

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

جامعة سعد دحلب البلدية 1
Université SAAD DAHLAB de BLIDA 1

كلية التكنولوجيا
Faculté de Technologie

قسم الإلكترونيك
Département d'Électronique



Mémoire de Master

Filière Électrotechnique
Spécialité Machines électriques

Présenté par

DIAKITE Oumar

Diagnostic de la MAS par l'analyse de la puissance instantanée

Proposé par : Mr. FERDJOUNI Abdellaziz

Année Universitaire 2019-2020

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier Dieu le tout puissant et miséricordieux, qui m'a donné la force, la volonté et la patience d'accomplir ce modeste travail.

En second lieu, je tiens à remercier mon encadreur Mr. FERDJOUNI ABDELLAZIZ pour son dévouement, ses conseils et son soutien moral tout le long de l'élaboration de ce travail.

Ainsi que je remercie pour toute l'aide et le soutien qu'il m'a offert tout au long de mes études.

Mes vifs remerciements vont également aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à ma recherche en acceptant d'examiner mon travail et de l'enrichir par leurs propositions.

Enfin, je tiens également à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Merci

Dédicace

Je dédie ce modeste travail. A mes parents.

A mes frères et sœurs.

Vous vous êtes dépensés pour moi sans compter.

En reconnaissance de tous les sacrifices consentis par tout un chacun pour me permettre d'atteindre cette étape de ma vie.

Avec toute la tendresse.

A toute ma famille.

A mes cousins et cousines.

A mes amis.

Vous avez de près ou de loin contribué à ma formation.

Affectueuse reconnaissance.

Vous avez contribué en fonction de vos moyens à affermir ma formation.

Sincère gratitude.

A tous mes collègues du groupe «électrotechnique» de la faculté des sciences et de technologie; à tous les étudiants Mauritaniens de Blida.

ملخص:

يهدف هذا العمل إلى اكتشاف أخطاء الآلة غير المتزامنة بشكل أكثر تحديدًا خطأ ماس كهربائي بين لفات الساكنة. تحويل فورييه السريع) إمكانية تمثيل طيف القوة اللحظية من أجل (FFT يتيح التحليل الطيفي بواسطة تقنية الحصول على فكرة أعمق عن تأثير هذا الخطأ. النتائج التي تم الحصول عليها عن طريق المحاكاة دقيقة للغاية لأن كل عيب أو الجزء الثابت أو الدوار له تردداته المميزة. يساعد التحليل الطيفي في تحديد موقع هذه الترددات. يُكمل تحليل متجه بارك العمل.

كلمات المفاتيح آلة غير متزامنة، ماس كهربائي بين لفات الساكنة، القدرة اللحظية، التحليل الطيفي

Résumé :

Ce travail a pour but de détecter les défauts de la machine asynchrone plus particulièrement le défaut de court-circuit entre spires statoriques. Une analyse spectrale par la technique FFT (**Fast Fourier Transform**) permet de représenter le spectre de la puissance instantanée afin d'avoir une idée plus profonde de l'impact de ce défaut. Les résultats obtenus par simulation ont une grande précision car chaque défaut, statorique ou rotorique a ses fréquences caractéristiques propres. L'analyse spectrale permet de localiser ces fréquences. Une analyse par le vecteur de Park complète le travail.

Mots clés : Machine asynchrone ; court-circuit entre spires ; puissance instantanée, analyse spectrale.

Abstract :

This work aims to detect the faults of the asynchronous machine more particularly the stator inter-turn short-circuit fault. Spectral analysis by the FFT (Fast Fourier Transform) technique makes it possible to represent the spectrum of the instantaneous power in order to have a deeper idea of the impact of this type of fault. The results obtained, by simulation, are very precise because each fault, stator or rotor has its own characteristic frequencies. Spectral analysis helps locate these frequencies. Park's vector completes this work.

Keywords: Asynchronous machine; Short-circuit fault between stator turns; instantaneous power; spectral analysis

Listes des acronymes et abréviations

$V_a V_b V_c$: Les tensions statoriques simples.

$i_a i_b i_c$: Les courants statoriques simples.

$V_{ab} V_{cb}$: Les tensions statoriques composées.

$P_{ab0} P_{cb0}$: Les puissances instantanées partielles.

P_{abc0} : La puissance instantanée totale.

$i_A i_B i_C$: Les courants statoriques simples avec défaut.

$P_{ab} P_{cb}$: Les puissances instantanées partielles avec défaut.

P_{abc} : La tension instantanée totale avec défaut.

$i_{ds} i_{qs}$: Courants statoriques diphasés dans le repère de Park.

P_s : Matrice de la transformation de Park.

θ : Position angulaire du rotor.

f : Fréquence fondamentale.

f_{osc} : Fréquence de défaut.

ω : Pulsation statorique.

ω_{osc} : Pulsation de défaut.

α : Le facteur de puissance.

I_r : La composante de bande supérieure du courant avec défaut.

I_l : La composante de bande inférieure du courant avec défaut.

φ_r : Le déplacement angulaire de la composante de bande supérieure du courant avec défaut.

φ_l : Le déplacement angulaire de la composante de bande inférieure du courant avec défaut.

C_{em} : Couple électromagnétique.

C_r : Couple de charge.

Ω : Vitesse mécanique de rotation du rotor.

J : Moment d'inertie.

p : Nombre de paires de pôles.

g : Glissement.

Table des matières

Table des matières

1	GENERALITE SUR LA MACHINE ASYNCHRONE	5
1.1	Introduction	6
1.2	Éléments de constitution de la machine asynchrone :	6
1.2.1	Stator	7
1.2.2	Rotor	7
1.2.2.1	Rotor à simple cage.....	7
1.2.2.2	Rotor à double cage	8
1.3	Paliers.....	9
1.3.1	Palier lisses.....	9
1.3.2	Paliers à roulement.....	9
1.4	Défauts de la machine asynchrone.....	10
1.4.1	Introduction.....	10
1.4.2	Principaux défauts	10
1.4.3	Source des défauts.....	11
1.4.4	Défauts de roulement.....	12
1.4.5	Excentricité	14
1.4.6	Défauts rotoriques.....	15
1.4.6.1	Ruptures des barres conductrices	16
1.4.6.2	Rupture des anneaux de court-circuit	16
1.4.7	Défauts de stator	17
1.4.7.1	Ouverture de phase	17
1.4.7.2	Court-circuit entre spires.....	18
1.4.7.3	Court-circuit entre phases	19
1.5	Conclusion.....	20
2	Chapitre 2 : les methodes de diagnostic de la machine asynchrone.....	21

2.1	Introduction	22
2.2	Les méthodes avec modèles	22
2.3	Les méthodes sans modèles	23
2.3.1	Les méthodes de raisonnement	23
2.3.2	Méthodes de traitement des signaux	24
2.3.2.1	Transformée en série de Fourier	24
a.	La transformée de Fourier discrète	24
b.	La transformée de Fourier rapide	25
•	Méthodes de diagnostic des défauts basées sur l'analyse spectrale des signaux.....	25
	Les courants absorbés.	26
	Le flux de dispersion.....	26
	La tension d'alimentation.	26
	La vitesse de rotation mécanique.	26
	Les vibrations.....	26
2.3.2.2	Diagnostic par mesure du courant statorique	26
2.3.2.3	Diagnostic par mesure du flux magnétique axial de fuite.....	26
2.3.2.4	Diagnostic par mesure du couple électromagnétique	26
2.3.2.5	Diagnostic par mesure des vibrations mécaniques	27
2.3.2.6	Diagnostic par mesure de la puissance instantanée	27
2.4	Conclusion.....	28
3	Chapitre 3: LES RESULTATS DE SIMULATION	29
3.1	Introduction	30
3.2	Calcul théorique.....	30
3.3	Simulation de la machine.....	33
3.4	Approche du vecteur de Park	39
3.4.1	Interprétation des résultats de simulation	45
3.5	Conclusion.....	45
4	Conclusion générale.....	46

5 Bibliographie48

Liste des figures

Figure 1.1: Elément de construction.....	6
Figure 1.2: stator.....	7
Figure 1.3: Rotor à simple cage.....	8
Figure 1.4: Rotor à double cage.....	9
Figure 1.5: Répartition des défauts.....	11
Figure 1.6: roulement à bille.....	14
Figure 1.7: a/ excentricité statique, b/ excentricité dynamique, c/ excentricité mixte	15
Figure 1.8: Rupture d'une barre de court-circuit.....	16
Figure 1.9: différents défauts du stator(5).	17
Figure 1.10: (a) Court-circuit entre spires de la même phase (b) Enroulement court-circuité	19
Figure 3.1: Les puissances instantanées partielles : a) Tous régimes b) Régime permanent (sans défaut).	34
Figure 3.2: Les puissances instantanées partielles : a) sans défaut, application du couple de charge b) avec défaut sur la phase as).....	34
Figure 3.3: Les puissances instantanées partielles : a) avec défaut sur les phases as et bs b) avec défaut sur les 3 phases).....	35
Figure 3.4: Les puissances instantanées partielles: a) machine saine b) machine avec défaut sur la phase as.....	35
Figure 3.5: Les puissances instantanées partielles: a) défaut sur as et bs b) défaut sur as, bs et cs	36
Figure 3.6: La puissance instantanée totale: a) machine saine b) défaut sur as	36
Figure 3.7: La puissance instantanée totale: a) défaut sur as, bs et cs b) défaut sur as et bs	36
Figure 3.8: Les puissances instantanées totales avec 30% de défaut et un couple $C_r=1$ Nm	37
Figure 3.9: Les puissances instantanées totales avec 30% de défaut et un couple de charge $C_r=2$ Nm	37
Figure 3.10: Les puissances instantanées totales: a) avec 30% de défaut et un couple de charge $C_r=3.8$ Nm b) avec un couple de charge $C_r=4.5$ Nm	37
Figure 3.11: Les puissances instantanées totales avec 60% de défaut b) couple de charge $C_r=1$ Nm b) avec un couple $C_r=2$ Nm	38
Figure 3.12: Les puissances instantanées totales avec 60% de défaut et un couple de charge $C_r=3.8$ Nm b) avec un couple de charge $C_r=2$ Nm.	38
Figure 3.13 : Courant statorique dans le plan de phase $ids = f(iqs)$ pour une machine saine (sans défaut) à vide.....	40

Figure 3.14 : Courant statorique dans le plan de phase $ids = f(iqs)$ pour une machine avec défaut de spires (6% de spires retranchés dans la phase **as**) et avec un couple de charge $Cr=1$ Nm..... 40

Figure 3.15 : Courant statorique dans le plan de phase $ids = f(iqs)$ pour une machine avec défaut de spires (15% de spires retranchés dans les phases **as et bs**) et avec un couple de charge $Cr=1$ Nm. . 41

Figure 3.16: Courant statorique dans le plan de phase $ids = f(iqs)$ pour une machine avec défaut de spires (28% de spires retranchés dans les phases **as, bs et cs**) et avec un couple de charge $Cr=1$ Nm. 41

Figure 3.17: Courant statorique dans le plan de phase $ids = f(iqs)$ pour une machine avec défaut de spires (6% de spires retranchés dans la phase **as**) et avec un couple de charge $Cr=2$ Nm. 42

Figure 3.18 : Courant statorique dans le plan de phase $ids = f(iqs)$ pour une machine avec défaut de spires (15% de spires retranchés dans les phases **as et bs**) et avec un couple de charge $Cr=2$ Nm.42

Figure 3.19 : Courant statorique dans le plan de phase $ids = f(iqs)$ pour une machine avec défaut de spires (28% de spires retranchés dans les phases **as, bs et cs**) et avec un couple de charge $Cr=2$ Nm.43

Figure 3.20 : Courant statorique dans le plan de phase $ids = f(iqs)$ pour une machine avec défaut de spires (6% de spires retranchés dans la phase **as**) et avec un couple de charge $Cr=3.8$ Nm. 43

Figure 3.21 : Courant statorique dans le plan de phase $ids = f(iqs)$ pour une machine avec défaut de spires (15% de spires retranchés dans les phases **as et bs**) et avec un couple de charge $Cr=3.8$ Nm.43

3.22: Courant statorique dans le plan de phase $ids = f(iqs)$ pour une machine avec défaut de spires (28% de spires retranchés dans les phases **as, bs et cs**) et avec un couple de charge $Cr=3.8$ Nm. 44

Liste des tableaux

Tableau 1.1: Défauts des machines électriques selon leurs origines 12

Introduction générale

Les machines électriques tournantes occupent une place prépondérante dans tous les secteurs industriels. Les machines asynchrones (MAS) triphasées à cage d'écureuil sont les plus fréquemment utilisées grâce à leur robustesse, leur simplicité de construction et leur bas coût. Néanmoins, celles-ci subissent au cours de leur durée de vie un certain nombre de sollicitations externes ou internes qui peuvent les rendre défaillantes. Les contraintes industrielles en maintenance, disponibilité et sécurité des équipements sont par ailleurs très fortes. C'est pourquoi le monde industriel est fortement intéressé par un ensemble de techniques permettant de déterminer l'état de santé de ces machines.

