



République Algérienne Démocratique Et Populaire

**Ministère De l'Enseignement Supérieur
Et De La Recherche Scientifique**



Université Echahid Hamma *Lakhder d'El-Oued*

Faculté De La Technologie

Mémoire De Fin d'Études

En Vue De L'obtention Du Diplôme De

Master Académique

Domain : Science Et Technologie

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Machine Electriques

THEME

**Diagnostic de défauts dans la machine
à induction triphasée.**

Réalisé par:

- Oubiri Mohammed yassine
- Cheradid Nassim
- Ben Debka Ayoub

Encadré par:

- Dr. HALEM Noura MCA

Année Universitaire 2021/2022

Remerciement

Nos remerciements vont tout premièrement, le bon DIEU le tout puissant de nous avoir donné le courage, la patience et la santé durant toutes ces années et que grâce à lui ce travail a pu être réalisé.

Nous tenons ainsi à exprimer nos vifs remerciements et notre profonde gratitude À Dr. HALEM Noura pour les conseils précieux, les orientations, et l'aide qu'elle nous a accordé pour mener ce travail à terme.

Nous remercions également les membres de juré d'avoir accepté d'examiner ce travail. Notre profonde reconnaissance et nos respects les plus distingués à l'ensemble des enseignants de la faculté de technologie de l'université de EL OUED, qui ont assuré notre formation tout au long de nos années d'études. Nous voudrions associer à nos remerciements toutes personnes qui ont contribué de près ou de loin à ce travail.

A ce jeu, il est impossible de ne pas oublier des noms. On voudrait présenter d'avance nos excuses à ceux qui pourraient alors subir les affres de l'oubli

Dédicaces

Nous avons le grand plaisir de dédier ce modeste travail :

A mes très chères mères, qui nous donnent toujours l'espoir de vivre
et qui n'ont jamais cessé de prier pour nous.

A mes très chers pères, pour ses encouragements, ses soutiens, surtout
pour ses sacrifices.

A mes très chers frères et sœurs. A toutes mes tantes et oncles,
cousins et cousines.

A toute mes grandes familles.

A mes chères amies chacun à son nom

A tous ceux qui nous sont chères.

A tous ceux qui nous aiment. A tous ceux que nous aimons.

.

Sommaire

Remerciement	
Dédicaces	
Sommaire	I
Liste des Figures	II
Liste des Tableaux	III
Notations et symboles	V
Introduction générale	01
CHAPITRE 1 : Etat de l'art sur le diagnostic de défauts de la machine asynchrone	
1.1. Introduction	02
1.2. Construction de la machine asynchrone triphasée à cage	02
1.2.1. Stator	03
1.2.2. Rotor	03
1.2.3. Les paliers	04
1.3. Les principaux défauts dans la machine asynchrone	04
1.3.1. Défauts statoriques	04
1.3.2. Défauts rotoriques	04
1.3.2.1. Excentricité	04
1.3.2.2. Rupture de barres et d'anneau de court-circuit	06
1.4. Méthodes de diagnostic de défauts	07
1.4.1. Aspect modélisation	07
1.4.2. Méthodes extérieures	08
1.4.2.1. Méthodes basées sur l'analyse spectrale	08
1.4.2.2. Diagnostic par mesure des vibrations mécaniques	08
1.4.2.3. Diagnostic par mesure du flux magnétique axial de fuite	09
1.4.2.4. Diagnostic par l'analyse des tensions statoriques induites	09
1.4.2.5. Diagnostic par mesure du couple électromagnétique	09
1.4.2.6. Diagnostic par mesure de la puissance instantanée	09
1.4.2.7. Diagnostic par mesure du courant statorique	10
1.5. Conclusion	10
CHAPITRE 2 : Modèle réduit issu du modèle multi enroulements	
2.1. Introduction	09

sommaire

2.2. Calcul des inductances	10
2.3. Modèle réduit équivalent de la machine	10
2.3.1.Introduction	10
2.3.2.Transformation de clarke généralisée	11
2.3.3.Modèle réduit	11
2.4.Simulation du modèle réduit issu du modèle multi enroulements	13
2.4.1. État sain	14
2.4.2. État de défaut de cassure de barres	15
2.4.3. État de défaut, faible charge	15
2.4.4. État de défaut, moyenne charge	17
2.4.5. État de défaut, forte charge	19
2.5. Conclusion	21
<i>CHAPITRE 3 : Analyse spectrale du courant statorique ou MCSA</i>	
3.1. Introduction	22
3.2. État sain, forte charge	22
3.3. État de défaut, faible charge	24
3.4. État de défaut, moyenne charge	27
3.5. État de défaut, forte charge	29
3.6. Conclusion	32
Conclusion Générale	33
Bibliographie	34

Listes des figures

Chapitre 1	
Figure 1.1 Eléments de constitution d'une machine asynchrone à cage d'écureuil	03
Figure 1.2.Types d'excentricité : (a) rotor concentré; (b) excentricité statique; (c) excentricité dynamique	06
Chapitre 2	
Figure 2.1 Schéma du rotor représenté par des mailles électriques	09
Figure 2.2 Schéma de simulation	13
Figure 2.3 Courant statorique, état sain	14
Figure 2.4 Vitesse de rotation angulaire, état sain	14
Figure 2.5 Couple électromagnétique, état sain	15
Figure 2.6 Courant statorique, état de défaut	16
Figure 2.7 Vitesse de rotation angulaire, état de défaut	16
Figure 2.8 Couple électromagnétique, état de défaut	17
Figure 2.9 Courant statorique, état de défaut, moyenne charge	17
Figure 2.10 Vitesse de rotation angulaire, état de défaut, moyenne charge	18
Figure 2.11 Zoom de la vitesse de rotation angulaire état de défaut, moyenne charge	18
Figure 2.12 Couple électromagnétique, état de défaut, moyenne charge	18
Figure 2.13 Courant statorique, état de défaut, forte charge	19
Figure 2.14 Zoom du courant statorique, état de défaut, forte charge	19
Figure 2.15 Vitesse de rotation angulaire, état de défaut, forte charge	20
Figure 2.16 Couple électromagnétique, état de défaut, forte charge	20
Chapitre 3	
Figure 3.1 Spectre du courant statorique, état sain	22
Figure 3.2 Spectre du courant statorique en dB, état sain	23
Figure 3.3 Spectre de la vitesse, état sain	23
Figure 3.4 Spectre de la vitesse en dB, état sain	23
Figure 3.5 Spectre du couple électromagnétique, état sain	24
Figure 3.6 Spectre du couple électromagnétique en dB, état sain	24
Figure 3.7 Spectre du courant statorique, état de défaut, faible charge	25
Figure 3.8 Spectre du courant statorique en dB, état de défaut, faible charge	25

sommaire

Figure 3.9Spectre de la vitesse, état de défaut, faible charge	26
Figure 3.10Spectre de la vitesse en dB, état de défaut, faible charge	26
Figure 3.11Spectre du couple électromagnétique, état de défaut, faible	26
Figure 3.12Spectre du couple électromagnétique en dB, état de défaut, faible charge	27
Figure 3.13Spectre du courant statorique, état de défaut, moyenne charge	27
Figure 3.14Spectre du courant statorique en dB, état de défaut, moyenne charge	28
Figure 3.15Spectre de la vitesse, état de défaut, moyenne charge	28
Figure 3.16Spectre de la vitesse en dB, état de défaut, moyenne charge	28
Figure 3.17Spectre du couple électromagnétique, état de défaut, moyenne charge	29
Figure 3.18Spectre du couple électromagnétique en dB, état de défaut, moyenne charge	29
Figure 3.19Spectre du courant statorique, état de défaut, forte charge	30
Figure 3.20Spectre du courant statorique en dB, état de défaut, forte charge	30
Figure 3.21Spectre de la vitesse en dB, état de défaut, forte charge	30
Figure 3.22Spectre de la vitesse, état de défaut, forte charge	31
Figure 3.23Spectre du couple électromagnétique, état de défaut, forte charge	31
Figure 3.24Spectre du couple électromagnétique en dB, état de défaut, forte charge	31
Liste des tableaux	
Tableau 2.1 : Inductances de la machine asynchrone à cage	10

NOTATIONS et SYMBOLES

	<i>Notations Et Symboles</i>
a, b, c	Indice correspondent aux trois phases (a,b,c).
s, r	Indice relatif au stator et rotor respectivement.
O	Indice relatif au stator et rotor respectivement.
D	Indice de l'axe direct.
Q	Indice de l'axe quadrature
OP	Polaire au longitudinal
Oq	Interpolaire on transversale
X	Ce sont des variables statoriques ou rotoriques : tension, courant ou flux.
O	Indice de l'axe homopolaire.
Ia, ib, ic	Courants des phases statoriques [A].
va, vb, vc	Tensions des phases statoriques [V].
ids, iqs	Composantes biphasées directe et en quadrature du courant statorique[A].
Φ	Flux magnétique.
L_{as}	Inductance propre d'une phase du stator.
M_{as}	Inductance mutuelle entre deux phases du stator.
L_{ar}	Inductance propre d'une phase du rotor.
M_{sr}	Inductance mutuelle entre une phase du stator et une phase du rotor.
j s	Flux magnétique par pôle créé par le courant statorique [Wb].
M_{ar}	Inductance mutuelle entre deux phases du rotor.
Θ_r	position du rotor [rd].
Θ_s	Position des grandeurs statoriques [rd].
[P]	Matrice de transformation de Park.
R_s	Résistance de l'enroulement statorique [%].
R_r	Résistance de l'enroulement rotorique [%].
ω_{dq}	Vitesse de rotation du repère (d,q) par rapport au stator.

Nations et symboles

ω_r	Vitesse de rotation du rotor par rapport au stator.
R_e	Résistance totale de l'anneau de court-circuit [%].
s, r	Indices stator et rotor, respectivement
P	Puissance [W].
B	Induction magnétique [T].
ϕ_r	Flux rotorique [Wb].
ϕ_s	Flux statorique [Wb].
P	Nombre de paires de pôles.
J	Moment d'inertie du système.
C_r	Couple résistant.
F	Coefficient de frottement visqueux.
C_{em}	Couple électromagnétique.
B	Induction magnétique.
K'	une barre cassée
R_{fdr}	la matrice résistance réduite
R_{fdr}	la matrice inductance réduite
R_{rfdq}	les termes des barres en défaut

Introduction générale

Introduction générale

Actuellement, la machine asynchrone s'est instaurée dans tous les secteurs industriels de pointe que se soit dans l'aéronautique, le nucléaire, la chimie ou encore les transports ferroviaires, ceci est dû à sa simplicité de construction, à sa robustesse, à son faible coût d'achat, à sa facilité d'utilisation et au minimum d'entretien qu'elle nécessite. Tous ces facteurs réunis lui ont permis de prendre cette place élevée. Pourtant, et avec tous ces mérites, cette machine ne peut éviter des défaillances tels le court circuit, l'excentricité ou le défaut de cassure de barres ou d'anneau. Certains défauts peuvent commencer faiblement et s'amplifient au cours du temps, par suite mènent à la panne totale et provoquant l'arrêt non désiré. D'autres tels que le court circuit ne tarde pas et mène très rapidement à l'arrêt brusque et définitif. C'est pourquoi, des méthodes de détection et de diagnostic, voulant éviter ces situations qui sont nuisibles et qui touchent le côté économique, ont pris naissance. Ces méthodes essaient de détecter les défauts dès leur naissance.

