

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

BADJI MOKHTAR- ANNABA UNIVERSITY
UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR- ANNABA



جامعة باجي مختار - عنابة

Année : 2017

Faculté : Sciences de L'Ingéniorat

Département : Électromécanique

MÉMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de : MASTER

Etude et Diagnostic de mauvais branchement d'un moteur à induction

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Electromécanique

Spécialité : Electromécanique

Par : KERROUM Badreddine

DEVANT LE JURY

Président :	BOURAS Slimane	U.B.M. Annaba
Directeur de mémoire :	BOURAS Slimane	U.B.M. Annaba
Examineur :	BERKANIM	U.B.M. Annaba
	TOLBAS	U.B.M. Annaba
	CHEGHIB.H	U.B.M. Annaba

DEDICACES

*A mes chers parents, pour leurs soutien
inconditionnel, leurs encouragements, et
Bien sur pour m'avoir permis de réaliser mes
études dans les meilleures conditions ;*

A mon frère Mohamed ;

*A mes sœurs Fatima ... Nardjas... Siham et a
toute ma grande famille ;*

*A ceux qui m'ont soutenu pendant toute la
durée de mes études...*

...je dédie ce modeste travail.

KERROUM Badreddine

Remerciement

« *Le grand merci pour ALLAH* »

Un Remerciement particulier à Monsieur Bouras Slimane, Professeur au sein du département d'Electromécanique pour son soutien scientifique et humain ainsi que la confiance qu'il me témoigne tout au long de ce travail d'initiation à la recherche.

Je tiens à remercier très vivement autre fois Monsieur Bouras Slimane, Professeur au sein du département d'Electromécanique pour m'avoir fait l'honneur de présider le jury de soutenance. Mes remerciements vont également à, Messieurs BERKANI.M, TOLBA.S et CHEGHIB.H, Maitres de conférences au sein du département d'Electromécanique, qui m'a fait l'honneur d'être des examinateurs de ma mémoire.

Mes remerciements s'adressent aussi à Mademoiselle MENASRIA.Y maitre de conférences au sein du département d'Electromécanique de l'université d'Annaba pour ses conseils et toute l'aide qu'elle a pu m'apporter durant cette mémoire.

Enfin, je ne saurais terminer ces remerciements sans oublier toute ma famille, sans exception, ainsi que tous mes amis.

RESUME

Ce travail s'inscrit dans la thématique de la surveillance et du diagnostic des défauts de la machine asynchrone triphasée à cage d'écureuil. Le choix de cette dernière est justifié par le succès grandissant qu'elle a suscité, notamment, dans les entraînements électriques à vitesse variable. Sa simplicité de construction, son faible coût d'achat et sa robustesse mécanique, surtout sa quasi-absence d'entretien, fait qu'elle s'impose et s'imposera dans le secteur industriel. Malgré ces atouts, la machine asynchrone à cage n'est pas à l'abri de certains défauts électriques et mécaniques à savoir les dégradations des enroulements statoriques et les roulements. A notre sens, certaines dégradations électriques au stator ont des conséquences beaucoup plus lourdes comparativement aux défauts de barres rotoriques dont les chercheurs s'intéressent énormément. Il est donc important de développer une méthodologie de détection et de diagnostic prédictif de ces défauts électriques qui mettent la machine directement hors services si certaines mesures de protections ne sont pas prises

Mots clés : Machine asynchrone à cage d'écureuil, surveillance et diagnostic, FFT, MCSA.

ABSTRACT

This work of thesis is a part of the thematic of monitoring and fault diagnosis of the squirrel cage three-phase induction machine. The choice of this type of machine is justified by the growing success it has exhibited, mainly, in the electric drives with variable speed.

Besides its simple construction, low cost, mechanical robustness and mainly its quasi absence of maintenance justified its large presence in the industrial sector. Despite all these advantages, it is important to develop some diagnostic systems to detect, in advance, the failures that may appear in this type of machine.

Our main contribution resides in the development of methods and technologies for monitoring and fault diagnosis in electrical machines such as the stator imbalance, in our opinion, certain electrical impairments to the stator have far greater consequences compared to the defects of rotor bars which researchers are very interested in. It is therefore important to develop a methodology for the detection and predictive diagnosis of these electrical faults, which put the machine directly out of service if some protective measures are not taken.

Key words: Squirrel cage induction machine, Monitoring and Diagnosis, FFT, MCSA .

المخلص

يهتم هذا البحث بمراقبة وتشخيص الأخطاء في الآلات الكهربائية غير المتزامنة ، و التذكير ببعض المفاهيم الأساسية في هذا المجال، وإلقاء الضوء على العديد من الطرق المستعملة في معالجة مشكلات المراقبة والصيانة وتشخيص الأخطاء فيها، ومن ثم وضع التدابير اللازمة و البحث عن الخيارات الناجعة والمواصفات ونماذج الأداء المنشود.

يندرج عملنا هذا في تشخيص الأخطاء في الآلات الكهربائية غير المتزامنة ذات قفص السنجاب.الغرض من هذا، هو الحفاظ على الآلة الكهربائية و صيانتها من أجل تمديد مدة خدمتها وتحسين أدائها و مردودها. ويرجع سبب دراسة هذه الآلات الكهربائية غير المتزامنة لكونها الألة الأكثر استعمالا في المجال الصناعي وذلك لبساطة بنيتها، انخفاض تكاليف الشراء والتصنيع، قوتها ومناقتها الميكانيكية و عدم تكاليف صيانتها. نركز في عملنا على عدة أبحاث قام بها باحثون في هذا المجال من أجل تشخيص ومراقبة الأخطاء في الآلة الكهربائية غير المتزامنة ذات قفص السنجاب . ومن بين هذه الأخطاء نذكر: توصيل التغذية رديء غياب أحد الأطوار، خطأ في توصيل الأطوار الثلاثة تركيب الحياضي بدل تركيب أحد الأطوار. بما أن تيار الساكن للآلة الكهربائية مقدار قابل للقياس والمراقبة اللحظية، اعتمدنا في بحثنا هذا على تتبع إشارة شعاع هذا التيار ووضع عدة طرق و تقنيات من اجل المراقبة اللحظية لهذا العامل وإجراء مقارنة إشارته مع إشارة تيار الآلة السليمة.

الكلمات المفتاح : تشخيص الأعطال، المراقبة، المحرك غير المتزامن ذو قفص السنجاب، محول فوريي السريع، تحليل الطيف التيار الساكن.

Table des matières

Résumé

Abstract

الملخص

Introduction générale..... 1

Chapitre I Moteur a induction et ses défauts

1.1.Introduction..... 4

1.2. Moteur à induction..... 4

1.3. Constitution de la machine asynchrone : 4

1.3.1. Stator 5

1.3.2. Rotor à cage..... 6

1.3.3. Organes mécaniques..... 7

1.4. Fonctionnement d'un moteur asynchrone 8

1.4.1. Particularités 8

1.4.2. Principes généraux 8

1.5. Couplage des enroulements 9

1.5.1. Définitions 9

1.5.2. Types de couplage 9

1.5.3. Couplage des moteurs asynchrones triphasés 9

1.6. Étude statistique des différents défauts de la machine asynchrone 10

1.7. Présentation des différentes défaillances du moteur asynchrone à cage d'écureuil..... 11

1.7.1 Défaillances au rotor 12

1.7.1.1. Ruptures de barres 12

1.7.1.2. Ruptures d'anneaux 13

1.7.1.3. Excentricité statique et dynamique 13

1.7.2. Défaillances au stator 14

1.7.2.1. Les Défauts de mauvais branchement 15

1.7.2.2. Défauts d'isolant dans un enroulement..... 15

1.7.2.3. Court-circuit entre spires 16

1.7.2.4. Court-circuit entre phases 16

1.7.2.5. Court-circuit phase/bâti..... 16

1.7.3. Défauts de circuit magnétique 17

1.7.4. Défaillances mécaniques..... 18

1.7.4.1. Défauts de roulements	18
1.8. Conclusion	18

Chapitre II Les méthodes de diagnostic de MAS

2.1. Introduction	20
2.2. Terminologie dédiée au diagnostic	20
2.3. Principe du diagnostic des défauts dans la machine asynchrone	21
2.4. Aperçu sur les méthodes de diagnostic	21
2.4.1. Diagnostic par la méthode MCSA	21
2.4.2. Analyse des signaux vibratoire et acoustiques	22
2.4.3. Analyse des flux.....	22
2.4.4. diagnostic par mesure du couple électromagnétique	22
2.4.5. Diagnostic à base de modèle qualitatif	23
2.4.6. Diagnostic par analyse de la température : La Thermographie	23
2.4.7. Diagnostic par les analyses chimiques.....	24
2.4.8. Diagnostic des défauts par analyse du vecteur de Park	24
2.4.9. Méthodes basées sur l'intelligence artificielle.....	24
2.5. méthode de traitement des signaux dédiées au diagnostic des défauts de mauvais branchement	25
2.5.1. La transformée de Fourier rapide (FFT)	25
2.5.2. Méthode de représentation tridimensionnelle des courants statoriques (3D).....	26
2.6. Conclusion	28

Chapitre III Modélisation et simulation de la machine asynchrone

3.1. Introduction.....	30
3.2. Hypothèses simplificatrices	31
3.3. Les équations de la machine asynchrone	31
3.3.1. Équation électrique	32
3.3.2. Équation magnétique	32
3.3.3. Equation mécanique.....	33
3.4. Transformation triphasé – diphasé.....	33
3.5. Transformation de Park.....	35
3.6. Choix du repère dq.....	37
3.7. Dans un référentiel lié au champ tournant.....	37
3.8. Simulation numérique	38

3.8.1. Les étapes de simulation numérique	39
3.8.2. Les résultats de simulation du moteur sains	42
3.8.3. Les résultats de simulation du moteur avec défaut	42
3.8.4. Discussion des résultats de simulation.....	44
3.9. Conclusion	44

Chapitre IV La signature du courant dédiée au diagnostic des défauts de mauvais branchement du MAS.

4.1. Introduction.....	46
4.2. Mode de détection des défauts par traitement du signal	47
4.3. Effets des défauts Electriques sur les courants statoriques.....	48
4.4. Campagnes d’Essais et Description.....	48
4.4.1. Procédure de la réception des signaux	48
4.4.2. Les étapes de réalisation de la technique du diagnostic.....	48
4.5. Résultats expérimentaux et Analyse.....	50
4.5.1. Signature du courant statorique dans le cas du moteur sain.	50
4.5.2. Défaut de manque d’une phase d’alimentation.....	50
4.5.3. Défaut de mauvais contact	52
4.5.4. Défaut Erreur de branchement.....	53
4.6. Les résultats dans le même plan	54
4.7. Signatures des défauts par la reconnaissance des formes en 3D.....	55
4.8. Interprétation des résultats	56
4.9. Synthèse des techniques du diagnostic utilisées	56
4.10. Conclusion.....	58
Conclusion générale	59

Annexe.

Références Bibliographiques.

Table des figures

Chapitre I Moteur a induction et ses défauts

Figure .1.1. Les éléments de constitution d'une machine asynchrone à cage d'écureuil	6
Figure .1.2. Vu stator d'une machine asynchrone	7
Figure .1.3. Vue schématique en perspective du rotor.....	8
Figure .1.4. Types du couplage.....	11
Figure .1.5. Proportion des défauts 1988	11
Figure .1.6. Pourcentage des défauts1995	12
Figure .1.7. Pourcentage des défauts 2008	12
Figure .1.8. Rupture de barre	14
Figure .1.9. Modélisation schématique de l'excentricité statique et dynamique.....	15
Figure .1.10. Différents défauts statoriques.....	18

Chapitre II Les méthodes de diagnostic de MAS

Figure .2.1. Les déférents points de mesure.....	22
Figure .2.2. Capteur de température dans une plaque à bornes	24
Figure .2.3. Image colorée infrarouge thermique	24
Figure .2.4. Principe de la Transformée de Fourier	27
Figure .2.5. Machine saine.....	28
Figure .2.6. Machine en rupture de barre.....	28

Chapitre III Modélisation et simulation de la machine asynchrone

Figure .3.1. Modèle triphasé de la machine asynchrone.....	31
Figure .3.2. Transformation triphasé-diphasé.....	33
Figure .3.3. Transformation de Park.....	33
Figure .3.4. Modèle SIMULINK prédéfinie d'un moteur asynchrone à cage.....	40
Figure .3.5. Modèle SIMULINK d'un moteur asynchrone à cage	40
Figure .3.6. Courants statoriques	41
Figure .3.7. Couple électromagnétique	41
Figure .3.8. vitesse de rotation.....	42
Figure .3.9. Courants statoriques avec manque de phase	42
Figure .3.10. Couple électromagnétique avec manque de phase	43
Figure .3.11. Vitesse avec manque de phase	43

Chapitre IV La signature du courant dédiée au diagnostic des défauts de mauvais branchement du MAS.

Figure .4.1. Banc d'Essai	48
Figure .4.2. Présentation d'acquisition et Traitement des signaux	48
Figure .4.3. Le courant statorique de la machine saine.....	49
Figure .4.4. Le spectre du moteur sain	50
Figure .4.5. Le courant statorique du moteur avec défaut de manque d'une phase.....	51
Figure .4.6. Le spectre du moteur avec défaut de manque d'une phase	51
Figure .4.7. Le courant statorique du moteur avec défaut de mauvais branchement.....	52
Figure .4.8. Le spectre du moteur avec défaut de mauvais branchement	52
Figure .4.9. Le courant statorique du moteur avec défaut d'erreur de branchement	53
Figure .4.10. Le spectre du moteur avec défaut d'erreur de branchement.....	53
Figure .4.11. Les spectres du moteur sain et avec défaut de manque d'une phase.....	54
Figure .4.12. Les spectres du moteur sain et avec défaut de mauvais branchement.....	54
Figure .4.13. Les spectres du moteur sain et avec défaut d'erreur de branchement	55
Figure.4.14. Motifs en 3D pour le mode de fonctionnement du moteur sain	55
Figure .4.15. Motifs en 3D pour le mode de fonctionnement du moteur en.....	56
présence d'un défaut de manque d'une phase.....	56
Figure .4.16. Synthèse du diagnostic étudié	57

Notation et symboles

n_s : Vitesse de synchronisme de la machine asynchrone (tr/min) ; $n_s = 60f/p$

p : nombre de paires de pôles

n_r : Vitesse de rotation du rotor (tr/mn) ; $n_r = n_s (1-g)$

g : glissement

C : Le couple utile (ou mécanique)[N.m], $C = (P \cdot 60) / 2\pi n$

n : la vitesse de rotation du moteur [tr/min]

f_s : fréquence d'alimentation

f_r : fréquence de rotation mécanique

$V_{sa(1)}$, $V_{sb(2)}$, $V_{sc(3)}$: Tensions statoriques suivants les axes a_s , b_s et c_s

$V_{ra(1)}$, $V_{rb(2)}$, $V_{rc(3)}$: Tensions rotoriques suivants les axes a_r , b_r et c_r

$V_{s\alpha,\beta}$, $V_{r\alpha,\beta}$: Tension statorique (respectivement rotorique) suivant l'axe α (ou β)

$V_{sd,q}$, $V_{rd,q}$: Tension statorique (respectivement rotorique) suivant l'axe (d ou q)

$i_{ra(1)}$, $i_{rb(2)}$, $i_{rc(3)}$: Courants rotoriques suivants les axes a_r , b_r et c_r

$i_{sa(1)}$, $i_{sb(2)}$, $i_{sc(3)}$: Courants statoriques suivants les axes a_s , b_s et c_s

$I_{s\alpha,\beta}$, $I_{r\alpha,\beta}$: Courant statorique (respectivement rotorique) suivant l'axe α (ou β)

$i_{sd,q}$, $i_{rd,q}$: Courant statorique (respectivement rotorique) suivant l'axe d (ou q)

$\Phi_{sa(1)}$, $\Phi_{sb(2)}$, $\Phi_{sc(3)}$: Flux statorique suivant les a_s , b_s et c_s

$\Phi_{sr(1)}$, $\Phi_{sr(2)}$, $\Phi_{sr(3)}$: Flux rotoriques suivant les a_r , b_r et c_r

$\Phi_{sd,q}$, $\Phi_{rd,q}$: Flux statorique (respectivement rotorique) suivant l'axe d (ou q)

$\Phi_{s\alpha,\beta}$, $\Phi_{r\alpha,\beta}$: Flux statorique (respectivement rotorique) suivant l'axe α (ou β)

J : Moment d'inertie

$[L]$: Matrice inductance

L_{fs} : Inductance de fuite au stator

L_m : Inductance mutuelle entre le stator et le rotor

l_{ms} : Inductance magnétisante

l_r : Inductance propre cyclique du rotor

l_s : Inductance propre cyclique du stator

$[R]$: Matrice résistive

R_s , R_r : Résistance statorique, respectivement rotorique

R_{ra} , R_{rb} , R_{rc} : Résistance rotorique de la phase a_r , b_r , c_r

R_{sa} , R_{sb} , R_{sc} : Résistance statorique de la phase a_s , b_s , c_s

l_s : est l'inductance propre d'une phase statorique.

l_r : est l'inductance propre d'une phase rotorique.

m_s : est l'inductance mutuelle entre deux phases statoriques.

m_r : est l'inductance mutuelle entre deux phases rotoriques.

m_{sr} : est le maximum de l'inductance mutuelle entre une phase statorique et une phase rotorique.

[Rr] : vecteur des résistances rotorique

[Rs] : vecteur des résistances statorique

[Vr] : vecteur des tensions rotorique

[Vs] : vecteur des tensions statorique

θ_s : Déphasage entre l'axe (A) de la phase statorique et l'axe direct de Park

θ_r : Déphasage entre l'axe (A) de la phase statorique et l'axe (a) de la phase rotorique

Ω : Vitesse mécanique du rotor en tr /mn

J : Moment d'inertie du rotor.

f_v : Coefficient de frottement visqueux.

C_r : Couple de charge.

C_e : couple électromagnétique.

ω_m : vitesse angulaire mécanique du rotor ($\omega_m = p\omega$)

ω_{r0} : la vitesse angulaire à vide

θ_r : L'angle mécanique du rotor

ϕ : déphasage des courants rotoriques par rapport aux courants statoriques

θ : angle mécanique dans le repère fixe du stator

ω_{r0} : la vitesse mécanique angulaire du rotor

Φ : Le flux magnétique

B : l'induction magnétique

A : Surface

ϕ_A : angle de phase de la modulation.

$i_r(t)$: la modulation de phase due aux oscillations du couple et de la vitesse

$X(t)$: signal généré par le défaut à caractère transitoire

$X(f)$: la valeur d'un coefficient de Fourier à la fréquence

f_1 : fréquence fondamentale (Hz)

$x(t)$: représente le signal temporel échantillonné

$w(t)$: fenêtre temporelle de largeur T

fr : fréquence de rotation de l'arbre

ia, ib, et ic : les courants statoriques des trois phases

im : valeur maximale du courant

ω : pulsation

ϕ : angle de la phase

t: temps

MCSA : Motor Current Signature Analysis (Analyse des signatures des courants de moteur).

FFT : Fast Fourier transformer (transformée de Fourier rapide).

TFD : Transformée de Fourier discrète.

W_n : Les affixes des nombres, appelés coefficients de la T.F.D. se trouvent sur le cercle unité, ce sont les racines de l'équation $Z^N - 1 = 0$ ou racines Nièmes de l'unité.

C_N : Nombre d'opération du calcul.

\mathbb{N} : Ensembles de nombres complexes.

IBM : International Business Machines Corporation.

Introduction générale

Introduction générale

La machine électrique est l'organe principal dans les entraînements électriques et la conversion électromécanique des énergies. De par l'importance de son rôle dans les chaînes de production, elle devient aussi le maillon faible. C'est pour cette raison que la surveillance des machines électriques s'est fortement développée dans le monde industriel car la volonté d'améliorer la sûreté de fonctionnement de ces entraînements et par conséquent la durée de vie devient de plus en plus indispensable. De par sa robustesse et son faible coût, le moteur asynchrone à cage occupe un rang privilégié. Ces dernières décennies, la détection précoce et le diagnostic des défauts affectant les moteurs à induction a fait l'objet de beaucoup de recherches. Il existe plusieurs types de techniques de détection et de diagnostic, à savoir l'analyse vibratoire, l'analyse acoustique et thermographique. Seulement, ces méthodes sont principalement préconisées pour la détection des défauts mécaniques (roulement, balourd...).

