



République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Echahid Hamma Lakhdar - El Oued

Faculté de la Technologie

Département de Génie Électrique

Mémoire de fin d'études

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

Spécialité : Machines électriques

Intitulé :

**Détection des défauts dans la machine asynchrone
triphasée par analyse du courant statorique**

Présenté par :

1. KERROUCHE Youcef
2. AMRI Chraf Eddine

Devant le jury composé de :

Dr : ALLAL Abdelrahim

Dr : CHENOUFI Hakim

Dr : HALEM Noura

Président

Examineur

Encadreur

Année universitaire : 2025/2026

Remerciements

Avant tout, nous remercions notre Dieu Tout-Puissant de nous avoir donné la force d'atteindre notre but et d'accomplir notre travail.

*Que nos remerciements les plus sincères s'adressent tout particulièrement à notre encadrante, la docteure **Halem Noura**, qui nous a encadrés tout au long de ce travail, pour ses conseils, sa patience, son soutien permanent et ses encouragements, qui nous ont permis de mener à bien ce mémoire.*

Enfin, nous adressons tous nos remerciements les plus sincères à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la concrétisation de ce travail.

Nos remerciements vont également à toutes les personnes que nous n'avons pas citées et qui ont participé, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail.

Dédicace

*À nos chers parents, avec toute notre gratitude Pour
toutes ces années de sacrifices et d'encouragement.*

À nos frères et sœurs et à toute notre famille.

À tous les amis.

À tous ceux que nous aimons...

Nous dédions ce travail.

Youcef /Chraf Eddine

تُستخدم عدة تقنيات للكشف عن الأعطال في الآلة غير المتزامنة، من بينها تحليل التيار الساكن (MCSA). تعتمد هذه المقاربة على دراسة ومحاكاة سلوك الآلة بهدف استغلال النتائج في كشف الأعطال، خاصة الأعطال المرتبطة بالدوار.

الكلمات المفتاحية: آلة غير متزامنة، كشف الأعطال، تحليل التيار الساكن (MCSA)، تحويل فورييه السريع (FFT)، التيار الساكن، MATLAB/Simulink.

Résumé :

Plusieurs techniques sont utilisées pour la détection des défauts dans la machine asynchrone, notamment l'analyse du courant statorique (MCSA).

Cette approche repose sur l'étude et la simulation du comportement de la machine afin d'exploiter les résultats pour la détection des défauts, en particulier les défauts rotoriques.

Mots clés : Machine asynchrone, détection des défauts, MCSA, FFT, courant statorique, MATLAB/Simulink

Abstract:

Several techniques are used for fault detection in asynchronous machines, notably Motor Current Signature Analysis (MCSA).

This approach is based on studying and simulating the machine behavior in order to exploit the obtained results for fault detection, particularly rotor faults.

Keywords : Asynchronous machine, fault detection, MCSA, Fast Fourier Transform (FFT), stator current, MATLAB/Simulink.

Table des matières

Remerciements	
Dédicace	
Résumé	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Liste des Symboles	
Introduction générale	1
 Chapitre I : Généralités sur le diagnostic des défauts dans la machine asynchrone	
I.1	Introduction 2
I.2	Présentation de la machine asynchrone 2
I.2.1	Constitution de la machine asynchrone 2
I.2.2	Principe de fonctionnement d'une machine asynchrone 4
I.3	Terminologie du diagnostic des défauts 5
I.4	Les défaillances de la machine asynchrone 6
I.4.1	Défaillances d'ordre électrique 7
I.4.2	Défaillances d'ordre mécanique 10
I.5	Méthodes de diagnostic des défauts dans la machine asynchrone 12
I.5.1	Les méthodes de connaissances 12
I.5.2	Les méthodes de redondances analytiques 12
I.5.3	Méthodes par l'analyse de signaux 12
I.6	Conclusion 14
 Chapitre II : Modélisation multi-enroulements et détection des défauts de la machine asynchrone	
II.1	Introduction 15
II.2	Prélude 15
II.3	Modèle multi enroulements 16
II.3.1	Calcul des inductances 16
II.3.2	Mise en équations 17
II.3.3	Equations de tensions au stator 17
II.3.4	Equations de tensions au rotor 18
II.3.5	Equation globale des tensions 19
II.4	Machine montrant ensemble les états sain et de défaut 21
II.5	Résultats de simulation pour forte charge 24
II.6	Conclusion 26
 Chapitre III : Modèle réduit issu du modèle multi-enroulements et résultats de simulation	
III.1	Introduction 27
III.2	Transformation de Clarke généralisée 27
III.2.1	Modèle réduit 28
III.3	Simulation et résultats 29
III.4	Conclusion : 42
Conclusion générale	44
Références bibliographiques	

Liste des figures

Chapitre I Généralités sur la machine asynchrone

Figure I.1. Eléments de constitution d'une MAS à cage d'écureuil.....	3
Figure I.2. Stator d'un moteur asynchrone triphasé	3
Figure I.3. Vue schématique du rotor	4
Figure I.4. Sources de défauts de la machine asynchrone	7
Figure I.5. Ruptures de barres	8
Figure I.6. Représentation de l'excentricité a) statique, b) dynamique c) mixte.	9
Figure I.7. Différents types de courts-circuits enter-spires	11
Figure I.8. Structure d'un roulement à billes.....	12
Figure I.9. Méthodes de diagnostic de la machine asynchrone	13
Figure I.10. Principaux points de mesure utilisés pour le diagnostic.....	14

Chapitre II Modélisation multi-enroulements et détection des défauts de la machine asynchrone

Figure II.1. Schéma du rotor représenté par des mailles électriques.....	16
Figure II.2. Schéma électrique équivalent, à mailles, de la cage rotorique.	18
Figure II.3 .Modèle multi-enroulements, schéma de simulation.....	21
Figure II.4. Courant i_{ds} , état sain et en défaut.....	22
Figure II.5. Zoom du courant i_{ds}	22
Figure II.6 .Courant statorique i_a , état sain et en défaut.....	22
Figure II.7 .Zoom du courant i_a	22
Figure II.8 .Vitesse angulaire ω_m , état sain et en défaut.....	22
Figure II.9 .Zoom de la vitesse ω_m	22
Figure II.10 .Couple électromagnétique C_{em} , état sain et en défaut.	23
Figure II.11 .Zoom du couple C_{em}	23
Figure II.12 .Courants des barres rotoriques, état sain et en défaut.	23
Figure II.13 .Zoom des courants des barres.....	23
Figure II.14 .Courants des barres 0 à 4.....	24
Figure II.15 .Courants des barres 5 à 9.....	25
Figure II.16 .Spectre du courant i_a , échelle linéaire.....	25
Figure II.17 .Spectre du courant i_a , échelle en dB.	25
Figure II.18 Spectre de la vitesse ω_m , échelle linéaire.	25
Figure II.19 .Spectre de la vitesse ω_m , échelle en dB.....	25
Figure II.20 .Spectre du couple électromagnétique C_{em} , échelle linéaire.	26

Figure II.21 .Spectre du couple électromagnétique Cem, échelle en dB.....	26
---	----

Chapitre III Modèle réduit issu du modèle multi-enroulements et résultats de simulation

Figure III.1. Schéma de simulation	30
Figure III.2. courants ids et iqs en quadrature, état sain	31
Figure III.3. Courant statorique, état sain	31
Figure III.4. Module du courant statorique, état sain	32
Figure III.5. Carré du courant statorique, état sain	32
Figure III.6. Couples électromagnétiques et résistants, état sain	33
Figure III.7. Vitesse de rotation, état sain.....	33
Figure III.8. Courants ids et iqs montrant ensemble l'état sain et l'état de défaut	34
Figure III.9. Module des courants ids et iqs exposant ensemble l'état sain et l'état de défaut	34
Figure III.10. Carré du courants ids montrant ensemble l'état sain et l'état de défaut à partir de 2.4s les ondes diffèrent des premières.....	35
Figure III.11. Courant ias statorique dévoilant la partie saine et la partie en défaut Les ondulations débutent à l'instant 2.4 s	35
Figure III.12. Couples électromagnétique et résistants les ondulations apparaissent à l'instant de l'instauration du défaut	36
Figure III.13. Vitesse de rotation, les ondulations apparaissent à l'instant de l'instauration du défaut	36
Figure III.14. Courant statorique, l'enveloppe est ondulée, état de défaut.....	37
Figure III.15. Modules des courants des états sain et en défaut, le module ondulé de défaut entoure le module sain	37
Figure III.16. Carré des courants des états sain et en défaut, le signal rouge de défaut a des ondes déformées par rapport au bleu et une fréquence plus élevée	38
Figure III.17. Spectre du courant statorique, échelle linéaire, état de défaut	38
Figure III.18. Spectre du courant statorique, échelle en db, état de défaut	39
Figure III.19. Spectre du module de idqs, échelle linéaire, état de défaut	39
Figure III.20. Spectre du module de idqs, échelle en db, état de défaut.....	40
Figure III.21. Spectre du courant ids, échelle en linéaire, état de défaut	40
Figure III.22. Spectre du courant ids, échelle en db, état de défaut	41
Figure III.23. Spectre du carré du courant ids, échelle en linéaire, état de défaut.....	41
Figure III.24. Spectre du carré du courant ids, échelle en db, état de défaut.....	42

Liste des tableaux

Tableau II.1. Inductances de la machine asynchrone à cage	16
---	----

Liste des Symboles

MAS	Machine Asynchrone.
MCSA	Motor Current Signature Analysis.
FFT	Fast Fourier Transform.
g	Glissement.
n	Vitesse de rotation du rotor (tours. s-1).
n_s	Vitesse de rotation de synchronisme du champ tournant (tr. s-1).
Nr	Nombre de barres rotoriques.
L_{sp}	Inductance principale d'une phase statorique
L_{rp}	Inductance principale d'une maille rotorique
μ_0	Perméabilité magnétique du vide (de l'air).
N_s	Nombre de spires statoriques par phase.
e	Entrefer.
p	Nombre de paires de pôles
i_{bk}	Courant dans la barre k
i_{rk}	Courant dans la maille k.
i_{ek}	Courant dans une portion d'anneau.
i_e	Courant dans l'anneau de court- circuit.
M_s	Inductance mutuelle entre deux phases statoriques [H].
M_{sr}	Inductance mutuelle entre phase de stator et une phase de rotor [H].
C_e	Couple électromagnétique [N.m].
C_r	Couple résistif [N.m].
i_{sa}, i_{sb}, i_{sc}	Courants statoriques [A].
i_{ra}, i_{rb}, i_{rc}	Courants rotoriques [A].
R_s	Résistances propres d'une phase statoriques.
a, b, c	Indice correspondent aux trois phases (a,b,c).
$[L_s]$	Matrice des inductances statoriques [H].
$[L_r]$	Matrice des inductances rotoriques [H].
$\Phi_{sa}, \Phi_{sb}, \Phi_{sc}$	Les flux statoriques [Wb].

$\Phi_{ra}, \Phi_{rb}, \Phi_{rc}$	Les flux rotoriques [wb].
R_e	Résistance totale de l'anneau de court-circuit.
L_e	Inductance totale de l'anneau de court-circuit.
L_{sc}	Inductance statorique cyclique (H)
A_{Rdf}	Matrice de défaut supplémentaire
R_{rqq}	Résistance rotorique selon l'axe q (Ω)
R_{rdd}	Résistance rotorique selon l'axe d (Ω)
W_r	Vitesse angulaire du rotor (rad.s^{-1})
R_{rfdq}	Matrice de résistance rotorique en présence de défaut
T_{2Nr}	Transformation de Clarke généralisée ($2 \times N_r$)
M_{rr}	Inductance mutuelle entre mailles rotoriques non adjacentes (H)
L_{Ltr}	Matrice inductance réduite
R_{Rtr}	Matrice résistance réduite
V_{ds}	Tension statorique selon l'axe d (V)
V_{qs}	Tension statorique selon l'axe q (V)

Introduction générale

Introduction générale

Les machines électriques constituent des éléments essentiels des systèmes industriels modernes, car elles assurent la conversion de l'énergie électrique en énergie mécanique et inversement. Parmi ces machines, la machine asynchrone triphasée est la plus utilisée dans les applications industrielles, grâce à sa simplicité, sa robustesse, son faible coût et sa facilité de maintenance.

Avec le développement industriel et l'automatisation croissante des systèmes, la surveillance et le diagnostic des défauts des machines électriques sont devenus des enjeux majeurs afin d'assurer la continuité de service et de réduire les arrêts non planifiés pouvant engendrer des pertes économiques importantes. Dans ce contexte, plusieurs techniques modernes de diagnostic ont été développées, basées sur l'analyse des signaux électriques et physiques du système.

L'objectif principal de ce travail est la détection des défauts rotoriques de la machine asynchrone triphasée par l'analyse du courant statorique, en utilisant la méthode MCSA et la transformée de Fourier rapide (FFT).

Dans ce cadre, ce mémoire porte sur l'étude et le diagnostic des défauts de la machine asynchrone triphasée et s'articule autour de trois chapitres :

Le premier chapitre est consacré aux généralités sur la machine asynchrone et le diagnostic de ses défauts. Il présente la constitution et le principe de fonctionnement de la machine, la terminologie du diagnostic, les différentes défaillances d'ordre électrique et mécanique, ainsi que les principales méthodes de diagnostic basées sur les connaissances, la redondance analytique et l'analyse de signaux.

Le deuxième chapitre traite de la modélisation multi-enroulements et de la détection des défauts. Il présente le modèle multi-enroulements, le calcul des inductances, la mise en équations, les équations de tensions au stator et au rotor, ainsi que les résultats de simulation montrant le comportement de la machine en état sain et en présence de défauts rotoriques, complétés par une analyse spectrale FFT.

Le troisième chapitre présente le modèle réduit issu du modèle multi-enroulements. Il expose la transformation de Clarke généralisée permettant de passer d'une modélisation multi-enroulements à une modélisation diphasée équivalente dans le repère d-q, ainsi que les résultats de simulation obtenus à partir de ce modèle réduit, en vue du diagnostic des défauts par analyse du courant statorique (MCSA) et la transformée de Fourier rapide (FFT).

Chapitre I : Généralités sur le diagnostic des défauts dans la machine asynchrone

I.1 Introduction

Actuellement, les machines asynchrones sont considérées comme l'outil de conversion électromécanique le plus largement utilisées dans l'environnement industriel. Cela se justifie par sa simplicité de construction, son faible coût d'acquisition et sa robustesse mécanique. Malgré ses qualités, elle subit un certain nombre de contraintes électriques, mécaniques et chimiques au cours de sa durée de vie, qui peuvent la rendre potentiellement défaillante, ce qui conduit à un arrêt irréparable entraînant des pertes économiques considérables. D'où la nécessité d'une surveillance constante de l'état de cet appareil. Par conséquent, il est essentiel de développer des systèmes de diagnostic précis afin de détecter à un stade précoce les défauts susceptibles de survenir dans ce type de machines [1].

Une surveillance adéquate de cette machine nécessite une connaissance des défauts, incluant en particulier ses caractéristiques fréquentielles et toutes les informations de fonctionnement du moteur dans les états sain et défectueux.

Après ces considérations, nous commencerons ce chapitre par rappeler les différents éléments constituant cette machine. Ensuite, nous présenterons les différents défauts pouvant survenir sur chacun d'eux. À la fin de ce chapitre, nous aborderons les méthodes de diagnostic appliquées à la machine asynchrone.

I.2 Présentation de la machine asynchrone

La machine asynchrone est une machine à courant alternatif fonctionnant selon le principe de l'induction électromagnétique. Son fonctionnement repose sur la création d'un champ magnétique tournant au niveau du stator, qui induit des courants dans le rotor. Afin de mieux comprendre son comportement et les défauts susceptibles de l'affecter, il est nécessaire d'examiner sa structure interne [2].

I.2.1 Constitution de la machine asynchrone

Bien que la paternité des machines asynchrones soit attribuée à plusieurs chercheurs, il est admis qu'en 1889, Mikhaïl Dolivo Dobrovolski, électricien allemand d'origine russe, invente le premier moteur asynchrone à courant triphasé à cage d'écureuil, construit industriellement à partir de 1891. Ces machines ont progressivement pris de l'ampleur grâce à leur simplicité d'utilisation et d'entretien, leur robustesse et leur faible coût. Notre étude porte sur la machine asynchrone triphasée à cage d'écureuil, souvent appelée moteur à induction, qui est un dispositif électromécanique permettant la conversion de l'énergie par induction électromagnétique. Elle comprend un stator, partie fixe contenant les enroulements reliés à la source, et un rotor, partie mobile montée sur l'axe de rotation. Plusieurs composants

mécaniques et électriques travaillent ensemble pour produire le mouvement rotatif, comme illustré dans la figure I.1. [1][12].

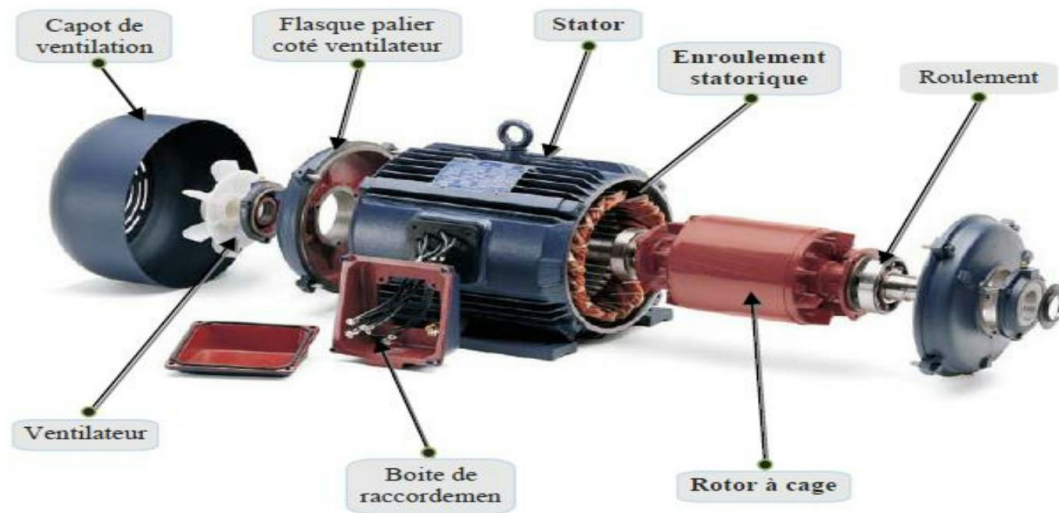


Figure I. 1. Eléments de constitution d'une MAS à cage d'écureuil

I.2.1.1 Le stator

Les différentes catégories de moteurs asynchrones se distinguent essentiellement par la configuration du rotor, tandis que le stator demeure identique dans son principe de conception et est composé d'un enroulement bobiné, uniformément réparti dans les encoches du circuit magnétique statorique, lequel est réalisé par un empilage de tôles ferromagnétiques dans lesquelles sont aménagées des encoches parallèles à l'axe longitudinal de la machine, destinées à loger les conducteurs de l'enroulement [7].

