

N° d'ordre :

N° de série :

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



Mémoire de Fin d'Études

Présenté à

L'Université d'Echahid Hamma Lakhdar d'El Oued

Faculté de la Technologie

Département de Génie Electrique

En vue de l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

En Electrotechnique

Machines Electriques

Présenté par

CHERIFI Abdelkader

MOHAMMEDI Kamel

TOUATI Abdelhafid

DRIHEM Med Anis

Thème

**Contribution au diagnostic des défauts dans les moteurs asynchrones
à cage d'écureuil :
Détection du défaut de la cassure de barres rotoriques**

Soutenu en Juin 2022, devant le jury composé de :

M. HALEM Noura

Maitre de conférences

Président

Dr. BESSOUS Noureddine

Maitre de conférences

Rapporteur

Dr. TOUIL Sliman

Maitre de conférences

Examineur

Année Universitaire 2021/2022

REMERCIEMENTS

*C'est à nos Dieu que nous adressons en premier lieu
mes
remerciements.*

*Nous tenons à exprimer nos remerciements et
gratitude à notre encadreur : **Dr. BESSOUS
Nouredine** (Docteur à l'université d'El oued) pour
ses aides et pour ses encouragements sincères
pour la finalisation de ce mémoire.*

*Nos sincères remerciements aux messieurs les
membres du jury pour l'honneur qu'ils nous font en
participant au jugement de ce travail.*

*Nous tenons à remercier vivement toutes
personnes qui nous ont aidé à élaborer et réaliser
ce mémoire, ainsi à tous ceux qui nous aidés de
près ou de loin à accomplir ce travail.*

Dédicace

Nul plaisir ne peut égaler celui de partager son bonheur avec les gens que l'on aime.

Arrivé au terme de mes études, j'ai le grand honneur de dédier ce modeste travail :

*À ma chère mère GAREL MATHERED Fatema à qui je dois ce que je suis, elle qui a été toujours là
pour moi et qui n'a jamais cessé de prier
pour mon bonheur.*

*À mon cher père M^{ed} Seghir, pour tous les conseils qui m'a donnés, le soutien qui m'a montré et les
sacrifices qu'il a consentis
pour qu'il me voie réussir.*

À mes chers frères Ibrahim, Larbi, Ahmad et Takieddin

À mes chères sœurs

À tous les membres de ma famille grand et petit

À tous mes amis.

À tous ceux que j'aime et qui m'aiment.

Abdelkader Cherif i

Dédicace

Louange à Allah. Je vous remercie et exige plus s'il vous plaît. Louange à Dieu, comme vous nous avez gracieusement réconfortés après oui et merci dans le bien et le mal. Et merci dans l'intensité et la prospérité et vous féliciter quand même.

À qui était l'aide et la chaleur entre mes côtes...

"Maman"

A qui je n'ai rien épargné...

"Mon père"

Au lien sur lequel j'étais basé...

"Mes frères et sœurs"

Et à ceux qui ont rendu ma vie exaltante avec eux comme un soleil ils ont enlevé mes nuages

"mes amis"

À tous ceux qui m'ont appris des personnages...

"Mes professeurs"

Kamel MOHAMMEDI

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

Mes très chers parents

Qui n'ont jamais cessé d'être à l'écoute et pour tous leurs sacrifices

A mes sœurs

A mes oncles, tantes, cousins, cousines et à toute ma famille.

Vous m'avez encouragée et aidée quand j'avais besoin de vous. Je n'aurais jamais pu le faire sans vous. Mes sincères remerciements.

A tous mes enseignants de la faculté de la Technologie.

A tous mes amis et collègues de cette promotion 2022

A tous ceux qui ont participés de près ou de loin pour la réalisation de ce travail et ceux qui m'espèrent la réussite.

Et à tous ceux qui leurs revient du droit

Med Anis DRIHEM

Dédicace

Ma Mère, Mon Père

Affable, honorable, aimable : vous représentez pour moi

*Le symbole de la bonté par excellence, la source de tendresse
et l'exemple du dévouement qui n'a pas cessé de m'encourager et de prier pour
moi.*

Soyez sûrs que je continuerai mon chemin.

Je vous dédie ce travail en témoignage de mon profond amour.

*Puisse Dieu, le tout puissant, vous préserver et vous
accorder santé, longue vie et bonheur.*

A mes sœurs à mes frères

En témoignage de l'attachement, de l'amour et de

L'affection que je porte pour vous.

A tous les membres de ma famille, petits et grands

A tous mes amis de proches :

Veillez trouver dans ce modeste travail l'expression de mon Affection

ABDELHAFID TOUATI

الآلات الكهربائية الدوارة مهمة جدا في الحياة اليوم، وذلك لتواجدها في العديد من المجالات، ومن بين هذه آلات نذكر الآلات غير المتزامنة ذات قفص السنجاب التي تعد واحدة من أكثر الآلات رواجاً واستخداماً في المجال الصناعي. هذه الأخيرة يمكن أن تتعرض إلى خلل في أي وقت ويسبب ذلك خسائر كبيرة، لذا فإن عملية تشخيص العيوب قبل أن تتحول إلى عطب في وقت مبكر أصبح أمراً ضرورياً. يتضمن هذا العمل دراسة تجريبية للكشف عن خلل تكسر القضبان في القفص الدوار في الماكينة الكهربائية اللامتزامنة، وذلك باستخدام تقنية التحويل السريع لفوريي أو ما يسمى بالتحليل الطيفي للتيار الكهربائي في الجزء الساكن، بهدف التحقق من تأثير تكسر القضبان على السلوك الكهربائي للماكينة.

الكلمات المفتاحية: الآلات الكهربائية الدوارة- المجال الكهربائي- الماكينة الكهربائية

RESUME

Les machines électriques tournantes sont très importantes dans la vie d'aujourd'hui en raison de leur présence dans de nombreux domaines, et parmi ces machines nous citons la machine asynchrone à cage d'écureuil qui est l'une des machines les plus populaires et les plus utilisées dans le domaine industriel.

Cette dernière peut être affecter à n'importe quel défaut à tout moment et causer de grandes pertes, de sorte que le processus de diagnostic des défauts avant qu'ils ne soient se transformer en dysfonctionnement précoce est devenu une nécessité.

Ce travail comprend une étude expérimentale pour objectif de détecter la rupture des barres rotoriques dans une MAS. Cette étude a utilisé la technique de la transformé de Fourier rapide (TFR ou FFT en Anglais) du courant électrique du stator. Cela nous ont permis de voir l'effet de la rupture des barres rotoriques sur comportement électrique de la machine.

Mots clés : machines électriques tournantes, champ électrique, machine électrique

ABSTRACT

Rotating electrical machines are very important in today's life because of their presence in many fields, and among these machines we mention The squirrel cage asynchronous machine is one of the most popular and widely used machines in the industrial field.

The latter can be exposed to any defect at any time and cause great losses, so the process of diagnosing defects before they are Turning into an early malfunction has become a necessity this work includes an experimental study in order to detect broken rotor bars in asynchronous machine type. We used the fast Fourier transform to detect broken rotor bars which is based on the analysis of the sator current spectra. This led us to verify the effect of broken rotor bars on the electrical behavior of the machine.

Key words: rotating electric machines, electric field, electric machine

SOMMAIRE:

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

Chapitre I: Généralités sur le Diagnostic des défauts dans les MAS

I.1. Introduction	4
I.2.Moteur Electrique	4
I.2.1. Définition	4
I.2.2.Présentation Générale Du Moteur Electrique	4
I.3.Moteur Asynchrone	5
I.3.1. Description D'un Moteur Asynchrone.....	5
I.3.2.Partie Mécanique.....	8
I.3.3.Principe de fonctionnement:.....	8
I.4.Présentation des différentes défaillances de la MAS.....	10
I.4.1.Les statistiques des défauts:	10
I.4.2.Défauts statoriques:	10
I.4.3.Défauts rotoriques	12
I.4.4.Défaillances aux paliers:	13
I.4.5.Défaut mécanique:	14
I.5. Les méthodes de diagnostiques:	15
I.5.1 Les méthodes de connaissances.....	15
I.5.2 Les méthodes de redondances analytiques:	17
I.5.3 Les méthodes par l'analyse de signaux:	17
I.6.Causes de défauts de la machine asynchrone	18
I.7.Conclusion.....	19

Chapitre II: Aperçu détaillé sur le défaut de la cassure des barres rotoriques

II.1. Introduction	21
II.1.1. Phénomène de base du défaut de barre cassée.....	23
II.1.2. Modification du flux axial par la variation de vitesse rotorique.....	24
II.2.Utilisation des différents signaux autres que le courant statorique:	24
II.2.1. Analyse des signaux vibratoires	25
II.2.2. Analyse des flux.....	26
II.2.3.Analyse du couple électromagnétique.....	26
II.2.4. Signatures fréquentielles extraites à partir des signaux préconditionnés.....	27
II.3. Conclusion	27

Chapitre III: Analyse du défaut de la cassure de barres

III.1. Introduction	29
III.2. Cassures de barres rotoriques:	29
III.2.1 FMM résultante d'un moteur avec une barre cassée	29

III.2.2 Résultats expérimentaux:	30
III.3 Résultats et discussion de la cassure de barres:	30
III.4 Fonctionnement en charge:	31
III.4. Conclusion:	36
Conclusion Générale.....	38
Bibliographie.....	39

Liste des figures

Chapitre I

Figure I.1	moteur asynchrone	16
Figure I.2	le stator	17
Figure I.3	rotor bobiné	18
Figure I.4	Rotor A Cage D'écureuil	19
Figure I.5	les différents organes mécaniques d'un moteur asynchrone à cage	19
Figure I.6	Dessin expérimental de principe de fonctionnement	20
Figure I.7	La répartition des pannes	21
Figure I.8	Différents types de défauts statorique	22
Figure I.9	Trois catégories d'excentricité	23
Figure I.10	Méthodes de diagnostic des machines électriques	24

Chapitre II

Figure II.1	L'excentricité d'une machine asynchrone	26
Figure II.6	Schéma de fonctionnement pour une machine saine et défectueuse	34

Chapitre III

Figure III.1	1 Photographie des rotors de la MAS	43
Figure III.2	Courant statorique en fonction du temps	44
Figure III.3	Zoom de spectre du courant statorique à l'état sain (en charge)	45
Figure III.4	Zoom de spectre du courant statorique avec 1BC	45
Figure III.5	Fréquences qui correspondent aux ordres 3 à l'état sain(en charge)	45
Figure III.6	Fréquences qui correspondent aux ordres 3 à l'état sain(en charge)	46
Figure III.7	Fréquences qui correspondent aux ordres 3 avec 1BC (en charge)	46
Figure III.8	Fréquences qui correspondent aux ordres 5 avec 1BC (en charge)	46
Figure III.9	Fréquences qui correspondent aux ordres 7 à l'état sain(en charge)	47
Figure III.10	Fréquences qui correspondent aux ordres 7 avec 1BC (en charge)	47
Figure III.11	Fréquences qui correspondent aux ordres 9 à l'état sain(en charge)	47
Figure III.12	Fréquences qui correspondent aux ordres 9 avec 1BC (en charge)	48

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Ce travail entre dans le cadre du diagnostic des défauts dans les machines électriques et spécialement le moteur asynchrone (MAS) à cage d'écureuil. Le moteur asynchrone à cage est un composant clé de la plupart des équipements industriels, du fait de sa grande robustesse et son faible coût. Il est en effet, omniprésent dans les secteurs de pointes comme l'aéronautique, le nucléaire, la chimie, etc. Malgré le fait que la machine asynchrone (MAS) soit réputée pour être la plus robuste des machines électriques, un certain nombre de contraintes de différentes natures (thermiques, électriques, mécaniques et d'environnement) peuvent affecter la durée de vie de celle-ci en faisant apparaître des pannes dans le stator et le rotor. Ces pannes occasionnent des pertes économiques considérables. Il est impératif donc de mettre en œuvre des systèmes de surveillance adéquats afin d'éviter les arrêts imprévus [DID04].

Malheureusement, ces machines sont impactées par des défaillances diverses comme les barres cassées ou l'excentricité au niveau du rotor ou encore les courts-circuits entre spires au stator, qui peuvent conduire à l'arrêt de la production et causer des dommages aux équipements et humains aux alentours, par conséquent. La surveillance et le diagnostic de ces machines deviennent primordiaux afin de diminuer les coûts de maintenance et d'exploitation, augmenter la sécurité et la disponibilité des équipements et garantir la continuité de la production.