Une nouvelle technique est également utilisée de plus en plus 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.

L'apparition d'un défaut électrique ou mécanique au niveau du moteur peut engendrer des frais de remplacement, des arrêts de production, il est alors indispensable de prévoir ces défaillances et parvenir à les éviter ou bien à les remédier à temps en prévoyant des arrêts programmés tout en ayant tout le temps pour s'y préparer. C'est pour cette raison qu'il est donc nécessaire d'identifier et de développer une technique ou un système de détection prédictive de ces dégradations pouvant prévenir la présence d'un défaut à sa naissance.

Beaucoup d'études ont montré que l'analyse du courant statorique de la machine asynchrone permet de révéler naturellement l'existence de la quasi majorité des défauts électriques et mécaniques survenant au niveau des entraînements électriques.

Cette approche de surveillance des entraînements électriques est connue sous le nom de MCSA (Motor Current Signature Analysis) et a fait l'objet de plusieurs publications pendant ces dix dernières années. Par contre son utilisation pour identifier une gamme de défauts beaucoup plus étendue susceptible d'affecter non seulement le moteur mais toute la chaîne de transmission.

Le premier avantage de cette technique est qu'elle permet, de part les potentialités du courant statorique, la détection d'un grand nombre des défauts électromécaniques sans ajout de capteurs supplémentaires spécifiques à des grandeurs mécaniques ou relatives aux vibrations.

Le deuxième avantage, est que les capteurs de courant sont désormais présents dans tous les systèmes de commande des entraînements électriques et offrent un accès à la mesure sans aucun dérangement du fonctionnement de la machine.

Notre travail s'intéresse à la détection de défauts électriques qui sont très dangereux pour le moteur et qui, fort heureusement, ne sont pas courants. Il s'agit d'un défaut de mauvais branchement qui provoque un déséquilibre électrique extrême du moteur lors de son fonctionnement lié au manque carrément d'une phase et aux erreurs de branchement dues à la confusion du neutre avec la phase. Ce dernier défaut arrive généralement lors du premier montage de l'installation ou bien après une réparation ou une intervention sur le circuit de puissance du moteur.

Afin de parvenir à bien encadrer ce travail l'organisation de notre mémoire sera comme suit L'organisation en quatre chapitres retenue pour la présentation de ce manuscrit traduit la démarche suivie pendant les travaux de cette mémoire.

Le premier chapitre est scindé en deux parties dont la première est consacrée à un rappel sur la construction de la machine asynchrone triphasée et le principe de fonctionnement de cette dernière, quant à la deuxième partie, de ce chapitre elle a été réservée à la présentation des défaillances que peut subir un moteur asynchrone en service.

Le deuxième chapitre discutera des techniques envisagées pour la détection et le diagnostic des défauts de déséquilibre électrique extrême : Le manque phase et l'erreur de branchement.

Le troisième chapitre développera la description mathématique (modélisation) de la machine asynchrone saine et nous évoquerons les modèles de cette dernière en présence de certaines défaillances. affine de faire une simulation numérique et voire la différence entre le comportement des trois paramètres courant, couples et vitesse dans les deux cas sain et défaillante.

Le quatrième chapitre qui est la partie spéciale de ce travail d'initiation à la recherche est consacré à la présentation du banc d'essais ayant servi à la campagne expérimentale et qu'on a pu réaliser dans notre laboratoire de machines électriques ainsi que les techniques utilisées pour la création volontaire des défaillances simples et combinées précitées. Il aura aussi pour mission la discussion et l'analyse des résultats expérimentaux obtenus concernant les signatures des courants statoriques du moteur en se basant sur **la transformée de Fourier rapide (FFT)** , **la reconnaissance des formes en 3D**, deux approches seront suppléées par une interprétation du carré des intensités des trois phases d'alimentation contribuant à la reconnaissance des défauts qui peuvent avoir les mêmes caractéristiques fréquentielles et par conséquent pouvant se masquer l'un l'autre. Le tout apparaît comme une méthodologie suffisamment précise pour détecter et surveiller les anomalies précitées dès leur naissance. Un organigramme de diagnostic a été conçu afin de simplifier la compréhension et l'application pratique de cette méthodologie. Une conclusion générale résumant ce qui a été atteint par ce travail et des perspectives clairement orientés clôturent ce travail.

Chapitre I

Moteur à induction et ses défauts

1.1. Introduction

Ce chapitre est reparti en deux parties. La première partie de ce chapitre fait un rappel sur la constitution du moteur asynchrone à cage d'écureuil et le principe de son fonctionnement. La seconde partie traite les différentes défaillances de nature électrique et mécanique qui peuvent affecter le moteur asynchrone et certaines de leurs causes, nous indiquons à la présentation des défauts de mauvais branchement électriques qui sont l'objectif de cette étude, et ses derniers sont très virulents pour le moteur asynchrone et qui ont pour conséquence la mise hors service directe de l'actionneur si certaines précautions ne sont pas prises.

1.2. Moteur à induction

1.2.1. Identification et Rôle

Les moteurs asynchrones sont habituellement alimentés au niveau du stator, et le courant est induit dans le rotor. C'est pour cette raison que l'on parle également de « moteurs ou de machines à induction ».

Le moteur asynchrone (ou moteur d'induction) permet la transformation de l'énergie électrique en énergie mécanique. [4]

1.2.2. Principaux types de moteurs

- A cage d'écureuil ou à rotor en court-circuit
- A rotor bobiné [1]

1.3. Constitution de la machine asynchrone :

La machine asynchrone, souvent appelée moteur à induction, comprend un stator et un rotor, constitués des 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. Le rotor est monté sur un axe de rotation. Selon que les enroulements du rotor sont accessibles de l'extérieur ou sont fermés sur eux-mêmes en permanence, on définit deux types de rotor : bobiné ou à cage d'écureuil. Toutefois, nous admettons que sa structure est, électriquement, équivalente à celle d'un rotor bobiné dont les enroulements sont en court-circuit.

Dans ce travail, nous nous intéressons à la machine asynchrone à cage d'écureuil les éléments de constitution d'une machine asynchrone à cage d'écureuil sont illustrés dans la figure 1.1. [2]

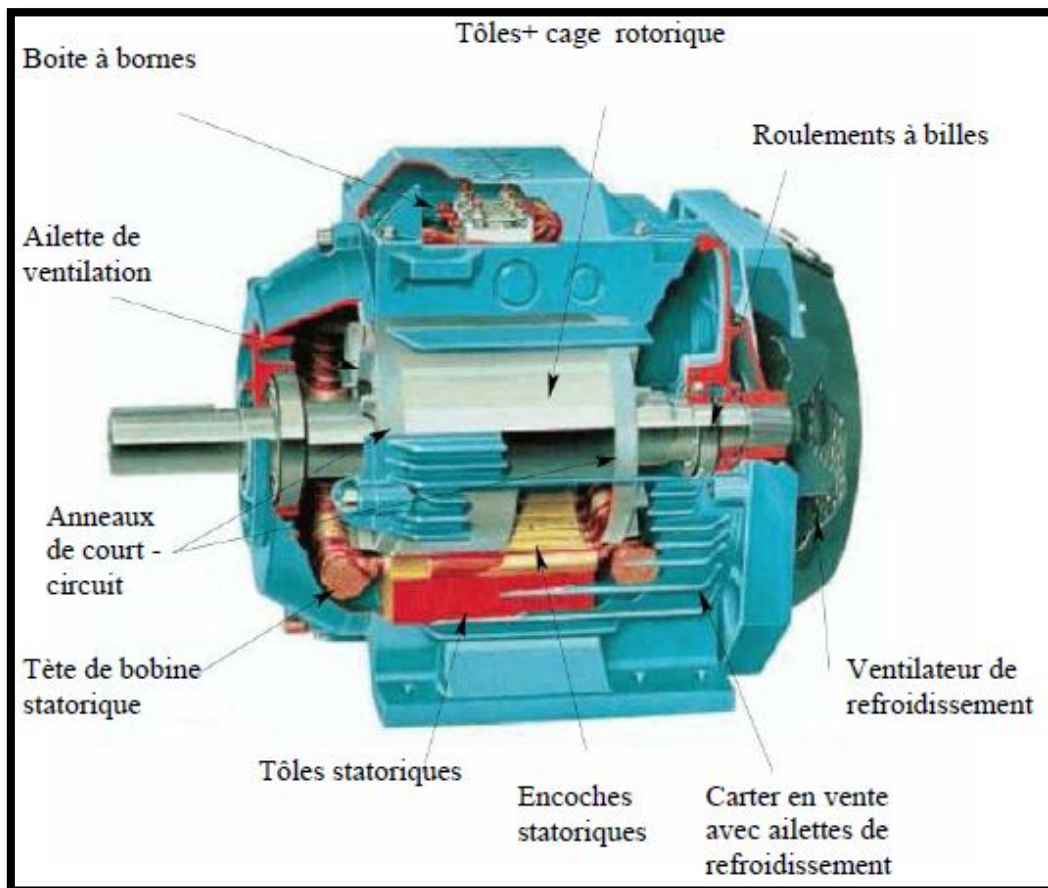


Figure .1.1. Les éléments de constitution d'une machine asynchrone à cage d'écureuil [2]

1.3.1. 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 les quelles sont découpées des encoches parallèles à l'axe de la machine (Figure. 1.2).

Le bobinage statorique peut se décomposer en deux 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. [2]

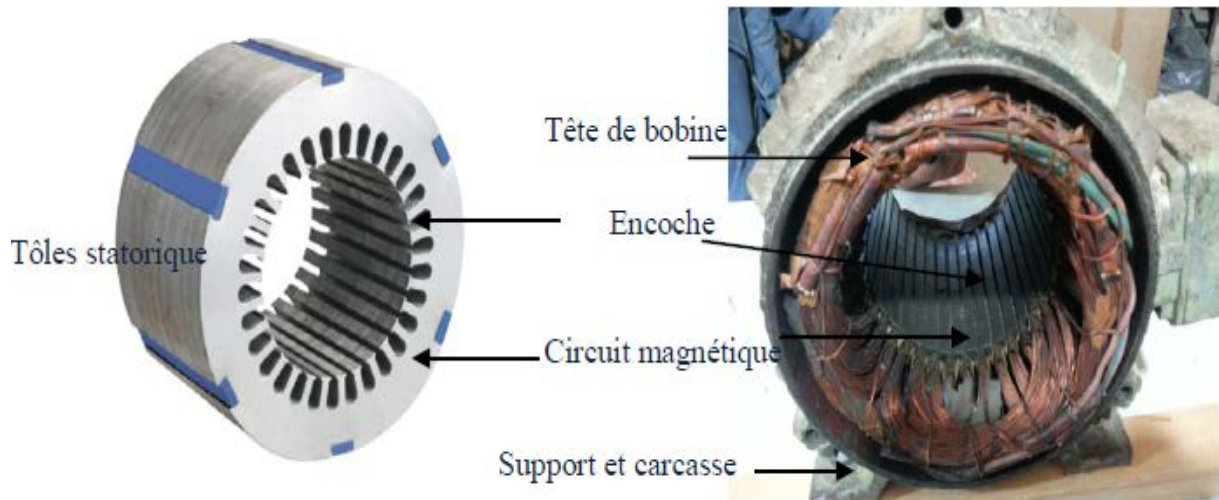


Figure.1.2. Vue stator d'une machine asynchrone [11]

1.3.2. Rotor à cage

Dans le rotor à cage, les anneaux de court-circuit permettent la circulation des courants d'un conducteur d'encoche (barre rotorique) à l'autre. Ces barres conductrices sont régulièrement réparties, et constituent le circuit du rotor (Fig.1.3). Cette cage est insérée à l'intérieur d'un circuit magnétique constitué de disques en tôles empilés sur l'arbre de la machine analogue à celui du moteur à rotor bobiné.

Dans le cas de rotors à cage d'écureuil, les conducteurs sont réalisés par coulage d'un alliage d'aluminium, ou par des barres massives de cuivre préformées et frettées dans les tôles du rotor. Il n'y a 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. De ce fait, son prix de revient est inférieur. De plus, il dispose d'une plus grande robustesse. Il constitue la plus grande partie du parc de moteurs asynchrones, actuellement, en service.

Son inconvénient majeur est qu'il a, au démarrage, de mauvaises performances (courant élevé et faible couple). Pour remédier à cette situation, deux autres types de cages ont été développés : Rotor à double cage et rotor à encoches profondes. [2]

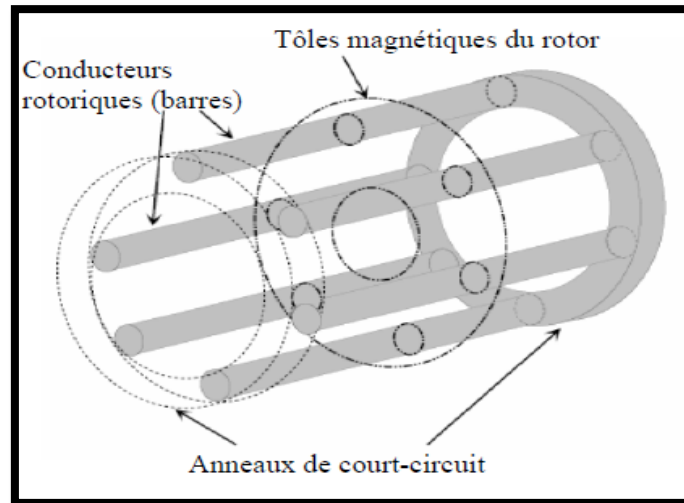


Figure .1.3. Vue schématique en perspective du rotor [2]

1.3.3. Organes mécaniques

La carcasse sert de support. Elle joue le rôle d'enveloppe et assure la protection contre l'environnement extérieur. L'arbre est un organe de transmission. Il comprend une partie centrale qui sert de support au corps du rotor et un bout d'arbre sur lequel est fixé un demi-accouplement.

Il est, généralement, constitué en acier moulé ou forgé. Son dimensionnement est fonction des plusieurs efforts :

- Efforts de flexion (force centrifuge qui s'exerce sur lui, attraction magnétique radiale,...etc.).
- Efforts radiaux et tangentiels dus aux forces centrifuges.
- Efforts de torsion (couple électromagnétique transmis en régime permanent et transitoire).

Il est supporté par un ou plusieurs paliers. Ces paliers soutiennent le rotor et assurent la libre rotation. Le second palier est libre pour assurer les dilatations thermiques de l'arbre. Une isolation électrique de l'un des paliers assure l'élimination des courants dans l'arbre dus aux dissymétries des réluctances du circuit magnétique. Ils sont, généralement, à roulements pour les machines de petite et moyenne puissances.

Afin d'assurer la variation de vitesse des moteurs électriques mais aussi la conversion de l'énergie, de nombreuses machines se voient associer à un convertisseur. Ainsi, de nos jours, on trouve dans un grand nombre de procédés industriels, des associations entre des convertisseurs statiques et des machines électriques (pompage, levage,...etc). Cela permet de fournir aux moteurs des tensions et des courants de fréquence variable servant à commander la machine en couple ou en vitesse. [2]

1.4. Fonctionnement d'un moteur asynchrone

1.4.1. Particularités

Un moteur synchrone est entraîné en fonctionnement normal à sa vitesse de synchronisme (par exemple 1500 tr/min pour un 4 pôle). Le moteur asynchrone doit être entraîné au-delà de sa vitesse de synchronisme pour fournir de l'énergie électrique. Cependant, ces machines asynchrones ne possèdent pas comme les alternateurs un circuit d'excitation. Il faut néanmoins fournir la puissance de magnétisation aussi bien en génératrice qu'en moteur ; il ne s'agit pas d'une puissance utilisable, appelée puissance active, mais d'une puissance effective, puissance réactive, correspondant à une composante du courant à facteur de puissance nul. Ce courant peut être emprunté au réseau mais peut aussi bien être obtenu de façon statique en branchant en parallèle à la machine une batterie de condensateurs. En outre, en ajustant ces condensateurs de façon précise, il est possible, dans certaines conditions, d'utiliser une génératrice asynchrone en dehors d'un réseau, fonctionnement autonome pour alimenter une charge isolée. [3]

1.4.2. Principes généraux

Les courants statoriques créent un champ magnétique tournant dans le stator. La fréquence de rotation de ce champ est imposée par la fréquence des courants statoriques, c'est-à-dire que sa vitesse de rotation est proportionnelle à la fréquence de l'alimentation électrique. La vitesse de ce champ tournant est appelée vitesse de synchronisme.

L'enroulement au rotor est donc soumis à des variations de flux (du champ magnétique). Une force électromotrice induite apparaît qui crée des courants rotoriques. Ces courants sont responsables de l'apparition d'un couple qui tend à mettre le rotor en mouvement afin de s'opposer à la variation de flux : loi de Lenz-Faraday. Le rotor se met donc à tourner pour tenter de suivre le champ statorique.

Le moteur est dit asynchrone car il est dans l'impossibilité, sans la présence d'un entraînement extérieur, d'atteindre la même vitesse que le champ statorique. En effet, dans ce cas, vu dans le référentiel du rotor, il n'y aurait pas de variation de champ magnétique ; les courants s'annuleraient, de même que le couple qu'ils produisent, et la machine ne serait plus entraînée. La différence de vitesse entre le rotor et le champ statorique est appelée vitesse de glissement.

Lorsqu'il est entraîné au-delà de la vitesse de synchronisme « fonctionnement hyper synchrone » la machine fonctionne en générateur alternatif. Mais son stator doit être forcément relié au réseau car lui seul peut créer le champ magnétique nécessaire pour faire apparaître les courants rotoriques. [3]

1.5. Couplage des enroulements

1.5.1. Définitions

Tension nominale : C'est la tension à appliquer au récepteur pour un fonctionnement normale de celui-ci ; une tension trop élevée ou trop faible par rapport à cette tension nominale entraîne la destruction ou un mauvais fonctionnement suivant les cas et les types de récepteurs. [4]

Tension simple : C'est la tension mesurée entre une phase et le neutre du réseau ou des récepteurs. [4]

Tension composée : C'est la tension mesurée entre deux phases quelconques du réseau ou des récepteurs. Une tension donnée sans autre précision est toujours la tension composée. [4]

1.5.2. Types de couplage :

Couplage étoile (Y) : Un moteur est couplé en étoile quand chacun de ses trois enroulements est soumis à la tension simple du réseau. [4]

Couplage triangle (Δ) : Un moteur est couplé en triangle quand chacun de ses trois enroulements est soumis à la tension composée du réseau. [4]

1.5.3. Couplage des moteurs asynchrones triphasés

Choix du couplage des moteurs asynchrones triphasés se fait en fonction de la tension nominale de l'enroulement et de la tension du réseau d'alimentation ; un mauvais choix du couplage entraîne la suralimentation ou la sous-alimentation du moteur donc sa destruction ou son dysfonctionnement suivant les cas. Couplage des enroulements un enroulement est calculé pour être normalement utilisé sous une seule tension appelée tension nominale pour un moteur, la tension nominale est de 220V, c'est toujours la plus petite des deux tensions portées sur la plaque signalétique.

La distribution de l'énergie électrique se fait en basse tension 380 V entre deux phases quelconques et 220V entre chaque phase et le neutre. Les trois barrettes livrées avec le moteur permettent de le coupler en étoile ou en triangle.

La plus petite intensité correspond au branchement étoile (intensité nominale d'un enroulement), et la plus forte intensité au branchement triangle (intensité nominale en ligne).