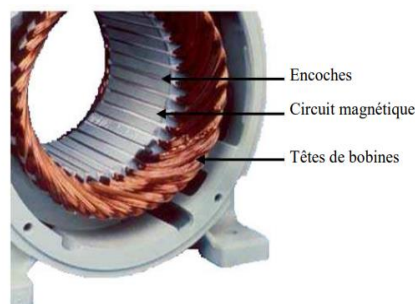


Figure I. 2. Stator d'un moteur asynchrone triphasé [2].

I.2.1.2 Le rotor

Le circuit magnétique du rotor, comme celui du stator, est constitué d'un empilage de tôles d'acier, et les rotors des machines asynchrones sont de deux types, soit bobinés avec des enroulements insérés dans les encoches rotoriques et accessibles par un système de bagues et balais, soit à cage d'écureuil, constitués de barres en cuivre pour les grandes puissances ou en aluminium pour les petites puissances, court-circuitées à leurs extrémités par deux anneaux de court-circuit [3].

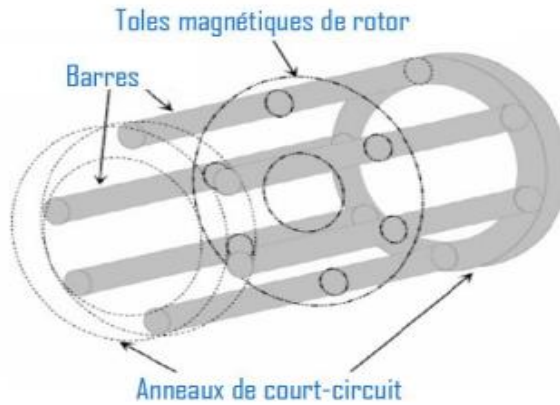


Figure I. 3. Vue schématique du rotor [3].

I.2.1.3 Les organes mécaniques

La carcasse assure le rôle de support et constitue l'enveloppe de la machine, protégeant ainsi les composants internes des influences de l'environnement extérieur.

L'arbre constitue l'organe de transmission principal. Il comporte une partie centrale servant de support au corps du rotor et une extrémité sur laquelle est fixé un demi-accouplement. L'arbre est généralement fabriqué en acier moulé ou forgé. Son dimensionnement dépend des efforts de flexion (notamment la force centrifuge, l'attraction magnétique radiale, etc.), des efforts radiaux et tangentiels résultant des forces centrifuges, ainsi que des efforts de torsion liés au couple électromagnétique transmis en régime permanent ou transitoire [4].

L'arbre est supporté par un ou plusieurs paliers, qui soutiennent le rotor et permettent sa rotation libre. Le second palier est généralement libre afin de compenser les dilatations thermiques de l'arbre. Une isolation électrique sur l'un des paliers permet d'éliminer les courants induits dans l'arbre, dus aux asymétries de réluctance dans le circuit magnétique. Pour les machines de petite et moyenne puissance, les paliers sont généralement équipés de roulements [4].

I.2.2 Principe de fonctionnement d'une machine asynchrone

L'enroulement du rotor est exposé au champ magnétique tournant généré par l'alimentation triphasée du stator. Ce champ provoque l'induction d'une force électromotrice (f.é.m.) dans les enroulements du rotor, ce qui engendre des courants induits, à condition que le circuit rotorique soit fermé. Conformément à la loi de Lenz, ces courants induits s'opposent aux variations du champ magnétique responsable de leur apparition. Par conséquent, à mesure que la vitesse du rotor augmente, la vitesse relative entre celui-ci et le champ tournant diminue. Si le rotor atteignait la vitesse du champ statorique, le mouvement relatif cesserait, entraînant l'arrêt de l'induction, la disparition des courants rotoriques et, par conséquent,

Chapitre I : Généralités sur le diagnostic des défauts dans la machine asynchrone

l'extinction du couple électromagnétique. Pour garantir un fonctionnement stable et continu, il subsiste toujours un écart entre la vitesse du rotor et celle du champ tournant. Cet écart, exprimé en proportion de la vitesse synchrone, est désigné sous le terme de glissement, défini comme suit [5] :

$$g = \frac{ns - n}{ns} \quad (I.1)$$

Où :

- ns : Vitesse synchrone du champ tournant (en tr/min ou en rad/s)
- n : Vitesse mécanique du rotor (en tr/min ou en rad/s)

I.3 Terminologie du diagnostic des défauts

Étant donné que le diagnostic des défauts couvre plusieurs domaines technologiques, un ensemble de terminologies unifiées a été proposé et sera adopté dans ce mémoire.

- **Défaut**

Écart non autorisé d'au moins une propriété caractéristique ou variable du système par rapport au comportement acceptable, habituel ou standard du système [6].

- **Fiabilité**

Aptitude d'un système à fonctionner correctement pendant une période déterminée sans subir de panne, généralement caractérisée par le temps moyen de bon fonctionnement [7].

- **Détection de défauts**

Détermination de la présence d'un ou plusieurs défauts dans un système ainsi que du moment de leur apparition [6].

- **Isolation des défauts**

Détermination du type, de l'emplacement et du moment d'apparition d'un défaut. Cette étape suit celle de la détection.

- **Identification des défauts :**

Détermination de l'amplitude et de l'évolution temporelle d'un défaut. Cette étape intervient après l'isolation.

- **Diagnostic des défauts**

Ensemble d'actions visant à évaluer l'état d'un procédé à partir de la connaissance de son fonctionnement. A partir de l'observation du procédé on détermine, par comparaison avec les divers états de fonctionnement connus, l'origine de ces défaillances, leurs causes et le degré de défaillance du système [7].

I.4 Les défaillances de la machine asynchrone

Les causes des défaillances dans les machines électriques peuvent être attribuées à plusieurs facteurs, notamment la conception, les tolérances de fabrication, les conditions d'installation, l'environnement d'exploitation, la nature de la charge ainsi que la politique de maintenance adoptée. Comme toute machine électrique tournante, la machine asynchrone est soumise à des contraintes électromagnétiques et mécaniques. Lorsqu'un défaut survient, l'équilibre entre ces différentes forces est rompu, ce qui peut engendrer d'autres dégradations successives. Les défaillances de la machine asynchrone peuvent être regroupées en deux grandes catégories : électriques et mécaniques. Leurs origines peuvent être internes, externes ou liées à l'environnement de fonctionnement, comme illustré à la figure I.4. Les défauts internes sont généralement classés selon leur nature, électrique ou mécanique. Par ailleurs, les anomalies liées aux roulements et au système de refroidissement sont souvent associées aux défauts rotoriques, étant donné qu'elles concernent principalement les éléments mobiles de la machine [8].

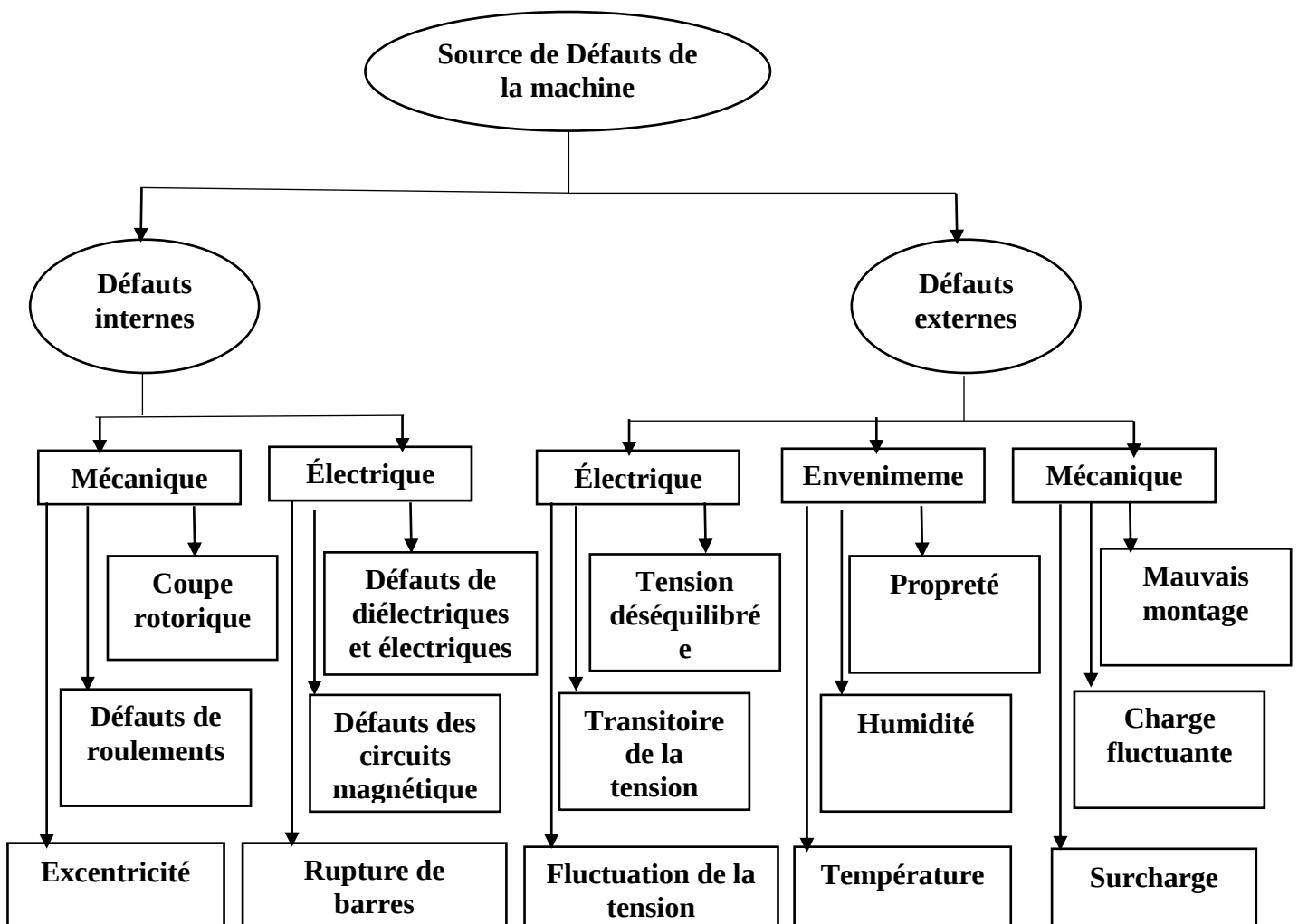


Figure I. 4. Sources de défauts de la machine asynchrone [8].

Chapitre I : Généralités sur le diagnostic des défauts dans la machine asynchrone

D'après l'organigramme ci-dessus Fig. I.4. on peut classer les défauts majeurs pouvant apparaître dans la machine asynchrone en deux catégories.

I.4.1 Défaillances d'ordre électrique

Les défaillances d'origine électrique peuvent, dans certains cas, entraîner l'arrêt définitif de la machine, au même titre que les défaillances d'ordre mécanique. Ces anomalies sont généralement classées en deux catégories principales : celles qui affectent les circuits électriques statoriques et celles qui concernent les circuits électriques rotoriques [18].

I.4.1.1 Défaillances des circuits électriques rotoriques

Dans la majorité des cas, ces défaillances conduisent à l'apparition d'une dissymétrie rotorique lors du fonctionnement de la machine, laquelle peut à son tour aggraver divers phénomènes, notamment d'ordre thermique (surcharge), électromagnétique (excentricité), résiduel (déformation), dynamique (arbre de transmission) et mécanique (roulements). Les défauts les plus fréquemment rencontrés au niveau du rotor peuvent être principalement classés comme suit [18] :

- Rupture de barres.
- Cassure d'une portion d'anneau.
- Excentricité statique et dynamique.

I.4.1.1.1 Ruptures de barres

La rupture ou la fissuration des barres du rotor, fréquente dans les machines asynchrones, peut survenir au niveau des encoches ou aux extrémités en connexion avec l'anneau de court-circuit. Cette défaillance réduit le couple électromagnétique moyen, augmente les oscillations de couple et engendre des vibrations ainsi qu'un fonctionnement anormal. Plus le nombre de barres rompues augmente, plus l'effet de la défaillance devient significatif, accélérant la détérioration globale de la machine [9].



Figure I. 5. Ruptures de barres

I.4.1.1.2 Ruptures d'anneaux

La rupture partielle de l'anneau de court-circuit, fréquente comme la cassure des barres du rotor, peut résulter de défauts de coulée, de dilatations différentielles ou de conditions de

fonctionnement défavorables. Cette défaillance est difficile à détecter et est souvent assimilée à la rupture de barres. Elle perturbe la répartition des courants dans le rotor, provoquant une modulation d'amplitude des courants statoriques similaire à celle causée par une cassure de barres [9].

I.4.1.1.3 Excentricité statique et dynamique

L'excentricité constitue un défaut lié à la position relative du rotor par rapport au stator. Elle résulte généralement de phénomènes d'origine mécanique, hydraulique ou électromagnétique. Dans un moteur sain, les axes du rotor et du stator sont parfaitement alignés ; toutefois, en pratique, il est impossible de garantir une condition de centrage idéal. Lorsque le rotor n'est pas correctement aligné avec le centre du stator, des forces d'attraction magnétique se développent, pouvant entraîner un contact rotor-stator. Ce frottement engendre une détérioration progressive des deux éléments [10].

L'excentricité peut être classée en trois types principaux :

- L'excentricité statique ;
- L'excentricité dynamique ;
- L'excentricité mixte.

Le comportement du rotor peut ainsi être analysé selon deux configurations fondamentales : l'excentricité statique et l'excentricité dynamique. Dans une situation idéale, l'entrefer est parfaitement uniforme du fait de l'alignement des axes du rotor et du stator. Dans le cas de l'excentricité statique, l'entrefer est non uniforme mais demeure constant dans le temps ; la position de l'entrefer radial minimal reste donc fixe. En revanche, lors d'une excentricité dynamique, l'axe du rotor ne coïncide pas avec son centre de rotation, et la position de l'entrefer minimal se déplace en rotation autour de l'axe du stator. En pratique, une combinaison des excentricités statique et dynamique est fréquemment observée. Cette configuration est désignée sous le terme d'excentricité mixte [10].

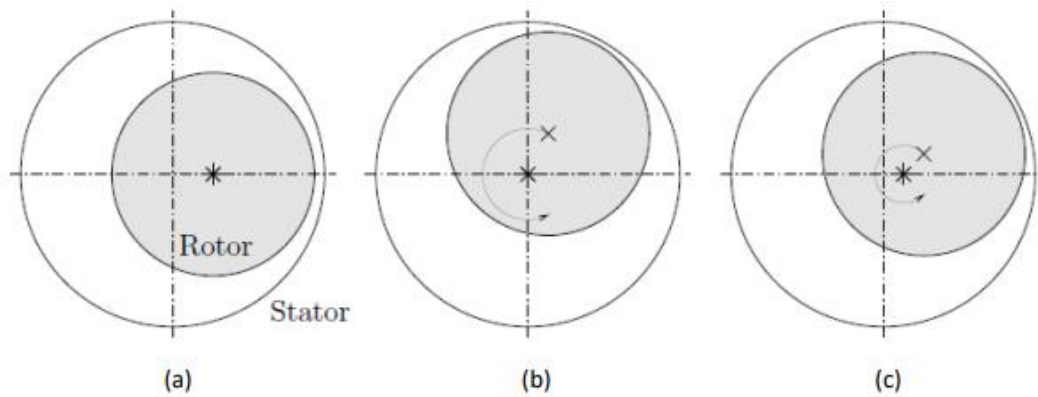


Figure I. 6. Représentation de l'excentricité a) statique, b) dynamique c) mixte [1].

I.4.1.2 Défaillances des circuits électriques statoriques

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

- Défaut d'isolant ;
- Courts-circuits dans les enroulements ;
- Défaut de circuit magnétique.

I.4.1.2.1 Défauts d'isolant dans un enroulement

La dégradation des isolants des enroulements peut entraîner des courts-circuits, principalement en raison de l'élévation de température provoquée par les pertes Joule, fer et mécaniques. Les matériaux isolants possèdent en effet des limites thermiques, mécaniques et diélectriques, dont le dépassement favorise l'apparition de défauts. Selon la zone affectée, le courant de défaut peut circuler entre une spire et la masse (défaut phase-masse), entre deux spires d'une même phase (défaut entre-spires) ou entre deux phases différentes lorsque leurs isolants se détériorent simultanément (défaut phase-phase), notamment dans les bobinages à deux couches ou au niveau des têtes de bobines. Ces défauts modifient ainsi la topologie du circuit électrique de la machine [7].

I.4.1.2.2 Courts-circuits dans les enroulements

Les défauts d'origine électrique, tels que la dégradation de la matière isolante, constituent des défauts internes qui se développent progressivement au sein de la machine durant son fonctionnement. Ils sont notamment favorisés par la commutation rapide des composants de l'électronique de puissance, qui soumet les enroulements à des transitoires de tension élevés. Ces surtensions provoquent une altération des propriétés diélectriques de l'isolant et accélèrent son vieillissement, favorisant ainsi l'apparition de défauts inter-spires. Par ailleurs, plusieurs facteurs contribuent à la détérioration de l'isolation, tels que les contraintes mécaniques au démarrage (liées aux surintensités), les contraintes thermiques, les

décharges partielles ainsi que le vieillissement naturel des matériaux isolants [11].

Les défauts entre-spires se traduisent par la circulation d'un courant de court-circuit pouvant apparaître dans différentes configurations :

1. Deux spires d'une même phase ;
2. Deux spires appartenant à deux phases différentes ;
3. Une spire et la masse ;
4. Une spire et le neutre ;
5. Deux phases.

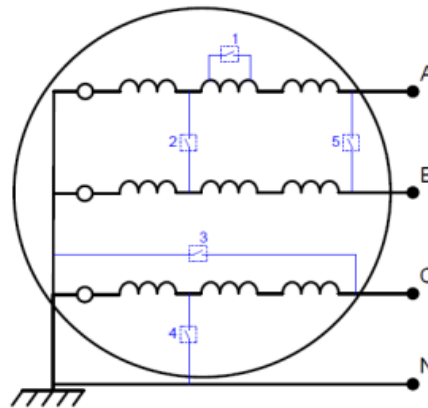


Figure I.7. Différents types de courts-circuits entre-spires [11].

I.4.1.2.3 Défauts de circuit magnétique

Les tôles constituant le circuit magnétique sont feuilletées et isolées les unes des autres. Cependant, elles peuvent être sujettes à des courts-circuits. Les causes les plus fréquentes de défauts dans le circuit magnétique sont généralement liées à des excentricités statiques et/ou dynamiques sévères, pouvant provoquer un contact direct entre le stator et le rotor, entraînant ainsi la détérioration du circuit magnétique.

Par ailleurs, un court-circuit des conducteurs peut générer un échauffement local intense dans les tôles. De même, la présence de corps étrangers projetés dans l'entrefer peut provoquer l'abrasion des tôles et conduire à leur court-circuit [12].

I.4.2 Défaillances d'ordre mécanique

Les défaillances d'ordre mécanique constituent généralement la catégorie la plus fréquente parmi l'ensemble des défauts affectant la machine asynchrone. Les anomalies mécaniques les plus couramment observées peuvent être regroupées comme suit :

- Défauts des roulements à billes
- Défauts liés à l'arbre moteur
- Défauts associés aux flasques

Ces différentes problématiques ont été largement étudiées et font l'objet de développements approfondis dans la littérature spécialisée [13].