L'histoire du diagnostic de défaut et de la protection remonte à l'origine des machines elles-mêmes. Les fabricants et les utilisateurs des machines électriques ont initialement mis en œuvre une protection simple telle que la surintensité, la surtension et la protection contre les défauts à la terre, etc. pour assurer un fonctionnement sûr et fiable. Pendant que les tâches accomplies par ces machines devenaient de plus en plus complexes, des améliorations ont été également cherchées dans le domaine du diagnostic de défaut. Dans certaine application, il est maintenant devenu très important de diagnostiquer des défauts dès leur naissance ; parce qu'une panne dans l'un des corps constitutifs de la machine peut arrêter tout le processus de production, ce qui cause des pertes financières lourdes [IBR09].

Le travail présenté dans ce mémoire s'inscrit sur le diagnostic du défaut de la cassure de barres rotoriques dans les machine asynchrone à cage d'écureuil en utilisant la méthode d'analyse

spectrale du courant statorique (MCSA-FFT). Cette technique est connue sous l'abréviation Anglaise MCSA (Motor Current Signature Analysis).

Le but de ce travail est de contribuer à la détection, la surveillance et le diagnostic des défauts auxquels cette machine électrique est exposée. Nous avons donc essayé dans cette étude de diagnostiquer défaut de la cassure de barre rotorique dans la machine asynchrone en utilisant la méthode d'analyse du courant statorique afin de vérifier l'état de la machine.

Ce travail est organisé en trois chapitres comme suit:

Dans le premier chapitre, un état de l'art de diagnostic des défauts dans la machine asynchrones vont bien présenté.

La deuxième partie présentera quelques notions sur la méthode couramment utilisée dans le diagnostic des défauts dans les MAS.

Le dernier chapitre va analyser et discuter les résultats obtenus en présence du défaut de la cassure de barres. Dans ce chapitre, on va comparer entre le spectre du courant statorique sous un fonctionnement du moteur sain et défectueux.

Nous terminerons ce travail par une conclusion générale.

CHAPITRE I

Généralités sur le Diagnostic des défauts dans les MAS

I.1. Introduction:

Dans ce chapitre, nous allons commencer par la présentation de la machine asynchrone étudier puis, nous exposerons les différentes défaillances qui peuvent affecter la machine, les défauts statoriques, les défauts rotoriques et les défauts aux paliers, et défaut mécanique. Enfin, nous étalerons le diagnostic des méthodes les plus usitées, la surveillance la détection l'identification et localisation de défaut.

I.2.Moteur Electrique :

I.2.1. Définition :

Le moteur électrique est considéré comme l'élément principal dans le système électromécanique. Il accomplit la conversion de l'énergie électrique en énergie mécanique, et pour un large part, il détermine les indices techniques et économiques de l'entraînement électrique en générale [SEB 06].

I.2.2.Présentation Générale Du Moteur Electrique :

Il existe de nombreuses types de moteur électrique, les moteurs asynchrones et quelques moteurs synchrones qui sont employés actuellement dans l'usine, les raisons de ce choix sont simples :

- les moteurs à courant continu nécessitent un collecteur à charbons donc formes des étincelles et demandent beaucoup d'entretien .en outre leur prix est élevé. leur avantage réside da la possibilité de faire varie facilement leur vitesse.
- les moteurs synchrones ont une vitesse strictement constante et peuvent décrocher par surcharge. il nécessite un moteur auxiliaire de démarrage (conçus pour le démarre en asynchrone). De plus, leur rotor doit être alimenté par un courant continu ; rarement disponible sur place. ils ont un

bon rendement mais leur prix sont élevés .ils ne sont utilisés que pour de fortes puissance (plusieurs Mégawatts).

- Les moteurs asynchrones sont intéressants par leurs robustesse ; leurs modes de démarrage simple en générale ; et également l'absence d'étincelle et leur prix sont abordable nettement. ils ont un rendement optimum qui va de 0.6 pour les petites moteurs (<1KW) à 0.95 pour les moteurs de 100KW et plus.

Il existe deux grandes familles de moteurs asynchrones :

- ✓ Les moteurs à cage d'écureuil.
- ✓ Les moteurs à bague (ou rotor bobiné).

Les moteurs asynchrones constituant plus de 95% des moteurs utilisés dans l'industrie pétrochimique. Ils seront les seuls à être étudiés dans ce chapitre [PIG].

I.3. Moteur Asynchrone :

I.3.1. Description D'un Moteur Asynchrone :

Comme toutes les machines à induction, le moteur triphasé comporte :

- **Une partie fixe (stator)** : constitué de disques en tôle magnétique portant les enroulements chargés de magnétiser l'entrefer.
- **Une partie tournante (rotor)** : constitué de disque en tôle magnétique empilés sur l'arbre de la machine portant un enroulement bobiné ou injecté.
- **Une partie mécanique** : qui permet la rotation du rotor et le maintien des différents sous-ensembles [PIG].

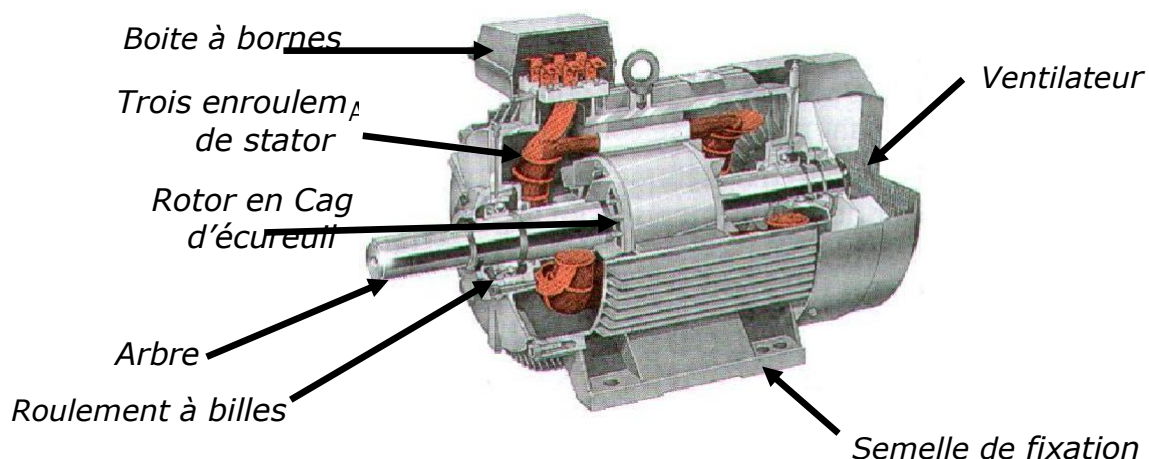


Figure (I.1) : moteur asynchrone

1. le Stator :

Les différents types de moteurs asynchrones ne se distinguent que par le rotor dans tous les cas le stator reste, au moins dans son principe, le même. Il est constitué d'un enroulement bobiné reparti dans les encoches du circuit magnétique statorique. Ce circuit magnétique est constitué d'un empilage de tôle dans lesquelles sont découpées des encoches parallèles à l'axe de la machine Figure (I.2) [SEB 06].

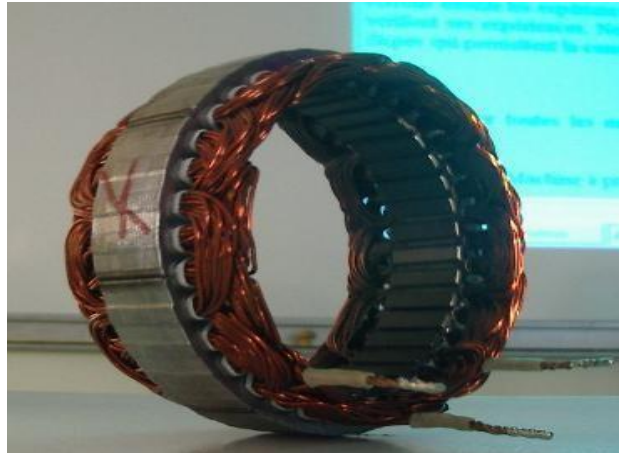


Figure (I.2): le stator

2. le Rotor :

2.1. Rotor bobiné (à bague) :

Le rotor comporte un enroulement bobiné à l'intérieur d'un circuit magnétique constitué de disques en tôle empilés sur l'arbre de la machine. Cet enroulement est obligatoirement polyphasé, même si le moteur est monophasé, et en pratique, toujours triphasé à couplage en étoile. Les encoches, découpées dans les tôle sont légèrement inclinées par rapport à l'axe de la machine de façon à réduire les variations de réluctance liées à la position angulaire rotor/stator et certaines pertes dues aux harmonique. les extrémités des enroulements rotoriques sont sorties et reliées à des bagues montées sur l'arbre , sur lesquelles frottent des balais en charbonne. On peut ainsi mettre en série avec le circuit rotorique des éléments de circuit complémentaire

(résistance, électronique de puissance); qui permettent des réglages de la caractéristique couple /vitesse. Ce type de moteur est utilisé essentiellement dans des applications où les démarrages sont difficiles ou nombreux; en effet les pertes rotorique pendant la phase de démarrage valant approximativement $1/2J\Omega^2$ ne sont pas toujours supportées par les cages Figure (I.3) [SEB 06].

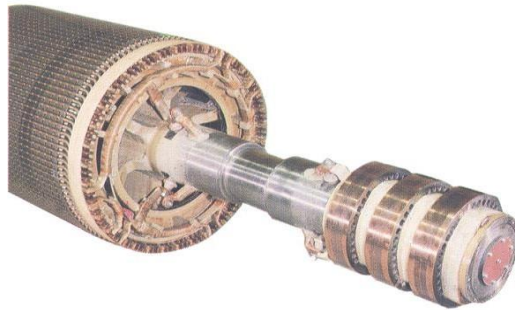


Figure (I.3): rotor bobiné

2.2. Rotor à cage :

Le circuit de rotor constitué de barres conductrices régulièrement réparties entre deux couronnes métalliques formant les extrémités, le tout rappelant la forme d'une cage d'écureuil. Bien entendu, cette cage est insérée à l'intérieur d'un circuit magnétique analogue à celui du moteur à rotor bobiné. Les barres sont faites en cuivre, en bronze ou en aluminium, suivant les caractéristiques mécanique et électrique recherchées par le constructeur. Dans certaines constructions, notamment pour le moteur à basse tension (par exemple 230/400 V), la cage est réalisée par coulée et centrifugation d'aluminium. On démontre que si le nombre de barres est suffisamment grand (soit en pratique, $N_b \geq 8.p$), la cage est transformée automatiquement en un circuit polyphasé de polarité adéquate. Ce type de moteur, beaucoup plus aisé à construire que le moteur à rotor bobiné est par conséquent d'un prix de revient inférieur et a une robustesse intrinsèquement plus grande. Ce n'est pas étonnant qu'il constitue la plus grande partie du parc de moteur asynchrone actuellement en service. Son inconvénient majeur est qu'il est au démarrage de mauvaises performances (courant élevé et faible couple). C'est pour remédier à cette situation qu'ont été développés deux autres types de cages (rotor à double cage et rotor à encoche profondes) Figure (I.4) [PIG]



Figure (I.4) : Rotor A Cage D'écureuil

I.3.2. Partie Mécanique :

La figure (I.5) montre les différents organes mécaniques d'un moteur asynchrone à cage.