Nous avons donc deux choix de couplage pour le fonctionnement normal du moteur :

a) Si nous disposons d'un réseau d'alimentation de 220 V, alors le moteur sera couplé obligatoirement en triangle car en étoile il sera sous alimenté.

b) Si nous disposons d'un réseau d'alimentation de 380 V, alors le moteur sera couplé obligatoirement en étoile car en triangle il sera suralimenté. [14]

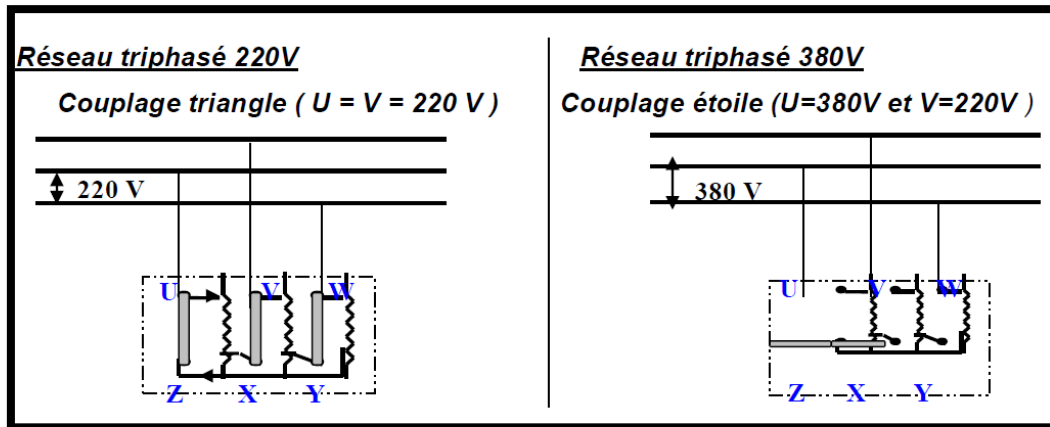


Figure .1.4. Types du couplage [14]

1.6. Étude statistique des différents défauts de la machine asynchrone

Statistiquement, il est difficile de donner des informations exactes des défaillances de machines asynchrone par ce que les défauts ne sont pas automatique dans l'ensemble des parcs d'exploitation et des ateliers de maintenance. De multiples études statistiques sur des machines ont été effectuées depuis les années 80 jusqu'à nos jours. Toutes ces statistiques mentionnées dans [5] concernent les machines asynchrones de moyenne et grande puissance exploitées dans l'industrie.

Une étude statistique, effectué en 1988 par une compagnie d'assurance allemande de systèmes industriels sur les pannes des machines asynchrones de moyenne puissance (de 50 kW à 200kW) a donné les résultats suivants (Figure.1.5). [5]

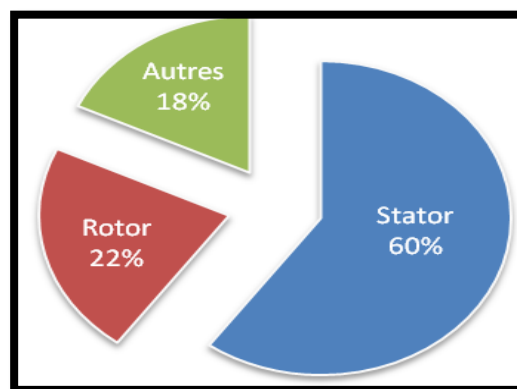


Figure 1.5. Proportion des défauts 1988[5]

Une autre étude statistique [6] faite en 1995 sur des machines de grande puissance (100 kW à 1 MW) donne des résultats qui sont présentés la figure 1.6

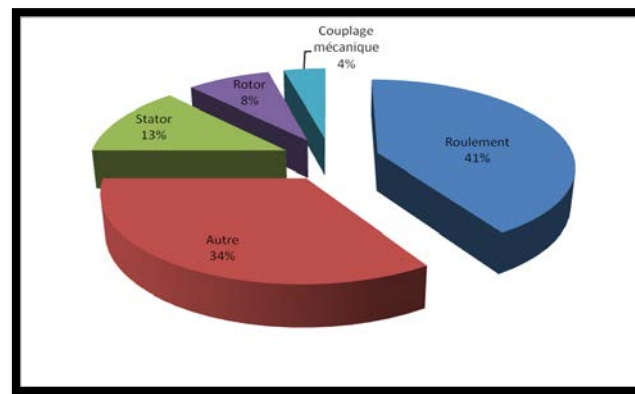


Figure 1.6. Pourcentage des défauts 1995 [6]

De même, une étude statistique, effectuée en 2008 par A. H. Bonnette sur les défauts de la machine asynchrone a donné les résultats sur la figure 1.7

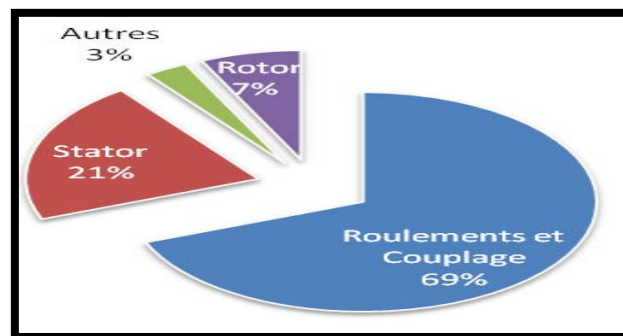


Figure 1.7. Pourcentage des défauts 2008 [7]

D'après les études statistiques de 2008 ; 1995 et de 1988, il est clair que les contraintes mécaniques sont plus grandes pour ces types de machines et en particulier pour celles de gros calibres. Ceci peut justifier le taux élevé des pannes suite aux dégradations des roulements, Par conséquent leur surveillance et leur maintenance s'avèrent indispensables.

1.7. Présentation des différentes défaillances du moteur asynchrone à cage d'écureuil

Les machines électriques et les systèmes d'entraînement sont soumis à de nombreux types de défauts. Ces derniers peuvent être classés selon leurs causes en deux grandes familles **Internes** et **externes**, et on a présentée ces derniers selon les niveaux de construction de MAS

- ❖ Les défauts externes sont provoqués par les tensions d'alimentation, la charge mécanique ainsi que par l'environnement d'utilisation de la machine.
- ❖ Les défauts internes sont causés par les constituants de la machine (circuits magnétiques, bobinages du stator et du rotor, entrefer mécanique, cage rotorique). [8]

Une classification des défauts qui existent dans les machines électriques selon leurs origines est présentée dans le Tableau 1.1. [5]

Tableau 1.1. Défauts des machines électriques selon leurs origines [5]

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

1.7.1 Défaillances au rotor [8]

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

- thermique (surcharge,...)
- électromagnétique (force en induction magnétique)
- résiduel (déformation,...)
- dynamique (arbre de transmission,...)
- mécanique (roulement,...)
- environnemental (agression,...)

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

- ✚ Rupture de barres
- ✚ Rupture d'une portion d'anneau de court-circuit
- ✚ Excentricité statique et dynamique

1.7.1.1. Ruptures de barres

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. La détérioration des barres réduit la valeur moyenne du couple électromagnétique et augmente l'amplitude des oscillations, qui elles-mêmes provoquent des oscillations de la vitesse de rotation, ce qui engendre des vibrations mécaniques et donc, un fonctionnement anormal de la machine. La grande amplitude de ces oscillations accélère la détérioration de la machine.

Ainsi, le couple diminue sensiblement avec le nombre de barres cassées induisant un effet cumulatif de la défaillance. L'effet d'une cassure de barre croît rapidement avec le nombre de barres cassées. [8]



Figure.1.8. Rupture de barre [8]

1.7.1.2. Ruptures d'anneaux

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.

Comme il est difficile de le détecter, ce défaut est généralement groupé, voir confondu, avec la rupture de barres dans les études statistiques. Ces portions d'anneaux de court-circuit véhiculent des courants plus importants que ceux des barres rotoriques. De ce fait, un mauvais dimensionnement des anneaux, une détérioration des conditions de fonctionnement (température, humidité,...) ou une surcharge de couple et donc de courants, peuvent entraîner leur cassure.

La rupture d'une portion d'anneau déséquilibre la répartition des courants dans les barres rotoriques et de ce fait, engendre un effet de modulation d'amplitude sur les courants statoriques similaire à celui provoqué par la cassure de barres. [8]

1.7.1.3. Excentricité statique et dynamique

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 liée à un positionnement incorrect des paliers lors de l'assemblage, à un défaut roulement (usure), à un défaut de charge, ou à un défaut de fabrication (usinage).

Trois cas d'excentricité sont généralement distingués :

- l'excentricité statique, le rotor est déplacé du centre de l'alésage stator mais tourne toujours autour de son axe.
- l'excentricité dynamique, le rotor est positionné au centre de l'alésage mais ne tourne plus autour de son axe.

- l'excentricité qu'on pourrait qualifier de 'mixte', associant les deux cas précédemment cités. [8]

On peut représenter l'excentricité statique et dynamique de la manière suivante :

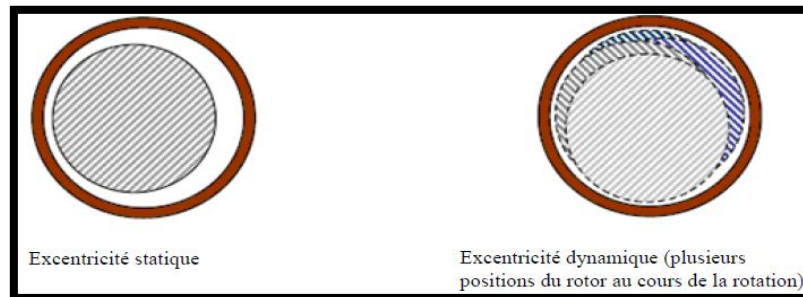


Figure 1.9. Modélisation schématique de l'excentricité statique et dynamique [8]

Ce défaut modifie le comportement magnétique ainsi que mécanique de la machine. En effet, l'augmentation de l'excentricité dans l'entrefer induit une augmentation des forces électromagnétiques qui agissent directement sur le noyau statorique ainsi que l'enroulement correspondant, ce qui engendre une dégradation de son isolation. D'autre part, cette augmentation peut avoir comme conséquence des frottements entre le stator et le rotor en raison des forces d'attraction magnétique qui déséquilibrent le système. Ceci donne naissance à des niveaux de vibration considérables dans les enroulements.

1.7.2. Défaillances au stator [8]

Pour le stator, les défaillances sont principalement dues à un problème :

- électrique (augmentation d'ampérage)
- thermique (surcharge,...)
- mécanique (bobinage,...)
- environnemental (agression,...)

Les défauts qui sont les plus récurrents, localisés au niveau du stator, peuvent être définis comme suit :

- ✚ déséquilibre d'alimentation (erreur de branchement, mauvais contact ou absence d'une phase...)
- ✚ défaut d'isolant
- ✚ court-circuit entre spires
- ✚ court-circuit entre phases
- ✚ court-circuit phase/bâti
- ✚ défaut de circuit magnétique

1.7.2.1. Les Défauts de mauvais branchement

On peut les dire aussi les défauts de déséquilibre d'alimentation, bien que ces défauts apparaissent rarement, mais ils existent réellement et leurs conséquences sont redoutables. Ces défaillances de nature électrique peuvent être aussi bien externes qu'internes. Elles peuvent surgir à n'importe quel moment surtout lorsque le moteur est en service, suite à une mauvaise exploitation du réseau de la part du fournisseur en énergie électrique (SONALGAZ) ou bien suite à une anomalie au niveau de l'appareillage de commutation (contacteur, sectionneur, etc..) ou à des erreurs de branchement de l'utilisateur pendant le montage de l'installation.

Parmi ces types de défaut, nous avons ciblé dans notre travail le défaut manque phase ou coupure d'une phase et le défaut de déséquilibre électrique conséquence d'une erreur de branchement et le défaut de mauvais contact entre la phase et la source.

De grande ampleur qui peut arriver par suite d'une confusion de la phase et du neutre lors du branchement du moteur au réseau d'alimentation. Ces deux défauts ont des conséquences très néfastes pour le moteur à induction dans la mesure où les protections n'interviennent pas à temps, mal calibrées ou bien elles n'existent pas du tout.

1.7.2.2. Défauts d'isolant dans un enroulement

La dégradation des isolants dans les enroulements peut provoquer des courts-circuits. En effet, les différentes pertes (Joule, fer, mécanique,...) engendrent des phénomènes thermiques se traduisant par une augmentation de la température des différents constituants du moteur. Or les matériaux d'isolation ont une limite de température, de tension et mécanique. De ce fait, si l'environnement de travail d'un matériau d'isolation dépasse une de ces limites, ce matériau se dégrade de manière prématurée ou accélérée, puis finit par ne plus assurer sa fonction. [8]

Dans ce cas, un court-circuit peut apparaître dans l'enroulement concerné. Les différentes causes pour ce type de défaut sont :

- dégradation de l'isolant à la fabrication.
- tension de l'enroulement supérieure à la limite du matériau d'isolation.
- courant élevé dans l'enroulement dû à un court-circuit, un défaut du convertisseur, une surcharge. Ceci entraîne une élévation de la température dégradant prématurément le matériau d'isolation.
- vibrations mécaniques.

vieillesse naturelle des isolants. Tous les matériaux isolants ont une durée de vie limitée. Même dans une utilisation 'normale', l'isolant finit naturellement par se dégrader.

- fonctionnement dans un environnement sévère.

1.7.2.3. 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 et, de ce fait, une dégradation accélérée des isolants, pouvant provoquer ainsi, un défaut en chaîne (apparition d'un 2ème court-circuit). Par contre, le couple électromagnétique moyen délivré par la machine reste sensiblement identique hormis une augmentation des oscillations proportionnelle au défaut. [8]

1.7.2.4. 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. [8]

1.7.2.5. Court-circuit phase/bâti

Le bâti a généralement un potentiel flottant, mais pour des raisons de liaisons mécaniques, il est souvent relié à la masse. Si le potentiel est flottant, un court-circuit entre l'enroulement et le bâti n'a pas d'importance du point de vue matériel, excepté les effets capacitifs, le bâti prend alors le potentiel de l'enroulement à l'endroit du court-circuit. Par contre, au niveau de la sécurité des personnes, ce type de défaut peut être très dangereux et il est alors nécessaire de mettre en place des dispositifs de protection (disjoncteurs différentiels). [8]

En présence de ce type de défaillance, la tension de la phase concernée ne change pas. Cependant le courant circulant dans cette phase augmente avec la réduction de la résistance et de l'inductance.

Cette augmentation du courant se traduit par une augmentation de la température pouvant entraîner des défauts d'isolant dans l'enroulement. De plus, cette défaillance va générer une composante homopolaire entraînant l'apparition d'un couple pulsatoire. Une mesure du courant de fuite pourrait permettre de détecter ce type de défaut. [8]

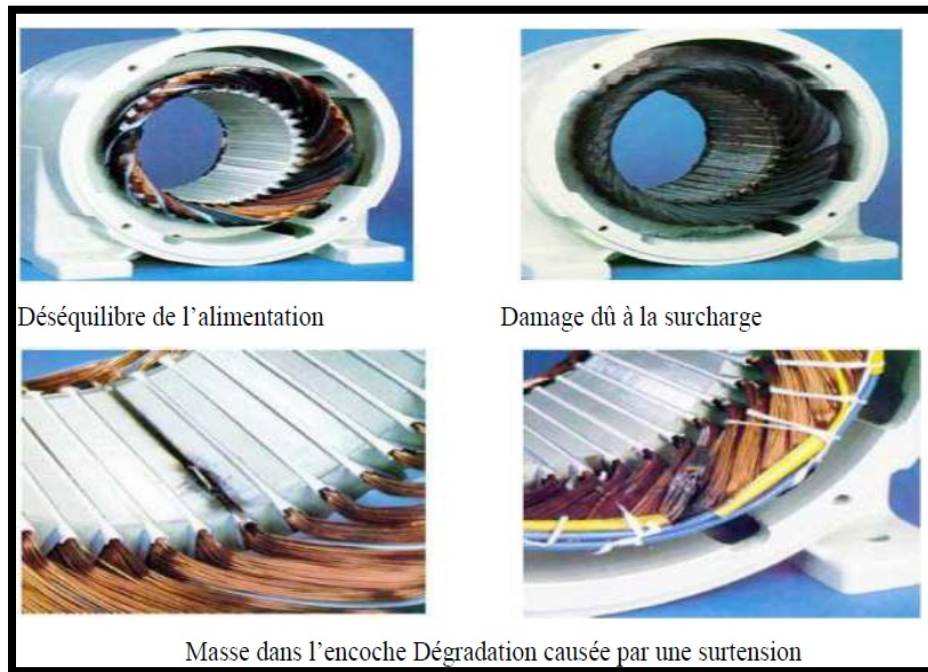


Figure 1.10. Différents défauts statoriques. [8]

1.7.3. Défauts de circuit magnétique

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

1.7.4. Défaillances mécaniques

1.7.4.1. Défauts de roulements

Les roulements à billes jouent le rôle d'interface électromécanique entre le stator et le rotor. En outre, ils représentent l'élément de maintien de l'axe de la machine permettant d'assurer une bonne rotation du rotor. La plupart des défauts survenant dans les roulements des moteurs à induction ainsi que les raisons de leur vieillissement.

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

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

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, ne 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 du moteur. [9]

1.8. Conclusion

Nous avons scindé ce chapitre en deux parties : la première concerne la constitution de la machine asynchrone ; la deuxième partie Des études statistiques, sur les défaillances des machines, sont exposées dont le taux le plus élevé était ceux des défauts de roulements et du stator. Anis que la citation les principales défaillances qui peut subir les différentes parties de la machine asynchrone et que ces défauts pourraient entraîner dans la plupart du temps un arrêt intempestif de la machine.

Le chapitre suivant traitera différentes techniques de diagnostic et détection de ces défauts en précisons les deux méthodes diagnostic utilisée dans cette étude.

Chapitre II

Les méthodes de diagnostic du Moteur asynchrone

2.1. Introduction

En général, lorsqu'on parle de diagnostic des défauts, on se réfère à la procédure de détection et d'isolation de ces derniers, que l'on retrouve souvent sous le nom : FDI (Fault Détection and Isolation). Le rôle d'une telle procédure est de fournir une information sur l'apparition d'un défaut et sa provenance le plus rapidement possible.

Les méthodes de détection et de localisation des défauts ont connu un essor considérable depuis le début des années 70. En effet, de nombreux chercheurs ont investi dans ce domaine proposant alors diverses approches et techniques répondant à la diversité des applications. [7]

On a commencé ce chapitre, dans un premier temps, de mettre en relief les différents concepts et notions rencontrés dans la littérature du diagnostic des défauts car un bon diagnostic nécessite une bonne compréhension de ces notions. Le principe de base du diagnostic sera alors présenté ainsi que les différentes méthodes proposées dans ce domaine et en deuxième temps on parle sur les deux techniques de traitement du signal des courant statorique qu'on a utilisés dans notre travail.

2.2. Terminologie dédiée au diagnostic [16]

Défaut : déviation non permise d'au moins d'une propriété ou d'un paramètre caractéristique du système par rapport aux conditions normal de fonctionnement.

Panne ou défaillance : interruption permanente de la capacité du système à remplir une fonction requise dans des conditions d'opérations spécifiées.

Dysfonctionnement : exécution d'une fonction de système au cours de laquelle le service rendu n'est pas délivré ou est délivré de manière incomplète.

Symptôme : changement d'une qualité observable par rapport à un comportement normal.

Perturbation : signal d'entrée non contrôlé dont la présence est non souhaitable mais considérée comme normale.

Suivi : fonction maintenant en permanence un historique des traitements effectués par le système de commande supervision et une trace des événements que perçoit le système.

Détection de défauts : détermination de la présence de défauts et l'instant d'occurrence de ces défauts.

Localisation de défauts : détermination du type de la localisation et de la date d'un défaut détecté. Elle consiste à remonter d'un ensemble de symptômes à un ensemble de composants défaillants.

Identification de défauts : détermination de la taille et du comportement temporel d'un défaut. C'est une fonction qui suit la localisation.

Diagnostic : détermination du type. De la taille. De la localisation et de l'instant d'occurrence d'un défaut. C'est une fonction qui suit la détection et inclut les fonctions de localisation et l'identification.

Surveillance : ensemble de fonctions s'exécutant en temps réel ayant pour but de reconstituer l'état réel du procédé au sien des modèles utilisés par le système de conduite du procédé. Elle consiste à l'enregistrement de l'information ainsi qu'à la reconnaissance et l'indication des comportements anormaux.

Supervision : représente la surveillance d'un système physique et la prise de décisions appropriées en vue de maintenir son opération face à des défaillances.

