

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 Mohamed Lakhdar Ammara d'El Oued

Faculté de la Technologie

Département de Génie Mécanique

En vue de l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

En Electromécanique

Présenté par

Bouaoun Oudai

Chouia Abdeljalil

Thème

**Contribution au Diagnostic des défauts de la cassure des barres
rotoriques dans les systèmes électromécaniques : Application aux
Moteurs à Induction**

Soutenu le 30/09/2020. Devant le jury composé de :

Dr. MENECEUR Nouredine

Maitre de conférences B

Président

Dr. BESSOUS Nouredine

Maitre de conférences A

Rapporteur

Dr. BOUSBIA SALAH Seif Eddine

Maitre Assistant B

Examineur

Année Universitaire 2019/2020

Remerciements

Nous remercions tout d'abord « ALLAH » qui nous a donné la force et la patience nécessaire pour réaliser ce modeste travail.

Nous tenons à remercier notre encadreur du mémoire de Master, **Dr. Noureddine BESSOUS**, pour la confiance dont il nous a gratifié, pour sa gentillesse et ses conseils judicieux qu'il nous a prodigué à chacune de nos rencontres et nous avoir soutenu et dirigé tout au long de ce travail.

Nos vifs remerciements aux membres de jury pour nous avoir fait l'honneur d'examiner et de juger notre travail.

Enfin, nous adressons nos remerciements à tous nos enseignants de la Faculté de la Technologie et précisément les enseignants du Département de Génie Mécanique de l'Université d'El-Oued et à toutes les Personnes qui, de manière directe ou indirecte, ont contribué à l'aboutissement de ce travail.

Dédicaces

A ma très chère mère

Quoi que je fasse ou que je dise, je ne saurai point te remercier comme il se doit. Ton affection me couvre, ta bienveillance me guide et ta présence à mes côtés a toujours été ma source de force pour affronter les différents obstacles.

A mon très cher père

Tu as toujours été à mes côtés pour me soutenir et m'encourager.

A l'âme de ma chère grand-mère

A ceux qui me souhaitent du succès

Mes frères et chère sœur

Et à tous ceux qui m'ont appris une lettre

à tous ceux qui m'ont soutenu et m'ont donné amour et espoir

et à tous ceux qui m'ont souhaité du succès, ma famille, mes amis et mes collègues

Bouaoun Oudai

Dédicaces

À mon trésor éternel et raison de ma vie, symbole de sacrifice et d'amour, qui m'a toujours soutenue et prêtée aide et assistance dans mes études :

"Ma mère "

À l'homme le plus fort, le plus important dans ma vie, pour ses efforts et ses sacrifices : " Mon père ".

À mes étoiles qui éclairent ma vie : mes sœurs

À toute personne qui m'a aidé dans mes études.

Chouia Abdeljalil

ملخص

الآلات الكهربائية الدوارة مهمة جدا في الحياة اليوم وذلك لتواجدها في العديد من المجالات، ومن بين هذه الآلات نذكر الآلة غير المتزامنة ذات قفص السنجاب التي تعد واحدة من أكثر الآلات رواجاً واستخداماً في المجال الصناعي.

هذه الأخيرة يمكن أن تتعرض لأي خلل في أي وقت ويسبب ذلك خسائر كبيرة، لذا فإن عملية تشخيص العيوب قبل أن تتحول إلى عطب في وقت مبكر أصبح أمراً ضرورياً.

علاوة على ذلك في مجال التشخيص ومراقبة العيوب يوجد العديد من الطرق لاكتشاف العيوب في الآلات غير المتزامنة ومن بين هذه الطرق: طريقة تحليل الإشارة الاهتزازية وطريقة تحليل التيار الكهربائي اللذان يعتمدان بالأساس على التحليل الطيفي بواسطة تحويلات فورييه.

الهدف من هذا العمل هو المساهمة في كشف، مراقبة وتشخيص العيوب التي تتعرض لها هذه الماكينة الكهربائية، لذا حاولنا في هذه الدراسة تشخيص عيب في القضبان للجزء الدوار للآلة اللامتزامنة بطريقة تحليل التيار الكهربائي وذلك من أجل الوقوف الآلة و كفاءتها.

الكلمات المفتاحية: الآلات الكهربائية، الآلات الغير متزامنة، طريقة تحليل

الإشارة الاهتزازية، طريقة تحليل التيار الكهربائي

Abstract

Electrical rotating machine have big importance in our daily life and especially in industries. Among these machines, we distinguish squirrel cage machine, which is the most used in the industry sector.

According to these kind of machines can get damaged at any time. It can be because of huge losses as a result diagnostic process at early time became a necessity before the damages transform to a failure.

Furthermore, in the field of diagnostic and surveillance of the damages there are a lot several methods to detect damages in the asynchronous machines (induction machines). Among these techniques, we mention :Motor Vibration Signature Analysis (MVSA) and Motor Current Signature Analysis (MCSA) which are based on spectral analyzing of signals using Fourier Fast Transform (FFT).

The aim of this work is to contribute to the detection, monitoring and diagnosis of faults to which this electric machine is exposed, so in this study we have tried to diagnose fault of rotor bar breakage in asynchronous machine using the method stator current analysis in order to check the condition of the machine and its efficiency.

key words : Electrical rotating machine. Motor Vibration Signature Analysis (MVSA). Motor Current Signature Analysis (MCSA). asynchronous machines.

Résumé

Les machines électriques tournantes ont une grande importance dans notre vie quotidienne et surtout dans les industries. Parmi ces machines, nous distinguons la machine à cage d'écureuil qui est la plus utilisée dans le secteur industriel.

Ce type de machines peut être endommagé à tout moment. Cela peut être dû à d'énormes pertes, le processus de diagnostic est donc devenu une nécessité avant que les défauts ne se transforment à une panne.

De plus, dans le domaine du diagnostic et de la surveillance des défauts, il existe de nombreuses méthodes pour détecter les défauts dans les machines asynchrones. Parmi ces techniques, nous mentionnons : L'Analyse des Signatures de Vibration du Moteur électrique (ASVM) et l'Analyse des Signatures des Courants du Moteur (ASCM) qui sont basés sur l'analyse spectrale des signaux à l'aide de la transformée de Fourier rapide (TFR).

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 et son efficacité.

les mots clés : Les machines électriques tournantes • L'Analyse des Signatures de Vibration du Moteur électrique (ASVM) • l'analyse spectrale des signaux • les machines asynchrones •

Liste des figures

Liste des figures

Figure.I.1.Eléments de constitution d'une machine asynchrone à cage d'écureuil.	5
Figure.I.2.Photo du stator d'une machine asynchrone	6
Figure.I.3.constitution de rotor.	7
Figure.I.4.Principe de fonctionnement MAS.....	8
Figure.I.5.Excentricité statique [HAL15]	11
Figure.I.6Excentricité dynamique[BES07].	12
Figure.I.7.L'excentricité mixte	12
Figure.I.8.Rupture d'une et deux portions adjacentes d'anneau de court-circuit [BES17]	13
Figure.I.9.Défaut d'un rotor à cage d'écureuil , rupture de barres	13
Figure.I.10.défauts des roulements (a) - Défaut sur la bague extérieure (b) - Défaut sur la bague intérieure (c) -Défaut de cag.	14
Figure.I.11.représentation des différents défauts statoriques possible [BES17].	15
Figure.I.12.court-circuit phase-phase [CHE14].	15
Figure.I.13.court-circuit entre spires dû aux coupures de tension [BAB14]	16
Figure.I.14.défauts d'isolant dans un enroulement[BAB14].....	17
Figure.I.15.Répartition des causes des défauts pour une machine asynchrone [LEB06]......	18
Figure III.1. plan de principe de l'acquisition des signaux.	30
Figure III.2. Image du banc d'essai dédié au diagnostic (Dspace1104).	30
Figure III.4. Photographie des rotors de la MAS de 3 kW pour un état sain (à gauche), une barre cassée (au centre), deux barres cassées (à droite).	31
Figure III.5. Le courant statorique en fonction du temps (1BC) ; (a) : 0% de la charge, (b) : 75% de la charge($s=3.6\%$).	32
Figure III.7. Spectre du courant statorique (1BC, à vide) ; (a): Bande : 0-1000Hz, (b) et (c) : Basses fréquences, (d) et (e) : Autour des PSHs.	33
Figure III.8. Spectre du courant statorique ($s=3.6\%$, 1BC) ; (a) : 0-1000Hz, (b) et (c) : 0-200Hz, (d) et (e): 200-400Hz.	34
Figure III.9. Spectre du courant statorique ($s=3.6\%$, 1BC) ; (a) et (b): 20-800Hz, (c) et (d): 600-650Hz.	35
Figure III.10. Courant statorique en fonction du temps ($s=3.6\%$, 2BC).	36
Figure III.11. Spectre du courant statorique (MAS sain, 1BC et 2BC) ; (a) : Autour du fondamental, (b) : Autour de L -PSH, (c) : Autour de 5, (d) : Autour de 7.	37
Figure III.12. Spectre du courant statorique (2BC) de 0 à 100 Hz.	38

Liste des Tableaux

Liste des Tableaux

Tableau I.1 : Défaits des machines électriques selon leurs origines [AND12]	10
Tableau II.1. Récapitulation des raies dans le spectre du courant statorique (1BC).	36
Tableau III.2 Récapitulation des raies induites dans les enroulements statoriques (2BC, s=3.2%).	38
Tableau III.3 Récapitulation des raies induites dans les enroulements statoriques (1BC+2BC). .	39

Table des matières

Table des matières

Dédicaces	
Abstract	
Résumé	
Liste des figure	i
Liste des Tableaux	ii
Introduction générale	2
Chapitre I : Etat de l'art sur le diagnostic des défauts dans les machines asynchrones	
I.1. Introduction	5
I.2. Généralités sur la machine asynchrone (MAS) à cage	5
I.2.1. Stator :	6
I.2.2. Rotor :	6
I.2.3. Principe de fonctionnement de la MAS :	7
I.3. Définitions et concepts	8
I.4. Défauts dans la machine asynchrone à cage (MAS)	10
I.4.1. Défauts rotoriques :	11
I.4.2. Les défauts de roulements :	14
I.4.3. Défauts statoriques :	14
I.4.4. Défaillances du circuit magnétique :	16
I.4.5. Défauts d'isolant dans un enroulement :	17
I.5. Causes et conséquences des défauts	18
I.5.1. Les causes des défauts :	18
I.5.2. Conséquences des défauts :	18
I.6. Techniques de diagnostic	19
I.6.1. Analyse de flux magnétique :	19
I.6.2. Analyse par mesure de la puissance instantanée :	20
I.6.3. Analyse de couple électromagnétique :	20
I.6.4. Analyse de courant statorique :	20
I.6.5. Analyse de vibratoire :	21
I.7. Conclusion	22

Chapitre II:Technique de Diagnostic d'analyse des défauts (MCSA)

II.1. Introduction	24
II.2.Technique de diagnostic (MCSA)	24
II.2.1.Analyse spectrale	24
II.2.1.1.principe	24
II.2.1.2 _Spectre d'un signal	24
II.2.2Analyse spectrale de courant statorique(MCSA) :	25
II.2.2.1.Définitions	25
II.2.2.2. Technique de la FFT	26
II.2.2.3.Surveillance du moteur asynchrone basée sur la technique de la MCSA	26
II.3.Les fréquences caractéristiques du défaut :	27
II.4.Conclusion	27

Chapitre III : Détection du défaut de la cassure des barres par la méthode de MVSA aux MAS

III.1 Introduction	29
III.2 Affichage et application du banc d'essai	29
III.2.1 Plan synoptique général de l'ensemble	30
III.33 Execution experimentaux de rupture de barres	31
III.4.Conclusion	40
Conclusion générale	42
Bibliographie	43

Introduction générale

Introduction générale

La machine asynchrone est l'une des machines les plus utilisées dans l'industrie, grâce à sa robustesse, sa fiabilité et son faible coût. En fait, elle est omniprésente dans de nombreuses applications et en particulier dans les secteurs de pointe comme l'aéronautique, le nucléaire, les industries chimiques, dans le transport (métro, trains, propulsion de véhicule et des navires, les ascenseurs), dans l'industrie (machines-outils, treuils), dans l'électroménager [IBR09].

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.

Compte tenu de l'importance des enjeux en termes de productivité et de sécurité, de nombreuses approches concernant la surveillance ont été développées dernièrement.

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. Dans le domaine nucléaire, par exemple, il est essentiel d'assurer la sécurité des personnes et du matériel parce qu'aucun système, qu'il soit simple ou complexe, n'est à l'abri d'un dysfonctionnement [IBR09].