[PIG]

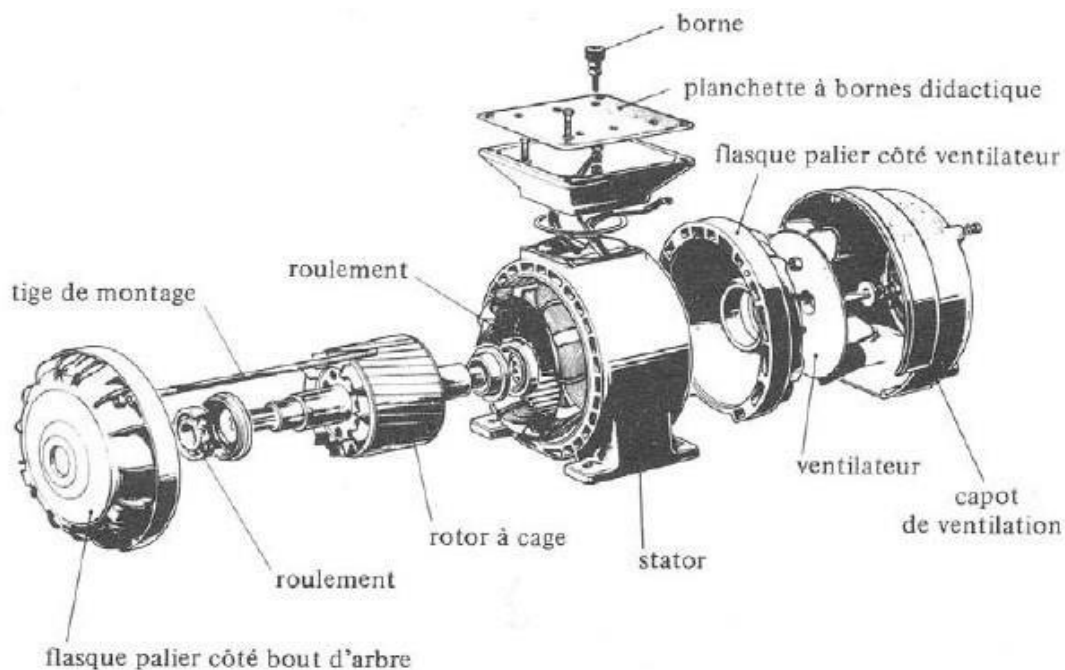


Figure (I.5): les différents organes mécaniques d'un moteur asynchrone à cage

I.3.3. Principe de fonctionnement:

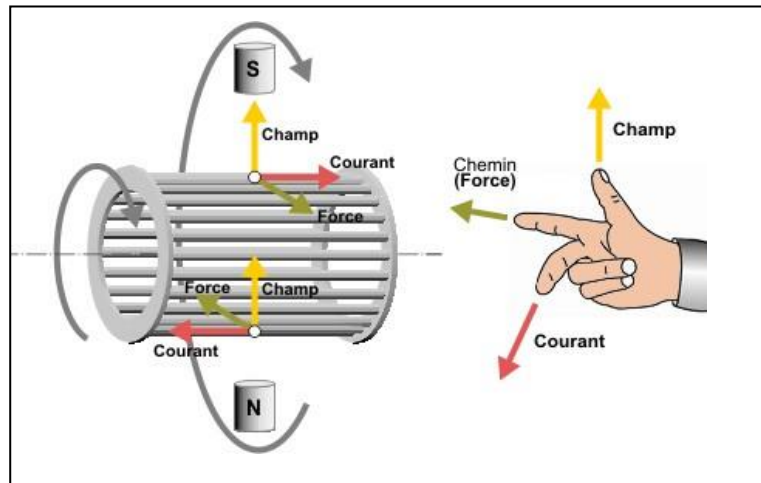
Le moteur asynchrone est une machine très simple dans sa réalisation et son principe qui utilise l'action d'un champ magnétique tournant sur les courants qu'il induit dans une masse métallique.

Le champ magnétique tournant créé par le stator induit dans le rotor **des courants de Foucault**. Conformément à **la loi de Lenz**, les forces dues à l'action du champ magnétique tournant sur les courants induits s'opposent à la cause qui leurs donne naissance, c'est-à-dire au mouvement relatif du champ magnétique tournant par rapport au rotor. Elles font tourner ce dernier dans le sens du champ magnétique tournant.

Si le rotor n'est soumis à aucun couple résistant, sa vitesse atteint celle du champ magnétique tournant appelé **vitesse de synchronisme**, mais alors, les courants induits disparaissent et au même temps le couple moteur [SEB 06].

S'il existe un couple résistant, le rotor prend une vitesse inférieure à celle du champ. L'écart est d'autant plus grand que le couple est plus important, car les courants induits, par suite le couple moteur, croissent avec cet écart.

On caractérise cet écart en introduisant une grandeur appelée **glissement**.



Figure(I.6) : Dessin expérimental de principe de fonctionnement

Le pouce est placé dans le sens du champ de l'inducteur. **L'index** indique le sens de la force. **Le majeur** est placé dans le sens du courant induit. La spire est donc soumise à un couple qui provoque sa rotation de le même sens que le champ inducteur, appelé champ tournant. La spire se met donc en rotation et le couple électromoteur produit, équilibre le couple résistant [SEB 06].

I.4. Présentation des différentes défaillances de la MAS:

I.4.1. Les statistiques des défauts:

Ces défauts se répartissent selon la figure suivante :

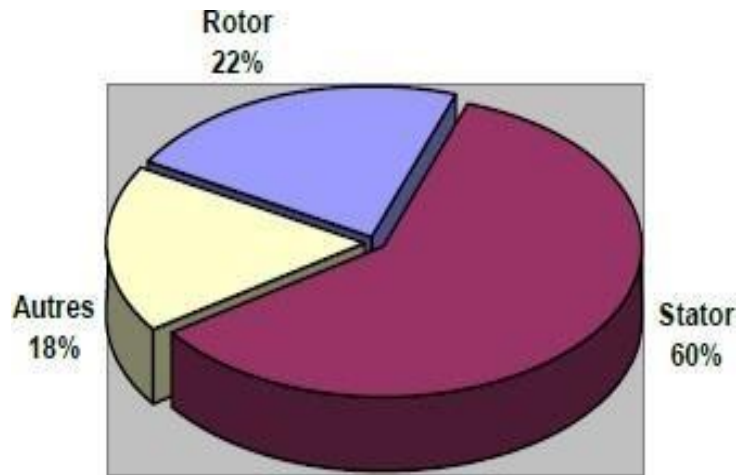
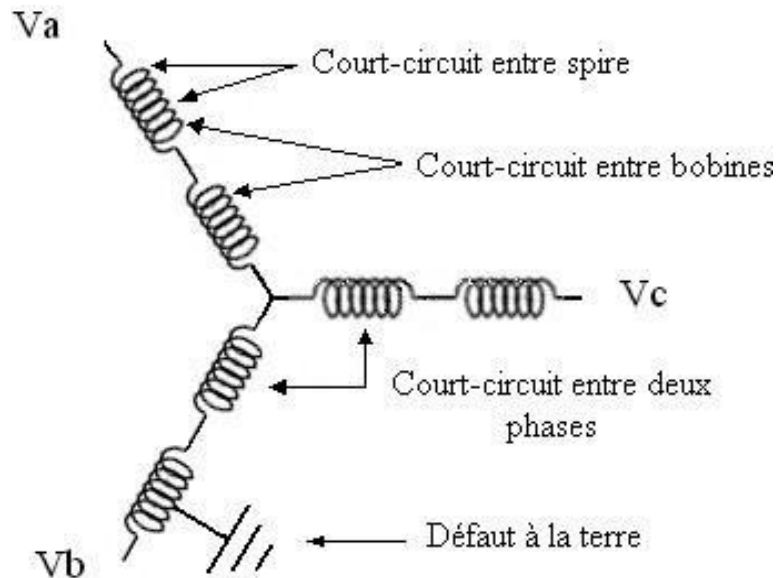


Figure (I.7).La répartition des pannes.

La figure (I.7) représente une étude statistique qui a été effectuée en 1988 par une compagnie d'assurance allemande des systèmes industriels sur les pannes des machines asynchrones de moyenne puissance (de 50 kW à 200kW).

I.4.2. Défauts statoriques:

Les défaillances au stator représentent environ de 40% à 60% des défauts des machines asynchrones ayant plusieurs types comme indique la figure (I.8). La majeure partie de défauts statoriques est attribuée à la dégradation d'isolants. L'enroulement statorique d'une machine électrique est soumis à des efforts induits par une variété de facteurs, parmi les plus importants, une surcharge thermique, les vibrations mécaniques, les pics de tension provoqués par le réglage de fréquence...etc [CHA 17].



Figure(I.8).Différents types de défauts statorique.

a- 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 des phénomènes thermiques se traduisant par une augmentation de la température des différents constituants du moteur. Or les matériaux d'isolation ont une limite de température, de tension et mécanique. De ce fait, si l'environnement de travail d'un matériau d'isolation dépasse une de ces limites, ce matériau se dégrade de manière prématurée ou accélérée, puis finit par ne plus assurer sa fonction. Dans ce cas, un court-circuit peut apparaître dans l'enroulement concerné. Les différentes causes pour ce type de défaut sont [OND 06]:

- 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, une surcharge. Ceci entraîne une élévation de la température dégradant prématurément le matériau d'isolation
- vibrations mécaniques
- vieillissement naturel des isolants
- fonctionnement dans un environnement sévère [OND 06]

b- Court-circuit entre spires:

Un court-circuit entre spires de la même phase est un défaut assez fréquent. Cette défaillance 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 variation de l'amplitude sur les autres phases, modifie le facteur de puissance et amplifie les courants dans le circuit rotorique. Ceci a pour conséquence une augmentation de la température au niveau du bobinage, de ce fait, une dégradation accélérée des isolants, pouvant provoquer ainsi, un défaut en chaîne (apparition d'un 2ème court-circuit). Par contre, le couple électromagnétique moyen délivré par la machine reste sensiblement identique hormis une augmentation des oscillations proportionnelle au défaut [IBR 09].

c- 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. D'autre part, un court-circuit proche du neutre entre deux phases engendre un déséquilibre sans provoquer la fusion des conducteurs. Les courants statoriques sont totalement déséquilibrés et ce déséquilibre est proportionnel au défaut qui apparaît [OND 06].

d- Défauts de circuit magnétique:

Ces défauts aboutissent dans la plupart des cas à une dissymétrie au niveau du fonctionnement de la machine, qui à son tour peut accentuer le problème par des phénomènes de surchauffe, de surtension, d'élévation importante du courant, etc.

I.4.3. Défauts rotoriques:

Les facteurs les plus importants pour les défaillances rotoriques sont dus aux phénomènes thermiques, mécaniques, électromécaniques, résiduels, dynamiques, environnementaux. Parmi ces défauts on cite :

a- Ruptures de barres:

La cassure ou rupture de barre est un défaut assez courant dans les machines électriques, Elle peut se situer soit au niveau de son encoche soit à l'extrémité qui la relie à l'anneau rotorique [IBR 09]. La déformation de cette barre provoque une variation dans le couple électromécanique ainsi que des oscillations de la vitesse de rotation, en créant des vibrations mécaniques, c'est le fait d'une présence d'une anomalie dans le fonctionnement de la MAS. Cette rupture de barres est causée par des vibrations excessives, ou de large transitoire, de

charges lourdes, aussi par la contamination du matériau rotorique par des éléments chimiques ou naturels environnementale telle que l'humidité, température etc.

b- Rupture des anneaux de court-circuit:

Ce défaut est assez fréquent que les ruptures de barres, il est due aux dilatations différentiels entre les barres et les anneaux, d'autre part, ils prennent en circulation des courants plus importants que peuvent supporter les barres, car ce sont des anneaux de court-circuit, de ce fait l'application de charges trop lourdes engendrera un appel de grands courants ainsi cette pression d'intensité grande, causera une rupture d'une portion d'anneau et impliquera une fluctuation dans le courant de barres, ce qui engendre une création de modulations au niveau des courants statoriques similaire à celle causée par la rupture des barres [IBR 09].

I.4.4. Défaillances aux paliers:**a- Défauts roulements:**

Les roulements à billes jouent le rôle d'interface électromécanique entre le stator et le rotor. En outre, ils représentent l'élément de maintien de l'axe de la machine permettant d'assurer une bonne rotation du rotor [DID 04].

Ce type de défaut est le plus fréquent sur les machines de fortes puissances. Il est généralement lié à l'usure du roulement et plus précisément une dégradation des billes, ou de la bande de roulement. Ses causes possibles sont :

- l'usure due au vieillissement
- la température de fonctionnement élevée
- la perte de lubrification
- l'huile contaminée (par des paillettes métalliques issues de la dégradation des billes ou de la bande de roulement)
- le défaut de montage
- les courants d'arbres (ShaftCurrent)

b- Défaillance du flasque:

Les défauts créés par les flasques de la machine asynchrone sont le plus généralement causés à l'étape de fabrication. En effet, un mauvais positionnement des flasques provoque un désalignement des roulements à billes, ce qui induit une excentricité au niveau de l'arbre de la machine. Il est possible de détecter ce type de défaillance par une analyse vibratoire ou une analyse harmonique des courants absorbés par la machine [DID 04].

c- Défaillances de l'arbre:

L'arbre de la machine peut laisser apparaître une fissure due à l'utilisation d'un mauvais matériau lors de sa construction. A court ou long terme, cette fissure peut mener à une fracture nette de l'arbre provoquant ainsi un arrêt immédiat de la machine asynchrone. Les milieux corrosifs peuvent aussi affaiblir la robustesse de l'arbre de la machine. Par exemple, l'humidité peut provoquer des microfissures et conduire à une destruction complète de la machine. Une excentricité statique, dynamique ou mixte peut induire des efforts considérables sur l'arbre moteur, amenant ainsi à une fatigue supplémentaire. Une analyse vibratoire, une analyse par ultrason, une analyse fréquentielle des courants absorbés ou simplement une analyse visuelle de l'arbre de la machine permet de détecter ce type de défaillance [DID 04].

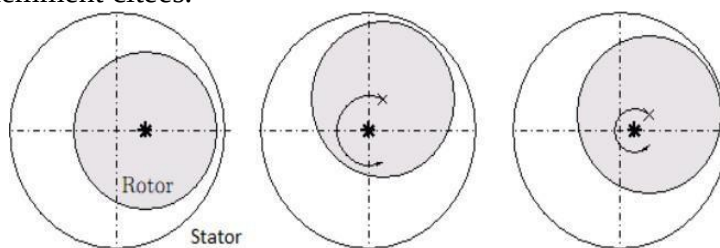
I.4.5. Défaut mécanique:

a- 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 [HAL 15].