Plus généralement, la surveillance et le diagnostic en génie électrique remettent en cause les concepts et les outils traditionnels utilisés en conception et commande des machines électriques tournantes.

L'objet de notre travail est d'analyser les effets du court-circuit de spires statoriques sur les grandeurs électrique de la machine asynchrone à cage d'écureuil.

Dans la première partie du mémoire, nous allons présenter des généralités sur les machines asynchrones triphasées à cage d'écureuil, un aperçu sur les différents défauts pouvant survenir dans ces machines et leurs causes.

Dans la deuxième partie, nous allons citer les différentes techniques de diagnostic de la machine asynchrone.

Dans le troisième chapitre, nous allons faire la simulation de la MAS dans ses états sain et en présence de court-circuit de spires statoriques. Ensuite nous allons analyser la puissance instantanée afin de trouver une information sur l'effet du court-circuit de spires sur le comportement de la machine.

Nous allons finir par l'analyse du vecteur de Park, qui aura pour objet de confirmer notre approche théorique.

CHAPITRE 1 :

1 GENERALITE SUR LA MACHINE ASYNCHRONE

Chapitre 1 Généralité sur la machine asynchrone

1.1 Introduction

La machine asynchrone, souvent appelée moteur à induction comprend un stator et un rotor, constitués d'empilement de tôles d'acier au silicium et comportant des encoches dans lesquelles sont placées les enroulements. Le stator est fixe ; on y trouve les enroulements reliés à la source, l'objectif étant d'obtenir une répartition des forces magnétomotrices et du flux la plus sinusoïdale possible dans l'entrefer, Le rotor est monté sur un axe de rotation (1).

1.2 Eléments de constitution de la machine asynchrone :

Il comporte un inducteur fixe nommé stator et un induit nommé rotor. C'est un transformateur à champs tournant dont le primaire est le stator et dont le secondaire mis en court-circuit et libre de tourner est le rotor.

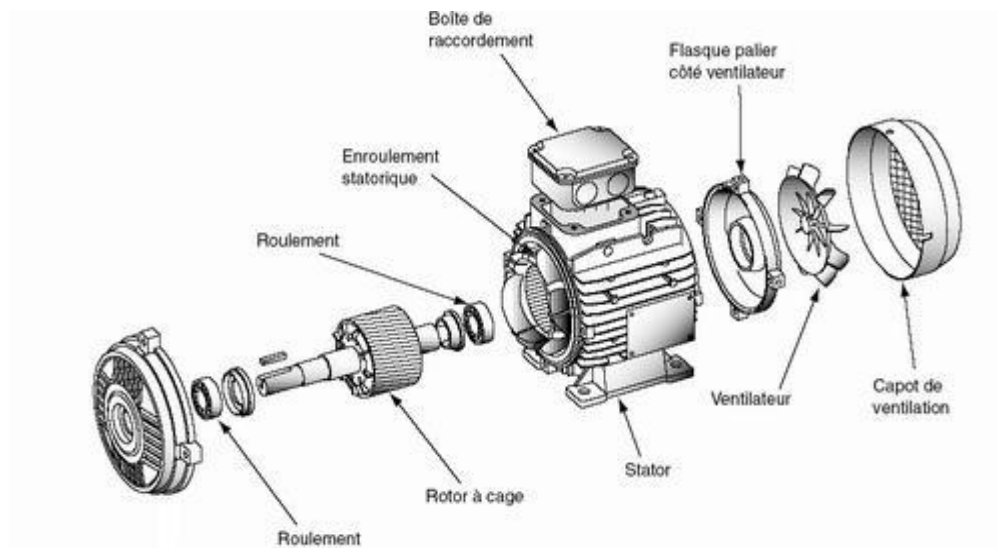


Figure 1.1: Elément de construction

1.2.1 Stator

Il est constitué par une couronne des tôles empilées. Ce sont des tôles minces dont l'épaisseur varie entre 0.35 et 0.50 millimètres. Cette couronne est serrée dans une carcasse. Débouchant à l'intérieur de l'anneau ainsi formé, des encoches contiennent un enroulement triphasé. Cet enroulement peut être bipolaire, tétra-polaire, à hexa-polaire, etc.

Les entrées et les sorties des trois phases aboutissent à une plaque à borne (2).



Figure 1.2: stator

1.2.2 Rotor

1.2.2.1 Rotor à simple cage

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.

Ce type de moteur, beaucoup plus aisé à construire que le moteur à rotor bobiné, est d'un prix de revient inférieur et a une robustesse intrinsèquement plus grande. Il n'est donc pas étonnant qu'il constitue, et de loin, la plus grande partie du parc des moteurs asynchrones en service.

Son inconvénient majeur est qu'il ne permet pas d'insérer un rhéostat et qu'il a, au démarrage, de mauvaises performances (courant élevé et couple faible). C'est pour remédier à cette situation qu'ont été développés deux autres types de moteur (rotor à double cage et rotor à encoches profondes) (3).

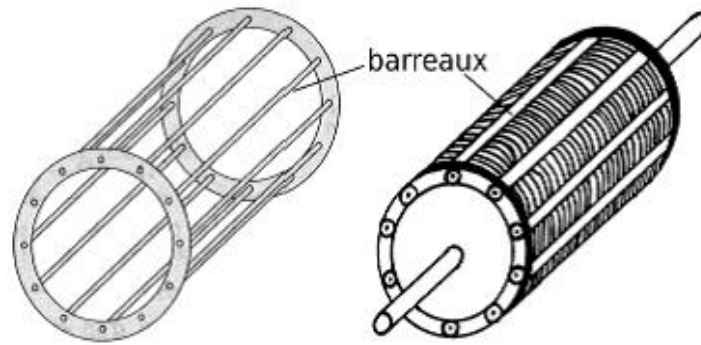


Figure 1.3: Rotor à simple cage

1.2.2.2 Rotor à double cage

Le rotor comporte deux cages coaxiales :

- L'une (fréquemment réalisée en laiton ou en bronze), externe, à résistance relativement élevée, est placée près de l'entrefer
- L'autre (en cuivre), interne, de plus faible résistance, est noyée dans le fer, ayant ainsi une inductance des fuites supérieures à la première.

Au démarrage, le courant rotorique, de fréquence égale à la fréquence f du réseau d'alimentation, se répartit de façon inversement proportionnelle aux réactances des cages, qui sont alors grandes devant les résistances. Dans ces conditions, c'est la cage externe qui est parcourue par le maximum de courant ; sa résistance relativement forte réduit l'appel de courant et accroît le couple.

Au contraire, lorsque le moteur atteint son régime nominal de fonctionnement, normalement caractérisé par un faible glissement g et une fréquence basse fb , ce sont les résistances qui contrôlent la répartition du courant, ce qui favorise le passage du courant dans la cage interne de faible résistance.

On peut, ainsi, obtenir des couples de démarrage de l'ordre de deux à trois fois supérieurs à ceux du rotor à simple cage (3).

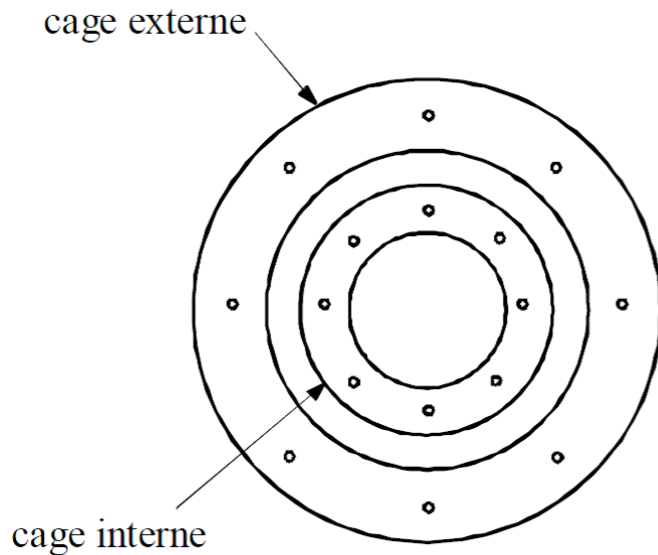


Figure 1.4: Rotor à double cage

1.3 Paliers

Les paliers ont pour rôle de soutenir le rotor et assurent sa libre rotation. Les déplacements axiaux sont bloqués par un calage longitudinal sur l'un des paliers ; l'autre palier est libre pour assurer les dilatations thermiques de l'arbre. Lorsque les forces axiales exercées sur le rotor sont importantes, le calage longitudinal est assuré par une butée. Les dissymétries des reluctances du circuit magnétique engendrent des courants dans l'arbre qui sont éliminés par isolation électrique de l'un des paliers par une feuille isolante. On distingue deux types de paliers

1.3.1 Palier lisses

Ces paliers comportent deux types principaux, corps de paliers et palier à pied. Le corps de palier (flasque) est généralement fixé sur la carcasse. Le rotor est alors centré dans le stator au moment de la construction de la machine. Le palier à pieds utilisé pour les machines de grandes dimensions et de masse supérieure à 20 tonnes, est désolidarisé de la carcasse.

1.3.2 Paliers à roulement

Ils sont utilisés dans les petites et les moyennes machines, de masse inférieure à 20 tonnes. Leur encombrement est plus faible que celui des paliers lisses et les longueurs totales des machines sont donc réduites (4).

1.4 Défauts de la machine asynchrone

1.4.1 Introduction

Pour avoir une idée précise de l'effet des défauts sur le comportement d'un moteur sans pour autant détruire des machines, nous pouvons les étudier avec un modèle qui représente la machine réelle. Le modèle triphasé-triphasé et celui de Park représentent le comportement électrique de la machine asynchrone. Ils négligent les phénomènes magnétiques ou électriques tels les courants de Foucault, la saturation magnétique, l'effet d'une géométrie complexe (encoches),...

La considération du comportement électromagnétique local de la machine permet d'avoir une modélisation plus précise. La résolution numérique des équations de Maxwell régissant le comportement des champs électromagnétiques et la prise en considération des équations électriques représentant le circuit d'alimentation du moteur, permettent de réduire les simplifications faites dans les modèles classiques et ainsi d'avoir un modèle plus proche de la machine électrique réelle.

1.4.2 Principaux défauts

Les principaux défauts pouvant se produire dans une machine à cage peuvent être classés comme suit :

- ✓ Défauts au stator résultant d'une ouverture ou d'un court-circuit sur au moins une phase du stator
- ✓ Connexion anormale des enroulements du stator
- ✓ Cassure de barre ou d'anneau de court-circuit au rotor
- ✓ Excentricité dynamique ou statique.
- ✓ Axe plié (proche de l'excentricité dynamique)
- ✓ Défauts de roulements

Une étude conduite pour IEEE [IEEE-85] a établi une statistique des différents défauts pouvant se produire sur une machine électrique (figure 1.5)

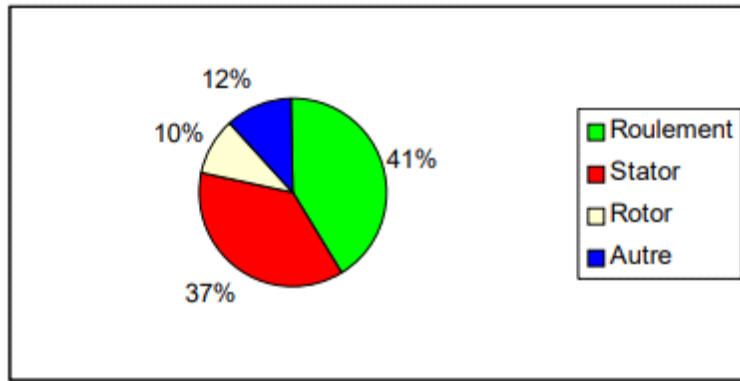


Figure 1.5: Répartition des défauts

A signaler que ces statistiques ne sont pas détaillées par type de branches industrielles.

Par conséquent, elles peuvent avoir des significations différentes selon qu'on parle d'industries d'hydrocarbures, cimentières ou autres.