2.3. Principe du diagnostic des défauts dans la machine asynchrone

Le diagnostic consiste à détecter de façon précoce un défaut avant qu'il ne conduise à une défaillance. La procédure de diagnostic s'articule autour des étapes suivantes :

-Extraction des informations issues de capteurs de la machine pour obtenir des indicateurs de défauts ou résidus. Le résidu représente la différence entre l'observation et la valeur de référence. Avant de chercher la cause du défaut, il est important de valider l'information fournie par les résidus.

- la valeur du résidu doit être quantifiée afin de produire des symptômes. Le problème d'évaluation des résidus consiste à définir le seuil à partir duquel on déclarera le défaut.

- la décision constitue la dernière étape de la tâche du diagnostic. A partir de la comparaison de la signature actuelle avec celle de l'expérience, il s'agit de déclarer, dans un premier temps, si l'élément est défaillant ou non. Dans un second temps, si l'élément est défaillant, il faut trouver la cause de l'anomalie. [9]

2.4. Aperçu sur les méthodes de diagnostic

2.4.1. Diagnostic par la méthode MCSA

Dans notre étude on utilise la proche de diagnostic par analyse des courants, la méthode est basées sur l'examen du courant statorique et parce qu'il est facilement accessible, et vue sa capacité de détecter aussi bien les défauts électromagnétiques que mécaniques, l'analyse du courant statorique occupe une place privilégiée dans le diagnostic par analyse des signaux. Cette technique est connue sous l'abréviation MCSA (Motor Current Signature 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).

Nous distinguons un grand nombre de travaux basés sur l'analyse de courant statorique, aussi bien que cette analyse est appliquée dans différents défauts.

Les signatures des courants statoriques sont utilisées pour la détection des cassures de barres, on distingue aussi pour la détection de défaut d'excentricité et dans notre recherche on donne une validation à l'utilisation de cette technique pour la détection des défauts de mauvais branchement.

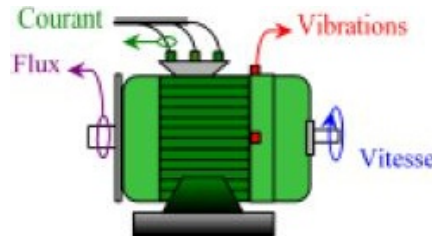


Figure .2.1. Les différents points de mesure [5]

L'analyse d'un signal donc est une source d'informations. En effet, la mesure d'un signal indique des oscillations qui peuvent être harmoniques, de nature stochastique ou les deux simultanément. La variation de ces signaux peut être reliée aux défauts.

Pour extraire les caractéristiques d'un signal relatif à un défaut, généralement, on extrait l'amplitude ou les densités d'amplitude. Il existe toutefois d'autres possibilités qui consistent à déterminer les fonctions d'auto corrélation, les transformées de Fourier ou la densité spectrale. [9]

2.4.2. Analyse des signaux vibratoires et acoustiques

L'analyse des défaillances des moteurs électriques par les signaux vibratoires et acoustiques permet une détection de quasiment tous les défauts, notamment ceux mécaniques, pouvant se produire sur le processus. Cette analyse peut être réalisée à partir de capteurs, généralement des accéléromètres, placés sur les paliers dans les directions verticales, axiales et radiales.

Pour surveiller l'état des roulements, des recherches utilisent un capteur laser pour lire directement les déplacements causés par les défauts de roulement. Dans ces méthodes, il faut que le capteur de déplacement laser soit placé sur la surface d'appui, ce qui n'est généralement pas facile à mettre en œuvre. [15]

2.4.3. Analyse des flux

La conversion électromécanique de l'énergie est localisée dans l'entrefer. Cette conversion peut être affectée par tout déséquilibre de type magnétique, électrique ou électromagnétique au niveau du rotor ou du stator. Le flux d'entrefer, le flux embrassé par les enroulements statoriques ou encore le flux de fuite dans l'axe du rotor sont des paramètres qui, à cause de leur sensibilité à tout déséquilibre de la machine, méritent d'être analysés.

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. [9]

2.4.4. Diagnostic par mesure du couple électromagnétique

Le couple électromagnétique développé dans la machine, 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 de la machine. [10]

2.4.5. Diagnostic à base de modèle qualitatif

Il est souvent difficile de développer des modèles mathématiques permettant de représenter la dynamique du système de manière exacte. D'autre part, il est plus aisé de manipuler des descriptions générales des systèmes. C'est dans ce contexte que des approches de diagnostic de défauts, basées sur des connaissances sur le système réel, ont été développées. Ces méthodes sont dites qualitatives ou encore heuristiques. L'information heuristique peut être exprimée de plusieurs manières, telles que l'utilisation de termes linguistiques (petit, grand, moyen...) ou les observations de l'opérateur humain ou encore l'arbre de défaillance, qui représente les connexions entre les symptômes et les défauts. D'autres approches de méthodes qualitatives ont été proposées telles que l'utilisation des systèmes experts et des chaînes de retour pour suivre le système. [9]

2.4.6. Diagnostic par analyse de la température : La Thermographie

Un capteur peut être monté sur l'enroulement ou noyé (intégré) dans l'isolant ou placé dans la plaque à bornes est un bon indicateur de la surchauffe de la machine qui est un signe de défauts, (figure.2.2.). En plus, récemment des techniques par visualisation des images thermiques par infrarouge sont utilisées pour le diagnostic des différents défauts, (figure.2.3.). [11]

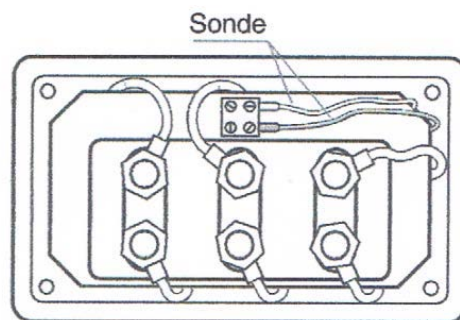


Figure .2.2. Capteur de température dans une plaque à bornes [11]

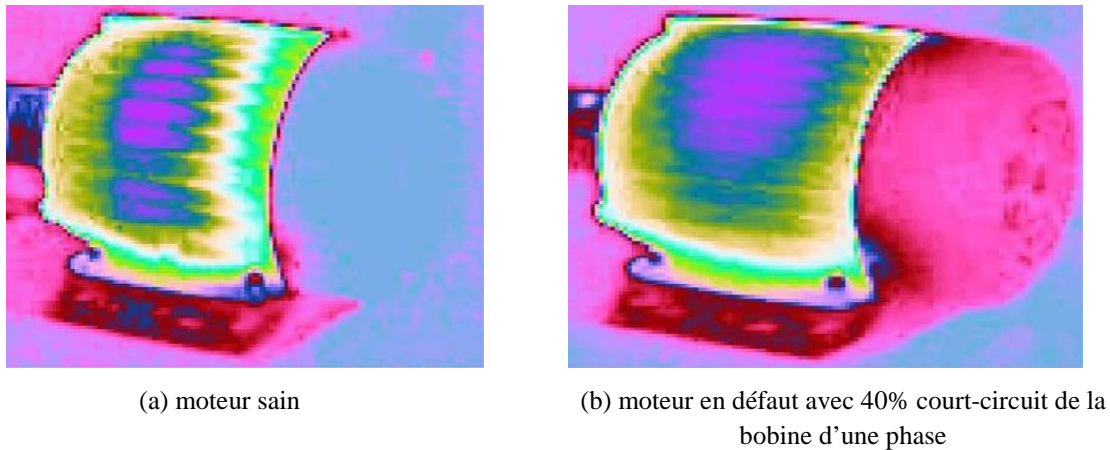


Figure .2.3. Image colorée infrarouge thermique [11]

2.4.7. Diagnostic par les analyses chimiques

La plus part des moteurs sont refroidis par l'air, ou le plus souvent à l'aide d'un circuit fermé avec échangeur de chaleur refroidi à l'eau, la dégradation de l'isolation électrique dans le moteur produit le gaz d'oxyde de carbone qui apparaît dans le circuit de l'air de refroidissement et qui peut être détecter par une technique d'absorption infrarouge. Dans certains cas, l'huile de roulement est analysée régulièrement, et l'intervention est requise si les produits indiquant la dégradation sont présents. [9]

2.4.8. Diagnostic des défauts par analyse du vecteur de Park

Deux versions d'analyse par cette méthode à savoir :

La première utilise les grandeurs biphasées i_{ds} et i_{qs} , qui sont calculées à partir des trois courants d'alimentation, pour l'obtention de la courbe de Lissajous : $i_q = f(i_d)$. Le changement de l'épaisseur et de la forme de cette courbe donne une information sur le défaut.

La deuxième est appelée Vecteur de Park Etendu, qui est basée sur l'analyse spectrale du module du vecteur de Park. Elle présente beaucoup d'avantages quant à la détection des défauts statoriques ou rotoriques et même les défauts de roulement. [10]

2.4.9. Méthodes basées sur l'intelligence artificielle

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

- ✓ logique floue,
- ✓ réseaux neuronaux,
- ✓ reconnaissance des formes. [10]

2.5. Méthodes de traitement des signaux dédiées au diagnostic des défauts de mauvais branchement

2.5.1. La transformée de Fourier rapide (FFT)

L'analyse de Fourier est une base majeure de la physique et des mathématiques. Elle est indissociable du traitement du signal, et ce pour deux raisons principales.

La première est l'universalité du concept de fréquence sur lequel elle repose. La seconde tient à la structure même de l'analyse de Fourier qui se prête aisément à des transformations communes comme le filtrage linéaire en les traduisant de manière particulièrement simple.

Le principe de la transformée de Fourier repose sur le fait que toute fonction périodique peut être représentée comme la somme d'une série de sinus et de cosinus dont on fait varier d'une part les amplitudes en les multipliant par des coefficients, et d'autre part les phases en les décalant de manière à ce qu'elles s'additionnent ou se compensent.

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t)e^{-j2\pi t} dt \quad (\text{II.1})$$

Cet algorithme célèbre a été inventé par Cooley et Tukey, ingénieurs dans le centre de recherche d'IBM au début des années 1960. Il a eu, du fait de son efficacité, un impact considérable sur le développement des applications en traitement numérique des signaux. Un calcul de transformée de Fourier discrète est un calcul de produit d'une matrice par un vecteur. Il nécessite donc T^2 multiplications/additions de nombres complexes.

Si on suppose qu'un ordinateur effectue 10^9 opérations par seconde, un calcul de transformée sur un signal de $T=10^3$ échantillons nécessitera 10^{-3} s. Un calcul sur une image de taille $T \times T=10^6$ nécessitera T^2 soit 10^{12} opérations et une quinzaine de minutes de calcul.

Si on envisage de traiter des données dans un domaine à trois dimensions (sur des vecteurs de taille $T \times T \times T$) il faudrait alors effectuer T^6 soit 10^{18} opérations, ce qui nécessite quelques dizaines d'années. La transformée de Fourier rapide réduit considérablement le nombre d'opérations à effectuer : au lieu d'effectuer T^2 opérations il suffira d'en faire $T \log_2 T$.

Dans les trois exemples précédents on aura à faire 10^4 , 2×10^7 et 3×10^{10} opérations ce qui nécessitera respectivement 10^{-5} s, 2×10^{-2} s et 30s.

L'algorithme FFT déguisée a partir du L'algorithme FDT mais avec un nombre d'opération de $C_N = N \log_2(N)$.

$$\hat{X}_k = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x_n W_N^{kn} \quad (\text{II.2})$$

La FFT est utilisée au travers d'une fenêtre glissante d'observation. Malgré sa célébrité et son succès, la FFT reste inadaptable pour les signaux non stationnaires et elle montre assez vite ses limitations, perte de localisation temporelle. [11-5]

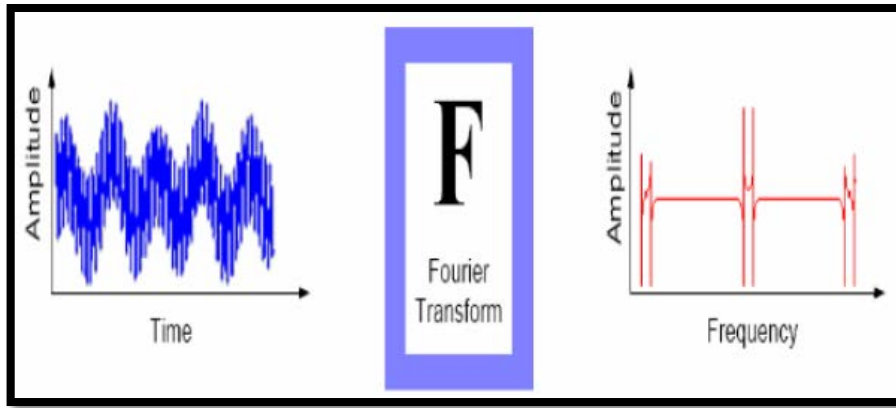


Figure .2.4. Principe de la Transformée de Fourier [5]

Malgré l'introduction et les succès de la transformée de Fourier rapide (FFT), est donc par définition peu adaptée à l'étude des signaux non-stationnaires. Hors, ces signaux se rencontrent beaucoup plus souvent que les signaux stationnaires.

2.5.2. Méthode de représentation tridimensionnelle des courants statoriques (3D)

Cette détection basée sur l'analyse des trois courants (I_a , I_b , I_c). La plupart des méthodes employées pour identifier et classifier les défauts du moteur asynchrone défectueux sont basées sur l'analyse des courants statoriques. L'approche proposée emploie également l'analyse des courants statoriques, Cependant, dans cette méthodologie le problème est converti dans une analyse de reconnaissance des structures. Avec les conditions idéales pour le moteur asynchrone et une alimentation non équilibrée de tensions, les courants statoriques sont donnés par l'équation [2] :

$$\begin{cases} I_A = I_m \sin(\omega t - \varphi) \\ I_B = I_m \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3} - \varphi) \\ I_C = I_m \sin(\omega t - \frac{4\pi}{3} - \varphi) \end{cases} \quad (\text{II.3})$$

I_A , I_B , et I_C : les courants statoriques des trois phases ;

I_m : la Valeur maximale du courant ;

ω : Pulsation ;

φ : Angle de la phase ;

t : temps.

$$R^2 = I_A^2 + I_B^2 + I_C^2$$

Dans l'approche proposée les courants sont identifiés en tant que modèles typiques pour chaque mode défectueux. Ceci est accompli en l'analysant dans un espace à trois dimensions. Pour un moteur sain, le modèle correspondant du courant est un cercle centré à l'origine des coordonnées. [17]

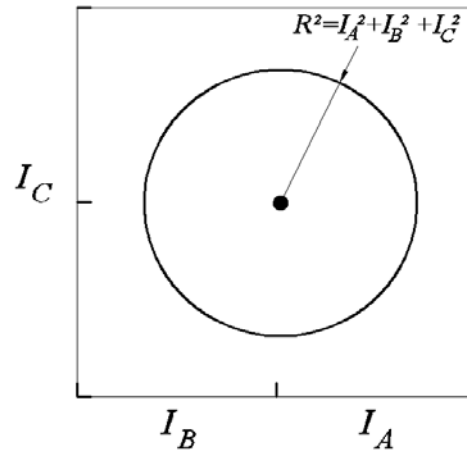


Figure .2.5. Machine saine [5]

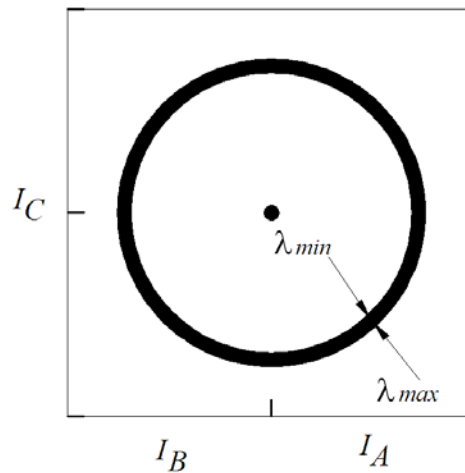


Figure .2.6. Machine en rupture de barre [5]

Pour un moteur asynchrone fonctionnant en mode défectueux, le modèle précédent n'est plus valide. Ainsi, avec un certain rotor présentant des barres cassées ou des fissurations de l'anneau, le modèle représentant les courants n'est plus un cercle mais plutôt une couronne ayant deux rayons : λ_{\max} et λ_{\min} et une épaisseur au niveau de la circonférence du cercle qui peut servir comme indice du 1 degré de gravité du défaut (nombre de barres), correspond à la largeur (section) de cet épaisseur comme l'équation (II.4), c.à.d. La différence entre ces deux rayons, comme est présenté dans la figure .2.6.

$$S_{rt} = \frac{\lambda_{\max} - \lambda_{\min}}{\lambda_{\max}} \quad (\text{II.4})$$

2.6. Conclusion

Ce chapitre a été, essentiellement, dédié aux méthodes de surveillance et de diagnostic. Nous avons scindé ce chapitre en deux parties.

La première partie traite des techniques qui permettent la mise en œuvre d'une procédure de diagnostic. Ces dernières étant très nombreuses, et nous avons vous indiquez que cette étude de diagnostic de MAS est réaliser a la base de l'approche MCSA.

La deuxième partie porte sur les méthodes de traitement du signal FFT et 3D. Ce sont des méthodes qui vont être privilégiée dans le cadre de notre travail d'initiation à la recherche sur la détection des anomalies électriques externes affectant le bobinage statoriques.

Bien qu'il y a énormément de méthodes de traitement du courant d'alimentation du moteur asynchrone à cage, cette méthode de la FFT, traditionnelle soit elle, mais à notre sens, elle est simple et efficace pour la surveillance des machines tournantes électriques ou autres.

Dans le chapitre suivante on fait rappel sur le modèle du MAS ensuite on le simule au milieu MATLAB dans les possibilités saine et en présence de l'un des défauts de mauvais branchement afin de faire une comparaison entre les deux cas étudiés.

Chapitre III
Modélisation et simulation de moteur
asynchrone

3.1. Introduction

La modélisation est l'outil de la simulation, elle permet de prendre en charge d'une façon efficace, les problèmes qui traitent le comportement dynamique et la dépendance du temps, à l'aide d'une description paramétrique détaillée du processus. Un modèle de la machine est utilisé dans le but d'étudier les propriétés et les caractéristiques internes que présente la machine dans les différents régimes de fonctionnement, transitoire et permanent.

La simulation est un moyen efficace et économique, utilisé pour faire des études préliminaires et/ou comparatives, tant au stade du développement (conception), qu'au cours du fonctionnement normal des systèmes. Plusieurs outils (spécialisés ou non) de simulation sont utilisés dans le domaine de l'électronique de puissance ou de la commande des machines électriques : ATOSEC5, EMTP, SPICE, SIMNON, MATLAB, SIMULINK, etc. La difficulté de simulation du moteur asynchrone provient de sa structure fortement non-linéaire. Le modèle contient plusieurs blocs non linéaires. [12]

3.2. Hypothèses simplificatrices

Une modélisation assez représentative du comportement physique réel de la MAS, fait convenir d'admettre les hypothèses simplificatrices suivantes :

- La répartition de la force magnétomotrice est parfaitement sinusoïdale
- La machine est supposée symétrique (à grandeurs périodiques).
- Le rotor est représenté par un bobinage triphasé équivalent.
- Les pertes fer et les pertes magnétiques sont négligées.
- L'entrefer est d'épaisseur uniforme.
- Les circuits magnétiques sont non saturés.
- L'effet de peau et la température sur les résistances est négligeable.