I.4.2.1 Les défauts de roulements

Les roulements à billes constituent des éléments essentiels au bon fonctionnement de l'ensemble des machines électriques. Les défaillances de ces roulements peuvent résulter d'un choix inapproprié des matériaux lors de leur fabrication. Des anomalies de rotation au niveau de la culasse de roulement, provoquées par des enroulements endommagés, écaillés ou fissurés, sont susceptibles d'engendrer des perturbations dans le fonctionnement global de la machine. Il est également établi que les courants électriques circulant dans les roulements d'une machine asynchrone à grande vitesse peuvent contribuer à leur détérioration prématurée [14].

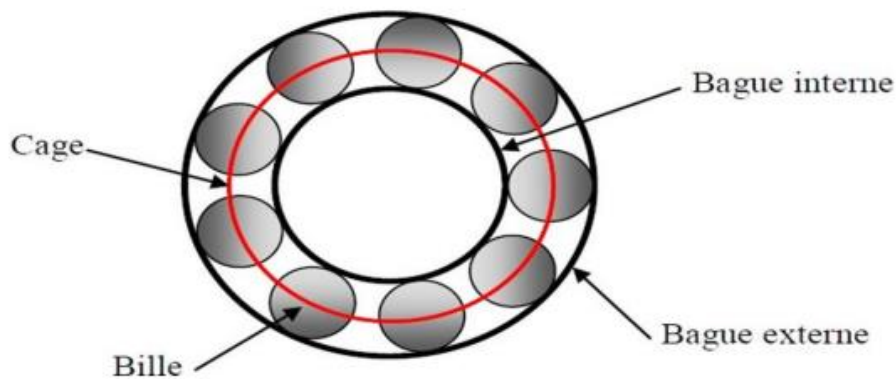


Figure I. 8. Structure d'un roulement à billes [12].

I.4.2.2 Défauts de l'arbre moteur

L'emploi d'un matériau inadapté lors de la fabrication de l'arbre peut favoriser l'apparition de fissurations. Ces fissures sont susceptibles d'évoluer vers une rupture brutale de l'arbre, entraînant ainsi un arrêt définitif de la machine asynchrone. Par ailleurs, un environnement agressif, notamment corrosif, peut altérer la résistance mécanique de l'arbre. À titre d'exemple, la présence d'humidité peut initier des microfissures et conduire, à terme, à une dégradation sévère, voire à la destruction complète de la machine. De plus, l'application de contraintes mécaniques importantes sur l'arbre moteur peut provoquer l'apparition d'une excentricité supplémentaire, qu'elle soit de nature statique, dynamique ou mixte [13].

I.4.2.3 Défauts créés par les flasques

Les défauts liés aux flasques d'une machine asynchrone résultent le plus souvent de la phase de fabrication. Un mauvais positionnement des flasques peut provoquer un désalignement des roulements à billes, entraînant une excentricité au niveau de l'arbre de la machine. Ce type de défaillance peut être détecté par le biais d'une analyse vibratoire ou

d'une étude harmonique des courants absorbés par la machine [15].

I.5 Méthodes de diagnostic des défauts dans la machine asynchrone

Les méthodes de diagnostic ont fait l'objet d'un nombre considérable de travaux de recherche. Un consensus s'est progressivement établi autour de trois grandes méthodologies de diagnostic : les méthodes fondées sur les connaissances, les méthodes basées sur la redondance analytique et les méthodes reposant sur la modélisation des signaux (voir figure I.6) [12].

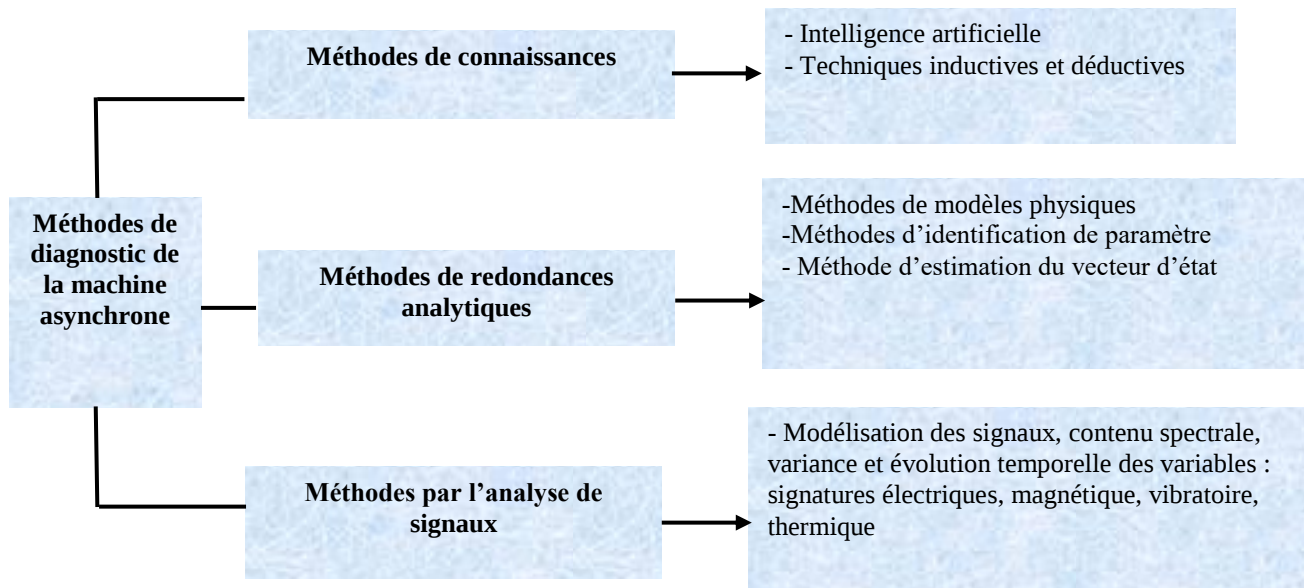


Figure I.9. Méthodes de diagnostic de la machine asynchrone [12].

I.5.1 Les méthodes de connaissances

Les méthodes de connaissances reposent sur l'exploitation de l'expérience pratique et des données historiques pour diagnostiquer les défauts des machines asynchrones, et peuvent être renforcées par l'intelligence artificielle qui permet de créer des systèmes d'aide à la décision. Ces méthodes s'appuient à la fois sur les techniques déductives, qui appliquent des règles logiques prédéfinies, et sur les techniques inductives, qui extraient des motifs à partir des données opérationnelles pour prédire les défauts futurs [11][12].

I.5.2 Les méthodes de redondances analytiques

Les méthodes de redondance analytique s'appuient sur une modélisation quantitative du système et exploitent les relations entre ses différentes variables afin d'identifier les paramètres physiques à surveiller. Elles se répartissent en trois catégories : les méthodes basées sur des modèles physiques, les méthodes d'identification des paramètres et les méthodes d'estimation du vecteur d'état. [16].

I.5.3 Méthodes par l'analyse de signaux

Les méthodes par l'analyse de signaux reposent sur l'existence de caractéristiques

fréquentielles propres au fonctionnement sain ou défaillant du système (voir Figure I.7). La première étape consiste à modéliser les signaux en les caractérisant dans le domaine fréquentiel, en déterminant leur contenu spectral, leur variance et autres propriétés. L'apparition d'un défaut provoque divers phénomènes tels que le bruit, l'échauffement et les vibrations, qui constituent des manifestations évidentes de la modification des caractéristiques temporelles et fréquentielles des grandeurs électriques et mécaniques, comme illustré sur la Figure I.7. L'analyse de ces grandeurs mesurables avec précision, directement attribuables aux signaux des défauts, reste la démarche la plus couramment utilisée pour le diagnostic des machines électriques [17][5].

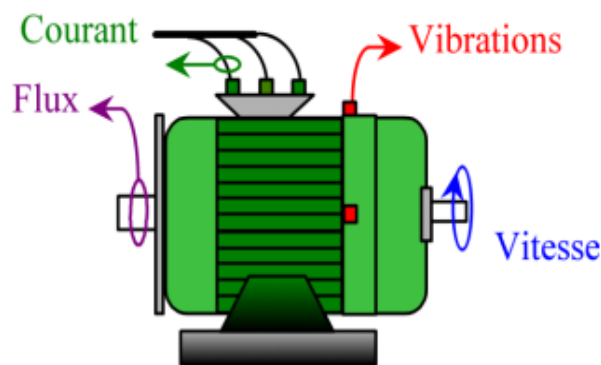


Figure I.10. Principaux points de mesure utilisés pour le diagnostic [5].

I.5.3.1 Analyse des défauts par analyse des courants statoriques

Parmi tous les signaux utilisables, le courant statorique s'est révélé être l'un des plus intéressants, car il est très facile d'accès et permet de détecter à la fois les défauts électriques et les défauts purement mécaniques. Cette technique est désignée dans la littérature sous le nom de "Motor Current Signature Analysis" (MCSA) [13]. Les défauts de la machine asynchrone se traduisent dans le spectre du courant statorique par [8] :

- L'apparition de raies spectrales dont les fréquences sont directement liées à la vitesse de rotation de la machine, aux fréquences du champ tournant, ou aux paramètres physiques de la machine (nombre d'encoches du rotor et nombre de paires de pôles).
- La modification de l'amplitude des raies spectrales déjà présentes dans le spectre du courant.

I.5.3.2 Utilisation des différents signaux autres que le courant statorique

En complément de l'analyse du courant statorique, d'autres signaux peuvent être utilisés pour le diagnostic des défauts dans la machine asynchrone.

L'analyse vibratoire constitue une méthode efficace pour la détection des défauts mécaniques, notamment les défauts de roulements et les désalignements. Elle repose sur

Chapitre I : Généralités sur le diagnostic des défauts dans la machine asynchrone

l'utilisation d'accéléromètres installés sur les paliers afin de mesurer les vibrations générées par les anomalies mécaniques [13]. L'analyse du flux magnétique, en particulier du flux d'entrefer ou du flux axial, permet également d'identifier certains défauts statoriques et rotoriques à travers l'apparition de composantes fréquentielles spécifiques. Par ailleurs, l'étude du couple électromagnétique peut mettre en évidence des oscillations caractéristiques liées à des défauts rotoriques ou mécaniques. Cependant, ces méthodes nécessitent généralement des capteurs supplémentaires ou des dispositifs spécifiques, ce qui peut augmenter le coût et la complexité du système de surveillance. [17]

I.6 Conclusion

Ce premier chapitre a permis de poser les bases théoriques nécessaires à l'étude de la machine asynchrone et de ses défaillances. Après avoir présenté la structure générale du moteur asynchrone et le rôle de chacun de ses composants, le principe de fonctionnement a été expliqué afin de mieux comprendre le comportement électromécanique de la machine en régime normal.

Par la suite, une classification détaillée des différents types de défauts a été abordée. Les défauts statoriques, rotoriques ainsi que les défaillances d'ordre mécanique ont été décrits en mettant en évidence leurs causes et leurs impacts sur le fonctionnement du moteur. Cette analyse montre que la majorité des pannes peuvent entraîner des perturbations importantes, voire des arrêts complets des systèmes industriels.

Par ailleurs, ce chapitre a permis d'exposer les principales approches de diagnostic des défauts, à savoir les méthodes basées sur les connaissances, les approches à redondance analytique et les techniques fondées sur l'analyse des signaux, en soulignant les signatures fréquentielles caractéristiques liées aux défauts majeurs de la machine asynchrone.

Chapitre II : Modélisation multi-enroulements et détection des défauts de la machine asynchrone

II.1 Introduction

La modélisation et la simulation du moteur asynchrone ont fait l'objet de nombreux travaux de recherche en vue du dimensionnement, de la commande et du diagnostic, donnant lieu à plusieurs approches de modélisation adaptées à des domaines spécifiques.

Le modèle multi-enroulements se distingue par sa fidélité dans la reproduction du comportement du moteur, aussi bien en fonctionnement sain qu'en présence de défauts. Basé sur la théorie des circuits électriques, il modélise le rotor par un réseau de mailles couplées magnétiquement, chacune composée de deux barres et de deux portions d'anneau de court-circuit. Pour un rotor de N_r barres, le système comporte $N_r + 4$ équations. Ses résultats concordent bien avec l'expérimental en termes de courants, de vitesse et de couple [19,20].

Néanmoins, ce modèle présente un temps de calcul élevé. Le modèle classique (abc-dq), bien que plus simple, néglige des phénomènes importants et ne permet pas de distinguer clairement les défauts de rupture de barres, car il ne reproduit aucune ondulation dans le courant statorique en cas de défaut [20].

C'est pourquoi un modèle réduit issu du modèle multi-enroulements sera proposé au troisième chapitre. Ce chapitre présente brièvement le modèle multi-enroulements et quelques résultats de simulation tirés de travaux antérieurs.

II.2 Prélude

Le modèle triphasé ne permet pas de déterminer les valeurs réelles des courants circulant dans les barres rotoriques, ni de prendre en compte les défauts rotoriques, ce qui a conduit au développement du modèle multi-enroulements.

Dans ce modèle, le rotor est traité comme un ensemble d'autant de phases que de barres, ce qui amène à considérer les courants circulant dans les portions d'anneau de court-circuit comme des courants de phase rotoriques, comme illustré à la figure II.1.

L'élaboration d'une procédure de diagnostic efficace nécessite un modèle précis décrivant complètement le moteur, non pas de manière approximative comme dans les modèles de commande, mais de façon plus détaillée en intégrant les paramètres réels de la machine.

Étant donné que les modèles simples (dq) négligent plusieurs phénomènes physiques et sont affectés par les transformations de coordonnées, il était nécessaire de recourir au modèle multi-enroulements, qui offre une description plus précise et mieux adaptée à la représentation des défauts.

Ce modèle repose sur un réseau maillé représentant la cage rotorique, permettant ainsi

de simuler les ruptures de barres et de restituer les phénomènes physiques qui leur sont associés. Le rotor y est modélisé par des mailles reliées électriquement et couplées magnétiquement, chaque maille étant constituée de deux barres et de deux portions d'anneau de court-circuit, comme représenté à la figure II.1.

II.3 Modèle multi enroulements

Nous allons donner de manière très brève les équations du modèle multi enroulements, cependant le modèle détaillé se trouve dans la référence [20].

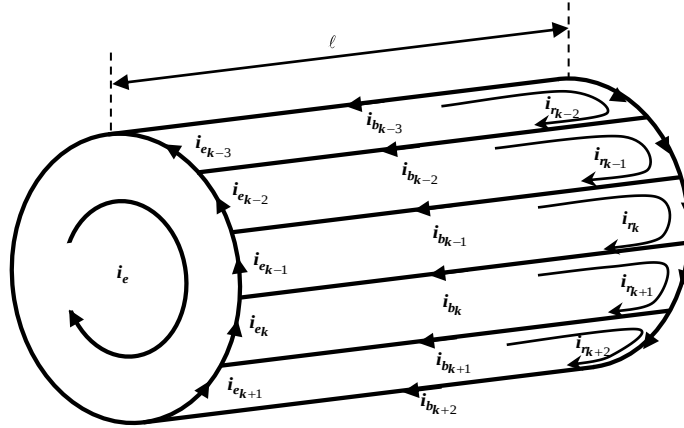


Figure II. 1 Schéma du rotor représenté par des mailles électriques[20]

II.3.1 Calcul des inductances

Les inductances qui entrent dans le modèle multi enroulements sont résumés dans le tableau suivant :

INDUCTANCES	EXPRESSIONS
L'inductance principale d'une phase statorique.	$L_{sp} = L_{ms} = \frac{4\mu_0 N_s^2 R \ell}{e \pi p^2}$
L'inductance mutuelle entre phases statoriques.	$M_s = -\frac{L_{sp}}{2}$
L'inductance totale d'une phase statorique.	$L_{as} = L_{bs} = L_{cs} = L_s = L_{sp} + L_{sf}$
L'inductance principale d'une maille rotorique	$L_{rp} = \frac{N_r - 1}{N_r^2} \mu_0 \frac{2\pi}{e} R \ell$
L'inductance mutuelle entre mailles rotoriques non adjacentes.	$M_{rr} = -\frac{1}{N_r^2} \mu_0 \frac{2\pi}{e} R \ell$
L'inductance mutuelle entre mailles rotoriques adjacentes.	$M_{r_{k(k-1)}} = M_{r_{k(k+1)}} = M_{rr} - L_b$

L'inductance mutuelle entre une maille rotorique et une phase statorique "a".	$M_{srk} = -M_{sr} \cos\left(p\theta_r - n\frac{2\pi}{3} + ka\right)$ Avec $M_{sr} = \frac{4\mu_0 N_s R \ell}{ep^2 \pi} \sin\left(\frac{a}{2}\right)$
---	---

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

II.3.2 Mise en équations

À partir de la topologie du circuit électrique, nous cherchons l'ensemble des équations différentielles indépendantes régissant l'évolution des courants, puis les mettre sous la forme classique.

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

II.3.3 Equations de tensions au stator

$$[V_{abc}] = [R_s][i_{abc}] + \frac{d}{dt}[\varphi_{abc}] \quad (\text{II.2})$$

et

$$[\varphi_{abc}] = [L_s][i_{abc}] + [M_{sr}][i_{rk}] \quad (\text{II.3})$$

avec :

$[v_{abc}] = [v_a \ v_b \ v_c]^T$, le vecteur des tensions statoriques.

$[i_{abc}] = [i_a \ i_b \ i_c]^T$, le vecteur des courants statoriques.

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

$[\varphi_{abc}] = [\varphi_a \ \varphi_b \ \varphi_c]^T$, le vecteur des flux statoriques.

$[R_s]$: matrice des résistances statoriques.

$$[R_s] = \begin{bmatrix} r_s & 0 & 0 \\ 0 & r_s & 0 \\ 0 & 0 & r_s \end{bmatrix} \quad (\text{II.4})$$

$[L_s]$: matrices des inductances statoriques.

$$[L_s] = \begin{bmatrix} L_{as} & M_s & M_s \\ M_s & L_{bs} & M_s \\ M_s & M_s & L_{cs} \end{bmatrix} \quad (\text{II.5})$$

$[M_{sr}]$: matrice des inductances mutuelles entre phases statoriques et mailles rotoriques.

$$[M_{sr}] = \begin{bmatrix} \cdots & M_{sr} \cos(\theta_r + k a) & \cdots \\ \cdots & M_{sr} \cos(\theta_r + k a - \frac{2\pi}{3}) & \cdots \\ \cdots & M_{sr} \cos(\theta_r + k a - \frac{4\pi}{3}) & \cdots \end{bmatrix} \quad (\text{II.6})$$

où : $k = 0, 1, \dots, N_r - 1$

II.3.4 Equations de tensions au rotor

La figure II.2, représente le schéma équivalent de la cage rotorique.