Dans notre travail nous allons utiliser un modèle réduit issu du modèle multi enroulements afin de déceler les défauts de cassure de barres rotoriques. Pour ce faire le mémoire est divisé en trois chapitres

Dans le premier chapitre, nous avons rappelé les principaux défauts qui peuvent apparaître dans la machine asynchrone à cage ainsi que leurs origines. Puis, nous avons présenté les différentes techniques de détection et de diagnostic des machines asynchrones.

Dans le deuxième nous avons présentés d'une manière brève le modèle réduit issu du modèle multi enroulements. Ensuite nous l'avons simulé grâce à Matlab/Simulink et collectés les résultats en vue de leur étude dans le domaine temporel.

Enfin le troisième chapitre contient les résultats correspondants aux états, sain et en défaut, ceci pour différentes charges. L'analyse spectrale a été utilisée grâce à la transformation de Fourier (FFT).

Le mémoire est finalisé par une conclusion générale.

Chapitre 1

Etat de l'art sur le diagnostic de défauts de la machine asynchrone

1.1 Introduction

La machine asynchrone, est très répandue dans le milieu industriel en raison de sa robustesse, de son faible coût de fabrication et du minimum de maintenance. Au début, son utilisation était l'entraînement des systèmes à vitesse constante. Aujourd'hui, avec l'amélioration de l'électronique de puissance, celle-ci supprime les moteurs à courant continu dans un domaine où ils excellaient, celui de la variation de la vitesse. Aussi malgré ses qualités cette machine ne peut échapper à des diverses défaillances tels que les défauts rotoriques, les défauts de court-circuit, d'excentricité et autres. Dans le milieu industriel le maintien de la continuité de service nécessite un effort de la part des exploitants de production. Le maillon faible est principalement la machine électrique, car sa panne paralyse immédiatement la production et entraîne une perte financière très importante. A cause de ce qui précède, ce chapitre a pour but de présenter un état de l'art des méthodes de diagnostic appliquées à la machine asynchrone à cage. Puis un rappel des différents éléments de la machine asynchrone triphasée et de son principe de fonctionnement. On mentionne les différents défauts pouvant survenir dans l'appareil, leurs causes et leurs conséquences. On parle brièvement des techniques de base couramment utilisées dans le domaine du diagnostic des défauts. Enfin, nous discutons des méthodes de modélisation d'une machine pour diagnostiquer les défauts rotorique pouvant l'affecter.

1.2 Constitution de la machine asynchrone triphasée à cage

Les machines asynchrones peuvent se décomposer, du point de vue mécanique, en trois parties distinctes [1] :

Le stator, partie fixe de la machine où est connectée l'alimentation électrique.

- Le rotor, partie tournante qui permet de mettre en rotation la charge mécanique.
- Les paliers, partie mécanique qui permet la mise en rotation de l'arbre du moteur.

Les éléments de constitution d'une machine asynchrone à cage d'écureuil sont illustrés dans la figure 1.1.

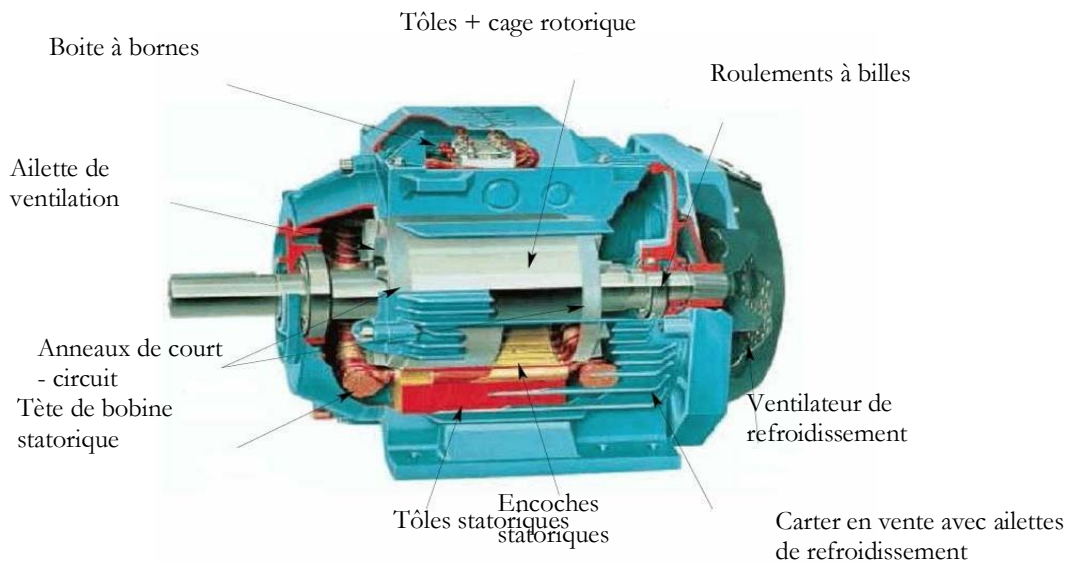


Figure 1.1 Eléments de constitution d'une machine asynchrone à cage d'écureuil [2]

1.2.1 Stator

Le stator de la machine asynchrone est constitué de tôles d'acier dans lesquelles sont placés les bobinages statoriques. Ces tôles sont, pour les petites machines, découpées en une seule pièce alors qu'elles sont, pour les machines de puissance plus importantes, découpées en sections. Elles sont habituellement recouvertes de vernis pour limiter l'effet des courants de Foucault. Les enroulements statoriques sont placés dans des encoches prévues à cet effet. Ces enroulements peuvent être insérés de manière imbriqués, ondulés ou encore concentriques [3].

1.2.2 Rotor

Les rotors des machines asynchrones peuvent être de deux types :

- ♦ Les rotors bobinés sont construits de la même manière que le bobinage statorique. Les phases rotoriques sont disponibles grâce à un système de bagues-balais positionné sur l'arbre de la machine, ce qui permet de profiter des caractéristiques de ce type de rotor à savoir le démarrage, le freinage et la variation de vitesse du moteur par insertion de résistance.
- ♦ Les rotors à cage d'écureuil, les enroulements sont constitués de barres en cuivre utilisées pour les gros moteurs ou en aluminium pour les moteurs de petite puissance.

Ces barres sont court-circuitées à chaque extrémité par deux anneaux dits "de court-circuit". Il existe différentes structures de rotor à cage dépendant principalement de la taille du moteur et de la charge qui sera objet de l'entraînement [3].

1.2.3 Les paliers

Les paliers, supportent l'arbre rotorique, ils sont constitués de flasques et de roulements à billes insérés à chaud sur l'arbre. Les flasques, moulés en fonte, sont fixés sur le carter statorique grâce à des boulons ou des tiges de serrage. L'ensemble ainsi établi constitue alors la machine asynchrone à cage d'écureuil [4].

1.3 Les principaux défauts dans la machine asynchrone

Si l'on élimine les pannes dues à des causes intrinsèques, c'est-à-dire, résultant d'une mauvaise conception, d'une mauvaise fabrication ou d'un mauvais montage du moteur, les défaillances usuelles d'une machine asynchrone sont les suivantes [5] :

1.3.1 Défauts statoriques :

- Court circuit entre phases statoriques ou entre spires d'une même phase.
- Ouverture d'une phase.
- Défaut du circuit magnétique (ruptures de tôles).

1.3.2 Défauts rotoriques :

- Rupture de barres ou d'anneaux de court-circuit.
- Défaut du circuit magnétique (ruptures de tôles).
- Défaut de roulements.
- Excentricité statique et/ou dynamique

Dans les machines asynchrones à cage, les défaillances qui peuvent atteindre le rotor sont considérées comme plus variées et plus complexes que celles affectant le stator. Ceci est particulièrement vérifié pour les machines de faible et moyenne puissances.

Plusieurs facteurs manifestent l'apparition des défaillances au niveau du rotor de la machine asynchrone, parmi eux on cite [5]:

- Thermique (surcharge,).
- Electromagnétique (force en $B^2(t)$).
- Dynamique (arbre de transmission,).

Les défauts qui sont les plus répétitifs, localisés au niveau du rotor sont : l'excentricité statique et dynamique, la rupture de barres rotoriques et la rupture d'une portion d'anneau de court-circuit.

1.3.2.1 Excentricité

Par conception, l'entrefer d'une machine asynchrone est considérablement plus petit que dans d'autres types de machines ayant les mêmes grandeurs et performances, la machine

Chap1 : Etat de l'art sur le diagnostic de défauts de la machine asynchrone

asynchrone sera la plus sensible aux excentricités. En outre, Lors du fonctionnement de la machine, deux causes principales aggraveront l'excentricité [6, 7] :

- ❖ La première est inhérente à la chaîne cinématique dans laquelle la machine intervient et qui peut imposer une force radiale sur l'arbre de cette machine, qui va engendrer une usure des roulements et une amplification du décentrement.
- ❖ Le deuxième phénomène risquant d'aggraver l'excentricité est quant à lui inhérent au fonctionnement de la machine, en effet, le décentrement génère un déséquilibre dans la distribution des efforts radiaux entre le stator et le rotor. L'effort radial est maximal à l'endroit où se situe l'épaisseur minimale de l'entrefer et va tendre à diminuer encore plus la valeur de l'entrefer minimum et augmenter par conséquent encore plus le déséquilibre des efforts radiaux. Le point extrême de l'excentricité est le frottement du stator sur le rotor, qui est synonyme de destruction rapide de la machine.

Trois catégories d'excentricité sont généralement distinguées, [6] :

- ❖ ***L'excentricité statique*** : généralement due à un désalignement de l'axe de rotation du rotor par rapport à l'axe du stator. Elle résulte d'un défaut de centrage des flasques et se manifeste même dans des machines fabriquées récemment en raison des méthodes de fabrication et d'assemblage (figure 1.2.b).
- ❖ ***L'excentricité dynamique*** : ce type d'excentricité est causé par une déformation du cylindre rotorique, une déformation du cylindre statorique ou la détérioration des roulements à billes. Elle correspond au décalage du centre de rotation du rotor par rapport au centre géométrique du stator, avec en plus, une rotation du centre du rotor autour du centre géométrique de ce stator (voir figure 1.2.c).
- ❖ ***L'excentricité mixte*** : en réalité, les excentricités statiques et dynamiques ont tendance à coexister. Un niveau inhérent d'excentricité statique existe toujours, même dans des machines de fabrication récentes. Cela provoque des efforts réguliers d'attraction magnétiques non compensés dans une seule direction, et avec le temps cela peut conduire à la flexion d'un arbre et la dégradation de roulement , tout cela entamant une excentricité dynamique. Sans détection précoce, l'excentricité devient suffisamment grande pour développer des forces radiales déséquilibrées qui peuvent créer un frottement entre le stator et le rotor, ce qui mène à une panne très grave de la machine [6].