Trois catégories d'excentricité figure (1.9) sont généralement distinguées :

- **L'excentricité statique:** généralement due à un désalignement de l'axe de rotation du rotor par rapport à l'axe du stator [BES 17].
- **L'excentricité dynamique:** correspond à un centre de rotation du rotor diffère du centre géométrique du stator mais, de plus, le centre du rotor tourne autour du centre géométrique de ce stator [BES 17].
- **L'excentricité mixte:** est la plus fréquente, elle fait la combinaison des deux excentricités précédemment citées.



L'excentricité statique

L'excentricité dynamique

L'excentricité mixte

Figure(I.9).Trois catégories d'excentricité

b- Défaut balourd:

Quel que soit le soin apporté à la construction des machines, il n'est pas possible de faire coïncider l'axe de rotation avec le centre de gravité de chaque tranche élémentaire du rotor, ce qui caractérise le balourd. Il en résulte que l'arbre en rotation est soumis à des efforts centrifuges qui le déforment. Le balourd est un déséquilibre massique qui provient généralement du défaut d'usinage, d'assemblage et de l'échauffement dissymétrique du rotor lors du fonctionnement [MAC 13].

I.5. Les méthodes de diagnostics:

Les méthodes de diagnostics sont couvertes par une somme appréciable de travaux. Un consensus semble être établi pour définir trois méthodologies de diagnostic [HAL 15], comme montre la figure (I.10).

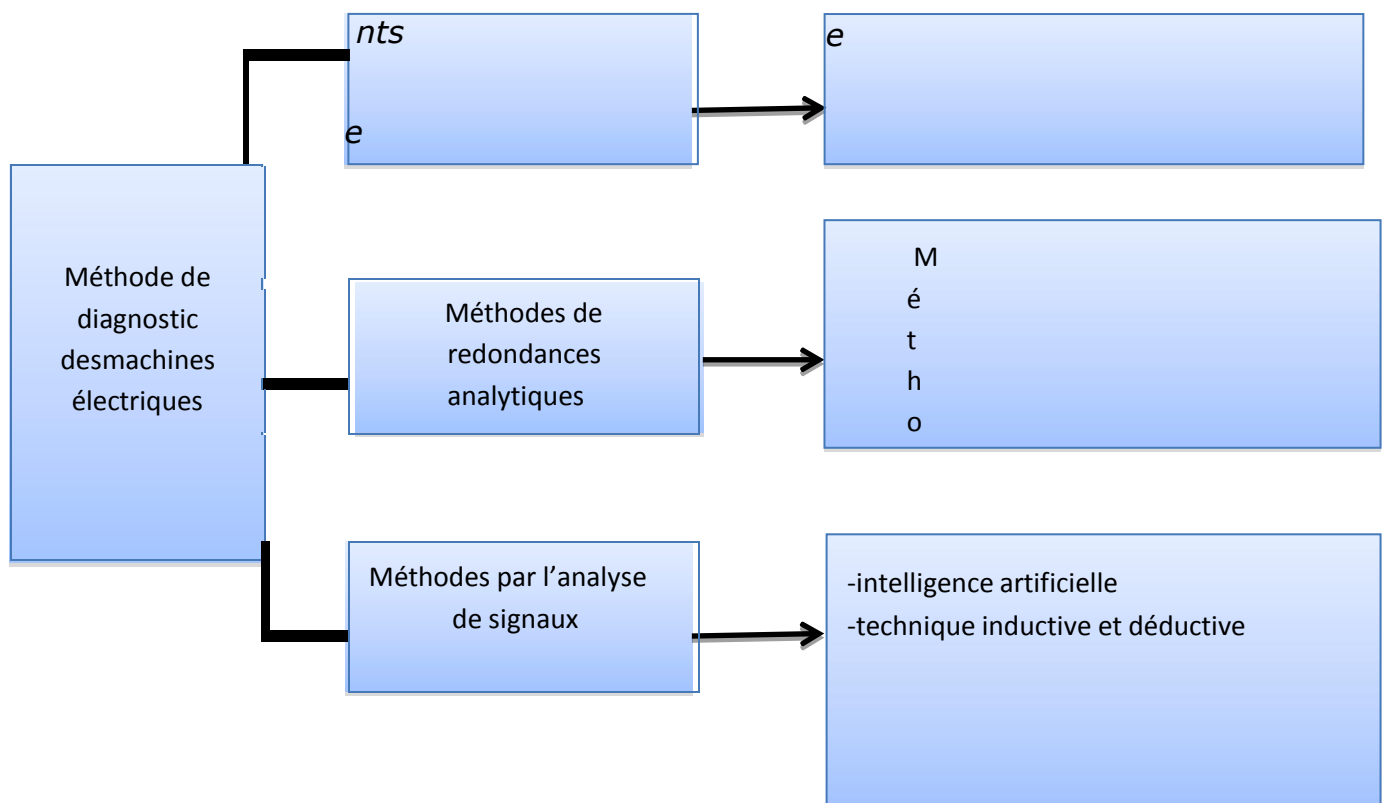


Figure (I.10). Méthodes de diagnostic des machines électriques.

I.5.1 Les méthodes de connaissances:

Dans la littérature spécialisée plusieurs techniques de détection de défauts par ces méthodes sont présentées. Ces méthodes ne font pas appel au modèle mathématique pour décrire

les relations de cause à effet. En définitif, la seule connaissance repose sur l'expérience humaine confortée par des retours d'expérience [HAL 15].

a- Diagnostic par utilisation des techniques d'intelligence artificielle (IA):

Ces dernières années, le diagnostic de défaut des machines électriques se sont éloignées des techniques traditionnelles pour s'orienter vers des techniques dites d'intelligence artificielle (IA). Ces méthodes sont basées sur la connaissance a priori du système et utilisant un ensemble de règles et de faits (données manipulées par les règles) qui constituent, ce qu'on appelle la base de connaissance. Parmi ces méthodes, on peut regrouper en quatre grandes familles :

- méthodes de reconnaissance des formes
- diagnostic par systèmes experts
- diagnostic par logique floue
- diagnostic par réseaux de neurones [BES16]

b- Diagnostic par les Méthodes inductives:

Ces méthodes de diagnostic correspondent à une approche montante ou recherche en avant. Il s'agit de trouver le défaut à partir de ses effets sur le système. Ces méthodes utilisent un mécanisme de raisonnement en avant qui a pour objectif d'interpréter les symptômes ainsi que leurs combinaisons afin de trouver le défaut [BEL 14].

c- Diagnostic par les Méthodes déductives:

Le raisonnement en arrière est la principale caractéristique de ces méthodes. Les méthodes déductives doivent trouver quels sont les effets dans les systèmes. Une vérification des «effets trouvés par rapport aux effets possibles » permet de confirmer ou d'infirmier l'existence du défaut. Le diagnostic peut utiliser soit un seul type de raisonnement (avant ou arrière) soit une combinaison de raisonnements (avant et arrière). Dans ce dernier cas, le raisonnement est appelé raisonnement mixte ou avant arrière. La connaissance "à priori" de la cause " défaut " implique la connaissance de certains effets [BEL 14].

d- Redondance physique (matérielle):

La redondance physique consiste à utiliser plusieurs capteurs, actionneurs, processeur et logiciels pour mesurer et/ou contrôler une variable particulière. Un principe de vote majoritaire est appliqué sur les valeurs redondantes pour savoir s'il y a un défaut ou non. Elle entraîne un coût important en instrumentation mais fiable, sûr et simple à implanter [BES16].

I.5.2 Les méthodes de redondances analytiques:

Ces méthodes se basent sur une modélisation quantitative du système et exploitent les relations entre les variables du système considéré pour identifier les paramètres physiques à surveiller. On y distingue trois classes: les méthodes de l'espace de parité, les méthodes d'identification de paramètres et les méthodes d'estimation du vecteur d'état [AND 12].

a- Diagnostic des défauts par estimation paramétrique:

Cette méthode de diagnostic utilise les paramètres structuraux d'un modèle de connaissance et extrait par la suite les paramètres du système à partir des lois de connaissance pour détecter et localiser les défaillances. Le point essentiel dans l'efficacité de cette méthode est le choix du modèle de connaissance. En effet, le type de défaut que l'on voudra détecter sera fonction du modèle utilisé.

b- Techniques d'estimation d'état:

Ces méthodes utilisent les observateurs pour la reconstruction de l'état du système en connaissant son modèle mathématique. Généralement, les observateurs sont utilisés dans les systèmes du contrôle pour réduire l'incohérence entre les systèmes modélisés et mesurés causée par les bruits ou les erreurs de modèle. Ils peuvent être utilisés pour le diagnostic et la détection des défauts si les paramètres du processus sont connus et les défauts peuvent être modélisés comme des changements de variables d'état du système surveillé [AME 18].

I.5.3 Les méthodes par l'analyse de signaux:

Le principe des méthodes d'analyse de signal repose sur l'existence de caractéristiques fréquentielles propres au fonctionnement sain ou défaillant du procédé. Le traitement du signal est utilisé depuis de nombreuses années pour détecter des défaillances dans les machines électriques, essentiellement les défauts rotoriques [VAS 09].

I.5.4 Diagnostic par mesures de vibration mécanique:

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 [SAH10].

a- Diagnostic par l'analyse du flux magnétique:

La présence d'un défaut quelconque, provoque un déséquilibre électrique et magnétique au niveau du stator et du rotor ce qui affecte la répartition du champ magnétique dans et hors la machine [CHA 17].

b- Diagnostic par mesure du couple électromagnétique:

Le couple électromagnétique développé dans les machines électriques, provient de l'interaction entre le champ statorique et celui rotorique. Par conséquent, tout défaut, soit au niveau du stator ou au rotor, affecte directement le couple électromagnétique. L'analyse spectrale du signal du couple (mesuré ou estimé), donne des informations sur l'état de santé du moteur [CHA 17].

c- Diagnostic par mesure de la puissance instantanée:

L'utilisation de la puissance instantanée pour la détection des défauts dans les moteurs asynchrones, a fait l'objet des nombreux travaux. Car la puissance instantanée est la somme des produits des courants et des tensions dans les trois phases statoriques [SAH 10].

d- Diagnostic par mesures des courants statorique:

Cette méthode encore appelée MCSA « Motor Current Signal Analyses », est liée à l'analyse fréquentiel (FFT) du courant statorique afin d'identifier les fréquences caractéristiques d'un défaut. Sachant qu'en présence de défauts, des raies spectrales de faibles amplitudes apparaissent.

e- Diagnostic par l'analyse du Vecteur de Park:

Il existe deux versions de cette méthode, la première utilise les grandeurs biphasées i_{ds} et i_{qs} , qui sont calculés à partir des trois courants d'alimentation, pour l'obtention de la courbe de lissajou : $i_d = f(i_q)$. Le changement de l'épaisseur et de la forme de cette courbe donne une information sur le défaut [SAH10].

I.6. Causes de défauts de la machine asynchrone:

Les causes des défauts sont multiples. Elles peuvent être classées en trois groupes:

- Les générateurs de défaut ou initiateurs de défauts; surchauffe du moteur, défaut électrique (court-circuit), problèmes mécaniques, rupture de fixations, problème d'isolation, survolage d'alimentation .
- Les amplificateurs de défauts : surcharge fréquente, vibrations mécaniques, environnement humide, alimentation perturbée (instabilité de la tension ou de la fréquence), échauffement permanent, mauvais graissage, vieillissement....
- Les vices de fabrication et les erreurs humaines : défauts de fabrication, défectuosité des composants, protections inadaptées, mauvais dimensionnement de la machine.... [ABE02].

I.7. Conclusion:

Dans ce chapitre nous avons fait un rappel de la constitution et le principe de fonctionnement de la machine asynchrone. Puis, on a présenté la classification des défaillances dans les MAS. Ensuite nous avons cité quelques méthodes utilisées pour détecter et localiser le défaut dans les MAS.

Chapitre II

Aperçu détaillé sur le défaut de la cassure des barres rotoriques

II.1. Introduction :

Dans ce chapitre, nous présenterons les phénomènes de base caractérisant les défauts de barres cassées. L'étude mettra en évidence la nécessité de considérer la distribution du champ dans l'entrefer. Pour cette étude simplifiée, les effets de denture ne seront pas pris en compte et seuls les fondamentaux des courants seront considérés et influencés par le défaut de la cassure des barres du rotor:

II.1.1. Phénomène de base du défaut de la cassure des barres rotoriques:

L'origine des raies dues au défaut rotorique de barre cassée dans l'analyse spectrale du champ magnétique extérieur de la machine peut s'expliquer de la manière suivante : en conditions normales de fonctionnement Figure (II.1) (a), le système triphasé crée un champ tournant dans l'entrefer qui peut être direct [RAZ 03]. 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 un moteur symétrique (état sain), il n'y aura pas de champ tournant résultant inverse [DID 03].