De façon générale, dans un moteur asynchrone peut se développer un défaut interne ou un défaut externe. En se référant à l'origine, un défaut peut être mécanique ou électrique. Il peut être classifié comme un défaut statorique ou rotorique et autres défauts qui sont associés aux pièces mobiles comme les roulements. Plus précisément, les défauts de la MAS peuvent se trouver aux roulements, au stator et au rotor, qui se traduisent, généralement par une vibration mécanique [BES17].

Introduction générale

Il existe plusieurs types de techniques de détection et de diagnostic, à savoir l'analyse vibratoire, l'analyse des signatures des courants du moteur, l'analyse acoustique et thermographique, etc. Seulement, Ces méthodes sont principalement préconisées pour la détection des défauts mécaniques [KER17].

Les vibrations sont omniprésentes dans la plupart des machines électriques. Les machines tournantes vibrent pour plusieurs raisons comme : défauts d'équilibrage et d'alignement et les imperfections des paliers, les cassures partielles ou totales des barres rotoriques, les problèmes aux roulements, et l'excentricité. Généralement, les vibrations diminuent la durée de vie de l'équipement et dans les cas extrêmes peuvent endommager celui-ci ou même provoquer des défaillances catastrophiques.

La procédure de l'analyse des signatures vibratoires du moteur (ASVM ou MVSA en Anglais), consiste à détecter l'apparition d'un défaut sans démontage de la machine en prélevant l'image vibratoire à l'aide d'un capteur de vibration. Dans la plupart des cas, le traitement des signaux vibratoires s'effectue par l'analyse du contenu spectral [BES17].

Une autre technique est également utilisée de plus en plus dans ces dernières années, elle repose sur l'analyse du courant statorique ou MCSA (Motor Current Signature Analysis). Sa particularité réside dans le fait que le courant statorique comporte des informations sur quasiment tous les défauts qui peuvent apparaître au niveau du moteur asynchrone. L'analyse des courants statoriques dans le domaine fréquentiel reste la méthode la plus couramment utilisée surtout pour les régimes stationnaires, car le spectre résultant contient une source de renseignements sur la majorité des défauts électriques et mécaniques pouvant apparaître au sein d'une machine asynchrone.

Ce travail est structuré dans trois chapitres qui sont agencés de la manière suivante :

Le premier chapitre se concentre fondamentalement à un état de l'art du domaine de diagnostic des défauts dans la machine asynchrone MAS.

Le deuxième chapitre présente la méthode d'analyse utilisée dans ce travail qui est MCSA-FFT.

Dans le troisième chapitre, nous allons exploiter les résultats expérimentaux pour analyser les défauts de la cassure de barres rotoriques se basant sur la méthode indiquée dans le deuxième chapitre.

Chapitre I

**Etat de l'art sur le diagnostic des défauts dans
les machines asynchrones**

I.1. Introduction

Ce premier chapitre donne un aperçu des explications de certaines informations sur la machine asynchrone et le principe de son fonctionnement. Cette partie va citer les différents défauts qui peuvent affecter les machines asynchrones en indiquant les causes, les conséquences et les techniques de détection des défauts.

I.2.Généralités sur la machine asynchrone (MAS)à cage

La machine asynchrone, souvent appelée moteur à induction comprend un stator et un rotor, constitués de tôles d'acier au silicium et comportant des encoches dans lesquelles on place les enroulements. Le stator est fixe ; on y trouve les enroulements reliés à la source Cela est illustré dans la figure (1.1) [BES07] .

Contrairement aux machines synchrone et à courant continu, seul les enroulements statoriques sont couplés à un réseau d'alimentation dont les tensions (amplitude et fréquence) définissent l'état magnétique de l'entrefer. Les enroulements du rotor sont raccordés sur eux-mêmes. Le moteur asynchrone ne possède donc ni enroulement d'excitation ni aimants permanents. Pour ce qui est du flux rotorique nécessaire pour la formation du couple électromagnétique, il est produit à partir de l'induction. La figure 1.1 ,représente la machine asynchrone [BAB14] .

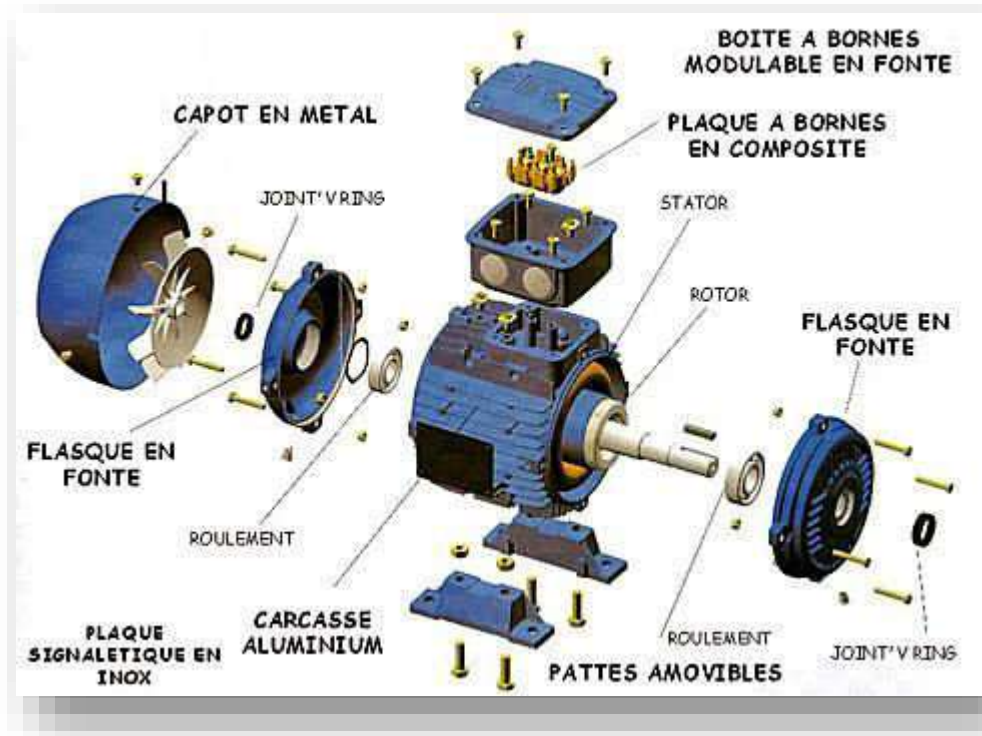


Figure.I.1.Eléments de constitution d'une machine asynchrone à cage d'écureuil.

I.2.1.Stator :

Il est constitué d'un enroulement bobiné réparti dans les encoches du circuit magnétique. Ce circuit magnétique est constitué d'un empilage de tôles dans lesquelles sont découpées des encoches parallèles à l'axe de la machine (Fig1.2.). Le bobinage statorique peut se décomposer en 2 parties : les conducteurs d'encoches et les têtes de bobines. Les conducteurs d'encoches permettent de créer dans l'entrefer le champ magnétique 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'objectif est d'obtenir à la surface de l'entrefer une distribution de courant la plus sinusoïdale possible, afin de limiter les ondulations du couple électromagnétique.



Figure.I.2.Photo du stator d'une machine asynchrone .

I.2.2.Rotor :

Le circuit du rotor est 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[BES07] , les barres conductrices sont réalisées par coulage d'un alliage d'aluminium, ou par des barres massives de cuivre perforées et frettées dans les tôles du rotor. Il n'y a pas généralement pas, ou très peu, d'isolation entre les barres rotoriques et les tôles magnétiques, mais leur résistance est suffisamment faible pour que les courants de fuite dans les tôles soient négligeables, sauf lorsqu'il y a une rupture de barre. Le moteur à cage d'écureuil est beaucoup plus simple à construire que le moteur à rotor bobiné et, de ce fait, son prix de revient se trouve réduit. De plus, il dispose d'une plus grande

robustesse. Il constitue la plus grande partie du parc de moteurs asynchrones actuellement en service .

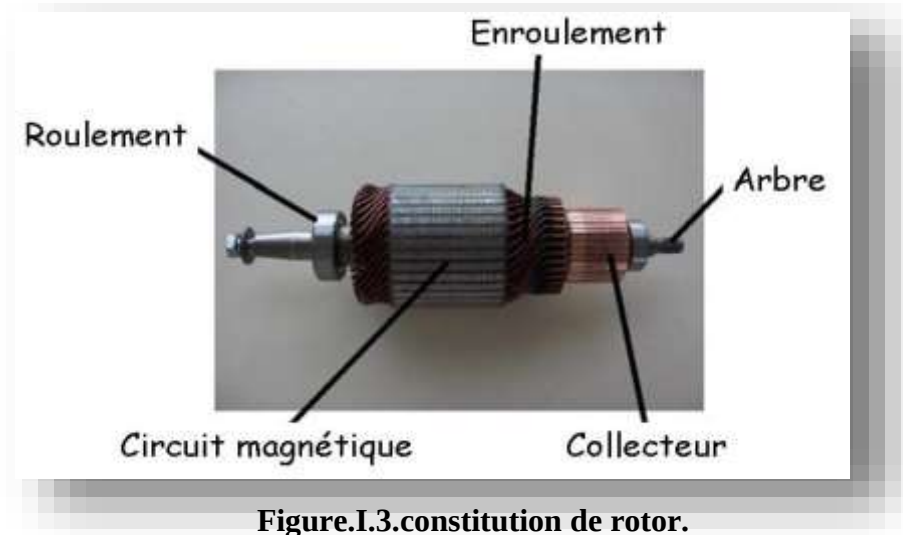


Figure.I.3.constitution de rotor.

I.2.3.Principe de fonctionnement de la MAS :

Le fonctionnement d'une machine asynchrone est basé sur le principe de l'interaction électromagnétique du champ tournant créé par le courant triphasé fourni à l'enroulement statorique par le réseau, et des courants induits dans l'enroulement rotorique lorsque les conducteurs de ce dernier sont coupés par le champ tournant. De cette façon le fonctionnement d'une machine asynchrone est analogue à celui d'un transformateur : le stator étant comparable à l'enroulement primaire et le rotor à l'enroulement secondaire qui, dans le cas général, peut tourner à la vitesse de rotation [BOU07].

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

$$N_s = f / P \text{ en tr/s} \quad \text{ou} \quad N_s = 60f / P \text{ en tr/min} \quad (\text{I.1})$$

Où f : est la fréquence d'alimentation.

p : représente le nombre de pair de pôles.

L'interaction électromagnétique des deux parties de la machine n'est possible que

Chapitre I:Etat de l'art sur le diagnostic des défauts dans les machines asynchrones

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

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

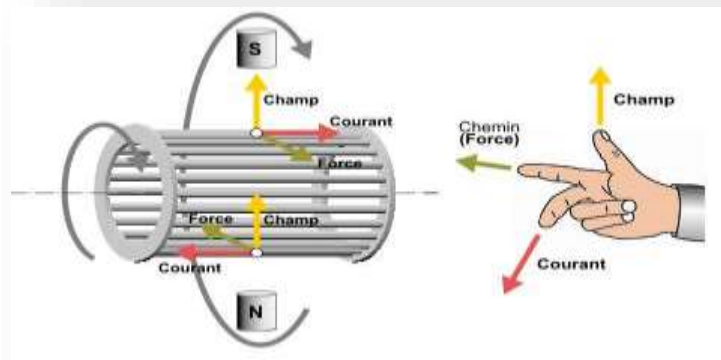


Figure.I.4.Principe de fonctionnement MAS

I.3.Définitions et concepts

Diagnostic : C'est un ensemble des actions destinées à identifier les causes probables de la défaillance. Les deux principales tâches de diagnostic sont : la détection et la localisation des défauts. La détection consiste à signaler l'existence du défaut, tandis que la localisation a pour objet d'identifier le type de défaut. Donc, le diagnostic a pour objectif de détecter d'une manière précoce un défaut avant qu'il conduise à une défaillance totale dans l'installation industrielle.

Un défaut : est une anomalie de comportement au sein du système. Ce concept est important dans les opérations de surveillance pour la conduite et la maintenance des processus industriels. Tout écart entre la caractéristique observée et la caractéristique de référence est considéré comme étant un défaut. Il est donc clair qu'une défaillance conduit à un défaut. Mais un défaut n'induit pas nécessairement une défaillance. En effet, le dispositif peut conserver son aptitude à accomplir sa tâche principale si les défauts n'ont pas d'impacts sur cette tâche. L'art du diagnostic consiste à détecter de façon précoce un défaut avant qu'il ne conduise à un état de défaillance donc de panne [BES17] .