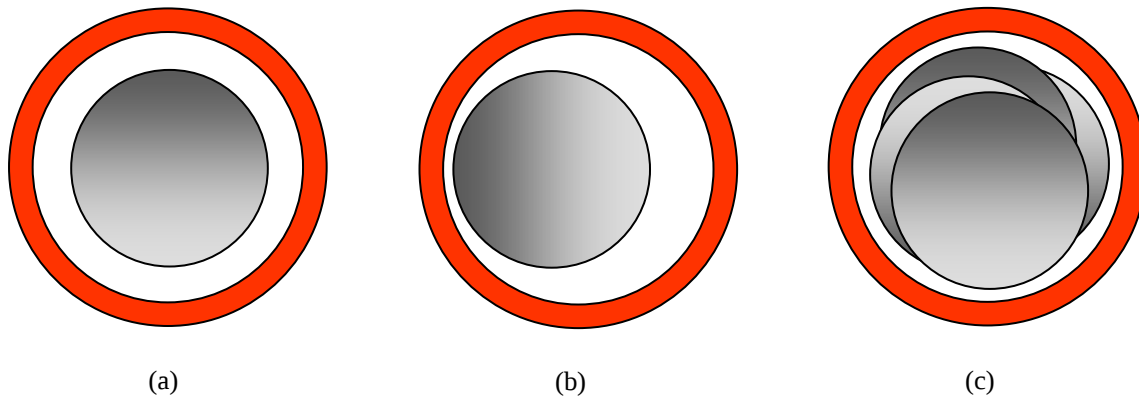


Figure 1.2.Types d'excentricité : (a) rotor concentré; (b) excentricité statique; (c) excentricité dynamique [6]

Ce défaut modifie les comportements magnétique et mécanique de la machine. En effet, l'augmentation de l'excentricité dans l'entrefer induit une augmentation des forces électromagnétiques qui agissent directement sur l'armature statorique ainsi que l'enroulement correspondant, ce qui engendre une dégradation de son isolation. D'autre part, cette augmentation peut avoir comme conséquence des frottements entre le stator et le rotor en raison des forces d'attraction magnétique qui déséquilibrent le système. Ceci donne naissance à des niveaux de vibration considérables dans les enroulements [7, 8].

1.3.2.2 Rupture de barres et d'anneau de court-circuit

Pour une machine asynchrone à cage d'écureuil, les défauts se résument à la rupture de barres ou à la rupture d'anneaux de court-circuit. La cassure ou rupture de barre est un des défauts les plus fréquents au rotor. Elle peut se situer soit au niveau de son encoche soit à l'extrémité qui la relie à l'anneau de court-circuit. Les ruptures de barres ou de portions d'anneau peuvent être dues, par exemple, à une surcharge mécanique (démarrages fréquents, etc.), à un échauffement local excessif ou encore à un défaut de fabrication (bulles d'air ou mauvaises soudures). La détérioration des barres réduit la valeur moyenne du couple électromagnétique et augmente l'amplitude des oscillations, qui elles-mêmes provoquent des oscillations de la vitesse de rotation, ce qui engendre des vibrations mécaniques et donc, un fonctionnement anormal de la machine. La grande amplitude de ces oscillations accélère la détérioration de la machine. Ainsi, le couple diminue sensiblement avec le nombre de barres cassées induisant un effet cumulatif de la défaillance. L'effet d'une cassure de barre croît rapidement avec le nombre de barres cassées [8].

La cassure de portion d'anneau est un défaut qui apparaît aussi fréquemment que la cassure de barres dans une machine asynchrone à cage. Ces cassures sont dues soit à des bulles de coulées ou aux dilatations différentielles entre les barres et les anneaux, d'autant que les portions

d'anneaux de court-circuit véhiculent des courants plus importants que ceux des barres rotoriques. Il convient de mentionner, qu'un mauvais dimensionnement des anneaux, conduit à une détérioration des conditions de fonctionnement ou une surcharge de couple et, donc, à des courants pouvant entraîner leur cassure [8]. La cassure d'une portion d'anneau déséquilibre la répartition des courants dans les barres rotoriques et de ce fait, engendre un effet de modulation d'amplitude sur les courants statoriques similaire à celui provoqué par la cassure de barres [10].

1.4 Méthodes de diagnostic de défauts

1.4.1 Aspect modélisation

La modélisation et la simulation des machines constituent une étape primordiale en matière de diagnostic. Elles permettent la compréhension du fonctionnement défectueux, la vérification sur prototype virtuel de l'efficacité des algorithmes de détection de défauts et elles apportent également la possibilité des bases de données sur les manifestations électriques et magnétiques de ces défauts.

Plusieurs voies de modélisation existent, elles sont actuellement utilisées pour examiner des problèmes tels que la commande, la conception ou la surveillance. En ce qui nous concerne, nous nous intéressons aux modèles simulant le comportement électromagnétique de la machine asynchrone en vue de diagnostic. Parmi les approches de modélisation, nous citons :

➤ Approche analytique

Cette approche est la plus simple et la plus employée. Elle est basée sur la modélisation de moteur sous forme de circuits équivalents. Cette approche permet d'établir un schéma électrique équivalent de la machine et par conséquent de trouver les équations différentielles décrivant le fonctionnement de la machine. Dans ce cadre, plusieurs modèles mathématiques ont été développés avec degrés de complexités différents, depuis les modèles triphasés au stator et au rotor jusqu'aux modèles triphasés au stator et multiphasés au rotor.

➤ Méthode des schémas magnétiques équivalents

Cette approche consiste à découper le circuit magnétique qui constitue la machine étudiée en tubes de flux, caractérisés chacun par sa réluctance ou sa perméance. Ces grandeurs, tout comme les inductances, peuvent être définies selon les valeurs de flux, prenant ainsi en considération la saturation magnétique. Le mouvement de rotation de la machine est pris en compte par l'intermédiaire de perméance d'entrefer variable selon la position du rotor. Les circuits électriques statoriques et rotoriques sont considérés grâce aux équations de couplage électrique/magnétique. Au rotor, les n phases sont constituées par les mailles électriques limitées

Chap1 : Etat de l'art sur le diagnostic de défauts de la machine asynchrone

par deux barres successives. Ce couplage est concrétisé au niveau de la mise en équation par le choix des inconnues du système qui seront simultanément les flux dans les différentes mailles du réseau magnétique ainsi que les courants statoriques et rotoriques. Pour la résolution des équations, un problème de non linéarité s'impose et nécessite l'utilisation d'une méthode itérative en pas à pas dans le temps [10].

♦ Méthodes des éléments finis

Il s'agit cette fois de découper le circuit magnétique de la machine en éléments de dimension suffisamment faible pour que le matériau magnétique puisse être considéré comme linéaire sur les surfaces correspondantes. A partir des formes locales des équations de Maxwell, il est possible d'exprimer le problème à résoudre. La résolution analytique est complexe et ne permet de traiter la saturation que de façon approchée. Les progrès des calculateurs ont permis d'envisager leur résolution numérique. De nombreux outils logiciels leur sont dédiés. Citons, entre autres, FLUX 2D, FLUX 3D et MAXWELL. Cependant, ces logiciels, ont historiquement été conçus pour déterminer le champ électromagnétique, et dans l'objectif de l'optimisation du dimensionnement [10].

1.4.2 Méthodes externes

1.4.2.1 Méthodes basées sur l'analyse spectrale

Pour effectuer le diagnostic d'une installation industrielle, les opérateurs de la maintenance analysent un certain nombre de signaux issus de la machine. En effet, l'évolution temporelle et le contenu spectral de ces signaux, peuvent être exploités pour détecter et localiser les anomalies qui affectent le bon fonctionnement de cette installation. D'après la littérature, les principales techniques du diagnostic utilisées sont les suivantes :

1.4.2.2 Diagnostic par mesure des vibrations mécaniques

Le diagnostic des défauts en utilisant les vibrations mécaniques est la méthode la plus utilisée dans la pratique. Les forces radiales, créées par le champ d'entrefer, provoquent des vibrations dans la machine asynchrone. Ces forces sont proportionnelles au carré de l'induction magnétique [11].

$$\sigma(\theta, t) = \frac{B_s^2(\theta, t)}{2\mu_0} \quad (1.1)$$

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

$$B_s = F_m \cdot P \quad (1.2)$$

Les vibrations de la machine peuvent être captés par des accéléromètres. Les spectres des signaux de vibration, issus du moteur avec défaut, sont comparés avec ceux enregistrés lorsque le moteur est en bon état. Puisque la force magnéto motrice contient les effets des asymétries du stator ou du rotor et la perméance dépend de la variation de l'entrefer (à cause des ouvertures des encoches statoriques et rotoriques, l'excentricité), ceci permet la détection aussi bien des défauts électriques que mécaniques.

1.4.2.3 Diagnostic par mesure du flux magnétique axial de fuite

Dans la machine idéale et sans défauts, les courants et les tensions statoriques sont équilibrés, ce qui annule le flux de fuite axial. La présence d'un défaut quelconque, provoque un déséquilibre électrique et magnétique au niveau du stator ce qui donne naissance à des flux de fuite axial de valeurs dépendantes du degré de sévérité du défaut. Si on place une bobine autour de l'arbre de la machine, elle sera le siège d'une force électromotrice induite. Le contenu spectral de la tension induite dans cette bobine, peut être exploité pour détecter les différents défauts [11].

1.4.2.4 Diagnostic par l'analyse des tensions statoriques induites

Cette technique est basée sur l'exploitation du contenu fréquentielle de la tension induite par le flux rotorique dans les enroulements statoriques, pendant la déconnexion du moteur de réseau. La rupture d'une barre va affecter directement la tension induite dans les enroulements statoriques. En utilisant cette approche, les effets de non idéalité de la source (déséquilibres et présence des harmoniques) ainsi que la non linéarité des caractéristiques magnétiques de la machine peuvent être évités [11].

1.4.2.5 Diagnostic par mesure du couple électromagnétique

Le couple électromagnétique développé dans les machines électriques, provient de l'interaction entre le champ statorique et celui rotorique. Par conséquent, tout défaut, soit au niveau du stator ou au rotor, affecte directement le couple électromagnétique. L'analyse spectrale du signal du couple (mesuré ou estimé), donne des informations sur l'état de santé du moteur [11].

1.4.2.6 Diagnostic par mesure de la puissance instantanée

La puissance instantanée est la somme des produits des courants et des tensions dans les trois phases statoriques. Donc, le niveau d'informations apportées par cette grandeur, est plus grand que celui apportées par le courant d'une seule phase. Ceci présente l'avantage de cette méthode par rapport aux autres [11].