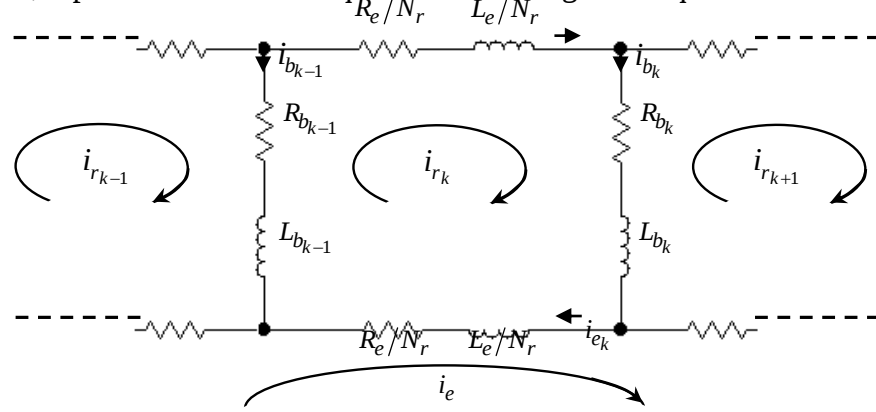


Figure II. 2 : schéma électrique équivalent, à mailles, de la cage rotorique

sachant que :

$$i_{ek} = i_{rk} - i_e \quad (\text{II.7})$$

$$\text{et } i_{bk} = i_{rk} - i_{rk+1}$$

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

$$-R_{bk-1} i_{rk-1} + \left(2 \frac{R_e}{N_r} + R_{bk-1} + R_{bk} \right) i_{rk} - R_{bk} i_{rk+1} - \frac{R_e}{N_r} i_e + \frac{d(\varphi_{rk})}{dt} = 0 \quad (\text{II.8})$$

avec :

$$\begin{aligned} \varphi_{rk} = & \left(L_{rp} + 2L_b + 2 \frac{L_e}{N_r} \right) i_{rk} - L_b (i_{r(k-1)} + i_{r(k+1)}) - \frac{L_e}{N_r} i_e - M_{rr} \sum_{\substack{j=0 \\ j \neq k}}^{N_r-1} i_{rj} \\ & - M_{sr} \left[\cos(\theta_r + ka) \cos(\theta_r + ka - 2\pi/3) \cos(\theta_r + ka - 4\pi/3) \right] [i_{abc}] \end{aligned} \quad (\text{II.9})$$

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

$$\frac{R_e}{N_r} \sum_{k=0}^{N_r-1} i_{rk} + \frac{L_e}{N_r} \sum_{k=0}^{N_r-1} \frac{d i_{rk}}{dt} - R_e i_e - L_e \frac{d i_e}{dt} = 0 \quad (\text{II.10})$$

II.3.5 Equation globale des tensions

L'équation complète des tensions est donnée par :

$$[V] = [R][I] + [L] \frac{d[I]}{dt} + \frac{d[L]}{dt} [I] \quad (II.11)$$

avec :

$$[V] = [v_a \ v_b \ v_c \vdots 0 \cdots \cdots 0 \vdots 0]^T, \text{ le vecteur augmenté des tensions de dimension } (N_r + 4, 1),$$

contient les trois tensions statoriques, les N_r tensions des mailles rotoriques ainsi que la tension de l'anneau de court-circuit.

$$[I] = [i_a \ i_b \ i_c \vdots i_{r0} \ i_{r1} \ \cdots \ i_{rk} \ \cdots \ i_{rN_r-1} \vdots i_e]^T, \text{ le vecteur augmenté des courants, aussi de dimension } (N_r + 4, 1),$$

contient les trois courants statoriques, les N_r courants des mailles rotoriques ainsi que le courant de l'anneau de court-circuit.

$$[R] = \begin{bmatrix} [R_s] & \vdots & [0] \\ \cdots & \vdots & \cdots \\ [0] & \vdots & [R_r] \end{bmatrix}, \text{ la matrice augmentée des résistances.}$$

avec :

R_r : la matrice des résistances rotoriques.

$$[R_r] = \begin{bmatrix} R_{bN_r-1} + R_{b0} + \frac{2R_e}{N_r} & -R_{b0} & 0 & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & -R_{bN_r-1} & \vdots & -\frac{R_e}{N_r} \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & \cdots & -R_{bk-1} & R_{bk-1} + R_{bk} + \frac{2R_e}{N_r} & -R_{bk} & 0 & \cdots & 0 & \vdots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots & \vdots \\ -R_{bN_r-1} & 0 & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & -R_{bN_r-2} & R_{bN_r-2} + R_{bN_r-1} + \frac{2R_e}{N_r} & \vdots & -\frac{R_e}{N_r} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ -\frac{R_e}{N_r} & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & -\frac{R_e}{N_r} & \vdots & R_e \end{bmatrix}$$

(II.12)

$$[L] = \begin{bmatrix} [L_s] & \vdots & [M_{sr}] \\ \cdots & \vdots & \cdots \\ [M_{sr}]^T & \vdots & [L_r] \end{bmatrix}, \text{ la matrice augmentée des inductances.}$$

avec :

L_r : matrice des inductances rotoriques.

$$[L_r] = \begin{bmatrix} L_{rp} + 2L_b + 2\frac{L_e}{N_r} & M_{rr} - L_b & M_{rr} & \dots & M_{rr} - L_b & \vdots & -\frac{L_e}{N_r} \\ M_{rr} - L_b & L_{rp} + 2L_b + 2\frac{L_e}{N_r} & M_{rr} - L_b & M_{rr} & \dots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ M_{rr} - L_b & M_{rr} & \dots & M_{rr} - L_b & L_{rp} + 2L_b + 2\frac{L_e}{N_r} & \vdots & -\frac{L_e}{N_r} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \vdots & \dots \\ -\frac{L_e}{N_r} & \dots & \dots & \dots & -\frac{L_e}{N_r} & \vdots & L_e \end{bmatrix} \quad (II.13)$$

$$\frac{d[L]}{dt} = \begin{bmatrix} [0] & \vdots & \frac{d[M_{sr}]}{dt} \\ \dots & \vdots & \dots \\ \frac{d[M_{sr}]^T}{dt} & \vdots & [0] \end{bmatrix}, \text{ la dérivée de la matrice augmentée des inductances.}$$

On remarque que la matrice $[M_{sr}]$ dépend du temps, ce qui nécessite, à chaque pas de calcul, l'inversion de la matrice inductance $[L]$, de dimension $(N_r + 4)^2$. Pour rendre cette matrice constante, on applique la transformation de Park sur les équations des tensions statoriques. Le repère de Park doit être lié au rotor. ;

L'équation du couple électromagnétique est :

$$C_e = \sqrt{\frac{3}{2}} p M_{sr} \left(i_{qs} \sum_{k=0}^{N_r-1} i_{\eta_k} \cos(ka) - i_{ds} \sum_{k=0}^{N_r-1} i_{\eta_k} \sin(ka) \right) \quad (II.14)$$

Nous avons énuméré les équations du modèle multi enroulements, nous passons à la présentation des résultats de simulation issus de ce modèle dont le schéma de simulation est montré à la figure II.3, prélevés sur quelques mémoires [19,20].

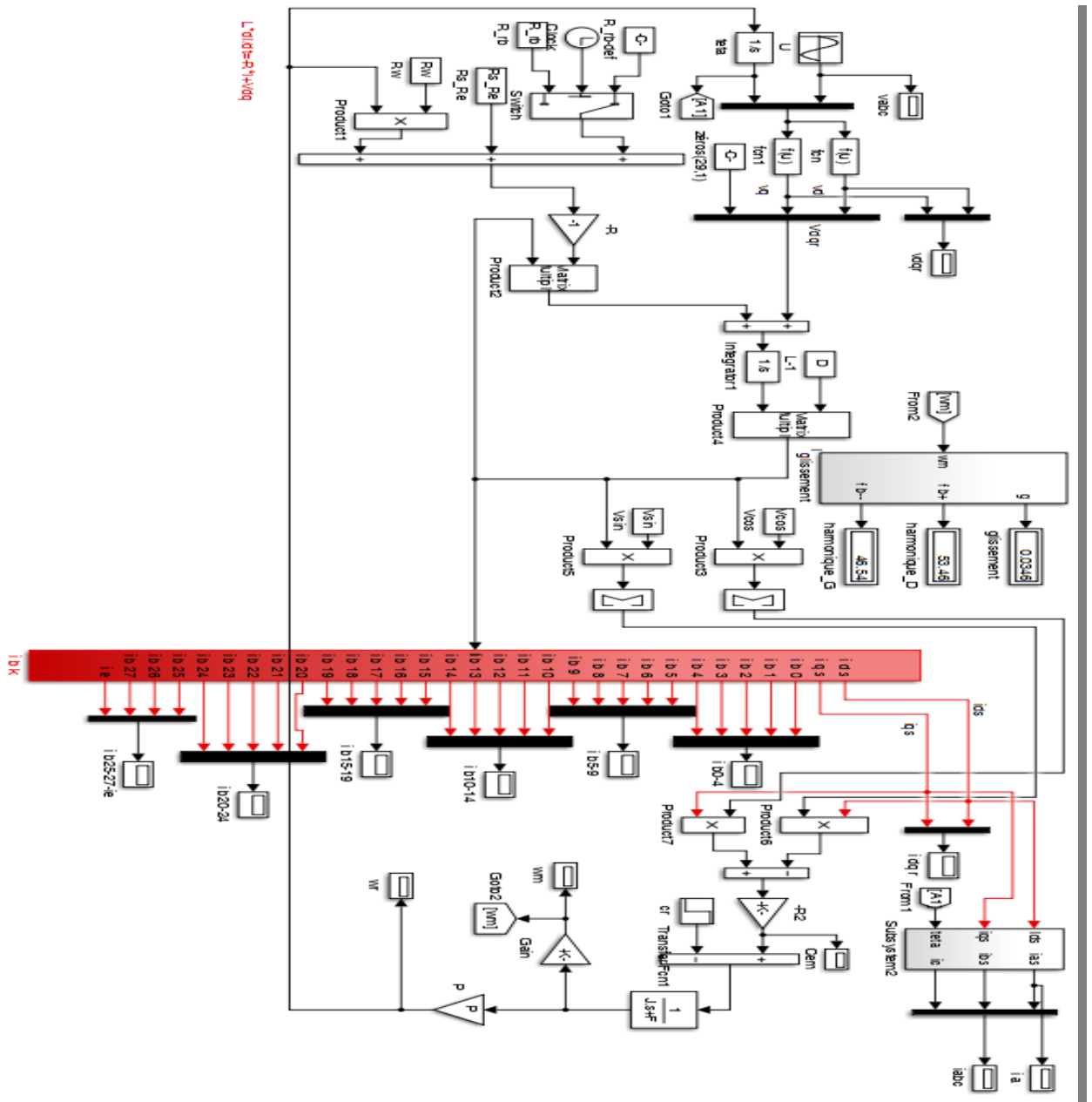


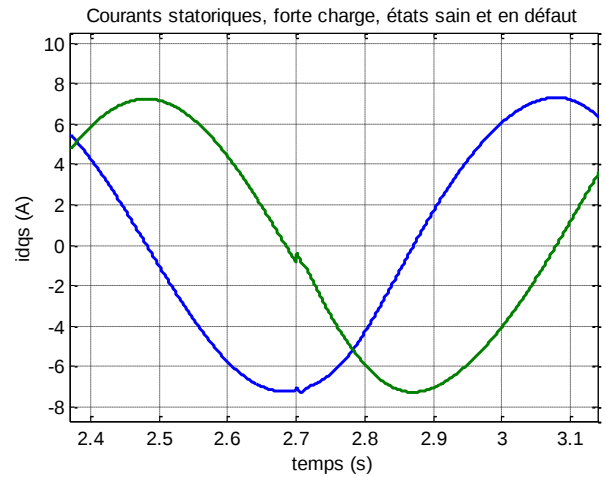
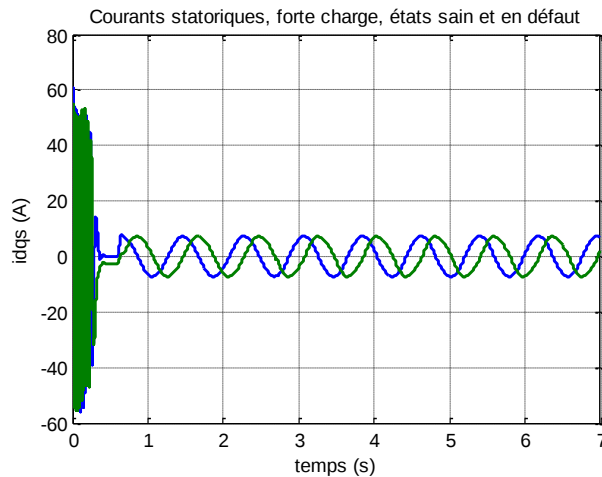
Figure II.3 Modèle multi enroulements, schéma de simulation

II.4 Machine montrant ensemble les états sain et de défaut

Tout d'abord nous lançons la simulation de la machine à vide ensuite vient l'instauration d'un échelon de couple résistant (15 N.m) à un instant après la fin du régime transitoire par exemple $t = 0.6s$. Puis vient l'application de défaut de cassure de barre à un instant éloigné de la fin du régime permanent tel que $t = 2.7s$ afin de réunir ensemble et d'observer, sur un même signal, l'état sain et l'état de défaut de la machine. Ceci pour tester la capacité (fidélité) du modèle à reproduire la machine saine et dans l'état de défaut. Les résultats sont réunis aux figures II.4 à II.13.

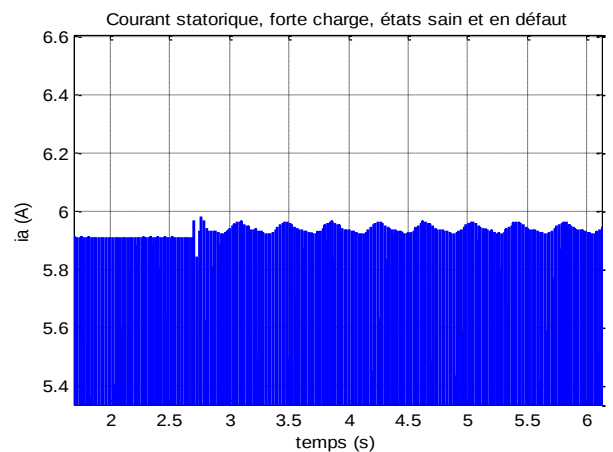
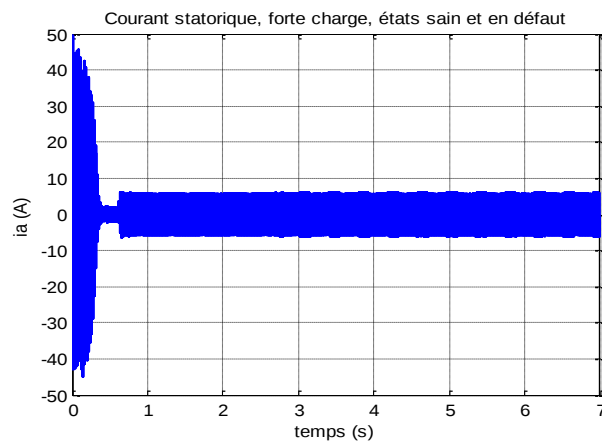
La figure II.5 représente le courant i_{ds} , elle ne montre aucun signe pouvant indiquer qu'il y a défaut si ce n'est son zoom qui indique une perturbation dans le signal à l'instant de

l'application du défaut.



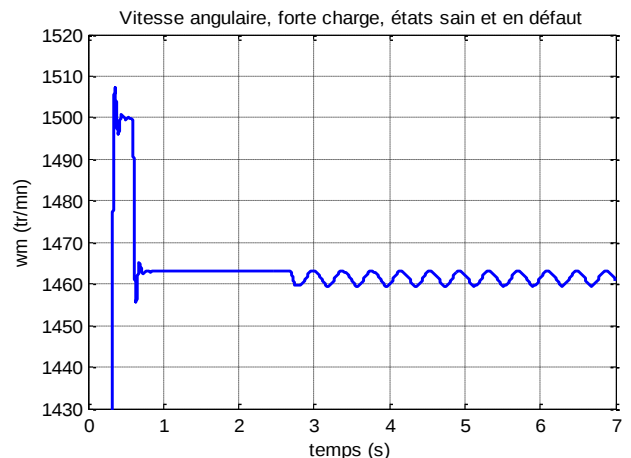
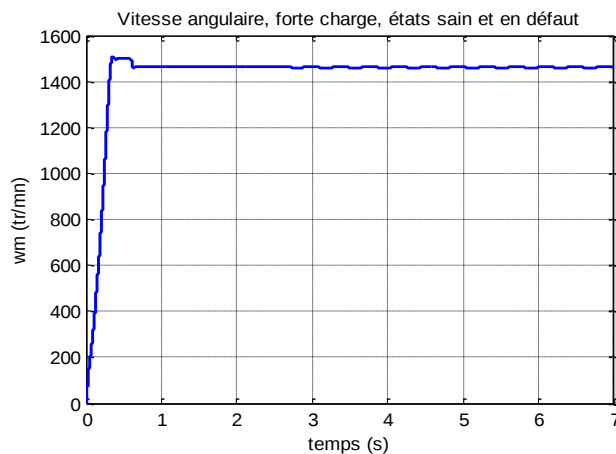
Figures II. 4 et II. 5 Courant i_{ds} à gauche, son zoom à droite, état sain et en défaut

Par contre la figure II.6 d'après représentant le courant statorique montre bien le défaut dès son instauration, meilleur encore son zoom dans la figure II.7 où l'on voit bien les ondulations dans l'enveloppe du courant comme rapporté dans la littérature.



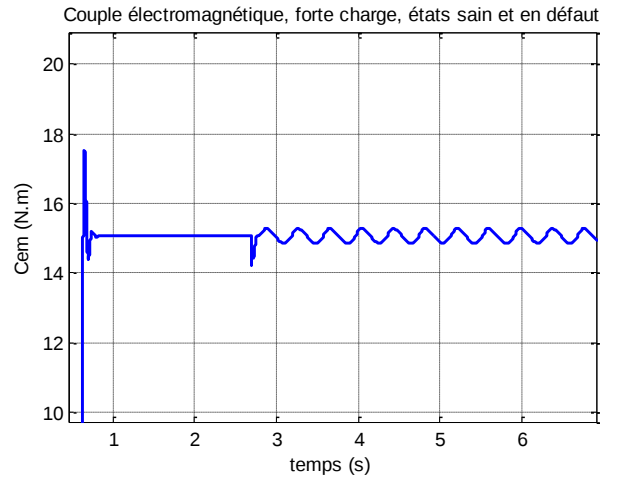
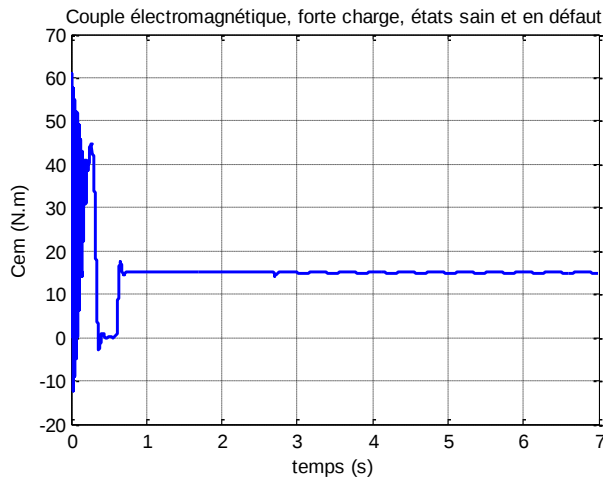
Figures II. 6 et II. 7 Courant statorique i_a à gauche, son zoom à droite, état sain et en défaut

L'évolution temporelle de la vitesse dans la figure II.8 montre parfaitement bien la partie saine et la partie du début des ondulations du au défaut rotorique dès l'instant de son introduction, mieux visible dans le zoom de la figure II.9.