Dans ces conditions, le modèle moteur à induction triphasé (au stator et au rotor), illustré schématiquement par la figure (3.1), est décrit par les équations suivantes (électrique, électromagnétique, mécanique) données ci-après. Les trois phases de l'armature du stator, et respectivement du rotor, sont décalées $\pm 2\pi/3$. Celles du rotor sont court-circuitées sur elles mêmes. θ est l'angle absolu de rotation inter armature. [11]

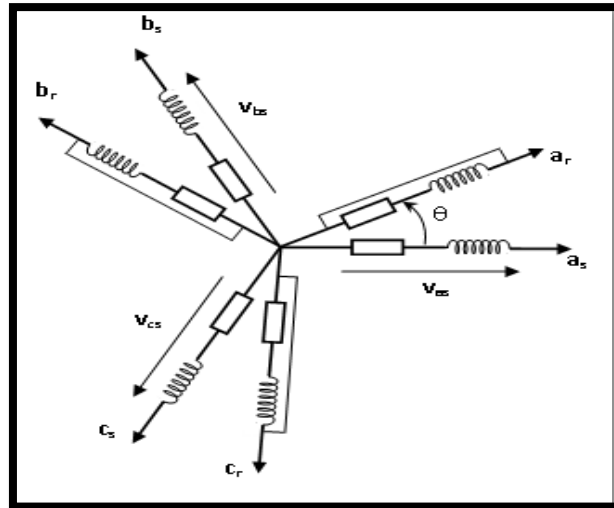


Figure 3.1. Modèle triphasé de la machine asynchrone. [3]

3.3. Les équations de la machine asynchrone

Les enroulements des trois phases statoriques et des trois phases rotoriques dans l'espace peuvent être représentés comme indiqué en (Figure 1). Les phases rotoriques sont court-circuitées sur elles-mêmes. θ Est l'angle électrique entre l'axe de la phase a statorique et la phase a rotorique. [14-3]

La loi de Faraday permet d'écrire : (III.1)

$$v = R_i + \frac{d\varphi}{dt} \quad (\text{III.1})$$

3.3.1. Équation électrique :

Pour les 3 phases statoriques on résume cette écriture par l'écriture matricielle condensée :

$$[v_{abcs}] = R_s [i_{abcs}] + \frac{d}{dt} [\varphi_{abcs}] \text{ cette notation est l'écriture condensée de:}$$

$$\begin{bmatrix} v_{as} \\ v_{bs} \\ v_{cs} \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{as} \\ \varphi_{bs} \\ \varphi_{cs} \end{bmatrix} \quad (\text{III.2})$$

La résistance statorique étant la même pour les 3 phases, il n'y a pas lieu d'écrire une matrice de résistances. De même pour le rotor

$$[v_{abcr}] = R_r [i_{abcr}] + \frac{d}{dt} [\varphi_{abcr}] = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\text{III.3})$$

Le rotor étant en court-circuit, ses tensions sont nulles.

3.3.2. Équation magnétique

Chaque flux comporte une interaction avec les courants de toutes les phases y compris la sienne (notion de flux / inductance propre).

Exemple de la phase a statorique :

$$\varphi_{as} = l_s i_{as} + m_s i_{cs} + m_1 i_{ar} + m_3 i_{br} + m_2 i_{cr} \quad (\text{III.4})$$

En calcul matriciel, on aura :

$$\begin{bmatrix} \varphi_{as} \\ \varphi_{bs} \\ \varphi_{cs} \\ \varphi_{ar} \\ \varphi_{br} \\ \varphi_{cr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_s & m_s & m_s & m_1 & m_3 & m_2 \\ m_s & l_s & m_s & m_2 & m_1 & m_3 \\ m_s & m_s & l_s & m_3 & m_2 & m_1 \\ m_1 & m_2 & m_3 & l_r & m_r & m_r \\ m_3 & m_1 & m_2 & m_r & l_r & m_r \\ m_2 & m_3 & m_1 & m_r & m_r & l_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \\ i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix} \quad (\text{III.5})$$

Où :

l_s : est l'inductance propre d'une phase statorique.

l_r : est l'inductance propre d'une phase rotorique.

m_s : est l'inductance mutuelle entre deux phases statoriques.

m_r : est l'inductance mutuelle entre deux phases rotoriques.

m_{sr} : est le maximum de l'inductance mutuelle entre une phase statorique et une phase rotorique.

$$\begin{aligned} m_1 &= m_{sr} \cos(\theta) \\ m_2 &= m_{sr} \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ m_3 &= m_{sr} \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \end{aligned}$$

3.3.3. Equation mécanique [11]

Expression du couple électromagnétique :

$$C_{em} = \frac{1}{2} [i_{abc}]^t \left\{ \frac{d}{d\theta_m} [L_{sr}] [i_{ABC}] \right\} \quad (\text{III.6})$$

θ_M : Angle entre la phase « as » du stator et la phase « ar » du rotor avec $\omega = d\theta_M/dt$.

L_{sr} : Inductance mutuelle maximale entre une phase du stator et une phase du rotor.

$$J \frac{d\Omega}{dt} = C_e - C_r - f_v \Omega \quad (\text{III.7})$$

Où,

J : Moment d'inertie du rotor.

Ω : Vitesse mécanique du moteur.

f_v : Coefficient de frottement visqueux.

C_r : Couple de charge.

C_e : couple électromagnétique.

3.4. Transformation triphasé – diphasé

Le but de l'utilisation de cette transformation est de passer d'un système triphasé abc vers un système diphasé $\alpha\beta$.

Il existe principalement deux transformations : Clarke et Concordia. La transformation de Clarke conserve l'amplitude des grandeurs mais pas la puissance ni le couple Tandis que celle de Concordia, qui est normée, conserve la puissance mais pas les amplitudes. [13]

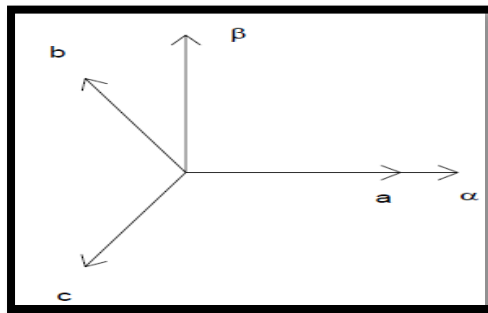


Figure .3.2. Transformation triphasé-diphasé [3]

Le choix de matrice de passage non normée (Clark) est bien pratique en commande où l'on traite des grandeurs dq (I_{ds}, I_{qs} que l'on verra par la suite). En effet, cela permet, par exemple, d'apprécier directement le module du courant qui est absorbé par le moteur, sans avoir à passer par un coefficient multiplicateur. Mathématiquement parlant, le choix d'une matrice normée (Concordia) est souvent utilisé pour des raisons de symétrie de transformation directe et inverse. Nous allons utiliser la transformation de Concordia dans notre modélisation. Son application aux équations de la machine écrites ci-dessous donne :

$$\begin{aligned}
 T_{23}[v_{abc}] &= [v_{\alpha\beta}] = T_{23} \left\{ R_s [i_{abc}] + \frac{d}{dt} [\varphi_{abc}] \right\} \\
 [v_{\alpha\beta}] &= R_s T_{23} [i_{abc}] + \frac{d}{dt} T_{23} [\varphi_{abc}] \\
 [v_{\alpha\beta}] &= R_s [i_{\alpha\beta}] + \frac{d}{dt} [\varphi_{\alpha\beta}] \quad (III.8)
 \end{aligned}$$

On a alors réduit le système de 3 équations à un système à 2 équations.

De même pour le rotor

$$[v_{\alpha\beta r}] = R_r [i_{\alpha\beta r}] + \frac{d}{dt} [\varphi_{\alpha\beta r}] \quad (III.9)$$

Ainsi que pour l'écriture des flux en fonction des courants. L'intérêt pour les flux, c'est que les matrices 3x3 des inductances vont être réduites à des matrices 2x2. On a alors l'apparition des inductances cycliques :

$$\begin{aligned}
 L_s &= l_s - m_s \\
 L_r &= l_r - m_r \\
 M &= \frac{3}{2} m_{sr}
 \end{aligned}$$

On dispose à présent d'une modélisation de la machine asynchrone dans 2 repères séparés : Les grandeurs statoriques sont exprimées dans le repère $\alpha\beta$ stator et les grandeurs rotoriques le sont dans le repère $\alpha\beta$ rotor. Il faut exprimer toute la modélisation dans un repère commun. En effet, si l'on examine de plus près la matrice des inductances,

$$\left[\begin{array}{cc|cc} L_s & 0 & M \cdot P(\theta) & \\ 0 & L_s & \hline M \cdot P(-\theta) & & L_r & 0 \\ & & 0 & L_r \end{array} \right]$$

On s'aperçoit que les grandeurs statoriques sont liées aux grandeurs rotoriques à travers l'angle θ . On choisit alors de transformer les grandeurs statoriques et les grandeurs rotoriques vers un repère commun dit dq et ceci à l'aide de deux transformations dans le plan qui sont des rotations. Ce sont ces transformations ainsi que la transformation de Concordia ou de Clarke qui constitue la transformation de Park.

3.5. Transformation de Park

La transformation de Park est constituée d'une transformation triphasée - diphasé suivie d'une rotation. Elle permet de passer du repère abc vers le repère $\alpha\beta$ puis vers le repère dq . Le repère $\alpha\beta$ est toujours fixe par rapport au repère abc par contre le repère dq est mobile. Il forme avec le repère fixe $\alpha\beta$ un angle qui est appelé l'angle de la transformation de Park ou angle de Park. Revenons au choix de ces angles de transformation pour chaque ensemble de grandeurs (statoriques et rotoriques).

Si l'on note par θ_s (resp. par θ_r) l'angle de la transformation de Park des grandeurs statoriques (resp. rotoriques), il existe une relation qui les lie et qui simplifie les équations et par la même le modèle final. Les repères de la transformation de Park des grandeurs statoriques et celle des grandeurs rotoriques doivent coïncider pour simplifier ces équations Ceci se fait en Liant les angles θ_s et θ_r par la relation [13] :

$$\theta_s = \theta + \theta_r$$

Les grandeurs statoriques sont transformées :

$$[x_{\alpha\beta s}] = P(\theta_s)[x_{dqs}]$$

Et les grandeurs rotoriques également :

$$[x_{\alpha\beta r}] = P(\theta_r)[x_{dqr}]$$

Les équations aux tensions deviennent :

$$[v_{dqs}] = R_s [i_{dqs}] + \theta_s P\left(\frac{\pi}{2}\right) [\varphi_{dqs}] + \frac{d}{dt} [\varphi_{dqs}] \quad (\text{III.10})$$

$$[v_{dqr}] = R_r [i_{dqr}] + \theta_r P\left(\frac{\pi}{2}\right) [\varphi_{dqr}] + \frac{d}{dt} [\varphi_{dqr}] \quad (\text{III.11})$$

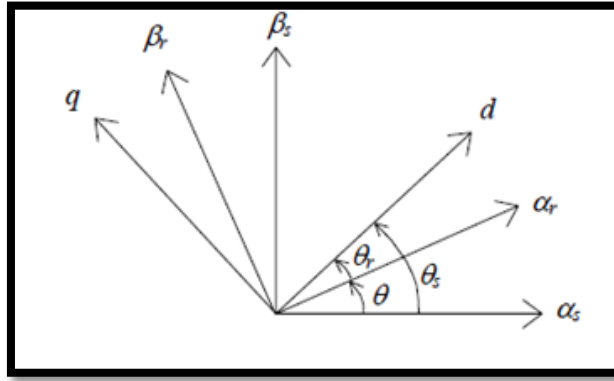


Figure 3.3. Transformation de Park [3]

Où $\dot{\theta}_s$ et $\dot{\theta}_r$ sont les dérivées des angles des transformations de Park des grandeurs statoriques et rotoriques respectivement. Cependant, c'est au niveau de l'écriture des flux que ça devient intéressant

$$\begin{bmatrix} \varphi_{dqs} \\ \varphi_{dqr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{dqs} \\ i_{dqr} \end{bmatrix}$$

En effet, les sous matrices sont maintenant diagonales et ne dépendent plus de θ (l'angle électrique entre le stator et le rotor). Le système matriciel peut également être écrit sous la forme suivante :

$$\begin{cases} \varphi_{ds} = L_s i_{ds} + M i_{dr} \\ \varphi_{qs} = L_s i_{qs} + M i_{qr} \\ \varphi_{dr} = M_s i_{ds} + L i_{dr} \\ \varphi_{qr} = M_s i_{qs} + L i_{qr} \end{cases} \quad (\text{III.12})$$

Et les tensions :

$$\begin{cases} v_{ds} = R_s i_{ds} - \dot{\theta}_s \varphi_{qs} + \frac{d\varphi_{qs}}{dt} \\ v_{qs} = R_s i_{qs} + \dot{\theta}_s \varphi_{ds} + \frac{d\varphi_{qs}}{dt} \\ v_{dr} = 0 = R_r i_{dr} + \dot{\theta}_r \varphi_{qr} + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} \\ v_{qr} = 0 = R_r i_{qr} + \dot{\theta}_r \varphi_{dr} + \frac{d\varphi_{qr}}{dt} \end{cases} \quad (\text{III.13})$$

Nous avons exprimé les équations de la machine mais il reste également le couple électromagnétique. Ce dernier peut être dérivé de l'expression de la Co-énergie ou obtenu à l'aide d'un bilan de puissance. Il en résulte plusieurs expressions toutes égales (où p est le nombre de paires de pôles) :

$$\begin{aligned}
C_e &= p(\varphi_{ds} i_{qs} - \varphi_{qs} i_{ds}) \\
C_e &= p(\varphi_{qr} i_{dr} - \varphi_{dr} i_{qr}) \\
C_e &= pM(i_{dr} i_{qs} - i_{ds} i_{qr}) \\
C_e &= p \frac{M}{L_r} (\varphi_{dr} i_{qs} - \varphi_{qr} i_{ds})
\end{aligned} \tag{III.14}$$

3.6. Choix du repère dq

Jusqu'à présent, nous avons exprimé les équations et les grandeurs de la machine dans un repère dq qui fait un angle électrique θ_s avec le stator et qui fait également un angle électrique θ_r avec le rotor mais qui n'est pas défini par ailleurs, c'est à dire qu'il est libre.

Il existe trois choix important. On peut fixer le repère dq au stator, au rotor ou au champ tournant. Rappelons que le repère dq est le repère mobile, c'est-à-dire qu'il nous appartient de calculer les angles des transformations de Park θ_s et θ_r afin d'effectuer les rotations. On peut donc le lier à un référentiel mobile comme le champ tournant.

Le champ tournant est le champ crée par le bobinage statorique et qui tourne, en régime permanent, à la vitesse de synchronisme. Il est symbolisé par le vecteur flux statorique. On parle de vecteur alors qu'on vérité on a tout un champ. Le vecteur permet de donner une idée visuelle de la phase et du module d'amplitude du flux.

Le flux rotorique, quant à lui, est représenté par un vecteur flux rotorique qui tourne également à la même vitesse, c'est-à-dire au synchronisme. En effet, c'est le rotor qui "glisse" par rapport au champ tournant. Mais, en régime permanent, les deux flux, statorique et rotorique tournent à la même vitesse, au synchronisme. [13]

3.7. Dans un référentiel lié au champ tournant

Choisissons de fixer le repère dq au champ tournant.

Notons $\omega_s = \dot{\theta}_s$ que nous appellerons pulsation statorique, bien que le régime puisse être quelconque (transitoire non sinusoïdal).

De même, nous noterons $\omega_r = \dot{\theta}_r$ la pulsation rotorique et $\omega = \omega_s - \omega_r = \dot{\theta} = p\Omega$ la pulsation mécanique.

Nous pouvons écrire alors :

$$\begin{cases} v_{ds} = R_s i_{ds} - \omega_s \varphi_{qs} \frac{d\varphi_{ds}}{dt} \\ v_{qs} = R_s i_{qs} - \omega_s \varphi_{ds} \frac{d\varphi_{qs}}{dt} \\ 0 = R_r i_{dr} - \omega_r \varphi_{qr} \frac{d\varphi_{dr}}{dt} \\ 0 = R_r i_{qr} - \omega_r \varphi_{dr} \frac{d\varphi_{qr}}{dt} \end{cases} \text{ avec } \begin{cases} \varphi_{ds} = L_s i_{ds} + M i_{dr} \\ \varphi_{qs} = L_s i_{qs} + M i_{qr} \\ \varphi_{dr} = M i_{ds} + L_r i_{dr} \\ \varphi_{qr} = M i_{qs} + L_r i_{qr} \end{cases}$$

L'avantage d'utiliser ce référentiel, est d'avoir des grandeurs constantes en régime permanent.

Il est alors plus aisé d'en faire la régulation.

On peut, à partir de ces équations, les réécrire pour avoir un vecteur d'état (variables d'état du système) différent. C'est-à-dire qu'au lieu d'avoir les flux, on peut l'écrire en courants, il suffit juste d'opérer des substitutions dans les équations [13] :

$$\begin{bmatrix} \varphi_{ds} \\ \varphi_{qs} \\ \varphi_{dr} \\ \varphi_{qr} \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} \text{ ou même avoir les flux et courant statoriques: } \begin{bmatrix} \varphi_{ds} \\ \varphi_{qs} \\ i_{ds} \\ i_{qs} \end{bmatrix}$$

3.8. Simulation numérique

Il existe deux méthodes de simulation sont les suivant :

- Simulation numérique à l'aide d'un logiciel MATLAB.
- Simulation réel par un banc d'essai au niveau de laboratoire.

Présentation de l'environnement MATLAB :

Un système interactif et convivial de calcul numérique et de visualisation graphique, destiné aux ingénieurs et scientifiques. Il possède un langage de programmation à la fois puissant et simple d'utilisation. Il permet d'exprimer les problèmes et solutions d'une façon aisée, contrairement à d'autres langages de programmation. Il intègre des fonctions d'analyse numérique, de calcul matriciel, de traitement de signal, de visualisation graphique 2D et 3D...

Les problèmes numériques peuvent être résolus en un temps record, qui ne représente qu'une infime du temps à passer avec d'autres langages comme le Basic, C, C++ ou le Fortran. MATLAB s'est imposé dans les milieux universitaire et industriel comme un outil puissant de modélisation, de simulation et de visualisation de problèmes numériques.

Dans le monde universitaire, MATLAB est utilisé pour l'enseignement de l'algèbre linéaire, le traitement du signal, l'automatique, etc., ainsi que dans la recherche scientifique. Dans le domaine industriel, il est utilisé pour la résolution et la simulation de problèmes d'ingénierie et de prototypage.

MATLAB est une abréviation de MATrix LABoratory. Écrit à l'origine, en Fortran, par Cleve Moler, MATLAB était destiné à faciliter l'accès au logiciel matriciel développé dans les projets LINPACK et EISPACK. La version actuelle est écrite en C. Sa disponibilité est assurée sur plusieurs plates-formes : Sun, Bull, HP, IBM, Compatibles PC, Macintosh, et plusieurs machines parallèles. MATLAB est conforté par une multitude de boîtes à outils (toolboxes) spécifiques à des domaines variés. Un autre atout de MATLAB, est sa portabilité ; la même portion de code peut être utilisée sur différentes plates-formes sans la moindre modification. [12]

SIMULINK :

SIMULINKTM est un programme pour la simulation des systèmes dynamiques linéaires et non linéaires ; une extension de **MATLAB**TM, dans laquelle la définition des modèles se fait par schémas blocs (diagramme structurel). Le diagramme structurel permet la représentation graphique d'un système d'équations linéaires et non linéaires. Il met en évidence la structure du système et permet de visualiser les interactions entre les différentes grandeurs internes et externes.

On distingue alors particulièrement bien les contres-réactions, les couplages réciproques, les non-linéarités, etc. Les éléments qui composent le diagramme structurel représentent des opérations mathématiques, à savoir addition, soustraction, multiplication avec un coefficient, intégration et différentiation, ainsi que la multiplication et la division de deux variables et la fonction non linéaire d'une variable. **SIMULINK** possède une interface graphique pour visualiser les résultats sous forme de graphiques ou de valeurs numériques en cours de simulation. Les paramètres régissant le fonctionnement des systèmes peuvent être modifiés en ligne, c'est à dire en cours de simulation, et l'on peut observer leur effet immédiatement. **SIMULINK** est bâti autour d'une bibliothèque de blocs (bibliothèques) classés par catégories. Les principales bibliothèques sont montrées dans le tableau 1. [12]

3.8.1. Les étapes de simulation numérique

Dans un premier temps, nous considérons que la machine est connectée en étoile et alimentée par un système de tension triphasé équilibré sous la forme suivante :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = 220\sqrt{2} \begin{bmatrix} \sin(2\pi f * t) \\ \sin(2\pi f * t - 2\pi/3) \\ \sin(2\pi f * t - 4\pi/3) \end{bmatrix} f = 50 \text{ Hz}$$

Dans notre travail, nous avons utilisé le logiciel « *MATLAB simulink* » pour la simulation du comportement dynamique de la machine asynchrone triphasée dans les deux cas sain et avec un défaut de manque d'une phase.