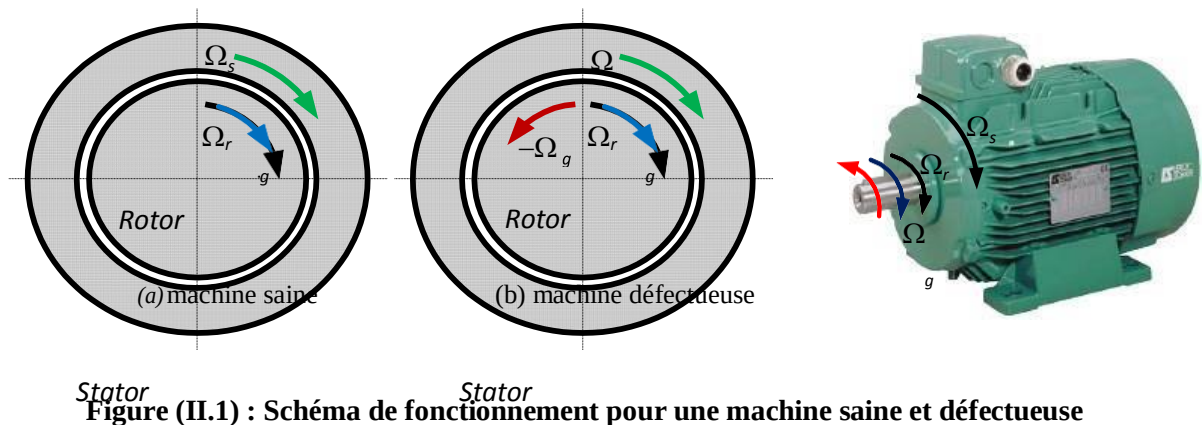


Figure (II.1) : Schéma de fonctionnement pour une machine saine et défectueuse

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

- vitesse synchrone: $\Omega_s = \frac{2\pi f}{n}$;
- vitesse rotorique : $\Omega_r = \Omega_s (1 - g)$;
- vitesse de glissement : $\Omega_g = \Omega_s - \Omega_r = g \cdot \Omega_s$

Si la machine présente une défaillance au rotor une dissymétrie au rotor apparaît (voir Figure II.1(b)). 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 et à un système inverse de valeur efficace I'_i . 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 et $(1 - 2g)f$ l'apparition de courants statoriques comportant ces composantes [HEN 03].

Le schéma de la Figure (II.1)(b) décrit le phénomène dû à l'apparition du défaut rotorique. Sachant que :

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

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 [G. DID 04] par la relation :

$$C_{\text{tot}} = C_d^{sr} + C_i^{sr} = \frac{\pi \mu_0}{2} k^s I^s [k_d^r I_d^r \sin \varphi_{\text{Brd}} + k_i^r I_i^r \sin(2g\omega - \varphi_{\text{Bi}})] \quad (\text{Eq:II.2})$$

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

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

$$C_{\text{tot}} = C_{\text{const}} + \Delta C \quad (\text{Eq:II.3})$$

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 un couple pulsant dû au champ inverse de pulsation $2g\omega_s$ [DID 04].

La fréquence d'oscillation sera donc de $2gf$ et engendrera une oscillation de vitesse à cette fréquence dont l'amplitude dépendra de l'inertie de l'ensemble moteur-charge [A. M. T 00]. 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 :

$$J \frac{d\Omega_r}{dt} = C_{\text{tot}} - C_r = C_i^{sr} \quad (\text{Eq:II.4})$$

où J représente le moment d'inertie totale et C_r le couple résistant (couple de charge).

on obtient : $\Omega_r = \Omega_0 + \Delta\Omega_r \cos(2g\omega t + \varphi)$ (II.5)

où $\Delta\Omega_r = -\pi \frac{K_s}{r} \frac{K_i}{i} \frac{K_f}{f} \frac{1}{\mu_0} \frac{r_{ele} e_m}{2g}$ représente l'amplitude d'oscillation de vitesse et Ω_0 est

la valeur moyenne de Ω_r laquelle change avec le nombre de barres cassées et

$$\varphi = \varphi_B - \varphi_{Bi}$$

La vitesse centrée sur Ω_0 supporte une pulsation égale à $2g\omega$, identique à celle du

couple. Cette variation de vitesse génère un flux additionnel dans entrefer à $(1 + 2g)$ f [DID 04].

II.1.2. Modification du flux axial par la variation de vitesse rotorique:

Le déséquilibre magnétique dû au défaut de barre cassée engendre également un effort radial sur le rotor dû à un déséquilibre dans la répartition des forces entre le stator et le rotor. Comme a été déjà mentionné, le flux axial total émis par une machine asynchrone avec un défaut de l'excentricité se calcule avec la relation :

$$\Phi_{AT} = \hat{\Phi} \cos(\omega t - p\beta) \quad (\text{Eq:II.6})$$

Dans le cas d'un défaut de barre cassée, il apparaît une variation de vitesse. Cette variation donnée par (Eq:II.5) va influencer le flux extérieur et, dans ce cas la relation (Eq:II.6) peut s'écrire sur la forme [HAJ 01] :

$$\Phi_{AT} = \hat{\Phi} \cos[\omega t - p(\beta_0 + \Omega_r t)] \quad (\text{Eq:II.7})$$

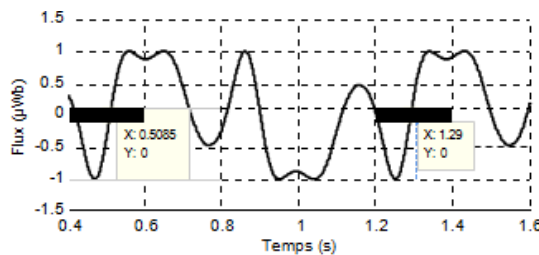
En développant l'argument de cosinus, on obtient :

$$\Phi_{AT} = \hat{\Phi} \cos[g\omega t - \Delta\Omega_r p t \cos(2g\omega t + \varphi) - p\beta_0] \quad (\text{Eq:II.8})$$

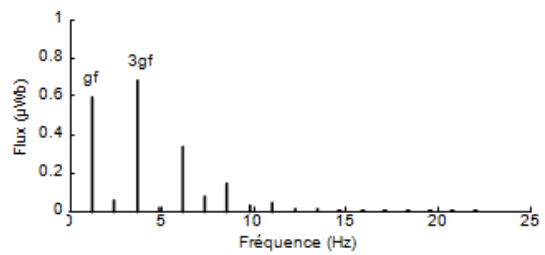
La variation temporelle de la fonction (Eq:II.2) pour $\Delta\Omega_r = 1$ et $g = 2.5 \%$ est présentée dans la Figure II.2(a) où on considère l'intervalle $(0.8 - 1.6)s$. Une analyse directe du signal est difficile d'où la nécessité d'un changement dans le domaine fréquentiel.

L'analyse FFT du signal obtenu en régime permanent permet de mettre en évidence les raies présentées sur le spectre du signal.

La modulation en fréquence apparaît en Φ_{AT} (voir Figure II.2(b)).



(a)



(b)

Figure II.2: Variation de flux axial : (a) signal de flux ; (b) spectre FFT

D'après les résultats présentés dans la Figure (II.2), on constate que l'analyse fréquentielle du flux par FFT, correspondant à l'apparition du défaut rotorique met en évidence l'apparition d'une raie à $3gf$ due à la variation de la vitesse. Une faible variation de vitesse crée une composante de fréquence importante à $3gf$ (voir Figure II.2(b)) en plus de la raie gf initiale.

II.2. Utilisation des différents signaux autres que le courant statorique:

II.2.1. Analyse des signaux vibratoires:

L'analyse des défaillances des moteurs électriques par les signaux vibratoires et acoustiques permet une détection de quasiment tous les défauts, notamment ceux mécaniques, pouvant se produire sur le processus. Cette analyse peut être réalisée à partir de capteurs, généralement des accéléromètres, placés sur les paliers dans les directions verticales, axiales et radiales. permettent de construire le tableau (Tab.II.1) résumant les caractéristiques de l'analyse vibratoire des défauts. [J.R.C

Tableau II.1 : Signatures fréquentielles du signal vibratoire

Types de défaut	Signatures (analyse vibratoire)	Commentaires
Ruptures des barres Ruptures de portions d'anneaux	$f_r \pm 2 \cdot g \cdot f_s$ (g : le glissement)	Les vibrations axiales augmentent avec le nombre de Barres Cassées
Excentricité Statique Dynamique	Excentricité statique : $2 \cdot f_s$ ou des composants à $N_r \cdot f_r \pm f_s$ Excentricité dynamique: $f_r \pm 2 \cdot g \cdot f_s$ ou f_r	L'excentricité dynamique est fonction du temps et de l'espace L'excentricité statique est fonction de l'espace seulement
désalignement	f_r et $2 \cdot f_r$ principalement	Vibration plus importantes dans la direction axiale
Déséquilibre Mécanique	f_r	Au niveau de la charge Notamment Vibration plus importantes dans la direction axiale

Défaillances des paliers	$n \cdot f_e$ et $n \cdot f_i$ $f_i \pm n \cdot f_r$ avec : n un nombre entier : 1,2,...	Bagues externes Bagues internes Ces composantes fréquentielles sont modulées par la vitesse
--------------------------	---	--

II.2.2. Analyse des flux:

Tout déséquilibre quel qu'il soit, magnétique, mécanique, électrique ou bien encore électromagnétique, situé au rotor ou au stator, peut affecter la conversion électromécanique et la répartition de champ dans et hors de la machine. Des études ont donc été menées pour extraire de la mesure des flux d'entrefer, axial ou de fuite des signatures caractéristiques de certains défauts. Pour cela, des bobines exploratrices sont placées à l'extérieur de la machine, parallèlement et perpendiculairement à l'axe du rotor.

Dans, l'auteur met en évidence les composantes fréquentielles du flux de fuite dans l'axe du rotor, qui permettent de détecter et d'identifier des courts-circuits dans les enroulements statoriques.[J.R.C 1986]

Il en déduit les fréquences caractéristiques suivantes :

$$k \cdot f_s \pm n \cdot f_r \quad (\text{Eq:II.9})$$

Avec n et k des nombres entiers et k impair

Ces composantes présentent dans le spectre du flux pour une machine saine, vont augmenter avec l'apparition d'un défaut.

Certaines composantes du flux axial permettent de détecter d'éventuels défauts liés aux barres rotoriques et aux paliers (roulements). Les composantes à prendre en compte pour les barres sont définies dans le tableau (Tab. II.2) .En ce qui concerne les paliers, les auteurs se focalisent sur les raies situées dans la plage de fréquence 600 Hz à 900 Hz pour une alimentation 50 Hz.

(Tab. II.2) : Fréquences caractéristiques du flux axial

f_s	$(5-4g) \cdot f_s$
$(2g-1) \cdot f_s$	$(6g-5) \cdot f_s$
$(3-2g) \cdot f_s$	$(7-6g) \cdot f_s$
$(4g-3) \cdot f_s$	$(8g-7) \cdot f_s$

II.2.3. Analyse du couple électromagnétique:

Certains défauts mécaniques peuvent être détectés par la recherche d'harmoniques dans le spectre du couple électromagnétique mesuré, résultant d'une interaction entre le flux et le courant. Ce couple peut être reconstruit, soit à partir de deux des trois courants statoriques, soit en utilisant un modèle physique de la machine.

L'utilisation de ce signal peut s'avérer un bon choix pour la détection des défauts de charge. En effet, les variations du couple de charge vont induire des variations du flux et du courant dans la machine. De même la torsion de l'arbre, entraîne l'apparition d'harmoniques dans le spectre du couple.

Les oscillations de couple, provoquées par certains défauts rotoriques, peuvent servir à détecter ceux-ci. Le montrer par une analyse théorique et des essais, comment le spectre du couple se trouve modifié lorsqu'un des deux anneaux d'une cage est cassé.

L'analyse le couple électromagnétique d'une machine asynchrone présentant des portions d'anneaux cassées. Dans le tableau (Tab. II.3) sont présentés les résultats obtenus concernant les variations des harmoniques du couple en présence de défaut pour une alimentation 50 Hz.