La 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. On peut citer trois types de maintenance;

Maintenance préventive : maintenance effectuée dans l'intention de réduire la probabilité de défaillance d'un bien ou la dégradation d'un service rendu. C'est une intervention de maintenance prévue, préparée et programmée avant la date probable

Chapitre I:Etat de l'art sur le diagnostic des défauts dans les machines asynchrones

d'apparition d'une défaillance. Le plus souvent elle est systématique, c'est-à-dire une maintenance préventive effectuée selon un échéancier établi suivant le temps ou le nombre d'unités d'usage.

Maintenance Corrective:C'est un ensemble des activités réalisées après la défaillance d'un bien. Autrement dit, la maintenance corrective est effectuée après la détection d'une panne. Elle devra s'appliquer automatiquement aux défaillances complètes et soudaines. Ce type de maintenance sera réservé aux matériels peu coûteux, non stratégiques pour la production et dont la panne aurait peu d'influence sur la sécurité [SAH10] .

Maintenance conditionnelle : alternative à la maintenance systématique, fait l'objet d'une demande croissante dans un grand nombre d'applications industrielles. Cette maintenance est basée sur la surveillance en continu de l'évolution du système, afin de prévenir un dysfonctionnement avant qu'il n'arrive. Elle n'implique pas la connaissance de la loi de dégradation. La décision d'intervention préventive est prise lorsqu'il y a évidence expérimentale de défaut imminent, ou approche d'un seuil de dégradation prédéterminé. Elle impose donc des traitements en ligne, au moins en partie [ZEM04] .

Surveillance : la surveillance peut être définie comme un ensemble d'actions réalisées Manuellement ou automatiquement, destinées à observer l'état d'un bien ou d'un service et à détecter l'apparition d'une éventuelle défaillance.

Les informations nécessaires à ces actions peuvent provenir de grandeurs physiques directement prélevées sur le système ou reconstituées à partir de mesures indirectes.

La surveillance consiste en la mise en œuvre de techniques reposant sur l'analyse des variations de paramètres ou de grandeurs de fonctionnement de l'entité, visant à évaluer son état de dégradation, pour décider de la nécessité d'une inspection ou d'une réparation préventive afin d'éviter sa défaillance. Si la surveillance permet de détecter une défaillance, le diagnostic consiste d'une part à observer les effets de la défaillance et, d'autre part, à identifier si possible les causes et l'importance de cette défaillance.

Un examen strict des définitions de la surveillance et du diagnostic montre que ce sont des outils de la maintenance qui visent à améliorer la sûreté de fonctionnement d'une entité à laquelle ils sont appliqués[BAB14] .

Fiabilité : capacité d'un système à fonctionner pendant un certain temps sans panne; elle se caractérise par le temps moyen de bon fonctionnement [LEB06] .

I.4.Défauts dans la machine asynchrone à cage (MAS)

Malgré que la machine asynchrone à cage d'écureuil est robuste, elle peut parfois présenter différents types de défauts, qui peuvent être soit d'origine électrique, ou mécanique. Cependant, les contraintes de différentes natures auxquelles ces machines sont sollicitées, sont les principales causes des défauts structurels et fonctionnels qui selon leur nature, peuvent endommager totalement la machine et causer inévitablement l'arrêt du processus, donc une perte consécutive de la production [MER09] .

Les origines des défauts peuvent être diverse , recensons d'après l'organigramme de les origines : mécaniques, électriques, thermiques et environnementales[KAI10] .

Tableau I.1 : Défauts des machines électriques selon leurs origines [AND12]

Défaillances des machines électriques	Interne	Mécanique	Contact entre le stator et rotor
			Défaut de roulements
			Excentricité
			Mouvement des enroulements et des tôles
		Électrique	Défaillance au niveau de l'isolation
			Rupture de barre
			Défaillance au niveau du circuit magnétique
	Externe	Mécanique	Charge oscillante
			Surcharge de la machine
			Défaut de montage
		Environnementale	Humidité
			Température
			Propreté
		Électrique	Fluctuation de la tension
			Sources de tensions déséquilibrées
			Réseaubruit

Les études dans ce domaine permettent de classer les défauts suivant leur localisation :

I.4.1.Défauts rotoriques :

I.4.1.1.Les défauts d'excentricités :

Dans une machine électrique idéal, le centre du rotor est aligné sur celui du stator, donc l'axe de rotation du rotor est le même que l'axe du stator comme indiqué sur la figure (I.5). Cependant, suite à la flexion de l'arbre, à un positionnement incorrect des paliers lors de l'assemblage, à l'usure des roulements, à un défaut de charge, ou tout simplement à un défaut de fabrication (usinage) la machine peut être soumise à un décentrement du rotor, se traduisant par des oscillations de couple. Ce phénomène est appelé excentricité statique ou dynamique dont l'origine peut être liée à un positionnement incorrect des paliers lors de l'assemblage, à un défaut de roulement, à un défaut de charge, ou à un défaut de fabrication [KAI10] .

Il y a trois cas d'excentricités généralement bien distinctes :

I.4.1.2.L'excentricité statique :

Dans ce type d'excentricité, la position de l'épaisseur minimale de l'entrefer est fixe dans l'espace. Elle peut être causée par l'ovalité de la partie intérieure du stator ou encore par le mauvais positionnement du rotor ou du stator durant la phase de construction.

Si cependant l'assemblage entre le rotor et l'arbre est suffisamment rigide, le niveau d'excentricité statique ne change pas[BAB14] .

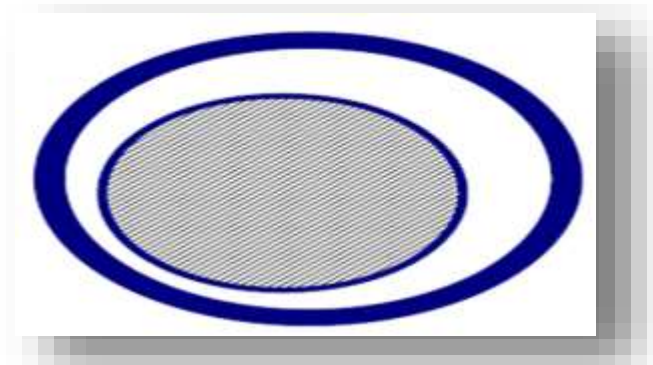


Figure.I.5.Excentricité statique [HAL15] .

I.4.1.3.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. Dans ce type d'excentricité, le centre du rotor n'est pas en son centre de rotation et de ce fait la position d'épaisseur minimale d'entrefer tourne avec le rotor. Parmi les causes de ce type d'excentricité, on cite : la flexion de l'arbre du rotor, l'usure ou le défaut d'alignement du roulement [BES17] .

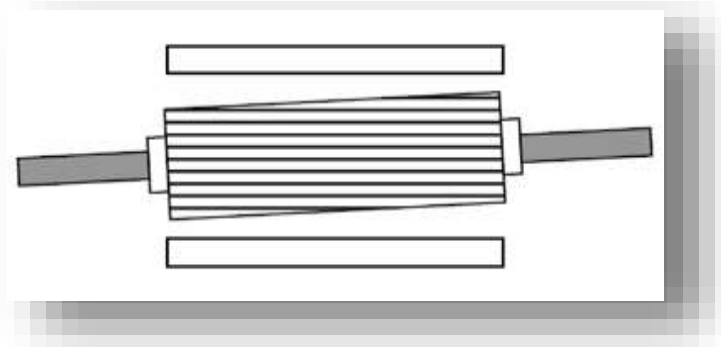


Figure.I.6Excentricité dynamique[BES07].

I.4.1.4.L'excentricité mixte :

En réalité, les excentricités statiques et dynamiques ont tendance à coexister, 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 [HAL15] .

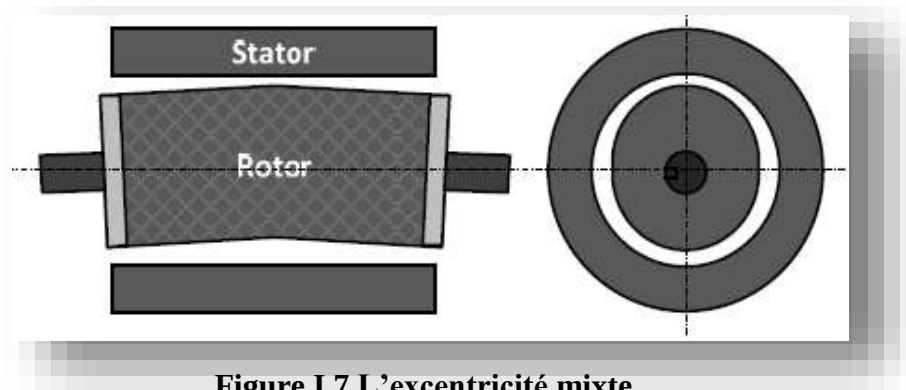


Figure.I.7.L'excentricité mixte .

I.4.1.5.Ruptures d'anneaux :

Les mêmes défauts qu'au stator peuvent se retrouver dans un rotor bobiné. Pour une machine asynchrone avec un rotor à cage d'écureuil, les défauts se résument à la rupture de barres ou à la rupture d'anneaux de court-circuit.

La rupture de portion d'anneau est un défaut qui apparaît aussi fréquemment que la cassure de barres. Ces ruptures sont dues soit à des bulles de coulées ou aux dilatations différentielles entre les barres et les anneaux [BES07] .

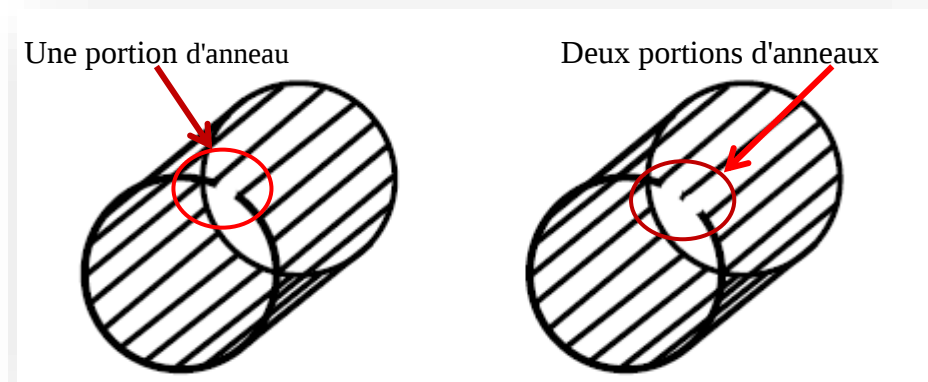


Figure.I.8.Rupture d'une et deux portions adjacentes d'anneau de court-circuit

I.4.1.6.Cassure de barres rotoriques :

Parmi les défauts les plus étudiés, la rupture de barres rotoriques de la machine asynchrone à cage, fait sans doute partie des plus courants. La rupture d'une barre rotorique ou d'un segment d'anneau de court-circuit peut être induite par plusieurs facteurs, qui sont souvent indépendants les uns des autres. Parmi ceux-ci, nous pouvons citer par exemple :

- L'augmentation de la température due à une surcharge de la machine.
- les efforts magnétiques provoqués par les forces électromagnétiques.
- les efforts résiduels dus aux problèmes de fabrication.
- Des efforts environnementaux provoqués par la contamination et l'abrasion du matériel rotorique dues aux produits chimiques ou à l'humidité.
- l'environnement hostile dans lequel la machine fonctionne [KAI10] .

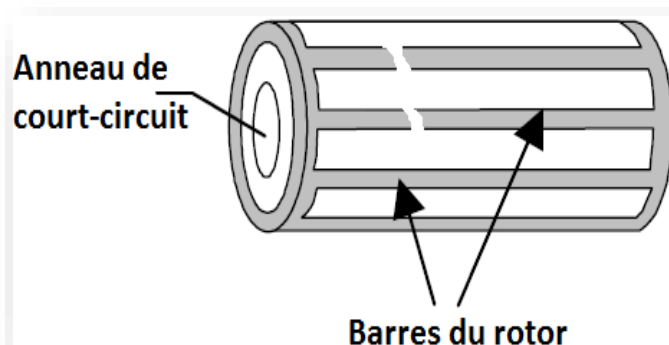


Figure.I.9.Défaut d'un rotor à cage d'écureuil , rupture de barres .

I.4.2.Les défauts de roulements :

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

Les fréquences caractéristiques des vibrations dépendent de l'élément du roulement affecté par le défaut, et sont liées à ses paramètres caractérisant les défauts des roulements à billes sont:

- a) -Défaut au niveau d'une bille
- b) - Défaut sur la bague intérieure
- c) -Défaut sur la bague extérieure [GHO06] .