Dans le cas sain nous avons utilisé un démarrage à vide avec application d'un couple de charge $C_r=30\text{N.m}$ à $t=3 \text{ s}$.

Les paramètres nominaux de la machine utilisée sont donnés à l'annexe, et les résultats obtenus sont représentés dans la figure (3.6-7-8).

Dans le cas défaillant on simulé le moteur a vide sans application du couple de charge et avec élimination d'une phase, les résultats obtenus sont représentés dans les figures (3.9-10-11)

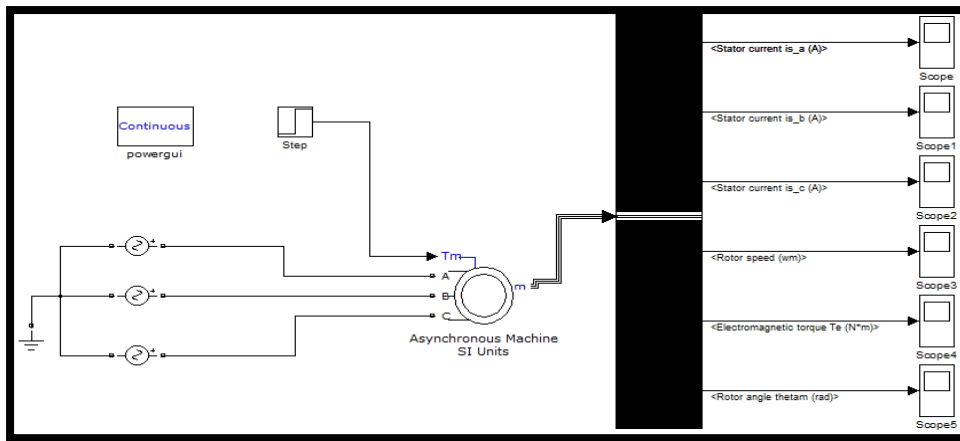


Figure 3.4. Modèle SIMULINK prédéfinie d'un moteur asynchrone à cage

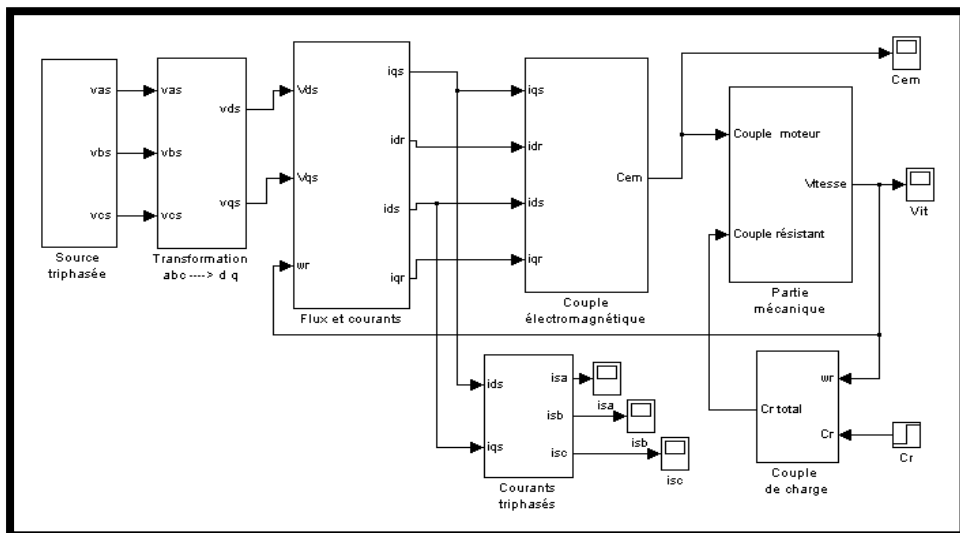


Figure 3.5. Modèle SIMULINK d'un moteur asynchrone à cage

3.8.2. Les résultats de simulation du moteur sains

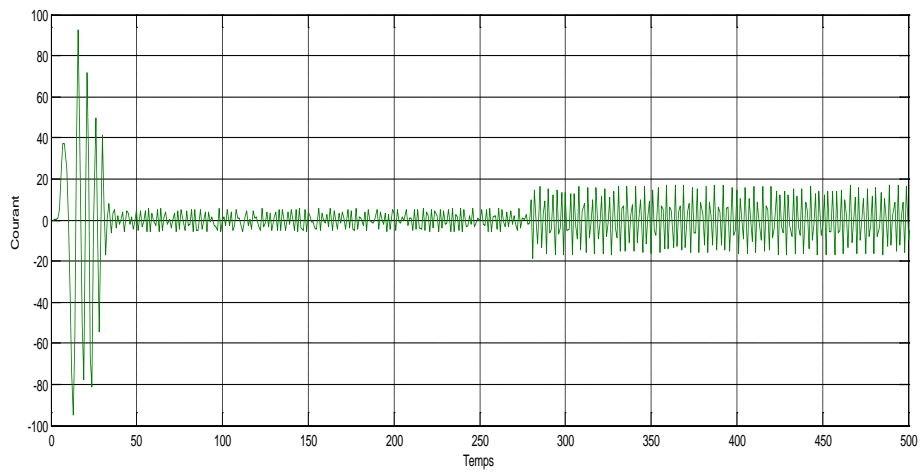


Figure 3.6. Courants statoriques

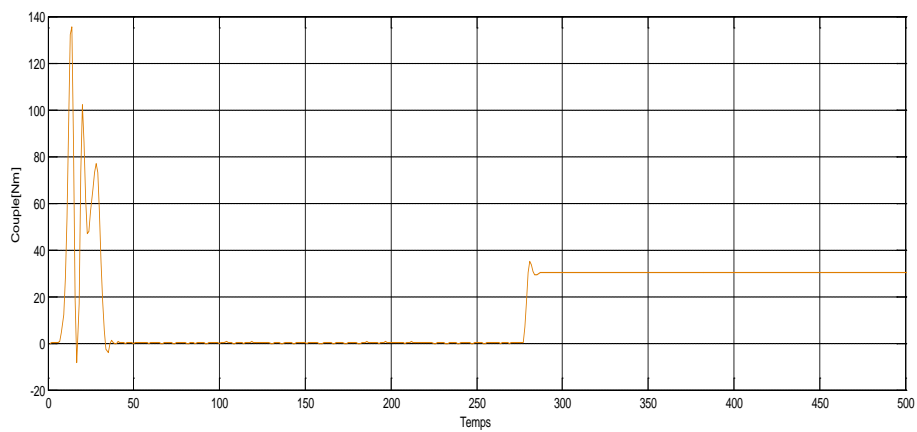


Figure 3.7. Couple électromagnétique

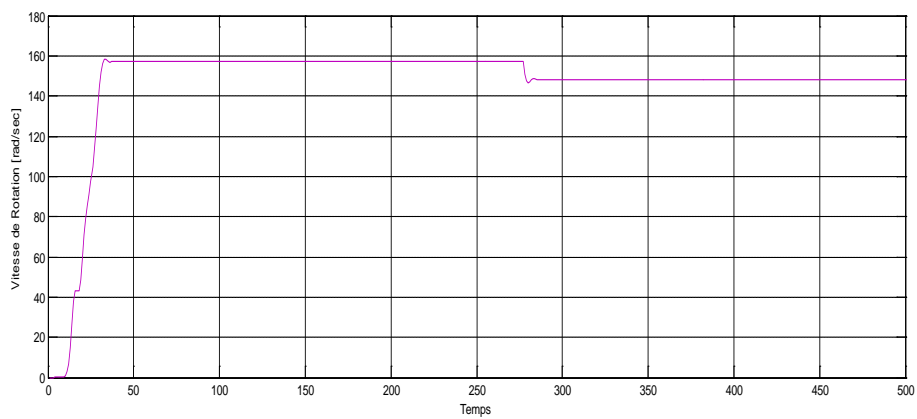
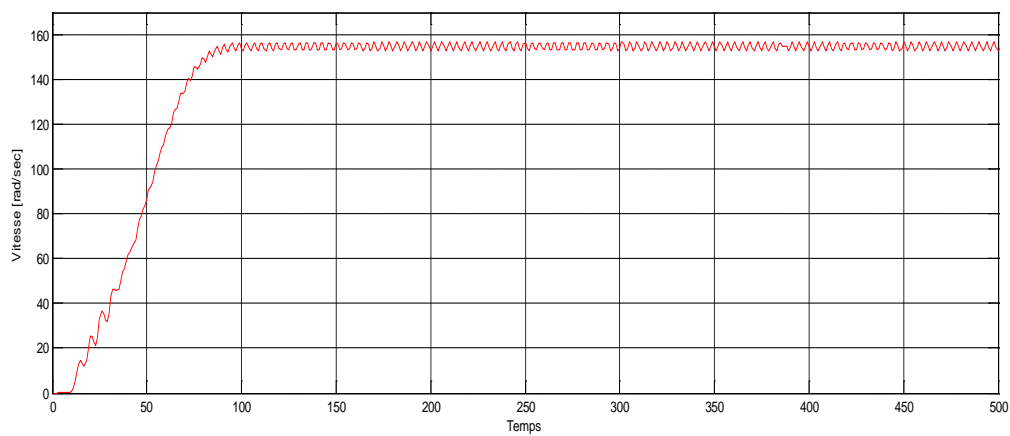
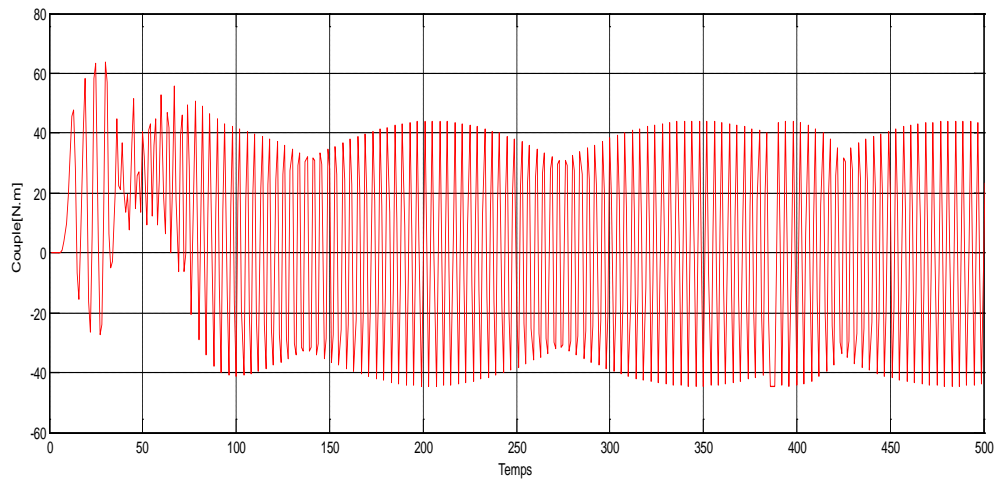
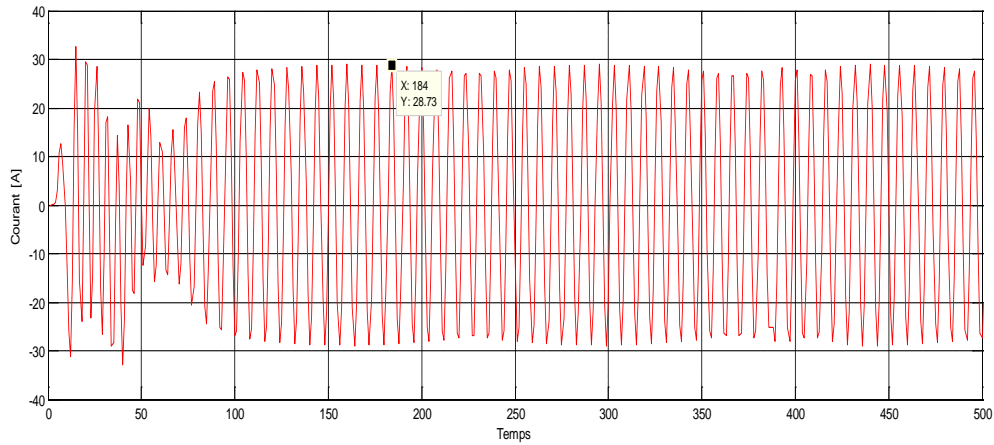


Figure 3.8 Vitesse de rotation

3.8.3. Les résultats de simulation du moteur avec défaut



3.8.4. Discussion des résultats de simulation

Dans le cas du moteur sain on remarque que le régime transitoire est oscillatoire est dure (0.2s) pour les différentes grandeurs de la machine.

La vitesse atteint une valeur proche de (157rad/s). Le couple électromagnétique atteint une valeur maximale de (130N.m) au régime transitoire, on note que les courants statoriques ont une valeur importante au démarrage avant la convergence vers faible valeur due l'effet réactif de la MAS.

Lors de l'application de la charge, nous remarquons que la machine répond à cette perturbation, par une diminution de la vitesse, le couple électromagnétique augmente et prend la valeur du couple de charge (30 Nm).

Dans le cas ou le moteur subir a un défaut de manque phase on voit clairement une augmentation d'amplitude de courant statorique et des perturbations au niveau du couple et la vitesse, nous pouvons constater que les résultats obtenus sont conformes avec ceux prévus théoriquement.

3.9. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons validé par simulation le fonctionnement du moteur asynchrone sain et en présence d'un défaut de mauvais branchement, dans ce cas on a choisi d'appliquer le défaut de manque d'une phase. Nous avons aussi présenté la méthode de captage des courants statoriques de la machine, cette méthode est une outille de suivi l'évolution des courant statorique à l'aide des programmes prédéfinie pour traitement des signaux.

Le chapitre suivant on va applique réellement l'approche du diagnostic basée sur MCSA en utilisant la FFT et la Méthode de représentation tridimensionnelle des courants statoriques (3D), afin de discutée les résultats et déterminée les caractéristiques de signal des défauts de mauvais branchement par rapporte au signal sain.

Chapitre IV

**La signature du courant dédiée au diagnostic
des défauts de mauvais branchement du MAS.**

4.1. Introduction

De nos jours, les entreprises de fabrication font de grands efforts pour mettre en œuvre un programme d'entretien de la machinerie efficace, ce qui permet la détection de défaut naissant. Le problème de la machine et son irrégularité peuvent être détectés à un stade précoce par l'emploi d'un état de surveillance approprié accompagné de technique de traitement du signal puissant.

La transformée de Fourier est parmi les méthodes les plus robustes pour le traitement des signaux en régime stationnaire. Ses dérivées discrète (TFD) et rapide (TFR) comptent parmi les outils fondamentaux pour le calcul des caractéristiques spectrales des signaux, ce qui donne ce rôle capital dans la réalisation de tout système d'aide à la surveillance et au diagnostic. En particulier de celui de la machine et de sa charge.

Ce chapitre évoque la surveillance et le suivi de comportement du moteur asynchrone à cage saine et en présence de défauts électriques, par deux stratégies de traitement et d'analyse des courants statoriques, afin de déterminer une technique de détection de défauts qui puisse donner satisfaction pour la surveillance de la machine à induction en cas de problèmes d'erreur de son branchement au réseau électrique ou en cas d'un manque de phase (le défaut d'appareillage de commutation ou dégradation de la distribution électrique).

4.2. Mode de détection des défauts par traitement du signal

L'objectif des méthodes de diagnostic et de surveillance de MAS à partir des informations données par des capteurs se trouvant au niveau de l'armoire électrique. Les signaux utilisés sont les tensions, les courants et les flux de MAS. Les informations données par les différents capteurs peuvent être utilisées séparément ou traitées dans l'ensemble pour détecter les défauts électriques et mécaniques affectés au MAS.

Dans cette étude on s'intéresse par les méthodes basées sur l'analyse des courants statoriques. Ces méthodes, couramment appelées MCSA (Motor Current Signal Analysis), présentent l'avantage de n'utiliser que des capteurs de courant.

Dans le cas particulier de la surveillance et du diagnostic, les méthodes qui reposent sur une approche signal dont la méthode de traitement numérique de base utilisée est la transformée de Fourier rapide (FFT), nous permettront de détecter l'apparition d'un défaut à partir de la comparaison de la signature observée en mode dégradé avec une signature de référence qui utilise des caractéristiques temporelles, fréquentielles et éventuellement statistiques des signaux.

4.3. Effets des défauts Electriques sur les courants statoriques

Dans les spectres du courant, il y a la présence d'harmoniques conditionnés par la qualité de la tension d'alimentation et les harmoniques qui peuvent provenir suite au défaut de fabrication de la machine elle-même. Quoique l'on utilise les nouveaux Matériaux actifs et les nouvelles technologies de fabrication on ne peut concevoir la machine idéale.

Seulement, dans ce travail de diagnostic ce spectre est considéré comme référentiel et toute émergence de nouvel harmonique ou de modifications dans les amplitudes de celles déjà existantes nécessite une interprétation. Ainsi, les anomalies du moteur et des mécanismes qui lui sont accouplés font apparaître aussi des harmoniques correspondants dans le spectre du courant. Les plus grandes dynamiques présentes dans le spectre du courant se produisent à la fréquence d'alimentation électrique et ses harmoniques.

Les défauts de déséquilibre électrique et de mauvais branchement en générale sont détectés par la lecture des fréquences des harmoniques appropriés de la phase du courant statorique. [17]

$$f_{\text{déf.}} = n f_s \quad \text{avec } n \in \mathbf{R}^{*+} \text{ et impaire}$$

4.4. Campagnes d'Essais et Description

Notre travail a pour objectif d'établir des éléments de diagnostic de défauts électriques de manque d'une phase, de mauvais contact ou des erreurs de branchement. Le choix des techniques et des défauts ciblés a été établi suite à l'étude bibliographique où ces défauts malgré leur importance et la fréquence de leur présence dans les applications industrielles n'ont pas fait l'objet de beaucoup d'études vu les difficultés de leurs modélisations numériques et surtout les risques à encourir lors de leur validation expérimentale

4.4.1. Procédure de la réception des signaux

L'acquisition des signaux pour le diagnostic par un capteur de courant de calibre (0.01-10A) relié à un oscilloscope HAMEG507 relié à un capteur de courant. Cet appareil permet l'acquisition du signal sur 8 bits avec une fréquence d'échantillonnage comprise entre 1 kHz et 2,5 MHz. La visualisation du signal sur l'écran du PC, se fait à l'aide du logiciel appelée *SP107 E*. Le courant statorique est acquis au moyen de la carte d'acquisition intégrée à l'oscilloscope.

Le traitement des données est fait en utilisant le logiciel MATLAB à des fins d'analyse des signaux et à l'aide de ce dernier on reçoit les différents spectres pour chaque phase selon la méthode de traitement de signal FFT.

4.4.2 Les étapes de réalisation de la technique du diagnostic

- Réalisation d'un montage de démarrage du moteur avec un couplage étoile.
- Prendre les signaux des courants statorique par un capteur.
- Faire le traitement des ces signaux par un programme implanté dans MATLAB.
- Commencé une comparaison entre les signaux dans les deux cas sain et défaillant et déduire une relation entre ces dernier pour avoir identifié le type de défaut directement par une simple lecture des signatures des courants statoriques.