(Tab. II.3) : Evolution des différents harmoniques du couple en présence de ruptures d'anneaux

50 Hz	100 Hz	200 Hz	300 Hz	700 Hz	800 Hz
					

A partir d'un modèle de la machine, procède à l'estimation des composantes du flux rotorique dans un repère 'd-q' lié au stator dans le but d'observer le couple électromagnétique C_{em} . Il constate qu'une dissymétrie électrique du rotor fait apparaître des harmoniques de dentures rotoriques, ce qui modifie le champ d'entrefer. Le problème peut alors être détecté en analysant les fréquences d'encoches présentent dans le spectre du couple estimé C_{em} :

$$\underline{\hspace{2cm}} \quad f_{sb} = f_s \left[\frac{Nr \cdot (1-g)}{p} \pm n \right] \pm 2 \cdot g \cdot f_s \quad (II.10)$$

Avec :

f_{sb} : Fréquence d'encoche au rotor

Nr : Nombre d'encoches au rotor

f_s : Fréquence d'alimentation (fréquence des courants statoriques)

$n=1, 2, 3, 4, \dots$

g : Le glissement

}

Pour une alimentation à 50 Hz, porte l'attention sur la variation d'amplitude des raies à 600 et 900Hz en présence de barres cassées et des deux premiers harmoniques du couple qui augmentent en présence d'excentricité.

Utilise le modèle triphasé pour estimer le flux statorique, ce qui permet d'estimer le couple utile C_u . Or, en présence d'excentricité, le spectre du couple C_u présente des informations aux fréquences :

$$f_{Cu} = n \cdot \left(1 \pm \frac{1}{p}\right) \cdot f_s \quad (\text{II.11})$$

De même que le spectre du courant présente des raies aux fréquences :

$$f_{exc} = \left(1 \pm n \cdot \frac{1}{p}\right) \cdot f_s \quad (\text{II.12})$$

Comme nous venons de le voir, les signaux évoqués précédemment permettent de détecter un grand nombre de défauts sur la machine. Cependant, ces signaux nécessitent la mise en place d'un grand nombre de capteurs (flux, couple mètre, accéléromètres, transducteurs,...) souvent onéreux, sensibles et délicats à placer dans des environnements contraignants.

Cette approche de surveillance des entraînements électriques a été largement utilisée depuis ces dix dernières années; elle est connue sous le nom de MCSA (Motor Current Signature Analysis).

II.2.4. Signatures fréquentielles extraites à partir des signaux préconditionnés:

-Ruptures de barres ou de portions d'anneaux:

La rupture de barres d'une machine asynchrone est un des défauts le plus couramment étudié en laboratoire en raison à sa simplicité de réalisation mais non nécessairement le plus probable. Ce défaut induit des modifications dans les courants du stator et entraîne donc l'apparition d'harmoniques caractéristiques dans le spectre de ce signal.

En effet, lors de l'apparition d'une rupture de barre, des harmoniques de flux sont produits et induisent des harmoniques de courant dans l'enroulement statorique aux fréquences :

$$f_b = f_s(1 \pm 2 \cdot g) \quad (\text{E:II.13})$$

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

II.3. Conclusion:

Dans chapitre, on a présenté l'effet de cassure des barres rotoriques avec une prise en compte des harmoniques spécifiques, et ainsi identifié les signatures les plus significatives sur le spectre du courant statorique.

Chapitre III

Analyse du défaut de la cassure de barres rotoriques

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 à l'état avec défaut. Dans ce chapitre, Nous présenterons, l'analyse spectrale du courant statorique (expérimentalement, courant statorique instantané i_{sa}) de la machine asynchrone triphasé à cage sous deux conditions (MAS saine et MAS défectueuse) en utilisant la transformée de Fourier rapide (Fast Fourier Transform 'FFT'). Nous montrerons comment cette méthode permet de détecter les signatures de défaut de barres cassées.

III.2. Cassures de barres rotoriques:

La présence d'une barre cassée dans la cage rotorique provoque une asymétrie géométrique ainsi qu'un déséquilibre magnétique dans le moteur. Ce défaut peut affecter sur le stator et ses enroulements, donc la force magnétomotrice (FMM) statorique résultante peut modifier. En plus, la FMM rotorique doit être recalculée en tenant compte des modifications provoquées par ce défaut [BEL 14].

III.2.1 FMM résultante d'un moteur avec une barre cassée :

L'approche utilisée pour étudier ce type de défauts suppose que la rupture d'une barre rotorique peut être traduite par l'élimination d'une maille rotorique ; ce qui altère la FMM résultante due à l'ensemble des mailles rotoriques. Par conséquent, des FMM rotoriques additionnelles directes et inverses vont induire des courants (caractérisés par des fréquences particulières) dans le bobinage statorique. Selon cette approche, un moteur asynchrone avec une barre cassée aura $(N_r - 1)$ mailles rotoriques au lieu de N_r . Il est important de noter que cette approche est moins précise dans le sens d'évaluation des amplitudes des courants induits par ce défaut ; parce qu'en réalité, le courant dans la barre cassée n'est pas nul à cause du courant inter barres [KER84]. Mais, puisque notre objectif est d'analyser seulement les signatures fréquentielles du défaut de barres, l'approche présentée reste valide et peut être utilisée sans aucun doute. En effet, la nouvelle expression de la FMM rotorique (en présence d'une barre cassée) peut être obtenue en soustrayant la FMM produite par la maille absente de la FMM rotorique créée à l'état sain [SRI 06].

Comme le défaut a des effets électromagnétiques, il ne faut pas oublier que ce défaut ait aussi un effet mécanique. En fait, dans les références, les auteurs ont montré qu'en présence d'une barre rompue dans la cage rotorique, un courant de fréquence $(1-2s) f_g$ sera induit dans les circuits statoriques, accompagné par une composante oscillatoire de fréquence $2s f_s$ dans le couple électromagnétique et la vitesse de rotation ce qui donne naissance à de nouvelles composantes de courant aux fréquences $(1 \pm 2s) f_s$ circulant dans les enroulements statoriques. Et par un processus identique, on obtient une série d'harmoniques de fréquences données par $(1 \pm 2ks) f_s$

$$\text{avec } k=1,2,3,\dots \quad (\text{III.1})$$

En tenant en compte des harmoniques du temps qui sont toujours présents dans les tensions d'alimentation, on peut aboutir aux formules générales suivantes :

$$[v - (h \pm \eta'')(1-s)] f_i(v) \quad (\text{III.2})$$

$$\pm 2ks) f_s \quad (\text{III.3})$$

avec $v=1,3,5,\dots$ est le rang des harmoniques du temps.

Dans le table ci-dessous, on a résumé les fréquences des harmoniques induits dans les courants statoriques suite à un défaut de barres. Ces fréquences sont déduites de la formule (III.2) pour $h=1$ et différentes valeurs de η'' et v [FILI 98].

III.2.2 Résultats expérimentaux:

Un même banc d'essai a été utilisé pour étudier expérimentalement le défaut de cassure de barres. Pour valider les résultats théoriques, on a comparé deux moteurs asynchrones triphasés à cage (Moteur sain et moteur défectueux). Un essai a été effectué pour le régime de fonctionnement en charge dans l'état sain et l'état de la cassure de barres rotoriques de la MAS en mesurant le courant d'alimentation afin de l'analyser [BEL 14].

III.3 Résultats et discussion de la cassure de barres:

La figure (III.1) représente des photos pour un rotor avec une barre cassée (1BC) et une autre pour deux barres cassées (2BC).



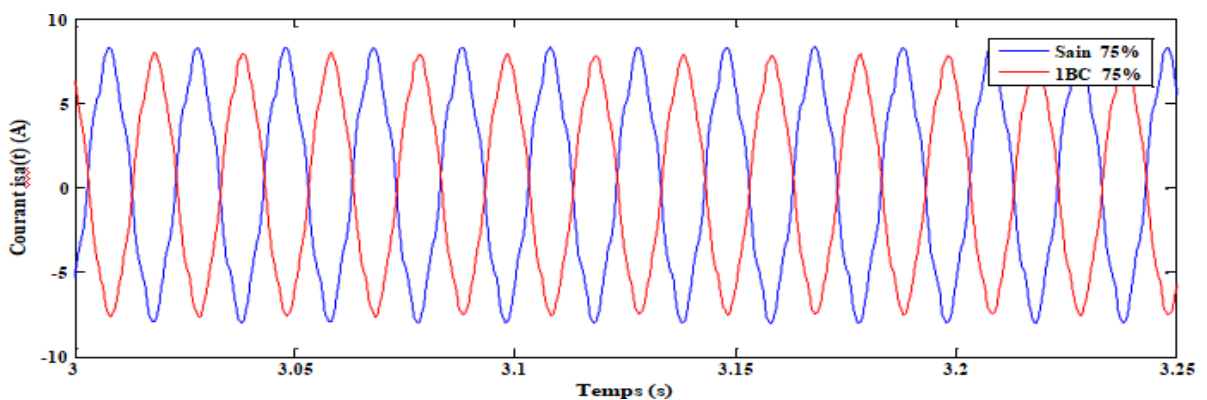
Figure (III.1): Photographie des rotors de la MAS de 3 kW pour une barre cassée(gauche) et avec deux barres cassées (droite).

Dans ce chapitre, tout ce qui est simulé en bleu désigne l'état sain et tout ce qui est simulé en rouge désigne l'état de la cassure de barres.

III.4 Fonctionnement en charge:

Dans ce cas la machine est d'un couple résistant d'une valeur de 15 N.m qui équivaut à 75 % de la charge et avec un glissement de (3,6 %).

Le courant électrique d'une phase statorique du MAS est représenté dans la figure (III.2) Sous un défaut de 1BC pour la condition en charge.



Figure(III.2) : Courant statorique en fonction du temps ($g= 3.6\%$, 1BC).

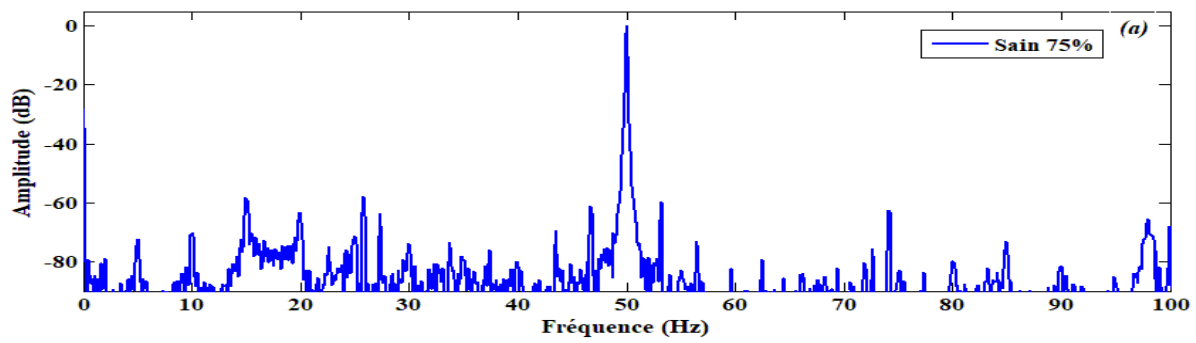


Figure (III.3) : Zoom de spectre du courant statorique à l'état sain (en charge).

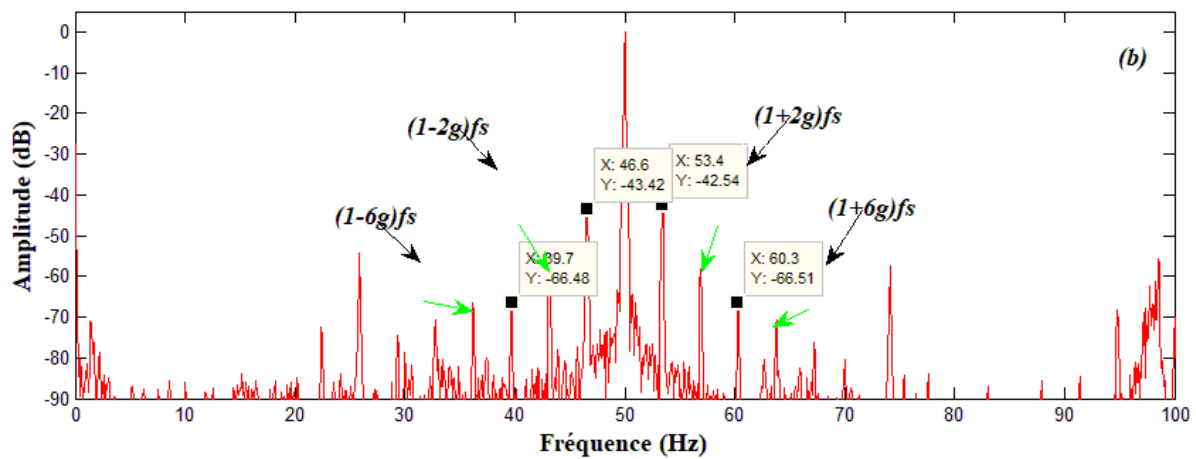


Figure (III.4): Zoom de spectre du courant statorique avec 1BC(en charge).