1.4.2.7 Diagnostic par mesure du courant statorique

Parmi tout les signaux utilisables, le courant statorique s'est avéré être l'un des plus intéressants, car il est très facile d'accès et nous permet de détecter aussi bien les défauts électriques que les défauts purement mécaniques. Cette technique est dénommée dans littérature "Motor Current Signature Analysis" (MCSA) [6,10].

Les défauts de la machine asynchrone se traduisent dans le spectre du courant statorique soit par :

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

La surveillance via le courant statorique nécessite une bonne connaissance des défauts et leurs signatures.

1.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons passé en revue les constituants de la machine asynchrone. Aussi il constitue un prétexte à la présentation des notions très importantes en diagnostic, tels que les défauts qui peuvent affecter la machine asynchrone, leurs causes, leurs origines ainsi que leurs signatures. Enfin nous avons présentés diverses techniques de diagnostic utilisées dans la littérature, en particulier celle appelée MCSA, technique que nous allons appliquer pour la détection et le diagnostic des défauts rotoriques.

Chapitre 2
Modèle réduit issu du modèle
Multi enroulements

2.1 Introduction

La littérature mentionne que le modèle triphasé-triphasé ne permet pas de connaître les valeurs réelles des courants circulants dans les barres rotoriques, de plus, il ne permet surtout pas, de prendre en compte les défauts rotoriques, à cause de son manque de fidélité, le modèle multi enroulements plus performant a été développé pour combler ces lacunes.

Dans ce modèle, le rotor est représenté comme étant constitué d'autant de phases que de barreaux ce qui conduit à considérer les courants circulant dans les portions d'anneau de court circuit comme des courants de phase rotorique, figure 2.1.

Le modèle mis au point, à base de modèles analytiques d'une procédure de diagnostic pour les machines asynchrones, exige la synthèse d'un modèle décrivant complètement la machine d'une façon plus exacte et plus fine en intégrant certains paramètres de la machine et non pas d'une façon moyenne comme pour la commande. Car les modèles simples (dq), négligeant un certain nombre de phénomènes, sont fréquemment affectés par les transformations et le changement d'axe. Par conséquent, il a fallu s'orienter vers le modèle multi enroulement pour une description adaptée aux défauts.

Visant cet objectif, le modèle multi enroulements a été choisi. Le modèle développé est basé sur un circuit maillé représentant la cage rotorique. Il permet la représentation des ruptures de barres ainsi que leur simulation. Aussi il permet de restituer les phénomènes physiques dus à ces défauts. Partant de ce concept et pour pouvoir se concentrer sur la simulation des ruptures de barres, le rotor a été modélisé par des mailles reliées entre elles électriquement et couplées magnétiquement, où une maille est constituée de deux barres et de deux portions d'anneaux qui les relie comme représenté à la figure 2.1.

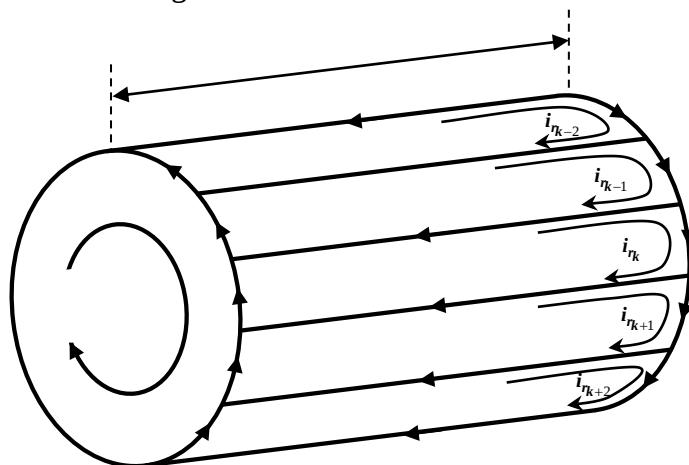


Figure 2.1 Schéma du rotor représenté par des mailles électriques

Chap 2 : modélé réduit issu du modèle multi enroulement

Le modèle multi enroulements ainsi que toutes les équations qui le régissent a été étudié par [5, 10] et beaucoup d'autres. Nous allons donner uniquement le résultat sur les inductances

2.2 Calcul des inductances

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

Tableau 2.1 : Inductances de la machine asynchrone à cage

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.	$M_{rk(k-1)} = M_{rk(k+1)} = M_{rr} - L_{rp}$
L'inductance mutuelle entre une maille rotorique et une phase statorique "a".	$M_{snrk} = -M_{sr} \cos\left(p\theta_r - n\frac{2\pi}{3} + ka\right)$ Avec $M_{sr} = \frac{4\mu_0 N_s R \ell}{e p^2 \pi} \sin\left(\frac{a}{2}\right)$

2.3 Modèle réduit équivalent de la machine

2.3.1 Introduction

Aussi performant qu'il soit le modèle multi enroulement de dimension $N_r + 4$ se trouve confronté au problème de temps de calcul, certes ce dernier est très inférieur à celui alloué au modèle à base d'éléments finis mais il demeure assez long devant les modèles réduits.

Donc le modèle réduit qu'on va proposer doit provenir du modèle multi enroulements lui-même et doit pouvoir simuler le moteur sain et avec défaut en tenant compte des ruptures de barres.

C'est dans ce contexte que le modèle dq équivalent a été développé en considérant la cage rotorique avec toutes ses barres.

2.3.2. 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-phasées "multi enroulements" à une modélisation diphasée équivalente, et elle est écrite de la façon suivante :

$$T_{3N_r}(\theta) = \frac{2}{N_r} \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & \cdots & \frac{1}{2} & \cdots & \frac{1}{2} \\ \cos(\theta) & \cdots & \cos(\theta - kp \frac{2\pi}{N_r}) & \cdots & \cos(\theta - (N_r - 1)p \frac{2\pi}{N_r}) \\ -\sin(\theta) & \cdots & -\sin(\theta - kp \frac{2\pi}{N_r}) & \cdots & -\sin(\theta - (N_r - 1)p \frac{2\pi}{N_r}) \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

ainsi que son inverse :

$$T_{3N_r}(\theta)^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & \cdots & \cos(\theta) & \cdots & -\sin(\theta) \\ 1 & \cdots & \cos(\theta - kp \frac{2\pi}{N_r}) & \cdots & -\sin(\theta - kp \frac{2\pi}{N_r}) \\ 1 & \cdots & \cos(\theta - (N_r - 1)p \frac{2\pi}{N_r}) & \cdots & -\sin(\theta - (N_r - 1)p \frac{2\pi}{N_r}) \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

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

$$[X_{odqs}] = [T_{33}(\theta_{dq})] \cdot [X_{abcs}] \Rightarrow [X_{abcs}] = [T_{33}(\theta_{dq})]^{-1} \cdot [X_{odqs}] \quad (2.3)$$

$$[X_{odqr}] = [T_{3N_r}(\theta)] \cdot [X_{kr}] \Rightarrow [X_{kr}] = [T_{3N_r}(\theta)]^{-1} \cdot [X_{odqr}] \quad (2.4)$$

Nous nous sommes contentés de présenter directement le modèle réduit à partir de la référence [10].

2.3.3 Modèle réduit

L'application des transformations (2.3) et (2.4) permettent d'aboutir à un modèle de taille réduite pour la machine asynchrone qui se résume à :

$$\begin{bmatrix} v_{ds} \\ v_{qs} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = [R_{Rtr}] \cdot \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} + [L_{Ltr}] \cdot \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

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 :

$$[R_{Rtr}] = \begin{bmatrix} R_s & -\omega_r L_{sc} & 0 & -\omega_r M_{sr} \frac{N_r}{2} \\ \omega_r L_{sc} & R_s & \omega_r M_{sr} \frac{N_r}{2} & 0 \\ 0 & 0 & R_{rdd} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_{rqq} \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

$$[L_{Ltr}] = \begin{bmatrix} L_{sc} & 0 & -M_{sr} \cdot \frac{N_r}{2} & 0 \\ 0 & L_{sc} & 0 & -M_{sr} \cdot \frac{N_r}{2} \\ -\frac{3}{2} M_{sr} & 0 & L_{rdq} & 0 \\ 0 & -\frac{3}{2} M_{sr} & 0 & L_{rdq} \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

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

$$\begin{cases} R_{rdd} = R_{rqq} = 2R_b (1 - \cos \alpha) + 2 \frac{R_e}{N_r} \\ L_{rdq} = L_{rp} - M_{rr} + 2L_b (1 - \cos \alpha) + 2 \frac{L_e}{N_r} \end{cases} \quad (2.8)$$

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

$$[R_{rfdq}] = [T_{2N_r}(\theta)] ([R_r] + [R_{rf}]) [T_{2N_r}(\theta)]^{-1} \quad (2.9)$$

où la matrice $[R_{rfdq}]$ concerne les termes des barres en défaut.

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

$$[R_{rfdq}] = \begin{bmatrix} R_{r11} & R_{r12} \\ R_{r21} & R_{r22} \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

où les quatre termes de cette matrice sont :

$$\begin{aligned}
 R_{r11} &= R_{rdd} + R_{11df} \\
 R_{r12} &= 0 + R_{12df} \\
 R_{r21} &= 0 + R_{21df} \\
 R_{r22} &= R_{rqq} + R_{22df}
 \end{aligned}
 \tag{2.11}$$

avec :

$$\begin{aligned}
 R_{11df} &= \frac{2}{N_r} (1 - \cos a) \cdot \sum_{k'}^{nk'} R_{bk'f} (1 - \cos(2k' + 1)a) \\
 R_{12df} &= -\frac{2}{N_r} (1 - \cos a) \cdot \sum_{k'}^{nk'} R_{bk'f} \sin(2k' + 1)a \\
 R_{21df} &= -\frac{2}{N_r} (1 - \cos a) \cdot \sum_{k'}^{nk'} R_{bk'f} \sin(2k' + 1)a \\
 R_{22df} &= \frac{2}{N_r} (1 - \cos a) \cdot \sum_{k'}^{nk'} R_{bk'f} (1 + \cos(2k' + 1)a)
 \end{aligned}
 \tag{2.12}$$

Dans ces expressions, l'indice k' caractérise une barre cassée, la sommation concerne donc toutes les barres qui présentent un défaut [5].

Ainsi, pour le modèle diphasé général il suffit de remplacer la matrice $[R_{rdq}]$ dans lamatrice (2.6) par la matrice $[R_{rfdq}]$.

Le schéma de simulation est représenté à la figure 2.2.