1.4.3 Source des défauts

Les défauts peuvent être d'origines diverses, électriques, mécaniques ou bien magnétiques. Leurs causes sont multiples et peuvent se classer en trois groupes :

- ✓ Les générateurs de pannes ou initiateurs de défauts : surchauffe du moteur, défaut électrique (court-circuit), surtension 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, etc.
- ✓ Les vices de fabrication et les erreurs humaines : défauts de fabrication, composants défectueux, protections inadaptées, mauvais dimensionnement de la machine, etc (5).

Tableau 1.1: Défaits des machines électriques selon leurs origines (5).

Défaillances des machines électriques	Interne	Mécanique	Contact entre le stator et le rotor
			Défaut de roulement
			Excentricité
			Mouvement des enroulements et des tôles
		Electrique	Défaillance au niveau de l'isolement
			Rupture de barres
	Défaillance au niveau du circuit magnétique		
	Externe	Mécanique	Charge oscillante
			Surcharge de la machine
			Défaut de montage
		Environnementale	Humidité
			Température
			Propreté
Electrique		Fluctuation de la tension	
		Sources de tension déséquilibrées	
		Réseau bruité	

1.4.4 Défaits de roulement

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. La plupart des défauts survenant dans les roulements des moteurs à induction ainsi que les raisons de leur vieillissement. Comme il a été présenté précédemment, 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 :

- 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 (Shaft Currents)

Les conséquences directes de cette défaillance sur les roulements sont :

- Des trous dans les gorges de roulement intérieures et extérieures
- L'ondulation de leur surface de roulement
- L'attaque des billes
- La corrosion due à l'eau
- Défaut de graissage, problème dû à la température
- Décollement, effritement de surface provoqué par une surcharge sur le système, ce type de défaut se traduit par des oscillations du couple de charge, une apparition de pertes supplémentaires et un jeu entre la bague interne et la bague externe du roulement entraînant des vibrations par les déplacements du rotor autour de l'axe longitudinale de la machine. Dans le cas le plus défavorable, la présence d'un roulement défectueux peut amener au blocage de la machine (6).

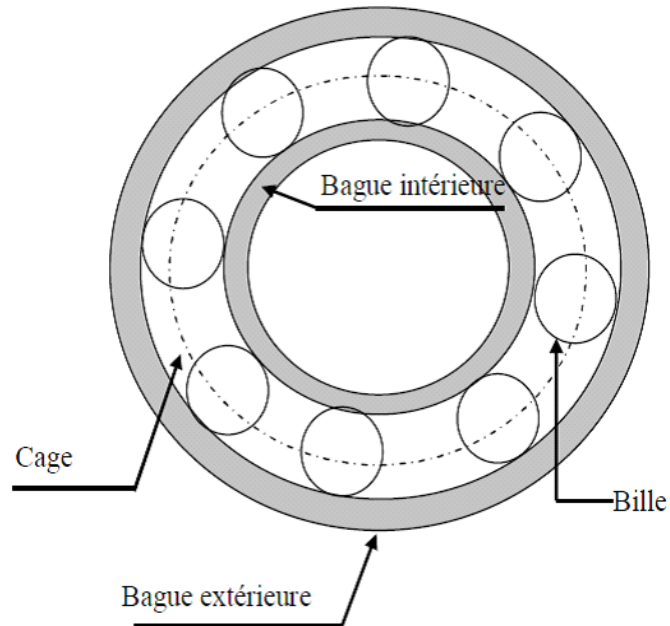


Figure 1.6: roulement à bille

1.4.5 Excentricité

L'excentricité se répartie en deux catégories, Excentricité statique et excentricité dynamique. L'excentricité statique se distingue par le fait que le centre du rotor n'est pas égal à celui du stator. L'excentricité dynamique fait que le centre du rotor tourne autour du centre de stator.

Parfois, la machine électrique peut être soumise à un décentrement du rotor, se traduisant par des oscillations de couple (décalage entre le centre de rotation de l'arbre et le centre du rotor. Ce phénomène est appelé excentricité (statique et dynamique) dont l'origine peut être lie à un positionnement incorrect des paliers lors de l'assemblage. A un défaut de roulement (usure). A un défaut de charge. Ou à un défaut de fabrication (usinage)

Celui-ci provoque la variation de l'entrefer dans le moteur. Une répartition non homogène des courants dans le rotor et le déséquilibre des courants statoriques. Le déséquilibre des efforts sur les barres génère un couple global non constant.

Quand l'excentricité devient du rotor, ce qui conduit à des dommages du stator et du rotor.

Trois cas d'excentricité sont généralement distingués :

- L'excentricité statique, dans laquelle l'axe du rotor reste fixe. Elle peut provenir de problème d'assemblage ou d'une légère ovalisation du stator et ou du rotor.
- L'excentricité dynamique dans laquelle l'axe du rotor tourne autour d'un axe différent de celui du stator. A cause de l'usure des roulements, des espaces se créent entre les billes et les anneaux. Suite à des manipulations d'entretien de la machine, des jeux apparaissent entre les flasques et les anneaux.
- L'excentricité mixte dans laquelle l'axe du rotor tourne autour d'un axe différent de celui du stator. Elle est donc la combinaison des excentricités statique et dynamique. Dans la plupart des machines tournantes, on observe cette dernière forme d'excentricité.

L'excentricité statique résulte soit d'une imperfection dans l'alésage du stator, soit d'un mauvais positionnement du rotor et/ ou du stator à l'assemblage. Supposant que l'arbre du rotor suffisamment raide, le niveau de l'excentricité statique ne change pas.

L'excentricité dynamique peut être provoquée par plusieurs facteurs, tels que des tolérances de fabrication, usure des roulements, désalignement, résonance mécanique à la vitesse critique, ou aussi à des pièces endommagées à la Fabrication (7).

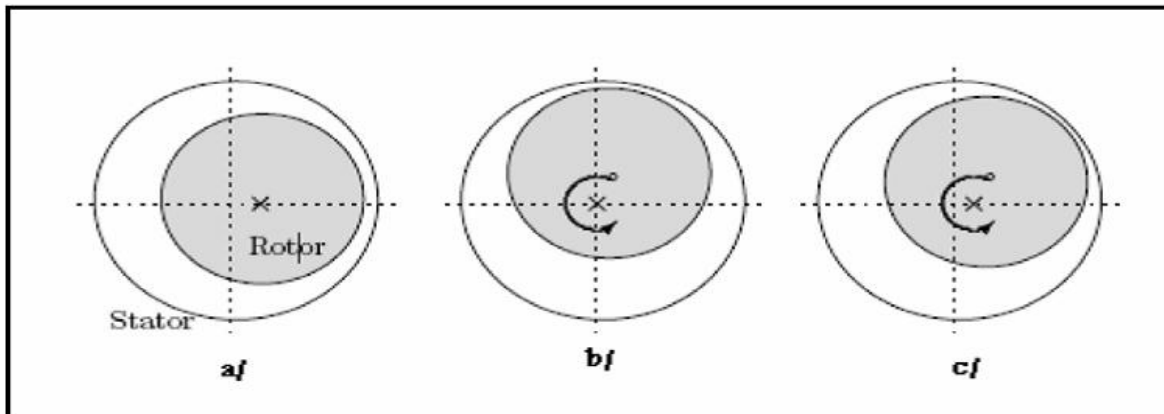


Figure 1.7: a/ excentricité statique, b/ excentricité dynamique, c/ excentricité mixte

1.4.6 Défauts rotoriques

Pour le rotor, les défaillances sont essentiellement dues à un problème

- Thermique
- Electromagnétique

- Résiduel
- Dynamique
- Mécanique
- Environnemental

Les défauts qui sont les plus récurrents, localisés au niveau du rotor, peuvent être définis comme suit (8) :

1.4.6.1 Ruptures des barres conductrices

La cassure ou rupture de barre est un des défauts les plus fréquents au rotor. Elle peut se situer soit au niveau de son encoche soit à l'extrémité qui la relie à l'anneau rotorique. L'effet d'une cassure de barre croît rapidement avec le nombre de barres cassées.

La détection de ces défaillances est rendue difficile par le fait que lors de leur apparition la machine continue à fonctionner. Le courant que conduisait une barre cassée par, exemple, se répartit sur les barres adjacentes. Ces barres sont alors surchargées, ce qui conduit à leurs ruptures, et ainsi de suite jusqu'à la rupture d'un nombre suffisant pour provoquer l'arrêt de la machine (9).

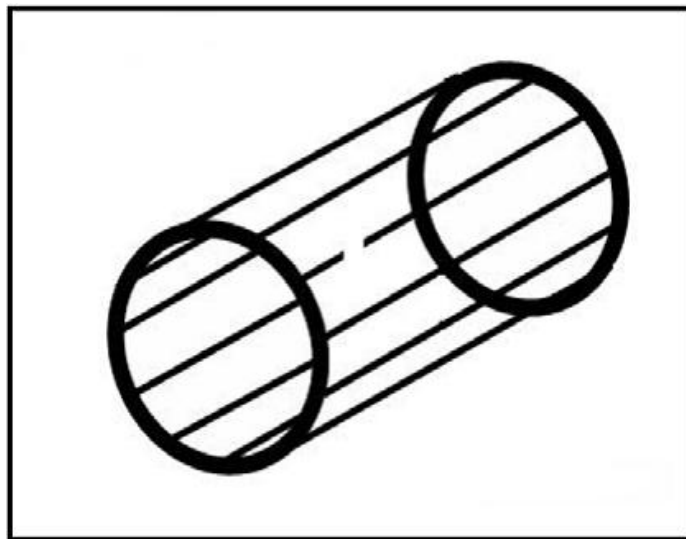


Figure 1.8: Rupture d'une barre de court-circuit

1.4.6.2 Rupture des 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. Cette rupture déséquilibre la répartition des courants dans les barres rotoriques et de ce fait, engendre un effet de modulation d'amplitude sur les courants statoriques similaire à celui provoqué par la cassure de barres (7).

1.4.7 Défauts de stator

Les défauts statoriques sont principalement dus à un problème thermique ou électrique, parmi lesquels :

- Un grand noyau du stator où la température d'enroulements est élevée.
- Attachement lâché à la fin de l'enroulement.
- Contamination due à l'huile.
- Surtension, décharges électriques.
- Les fuites dans les systèmes de refroidissement.
- Dégradation des isolants

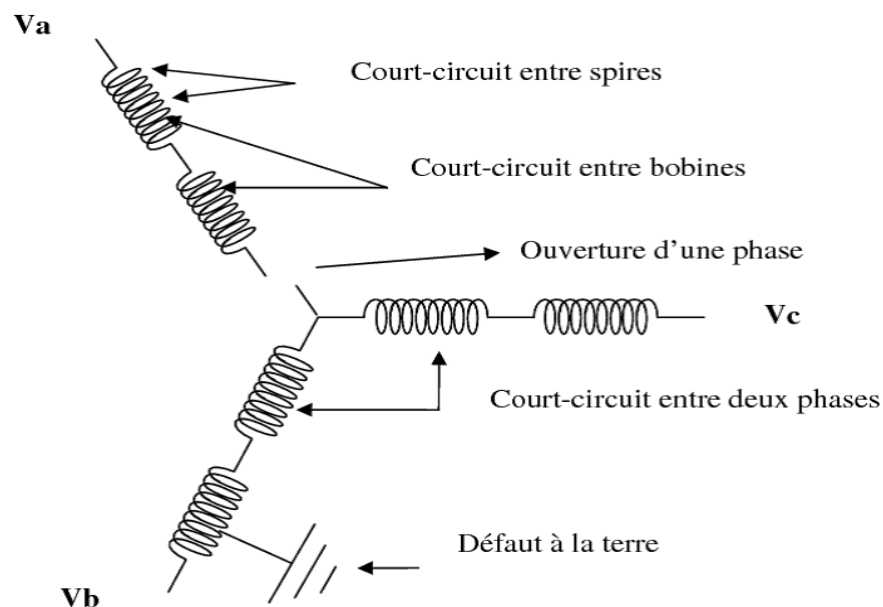


Figure 1.9: différents défauts du stator (5).