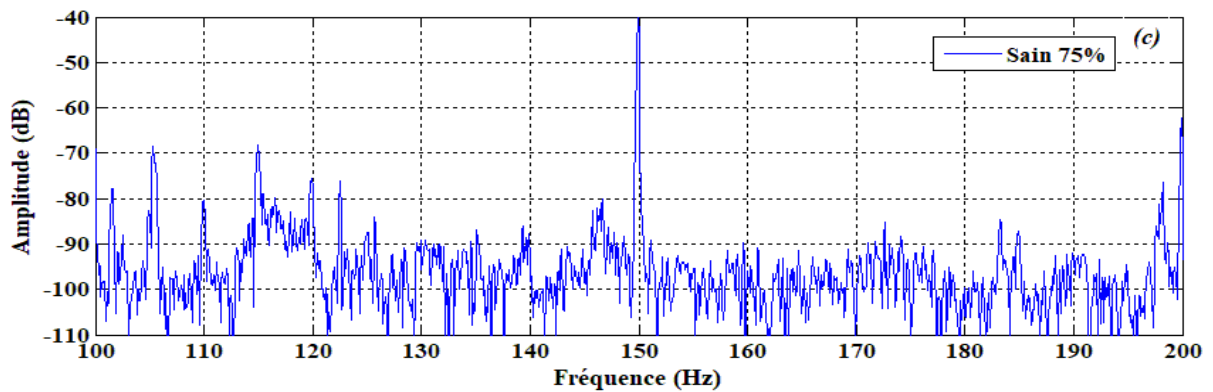


Figure (III.5) : Fréquences qui correspondent aux ordres 3 à l'état sain(en charge)

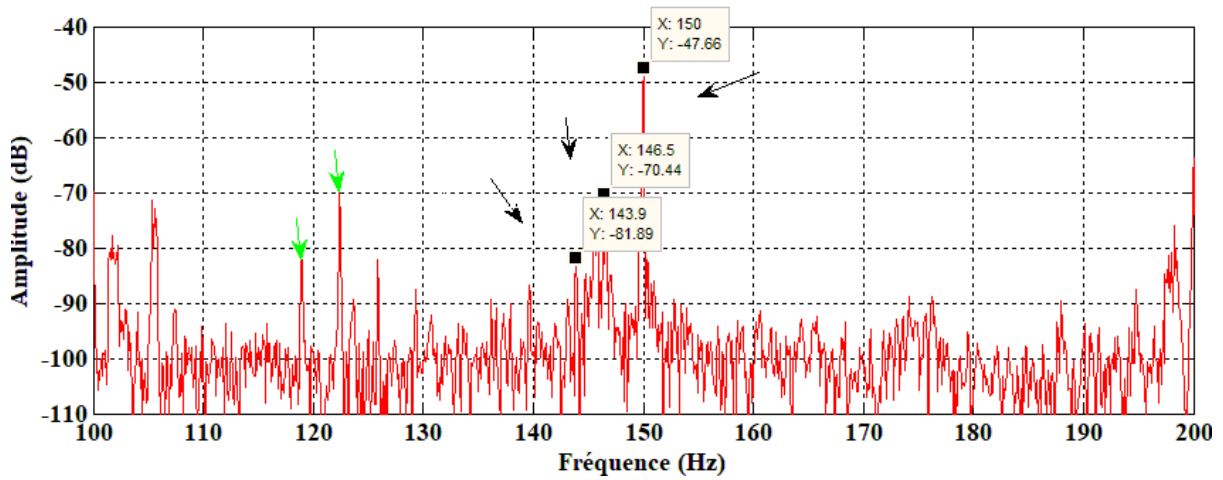


Figure (III.6): Fréquences qui correspondent aux ordres 3 avec **1BC** (en charge).

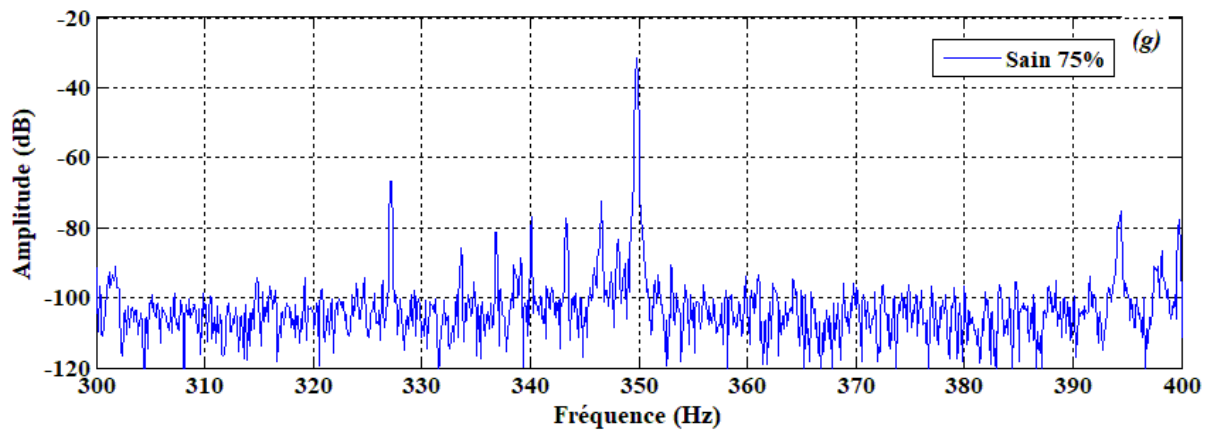


Figure (III.7) : Fréquences qui correspondent aux ordres 5 à l'état sain(en charge).

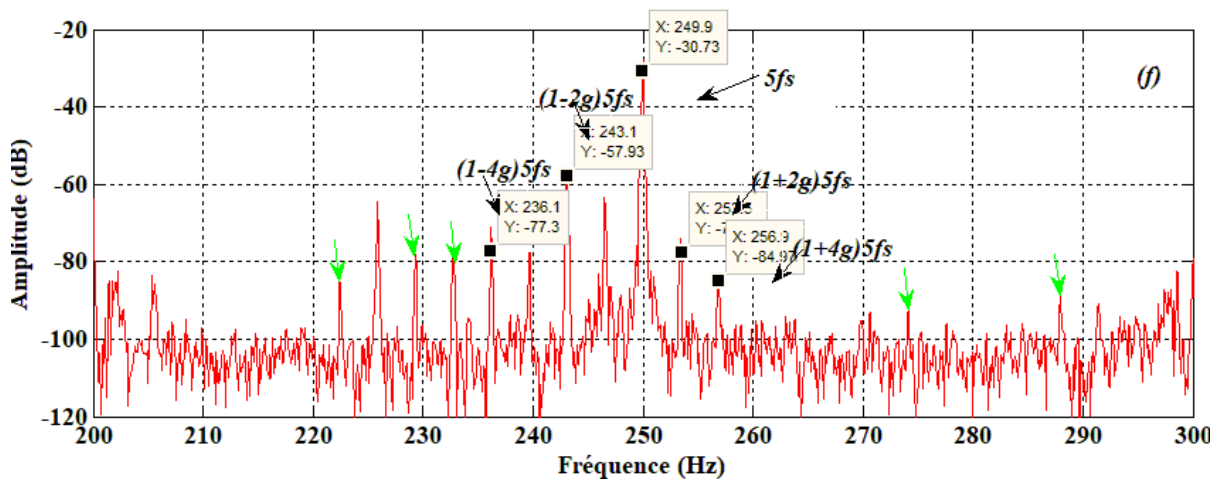


Figure (III.8): Fréquences qui correspondent aux ordres 5 avec **1BC** (en charge).

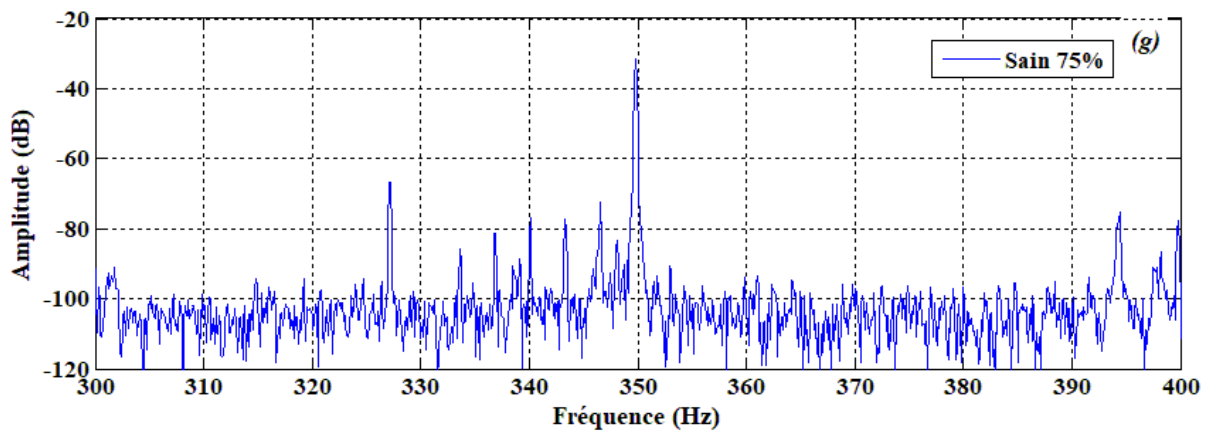


Figure (III.9) : Fréquences qui correspondent aux ordres 7 à l'état sain(en charge).

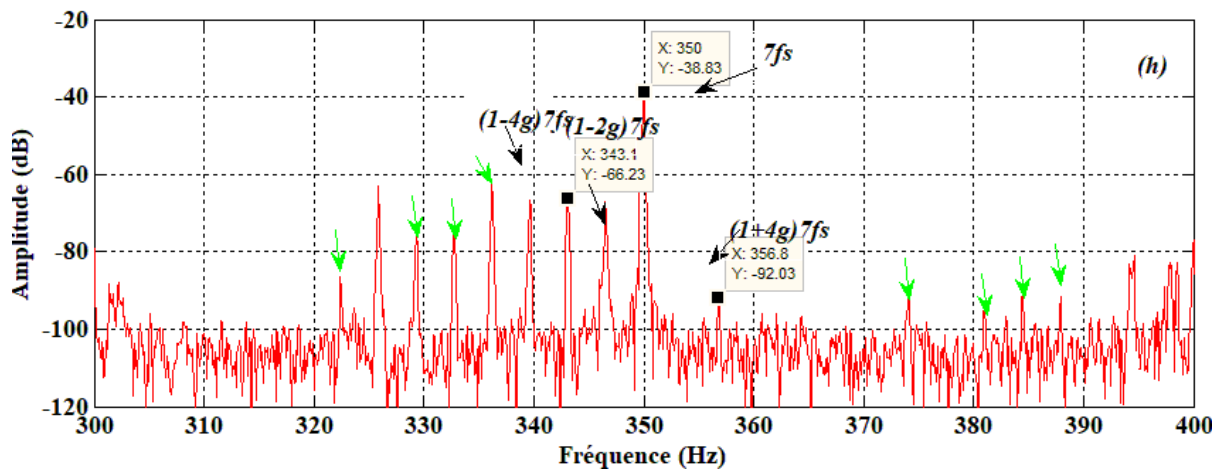


Figure (III.10): Fréquences qui correspondent aux ordres 7 avec 1BC (en charge).