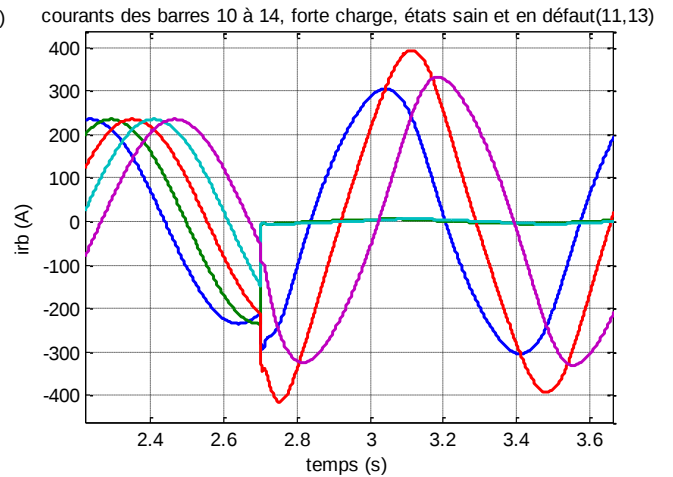
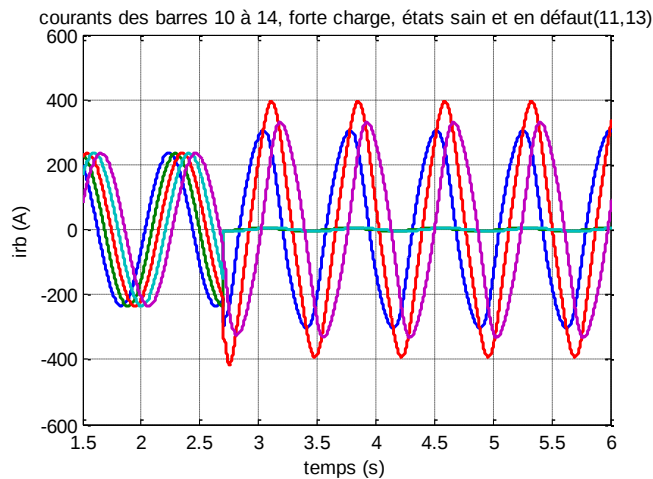


Figures II.8 et II.9 Vitesse angulaire w_m à gauche, son zoom à droite, état sain et en défaut

Tout comme la vitesse et le courant, le couple électromagnétique présenté à la figure II.10 expose bien le défaut rotorique dès l'apparition des ondulations sur le signal qui sont bien observées sur le zoom de la figure II.11.



Figures II.10 et II.11 Couple électromagnétique C_{em} à gauche, son zoom à droite, état sain et en défaut



Figures II.12 et II.13. Courants des barres rotoriques à gauche, leur zoom à droite, état sain et en défaut

Enfin les dernières (figure II.12 et II.13), de la série des figures précédentes, représente les courants dans les barres dans l'état sain et lors de défaut. Ceci nous renseigne sur le phénomène qui survient lors d'un défaut rotorique. Nous pouvons constater au début qu'il y a 5 courants de barres (10 à 14) pendant l'état sain puis lorsque le défaut a lieu, nous observons clairement bien que les courants dans les barres 11 et 13 sont devenus quasiment nuls dès l'instauration du défaut, seuls les courants dans les barres saines circulent. De plus comme rapporté dans la littérature nous constatons que les courants dans ces barres ont augmenté, c'est-à-dire. les courants qui circulaient dans les barres en rupture se sont rajoutés aux barres adjacentes.

Cependant cette série de figures permet la visualisation ensemble des états sains et de défaut, mais pour détecter le défaut dans une machine, une des procédures les plus utilisées est l'utilisation de la transformée de Fourier rapide TFR ou FFT en anglais appliquées aux différents signaux : courant statorique, vitesse, flux ou couple.

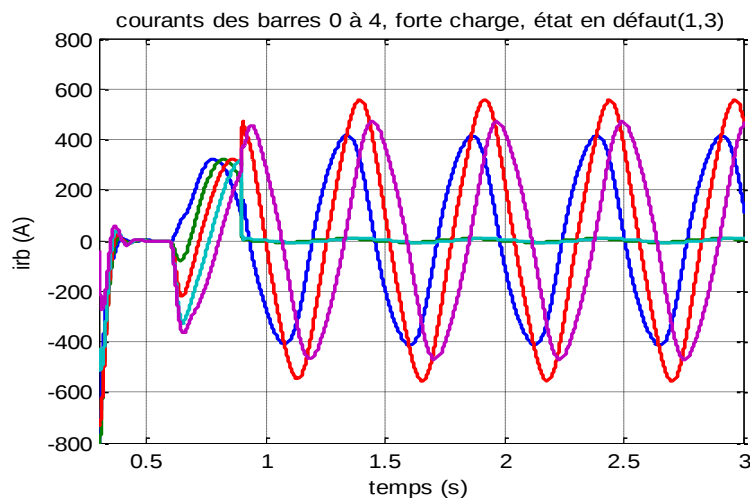
Pour ce faire l'analyse spectrale par le biais de la FFT nécessite pour une résolution de $\Delta f = 0.1s$, un temps de mesure de 10 s, de plus le régime doit être stationnaire. Par suite un temps de simulation de 11 s est choisi où l'on ne retient que les 10 dernières secondes pour éliminer le régime transitoire et rendre le signal stationnaire. Les résultats de simulation pour une machine de 3 kW avec un défaut touchant les barres 1 et 3 sont présentées aux figures II.14 à II.21. Seuls les résultats pour les fortes charges ont été montrés.

Nous rappelons que provoquer ou simuler la rupture de barre sous entend augmenter la résistance de cette barre de plusieurs fois. Dans notre simulation le coefficient est de 50.

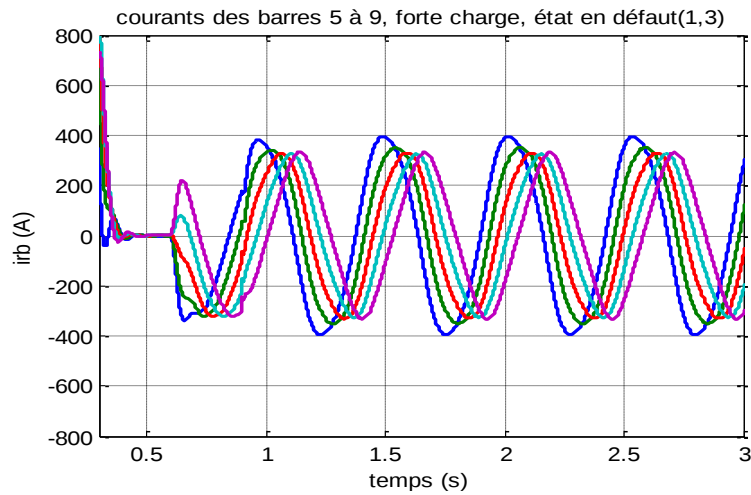
II.5 Résultats de simulation pour forte charge

Le processus de simulation consiste à lancer la machine à vide, introduire la charge nominale (20 N.m) puis provoquer le défaut de rupture de barres (les barres choisies sont 1 et 3). Les résultats collectés sont visualisés aux figures II.14 à II.21.

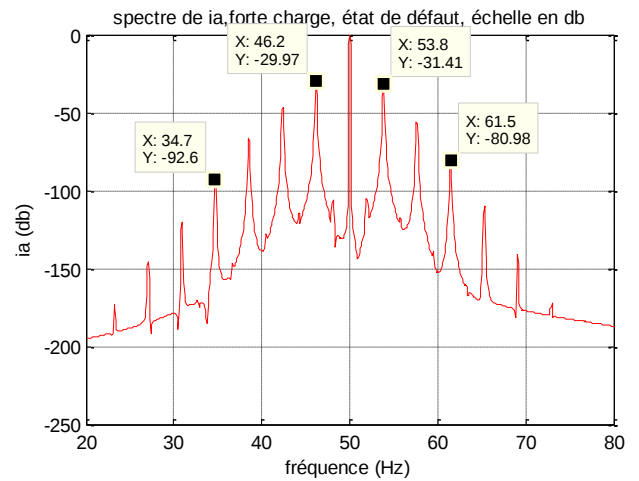
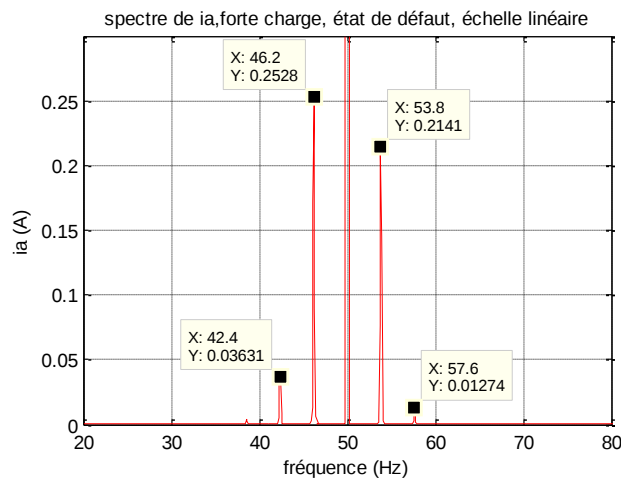
Nous avons montré (dans les figures II.14 et II.15) les courants des barres 0 à 9 séparément pour avoir une bonne observation et étudier le phénomène lors de cassure de barres. Nous constatons que la rupture des barres 1 et 3 a engendré un surplus de courant qui se répartit dans toutes les barres mais les barres adjacentes 0, 2, 4 et même 5 en reçoivent la plus grande partie comme c'est révélé aux figures sus-dénommées. Par conséquent ceci va causer la surchauffe des barres voisines et par la suite leur rupture dont le résultat fatal est la panne totale.



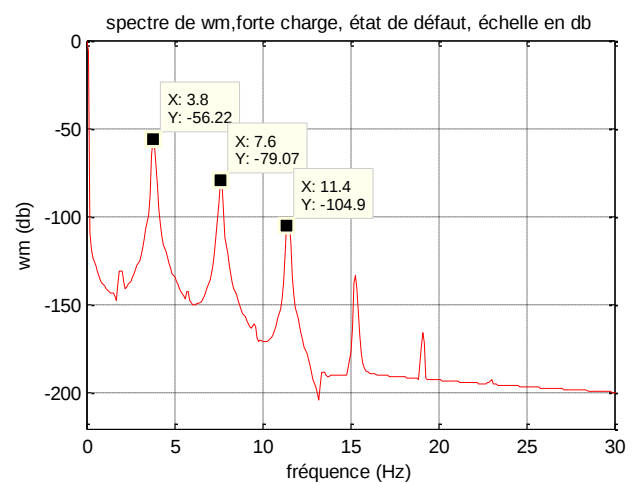
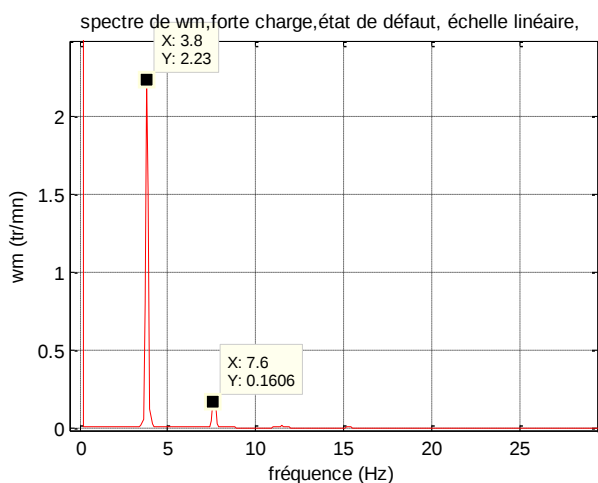
Figures II.14 Courants des barres 0 à 4



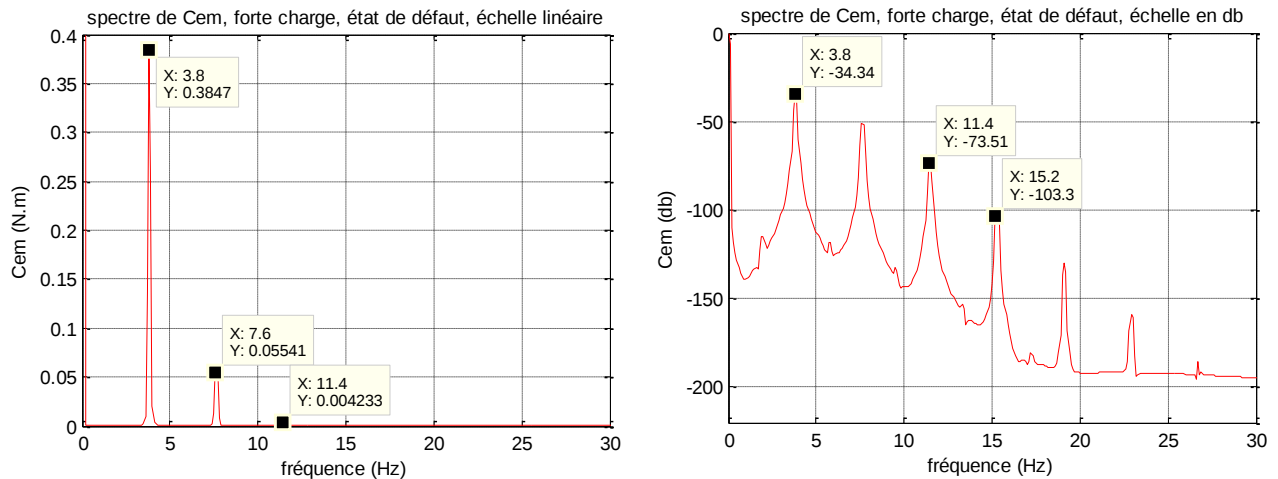
Figures II.15 Courants des barres 5 à 9



Figures II.16 et II.17 spectres du courant ia : à gauche échelle linéaire à droite en dB



Figures II.18 et II.19 spectres de la vitesse wm : à gauche échelle linéaire à droite en dB



Figures II.20 et II.21 spectres du couple électromagnétique Cem : à gauche échelle linéaire à droite en dB

Cette série de figures reflète le défaut rotorique pour des fortes charges, montrant les spectres du courant statorique, de la vitesse et du couple électromagnétique.

Les fréquences caractéristiques du défaut dans le spectre du courant sont données par

$$f_d = f_s(1 \pm 2 * g) = 50(1 - 2 * 0.038) = 46.2 \text{ Hz}$$

Avec $f_s=50$ Hz et $g=0.038$.

Pour la vitesse et le couple, la fréquence de défaut vaut

$$f_d = 2k * g * f_s = 2 * 0.038 * 50 = 3.8 \text{ Hz}$$

Ces valeurs concordent parfaitement avec les raies observées sur les figures, confirmant la présence du défaut de rupture de barres. Nous constatons également que le nombre d'harmoniques a augmenté, que la distance qui les sépare s'est accrue et que leurs amplitudes se sont accentuées par rapport aux faibles charges.

II.6 Conclusion

Dans le présent chapitre le modèle multi enroulement a été présenté d'une manière brève. Les résultats de simulation montrent l'efficacité du modèle à décrire le comportement de la machine saine et en défaut. Le modèle est souple d'utilisation, on peut démarrer à vide ou en charge puis instaurer un couple et introduire le défaut à n'importe quel instant. Les résultats des figures II.4 à II.13 le prouvent où l'on a réuni ensemble l'état sain et l'état de défaut. Les résultats sont semblables à ceux de la littérature.

Ensuite pour détecter les défauts de cassure de barres, l'analyse spectrale a été utilisée. Les figures II.14 à II.21 montrent les spectres représentant les défauts de cassure de barre du courant, de la vitesse de rotation et du couple électromagnétique. La position est conforme aux formules dans la littérature $(1 \pm 2 * g) * f_s$ pour le courant et $2 * g * f_s$ pour la vitesse ou le couple.

***Chapitre III : Modèle réduit
issu du modèle multi-
enroulements et résultats de
simulation***

III.1 Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons présenté le modèle multi-enroulements de dimension $N_r + 4$, qui s'est avéré très performant pour reproduire fidèlement le comportement de la machine asynchrone aussi bien en fonctionnement sain qu'en présence de défauts rotoriques. Cependant, malgré ses performances, ce modèle se trouve confronté au problème de temps de calcul, qui demeure assez long devant les modèles réduits. Par ailleurs, le modèle réduit classique (abc-dq) ne peut fournir des résultats certains sur la présence de défauts rotoriques.

C'est dans ce contexte que le modèle réduit issu du modèle multi-enroulements a été développé en considérant la cage rotorique avec toutes ses barres. Ce modèle, mentionné dans la littérature comme aussi performant que le modèle multi-enroulements, présente l'avantage d'un temps de calcul très réduit tout en conservant la capacité de simuler fidèlement les états sains et défaillants de la machine.

Dans ce chapitre, nous allons présenter ce modèle réduit d'une manière brève en nous appuyant sur le résumé des équations, puis nous exposerons les résultats de simulation obtenus par analyse du courant statorique (MCSA) et transformée de Fourier rapide (FFT) pour la détection des défauts rotoriques.

III.2 Transformation de Clarke généralisée

Cependant pour pouvoir passer au modèle réduit qui découle du modèle multi enroulements, il faut utiliser la transformation de Clarke généralisée. Cette transformation permet de passer d'une modélisation n-phasés "multi enroulements" à une modélisation diphasée équivalente, et elle est écrite de la façon suivante :

$$T_{3N_r}(\theta) = \frac{2}{N_r} \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & \cdots & \frac{1}{2} & \cdots & \frac{1}{2} \\ \cos(\theta) & \cdots & \cos(\theta - kp \frac{2\pi}{N_r}) & \cdots & \cos(\theta - (N_r - 1)p \frac{2\pi}{N_r}) \\ -\sin(\theta) & \cdots & -\sin(\theta - kp \frac{2\pi}{N_r}) & \cdots & -\sin(\theta - (N_r - 1)p \frac{2\pi}{N_r}) \end{bmatrix} \quad (\text{III.1})$$

ainsi que son inverse :

$$T_{3N_r}(\theta)^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & \cdots & \cos(\theta) & \cdots & -\sin(\theta) \\ 1 & \cdots & \cos(\theta - kp \frac{2\pi}{N_r}) & \cdots & -\sin(\theta - kp \frac{2\pi}{N_r}) \\ 1 & \cdots & \cos(\theta - (N_r - 1)p \frac{2\pi}{N_r}) & \cdots & -\sin(\theta - (N_r - 1)p \frac{2\pi}{N_r}) \end{bmatrix} \quad \text{III.2)}$$

Grâce à cette transformation, les différentes grandeurs diphasées s'expriment en fonction des grandeurs réelles de phases selon :

$$[X_{odqs}] = [T_{33}(\theta_{dq})] \cdot [X_{abcs}] \Rightarrow [X_{abcs}] = [T_{33}(\theta_{dq})]^{-1} \cdot [X_{odqs}] \quad \text{III.3)}$$

$$[X_{odqr}] = [T_{3N_r}(\theta)] \cdot [X_{kr}] \Rightarrow [X_{kr}] = [T_{3N_r}(\theta)]^{-1} \cdot [X_{odqr}] \quad \text{III.4)}$$

Nous nous sommes contentés de présenter directement le modèle réduit à partir de la référence [21].