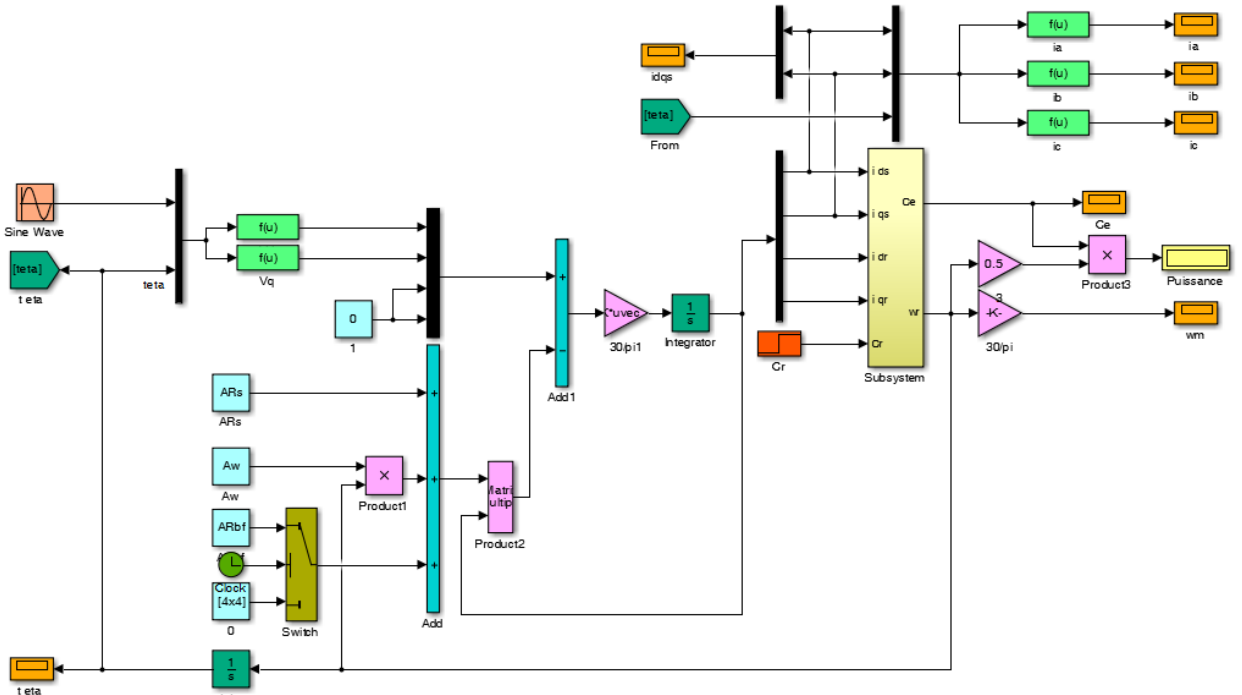


Figure 2.2 Schéma de simulation

2.4 Simulation du modèle réduit issu du modèle multi enroulements

Dans la littérature, le modèle réduit classique donne des résultats satisfaisants lorsque le

moteur est à l'état sain, par contre lors de défauts ses résultats sont loin de la réalité et peuvent induire en erreur [5].

2.4.1 État sain

Avec le modèle réduit issu du modèle multi enroulements, la simulation sur Matlab/Simulink en premier lieu est faite pour l'état sain avec un démarrage à vide puis instauration d'une charge nominale à l'instant 07 s. Les résultats collectés à partir de Workspace sont présentés aux figures 2.3 à 2.5.

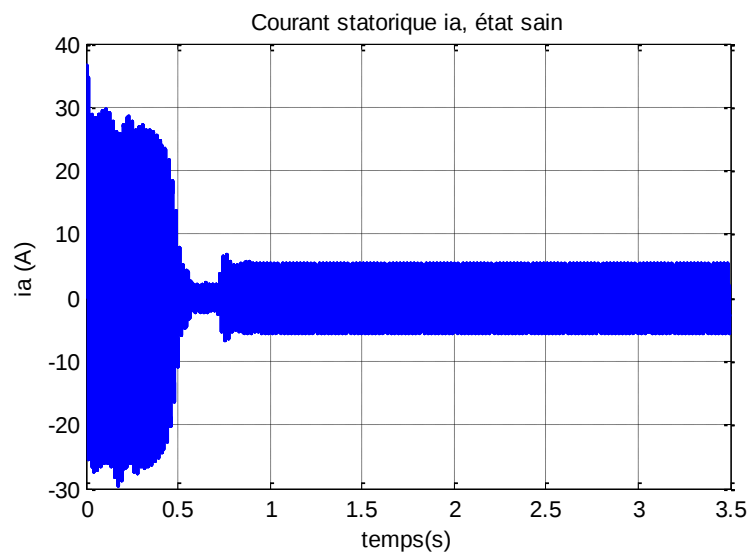


Figure 2.3 Courant statorique, état sain

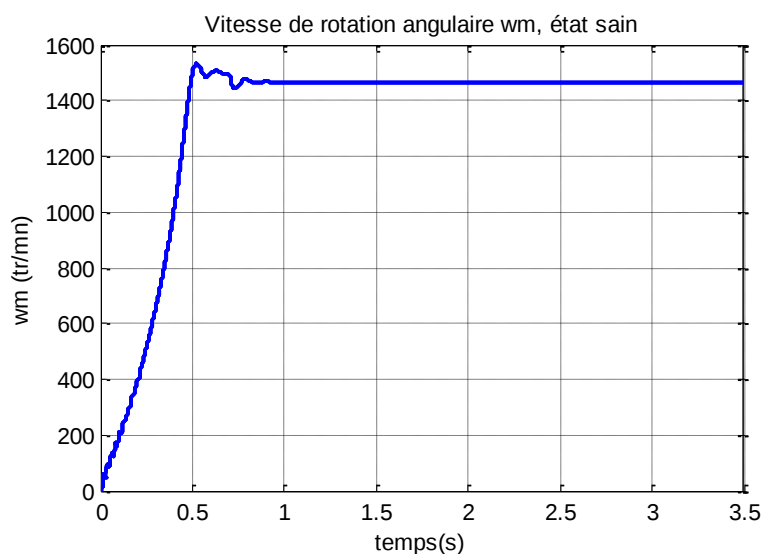


Figure 2.4 Vitesse de rotation angulaire, état sain

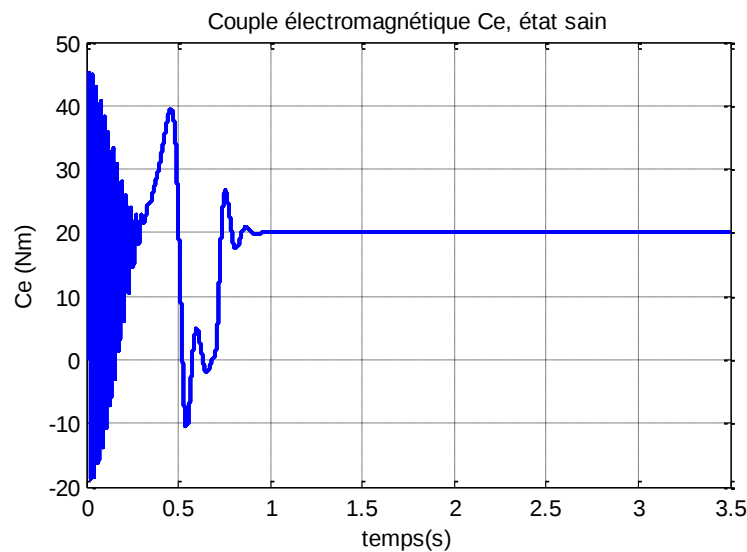


Figure 2.5 Couple électromagnétique, état sain

Les résultats obtenus grâce au modèle réduit issu du modèle multi enroulements sont semblables à ceux de la littérature, ils sont donc satisfaisants.

2.4.2 État de défaut de cassure de barres

La rupture de barre, comme le mentionne la littérature est obtenue en augmentant la résistance des barres concernées par le défaut. La simulation est réalisée en démarrant le moteur à vide puis dès que le régime transitoire est légèrement dépassé (0.5 s) on instaure une faible charge de 5 Nm. Le moteur reste sain, cependant à un instant quelconque par exemple à 3.7 s on introduit le défaut de cassure de barre grâce à la souplesse du programme qui permet cette manœuvre. De plus de cette façon, les signaux qui seront obtenus posséderont ensemble les deux états : une première partie qui est l'état sain suivie à 3.7 s par la seconde qui concerne l'état de défaut. Aussi les résultats sont présentés aux figures 2.6 à 2.8.

La même procédure a été adoptée pour les autres cas de charges à savoir la mi-charge (10 Nm) et la charge nominale (20 Nm). Les résultats sont visualisés aux figures 2.9 à 2.11 pour les moyennes charges et aux figures 2.12 à 2.14 pour les fortes charges.

2.4.3 État de défaut, faible charge

La charge étant faible, la figure 2.6 qui représente le courant statorique ne montre aucun changement à vue d'œil, mais avec le zoom, on peut voir qu'à partir de 3.7 s qu'il y a une légère

variation. Par contre le graphe de la vitesse angulaire de rotation présentée à la figure 2.7 laisse apparaître certaines ondulations, signe qu'il y a défaut de cassure de barres.

