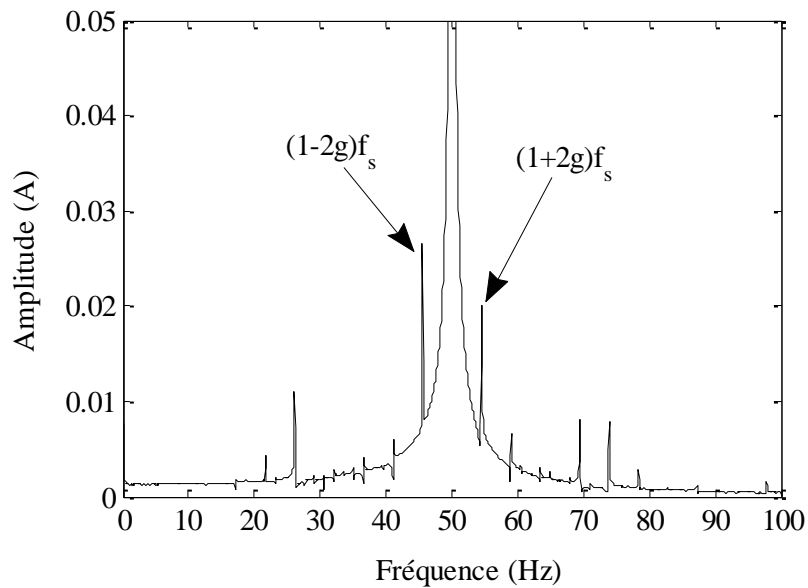


Figure III.20. Spectre linéaire du courant statorique de la machine en pleine charge, avec deux barres rompues.

III.5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une simulation d'un moteur asynchrone triphasé à cage, pendant les différentes conditions de fonctionnement (sain et rupture de barres).

Aussi nous avons présenté des résultats expérimentaux de la machine asynchrone à l'état sain et avec défaut.

Au cours de ce chapitre nous avons fait une comparaison entre les spectres logarithmique et les spectres linéaires

Nous avons trouvé que la rupture d'une barre provoque des oscillations dans le courant, ce indice peut argumenter la présence d'un défaut mais ne peut pas le préciser, la méthode d'analyse spectrale du courant statorique (MCSA) est le plus efficace.

CONCLUSION GÉNÉRALE

CONCLUSION GENERALE

L'intérêt grandissant des industriels pour la maintenance des entraînements électriques, et compte tenu de la fréquence d'utilisation des machines asynchrones, la détection précoce des défauts dans ces machines est devenu un enjeu économique important. Dans ce cadre, le travail présenté dans ce mémoire traite la modélisation de la machine asynchrone en vue de diagnostic.

Un premier chapitre a permis d'exposer les fréquents défauts, ainsi que les différentes techniques de diagnostic utilisées. Ensuite, les signatures du défaut de cassure de barre à été présenté.

Un second chapitre, où nous avons proposé une méthodologie de synthèse d'un modèle de la machine asynchrone à cage d'écureuil. Cette modélisation s'appuie sur une description de la topologie constitutive et géométrique de la machine asynchrone à cage d'écureuil. Sous la forme de circuits électriques maillés magnétiquement couplés, ce modèle permet la simulation des barres cassées.

Enfin, le troisième chapitre exploite la flexibilité du modèle développé pour rendre compte des défaillances due aux cassures de barres. Les résultats la machine à l'état sain et avec défauts obtenus par simulation sont confrontés aux résultats expérimentaux. Ils mettent en évidence l'effet de défaut sur les différentes grandeurs d'états de la machine.

BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE

- [1] M. Khov, "**Surveillance et Diagnostic des Machines Synchrones à Aimants Permanents: Détection des Courts-Circuits par Suivi Paramétrique**", Thèse de Doctorat, Université de Toulouse, France, 2009.
- [2] M. Sahraoui, "**Étude Comparative des Méthodes de Diagnostic des Machines Asynchrones**", Thèse de Doctorat, Université de Biskra, Algérie, 2010.
- [3] A. Abed, "**Contribution à l'Étude et au Diagnostic de la Machine Asynchrone**", Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy-1, France, Mars 2002.
- [4] N. Halem, "**Modélisation des Machines Asynchrones Triphasées à Cage en Vue du Diagnostic par la Méthode des Éléments Finis**", Thèse de Doctorat, Université de Biskra, Algérie, 2015.
- [5] B. Vaseghi, "**Contribution à l'Étude des Machines Electriques en Présence de Défaut Entre-Spires Modélisation-Réduction du Courant de Défaut**", Thèse de Doctorat, Université de Nancy, France, 2009.
- [6] M. Sahraoui, "**Contribution au Diagnostic d'une Machine Asynchrone Triphasée à Cage**", Mémoire de Magistère, Université de Biskra, Algérie, 2003.
- [7] M. E. H. Benbouzid and G. B. Kliman, "**What Stator Current Processing-Based Technique to Use for Induction Motor Rotor Faults Diagnosis?**" IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 18, no. 2, pages 238-244, June 2003.
- [8] N. Halem, "**Étude et Simulation du Modèle Multi-Enroulements de la Machine Asynchrone**", Mémoire d'Ingéniorat, Université de Biskra, 2007.
- [9] A. Ceban, "**Méthode Globale de Diagnostic des Machines Electriques**", Thèse de Doctorat, Université d'Artois, Laboratoire Systèmes Électrotechniques et Environnement, France, 2012.
- [10] F. Filippetti, G. Franceschini, C.Tassoni, P.Vas, "**Broken Bar Detection in Induction Machines: Comparaison Between Current Spectrum Approach**", IEEE Industry Application Conference 94, Denver USA, Oct 1994.

- [11] R. Fiser, S. Ferkoj, "**Modelling of Dynamic Performance of Induction Machine with Rotor Faults**", Proc. Of the Int. Electrical Machines ICEM 96, pp17-22, Vigo, Spain, 1996.

Annexe 1 : Paramètres du moteur utilisé

P	puissance nominale	1.1kW
V	tension nominale de ligne	230V
f_s	fréquence d'alimentation	50Hz
p	nombre de paire de pôles	1
D	diamètre moyen	75mm
l	longueur	60mm
e	épaisseur d'entrefer	0.38m
N_r	nombre de barre	28
N_s	nombre de spires par phase	193
r_s	résistance d'une phase statorique	4.1 Ω
L_{sf}	résistance de fuite statorique	17.5mH
R_b	résistance d'une barre rotoriques	74 $\mu\Omega$
R_e	résistance d'un anneau de court-circuit	74 $\mu\Omega$
L_b	inductance de fuite d'une barre rotoriques	0.33 μH
L_e	inductance de fuite d'anneau de court-circuit	0.33 μH
J	moment d'inertie	4.5 10^{-3}Nms^2
K_0	coefficient de frottement	5 10^{-6}Nms