III.2.1 Modèle réduit

L'application des transformations (III.3) et (III.4) permettent d'aboutir à un modèle de taille réduite pour la machine asynchrone qui se résume à :

$$\begin{bmatrix} v_{ds} \\ v_{qs} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = [R_{Rtr}] \cdot \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} + [L_{Ltr}] \cdot \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} \quad \text{III.5)}$$

où :

$[R_{Rtr}]$ représente la matrice résistance réduite.

$[L_{Ltr}]$ représente la matrice inductance réduite.

après calcul, ces matrices réduites $[R_{Rtr}]$ et $[L_{Ltr}]$ sont explicitées ci-dessous :

$$[R_{Rtr}] = \begin{bmatrix} R_s & -\omega_r L_{sc} & 0 & -\omega_r M_{sr} \frac{N_r}{2} \\ \omega_r L_{sc} & R_s & \omega_r M_{sr} \frac{N_r}{2} & 0 \\ 0 & 0 & R_{rdd} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_{rqq} \end{bmatrix} \quad \text{III.6)}$$

$$[L_{Ltr}] = \begin{bmatrix} L_{sc} & 0 & -M_{sr} \cdot \frac{N_r}{2} & 0 \\ 0 & L_{sc} & 0 & -M_{sr} \cdot \frac{N_r}{2} \\ -\frac{3}{2} M_{sr} & 0 & L_{rdq} & 0 \\ 0 & -\frac{3}{2} M_{sr} & 0 & L_{rdq} \end{bmatrix} \quad \text{III.7)}$$

où lorsque le moteur est sain, les valeurs de $\begin{bmatrix} R_{rdq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{rdd} & 0 \\ 0 & R_{rqq} \end{bmatrix}$ et L_{rdq} valent :

$$\begin{cases} R_{rdd} = R_{rqq} = 2R_b (1 - \cos a) + 2 \frac{R_e}{N_r} \\ L_{rdq} = L_{rp} - M_{rr} + 2L_b (1 - \cos a) + 2 \frac{L_e}{N_r} \end{cases} \quad (III.8)$$

La simulation de défaut exige l'ajout de termes supplémentaires qui résulte du calcul de :

$$\begin{bmatrix} R_{rfdq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{2N_r}(\theta) \end{bmatrix} \left(\begin{bmatrix} R_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_{rf} \end{bmatrix} \right) \begin{bmatrix} T_{2N_r}(\theta) \end{bmatrix}^{-1} \quad (III.9)$$

où la matrice $\begin{bmatrix} R_{rf} \end{bmatrix}$ concerne les termes des barres en défaut.

Enfin la matrice pour l'état sain ou en défaut s'écrit :

$$\begin{bmatrix} R_{rfdq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{r11} & R_{r12} \\ R_{r21} & R_{r22} \end{bmatrix} \quad (III.10)$$

où les quatre termes de cette matrice sont :

$$\begin{aligned} R_{r11} &= R_{rdd} + R_{11df} \\ R_{r12} &= 0 + R_{12df} \\ R_{r21} &= 0 + R_{21df} \\ R_{r22} &= R_{rqq} + R_{22df} \end{aligned} \quad (III.11)$$

avec :

$$\begin{aligned} R_{11df} &= \frac{2}{N_r} (1 - \cos a) \cdot \sum_{k'}^{nk'} R_{bk'f} (1 - \cos(2k'+1)a) \\ R_{12df} &= -\frac{2}{N_r} (1 - \cos a) \cdot \sum_{k'}^{nk'} R_{bk'f} \sin(2k'+1)a \\ R_{21df} &= -\frac{2}{N_r} (1 - \cos a) \cdot \sum_{k'}^{nk'} R_{bk'f} \sin(2k'+1)a \\ R_{22df} &= \frac{2}{N_r} (1 - \cos a) \cdot \sum_{k'}^{nk'} R_{bk'f} (1 + \cos(2k'+1)a) \end{aligned} \quad (III.12)$$

Dans ces expressions, l'indice k' caractérise une barre cassée, la sommation concerne donc toutes les barres qui présentent un défaut [15].

Ainsi, pour le modèle diphasé général il suffit de remplacer la matrice $\begin{bmatrix} R_{rdq} \end{bmatrix}$ dans la matrice (III.6) par la matrice $\begin{bmatrix} R_{rfdq} \end{bmatrix}$.

III.3 Simulation et résultats

Le modèle établi au (III.5) est simulé tel quel ou peut être transformé sous forme d'équation d'état. Cependant pour la simulation, il faut dissocier la matrice résistance en : $\begin{bmatrix} A_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{Rtr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} A_{Rdf} \end{bmatrix}$, où :

$$[A_R] = \begin{bmatrix} R_s & -\omega_r L_{sc} & 0 & -\omega_r M_{sr} \frac{N_r}{2} \\ \omega_r L_{sc} & R_s & \omega_r M_{sr} \frac{N_r}{2} & 0 \\ 0 & 0 & R_{r11} & R_{r12} \\ 0 & 0 & R_{r21} & R_{r22} \end{bmatrix} \quad (III.13)$$

$$[R_{Rtr}] = \begin{bmatrix} R_s & -\omega_r L_{sc} & 0 & -\omega_r M_{sr} \frac{N_r}{2} \\ \omega_r L_{sc} & R_s & \omega_r M_{sr} \frac{N_r}{2} & 0 \\ 0 & 0 & R_{rdd} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_{rqq} \end{bmatrix} \quad (III.14)$$

$$[A_{Rdf}] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_{11df} & R_{12df} \\ 0 & 0 & R_{21df} & R_{22df} \end{bmatrix} \quad (III.15)$$

La matrice $[A_{Rdf}]$ est la matrice de défaut supplémentaire.

Le schéma de simulation est représenté à la figure III.1.

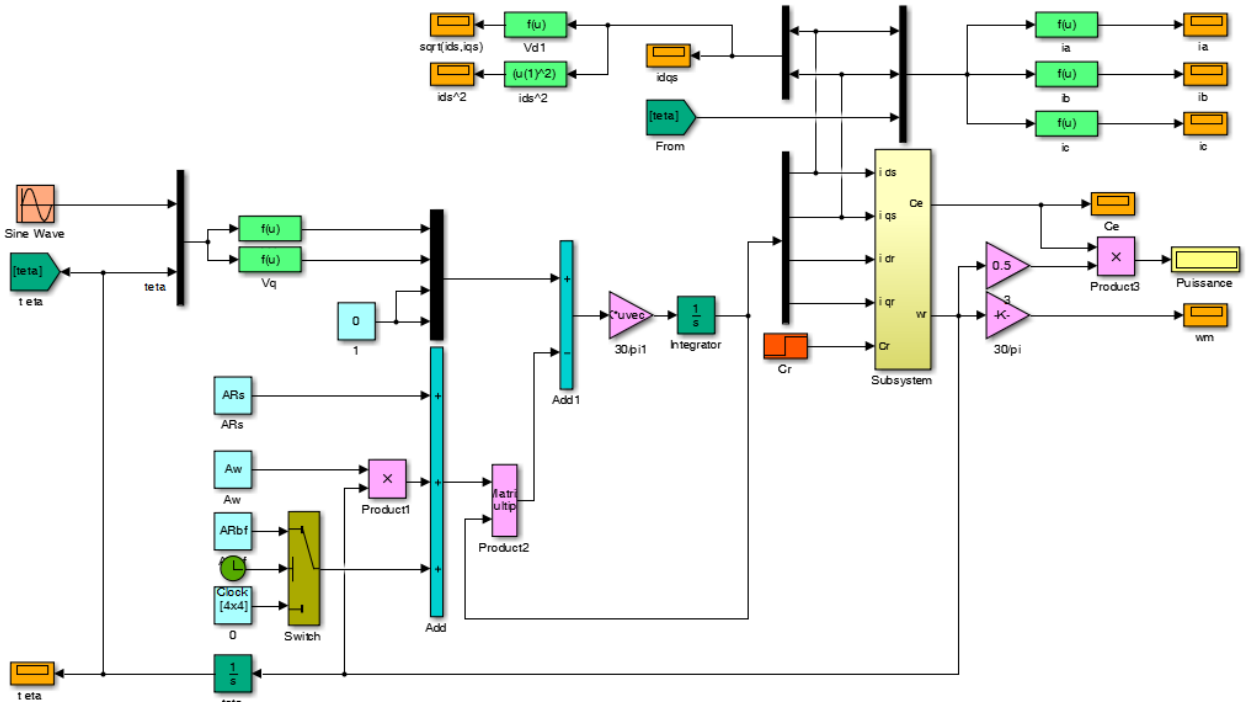


Figure III.1 Schéma de simulation

Le schéma de simulation montre qu'on récupère sur Workspace toutes les grandeurs voulues : les courants statoriques, le couple électromagnétique, la vitesse etc., entre autres le

module de i_{ds} et i_{qs} soit $\sqrt{i_{ds}^2 + i_{qs}^2}$ ainsi que le carré de i_{ds} soit i_{ds}^2 .

Chapitre III : Modèle réduit issu du modèle multi-enroulements et résultats de simulation

Tout d'abord nous simulons l'état sain. On démarre le moteur à vide pendant un certain temps jusqu'à la disparition du régime transitoire. Puis à l'instant 0.8s, on introduit une charge nominale de 20 N. Les résultats des différentes grandeurs sont récoltés dans Workspace. Ceux-ci sont exposés aux figures III.2 à III.7.

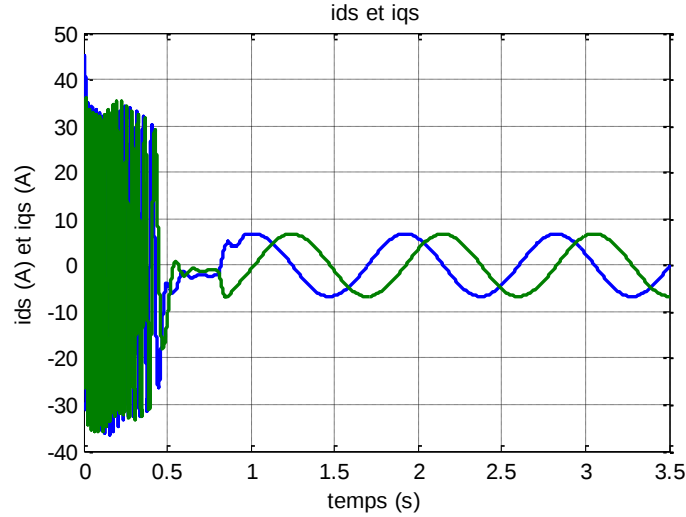


Figure III.2 courants ids et iqs en quadrature, état sain

La figure III.2 montre les courants statoriques sinusoïdaux dans le repère de Park i_{ds} et i_{qs} en quadrature tandis que la figure III.3 présente le courant statorique i_a obtenu par transformation inverse de Park des courants statoriques triphasés. Il ne présente aucune déformation visible. Il passe par un régime transitoire, le dépasse pendant une durée où l'on observe que la machine n'est pas chargée puis augmente à une amplitude conséquente à la charge nominale instaurée à l'instant 0.8s.

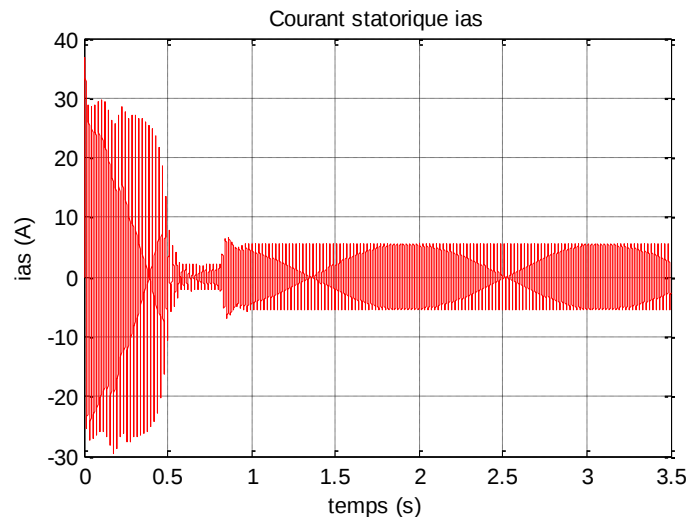


Figure III.3 Courant statorique, état sain

La figure III.4 montre le module des courants statorique $\sqrt{i_{ds}^2 + i_{qs}^2}$. Après un régime transitoire, vient le régime du moteur à vide puis celui en charge où l'on observe que le

module est constant et ne montre aucune perturbation, preuve qu'il n'y a aucun défaut.

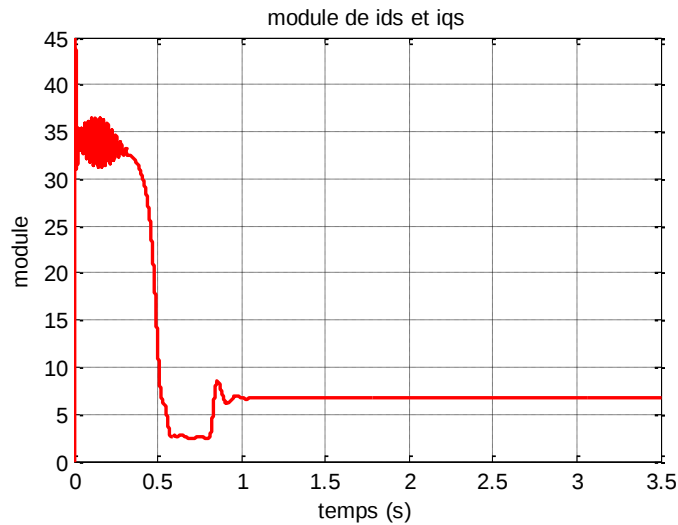


Figure III.4 Module du courant statorique, état sain

Aussi la figure III.5 montre le carré du courant statorique i_{ds}^2 . Après un régime transitoire, vient le régime du moteur à vide puis celui en charge où l'on observe qu'il est semblable à i_{ds} en régime permanent si ce n'est qu'il est positif (carré) mais de fréquence double, il ne présente aucune déformation, preuve qu'il n'y a aucun défaut.

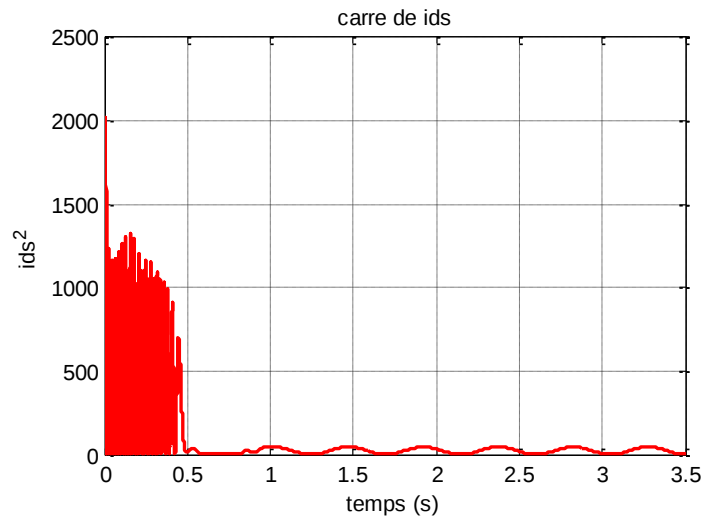


Figure III.5 Carré du courant statorique, état sain

Ensuite la figure III.6 présente la variation du couple électromagnétique (en vert) au cours des différentes étapes : régime transitoire, passage par une charge nulle et l'établissement de l'échelon d'un couple résistant (en bleu) à l'instant 0.8s valant 20 N.m. Nous observons tout comme les courants qu'ils ne présentent aucune déformation ou un signe pouvant indiquer qu'il y a défaut dans la machine.

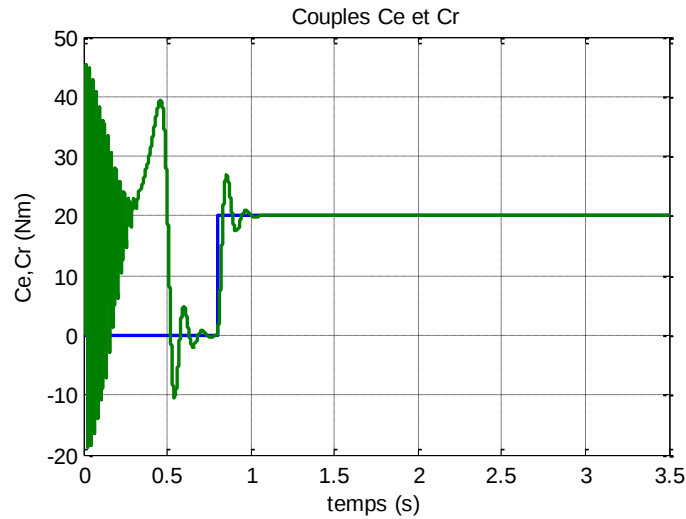


Figure III.6 Couples électromagnétiques et résistant, état sain

En dernier, la figure III.7 ci-après, représente la vitesse de rotation angulaire qui débute par une valeur nulle (du repos) et commence à augmenter au cours du régime transitoire, subit un dépassement et se stabilise à la valeur de synchronisme de 1500 tr/mn pour diminuer ensuite à l'instant 0.8s sous l'effet du couple de charge de 20 N.m établi à cet instant pour atteindre ensuite sa valeur nominale en régime permanent. De même la vitesse ne présente aucun changement en régime établi.

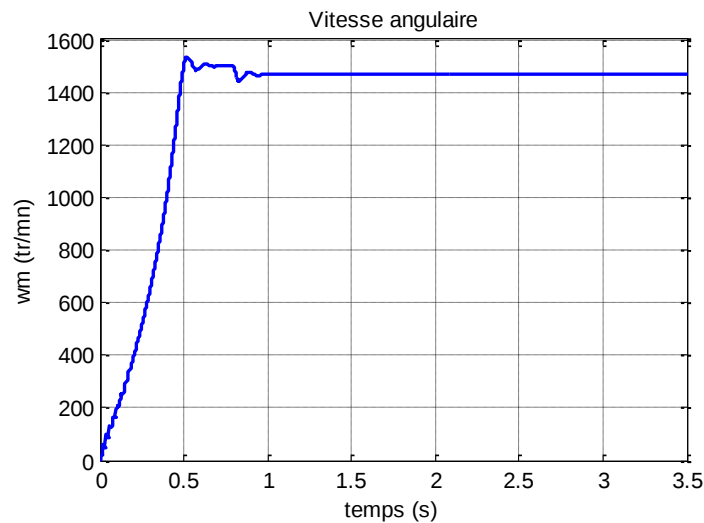


Figure III.7 Vitesse de rotation, état sain

Enfin les résultats obtenus à partir du modèle réduit issu du modèle multi enroulements sont semblables à ceux dans la littérature pour le cas d'un moteur sain. Le modèle réduit rend bien compte du comportement du moteur comme le modèle multienroulements.