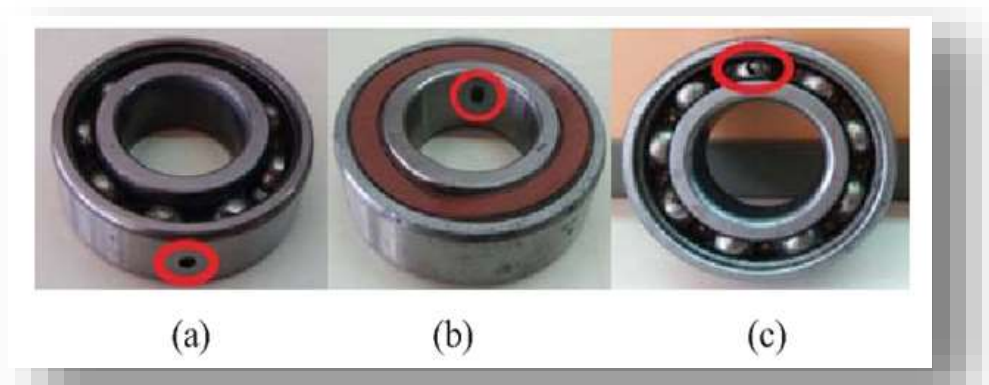


Figure.I.10.défauts des roulements (a) - Défaut sur la bague extérieure (b) - Défaut sur la bague intérieure (c) -Défaut de cage.

I.4.3.Défauts statoriques :

Les défaillances au stator représentent environ de 40% à 60% des défauts des machines à induction[HAL15], et défauts statoriques regroupent principalement les défauts de court-circuit d'une phase à la terre, court-circuit entre phases, ou court-circuit entre spires. Ils commencent généralement par un court-circuit entre spires, avant d'évoluer vers des défauts plus graves. Une des principales causes de ces défauts est la dégradation de l'isolation qui peut être une dégradation fonctionnelle (liée à la durée de vie de l'enroulement) ou bien due aux conditions d'exploitation et aux contraintes mécaniques, thermiques, électriques et environnementales [GHO05] .

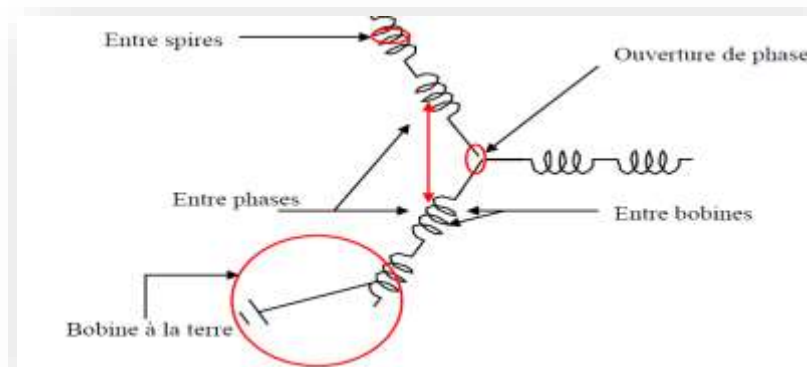


Figure.I.11.représentation des différents défauts statoriquespossible [BES17].

I.4.3.1.Court-circuit entre phases :

Un court-circuit entre phases peut arriver en tout point du bobinage, mais les plus fréquents apparaissent dans les têtes de bobines, puisque c'est dans celles-ci que les conducteurs de phases différentes se côtoient. L'influence de ce type de défaut sur le fonctionnement de la machine dépend de la localisation du défaut (de la partie affectée).

Si le court-circuit est proche de l'alimentation entre phases, il induit des courants très élevés qui conduisent à la fusion des conducteurs d'alimentation ce qui provoque un arrêt net de la machine. Si le court-circuit est proche du neutre entre deux phases, il engendre un déséquilibre des courants de phases avec un risque moindre de fusion des conducteurs.

L'apparition de ce type de défaut dans le cas des machines asynchrones, provoque une augmentation des courants dans les barres ainsi que dans les anneaux du rotor à cage[AND12] .



Figure.I.12.court-circuit phase-phase [CHE14].

I.4.3.2.Court-circuit entre spire :

La détection prématurée d'un court-circuit entre spires peut épargner un défaut statorique fatal par propagation de ses conséquence vers les autres spires .ainsi ,il est possible de réduire considérablement le cout de maintenance et des arrêts pour réparation .comme exposé dans d'antérieurs travaux, plusieurs technique permettent la détection d'un court-circuit entres spires d'une façon plus ou moine performante .penman et la dans ont utilisé le flux axial de fuite comme procédé de détection .une grande bobine doit être placée.

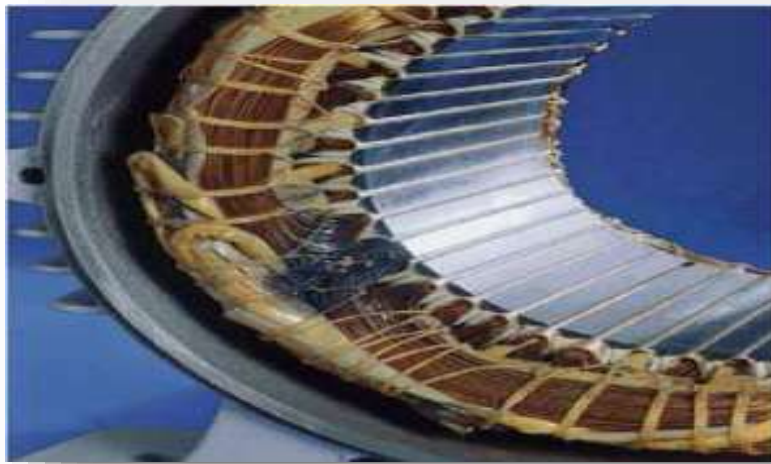


Figure.I.13.court-circuit entre spires dû aux coupures de tension [BAB14] .

I.4.3.3.Circuit ouvert sur une phase :

Les conséquences d'ouverture de phase sont moins graves qu'un court-circuit entre spires ou entre phases. Le courant ne peut pas circuler, et ça ne pose donc pas de problème d'échauffement pouvant détériorer le reste de bobinage.

De même, un circuit ouvert ne crée pas de couple résistant lorsqu'un champ variable est appliqué à la bobine[BES17] .

I.4.4.Défaillances du circuit magnétique :

Les tôles du circuit magnétique sont normalement isolées entre elles ; toutefois elles peuvent être accidentellement se court-circuitées. Ce défaut peut avoir comme origine :

- Un court-circuit des conducteurs qui peut également provoquer un échauffement local intense dans les tôles .
- Les corps étrangers projetés dans l'entrefer peuvent entraîner l'abrasion des tôles et causer des court-circuit .

- Un défaut sévère d'excentricité statique et/ou dynamique peut conduire à un contact franc entre le stator et le rotor, ce qui pourra détruire le circuit magnétique [SAH10] .

I.4.5.Défauts d'isolant dans un enroulement :

La dégradation des isolants dans les enroulements peut provoquer des court-circuit. 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 mécanique, de des différents constituants du moteur. Or, les matériaux d'isolation ont une limite mécanique, de température et de tension. Dans ce cas, un court-circuit peut apparaître dans l'enroulement concerné [HAL15] .



Figure.I.14.défauts d'isolant dans un enroulement[BAB14].

On peut résumer les défauts cités en haut comme suit :

❖ Défauts rotoriques

- Rupture de barreaux (Cassures partielles ou totales des barres).
- Cassure de l'anneau de court-circuit de la cage (Cassures partielles ou totales des anneaux).
- Défaut du circuit magnétique (ruptures de tôles).
- Excentricité statique ou dynamique.

❖ Défauts roulements

- Trous dans les gorges de roulement intérieures et extérieures.
- Ondulation de leur surface de roulement.
- Attaque des billes.
- Corrosion due à l'eau.
- Défaut de graissage, problème dû à la température.
- Décollement, effritement de surface, provoquée par une surcharge .

❖ Défauts statoriques

- Court-circuit entre spires, court-circuit entre bobines de la même phase.
- Ouvertures de phases, court-circuit phase-phase ou phase-terre.
- Coupure d'une phase.
- Défaut du circuit magnétique (ruptures de tôles).
- Défaut de l'isolation de masse.

I.5. Causes et conséquences des défauts

I.5.1. Les causes des défauts :

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

- les générateurs de pannes ou initiateurs de défauts : surchauffe du moteur, défaut Électrique (court-circuit), survoltage d'alimentation, problème d'isolation électrique, usure des éléments mécaniques (roulements à billes), rupture de fixations, etc.
- les amplificateurs de défauts : surcharge fréquente, vibrations mécaniques
Environnement humide, échauffement permanent, mauvais graissage, vieillissement
- les vices de fabrication et les erreurs humaines : défauts de fabrication, composants Défectueux, protections inadaptées, mauvais dimensionnement de la machine, etc [LAB16] .

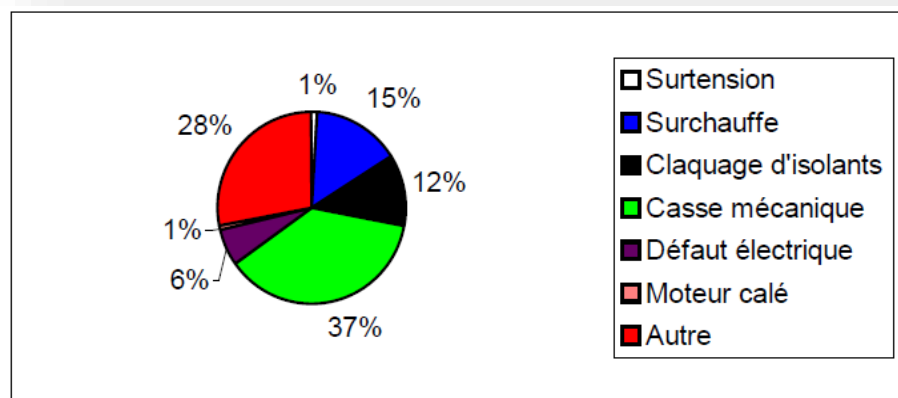


Figure.I.15. Répartition des causes des défauts pour une machine asynchrone [LEB06].

I.5.2. Conséquences des défauts :

Les défauts qui surviennent sur les machines asynchrones conduisent à de multiples problèmes qui affectent la rentabilité de l'installation globale, et qui peuvent aller jusqu'à

l'arrêt total .On cite parmi les conséquences des défauts:

- Fluctuations au niveau du couple et de la vitesse.
- Appel supplémentaire de courant.
- Déséquilibre au niveau de la tension et du courant de ligne.
- Augmentations des arrêts non programmés, des pertes de

production, et par conséquent, du rendement global [GHO05] .

I.6.Techniques de diagnostic

Les moteurs asynchrones sont soumis pendant leur fonctionnement à plusieurs contraintes de différentes natures, l'accumulation de ces contraintes provoque des défauts dans les différentes parties du moteur.

Pour remédier au problème de détection des défauts, il existe une variété de techniques de diagnostic et mesure (mesure de champ magnétique, mesure de bruit) d'autres sont basées sur la surveillance et la comparaison des caractéristiques électromécaniques du moteur en défaut (courant de détection des défauts. Certaines d'entre elles sont basées sur l'observation et la statorique, couple et vitesse)[HAR09] .

I.6.1.Analyse de flux magnétique :

Dans une machine idéale 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 dépendantes du degré de sévérité du défaut. Si on place une bobine autour de l'arbre de la machine, elle sera le siège d'une force électromotrice induite. L'analyse spectrale de la tension induite dans cette bobine, peut être exploitée pour détecter les différents défauts comme la rupture de la barre rotorique.

Par exemple, le flux axial est toujours présent dans les machines électriques à cause des dissymétries inhérentes à leur fabrication. L'étude des variations de ce flux est donc considérée par beaucoup d'auteurs comme une solution pour détecter et localiser un défaut. Une méthode dans la référence utilise le flux pour la détection des barres cassées, il place des spires d'une part sur l'enveloppe extérieure du moteur pour mesurer l'étendue du flux de fuite des têtes de bobine et d'autre part de l'arbre du rotor pour mesurer le niveau du flux axial.

Il montre ensuite les spectres mesurés à partir des signaux issus de ce dernier type de capteur dans le cas d'un moteur sain et dans celui où une des barres du rotor est cassée. Dans cet axe, nous pouvons citer qui sont des travaux basés sur les captures de flux de fuite et sa variation, cette dernière (la variation de flux) c'est une information pour détecter le défaut.

Nous distinguons aussi Liviu Kreindler, Julio C. Moreira et qui utilisent le control de l'orientation du flux direct (DFOC) et indirect (IFOC) cette méthode basée sur la détermination dans la position spatiale de l'entrefer, après aller à analyser les tensions statoriques et leurs composants d'harmoniques [BES07] .