1.4.7.1 Ouverture de phase

L'ouverture d'une phase a des conséquences moins graves qu'un court-circuit. L'ouverture d'une des phases ne fait pas circuler de courant de faute et ne pose donc pas de problème

d'échauffement pouvant détériorer le reste de la machine. De même, un circuit ouvert ne crée pas de couple résistant lorsqu'un champ variable est appliqué à la bobine. Le seul problème est donc la perte d'une phase et donc de production de couple. Dans le cas d'un moteur triphasé alimenté par un onduleur à trois bras, la seule manière de pouvoir assurer un minimum le fonctionnement est de piloter les deux phases restantes, c'est-à-dire avec un fonctionnement équivalent à une machine à une phase. Le problème vient alors des ondulations de couple importantes et du fait de ne pas pouvoir assurer un service nécessitant des changements de sens de rotation et des phases marche/arrêt fréquentes (passage par une vitesse nulle) (10).

1.4.7.2 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 légère 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, peut provoquer, ainsi un défaut en cascade (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.

Les courts-circuits entre spires de la même phase apparaissent soit au niveau des têtes des bobines soit dans les encoches. Ce sont des défauts très fréquents. Ils peuvent se manifester soit entre des spires au milieu du bobinage ou bien entre une spire et le neutre (9).

Le courant statorique a un spectre enrichi par la création d'un court-circuit entre plusieurs spires au stator où les fréquences caractéristiques de ce type de défaut sont données par la relation (9):

$$f_{cc} = \left(\frac{n}{p} (1 - g) \pm k \right) \cdot f \quad (1.1)$$

Avec : f_{cc} est la fréquence de court-circuit en Hertz, g le glissement, P le nombre de paire de pôles, $n = 1, 2, 3, \dots$, $k = 1, 3, 5, \dots$



Figure 1.10: (a) Court-circuit entre spires de la même phase (b) Enroulement court-circuité

1.4.7.3 Court-circuit entre phases

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

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

Les courants dans les barres ainsi que dans les anneaux sont augmentés lors de l'apparition de ce défaut. La détection de ce type de défaut peut reposer sur le déséquilibre des courants de phases (9).

1.5 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre la machine asynchrone de manière générale et ses différents composants. Nous avons également présenté les différents types de défauts qui peuvent l'affecter et les causes de ces défauts.

Dans le prochain chapitre, nous aurons un aperçu sur les différentes techniques de diagnostic actuellement appliquée à la machine asynchrone.

2 Chapitre 2 : les methodes de diagnostic de la machine asynchrone

Chapitre 2 les méthodes de diagnostic de la machine asynchrone

2.1 Introduction

Le diagnostic est l'ensemble d'actions visant à évaluer l'état d'un procédé à partir de la connaissance de son fonctionnement. A partir de l'observation du procédé on détermine, par comparaison avec les divers états de fonctionnement connus, le degré de défaillance du système, l'origine de ces défaillances et leurs causes (4).

Dans ce chapitre, nous allons présenter les différentes méthodes de diagnostic appliquées à la machine asynchrone. Deux catégories de méthodes de diagnostic existent, celles qui nécessitent l'utilisation d'un modèle mathématique et celles basées sur l'analyse des signaux des grandeurs de la MAS.

2.2 Les méthodes avec modèles

Les méthodes de diagnostic à base de modèles sont issues principalement de l'automatique et supposent une connaissance à priori du système. Elles prennent en compte les équations régissant les phénomènes internes du système et qui expriment les connaissances profondes sous la forme d'un modèle mathématique (11).

a. Méthode avec Observateur

Les méthodes à base d'observateurs ont pour principe de reconstruire les états et les sorties du système surveillé à partir des entrées et des sorties. La théorie des observateurs est utilisée pour des systèmes linéaires ou non linéaires, d'ordre plein s'ils estiment l'intégralité du vecteur d'état ou d'ordre réduit dans le cas contraire. Le système doit être complètement observable.

L'observateur peut être synthétisé dans le domaine fréquentiel (observateurs généralisés) ou

temporel (observateurs de Luenberger pour les systèmes linéaires). Il existe également une classe d'observateurs dits observateurs à entrées inconnues dont les sorties sont indépendantes des incertitudes structurées auxquelles est soumis le système (12).

b. Méthode avec Identification paramétrique

Le modèle de la machine est caractérisé par des paramètres électriques et mécaniques. A partir de l'acquisition des grandeurs électriques de la MAS, l'identification de ces paramètres permet de construire un modèle fidèle de la machine réelle. En diagnostic, le suivi de ces paramètres permet de caractériser les défauts.

Deux types de paramètres sont à identifier :

- les paramètres mécaniques
- les paramètres électriques (13).

2.3 Les méthodes sans modèles

2.3.1 Les méthodes de raisonnement

Elles s'appliquent dans le cas où la modélisation n'est pas possible. Les mécanismes reliant les causes des défaillances et des défauts ne sont pas techniquement modélisables :

- La reconnaissance de formes classique discrimine les états d'un système en constituant des classes, chaque classe étant représentative d'un mode de fonctionnement du système ;
- Les méthodes ensemblistes ou causales sont utilisées dans le cas où le système ne peut pas être modélisé numériquement (raisonnement qualitatif en utilisant des graphes orientés de causalité, raisonnement approximatif basé sur la théorie des probabilités et celle des ensembles sous raisonnement causal basé sur les connaissances des relations de cause à effets de dysfonctionnement utilisant les règles de production et la logique des prédicats).
- Les systèmes experts résolvent un problème précis à partir d'une représentation des connaissances et du raisonnement d'un ou de plusieurs experts humains.
- Les réseaux de neurones basés sur des mécanismes d'apprentissage et de reconnaissance sont très performants pour les petits systèmes mais nécessitent un nombre suffisant d'exemples de fonctionnement du système pour constituer la base d'apprentissage.

2.3.2 Méthodes de traitement des signaux

2.3.2.1 Transformée en série de Fourier

La méthode la plus utilisée est la transformée de Fourier qui effectue l'analyse spectral d'un signal donné. Chaque défaut, statorique ou rotorique, a ses fréquences caractéristiques. Ainsi une application de la transformée de Fourier peut localiser ces fréquences. En raison de sa simplicité, cette méthode est très utilisée car elle est peu coûteuse et fiable. Sa seule limitation réside dans le fait qu'elle ne peut être appliquée aux machines qui fonctionnent dans des conditions non stationnaires (vitesse non constante) (14).

Toutes les méthodes classiques d'estimation de la Densité Spectrale de Puissance d'un signal, notée DSP, sont fondées sur la transformée de Fourier (15).

a. La transformée de Fourier discrète

La transformée de Fourier Discrète, généralement notée TFD, d'une suite finie se calcul grâce à la relation :

$$F(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} Ps(n) e^{-j \frac{2\pi nk}{N}} \quad (2.1)$$

Où le terme N représente le nombre de points de calcul de la TFD.

En pratique, on essaye d'avoir un nombre de point P de la suite $Ps(n)$ supérieur ou égal au nombre de point de la FFT ($p \leq N$).

La transformée de Fourier Inverse, notée ITFD, se calcul grâce à la relation :

$$Ps(n) = \sum_{k=0}^{N-1} F(k) e^{j \frac{2\pi nk}{N}} \quad (2.2)$$

En décomposant l'exponentielle de (l'équation 2.1), le nombre complexe F(k) peut se mettre sous la forme :

$$F(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} Ps(n) \cos \frac{2\pi nk}{N} + j \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} Ps(n) \sin \frac{2\pi nk}{N} \quad (2.3)$$

Cette équation nous permet ainsi de définir la transformée de Fourier en cosinus, notée TFD-COS grâce à l'équation suivante :

$$Fc(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^N Ps(n) \cos \frac{2pnk}{N} \quad (2.4)$$

Ainsi que la transformée de Fourier en sinus, notée TFD-SIN, calculée avec l'équation :

$$Fs(k) = j \frac{1}{N} \sum_{n=0}^N Ps(n) \sin \frac{2npk}{N} \quad (2.5)$$

Ces deux transformées permettent d'obtenir des temps de calcul réduits lorsqu'elles doivent être implantées dans un algorithme de calcul.

b. La transformée de Fourier rapide

La transformée de Fourier rapide, notée TFR, est une technique de calcul rapide élaborée en 1965 par J. W. Cooley et J. W. Tuckey. L'algorithme de base de cette transformée utilise un nombre de points N égal à une puissance de 2, ce qui permet d'obtenir un gain en temps de calcul, par rapport à un calcul avec la TFD [qui est de l'ordre de $\log_2(n)$], de gain :

$$Gain = \frac{N}{\log_2(N)}$$

Cette transformée de Fourier rapide est très utilisée lorsqu'il est indispensable d'obtenir une analyse fréquentielle "en ligne" dans certains processus au travers d'une fenêtre glissante d'observation (15).

- **Méthodes de diagnostic des défauts basées sur l'analyse spectrale des signaux**

A ce jour, c'est l'analyse fréquentielle des grandeurs mesurables qui est la plus utilisée pour le diagnostic de défaut, car la plupart des défauts connus peuvent être détectés avec ce type d'approche.

Pour effectuer le diagnostic d'une installation industrielle, les opérateurs de maintenance analysent un certain nombre de signaux issus de la machine. En effet, l'évolution temporelle et le contenu spectral de ces signaux, peuvent être exploités pour détecter et localiser les anomalies qui affectent le bon fonctionnement de la machine. Elles font toute partie de la famille des méthodes d'estimation spectrale non-paramétriques. Les grandeurs accessibles et mesurables d'une machine asynchrone peuvent être (15):

Les courants absorbés.

Le flux de dispersion.

La tension d'alimentation.

La vitesse de rotation mécanique.

Les vibrations.

2.3.2.2 Diagnostic par mesure du courant statorique

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

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

La surveillance via le courant statorique nécessite une bonne connaissance des défauts et leurs signatures. Elles sont utilisées dans le contexte de machines alimentées par le réseau et pour la recherche de fréquence caractéristiques de défauts (15).

2.3.2.3 Diagnostic par mesure du flux magnétique axial de fuite

Dans une machine idéale sans défauts, 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 un flux de fuite axial de valeur dépendante 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.

2.3.2.4 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 [HSU 95]. L'analyse spectrale du signal du couple (mesuré ou estimé), donne des informations sur l'état de santé du moteur[JAC 98].

2.3.2.5 Diagnostic par mesure des vibrations mécaniques

D'après (16) 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 .

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

$$B_s = F_m \cdot P$$

La force magnétomotrice contient les effets des asymétries du stator ou du rotor, en plus la perméance dépend de la variation de l'entrefer (à cause des ouvertures des encoches statoriques et rotoriques et l'excentricité).

Pour la surveillance de vibrations on utilise des capteurs tels que les accéléromètres. Des balourds magnétiques, mécaniques et/ou des forces produisent des vibrations. Ces dernières sont mesurées suivant la direction radiale ou la direction axiale. Les mesures ainsi effectuées sont analysées du point de vue spectrale.

Les spectres des signaux de vibrations, issus du moteur avec défaut, sont comparés avec ceux enregistrés lorsque le moteur est en bon état. Ceci permet la détection aussi bien des défauts électriques que mécaniques (défauts d'enroulements statoriques, irrégularité d'entrefer et asymétrie de l'alimentation).

2.3.2.6 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. Donc, le niveau d'informations apportées par cette grandeur, est plus grand que celui apporté par le courant d'une seule phase. En plus de la fréquence fondamentale et des deux composantes latérales, le spectre de la puissance instantanée contient une composante additionnelle située à la fréquence de

défaut. Ceci présente l'avantage de cette méthode par rapport aux autres (15).

2.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différentes méthodes de diagnostic de la machine asynchrone, qui ont pour but de détecter et localiser les défauts. Nous avons mis l'accent sur l'analyse spectrale de la puissance instantanée qui est l'objectif de ce mémoire. Elle est sensée nous renseigner sur le type de défaut et sur sa sévérité. Nous présenterons dans le chapitre suivant les résultats des simulations effectuées sur la machine.