Pour bien observer la différence entre l'état sain et l'état en défaut il est judicieux de simuler les deux états ensemble.

Nous allons simuler et tester le modèle lorsque celui-ci passe de l'état sain à celui de défaut par exemple en démarrant le moteur à vide puis à insérer un couple résistant à l'instant

0.8 s et enfin à introduire le défaut de cassure de barres à l'instant 2.4 s. La durée de simulation est de 6s. De cette manière nous pouvons observer ensemble l'état sain ainsi que celui de défaut dès son apparition. Les résultats résumant les dires précédents sont présentés aux figures suivantes de III.8 à III.16.

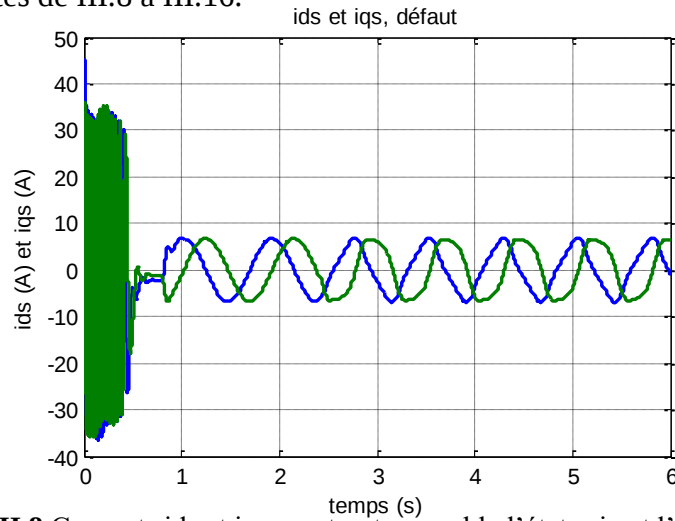


Figure III.8 Courants ids et iqs montrant ensemble l'état sain et l'état de défaut

L'observation de la figure III.8 montre que la courbe se compose de deux parties. La première est identique à la simulation de l'état sain et la seconde est celle de défaut où l'on constate avec évidence la déformation des ondes des courants ids et iqs, preuve qu'il y a défaut. Par suite c'est une attestation que le modèle réagit au défaut de cassure de barres et est totalement différent du modèle réduit classique.

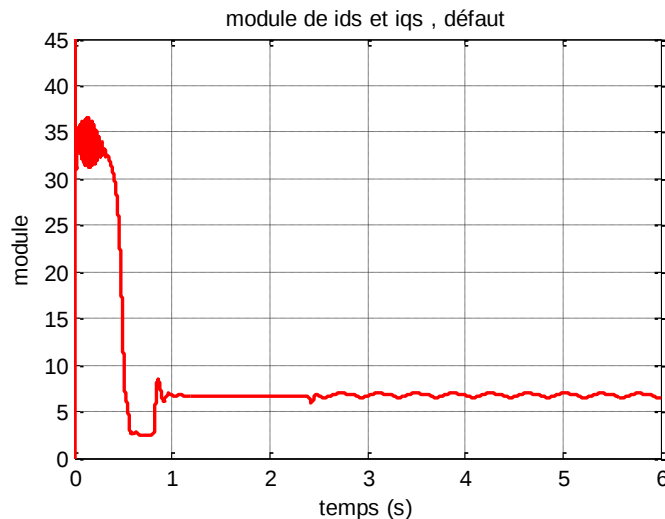


Figure III.9 Module des courants ids et iqs exposant ensemble l'état sain et l'état de défaut

La deuxième figure III.9 représente le module des deux courants ids et iqs où la première partie de la courbe montre l'état sain, la courbe est continue tandis que la deuxième partie est devenue ondulée juste à partir de l'instant de l'instauration du défaut de cassure de barres qui représente le défaut où c'est clair que ceci est un bon critère de diagnostic du défaut de rupture de barres car les deux parties sont très différentes : l'une est constante l'autre est ondulée.

Aussi la figure III.10 qui suit, représente le carré du courant i_{ds} où le graphe montre que la première partie est identique à l'état sain mais qu'à partir de l'instant 2.4s, instant de l'introduction du défaut, les ondes diffèrent et sont de façon évidente déformées. Donc les deux parties sont différentes ; preuve qu'il y a défaut. Ceci sera aussi un critère de diagnostic de défaut de cassure de barres.

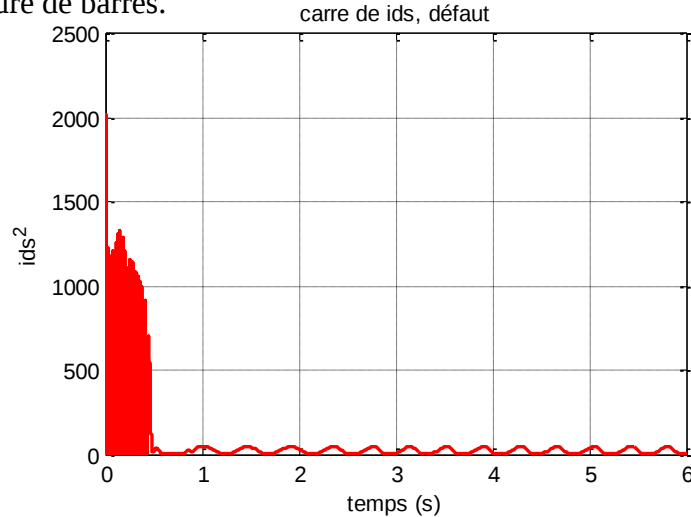


Figure III.10 Carré du courant i_{ds} montrant ensemble l'état sain et l'état de défaut
à partir de 2.4s les ondes diffèrent des premières

La figure III.11 montre le courant statorique qui dévoile clairement la séparation entre les parties saine et de défaut où dans la partie saine l'enveloppe du courant statorique est constante alors que dans la seconde partie de défaut, l'enveloppe est ondulée à partir de l'instauration du défaut comme mentionnée dans la littérature indiquant le défaut de rupture de barres mettant en valeur la capacité du modèle réduit à rivaliser avec le modèle multi enroulements.

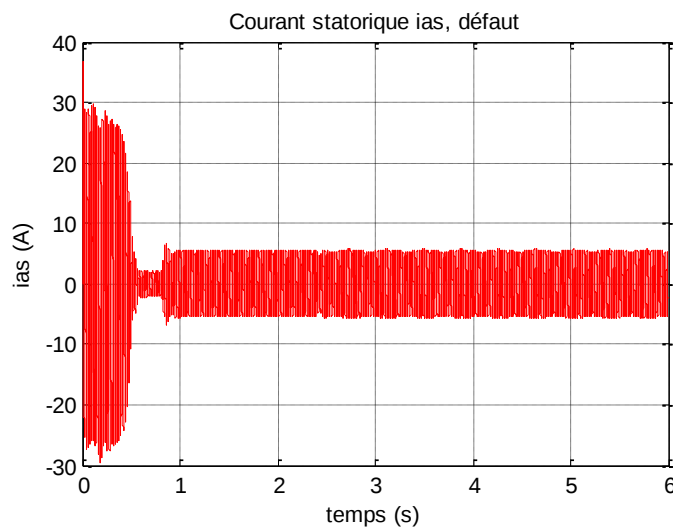


Figure III.11 Courant i_{as} statorique dévoilant la partie saine et la partie en défaut

Les ondulations débutent à l'instant 2.4 s

De même dans les deux prochaines figures III.12 et III.13 qui représentent le couple électromagnétique et la vitesse de rotation, les parties saines, après le régime transitoire sont constantes alors que dans les deuxièmes parties les courbes ont subi des ondulations importantes montrant et indiquant ainsi l'instauration du défaut de cassure de barres.

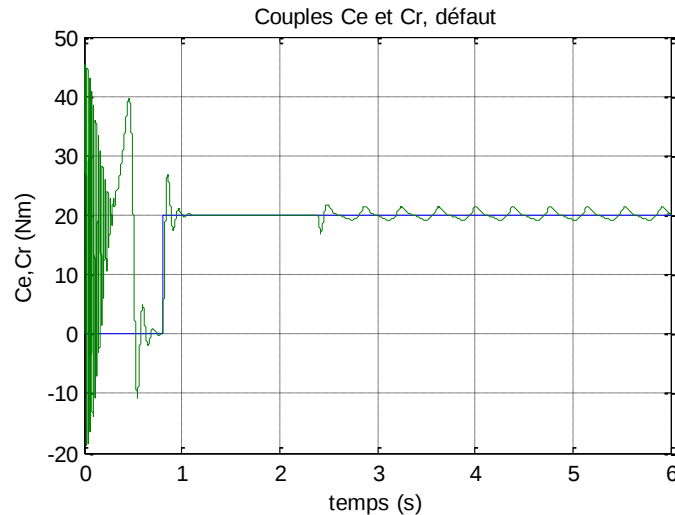


Figure III.12 Couples électromagnétique et résistant les ondulations apparaissent à l'instant de l'instauration du défaut

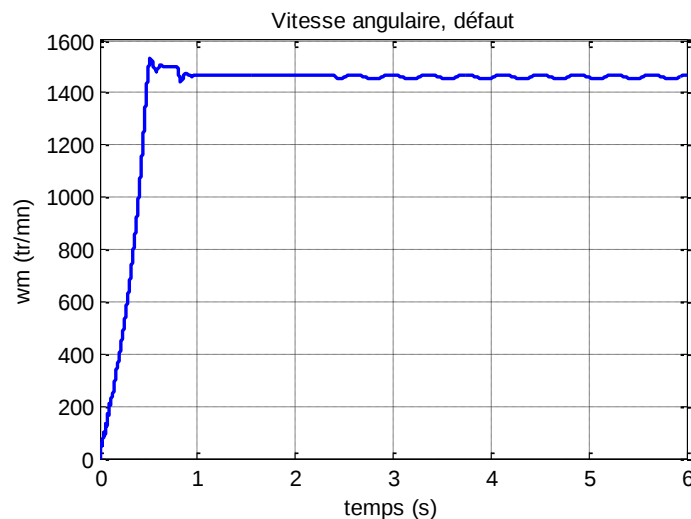


Figure III.13 Vitesse de rotation, les ondulations apparaissent à l'instant de l'instauration du défaut

Dans ce qui précède, les grandeurs ont été présentées dans le domaine temporel avec une partie saine et l'autre en défaut afin de mettre en évidence la différence. Aussi pour justifier et confirmer le défaut de cassure de barres nous allons simuler des résultats où le défaut est instauré dès le début et utiliser la FFT (c'est-à-dire confirmer dans le domaine fréquentiel) outil très important qui donne le spectre d'un signal c'est-à-dire le contenu spectral ou le contenu en harmoniques qui constitue le signal. Cependant pour que la FFT donne des résultats assez précis il faut que le signal soit stationnaire et que le temps de mesure

Chapitre III : Modèle réduit issu du modèle multi-enroulements et résultats de simulation

ou de simulation soit assez suffisant. Dans notre cas il est exigé une résolution fréquentielle de $\Delta f = 0.1 \text{ Hz}$ ceci entraîne un temps de simulation de 10s de signal stationnaire avec une fréquence de 10 kHz.

La simulation consiste à démarrer la machine à vide puis à l'instant 0.8s, on introduit un couple de 20 Nm et l'instauration du défaut. Le temps de simulation est de 12s.

Après simulation sous les conditions précédentes, les résultats collectés concernant les différentes grandeurs et leurs spectres sont présentés aux figures III.14 à III.18.

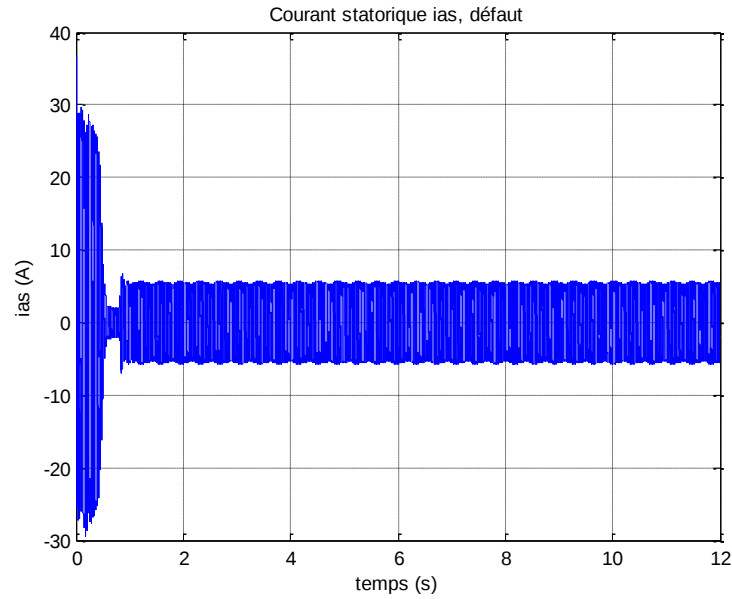


Figure III.14 Courant statorique, l'enveloppe est ondulée, état de défaut

La figure III.14 représente le courant statorique i_{as} . Les ondulations sur l'enveloppe de l'amplitude sont très claires prouvant ainsi la présence du défaut de cassure de barres comme c'est dit dans la littérature.

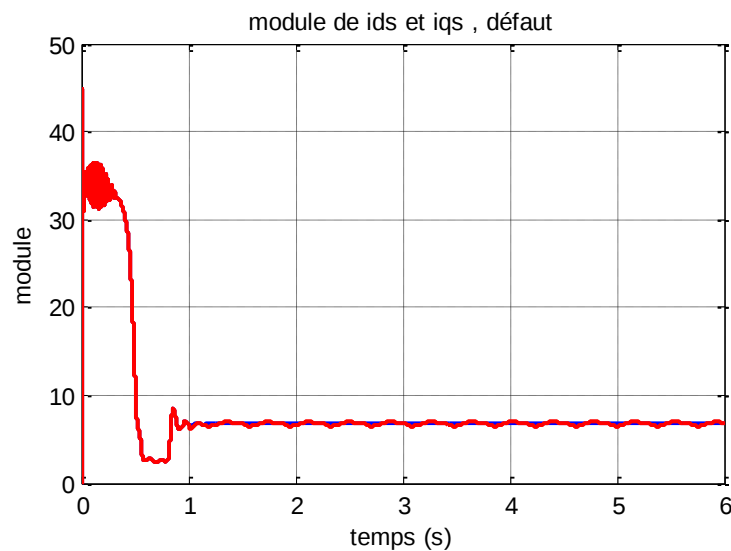


Figure III.15 Modules des courants des états sain et en défaut,

le module ondulé de défaut entoure le module sain

Dans la figure III.15 le graphe (sur 6s d'observation) montre ensemble la superposition des courbes des modules pour l'état sain et l'état de défaut où l'on voit de façon claire les ondulations du module de défaut (en rouge) autour du module sain (en bleu).

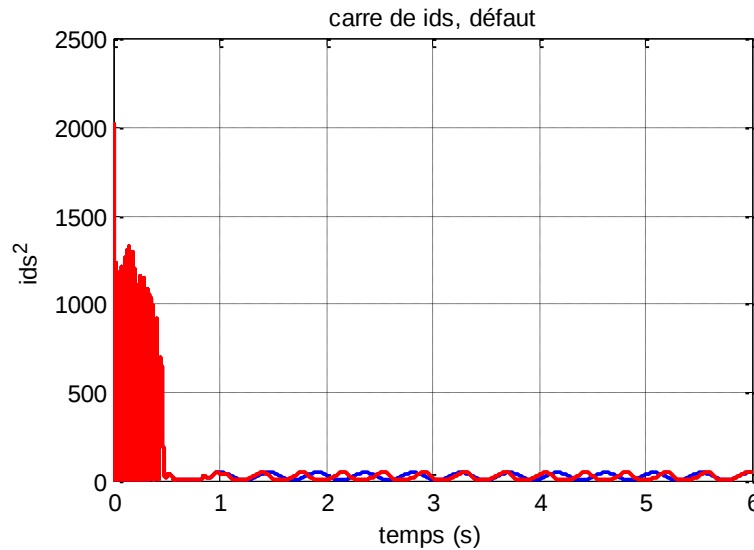


Figure III.16 Carré des courants des états sain et en défaut, le signal rouge de défaut a des ondes déformées par rapport au bleu et une fréquence plus élevée

Tandis que la figure III.16 (sur 6s d'observation) présente la superposition du carré des courants sain et de défaut. On voit bien la déformation des ondes du signal rouge représentant le défaut, de plus il y a accroissement de sa fréquence par rapport à l'état sain.

Les figures suivantes montrent les spectres des différentes grandeurs lors de défaut. On rappelle que pour appliquer la FFT tous les signaux ont été tronqués des deux premières secondes afin d'éliminer tout régime transitoire et les rendre stationnaires. La valeur du glissement pour cette simulation vaut $g = 0.0262$.

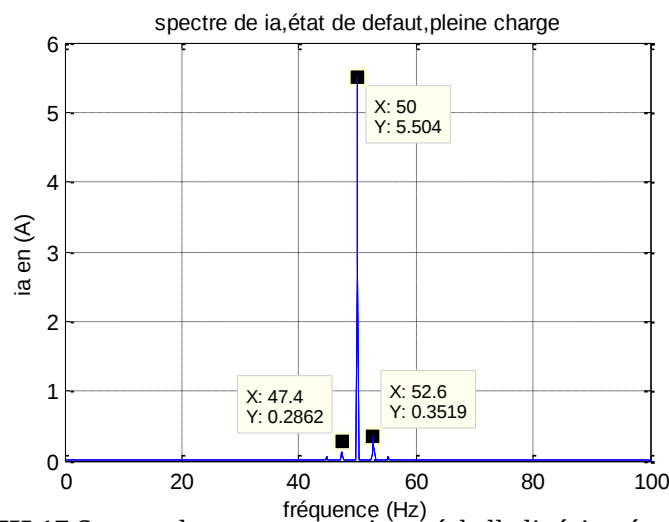


Figure III.17 Spectre du courant statorique, échelle linéaire, état de défaut

La figure III.17 montre le spectre du courant statorique obtenu grâce à la FFT où l'on voit le fondamental (50 Hz) et tout autour les harmoniques de défaut bien visibles en linéaire.

Aussi la figure III.18 représente le même spectre mais en échelle dB pour mettre en évidence les harmoniques, même de faible amplitude.