I.6.2.Analyse par mesure de la puissance instantanée :

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

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

I.6.3.Analyse de 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

I.6.4.Analyse de courant statorique :

Parce qu'il est facilement accessible, et vue sa capacité de détecter aussi bien les défauts électromagnétiques que mécaniques, l'analyse du courant statorique occupe une place privilégiée dans le diagnostic par analyse des signaux. Cette technique est connue sous l'abréviation MCSA (MotorCurrent Signature Analysis). La MCSA était l'objet de plusieurs travaux de recherche, elle consiste à affecter à chaque défaut une signature spectrale le caractérisant. Dans le même contexte, il a été démontré que la sévérité du défaut est fonction de l'amplitude des composantes fréquentielles qu'il génère, et notamment, des raies déjà présentes dans le moteur sain (harmoniques d'espace).

I.6.5.Analyse de vibratoire :

Le diagnostic vibratoire est une méthode très ancienne et très utilisée pour la détection des défauts dans les machines électriques. Toutes les machines électriques produisent du bruit et des vibrations. Leur analyse peut être employée pour fournir des informations sur l'état de la machine. Plus souvent, les mesures sont faites comme une procédure non fréquente ou lorsqu'un problème est suspecté, les mesures sont faites en utilisant des accéléromètres ou des capteurs de vitesse à boudins. Des sondes de déphasage sont aussi employées pour le contrôle du mouvement de l'arbre. Le désalignement entre les centres des supports donnant naissance à un entrefer non uniforme produit la vibration à une fréquence double, tandis que le déséquilibre mécanique engendre la vibration à la vitesse angulaire, au moment où les deux dépendent de la réponse mécanique à cette fréquence.

Les signaux de vibrations détectés contiennent des informations essentielles sur l'état de la machine. L'analyse spectrale de ces signaux nous renseigne sur les différents défauts qui sont à l'origine de ces vibrations[HAR09] .

I.7.Conclusion

Dans ce chapitre nous avons discuté le principe du fonctionnement du moteur asynchrone triphasé à cage en mentionnant ses composants. En plus, on a cité les différents défauts qui affectent la MAS et ses causes. Il existe plusieurs techniques de détections, ce chapitre a consacré une partie qui définit quelques techniques de diagnostic. Le chapitre suivant va définir la technique de détection qui se base sur l'Analyse du courant statorique.

Chapitre II

Technique de Diagnostic d'analyse des défauts (MCSA)

II.1.Introduction

Jusqu'à présent, il n'y a pas eu d'approche dans l'analyse et l'élimination définitive des vibrations et des bruits. La vibration est considérée comme l'une des sources importantes pour réaliser la surveillance.

Dans ce chapitre nous allons définir la technique de diagnostic des défauts qui est récemment utilisée dans le domaine de la surveillance des machines électriques tournantes.

II.2.Technique de diagnostic (MCSA)

La méthode de la MCSA est l'abréviation des mots MotorCurrent Signal Analysis qui a l'abréviation française ASCS qui signifie : Analyse des Signatures du Courant Statorique ou Analyse Spectrale du Courant Statorique.

II.2.1.Analyse spectrale

II.2.1.1.principe

L'analyse spectrale est utilisée depuis de nombreuses années pour détecter des défaillances dans les machines électriques, essentiellement les ruptures de barres au rotor des machines asynchrones à cage, la dégradation des roulements, les excentricités et les courts-circuits dans le bobinage. Ces cas se prêtent bien à cette approche dans la mesure où de nombreux phénomènes se traduisent par l'apparition de fréquence directement liées à la vitesse de rotation ou à des multiples de la fréquence d'alimentation [HAM 18].

La surveillance par analyse spectrale de la MAS consiste donc à effectuer une simple transformée de Fourier des grandeurs affectées par le défaut et à visualiser les fréquences parasites constituant la signature d'un défaut dans la machine. Les grandeurs choisies sont les grandeurs mécanique (vibration, couple électromagnétique, vitesses) .

II.2.1.2_Spectre d'un signal

II.2.1.2.1_ Définition d'un signal

Le signal correspond à la mesure d'une grandeur physique. Mesures de grandeur physique : signal sismique, mesure du poulx, déplacement, voltage, intensité, etc... La plupart des grandeurs physiques sont aujourd'hui converties en signaux électriques puis codées en signal numérique binaires. Il existe très peu de mesures totalement analogiques.

II.2.1.2.2_Définition de spectre d'un signal

C'est la représentation en fonction de la fréquence des amplitudes des différentes composantes présentes dans le signal.

II.2.2 .Analyse spectrale de courant statorique(MCSA):**II.2.2.1.Définitions**

a) L'analyse spectrale du courant statorique : est une méthode de contrôle qui consiste à analyser le spectre du courant statorique sachant que dans un spectre d'un moteur sans défaut, apparait la composante du fondamental à la fréquence du réseau d'alimentation en régime permanent, accompagnée des composantes à faibles et hautes fréquences qui sont dues à la géométrie de la machine considérée. Un bon équipement d'analyse de spectre (grande sensibilité) et la comparaison entre les spectres du courant d'un moteur avec défaut et celui de la référence (le spectre du courant d'un moteur sans défaut), permet d'avoir une bonne analyse et obtenir la maximum d'information sur l'état de moteur.

Cette méthode est utilisée lors de fonctionnement normale du moteur (moteur en marche) ce qui facilite beaucoup la surveillance de la machine et indique à chaque instant l'état de leur fonctionnement.

b) L'analyse du courant statorique : est un outil puissant pour détecter la présence d'anomalies mécaniques et électriques, non seulement dans le moteur, mais également dans la charge. Des améliorations considérables sont apportées à cette technique qui est dénommée dans la littérature.

* Les signaux de courants présentent l'avantage d'être facilement mesurable, et à moindre cout.

* Des composantes fréquentielles ont été déterminées pour chaque type de défaut. Il est important de noter, que l'amplitude de la composante fréquentielle augmente avec la sévérité du défaut.

* Parmi tout les signaux utilisables, le courant statorique s'est avéré être l'un des plus intéressant, car il est facile à mesurer et nous permet de détecter les défauts électriques, y compris les défauts purement mécaniques.

* Cette méthode qui est connue sous le nom "MotorCurrent Signature Analysis" (MCSA), se base sur les phénomènes électro magnétiques qui se transforment, par influence à une

information dans le courant statorique. Elle est appuyée par un algorithme de calcul rapide appelée Transformée de Fourier Rapide ou bien en Anglais : Fast Fourier Transform (FFT).

Les défauts de la machine asynchrone se traduisent dans le spectre du courant statorique par.[HAM 18]:

- L'apparition des raies spectrales dont les fréquences sont directement liées à la fréquence de rotation de la machine, aux paramètres physiques de la machine (nombre de barres rotoriques et nombre des paires de pôles).
- La modification de l'amplitude des raies spectrales, déjà présents dans le spectre du courant. La surveillance via le courant statorique, nécessite une bonne connaissance des défauts et de leurs signatures. Elles sont utilisées pour le moment dans le contexte de machines alimentées par le réseau et pour la recherche de fréquences caractéristiques de défauts[HAM 18].
- la présence d'harmoniques caractérisant les défauts de la MAS [HAM 18].

II.2.2.2. Technique de la FFT

La FFT est un moyen efficace qui réduit le nombre d'opérations arithmétiques nécessaire à la transformée discrète, son importance augmente aussi avec l'évolution du traitement numérique des signaux, de même avec la possibilité de pouvoir l'utiliser pour des signaux analogiques ou plus généralement pour des fonctions continues dans des nombreux domaines scientifiques

L'utilisation de cette méthode est très simple car elle ne nécessite pas l'introduction d'appareillage de mesure à l'intérieur de la machine électrique, mais consiste à analyser le courant statorique du moteur [HAM 18]

II.2.2.3.Surveillance du moteur asynchrone basée sur la technique de la MCSA

D'après la littérature, les principaux signaux du moteur utilisés et utilisables pour obtenir des informations sur l'état de santé de la machine sont les suivants :

- Couple électromagnétique
- Puissance instantanée statorique
- Vibration mécanique
- Courant statorique

Parmi tous ces signaux utilisable, le courant statorique s'est avéré être l'un des plus intéressants et ce pour deux raisons :

1. La surveillance du courant statorique permet de détecter voire de diagnostiquer aussi bien des défauts électromagnétiques (déséquilibre de phase, court-circuit entre spire, excentricités d'entrefer, rupture de barres....) que des défauts purement mécaniques (dégradation des roulements à bille, désalignement)
2. Le courant statorique est très facile d'accès puisqu'il est utilisé pour la commande de la machine et qu'il peut être mesuré directement au poste d'alimentation

II.3.Les fréquences caractéristiques du défaut :

On peut citer les harmoniques apparus dans la courants statoriques comme suit:

$$(fr \pm 2ks. fs) \quad \text{II.1}$$

$$(6 \pm 2ks. fs) \quad \text{II.2}$$

$$fcb = fr \pm fp \quad \text{II.3}$$

$$fp = (fs - fr)p \quad \text{II.4}$$

$$Nb = RBPF = Nb. fr \quad \text{II.5}$$

$$Cb = fnb \pm 2f \quad \text{II.6}$$

II.4.Conclusion

Dans ce chapitre nous avons abordé la notion de diagnostic utilisée pour connaître à l'avance l'évolution de l'état de santé d'un système électrique. Nous avons présenté les différentes approches de diagnostic. Le diagnostic conduit à quantifier le degré de sévérité de défaut et estimer le temps de vie restant pour un système. Comme nous avons expliqué la technique d'analyse du courant statorique qui sera utilisée dans le prochain chapitre pour suivre l'évolution de l'état de la machine asynchrone sous un défaut de la cassure des barres rotoriques.

Chapitre III

Détection du défaut de la cassure des barres par MCSA

III.1 Introduction

Les défauts qui apparaissent dans les machines électriques ont des causes variées. La rupture des barres dans les moteurs a fait l'objet de nombreux travaux. D'autres recherches ont suivi dans la même voie, où ont été étudiées dans le diagnostic d'autres défauts de la machine (désalignement entre la machine et la charge, les courts circuits statoriques, usure des paliers,...).

Les machines électriques, particulièrement les machines asynchrones, jouent de nos jours un rôle important dans toutes les applications industrielles. L'assurance de la disponibilité et la sûreté de fonctionnement de celles-ci sont fondamentales. Il est donc nécessaire de développer des systèmes, permettant de surveiller et de diagnostiquer l'état de santé de ces dispositifs.

Dans ce chapitre, nous allons essayer d'exploiter les résultats expérimentaux des machines défectueuses, ayant pour objectif d'apporter un bon diagnostic en utilisant la méthode de MCSA.

Remarque : Dans ce chapitre, tout ce qui est simulé en bleu désigne l'état sain et tout ce qui est en rouge désigne l'état défectueux.

III.2 Affichage et application du banc d'essai

Lorsqu'on veut surveiller un système ou un processus physique, on doit, à un certain stade des opérations, mesurer et surveiller les grandeurs physiques dépendantes, souvent directement du dispositif. Pour présenter des résultats, il faut que les grandeurs mesurées restent dans une fourchette acceptable de valeurs, dans le but d'assurer la qualité de l'ensemble des systèmes.

La réalisation d'un banc d'essai a été étudiée et conçue au niveau du laboratoire de génie électrique Biskra (LGEB).

Les capteurs sont les moyens les plus importants pour accomplir les tests. Si le choix de ces capteurs n'est pas adapté, le reste du traitement ne pourra pas donner de bonne mesure ou aider à prendre la bonne décision. Un capteur peut être défini comme un convertisseur d'une grandeur physique en un signal électrique.

Le banc est constitué d'une machine asynchrone de test accouplée à une charge (frein). Ces tests expérimentaux nous ont permis d'effectuer les analyses sur les défauts électriques et mécaniques afin de faire la validation avec certains algorithmes de diagnostic.

III.2.1 plan synoptique général de l'ensemble

La figure (II-1) présente la structure générale du dispositif expérimental. Le diagnostic est réalisé à travers une carte d'acquisition raccordée à un micro-ordinateur PC. Cette carte de développement comprend tout l'environnement proche du processeur du PC avec des outils logiciels nécessaires aux applications visées.

Il faut écrire des algorithmes précis en langage de correspondance, c'est la solution pour aboutir à une meilleure lisibilité et compréhension, en vue des évolutions ultérieures. Un autre point indispensable, est l'échantillonnage ; en principe, et afin d'éviter toute perte d'information, la fréquence f_e à laquelle s'effectue l'échantillonnage doit satisfaire à la condition de Nyquist : $f_e > 2f_{max}$.