3 Chapitre 3: LES RESULTATS DE SIMULATION

Chapitre 3 Les résultats de simulation de la machine asynchrone

3.1 Introduction

Nous présentons dans ce chapitre les résultats de simulation d'une MAS à cage dans le cas où la machine est à l'état sain puis le cas de la présence de défaut, plus précisément le court-circuit de spires statoriques. La simulation est réalisée sur Matlab/Simulink. Nous allons analyser le spectre de la puissance instantanée totale de la machine à vide sous un système équilibré de tensions triphasées, ensuite avec défaut sous différentes conditions de charge. Nous complétons le travail à l'aide de la méthode du vecteur de Park

3.2 Calcul théorique

a) Calculs de tensions et courants à l'état sain

Etant donné une MAS sain, alimenté par une source triphasée équilibrée, qui fait tourner une charge constante, les signaux suivants de courants et tensions statoriques sont modélisés par les équations 3.1 à 3.8 :

$$i_a = \sqrt{2} I \cos(\omega t) \quad (3.1)$$

$$i_b = \sqrt{2} I \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (3.2)$$

$$i_c = \sqrt{2} I \cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \quad (3.3)$$

$$V_a = \sqrt{2} V \cos(\omega t + \alpha) \quad (3.4)$$

$$V_b = \sqrt{2} V \cos\left(\omega t + \alpha - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (3.5)$$

$$V_c = \sqrt{2} V \cos\left(\omega t + \alpha + \frac{2\pi}{3}\right) \quad (3.6)$$

$$U_{ab} = \sqrt{2}\sqrt{3}V \cos(\omega t + \alpha + \frac{\pi}{6}) \quad (3.7)$$

$$U_{cb} = \sqrt{2}\sqrt{3}V \cos(\omega t + \alpha + \frac{\pi}{6} + \frac{\pi}{3}) \quad (3.8)$$

Où V est la valeur efficace de la tension simple, I la valeur efficace des courants simples, ω la pulsation d'alimentation en radians par seconde, et α le facteur de puissance. Le courant simple i_a est pris comme référence de notre cadre électrique. Dans la MAS alimentée en tension, la tension simple V_a a un angle d'avance α sur le courant. Le facteur de puissance est alors considéré comme l'angle entre i_a et V_a . En outre, comme la MAS est alimentée par une source de tension triphasée équilibrée, la tension simple V_b est en retard d'un angle $\frac{2\pi}{3}$ par rapport à la tension simple V_a . La tension simple V_c a une avance de $\frac{2\pi}{3}$ sur la tension simple V_b , comme le montrent les équations (3.5) et (3.6). Le même raisonnement peut être utilisé pour les trois courants.

Les puissances instantanées partielles, dans le cas sans défaut P_{ab0} et P_{cb0} , sont obtenues en multipliant U_{ab} par i_a et U_{cb} par i_c .

$$P_{ab0} = U_{ab} * i_a = \sqrt{3}VI (\cos(\alpha + \frac{\pi}{6}) + \cos(2\omega t + \alpha + \frac{\pi}{6})) \quad (3.9)$$

$$P_{cb0} = U_{cb} * i_c = \sqrt{3}VI (\cos(\alpha - \frac{\pi}{6}) - \cos(2\omega t + \alpha + \frac{\pi}{6})) \quad (3.10)$$

La puissance instantanée totale P_{abc0} est donc obtenue en additionnant les deux puissances instantanées partielles :

$$P_{abc0} = P_{ab0} + P_{cb0} = 3VI \cos \alpha \quad (3.11)$$

A noter que toutes les puissances instantanées contiennent une composante continue fonction du facteur de puissance α . En outre, les deux puissances partielles contiennent une composante à deux fois la fréquence fondamentale avec une amplitude constante ($\sqrt{3}VI$) (17).

b) Calculs des courants avec défaut

Si une anomalie électrique ou mécanique se produit dans un système d'entraînement, les couples harmoniques sont générés dans la MAS, accompagné d'oscillations de vitesse et de

modulations des courants statoriques, qui sont généralement périodiques (16) (18). Dans le cas de perturbations périodiques, les trois courants de ligne i_a , i_b et i_c sont simultanément affectés par la fréquence fondamentale f_{osc} de l'oscillation induite par le défaut affectant la MAS. Cet effet entraînera une chaîne de composantes spectrales dans les courants d'entrée qui représentent encore un multi système symétrique triphasé de fréquence. Si seulement les premières composantes de bandes latérales autour de l'alimentation à la pulsation ω sont prises en compte, les trois courants d'entrée pourraient alors être exprimés comme :

$$i_A = \sqrt{2}I \cos(\omega t) + \sqrt{2}I_1 \cos[(\omega - \omega_{osc})t - \varphi_1] + \sqrt{2}I_r \cos[(\omega + \omega_{osc})t - \varphi_r] \quad (3.12)$$

$$i_B = \sqrt{2}I \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) + \sqrt{2}I_1 \cos[(\omega - \omega_{osc})t - \varphi_1 - \frac{2\pi}{3}] + \sqrt{2}I_r \cos[(\omega + \omega_{osc})t - \varphi_r - \frac{2\pi}{3}] \quad (3.13)$$

$$i_C = \sqrt{2}I \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}) + \sqrt{2}I_1 \cos[(\omega - \omega_{osc})t - \varphi_1 + \frac{2\pi}{3}] + \sqrt{2}I_r \cos[(\omega + \omega_{osc})t - \varphi_r + \frac{2\pi}{3}] \quad (3.14)$$

Où I est la valeur efficace de la composante fondamentale du courant, I_1 est la valeur efficace de la composante inférieure du courant, I_r est la valeur efficace de la composante supérieure du courant, ω_{osc} est la pulsation de défaut ($\omega_{osc} = 2\pi f_{osc}$), φ_r est le déplacement angulaire de la composante gauche du courant et φ_1 est le déplacement angulaire de la composante droite.

De même nous reprenons le calcul des puissances instantanées avec l'apparition du défaut :

$$P_{ab} = U_{ab} * i_A = \sqrt{3}V [I \cos(\alpha + \frac{\pi}{6}) + I \cos(2\omega t + \alpha + \frac{\pi}{6}) + I_1 \cos(\omega_{osc} t + \alpha + \varphi_1 + \frac{\pi}{6}) + I_1 \cos((2\omega - \omega_{osc})t + \alpha - \varphi_1 + \frac{\pi}{6}) + I_r \sin(\omega_{osc} t - \alpha - \varphi_r + \frac{\pi}{6}) + I_r \cos((2\omega - \omega_{osc})t + \alpha - \varphi_r + \frac{\pi}{6})] \quad (3.15)$$

$$P_{cb} = U_{cb} * i_C = \sqrt{3}V [I \sin(\alpha + \frac{\pi}{3}) - I \cos(2\omega t + \alpha + \frac{\pi}{6}) + I_1 \sin(\omega_{osc} t + \alpha + \varphi_1 + \frac{\pi}{3}) - I_1 \cos((2\omega - \omega_{osc})t + \alpha - \varphi_1 + \frac{\pi}{6}) + I_r \cos(\omega_{osc} t - \alpha - \varphi_r + \frac{\pi}{6}) - I_r \cos((2\omega - \omega_{osc})t + \alpha - \varphi_r + \frac{\pi}{6})] \quad (3.16)$$

$$P_{abc} = P_{ab} + P_{cb} = 3V[I \cos \alpha + I_1 \cos(\omega_{osc} t + \alpha + \varphi_1) + I_r \cos(\omega_{osc} t - \alpha - \varphi_r)] \quad (3.17)$$

Il est clair que dans les deux spectres des puissances partielles, en plus de la composante continue, deux composantes de bandes latérales apparaîtront aux fréquences " $f1 = (2\omega + \omega_{osc})/2\pi$ " et " $f2 = (2\omega - \omega_{osc})/2\pi$ ".

3.3 Simulation de la machine

Nous avons utilisé un modèle de la MAS réalisé sur Simulink/Matlab par le binôme (19):

La MAS est alimentée directement par le réseau triphasé équilibré dont les paramètres sont donnés en annexe.

Avec : $f = 50Hz$

Le démarrage s'effectue à vide sous tension nominale avec une alimentation triphasée sinusoïdale équilibrée. La MAS est soumise à un couple résistant nominal $Cr=3.8N.m$, le couple électromagnétique vient équilibrer le couple de charge, la vitesse diminue, le courant augmente et atteint sa valeur nominale. On note que le couple de charge est appliqué à la machine à l'instant $t = 0.6s$.

Nous allons montrer le comportement d'une machine asymétrique qui présente 30 spires retranchées dans la phase a_s , 50 spires dans la phase b_s , et 70 spires dans la phase c_s , aux instants $t = 0.8s$, $t = 1s$ et $t = 1.2s$ respectivement ; cela dans les mêmes conditions que la machine saine. A noter que le nombre total de spires est de $Ns=528$.

Nous allons analyser les signatures des puissances instantanées partielles, ensuite nous allons visualiser le spectre de la puissance instantanée totale de la machine dans différentes conditions de charge et de gravité du défaut.

Les résultats obtenus par simulation sont présentés dans les figures (3.1) à (3.12) :

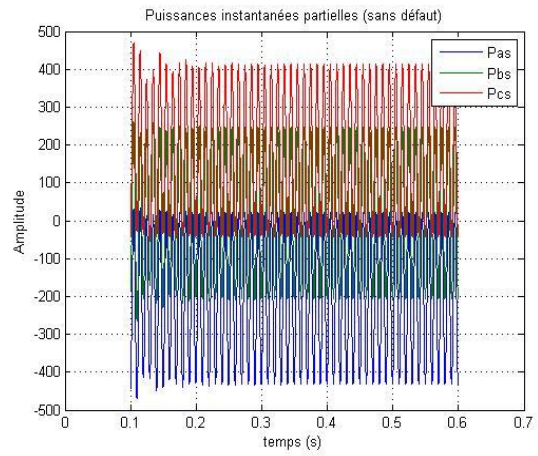
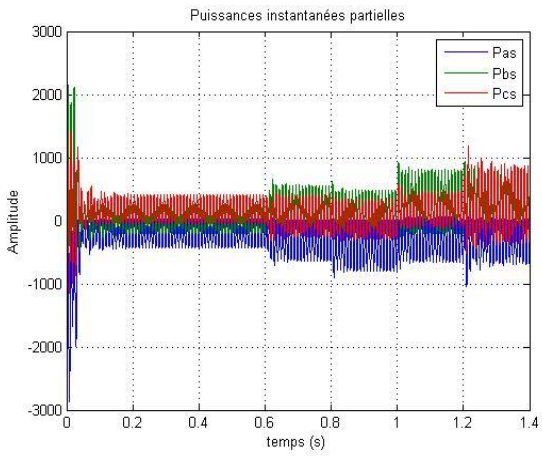


Figure 3.1: Les puissances instantanées partielles : a) Tous régimes b) Régime permanent (sans défaut).

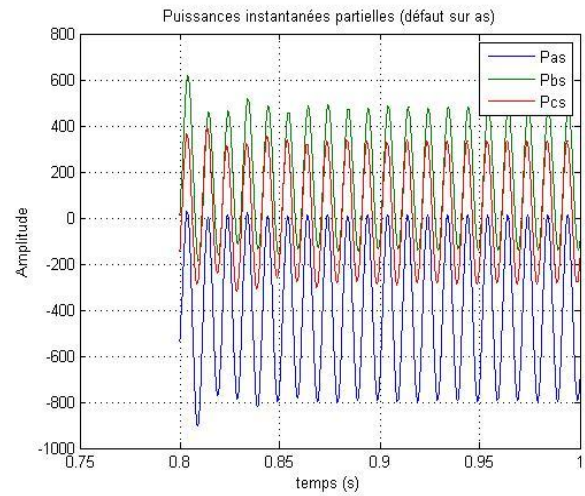
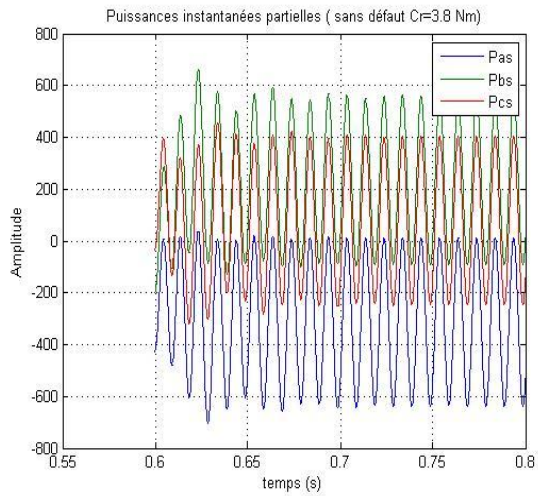


Figure 3.2: Les puissances instantanées partielles : a) sans défaut, application du couple de charge b) avec défaut sur la phase as).