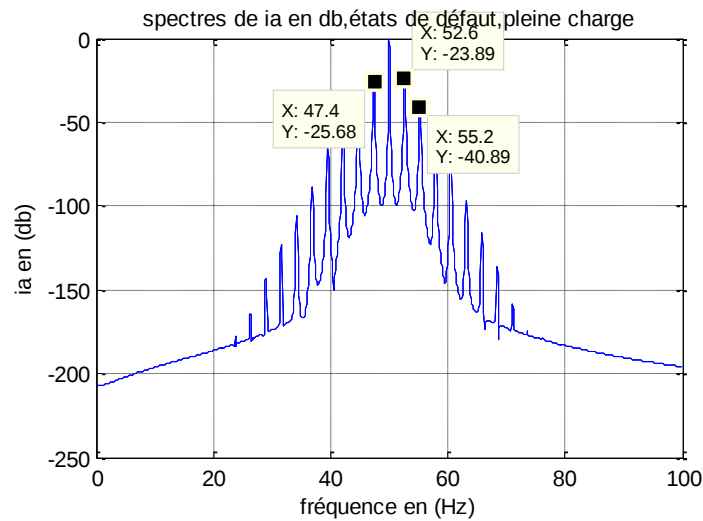


Figure III.18 Spectre du courant statorique, échelle en dB, état de défaut

La figure III.19 qui concerne le module montre le fondamental à la fréquence zéro suivi des harmoniques de défaut de cassure de barres respectant la formule $2k g f_s$, avec $k = 0, 1, 2, \dots$. En tronquant le fondamental, les harmoniques de défaut sont très visibles et sont bien distant de $2 g f_s$ comme dans la littérature, tout comme le domaine temporel (ondulations) ceci est aussi un puissant critère de diagnostic de défaut de cassure de barres.

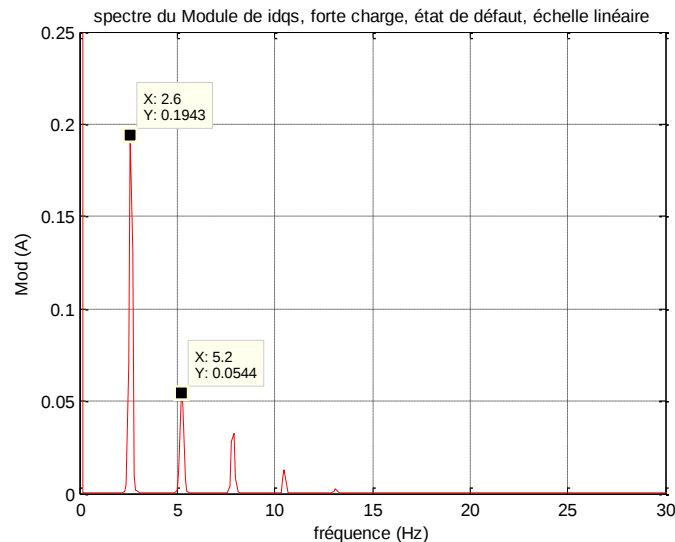


Figure III.19 Spectre du module de idqs, échelle linéaire, état de défaut

De même la figure III.20 représente le même spectre mais en échelle dB. L'échelle logarithmique a mis en évidence beaucoup plus d'harmoniques même ceux de faible amplitude.

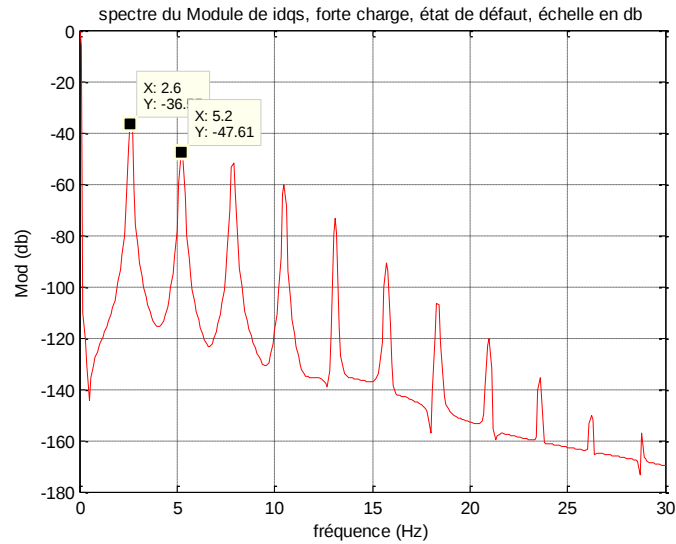


Figure III.20 Spectre du module de i_{dq} , échelle en dB, état de défaut

Pour terminer le chapitre nous avons ajouté le spectre du courant i_{ds} lors de défaut ainsi que celui du carré de i_{ds} . On constate (figures III.21 et III.22) que le fondamental a pour fréquence $g f_s = 1.3 \text{ Hz}$ suivi des harmoniques de défaut le premier à 3.9 Hz c'est-à-dire distant de $2 g f_s = 2.6 \text{ Hz}$. Ils sont très bien visibles avec l'échelle logarithmique dans la figure III.22.

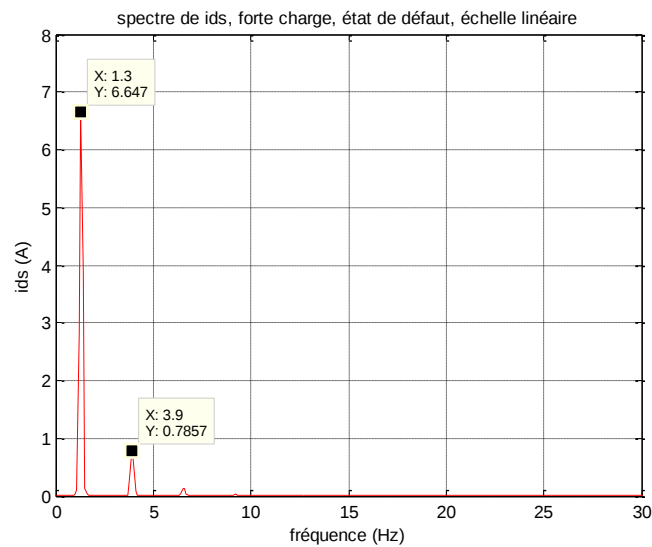


Figure III.21 Spectre du courant i_{ds} , échelle en linéaire, état de défaut

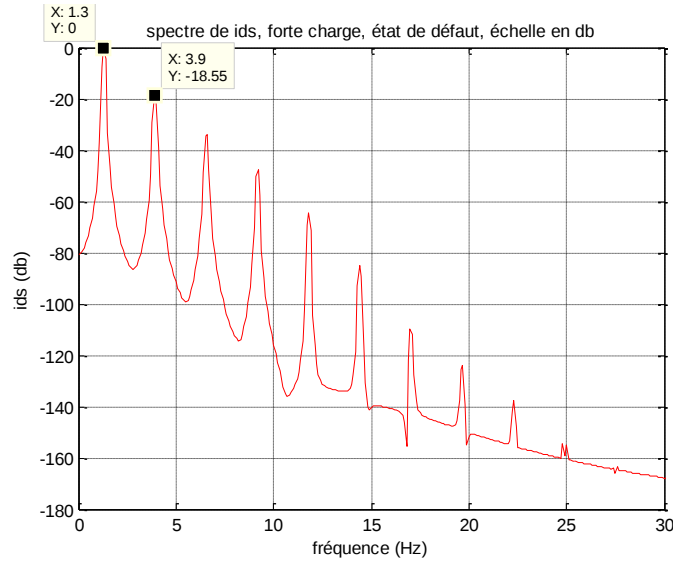


Figure III.22 Spectre du courant i_{ds} , échelle en dB, état de défaut

Le spectre dans les figures III.23 et III.24 confirment les dires précédents où nous avons mentionnés que le carré du courant i_{ds} engendre un signal de fréquence double. Ceci est montré aux figures III.23 et III.24. La fréquence du fondamental signal carré de i_{ds} vaut bien $g f_s = 2.6 \text{ Hz}$ alors que la fréquence du premier harmonique vaut 5.2 Hz c'est-à-dire distant du fondamental de $2 g f_s = 2.6 \text{ Hz}$. Ainsi se termine le chapitre.

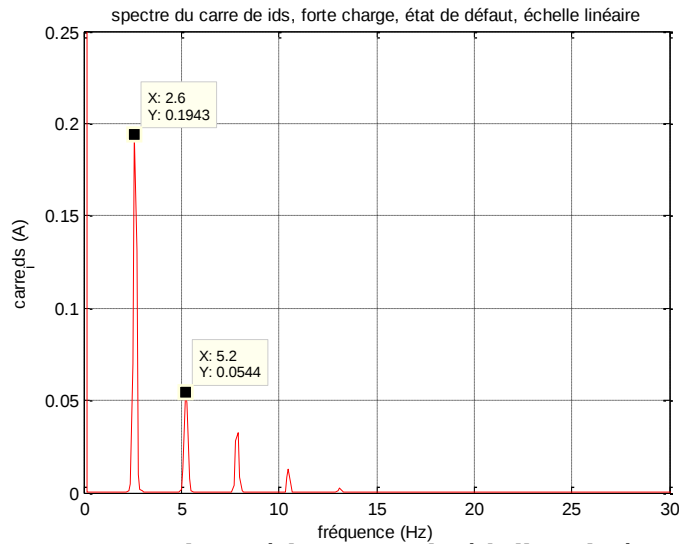


Figure III.23 Spectre du carré du courant i_{ds} , échelle en linéaire, état de défaut

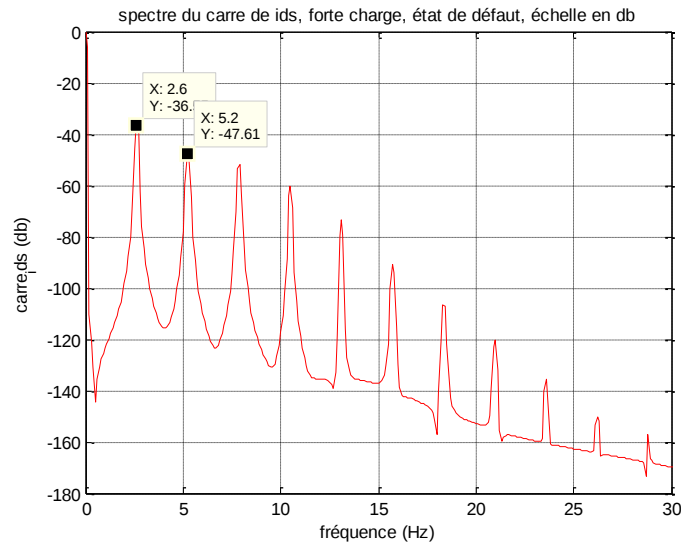


Figure III.24 Spectre du carré du courant ids, échelle en dB, état de défaut

III.4 Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté de manière très brève le modèle réduit qui découle du modèle multi enroulements pour pouvoir l'utiliser pour la simulation de l'état sain et de l'état du défaut de cassure de barres. Ensuite nous avons établi le modèle en Simulink de Matlab. Dans ce modèle les grandeurs tensions, courants, couples, vitesse etc. sont envoyées vers Workspace de Matlab afin de les étudier et de tirer des conclusions adéquates.

Afin de mettre en évidence la présence du défaut de cassure de barres avec ce modèle nous avons procédé à la simulation du cas de l'état sain suivi de l'état de défaut dans la même simulation. De cette manière nous avons pu observer ensemble la partie saine et la partie de défaut.

Dans ces résultats nous avons observés les ondulations du courant statorique comme décrit dans la littérature. Aussi ces ondulations se retrouvent sur le couple électromagnétique ainsi que sur la vitesse de rotation comme c'est montré aux figures précédentes. En plus l'étude du module a donné de bons résultats, il montre bien l'apparition de l'état de défaut par

l'apparition d'ondulations sur le module des courants $\sqrt{i_{ds}^2 + i_{qs}^2}$. Il en est de même pour le carré du courant ids ou les ondes sont déformées lorsqu'il y a défaut. Par suite ils peuvent être utilisés comme critères de détection du défaut rotorique Enfin la FFT appliquée au courant statorique vient confirmer l'état de défaut par l'apparition de raies de part et d'autre du fondamental aux fréquences $f_b = (1 \pm 2kg) \cdot f_s$ montrés aux figures III.17 et III.18. Aussi le spectre du module des courants statoriques vient confirmer que lors de défaut en plus du fondamental situé à la fréquence zéro, apparaissent d'autres harmoniques dus aux défauts et ceux-ci sont distants de $2g f_s$. De plus nous avons montré que le carré du courant peut aussi

Chapitre III : Modèle réduit issu du modèle multi-enroulements et résultats de simulation

être utilisé comme critère de diagnostic et qu'il est de fréquence double. Pour conclure le modèle réduit issu du modèle multi enroulements est très efficace et permet de simuler la machine asynchrone de manière tout aussi fidèle que le fameux modèle multi enroulements.

Conclusion générale

Conclusion générale

Les moteurs asynchrones sont parmi les machines électriques les plus utilisées dans l'industrie, en raison de leur robustesse, de la simplicité de leur construction et de leur faible coût de maintenance. Cependant, comme toute machine électrique, ils sont exposés à différents types de défauts, notamment les défauts rotoriques tels que les ruptures de barres, les défauts statoriques tels que les courts-circuits entre spires, ainsi que les défauts de roulements. Pour détecter ces défauts précocement et éviter l'arrêt des systèmes industriels, plusieurs méthodes de diagnostic ont été développées, dont les plus importantes sont l'analyse du courant statorique (MCSA), l'analyse spectrale par transformée de Fourier (FFT), l'analyse des vibrations et l'analyse du flux magnétique. La technique MCSA se distingue par son caractère non invasif et sa capacité à exploiter des signaux facilement accessibles.

Le premier chapitre a permis de poser les bases théoriques nécessaires à l'étude de la machine asynchrone. Après avoir présenté sa constitution et son principe de fonctionnement, une classification détaillée des défauts électriques et mécaniques a été établie, suivie d'une présentation des principales méthodes de diagnostic, notamment les méthodes basées sur les connaissances, la redondance analytique et l'analyse de signaux.

Le deuxième chapitre a été consacré à la modélisation multi-enroulements de la machine asynchrone. Ce modèle, basé sur une représentation détaillée de la cage rotorique sous forme de mailles couplées magnétiquement, a montré sa capacité à reproduire fidèlement le comportement de la machine aussi bien en fonctionnement sain qu'en présence de défauts rotoriques. Les résultats de simulation ont confirmé l'efficacité du modèle, et l'analyse spectrale FFT a permis d'identifier les harmoniques caractéristiques aux fréquences $f_s(1 \pm 2g) * f_s$ pour le courant et $2g * f_s$ pour la vitesse et le couple. Cependant, la complexité de ce modèle engendre un temps de calcul relativement élevé.

Le troisième chapitre a présenté le modèle réduit dans le repère d-q, dérivé du modèle multi-enroulements grâce à la transformation de Clarke généralisée. Ce modèle offre une représentation dynamique simplifiée et efficace tout en conservant la capacité de simuler les défauts rotoriques, constituant ainsi un bon compromis entre précision et rapidité de calcul, ce qui le rend bien adapté aux applications de diagnostic.

Enfin, ce travail contribue à une meilleure compréhension du comportement du moteur asynchrone dans différentes conditions de fonctionnement et constitue une base solide pour le développement de méthodes de diagnostic plus précises et plus performantes dans le domaine des systèmes électriques industriels.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] GUEDIDI ASMA, « Contribution au diagnostic des défauts de la machine asynchrone », Thèse de doctorat en électrotechnique. Université Mohamed Khider de Biskra, 2024.
- [2] BESSAM Besma, « analyse et détection de défaut dans la machine asynchrone base technique intelligentes », Thèse de doctorat en automatique. Université Mohamed Khider de Biskra, 2016.
- [3] BENAMIRA Nadir, « Contribution au diagnostic de la machine asynchrone triphasée en présence de défaut », Thèse de doctorat en électromécanique, Université Badji-Mokhtar-Annaba, 2017.
- [4] SOUAD Saadi, « Contribution à la commande et au diagnostic des défauts statoriques et rotoriques de la machine asynchrone à cage d'écureuil » Thèse de doctorat en génie électrique, Université des Sciences et de Technologie D'Oran.
- [5] MEGUENNI Sana et Mettai Maroua, « Conception et réalisation d'un onduleur triphasé », Memoire d'ingénieur en Électrotechnique, École Supérieure en Sciences Appliquées- T L E M C E N, 2025.
- [6] LAOUTI Nassim, « Diagnostic de défauts par les Machines à Vecteurs Supports : application à différents systèmes multivariabiles non linéaires » Thèse de doctorat en automatique, l'université Claude Bernard Lyon 1, 2012.
- [7] CHAHMI Abdelghani, Identification paramétrique de la machine asynchrone dédiée au diagnostic, » Thèse de doctorat en électrotechnique, Université des Sciences et de Technologie D'Oran, 2017.
- [8] BOUZIDA Ahcen, « Diagnostic de Défauts des Machines Asynchrones par la Technique du Traitement du Signal » Thèse de doctorat en sciences, École Nationale Polytechnique, 2015.
- [9] BABAK Vaseghi, « Contribution à l'étude des machines électriques en présence de défauts entre spires : modélisation et réduction du courant de défaut » Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine (INPL), Nancy Université, 2009.
- [10] DAMINE YASSER, « Contribution au diagnostic et à l'analyse de défauts dans les machines à induction par les techniques de la décomposition empiriques » Thèse de doctorat en Électromécanique, Université Mohamed Khider – Biskra, 2024.
- [11] Najla HAJE OBEID, « Contribution à la détection des défauts statoriques des actionneurs à aimants permanents Application à la détection d'un défaut inter-spires intermittent et au suivi de vieillissement » Thèse de doctorat génie électrique, L'Université de Lorraine, 2016.
- [12] HALEM Noura, « Modélisation des Machines Asynchrones Triphasées à Cage en Vue du Diagnostic par la Méthode des Éléments Finis », Thèse de doctorat en électrotechnique. Université Mohamed Khider de Biskra, 2015.

- [13] BEDBOUDI Mohamed, « Commande et diagnostic des défauts de la machine asynchrone », Thèse de doctorat en automatique, Université Badji-Mokhtar-Annaba ,2016.
- [14] HARZELLI Imad Eddine, « Contrôle non linéaire de la machine asynchrone en vue du diagnostic des défauts en utilisant des techniques avancées », Thèse de doctorat en électrotechnique. Université Mohamed Khider de Biskra,2020.
- [15] LAHOUASNIA Nasreddine, « Contribution au diagnostic des défauts mécaniques dans les machines électriques triphasées à induction par l'analyse du vecteur d'espace courant », Thèse de doctorat en électromécanique, Université Badji-Mokhtar-Annaba ,2021.
- [16] Andrian Ceban, « Méthode globale de diagnostic des machines électriques » Thèse de doctorat génie électrique, Université Lille de Nord de France, 2012.
- [17] YASSA Nacera, « Détection des défauts dans les systèmes de conversion d'énergie polyphasés », Thèse de doctorat en Électrotechnique, université mouloud Mammeri, tizi-ouzou,2018.
- [18] KERFALI Samir, « Contribution à la Surveillance et au Diagnostic des Défauts De la Machine Asynchrone », Thèse de doctorat en Génie Industriel, Université Badji-Mokhtar-Annaba ,2016.
- [19] AICHA Abed, «Contribution à l'Étude et au Diagnostic de la Machine Asynchrone», Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy-1, France, Mars 2002
- [20] SAHRAOUI Mohammed, «Contribution au diagnostic d'une machine asynchrone triphasée à cage», mémoire de Magister, Université de Biskra, 2003.