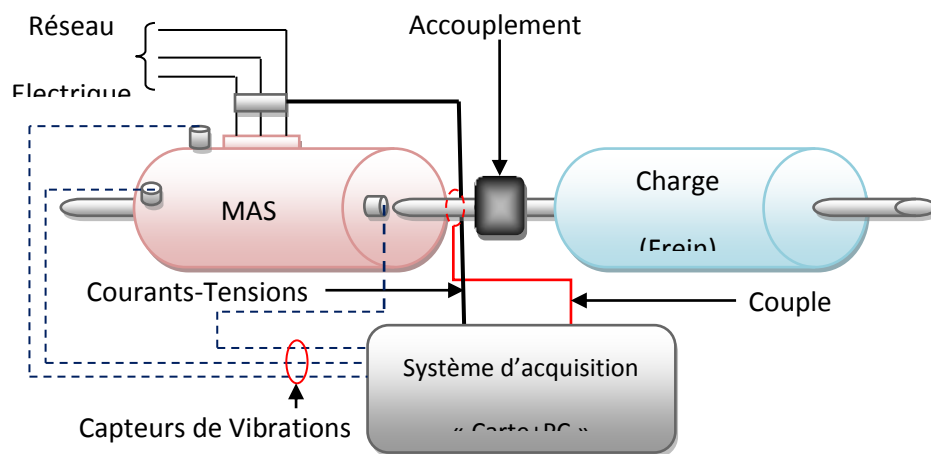


Figure III.1. plan de principe de l'acquisition des signaux.

Le bon choix de la résolution fréquentielle, permet de séparer les composantes les plus proches du fondamental. Notre acquisition des données a été effectuée par une fréquence d'échantillonnage de 10Khz ou de 12.8 Khz et un temps d'acquisition de 10 s. Ceci nous amène à obtenir une très bonne résolution fréquentielle de $\Delta f = \pm 0.1\text{Hz}$.

La figure (II-2) illustre une photo de système expérimental connecté avec la carte Dspace qui se traduit par Matlab/Simulink sous une fréquence d'échantillonnage $f_e = 10000\text{Hz}$.



Figure III.2. Image du banc d'essai dédié au diagnostic (Dspace1104).

III.3 Execution experimentaux de rupture de barres

Prenons la MAS à l'état sain afin de garder un ensemble d'informations de référence. Alors, tous les symptômes ou variations qui seront identifiées après, dépendent de la base des données de l'état normal de la machine.

Nous avons réalisé deux tests, le premier pour une seule barre cassée et le second pour deux barres cassées. La figure (II-4) représente la photographie des rotors de la machine asynchrone utilisée pratiquement pour les différents états.



Figure III.4. Photographie des rotors de la MAS de 3 kW pour un état sain (à gauche), une barre cassée (au centre), deux barres cassées (à droite).

Le courant électrique d'une phase statorique du MAS est représenté dans la figure (II-5) sous un défaut de 01 BC pour les deux conditions, à vide et en charge. La figure (II-7) montre le spectre du courant statorique pour un fonctionnement à vide des deux machines : l'une saine et l'autre défectueuse avec une barre cassée (01 BC).

Il est important de noter que les fréquences qui correspondent aux ordres : 5, 7, 11, 17, 19, 23, 25, ... $(6k \pm 1)$; ont les fréquences $(6k \pm 1)f_s$. Ces harmoniques sont connus sous le nom des harmoniques de la force magnétomotrice (FMM). On explique ses apparitions par l'existence de la rupture de barres rotorique avec un glissement s . La formule ci-après montre bien les valeurs des autres fréquences appelées : fréquences de bande latérale (FBL).

Généralement, les harmoniques du courant statorique de fréquence $(6k \pm 1)f_s$ sont modulés en amplitude à la fréquence $2(6k \pm 1)s f_s$ par l'expression suivante [BES17]

$$f_{cb} = [(6k \pm 1) \pm 2ks] f_s, \quad k = 1, 2, 3, \dots \quad (\text{III. 1})$$

Cette formule a été vérifiée dans notre étude par des bandes latérales présentées dans la figure (II-7). On va voir un autre indicateur du défaut de la rupture des barres qui est représenté

par des bandes latérales autour des harmoniques d'encoches rotoriques (*RSHs*). Ces fréquences sont attachées avec les *RSHs* et espacées de $2sf_s$; on conclut, donc, à la formule suivante :

$$f_{cb} = RSH \pm 2ksf_s \quad (\text{III. 2})$$

Ou bien,

$$f_{cb} = \left(\frac{kn_b(1-s)}{p} \pm \nu \pm 2ks \right) \cdot f_s = kn_b \cdot f_r \pm \nu f_s \pm 2ks \cdot f_s \quad (\text{III. 3})$$

On remarque que les composants harmoniques du courant statorique ne sont pas influencés par le changement de l'état de la MAS à vide pour une barre cassée. Dans ce cas, les fréquences supplémentaires causées par la rupture de barre sont encore presque invisibles ; ceci est dû à la valeur du glissement pour un fonctionnement à vide proche de zéro.

On peut voir les composantes de fréquence à $f_s - f_r$, $f_s + f_r$, $f_s + 2f_r$, etc. qui sont déjà présentes dans le spectre de la machine saine due à l'excentricité mixte. Ces séries des fréquences caractéristiques sont décrites par la formule (I.9).

En outre, des fréquences dues à la saturation sont apparues au spectre des résultats expérimentaux. Ces fréquences ont des raies importantes et remarquables.

$$f_{sat} = 3kf_s \quad k \text{ est impair} \quad (\text{III. 4})$$

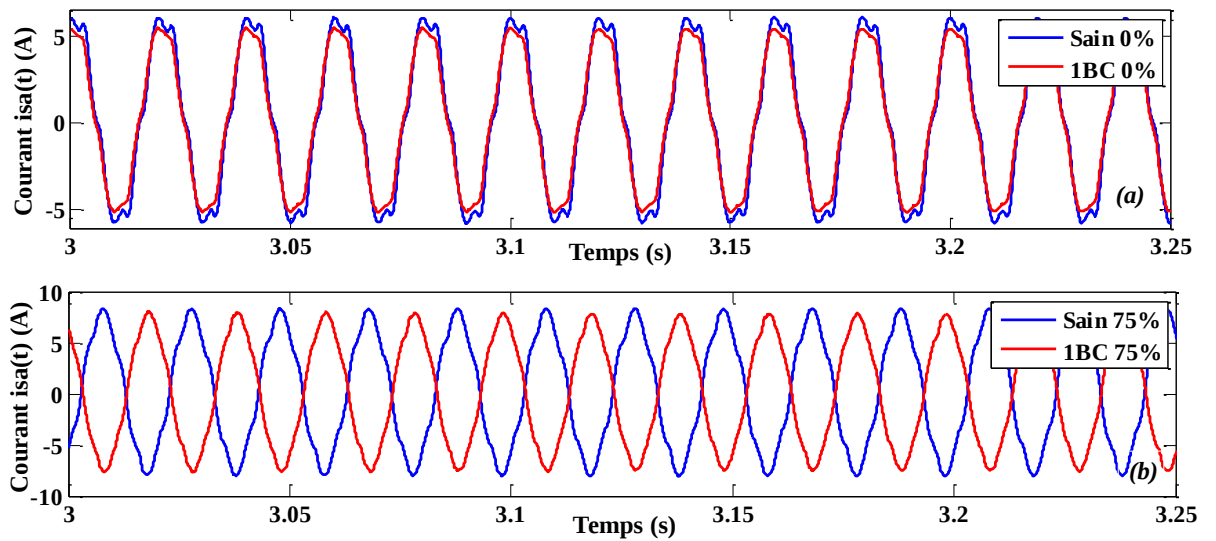


Figure III.5. Le courant statorique en fonction du temps (1BC) ; (a) : 0% de la charge, (b) : 75% de la charge($s=3.6\%$).

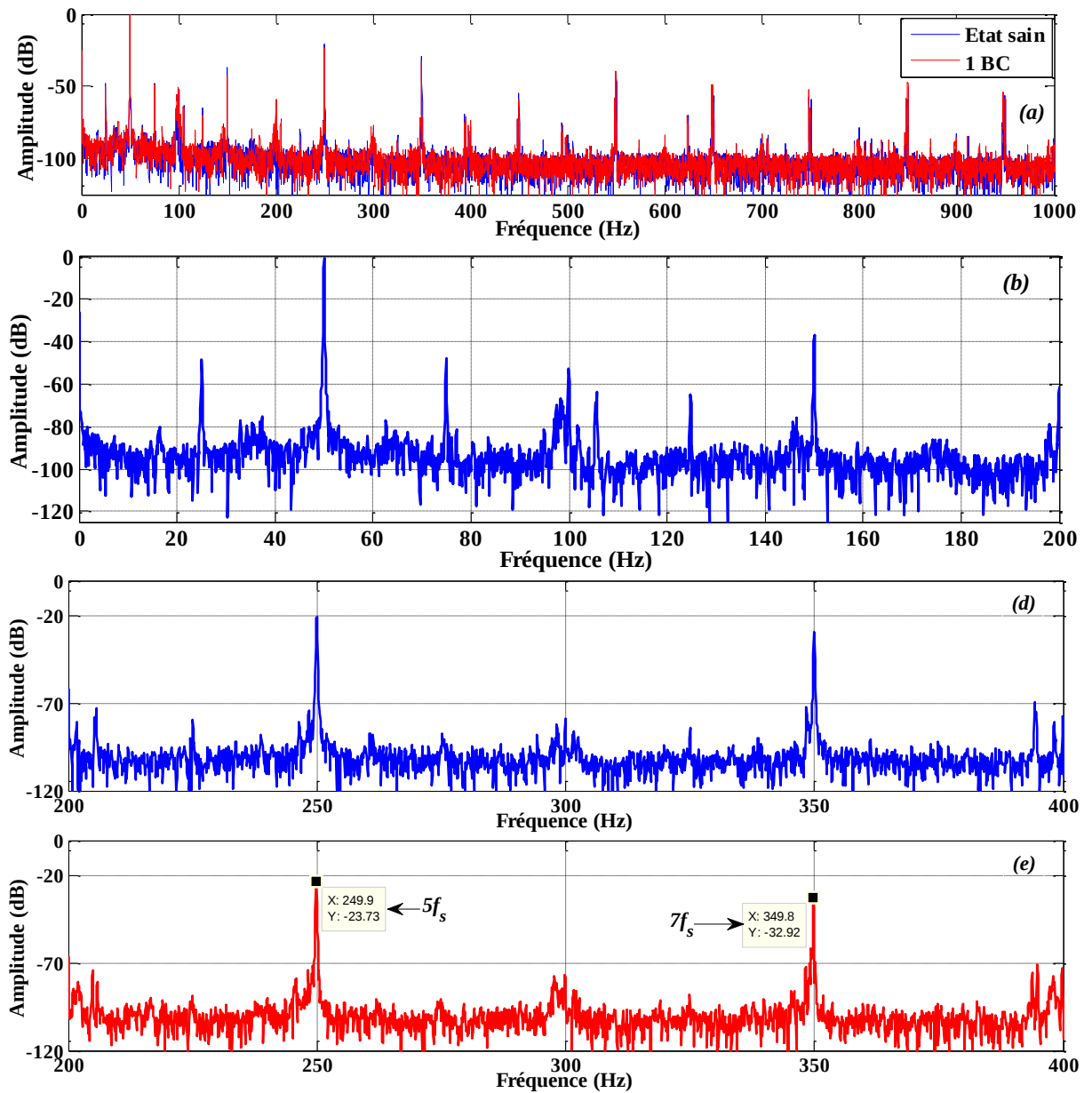


Figure III.7. Spectre du courant statorique (1BC, à vide) ; (a): Bande : 0-1000Hz, (b) et (c) : Basses fréquences, (d) et (e) : Alentours des *PSHs*.

La variation de la charge affecte une variation du glissement. On applique maintenant un couple résistant qui assure une charge de 75% ($s=3.6\%$). La représentation temporelle du courant statorique a été montrée dans la figure (II-5-b). Nous vérifions que le défaut de cassure de barres induit des fréquences de bandes latérales (FBL) autour des fréquences suivantes : la fondamentale f_s , les harmoniques 5, 7 et les *RSHs*. La figure (II-8) représente les FBL dans laquelle les fréquences se déplacent avec l'ordre d'harmonique.

Sous des conditions anormales (présence d'un défaut de la rupture de barre), des harmoniques dans le courant sont générées, accompagnées par des déformations dans celui-ci.

Une série de nouvelles composantes fréquentielles de valeurs $(1 \pm 2ks)f_s$ et autres citées précédemment, caractérise ce type de défaut. Ces nouveaux harmoniques apparaissent dans le spectre du courants statorique. Les valeurs de raies qui caractérisent le défaut de cassure des barres autour de la fréquence fondamentale, 5, 7, et des $RSHs$ sont résumées dans le tableau (II.1). Les vérifications des trois types des FBL sont liées aux formules (I.5), (II.1), (II.3), (II.4) et aux formules indiquées dans le tableau (I.1).