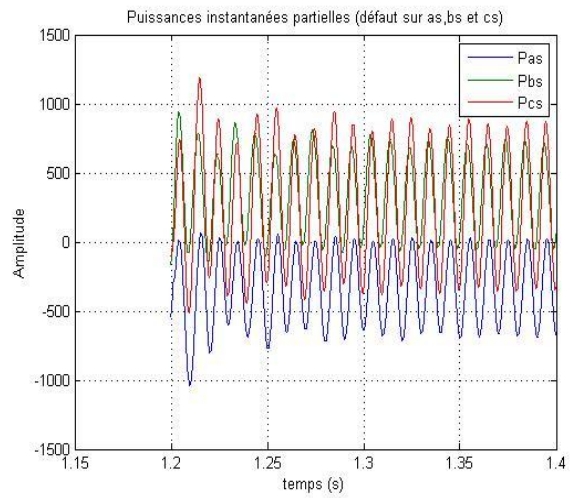
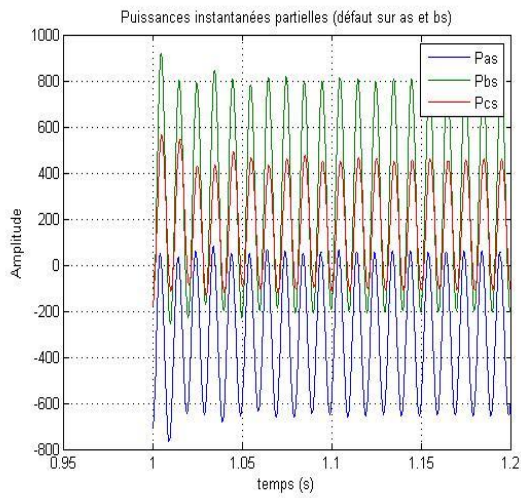


Figure 3.3: Les puissances instantanées partielles : a) avec défaut sur les phases as et bs b) avec défaut sur les 3 phases).

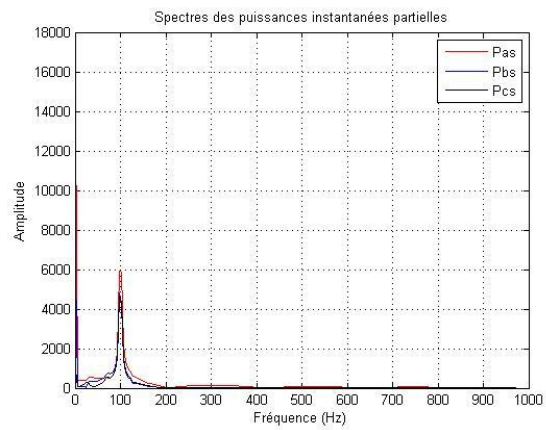
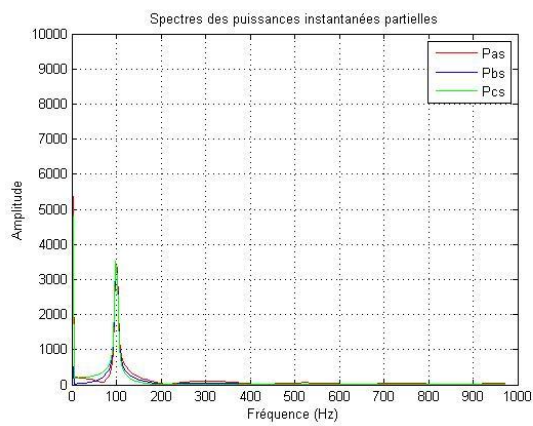


Figure 3.4: Les puissances instantanées partielles: a) machine saine b) machine avec défaut sur la phase as

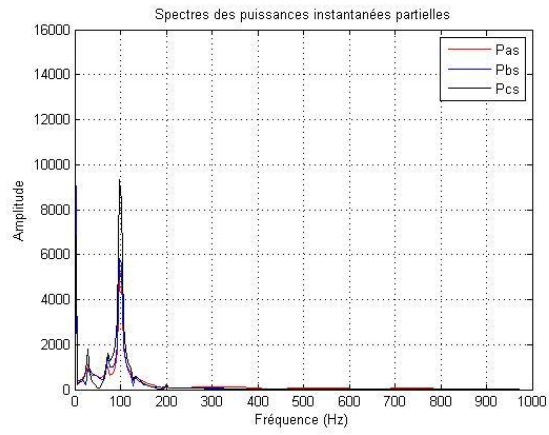
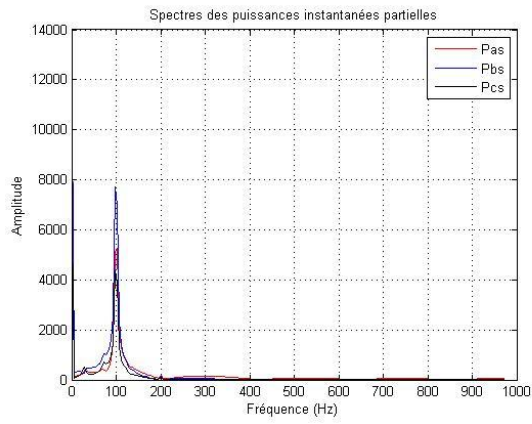


Figure 3.5: Les puissances instantanées partielles: a) défaut sur as et bs b) défaut sur as, bs et cs

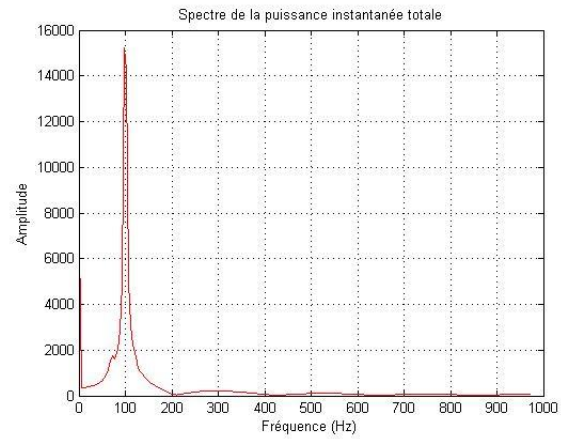
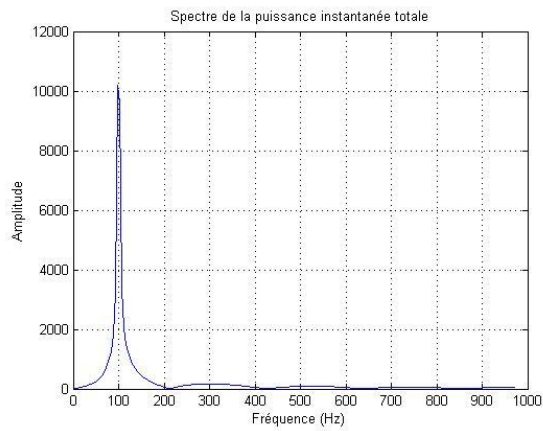


Figure 3.6: La puissance instantanée totale: a) machine saine b) défaut sur as

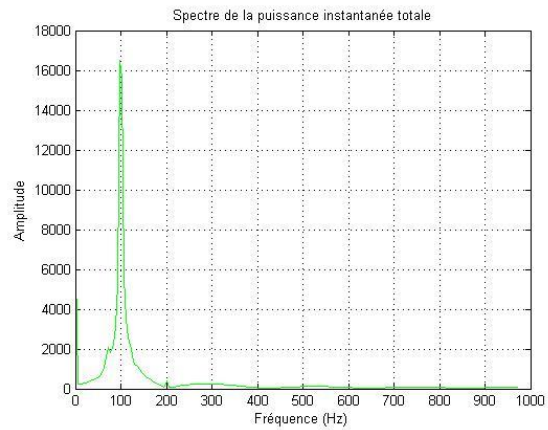
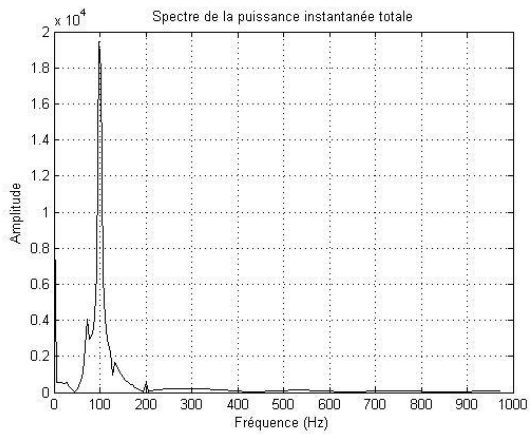


Figure 3.7: La puissance instantanée totale: a) défaut sur as, bs et cs b) défaut sur as et bs

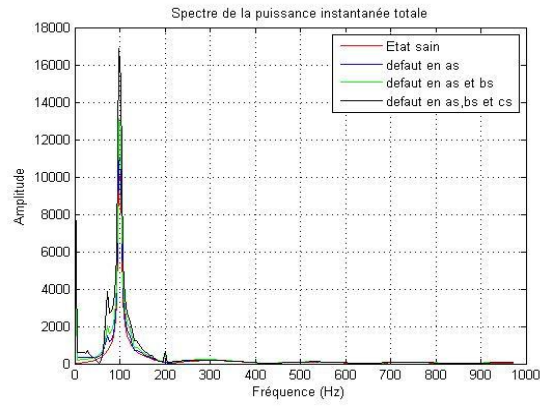


Figure 3.8: Les puissances instantanées totales avec 30% de défaut et un couple $Cr=1$ Nm

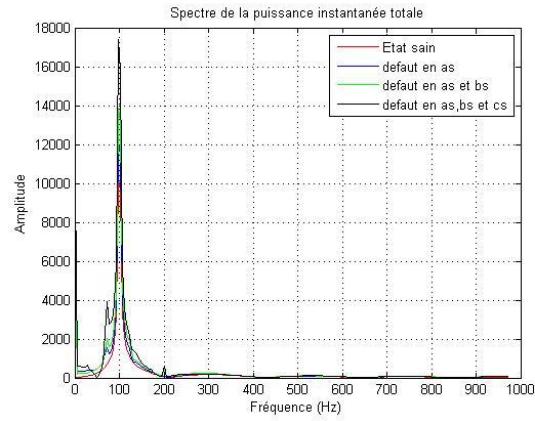


Figure 3.9: Les puissances instantanées totales avec 30% de défaut et un couple de charge $Cr=2$ Nm

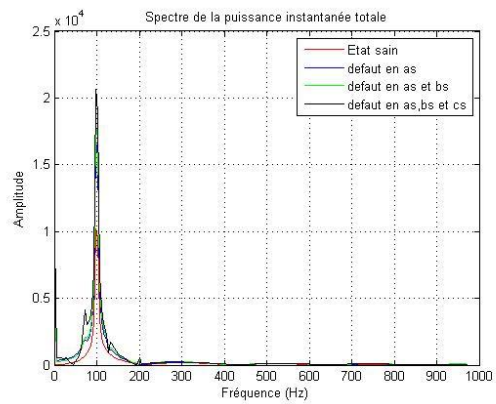
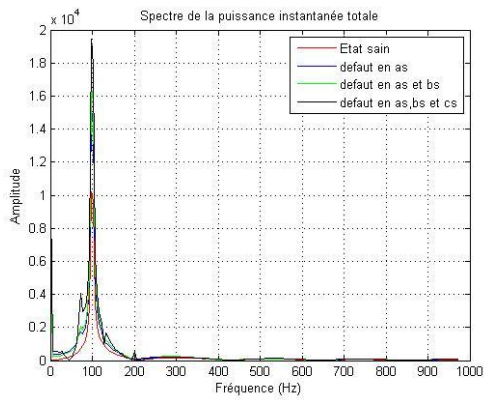


Figure 3.10: Les puissances instantanées totales: a) avec 30% de défaut et un couple de charge $Cr=3.8$ Nm b) avec un couple de charge $Cr=4.5$ Nm

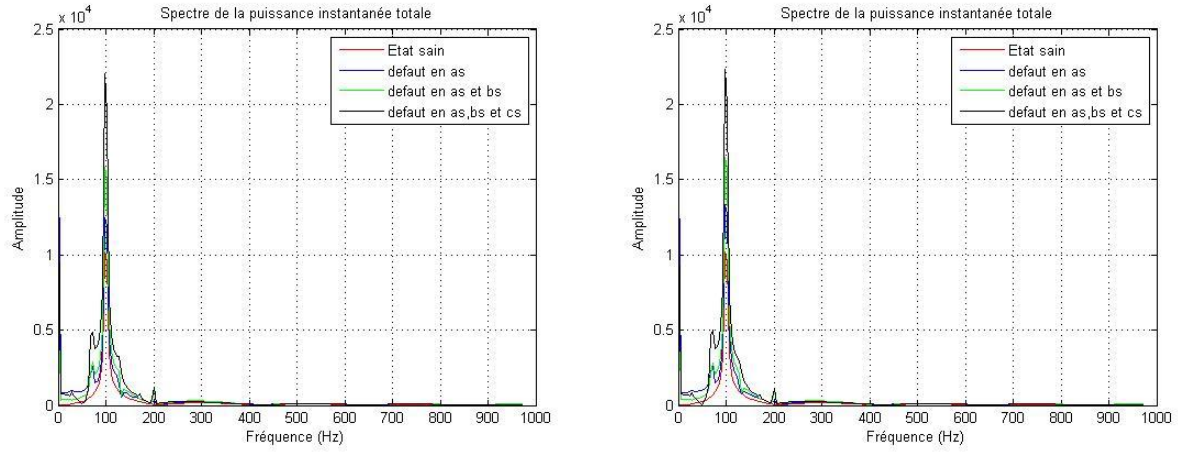


Figure 3.11: Les puissances instantanées totales avec 60% de défaut et un couple de charge $Cr=1$ Nm b) avec un couple $Cr=2$ Nm