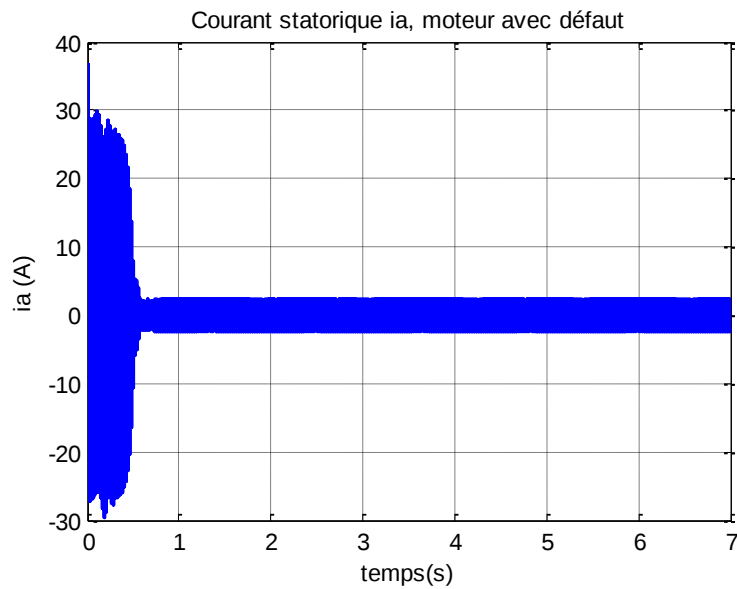


Figure 2.6 Courant statorique, état de défaut

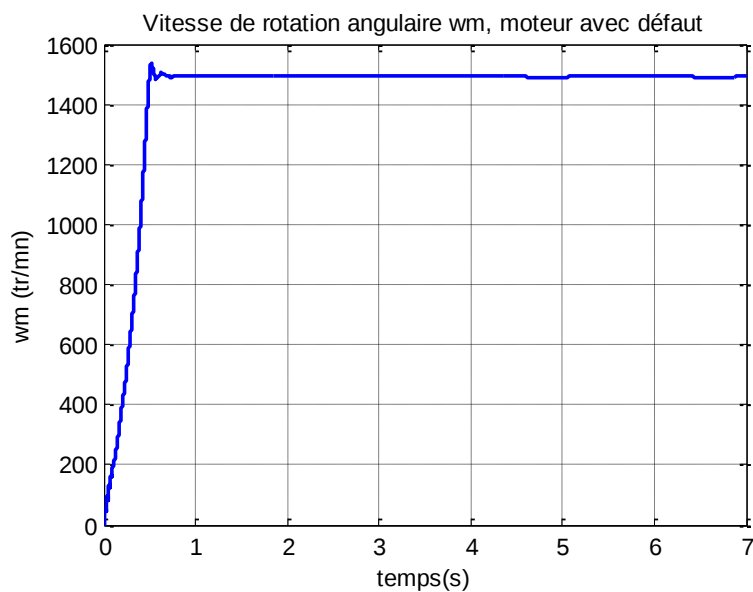


Figure 2.7 Vitesse de rotation angulaire, état de défaut

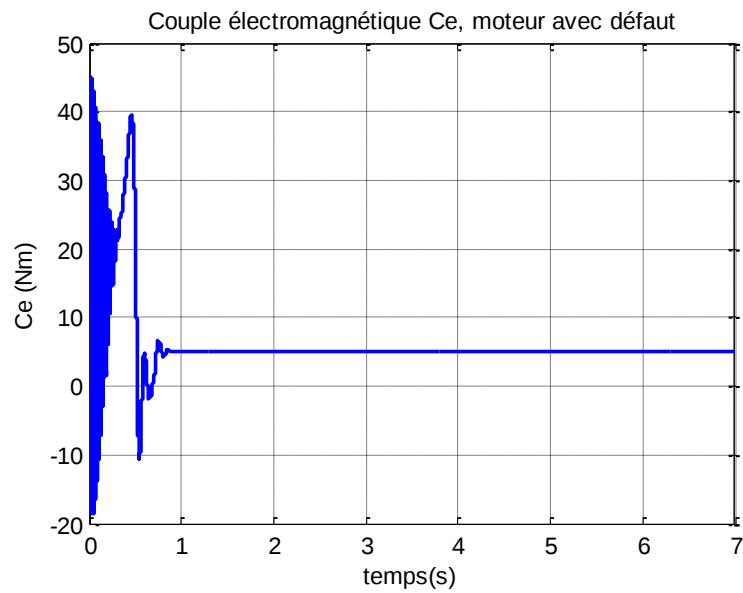


Figure 2.8 Couple électromagnétique, état de défaut

2.4.4 État de défaut, moyenne charge

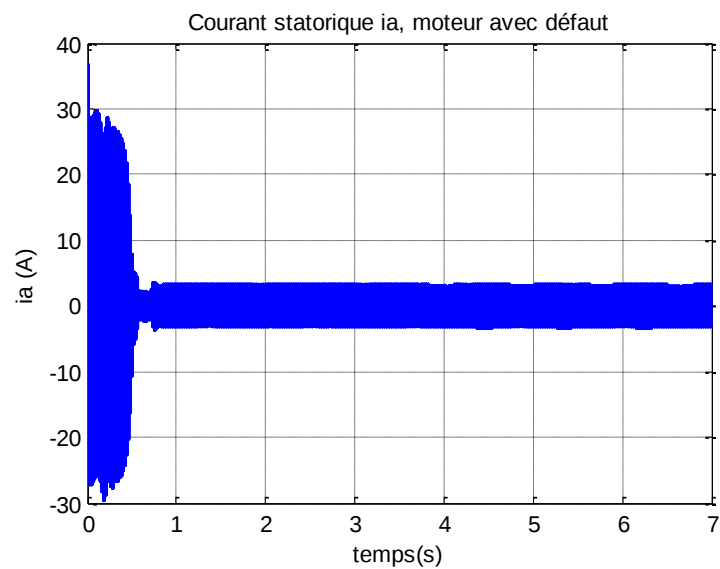


Figure 2.9 Courant statorique, état de défaut, moyenne charge

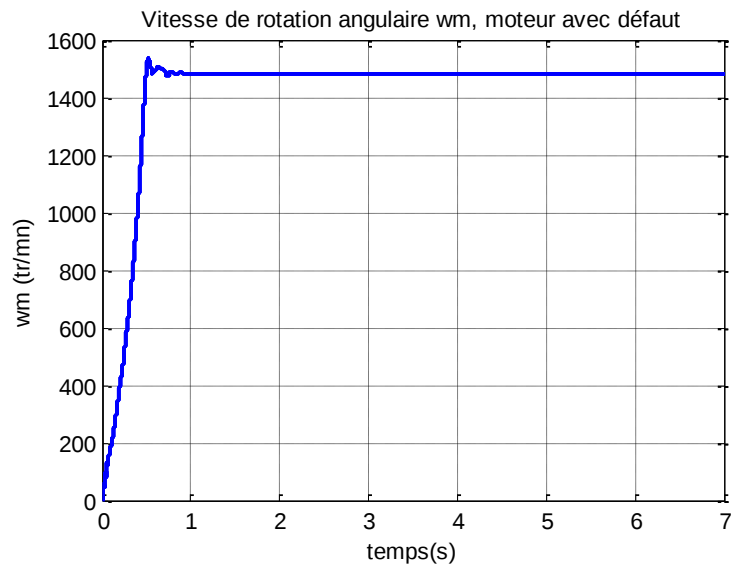


Figure 2.10 Vitesse de rotation angulaire, état de défaut, moyenne charge

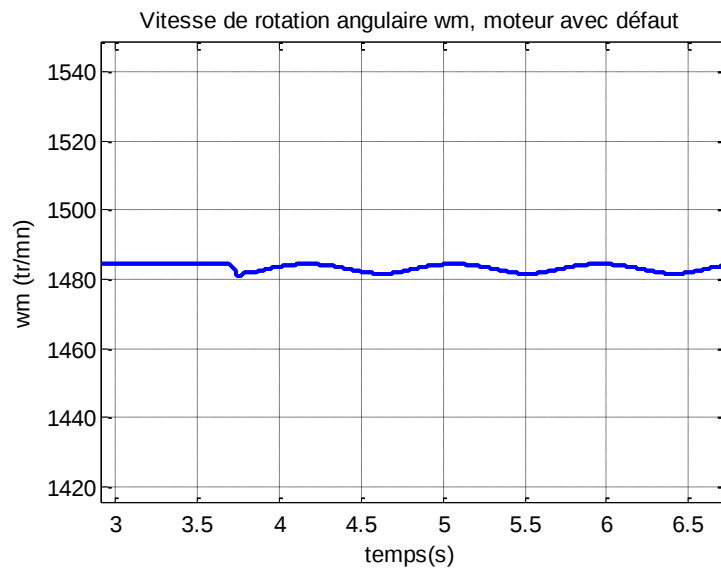


Figure 2.11 Zoom de la vitesse de rotation angulaire, état de défaut, moyenne charge

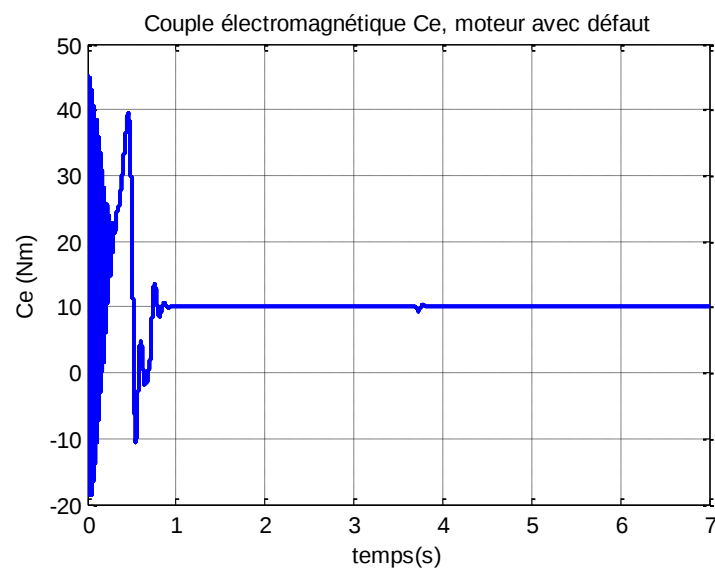


Figure 2.12 Couple électromagnétique, état de défaut, moyenne charge

La figure 2.9 montre le courant statorique pour une charge de 10 Nm. Dans cette figure, les ondulations sont bien visibles sans agrandissement et elles apparaissent à l'instant de l'instauration du défaut comme dans la littérature.

La figure 2.10 qui représente la vitesse de rotation montre très clairement les ondulations qui sont apparues juste après l'instant de l'introduction du défaut comme c'est bien visible dans le zoom de la vitesse (figure 2.11).

Par contre le graphe du couple électromagnétique (figure 2.12) visualise franchement la brusque variation du couple à l'instant de l'amorçage du défaut.