Figure .4.1. Banc d'Essai

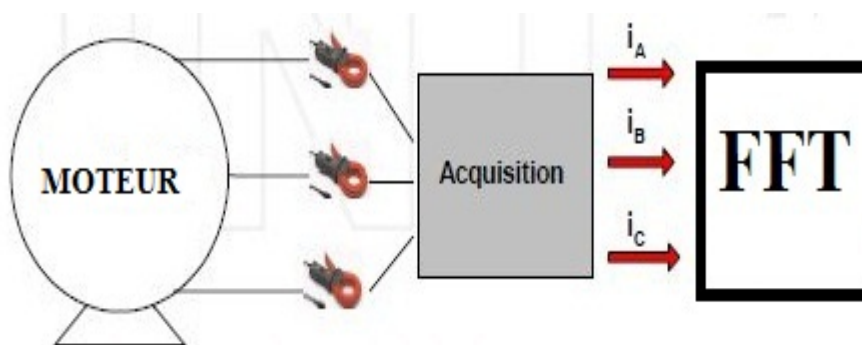


Figure .4.2. Présentation d'acquisition et Traitement des signaux

4.5. Résultats expérimentaux et Analyse

4.5.1 Signature du courant statorique dans le cas du moteur sain.

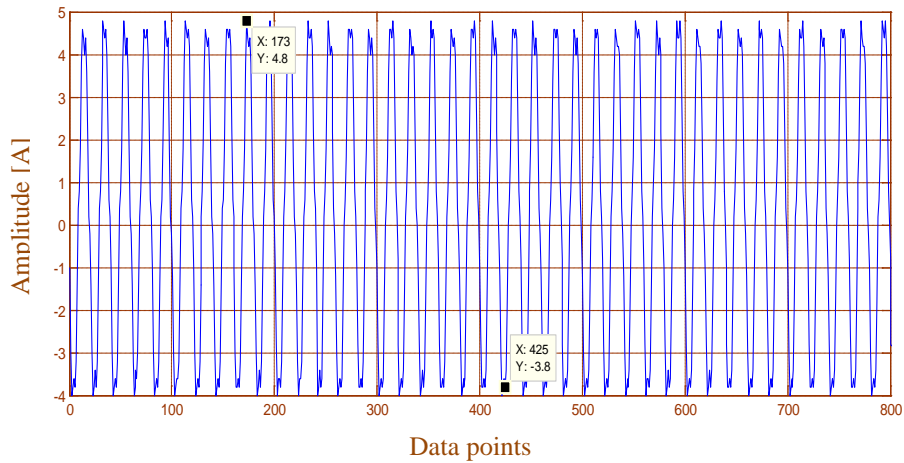


Figure .4.3. Le courant statorique de la machine saine

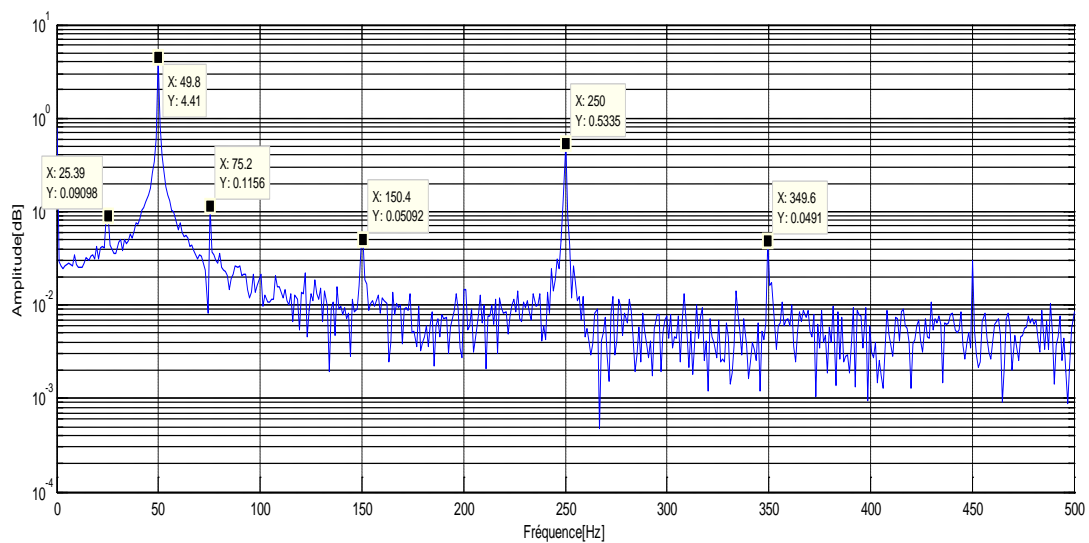


Figure .4.4. Le spectre du moteur sain

Le courant statorique capté est représenté en (figure 4.3) à travers sa caractéristique temporelle lors du fonctionnement sans la présence d'aucune anomalie qu'elle soit externe ou interne à la machine. Rien qu'en se référant à l'ampérage du courant absorbé par le moteur.

4.5.2. Défaut de manque d'une phase d'alimentation

Pour un bon fonctionnement d'un moteur asynchrone triphasé, il doit être câblé à un système triphasé équilibré avec une tension d'alimentation nominale. Une fois que ces l'une des trois phases sont déconnectées elle est nul complètement, le courant dans cette phase tend vers zéro qui provoquent une surcharge.

Les causes de ce défaut sont multiples parmi celles-ci on peut citer :

- 1) Un des trois fusibles de protection contre le court-circuit tombé en panne.
- 2) Une phase d'alimentation du moteur est en circuit ouvert (coupure d'une phase).
- 3) Un mauvais réglage des dispositifs de protection prévus pour le moteur.
- 4) Un contact de puissance de contacteurs est endommagé à l'oxydation.

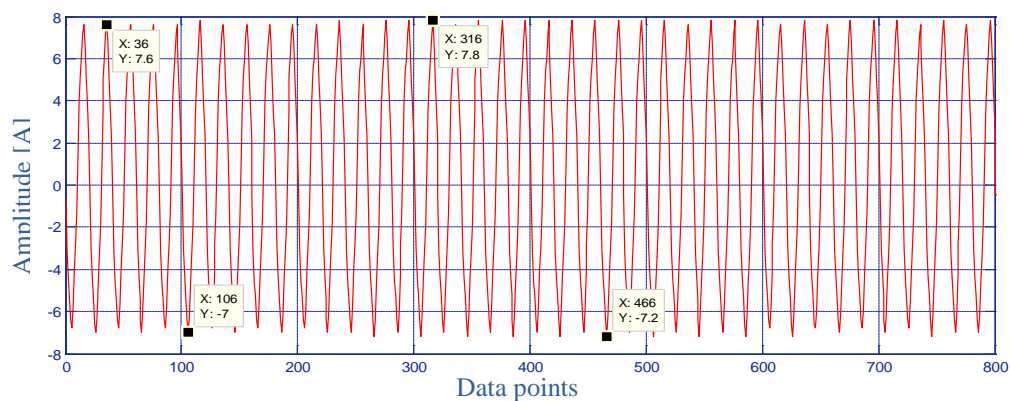


Figure .4.5. Le courant statorique du moteur avec défaut de manque d'une phase

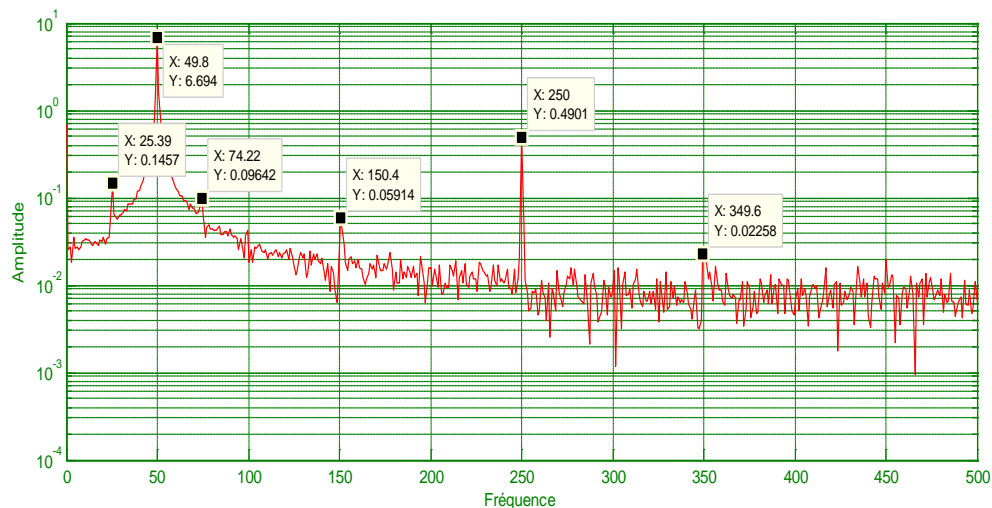


Figure .4.6. Le spectre du moteur avec défaut de manque d'une phase

(La figure 4.6.) montre le spectre du courant statorique lorsque le moteur fonctionne avec une phase qui manque. nous concluons directement qu'il y'a une anomalie importante et d'origine électrique. On remarque l'émergence des harmoniques nf_s avec un accroissement de leurs amplitudes. Les informations numériques sont données sur la figure.

4.5.3. Défaut de mauvais contact

Ce défaut a lieu lorsque l'une des phases n'est pas bien branchée suite à un mauvais contact ou à une coupure de phase d'alimentation. On constate sur la (figure.4.7.) l'augmentation flagrante du courant statorique

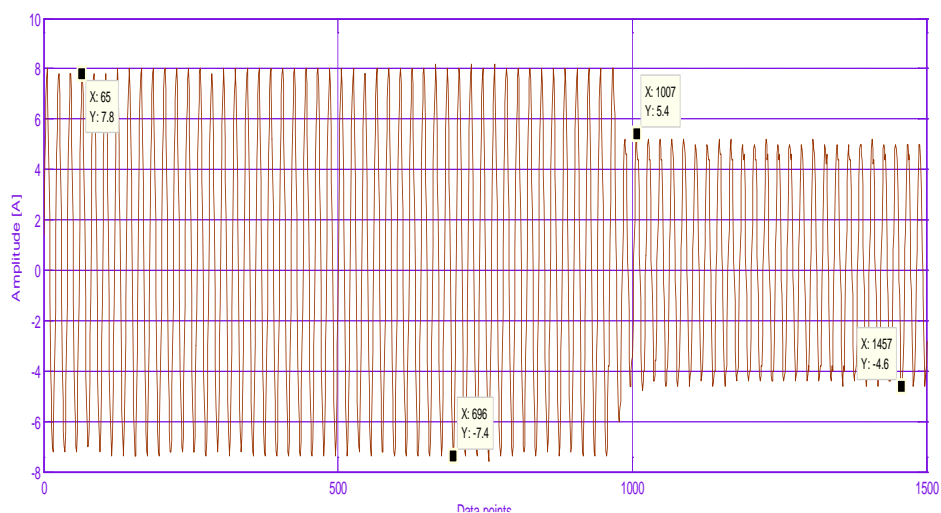


Figure 4.7. Le courant statorique du moteur avec défaut de mauvais branchement

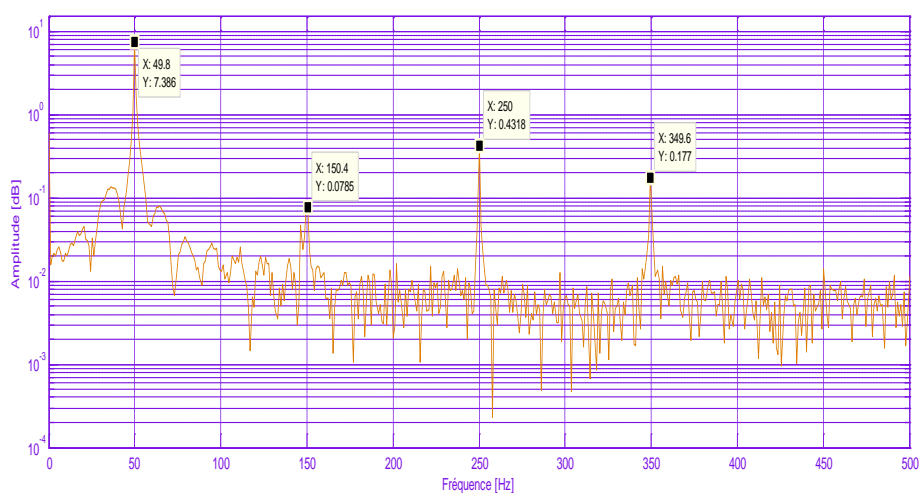


Figure 4.8. Le spectre du moteur avec défaut de mauvais branchement

(Les figures 4.7 et 4.8.), exposent respectivement la caractéristique temporaire du courant phasique et son spectre lorsque le moteur fonctionnait normalement et subitement une coupure de la phase d'alimentation advienne. Nous observons l'apparition des harmoniques impairs avec un accroissement assez remarquables de leurs amplitudes respectives.

4.5.4. Défaut d'erreur de branchement

Suite au défaut d'erreur de branchement qui peut arriver lors des nouveaux montages ou après des réparations, nous observons une augmentation de l'ampérage phasique (Figure.4.9.)

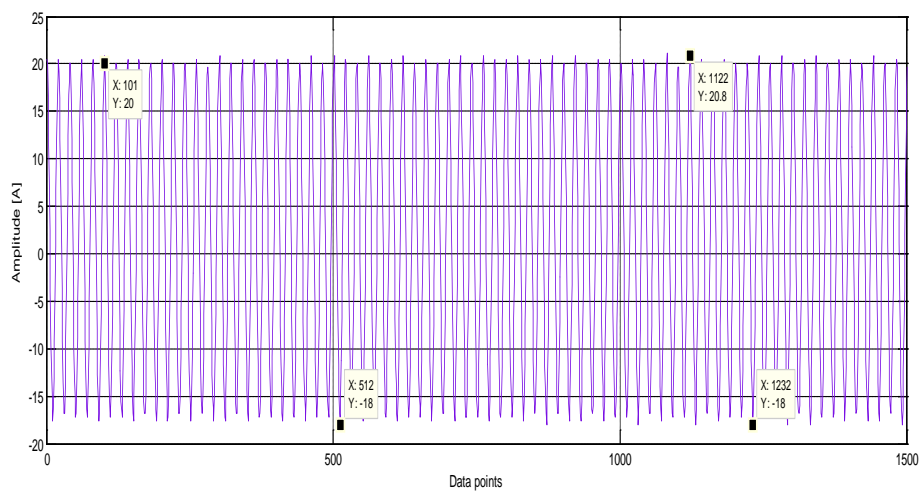


Figure .4.9. Le courant statorique du moteur avec défaut d'erreur de branchement

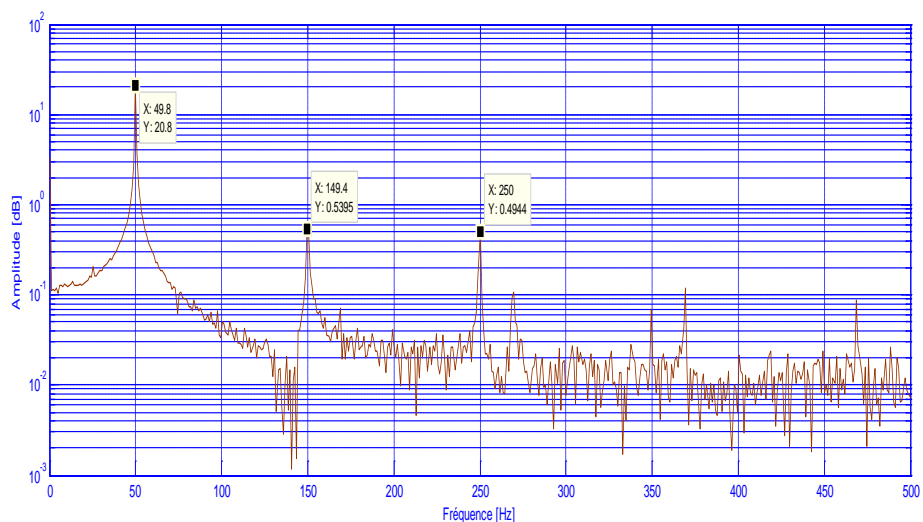


Figure .4.10. Le spectre du moteur avec défaut d'erreur de branchement

(La figure 4.10.) Présente le spectre du courant au moment de l'apparition de ce défaut d'erreur de branchement. On constate l'émergence croissante des harmoniques f_s , $3f_s$ et $5f_s$ qui constituent une signature assez claire pour ce genre d'anomalie électrique.

4.6. Les résultats dans le même plan

Pour avoir plus d'éclaircissement sur les signatures des défauts électriques précités nous donnons sur les (figures 4.11, 4.12, et 4.13.) respectivement le spectre des courant pour chaque situation de défaillance (en rouge) accompagné de celui à l'état sain (en bleu)

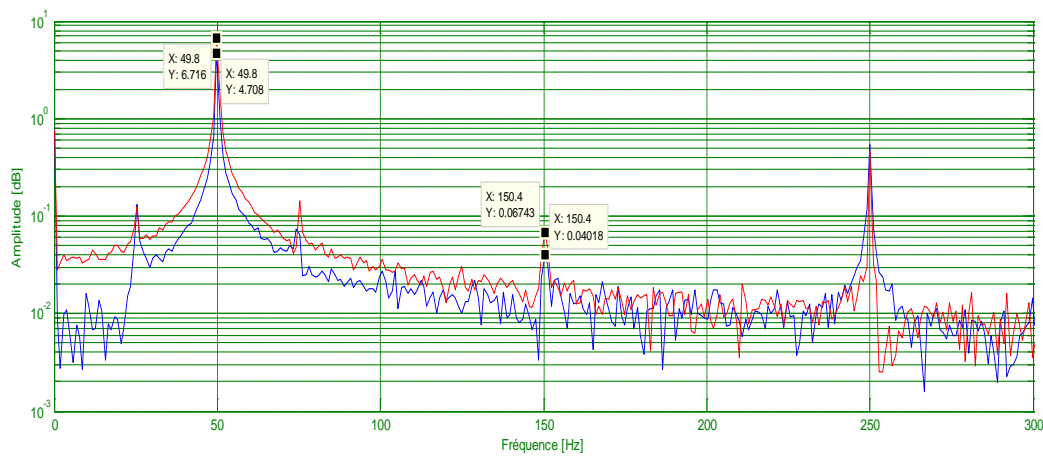


Figure .4.11. Les Spectres du moteur sain et avec défaut de manque d'une phase

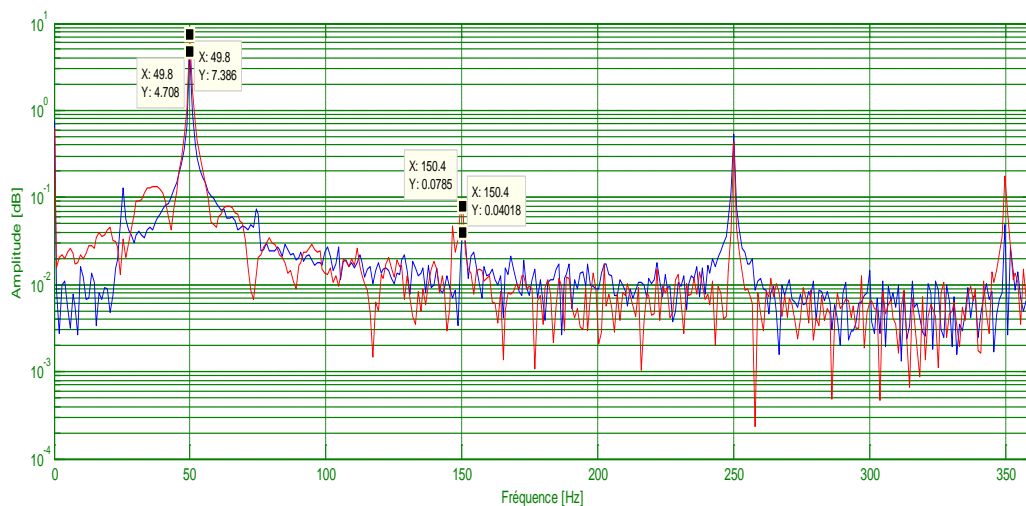


Figure .4.12. Les spectres du moteur sain et avec défaut de mauvais branchement

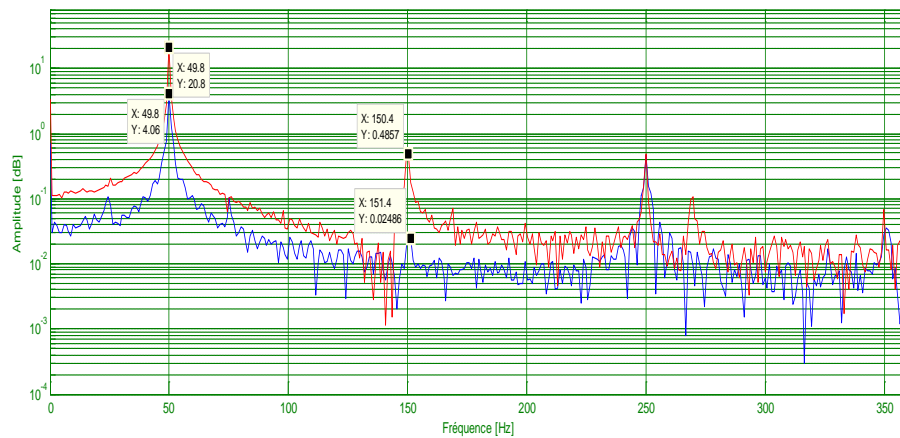


Figure .4.13. Le spectre du moteur sain et avec défaut d'erreur de branchement

4.7. Signatures des défauts par la reconnaissance des formes en 3D

Moteur sain :