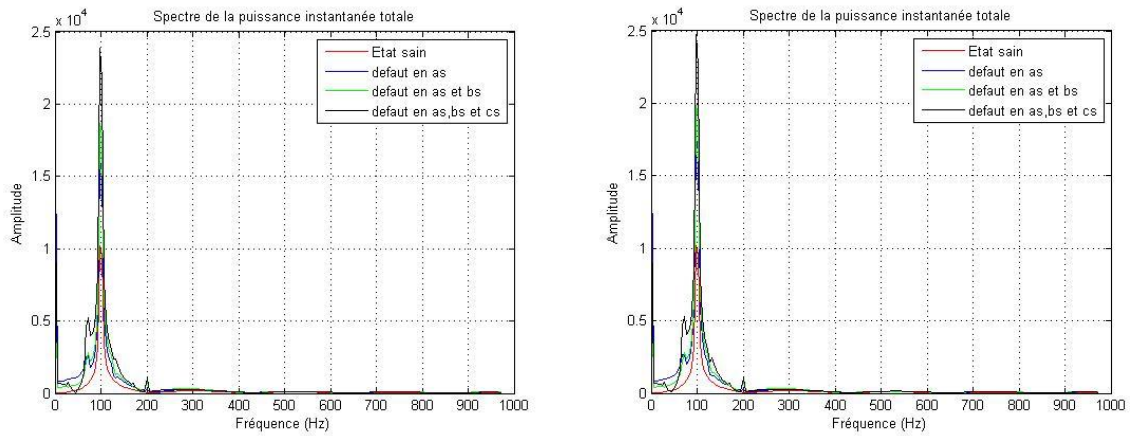


Figure 3.12: Les puissances instantanées totales avec 60% de défaut et un couple de charge $Cr=3.8$ Nm b) avec un couple de charge $Cr=4.5$ Nm.

D'après les résultats obtenus à partir des figures (3.1) à (3.12) nous pouvons interpréter que :

- ❖ A l'état sain, les puissances instantanées partielles ont la même amplitude de 400 W, elles augmentent (600 W) quand on applique le couple de charge figure (3.1).
- ❖ L'amplitude de la puissance est toujours plus élevée dans la phase avec le plus grand nombre de spires retranchées figures (3.2) et (3.3).
- ❖ L'état sain du moteur est caractérisé par l'absence de raies liées au défaut figures (3.4) et (3.5).
- ❖ L'apparition de défauts sur les trois phases a_s , b_s et c_s montre une apparition de raies autour de la fondamentale dans les puissances partielles ainsi que la puissance totale. L'amplitude de ces raies nous renseigne sur le degré de sévérité du défaut.
- ❖ Quand la charge augmente, une augmentation de l'amplitude des raies caractéristiques de défaut est observée figures (3.6) à (3.8).
- ❖ Avec l'augmentation de l'amplitude du défaut (de 30%) les figures (3.11) et (3.12) nous montrent des raies avec une amplitude de plus en plus grande autour de la fréquence fondamentale, au fur et à mesure qu'on accroît la charge.
- ❖ Les puissances instantanées partielles et totales nous informent sur l'apparition d'un défaut de court-circuit de spires, sur le degré de sévérité du défaut en fonction de la charge. Elles détectent et localisent le défaut en question.

3.4 Approche du vecteur de Park

L'approche du vecteur de Park utilise les grandeurs biphasées i_{ds} , et i_{qs} pour l'obtention de la courbe de Lissajou : $i_{ds} = f(i_{qs})$.

Les courants i_{ds} , et i_{qs} sont obtenus par application de la transformation de Park liée au stator, donnée par (19):

$$\begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \end{bmatrix} = P_s \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \end{bmatrix}. \quad (3.18)$$

$$\text{Avec : } P_s = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}. \quad (3.19)$$

La transformation de Park liée au stator est obtenue pour $\theta = 0$.

Nous allons retrancher 30 spires dans la phase a_s , 50 spires dans la phase b_s , et 70 spires dans la phase c_s , cela dans les mêmes conditions que la machine saine. Nous allons ensuite augmenter le nombre de spires retranchées (60 spires sur a_s , 80 spires sur b_s et 100 spires sur c_s), afin de comparer les résultats dans les deux cas.

Dans le plan de phase, la représentation a une forme circulaire. Par conséquent toutes déformations, changement de l'épaisseur de cette courbe donne une information sur la présence de défaut ou déséquilibre.

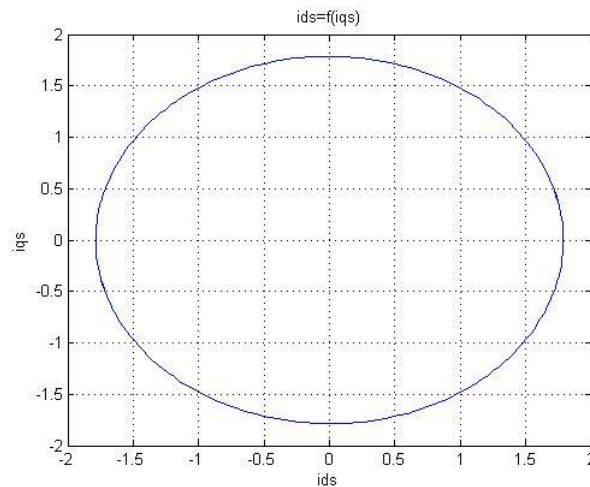


Figure 3.13 : Courant statorique dans le plan de phase $i_{ds} = f(i_{qs})$ pour une machine saine (sans défaut) à vide.

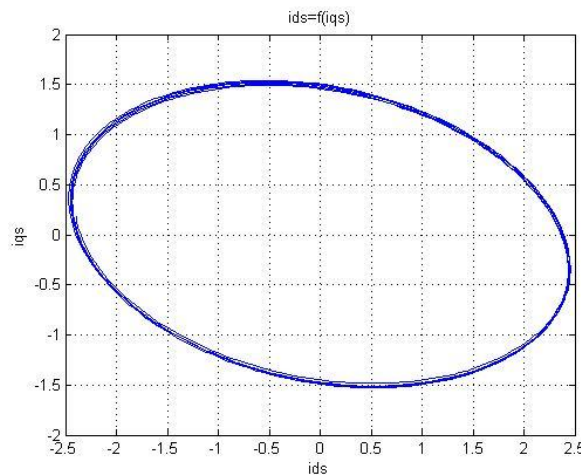


Figure 3.14 : Courant statorique dans le plan de phase $i_{ds} = f(i_{qs})$ pour une machine avec défaut de spires (6% de spires retranchés dans la phase a_s) et avec un couple de charge $C_r=1$ Nm.

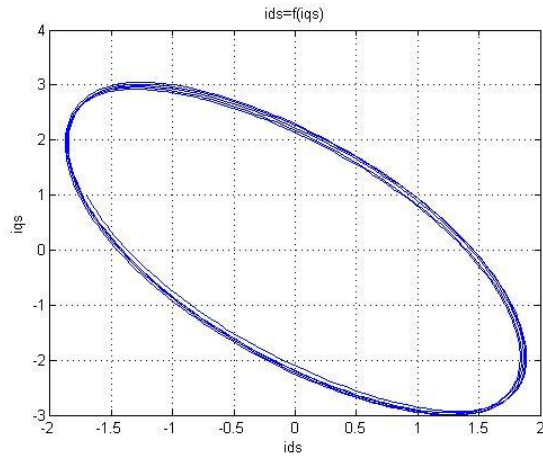


Figure 3.15 : Courant statorique dans le plan de phase $i_{ds} = f(i_{qs})$ pour une machine avec défaut de spires (15% de spire retranchés dans les phases *as* et *bs*) et avec un couple de charge $C_r=1$ Nm.

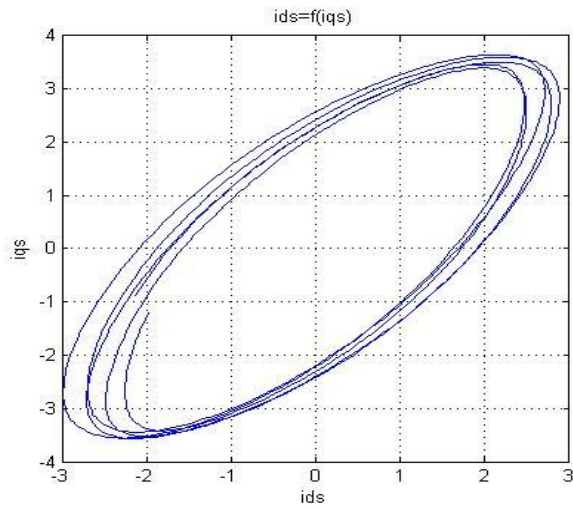


Figure 3.16: Courant statorique dans le plan de phase $i_{ds} = f(i_{qs})$ pour une machine avec défaut de spires (28% de spire retranchés dans les phases *as*, *bs* et *cs*) et avec un couple de charge $C_r=1$ Nm.

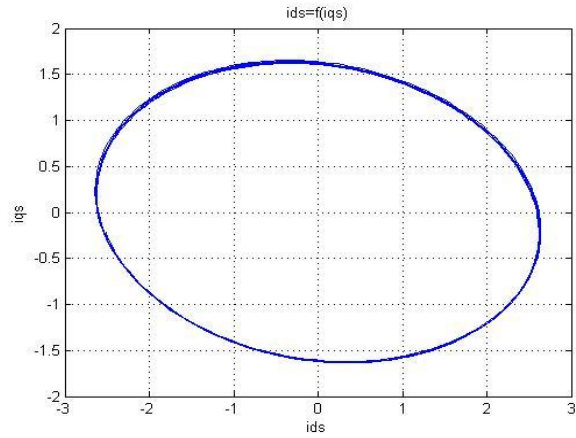


Figure 3.17: Courant statorique dans le plan de phase $i_{ds} = f(i_{qs})$ pour une machine avec défaut de spires (6% de spires retranchés dans la phase a_s) et avec un couple de charge $Cr=2$ Nm.

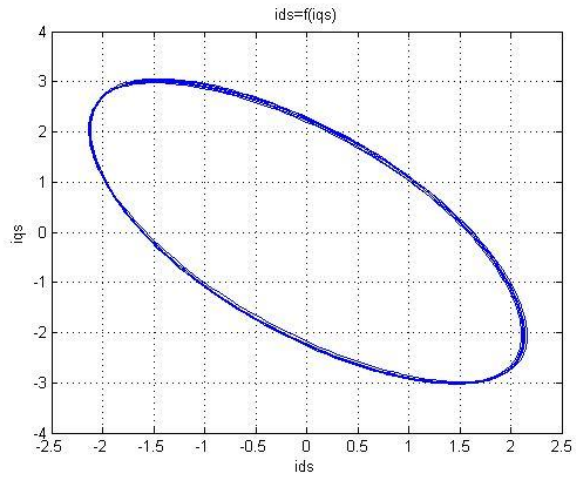


Figure 3.18 : Courant statorique dans le plan de phase $i_{ds} = f(i_{qs})$ pour une machine avec défaut de spires (15% de spires retranchés dans les phases a_s et b_s) et avec un couple de charge $Cr=2$ Nm.

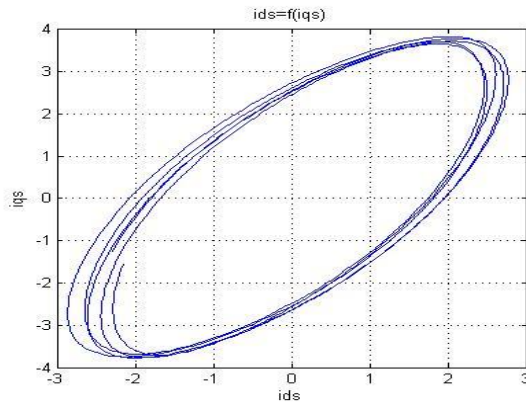


Figure 3.19 : Courant statorique dans le plan de phase $i_{ds} = f(i_{qs})$ pour une machine avec défaut de spires (28% de spires retranchés dans les phases a_s, b_s et c_s) et avec un couple de charge $Cr=2$ Nm.