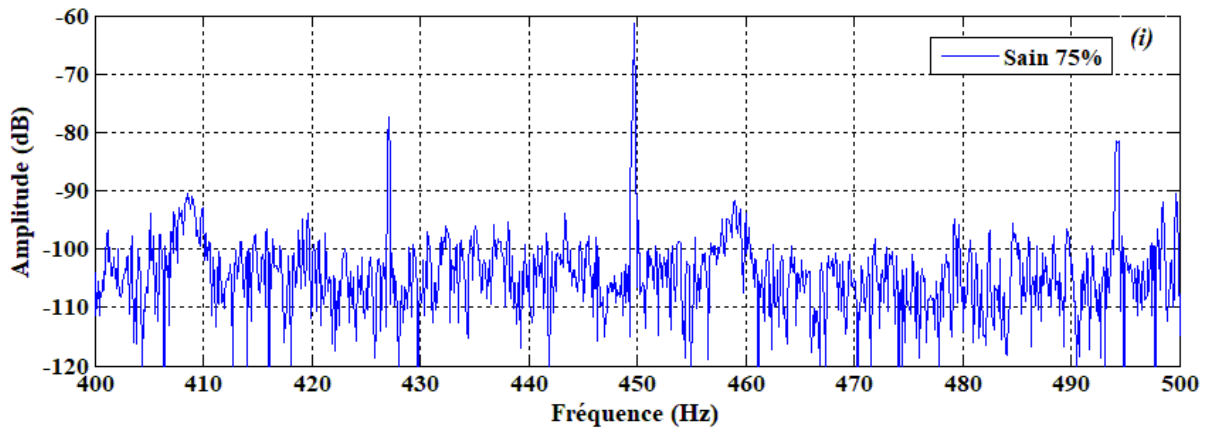


Figure (III.11) : Fréquences qui correspondent aux ordres 9 à l'état sain(en charge)

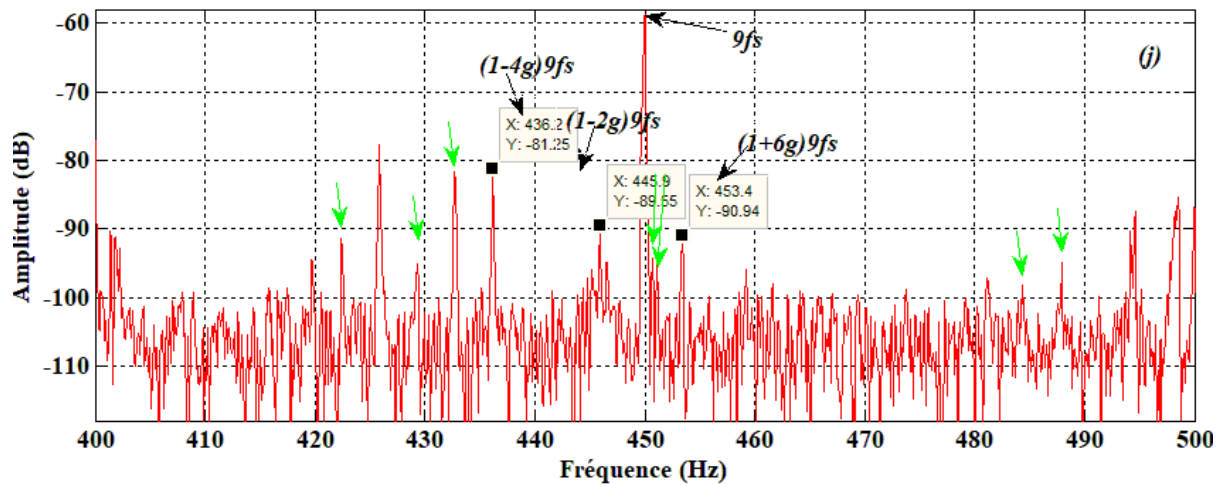


Figure (III.12): Fréquences qui correspondent aux ordres 9 avec **1BC** (en charge).

Les signatures de défaut de cassure de barres sont présentées dans les spectres de la machine asynchrone avec défaut (voir figures III.4)

D'après la figure (III.3) on constate que pour la machine à l'état sain en charge aucune composante fréquentielle n'est présente dans le spectre du courant statorique, sauf pour les composantes permanentes: les harmoniques de la saturation et les harmoniques de la force magnétomotrice (fmm).

Comme on a déjà mentionné auparavant, lorsque la machine en charge avec une barre cassée (figure III.4), on note que le défaut crée également des composantes fréquentielles autour de la fondamentale, sont: 46.6 Hz et 53.4 Hz.

Pour une seule barre cassée, les fréquences 46.6 Hz et 53.4 Hz ont respectivement les amplitudes -42.54 dB et -43.2 dB, ces amplitudes deviennent plus importantes avec la sévérité du défaut [Hal 15].

L'analyse spectrale du courant statorique relève ses composantes supplémentaires qui apparaissent en situation de défaut. Nous pouvons affirmer que la manifestation des raies $(1 \pm 2g)fs$ (tableau III.1) est un signe de l'existence de cassures de barres

Tableau III.1. Récapitulation des raies dans le spectre du courant statorique Formules des fréquences caractéristiques Valeurs théoriques (Hz) Valeurs expérimentales (Hz) Amplitude «état sain» (dB) Amplitude pour 1BC (dB)

$(1-2g)f_s$	46.4	46.6	-70.79	-43.2
$(1+2g)f_s$	53.6	53.4	-65	-42.54
$3f_s$	150	150	-43.44	-47.66
$(1-2g)3f_s$	139.2	146.5	-87.1	-70.44
$(1-4g)3f_s$	128.4	143.9	-99.91	-81.89
$5f_s$	250	250	-35.3	-27.95
$(1-2g)5f_s$	232	243.1	-102.5	-57.93
$(1+2g)5f_s$	268	253.4	-98.45	-73.88

$7f_s$	350	350	-55.18	-38.83
$(1-2g)7f_s$	324.8	343.1	-97.08	-66.23
$(1+2g)7f_s$	375.2	356.8	-104	-92.03
$(1-2g)9f_s$	417.6	445.9	-111.6	-89.55
$(1-4g)9f_s$	385.2	436.2	-108.4	-81.25
$(1+6g)9f_s$	547.2	453.4	-105.3	-90.94

D'après le tableau (III.1) ça explique bien que la barre rompue entraîne une augmentation des courants dans les barres ce qui provoque automatiquement une autre réaction magnétique qui influe sur la valeur du courant statorique.

Nous avons montré que le défaut de barres se manifeste par l'apparition des composantes spectrales dont les fréquences sont données par les équations (III.2) et (III.3). Autrement dit, on doit trouver des raies autour des harmoniques du temps à une distance de $2ksf_s$.

III.5 Conclusion:

Dans cette partie, on a présenté l'effet de cassure des barres rotoriques avec une prise en compte des harmoniques d'espace, et ainsi identifié les signatures les plus significatives sur le spectre du courant statorique à partir des résultats obtenus.

L'analyse spectrale du courant statorique nous a permis d'identifier les signatures fréquentielles causées par la rupture des barres de la cage rotorique. Il s'est avéré que la surveillance de l'amplitude des composantes de fréquence, présente dans le spectre fréquentiel du courant statorique, permet de détecter la présence d'un défaut au niveau de la cage rotorique de la machine par la présence des harmoniques de fréquences $(1 - 2g)f$.

Conclusion Générale

Le travail présenté dans ce mémoire s'inscrit dans le cadre du diagnostic des défauts des moteurs asynchrones à cage d'écureuil. Dans cette étude, nous nous sommes concentrés sur le défaut de la cassure des barres rotoriques.

Le diagnostic de défauts par l'analyse spectrale du courant statorique en régime permanent, a été fait dans notre étude. Cette approche reste, largement, la méthode la plus utilisée par les auteurs pour plusieurs raisons, notamment à cause de l'accessibilité du courant statorique extérieurement, et surtout pour la sensibilité des harmoniques associées aux défauts de la machine par rapport aux sévérités de ces derniers.

Au début de ce travail, nous avons mené une étude généralisée sur le diagnostic des machines asynchrones et évoqué toutes les erreurs pouvant survenir lors de leur fonctionnement et les raisons qui conduisent à ces dysfonctionnements et leurs conséquences. Puis, nous avons évoqué les différentes méthodes de détection actuellement utilisées.

Ensuite, nous avons analysé le défaut de la cassure de barres rotoriques en utilisant la méthode d'analyse du courant statorique (MCSA).

D'après cette étude, on peut conclure que la méthode de la MCSA a donné des bons résultats pour la détection du défaut de la cassure des barres rotorique de la MAS.

L'analyse spectrale du courant statorique nous a permis d'identifier les signatures fréquentielles causées par la rupture des barres de la cage rotorique. Il s'est avéré que la surveillance de l'amplitude des composantes de fréquence, présente dans le spectre fréquentiel du courant statorique, permet de détecter la présence d'un défaut au niveau de la cage rotorique de la machine par la présence des harmoniques de fréquences $(1 \pm 2g)f$.

Bibliographie

[PIG] NUOVO PIGNIONE ; SERVICE MANUEL FOR TURBINE A GAZ .

[K.SEBA 06] K.SEBA, COURS DE MACHINES ELECTRIQUES, ANNE 2005/2006.

[CHA. 17] CHAHMI Abdelghani : 'Identification paramétrique de la machine asynchrone dédiée au diagnostic', thèse de doctorat en machine électrique, université de science et technologie d'Oran, Algérie 2017.

[OND 06] : 'DIAGNOSTIC PAR RECONNAISSANCE DES FORMES : APPLICATION A UN ENSEMBLE CONVERTISSEUR, MACHINE ASYNCHRONE', thèse de doctorat en génie électrique, L'ÉCOLE DOCTORALE ÉLECTRONIQUE, ÉLECTROTECHNIQUE, AUTOMATIQUE DE LYON, France 2006.

[IBR09] : 'contribution au diagnostic de machine électromécanique : Exploitation des signaux électrique et de la vitesse instantanée', thèse de doctorat en génie électrique, Université de Saint Etienne, France 2009.

[DID 04] : 'modélisation et diagnostic de la machine asynchrone en présence de défaillance', thèse de doctorat en génie électrique, Université Henri Poincaré, Nancy I, France 2004.

[HAL 15]: HALEM Noura ; 'Modélisation des Machines Asynchrones Triphasées à Cage en Vue du Diagnostic par la Méthode des Eléments Finis', thèse de doctorat en électrotechnique, Université Mohamed Khider de Biskra, Algérie 2015.

[MAC 13]: Charles MACHADO: Application au diagnostic des défauts dans les roulements à billes. Colloque National en Calcul des Structures Mai, Spain 2013.

[BES 17]: BESSOUS Nouredine ; 'Contribution au Diagnostic des Défauts dans les Machines Asynchrone : Comparaison entre l'analyse vibratoire et l'analyse de courant d'alimentation', thèse de doctorat en électrotechnique, Université Mohamed Khider de Biskra, Algérie 2017.

[AND 12]: ANDRIAN Ceban ; 'Méthode globale de diagnostic des machines électriques-thèse de doctorat génie électrique', Université Lille de Nord de France, Ecole doctorale SPI, France 2012.

- [BES 16]:** BESSAM Besma ; 'Analyse et détection des défauts dans la machine asynchrone à base des techniques intelligentes', thèse de doctorat Automatique, Université Mohamed Khider de Biskra, Algérie 2016.
- [BEL 14]:** BELHAMDI Saad ; 'Diagnostic des défauts de la machine asynchrone contrôlée par des différentes techniques de commande', thèse de doctorat électrotechnique- Université Mohamed Khider de Biskra, Algérie 2014.
- [AME 18]:** AMEID Tarek ; 'Contrôle et Diagnostic de la Machine à Induction', thèse de doctorat génie électrique, Université Mohamed Khider de Biskra, Algérie 2018.
- [VAS 09]:** VASEGHI Babak ; 'Contribution à l'étude des machines électrique en présence de défaut entre spires. Modélisation réduction du courant de défaut', thèse de doctorat en génie électrique, Institut Nationale De L I.N.P.L, 2009.
- [SAH 10]:** SAHRAOUI Mohamed ; 'Etude Comparative des Méthodes de Diagnostic des Machines Asynchrones', thèse de doctorat électromécanique, Université Mohamed Khider de Biskra, Algérie 2010.
- [TRA 09]:** TRAJIN Baptiste. Analyse et traitement de grandeurs électriques pour la détection et le diagnostic de défauts mécaniques dans les entraînements asynchrones. Thèse de doctorat, l'Institut National Polytechnique de Toulouse. Toulouse, Décembre, France 2009.
- [ABE 02]:** A. Abed, 2002. Contribution à l'étude et au diagnostic de la machine asynchrone, Thèse de doctorat, Université de Henri Poincaré, Nancy-I, France.
- [HAT 95]:** H. A. Toliyat and T. A. Lipo, "Transient analysis of cage induction machines under stator, rotor bar and end ring faults," IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 10, pp. 241-247, June American 1995.
- [MHJ 01]:** M. Haji and H.A.Toliyat, "Pattern recognition-a technique for induction machines rotor broken bar detection," IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 16, pp. 312-317, December 2001
- [HAL 2015]:** Nora. 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.
- [1] **[JRC 1986]:** J. R. Cameron, W. T. Thomson, and A. B. Dow, "Vibration and current monitoring for detecting airgap eccentricity in large induction motors," *IEE Proceedings B Electric Power Applications*, vol. 133, pp. 155-163, 1986.
- [2] **[KRE 2017]:** Kerroum Badreddine,
- [3] "Etude et Diagnostic de mauvais branchement d' un Moteur à induction", Diplôme de Master, Université Badji Mokhtar Annaba, Algérie 2017

[FILI 2017]F. Filippetti, G. Franceschini, C. Tassoni, and P. Vas, "AI techniques in induction machines diagnosis including the speed ripple effect," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 34, pp. 98-108, January/February ,Italie1998.

[RAZ 2003]H. Razik and G. Didier, "On the monitoring of the defects of squirrel cage induction motors," in Power Tech Conference Proceedings, 2003 IEEE Bologna, France2003.

[HEN 2003]H. Henao, C. Demian, and G. A. Capolino, "A frequency-domain detection of stator winding faults in induction machines using an external flux sensor," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 39, pp. 1272-1279, September/October 2003.

[THA 2007] D. Thailly, "Etude du champ de dispersion des machines à courant alternatif : Application au diagnostic," Thèse de doctorat, Laboratoire Systèmes Electrotechniques et Environnement (LSEE), Université d'Artois, Béthune, France2007.