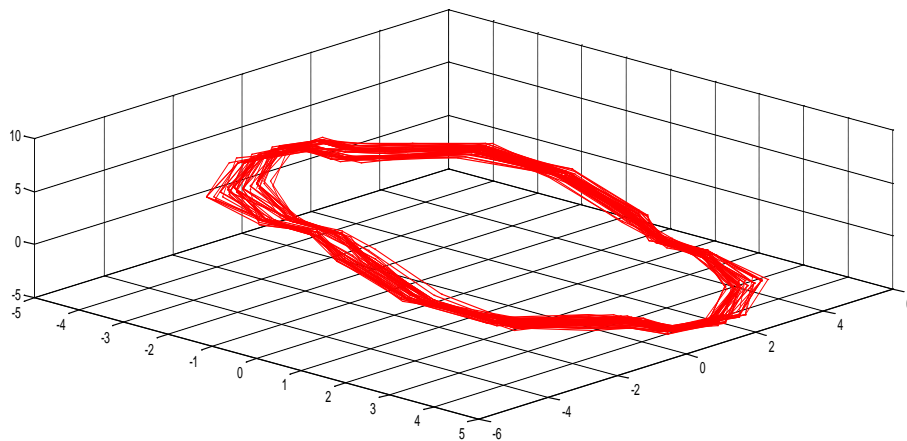


Figure.4.14. Motifs en 3D pour le mode de fonctionnement du moteur sain

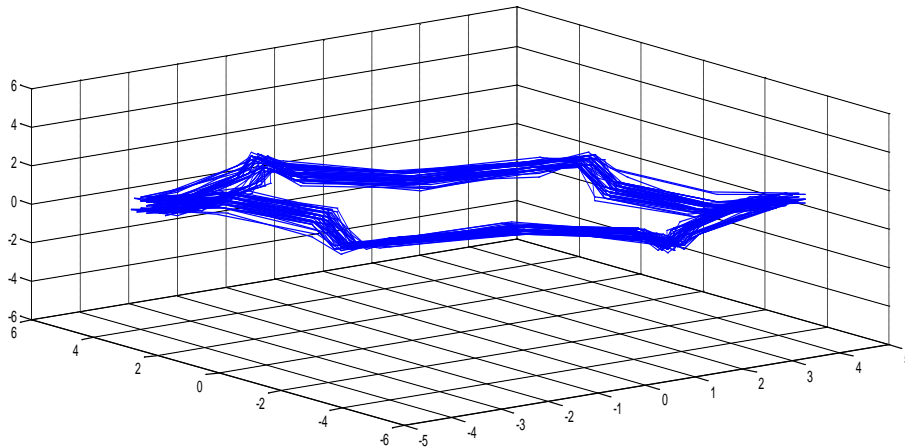
Moteur défaillant :

Figure .4.15. Motifs en 3D pour le mode de fonctionnement du moteur sain en présence d'un défaut de manque d'une phase

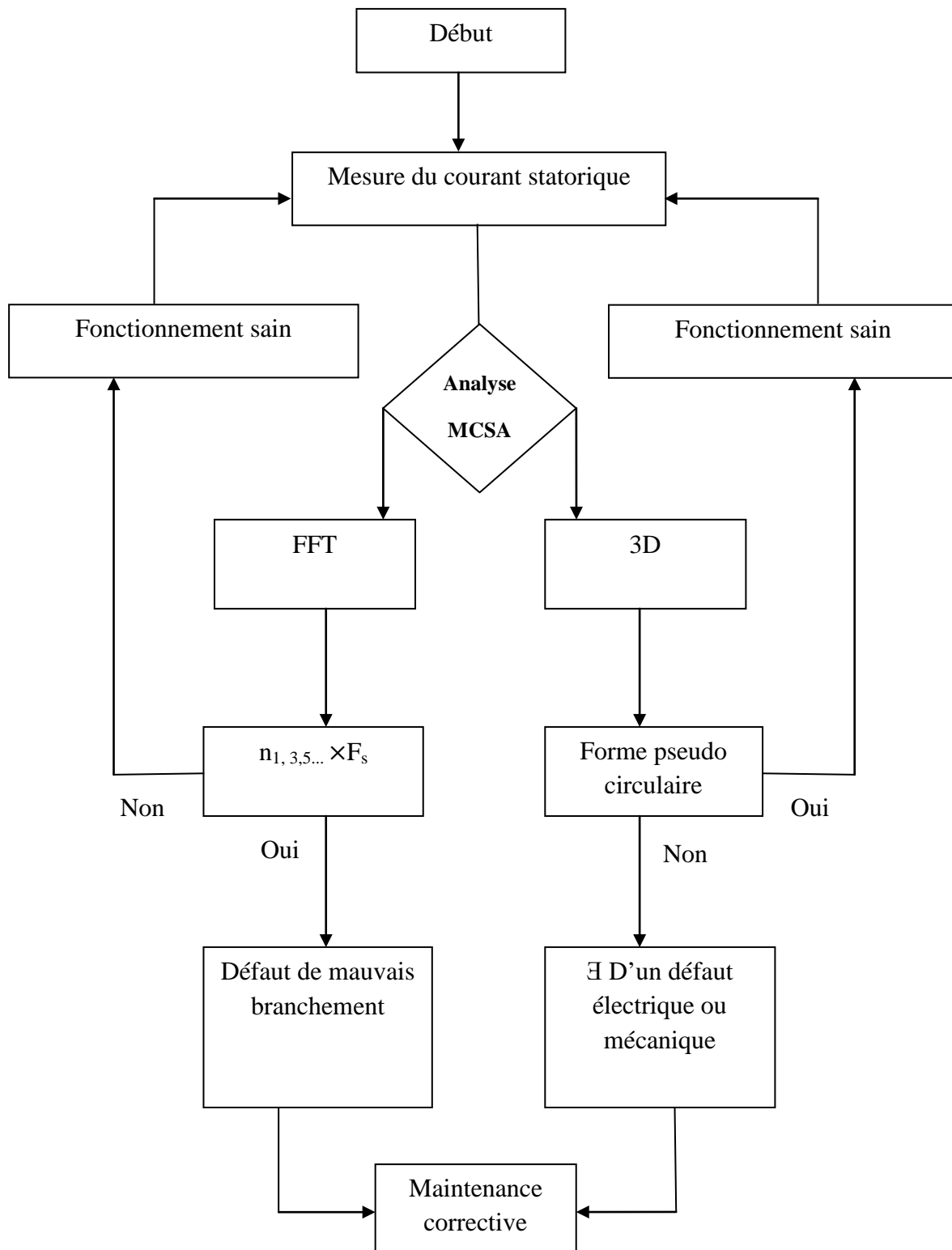
4.8. Interprétation des résultats

La figure 4.4 expose le motif obtenu pour l'état sain du moteur. Il est à noter que l'orbite obtenue n'est pas parfaitement circulaire ; ceci est justifié par les imperfections de fabrication du moteur.

Par contre le motif obtenu dans le cas défaillant (Fig. 4.4), on a remarqué une dégradation major de la géométrie circulaire cela nous indiquons que il ya un défaut affect la machine a induction au premier temps et pour arriver à déterminer la nature de ce défaut on doit de faire d'autre opération de diagnostic tel que FFT pour découvrir les défauts de nature électrique et l'analyse vibratoire pour déterminée les défauts de nature mécanique.

4.9. Synthèse des techniques du diagnostic utilisées

On fait une synthèse des techniques du diagnostic utilisées dans cette étude par la présentation de cet organigramme explicatif de notre méthodologie de détection et du diagnostic des défauts électriques que nous avons ciblé dans notre étude.

**Figure .4.16.** Synthèse du diagnostic étudié

Afin de synthétiser cet organigramme (Fig4.14) nous tenons à résumer notre contribution sur le diagnostic et la détection efficace et simple et à l'extraction de manière précise des informations relatives aux défauts électriques du mauvais branchement des moteurs asynchrones en se s'adressant vers le spectre des courants statoriques (FFT) et en suggérant une approche supplémentaire de signatures des défauts sous forme de motifs (3D).

4.10. Conclusion

Dans ce chapitre les résultats expérimentaux et leurs interprétations sont indiquées. Ils illustrent la possibilité et la sensibilité de détection de défauts multiples moyennant le captage du courant circulant dans le stator.

Il est conclu que l'analyse de la signature des courants du moteur sous forme fréquentielle et à travers les motifs apparaît comme une méthode qui peut contribuer à l'amélioration de la fiabilité de la détection et la surveillance des défauts simples et multiples aussi bien électriques que mécaniques pouvant affecter les entraînements électriques à base de moteur à induction. Il faut noter aussi que ces deux techniques jouent un rôle beaucoup plus complémentaires qu'alternatives. En outre, l'interprétation des motifs et la lecture des signatures ne posent aucune difficulté et elle est à la portée de maintiens pas forcément experts dans le diagnostic. Appliquées ensemble, ces approches de traitement du signal peuvent être un moyen très sensible, sélectif et rentable pouvant contribuer à la surveillance des entraînements électromécaniques à base de moteur asynchrone à vitesse constante et à vitesses variables peuvent être injecté dans l'automatisation du diagnostic.

Conclusion générale

Conclusion générale

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

Nous avons focalisé notre étude sur les MAS à cage : d'une part, ce sont les plus utilisées actuellement, à raison de leur simplicité de construction, leur faible coût d'achat et de fabrication, leur robustesse mécanique ou encore leur quasi-absence d'entretien et leur fonctionnement à vitesse variable grâce à l'avancée de l'électronique de puissance ; à tel point que nous les trouvons maintenant dans tous les domaines industriels. Pour cela, n'oublions pas que l'arrêt non programmé ou le fonctionnement anormal de l'outil de production, et le non-respect des délais qui s'en suivent, engendrent en effet des coûts que les entreprises ne sont plus en état de supporter et elles peuvent perdre leurs noms dans un marché concurrentiel, ce qui influe directement sur leurs milieux économiques, et déclarer enfin leur faillite.

Le travail présenté dans ce mémoire s'inscrit dans le cadre du diagnostic des défauts dans les moteurs asynchrones triphasés à cage. Nous avons focalisé l'étude de diagnostic sur les défauts électriques très critiques qui peuvent détériorer le bobinage du moteur dus aux mauvais branchements et aux problèmes de l'alimentation électrique à savoir tels que le mauvais contact d'une phase, l'erreur de branchement des phases du moteur, l'absence d'une phase,....

Les défauts électriques que nous avons essayé d'étudier expérimentalement au laboratoire sont très dangereux aussi bien pour le moteur que pour le personnel. En l'absence d'une protection électromagnétique rigoureuse, le moteur à induction ne peut échapper à une mise en court circuit de ses enroulements suite au défaut de masse et par conséquent sa mise hors service. Cette investigation expérimentale permet une surveillance du bon fonctionnement à l'état sain du moteur et à défaut peut contribuer à une expertise fiable en cas d'avarie suite à ce défaut électrique très critique et à grand risque pour l'installation.

Dans cette étude, nous avons réalisé une simulation numérique pour voir l'impact des défauts électriques préconisés sur les autres grandeurs électromécaniques de la machine à savoir le couple, la vitesse, et les courants statoriques. Afin de représenter expérimentalement le comportement de la machine lors d'un fonctionnement normal (MAS sain) et anormal (MAS défaillante), nous avons simulé des MAS face à des défauts statoriques. Ensuite, Nous avons effectué l'analyse spectrale du courant statorique, par la transformée de Fourier rapide (FFT) qui nous a offert la possibilité de détecter les défauts statoriques.

Enfin, une représentation en 3D des intensités des trois courants phasiques qui nous a permis d'avoir des motifs nous permettant de juger de l'état du moteur s'il est sain ou en voie de dégradation

Comme perspective, il nous semble important de recommander à se pencher sur la reformulation mathématique par un modèle descriptif de ces défauts et d'en faire une simulation complète suivie d'une validation expérimentale par des techniques avancées du traitement du signal basées sur l'intelligence artificielle

Annexe

Banc expérimental :

Un banc d'essai a été nécessaire pour le diagnostic du moteur asynchrone à cage. Le travail expérimental consiste au captage et à l'acquisition des intensités des trois phases du courant statorique du moteur asynchrone depuis son démarrage jusqu'à sa stabilité pour les modes de fonctionnement sain et défaillante.

On a simulé le moteur à cage réellement par les moyennes suivantes :

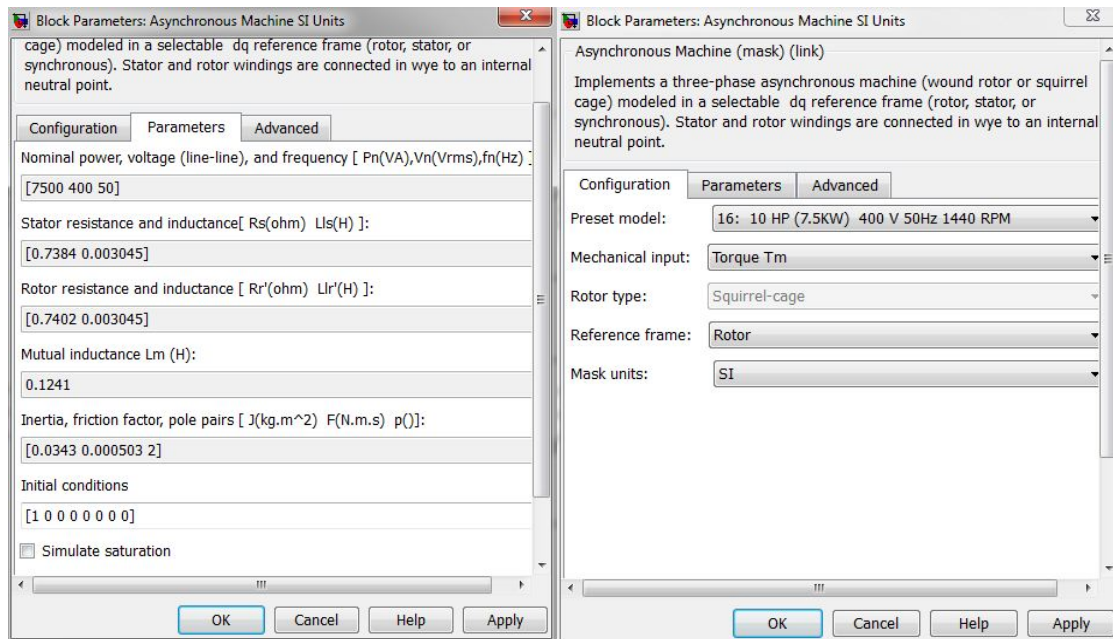
- Un moteur asynchrone de marque LEROY SOMMER
- Oscilloscope analogique
- Un capteur de courant
- Des files électriques
- Une Source triphasée
- Un micro-ordinateur contient les logiciels du traitement (SP107E, EXCEL et MATLAB)

Caractéristiques du moteur d'essai

Le banc est composé d'un moteur asynchrone triphasé à cage d'écureuil Leroy Sommer, ou la plaque signalétique nous donne les informations suivantes :

- ❖ LS132S, IP 55, Classe F, T°C Normalisée = 40°C, Régime Nominal S1.
- ❖ La tension nominale entre phases : 380 [V].
- ❖ La fréquence d'alimentation : 50 [Hz].
- ❖ La vitesse nominale : 1450 [tr/min].
- ❖ La puissance utile nominale : 2.6 [kW].
- ❖ Le facteur de puissance : $\cos\phi = 0.84$.
- ❖ Le courant nominal : 6.9 [A].
- ❖ Le nombre de paires de pôles : $p = 2$.
- ❖ La résistance stator par phase : 1.315 [Ω].
- ❖ Le nombre d'encoches au rotor $N_r = 28$,
- ❖ Le nombre d'encoches au stator $N_s = 48$.
- ❖ Les enroulements du stator sont couplés en étoile.

Caractéristiques du moteur dans la simulation numérique



L'implantation d'un calculateur FFT selon la base d'un programme script comme suivant :

```
def fft2(u,q):
```

```
    N = 2**q
```

```
    x = numpy.array(u,dtype=complex)
```

```
    y = numpy.zeros(2**q,dtype=complex)
```

```
    rangerInversionBits(q,x,y)
```

```
    z = x
```

```
    x = y
```

```
    y = z
```

```
    for e in range(1,q+1):
```

```
        for indice in range(N):
```

```
            etapeFFT_unite(x,y,q,e,indice)
```

```
        z = x
```

```
        x = y
```

```
        y = z
```

```
    return x
```

Référence bibliographique

- [1] : Bapio BAYALA ; cours machine asynchrone, université Dakar, Sénégal 2010.
- [2] : MEDOUED AMMAR, Surveillance et diagnostic des défauts des machines électriques : applications aux moteurs asynchrones, thèse de doctorat, université de Skikda, Algérie 2012.
- [3] : SAAD Saleh, cours modélisation et simulation, université Annaba, Algérie 2017.
- [4] : Claude CHEVASSU, MACHINES ÉLECTRIQUES Cours et Problèmes, école national supérieur maritime, France 2012.
- [5] : KERFALI Samir, Contribution à la Surveillance et au Diagnostic des Défauts De la Machine Asynchrone, thèse de doctorat, université d'Annaba Algérie 2016.
- [6] : Razik H., « Notes de cours sur le diagnostic de la machine asynchrone », Groupe de Recherches en Electrotechnique et Electronique, Université de Henri Poincaré Nancy, France, 2003.
- [7] : Didier G., « Modélisation et diagnostic de la machine asynchrone en présence de défaillances », Thèse de doctorat, Université Nancy 1, France, 2004.
- [8] : BOUGUREME Amel, diagnostique automatique des défauts des moteurs asynchrones, mémoire de magister Electrotechnique, université de Constantine, algerie2009.
- [9] : Noureddine BESSOUS, Contribution Au Diagnostic Des Machines Asynchrones, magister en Electrotechnique, université de Constantine Algérie 2013.
- [10] : SADKI Nour elhouda, Simulation des défauts statorique d'un moteur a asynchrone, mémoire master en Electrotechnique, université Ouargla 2015.
- [11] : BAZI Smail, Contribution à la Détection et au Diagnostic des Défauts dans un Système Machine à Induction-Convertisseur, Ingénieur d'État en Électrotechnique de, Université de Batna 2016.
- [12] : M. Gheorghe, Application Simulink pour l'étude par simulation des systèmes d'entraînement de machines électriques, Mémoire de maîtrise, Ecole Polytechnique de Montréal, 1995.
- [13] : DJAGHOT.Z, cours commande des moteurs master1 électromécanique, université d'Annaba 2016.

[14] : LOUHLM, cours du câblage des armoires électriques institue supérieur de formation professionnel d'Annaba 2017.

[15] : BELBECHE Adel « Modélisation, Diagnostic et Commande d'une Machine Asynchrone avec Rupture d'une Phase », Diplôme Ingénieur d'Etat en Electrotechnique de l'Université de Batna 2013.

[16] : Loures R, «Surveillance et diagnostic des phases transitoires des systèmes hybrides basés sur l'abstraction des dynamiques continues par réseau de pétri temporel flou», Thèse de Doctorat, Université de Toulouse, France, 2006.

[17] : Bouras A/K, Bouras. S Approches multiples d'Analyse du Courant dédiées à la Détection prédictive du Défaut de Branchement d'un moteur à induction, publication scientifique ; université d'Annaba décembre 2016.