2.4.5 État de défaut, forte charge

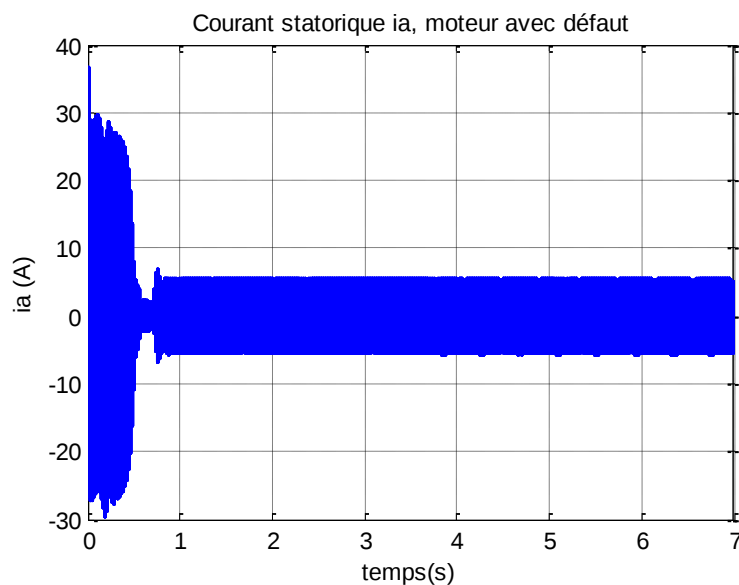


Figure 2.13 Courant statorique, état de défaut, forte charge

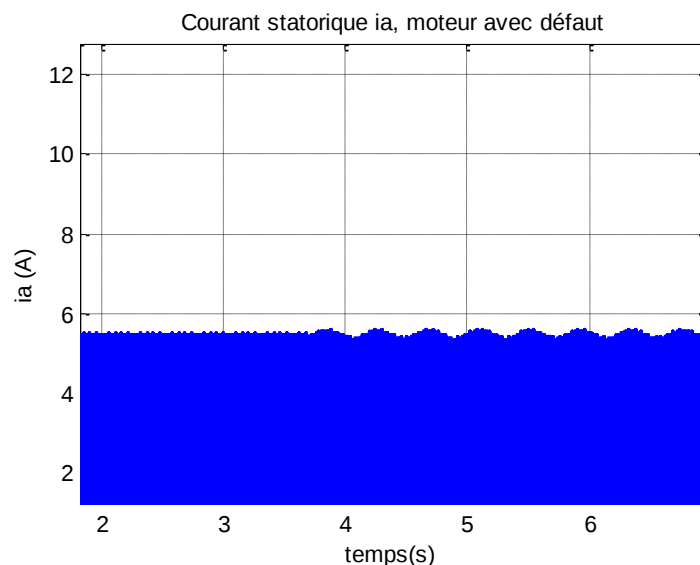


Figure 2.14 Zoom du courant statorique, état de défaut, forte charge

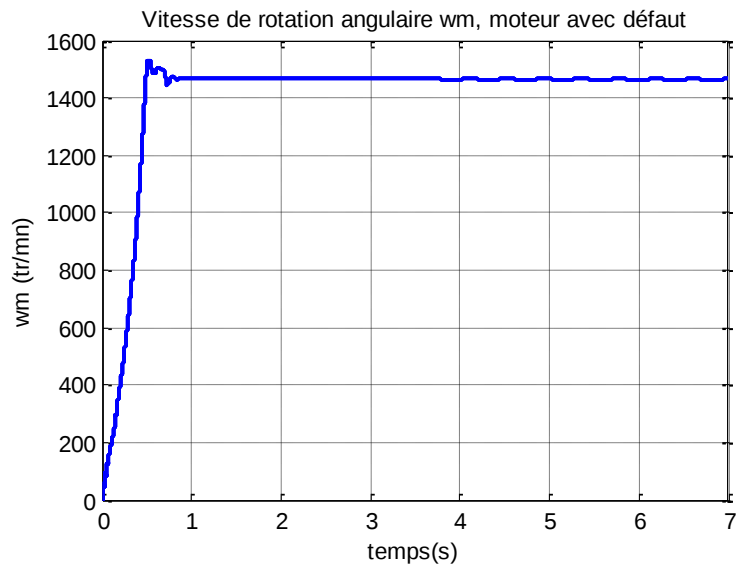


Figure 2.15 Vitesse de rotation angulaire, état de défaut, forte charge

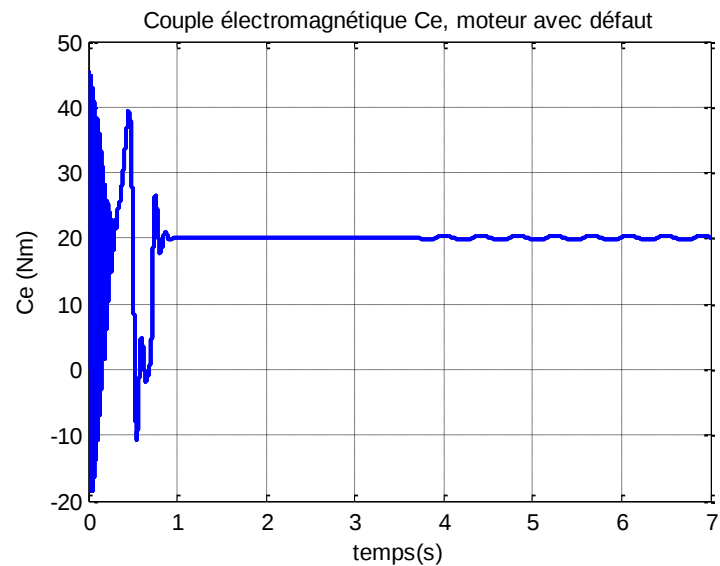


Figure 2.16 Couple électromagnétique, état de défaut, forte charge

Aussi les ondulations du courant statorique sont très évidentes dans la figure 2.13, bien mises en évidence dans le zoom de la figure 2.14, elles apparaissent juste après l'instauration du défaut de cassure de barres à l'instant 3.7 s. il en de même pour la vitesse et le couple où les ondulations de fréquence $2 \cdot g \cdot f_s$ (avec g le glissement et f_s le fondamental) oscillent autour de leur valeur moyenne. Dans ce qui précède seuls les signaux temporels ont été étudiés.

2.5 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons passé en revue de manière très brève le modèle réduit issu du modèle multi enroulements. La simulation faite sur Matlab/Simulink du modèle réduit a mis en évidence que ce modèle possède les mêmes caractéristiques du modèle dont il est issu. Les résultats prouvent son efficacité quant à sa fidélité à reproduire le comportement de la machine saine ou en défaut et ceci pour toutes les charges et dans le domaine temporel, il nous reste à appliquer la technique MCSA qui sera le sujet du prochain chapitre.

Chapitre 3

Analyse spectrale du courant statorique ou MCSA

3.1 Introduction

Dans le deuxième chapitre, les résultats de simulation ont été traités dans le domaine temporel uniquement, dans celui-ci nous allons appliquer l'analyse spectrale sur les signaux (ou MCSA) obtenus par simulation grâce à la transformation de Fourier rapide TFR ou FFT en anglais. Mentionnons que le temps de simulation est de 12s, différent de celui du chapitre précédent, car, dans le premier nous envisagions la souplesse du programme pour montrer le régime transitoire, l'instant d'application du couple de charge ou de l'instant de l'instauration du défaut mais pour faire l'analyse spectrale il faut respecter plusieurs critères pour obtenir de bons résultats avec une bonne résolution. Plus le temps de simulation est long, meilleure est la résolution. La fréquence d'échantillonnage est de 10 kHz, le temps de simulation est de 12 s dont on garde les 10 dernières secondes, ceci pour éliminer le régime transitoire car la FFT donne de bons résultats seulement pour le cas stationnaire. Les résultats de simulations auxquels nous appliquons la FFT sont présentés aux figures 3.1 à 3.24.

3.2 État sain, forte charge

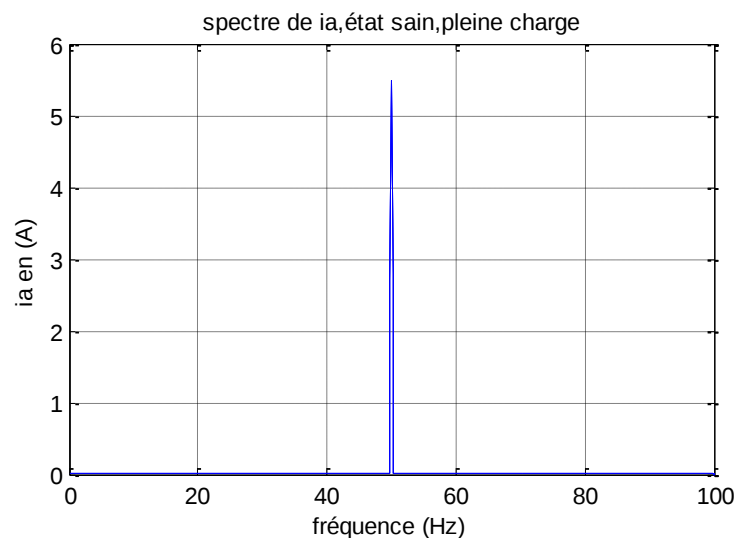


Figure 3.1 Spectre du courant statorique, état sain

L'application de la FFT au courant statorique a fourni le graphe de la figure 3.1. Dans ce dernier, hormis le fondamental à 50

Hz, on n'observe aucune harmonique supplémentaire, nous sommes dans le cas de l'état sain. Même le graphe en dB qui fait apparaître même les plus faibles harmoniques n'a rien fourni. Il en est de même pour les autres grandeurs, la vitesse (figure 3.3 et 3.4) et le couple électromagnétique (figure 3.5 et 3.6), aucune harmonique n'est observable, signe que le moteur est sain.