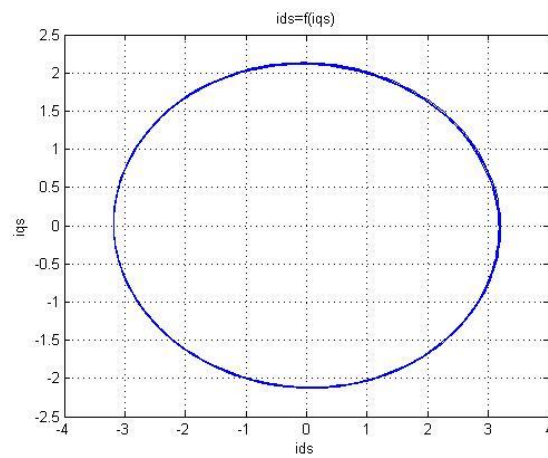


Figure 3.20 : Courant statorique dans le plan de phase $i_{ds} = f(i_{qs})$ pour une machine avec défaut de spires (6% de spires retranchés dans la phase a_s) et avec un couple de charge $Cr=3.8$ Nm.

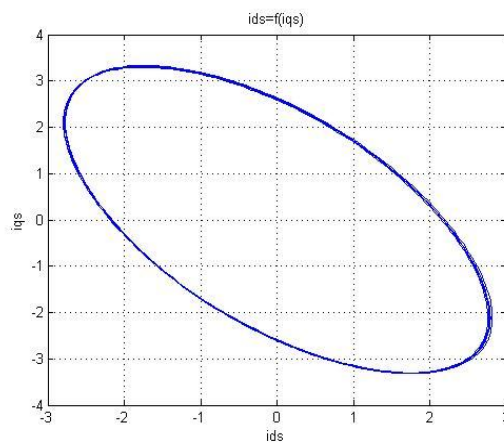
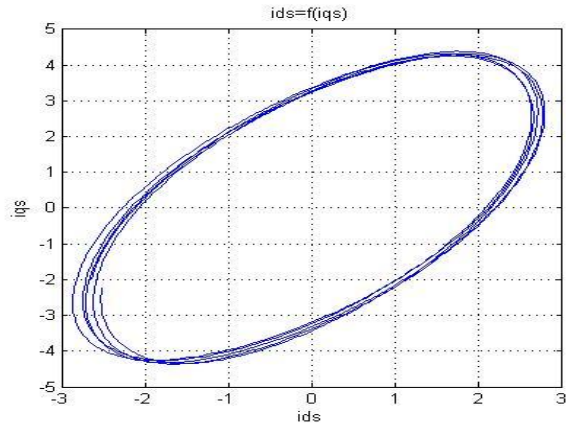


Figure 3.21 : Courant statorique dans le plan de phase $i_{ds} = f(i_{qs})$ pour une machine avec défaut de spires (15% de spires retranchés dans les phases a_s et b_s) et avec un couple de charge $Cr=3.8$ Nm.



3.22: Courant statorique dans le plan de phase $i_{ds} = f(i_{qs})$ pour une machine avec défaut de spires (28% de spires retranchés dans les phases a_s , b_s et c_s) et avec un couple de charge $C_r=3.8$ Nm.

3.4.1 Interprétation des résultats de simulation

On constate que s'il y a un déséquilibre ou un défaut :

- ❖ On peut constater que la courbe de Lissajou a une forme circulaire centrée à l'origine et de diamètre égale à l'amplitude du courant statorique à vide, figure (3.13). Cette courbe n'est pas modifiée par l'augmentation du couple de charge.
- ❖ En appliquant un couple de charge de $(1N.m)$ à la MAS à $t = 0.6s$, avec l'apparition d'un défaut sur la phase as à $t = 0.8s$, nous constatons une déformation de la forme du graphe qui a tendance à prendre une forme elliptique figure(3.14)
- ❖ A $t = 1s$ les phases as et bs présentent chacune un défaut, nous voyons que la courbe prend une forme d'ellipse centrée à 0.
- ❖ A $t = 1.2s$ la phase cs est également en défaut, nous remarquons une augmentation dans l'amplitude et l'épaisseur des contours, ce qui indique la sévérité du défaut.
- ❖ Après augmentation du couple de charge $(2N.m)$ puis $(3.8N.m)$ dans les trois cas de défauts cités plus haut, nous remarquons que plus la charge est importante plus le rayon de l'ellipse et les contours augmentent.

3.5 Conclusion

Nous nous étions fixés comme objectif dans ce chapitre l'analyse de la puissance instantanée afin de voir l'effet du court-circuit de spires sur le comportement de la MAS. L'analyse du spectre par FFT de la puissance instantanée nous a un effet procuré des résultats satisfaisants sur le défaut et sur sa sévérité. Nous avons également analysé le courbe de Lissajous donné par les courants de Park $i_{ds} = f(i_{qs})$, cela confirme les résultats obtenus sur la puissance et l'approche théorique que nous avons utilisée.

Conclusion générale

4 Conclusion générale

Pour aborder notre étude nous avons commencé par des généralités sur la machine asynchrone pour mettre en évidence sa structure et ses différents composants. Nous avons également cité les différents types de défauts qui peuvent survenir lors du fonctionnement qu'ils soient mécaniques ou électriques, leurs sources et conséquences et surtout le défaut type qui est l'exemple de cette étude (court-circuit de spires statoriques).

Nous avons présenté les techniques de diagnostic en vigueur utilisées sur la machine asynchrone.

L'analyse de la puissance, qui est le but de ce travail donne plus d'informations sur le défaut par rapport à celui du courant ; la puissance instantanée est la somme des produits des courants et des tensions dans les trois phases statoriques.

D'après ce travail, on peut conclure que la détection du court-circuit de spires par l'analyse du spectre de la puissance instantanée par FFT est assez conséquente, l'apparition des fréquences caractéristiques de défaut sont en fonction de la sévérité du défaut.

Enfin L'analyse des courants par le vecteur de Park confirme notre hypothèse sur l'effet du défaut étudié sur la MAS.

Annexes

Les paramètres de la MAS

Tension maximale (V)	$220\sqrt{2}$
Courant nominal (A)	1.6
Nombres de spires par phase	528
Nombres de paires de pôles	2
Moment d'inertie	0.00177007
Coefficient visqueux	0.0006437777
Résistance statorique (Ω)	13.6324
Résistance rotorique (Ω)	13.3072
Résistance de défaut (Ω)	1.3
Fréquence (Hz)	50
Inductance mutuelle (H)	0.6380
Inductance de fuite statorique (H)	0.0388
Inductance de fuite rotorique (H)	0.0388

Bibliographie

5 Bibliographie

1. **REZGUI, S.** *commande des machines électriques en environnement matlab/simulink et temps réel » mémoire de magister en électrotechnique. Université de Constantine 2009.*
2. **GALICHON, M. BELLIER et A.** *Machines électriques » Electricité industrielle LIBRAIRIE DELAGRAVE. 15, rue Soufflot, 75005 Paris : s.n. 1965*
3. **., M. GAOUAOU.** « Diagnostique par reconnaissance des formes : Application à la machine asynchrone » Mémoire de magistère en automatique. Tizi Ouzou : s.n., 2012.
4. **LEBAROUD, A.** THESE Modélisation et techniques orientées vers le diagnostic de la machine asynchrone associée à des sources variables . 2006.
5. **ADRIAN, C.** « Méthode global de diagnostic des machines électriques » thèse de doctorat Université d'Artois, Lille : s.n., 2012.
6. **JEANNOT, C. PRÉVÉ et R.** *Guide de conception des réseaux électriques industriels » Schneider Electric. 1997.*
7. **BELHAMDI, S.** « Diagnostic Des Défauts De La Machine Asynchrone Contrôlée Par Dégérentes Techniques De Commande » Thèse de doctorat en électrotechniques. . Université Mohamed KHIDER de ,Biskra : s.n., 2014.
8. **BOUGUERNE, A.** « Diagnostic automatique des défauts des moteurs asynchrones » Mémoire de Magistère en Electrotechniques. . CONSTANTINE : Université MENTOURI , 2009.
9. **MEKRACHE, A. MEGHNOUS et M.** « Diagnostic Des Défauts De La Machine Asynchrone » Projet de fin d'études pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Automatique., Ecole Nationale Polytechnique, 2009.
10. **Abdel, BELBECHE.** Modélisation, Diagnostic et Commande d'une Machine Asynchrone avec Rupture d'une Phase. batna : s.n., 2013.
11. **KAIKAA, M.** *Modélisation de la machine asynchrone avec prise en compte de la non uniformité de l'entrefer.* Université Mentouri Constantine : s.n., 2010.
12. **BENZAOU, W.** *Diagnostic de la machine asynchrone à base d'observateur.* Ecole Nationale Polytechnique, Hassen BADI, ElHarrach : s.n., 2007.

13. **CASIMIR, R.** *Diagnostic des défauts des machines asynchrones par reconnaissance des formes*. Ecole doctorale électronique, électrotechnique, automatique de Lyon : s.n., 2003.
14. **Jawad, F.** *Etude du problème inverse en électromagnétisme vue de la localisation des défauts de désaimantation dans les actionneurs à aimants permanents*. Université de technologie de Belfort : s.n., 2008.
15. **Merad, Rafik.** *Outils de diagnostic appliqués à la machine asynchrone*. Université de Constantine : s.n., 2006.
16. **R. Yacamini, K.S. Smith, L. Ran.** *Monitoring torsional vibrations of electro-mechanical systems using stator currents*. 72–79, s.l. : Journal of Vibration and Acoustics 120 , 1998.
17. **Mario Eltabach, Jerome Antoni, Micheline Najjar.** *Quantitative analysis of noninvasive diagnostic procedures for induction motor drives*. Université Saint Esprit de Kaslik, Liban, University of Technologies of Compiègne, France : s.n., 2007.
18. **A. Bellini, F. Filippetti, G. Franceschini, C. Tassoni, G.B. Kliman.** *Quantitative evaluation of induction motor broken bars by means of electrical signature analysis*. s.l. : IEEE Transactions on Industry Applications 37 , 2001. 1248–1255.
19. **Kada Ihcene, Mahmoud Bacha Chaimaa.** *Diagnostic de la machine asynchrone à l'aide des réseaux de neurones artificiels*. Université Blida1 : s.n., 2020.
20. **RAHMANI, M.Z. TAIBI et O.** Diagnostic de défauts électriques de la MAS à Rotor à Cage d'écureuil par les réseaux de neurones. El-Harrach : Ecole Nationale Polytechnique, 2009.
21. **JEANNOT, C. PRÉVÉ et R.** « Guide de conception des réseaux électriques industriels » . s.l. : Schneider Electric, 1997.
22. **Adil, Réalisé par : Mr. HAMADOU.** Modélisation numérique d'un moteur asynchrone à cage d'écureuil. blida : s.n., 2015.
23. **Meftah, LAKHDARI.** simulation et commande de la MAS double étoile pour aérogénération. SETIF : UNIVERSITE FERHAT ABBAS-SETIF-1, 2014.
24. **Assam, A.** « Identification des Machines Asynchrones en Vue de Leurs diagnostics », Thèse de magister. Sétif : l'Université de Sétif, 2010.
25. **EDDINE, EL BRAZZI NACER.** Modélisation et diagnostic d'une MADA. Blida : s.n., 2019.
26. **Hautier, J.-P. Caron et J.-P.** Modélisation et commande de la machine asynchrone. Paris : s.n., 1995.
27. **Chee-Mun, O.** dynamic simulation of electric machinery using Matlab/Simulink. london : Hall International (UK, 1998.
28. **Piotr, W.** Dynamics and control of electrical drives, . Opole, Poland : s.n., 2011.
29. **Zayza ELMoctar El, Cheriv Abdelmoumen.** *Modélisation et diagnostic de la machine asynchrone à cage lors de l'ouverture d'une phase statorique*. Université Blida1 : s.n., 2020.
30. **CHAHMI, A.** *Identification paramétrique de la machine asynchrone dédiée au diagnostic*. Université Mohamed Boudiaf, Oran : s.n., 2017.

31. **Ayache Mohamed, El Fani Yassine.** *Modélisation et Diagnostic des défauts de court-circuit entre spires d'une machine asynchrone* . Université Blida1 : s.n., 2018.