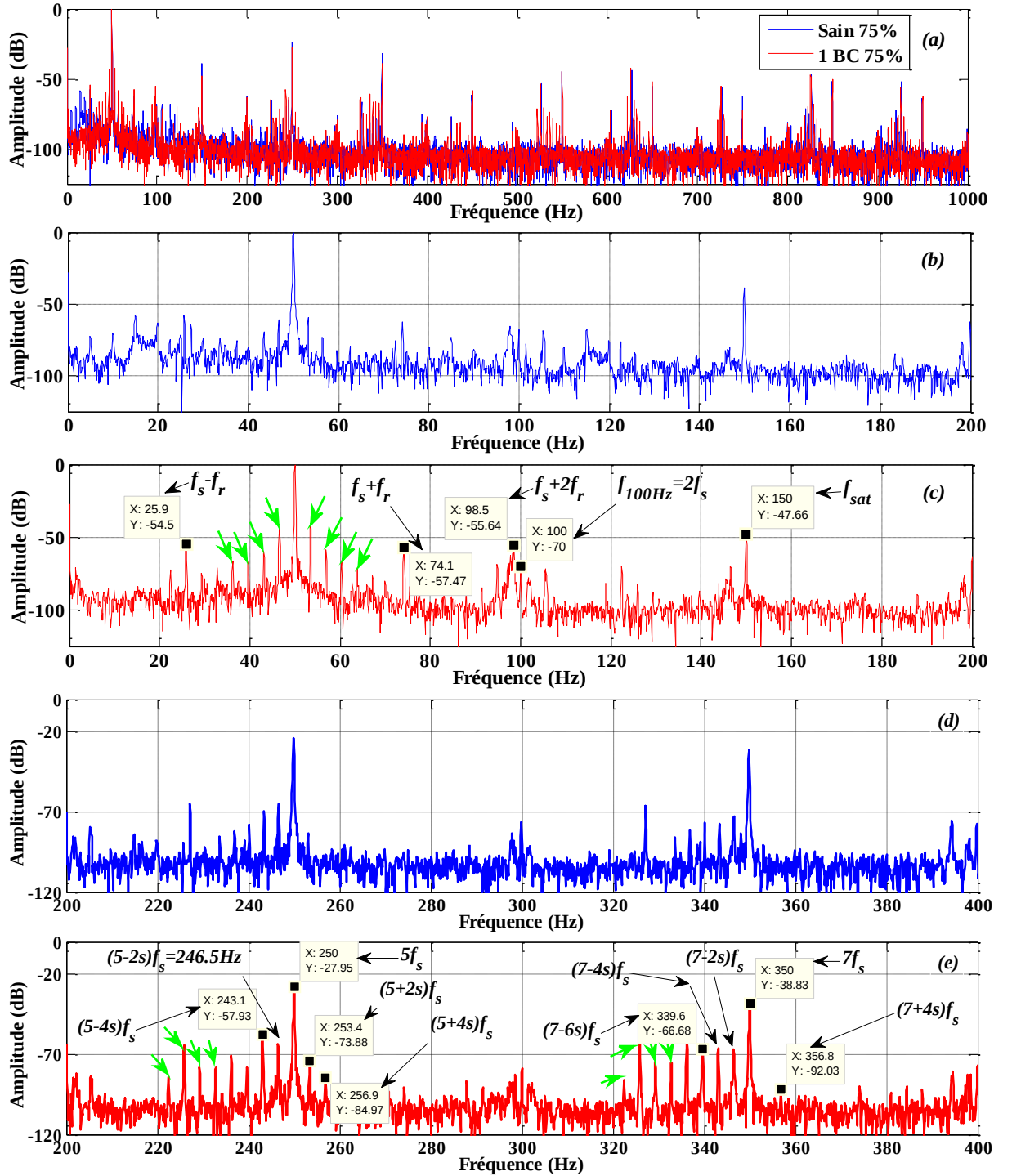


Figure III.8. Spectre du courant statorique ($s=3.6\%$, 1BC) ; (a) : 0-1000Hz, (b) et (c) : 0-200Hz, (d) et (e): 200-400Hz.

Un zoom autour de quelques bandes pour clarifier l'influence du défaut de la rupture de barres est présenté dans la figure (II-9).

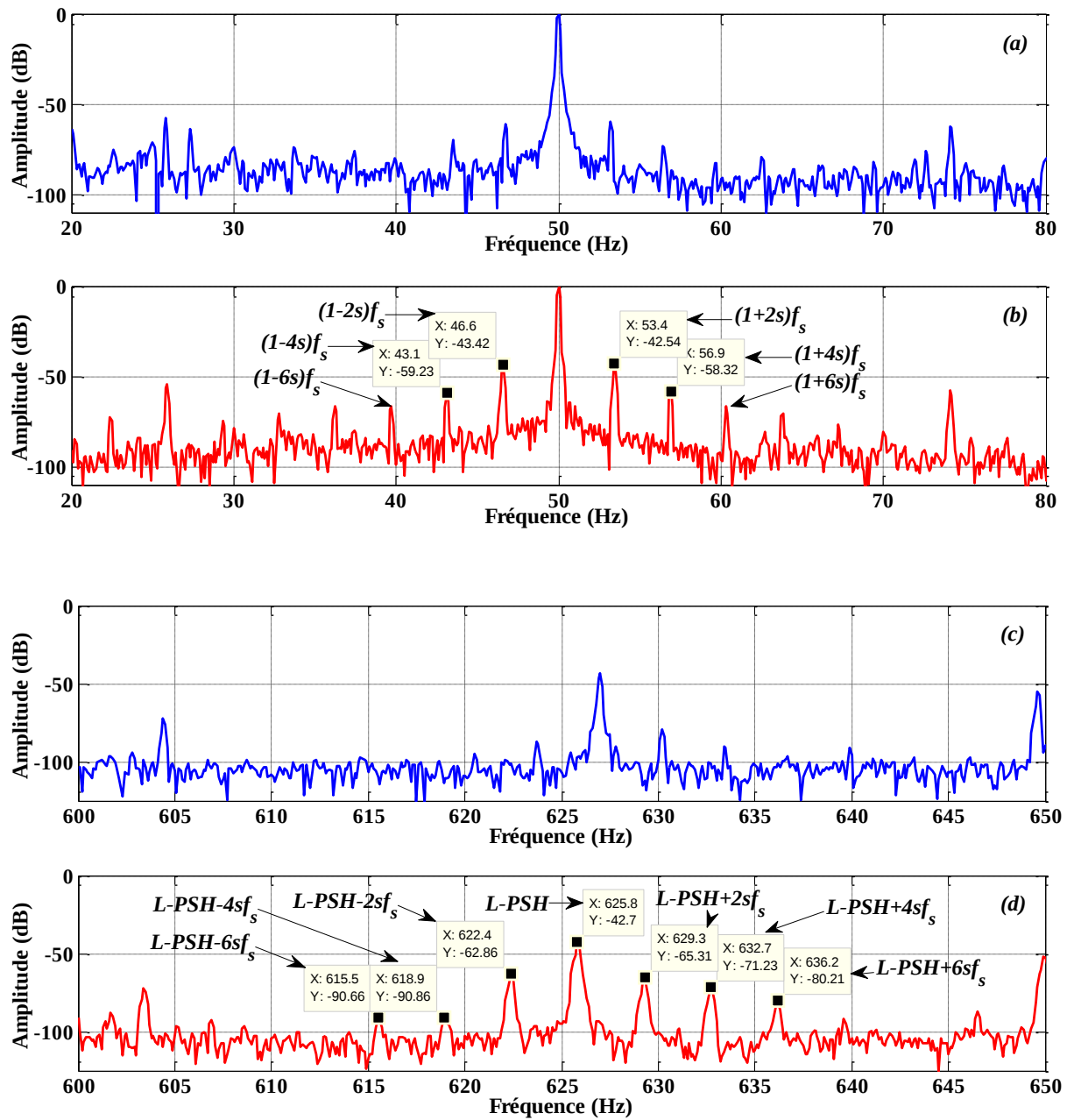


Figure III.9. Spectre du courant statorique (s=3.6%, 1BC) ; (a) et (b): 20-800Hz, (c) et (d): 600-650Hz

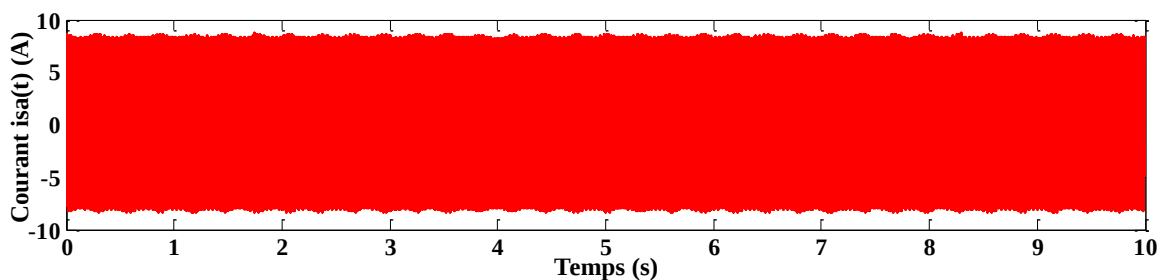
Tableau II.1. Récapitulation des raies dans le spectre du courant statorique (1BC).

Formules des fréquences caractéristiques	Valeurs théoriques (Hz)	Valeurs expérimentales (Hz)	Amplitude «état sain » (dB)	Amplitude pour 1BC (dB)
$(1-2s)f_s$	46.4 Hz	46.6 Hz	-61.7	-43.42
$(1+2s)f_s$	53.6 Hz	53.4 Hz	-59.67	-42.54
$5f_s$	250 Hz	250 Hz	-23.91	-27.95
$(5-2s)f_s$	246.4 Hz	246.5 Hz	-65.15	-63.36
$(5+2s)f_s$	253.6 Hz	253.4 Hz	-83.2	-73.88

L'évolution de l'amplitude des harmoniques est un indicateur qui vérifie plusieurs points intéressants. L'un est la sévérité du défaut ; pour cette raison, on présente une troisième machine défectueuse avec deux barres cassées. L'évolution de l'amplitude du courant statorique en fonction du temps est indiquée sur la figure (II-10). Il est clair que l'influence du degré de sévérité du défaut, se traduit par une déformation du courant. Généralement, et d'après la littérature, la cassure de barres rotorique impose une allure du courant statorique qui est similaire au phénomène du battement. Une superposition du FFT de trois machines : saine, avec 1BC et avec 2BC est présentée dans la figure (II-11).

En outre, lorsque le rotor est défectueux, les fréquences du défaut sont clairement présentées dans le spectre. Les composantes de $f_s \pm f_r$ données par l'équation (I.9) apparaissent dans le spectre du courant pour l'état sain et l'état défectueux ; cela explique que l'excentricité mixte.

La figure (II-11) représente les plages fréquentielles autour des harmoniques fondamentaux, *PSHs* ainsi que les 5^{ème} et 7^{ème} harmonique. Nous trouvons de façon évidente, les raies engendrées par une oscillation de vitesse provoquée par la rupture d'une barre du rotor. Ces résultats ont conduit à une émergence claire de raies significatives qui nous permettent de décider judicieusement sur le type du défaut.

Figure III.10. Courant statorique en fonction du temps ($s=3.6\%$, 2BC).

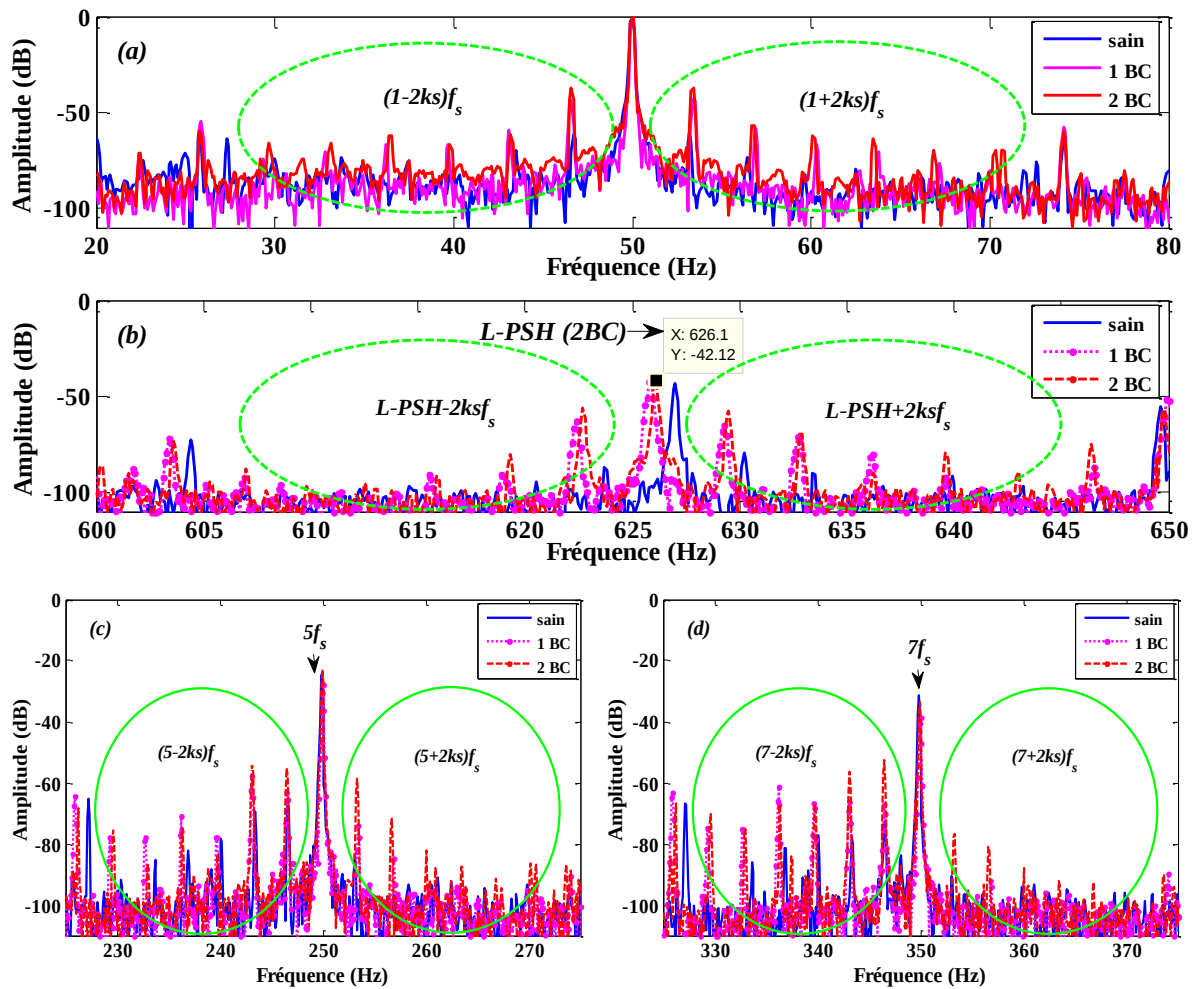


Figure III.11. Spectre du courant statorique (MAS sain, 1BC et 2BC) ; (a) : Autour du fondamental, (b) : Autour de $L-PSH$, (c) : Autour de 5, (d) : Autour de 7.

Un autre facteur important qui entre en jeu, est le pourcentage de la charge appliquée à la sortie du MAS. Plusieurs représentations fréquentielles du courant statorique ont été effectuées afin de calculer l'amplitude. Le glissement dans ce cas sera changé systématiquement ; et les positions des harmoniques seront déplacées.

La sévérité de la cassure de barres peut provoquer aussi des déplacements des raies harmoniques, même avec des valeurs faibles. Il est important d'indiquer la valeur du glissement qui peut être calculé par plusieurs méthodes. Parmi elles, les fréquences caractéristiques de l'excentricité mixte autour de la fréquence fondamentale sont $f_s - f_r$ et $f_s + f_r$. Ces dernières, donnent les valeurs du glissement $s=0.032$ et $s=0.036$ respectivement. On remarque aux alentours des $PSHs$, l'influence de nombre des barres cassées sur ses valeurs. Les valeurs logiques des glissements sont dues à la variation de la vitesse en régime permanent qui impose quelques

marges de différences entre les résultats théoriques et pratiques. La figure ci-dessous montre les FBL autour de l'harmonique fondamental pour deux barres cassées.

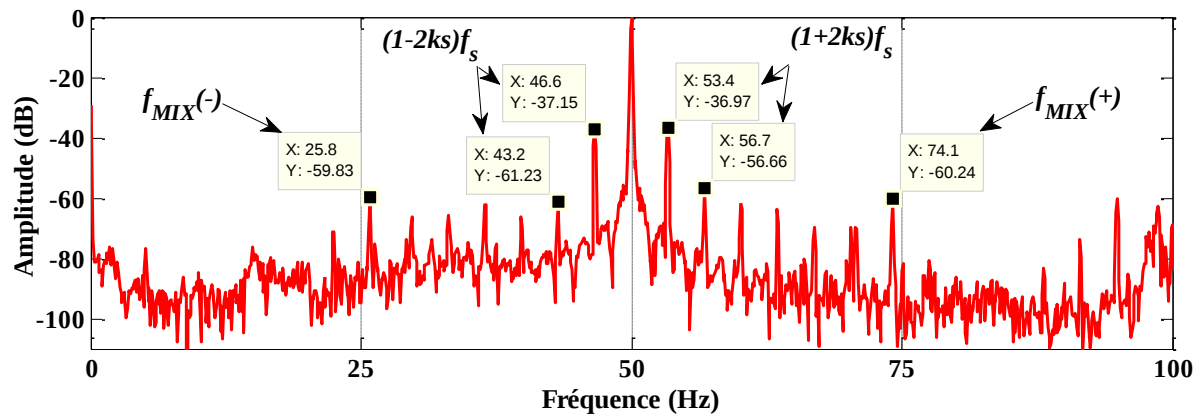


Figure III.12. Spectre du courant statorique (2BC) de 0 à 100 Hz.

Le tableau (II.2) décrit et généralise les harmoniques du défaut de rotor induites dans les bobinages statoriques avec deux barres cassées (2BC). Nous rappelons que cette étude nous permet de vérifier l'existence des harmoniques d'une part, et d'autre part de suivre les positions de celles-ci.

Un autre tableau récapitulatif, est présenté ci-dessous qui montre un bilan comparatif des amplitudes pour 1BC et 2BC.

Tableau III.2 Récapitulation des raies induites dans les enroulements statoriques (2BC, $s=3.2\%$).

Formules des fréquences caractéristiques	Valeurs théoriques (Hz)	Valeurs expérimentales (Hz)	Amplitude «état sain » (dB)	Amplitude pour 2BC (dB)
$(1-2s)f_s$	46.8 Hz	46.6 Hz	-61.7	-37.15
$(1+2s)f_s$	53.2 Hz	53.4 Hz	-59.67	-36.97
$5f_s$	250 Hz	249.9 Hz	-23.91	-22.72
$(5-2s)f_s$	246.8 Hz	246.5 Hz	-65.15	-55.03
$(5+2s)f_s$	253.2 Hz	253.4 Hz	-83.2	-58.64

**Tableau III.3 Récapitulation des raies induites dans les enroulements statoriques
(1BC+2BC).**

Fréquences caractéristiques	Amplitude pour 1BC (dB)	Amplitude pour 2BC (dB)
$(1-2s)f_s$	-43.42	-37.15
$(1+2s)f_s$	-42.54	-36.97
$5f_s$	-27.95	-22.72
$(5-2s)f_s$	-63.36	-55.03
$(5+2s)f_s$	-73.88	-58.64

Après avoir décrit les effets qui peuvent survenir suite à une rupture de barres ; notre étude montre la bonne correspondance et l'exactitude en comparant avec la littérature. Toutes les formules, le déplacement des harmoniques et le degré de sévérité du défaut de la rupture de barres sont vérifiés.

En présence du défaut en régime permanent, le système inverse de courant au rotor produit la composante oscillatoire de pulsation $2s\omega_s$ [BES17]

On a constaté, l'apparition d'harmoniques de fréquences lié à $2ksf_s$ dans le spectre du courant statorique. On a remarqué également que le spectre du courant donne des informations plus claires et plus visibles par une série des FBL aux alentours de la fondamentale, les $(6k\pm1)f_s$ et les *RSHs*.

On peut signaler aussi qu'il est possible d'observer les oscillations dans la vitesse ou dans le couple de pulsation $2s\omega_s$ d'origine purement mécanique [BES17]

Une analyse spectrale par la transformée de Fourier rapide a été appliquée sur le signal du courant statorique afin de déterminer le contenu fréquentielle du courant et par conséquent de trouver les harmoniques caractéristiques des cassures de barres qui conduisent à un diagnostic efficace.

III.4. conclusion

Dans ce travail, 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 par la simulation.

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 $(1 - 2g)f$.

L'analyse de l'amplitude des harmoniques d'espace dans le spectre du courant statorique a donné des informations supplémentaires non négligeables pour le diagnostic des défauts rotoriques.

Conclusion générale

Conclusion générale

La machine asynchrone occupe aujourd'hui une place importante dans le monde de l'industrie grâce à son intérêt et la simplicité de sa structure du fait de ses nombreuses utilisations dans différentes applications, les machines asynchrones nécessitent une détection et rapide des défauts.

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.

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, et parmi ces méthodes nous avons mentionné la méthode d'analyse du signal.

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 MCSAa donné des bons résultats pour la détection du défaut de la cassure des barres rotorique de la MAS.

Bibliographie

Bibliographie

- [BAB14] Babaa Fatima, Contribution à la modélisation et à la commande de la machine asynchrone : "Application au diagnostic des défauts statoriques", Thèse de Doctorat, Université Constantine 1, 2014.
- [BAB18] Babeche Yacine, Bouras Samir, "Diagnostic des machines électriques par la méthode des éléments finis", Diplôme de Master, Université Mohamed Boudiaf – M'sila, 2018.
- [BER17] Berkous Hafid, "Détection Des Défauts D'engrenage Par Analyse Vibratoire", Diplôme de Master, Université Badji Mokhtar Annaba, 2017.
- [BES07] Bessous Noureddine, "Contribution au diagnostic des machines asynchrones", Magister en électrotechnique, option: machines électriques, Université de Mentouri Constantine, Algérie, 2007.
- [BES17] Bessous Noureddine, "Contribution au Diagnostic des Défauts dans les Machines Asynchrones : Comparaison entre l'Analyse Vibratoire et l'Analyse du Courant d'Alimentation", Thèse de Doctorat, Université Mohamed Khider – Biskra, 2017.
- [BOU18] Boumaila Ahmed Dhia Eddine, "Diagnostic des défauts d'un ventilateur M14A par analyse vibratoire au niveau de l'unité SIDER TSS", Diplôme de Master, Université Badji Mokhtar Annaba, 2018.
- [CHE14] Chermat Badreddine, "Diagnostic des défauts de MAS par les méthodes paramétriques de traitement du signal", Diplôme de Master, Université Mohamed Khider – Biskra, 2012.
- [DJE13] Djebili Omar, "Contribution à la maintenance prédictive par analyse vibratoire des composants mécaniques tournants. Application aux butées à billes soumises à.",
- [GHE06] Ghemari Zine, "Modélisation Et Simulation D'un Capteur De Vibration (Accéléromètre)", Diplôme de Magister, Université Badji Mokhtar Annaba, 2006.
- [HAL15] Halem Noura, "Modélisation des Machines Asynchrones Triphasées à Cage en Vue du Diagnostic par la Méthode des Eléments Finis", Thèse de Doctorat, Université Mohamed Khider – Biskra, 2015.

Bibliographie

- [HAM09] Hamdidi Naima, Boucherk Kahina, "Traitement des signaux vibratoires : Application au diagnostic des défaillances", Diplôme d'ingénieur, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2009.
- [HAM18]HAMMI Sami,BENARABI Adel,"Contribution au diagnostic des défauts rotoriques dans les machines asynchrones à cage d'écureuil par la méthode de la (MCSA)",Diplôme de Master,Université EchahidHamma Lakhdar d'El-Oued 2018
- [HAR09] Harir Miloud, "Etude des Défauts dans La Machine Asynchrone à Cage d'Ecureuil par l'Emploi de la Fonction d'Enroulement Modifiée", Diplôme d'ingénieur, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf, 2009.
- [IBR09] Ali Ibrahim, "Contribution au diagnostic de machines électromécaniques : Exploitation des signaux électriques et de la vitesse instantanée", Thèse de Doctorat, laboratoire d'Analyse des Signaux et des Processus Industriels, Université Jean Monnet, Saint Etienne, 2009.
- [KERF16] Kerfali Samir, "Contribution à la Surveillance et au Diagnostic des Défauts De la Machine Asynchrone", Thèse de Doctorat, Université Badji Mokhtar Annaba, 2016.
- [KER17] KerroumBadreddine, "Etude et Diagnostic de mauvais branchement d'un moteur à induction", Diplôme de Master, Université Badji Mokhtar Annaba, 2017.