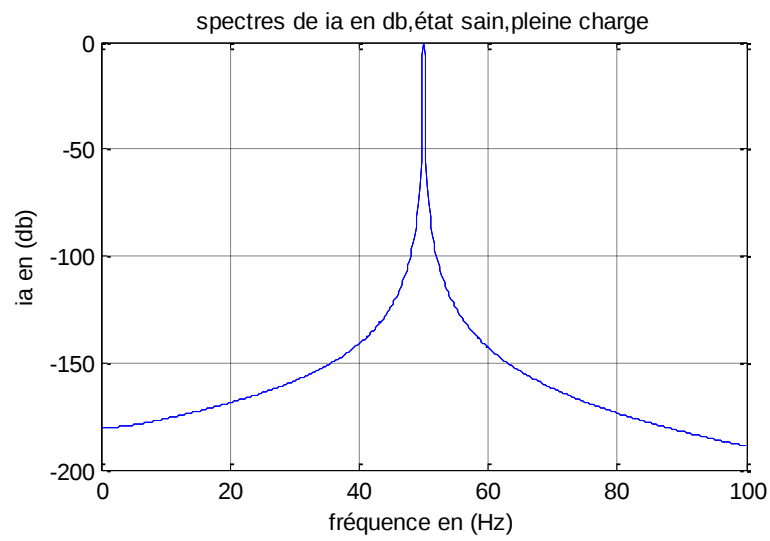


Figure 3.2 Spectre du courant statorique en dB, état sain

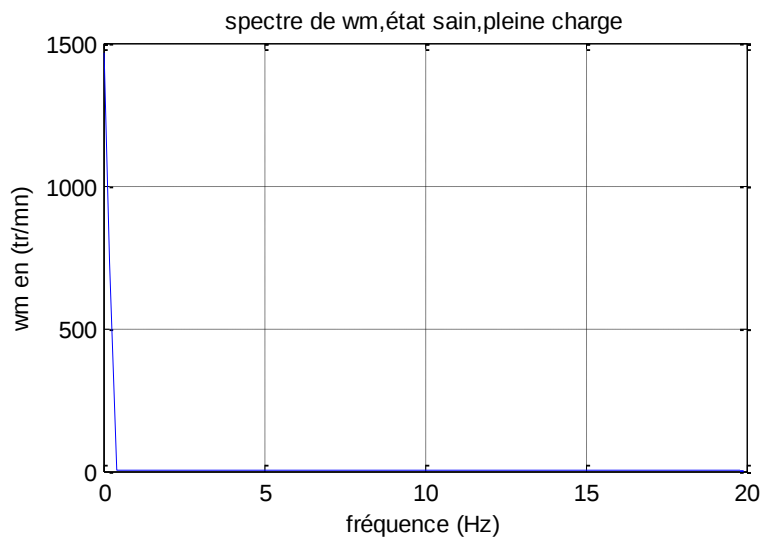


Figure 3.3 Spectre de la vitesse, état sain

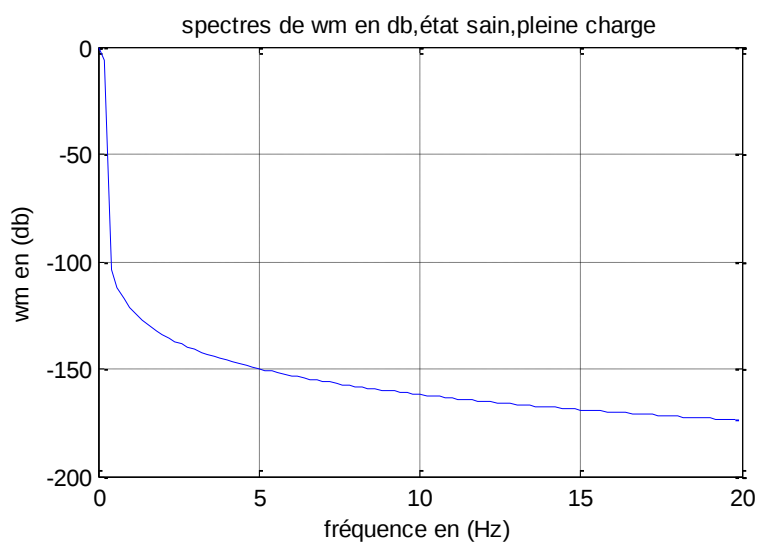


Figure 3.4 Spectre de la vitesse en dB, état sain

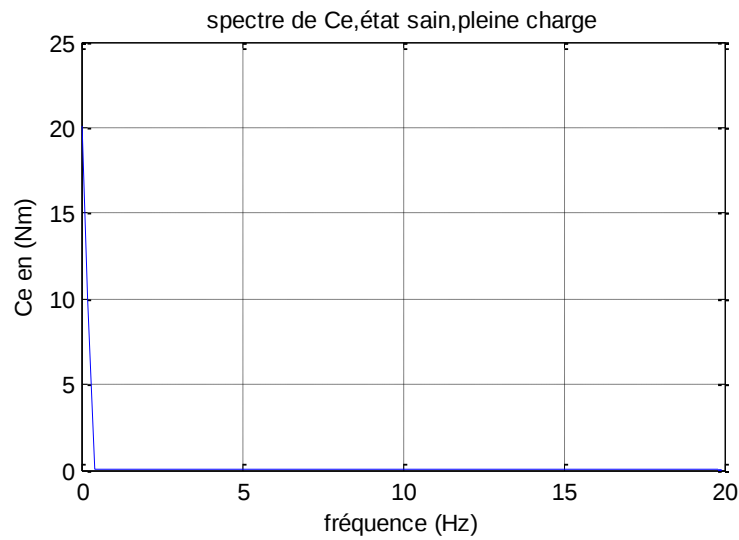


Figure 3.5 Spectre du couple électromagnétique, état sain

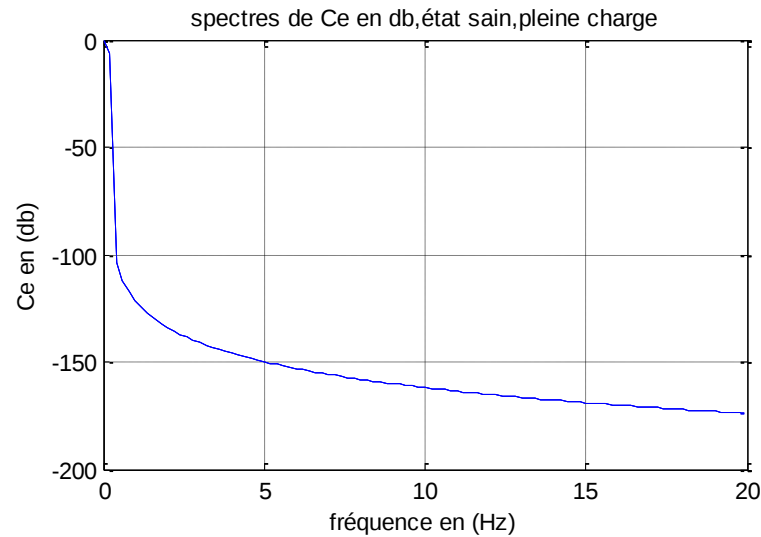


Figure 3.6 Spectre du couple électromagnétique en dB, état sain

3.3 État de défaut, faible charge

Le procédé consiste à démarrer la machine à vide jusqu'à la fin du régime transitoire, puis appliquer un faible couple de charge de 5 Nm ensuite introduire le défaut de cassure de barre de telle sorte que le temps de mesure ou d'acquisition soit suffisamment long pour permettre une bonne résolution du spectre du courant statorique et les autres grandeurs (dans notre cas le temps de mesure en régime stationnaire est de 10 s). Les résultats acquis sont montrés aux figures 3.7 à 3.12. Rappelons la formule de la signature du défaut rotorique, elle vaut :

$$f_b = (1 \pm 2k g) \cdot f_s \quad (3.1), \text{ où } k = 1, 2, \dots, g \text{ le glissement et } f_s \text{ la fréquence de l'alimentation.}$$

Chapitre 3 : modèle réduit issu du modèle multi enroulement

La figure 3.7 représente le spectre du courant statorique pour une faible charge, le graphe enlinéaire est zoomé jusqu'à l'apparition des raies signature des défauts rotoriques. Par contre la figure 3.8 fait apparaître les harmoniques de défaut aussi minimes qu'ils soient grâce au logarithme.

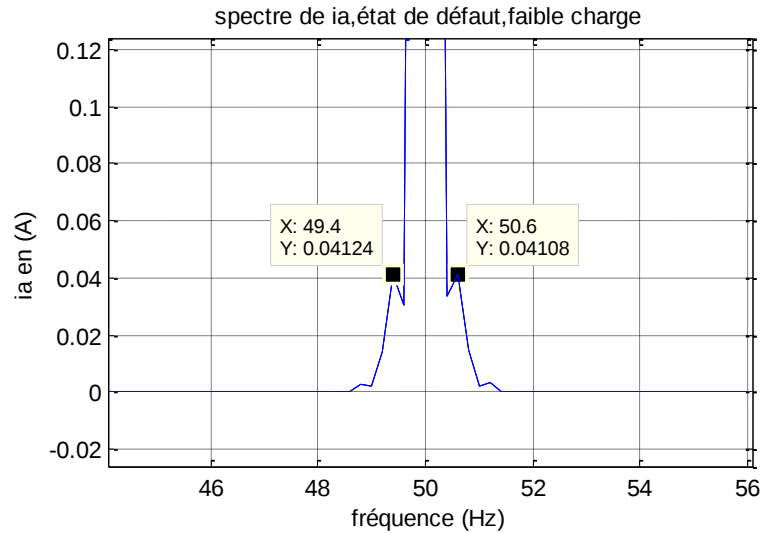


Figure 3.7 Spectre du courant statorique, état de défaut, faible charge

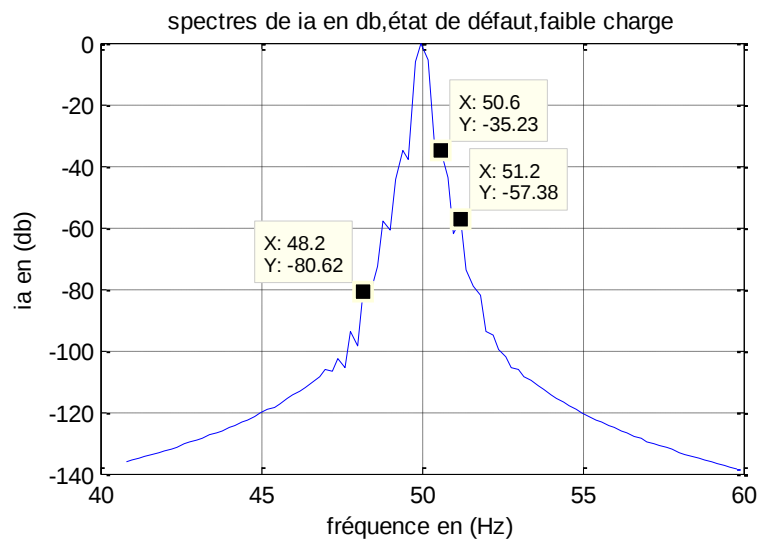


Figure 3.8 Spectre du courant statorique en dB, état de défaut, faible charge

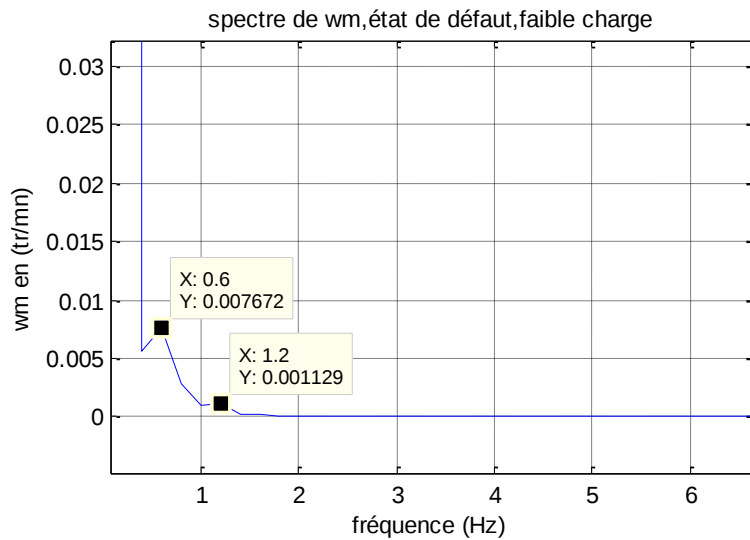


Figure 3.9 Spectre de la vitesse, état de défaut, faible charge

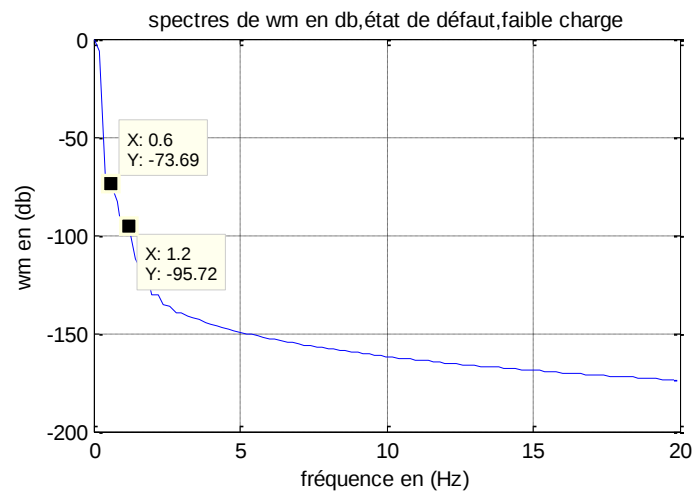


Figure 3.10 Spectre de la vitesse en dB, état de défaut, faible charge

Dans ce cas, la valeur moyenne de la vitesse est :

$$w_{moy} = 1491.5 \text{ tr / mn}, \text{ d'où le glissement est :}$$

$$g = 0.0057 \Rightarrow f_b \approx 50.06 \text{ Hz comme trouvé à la figure 3.7.}$$

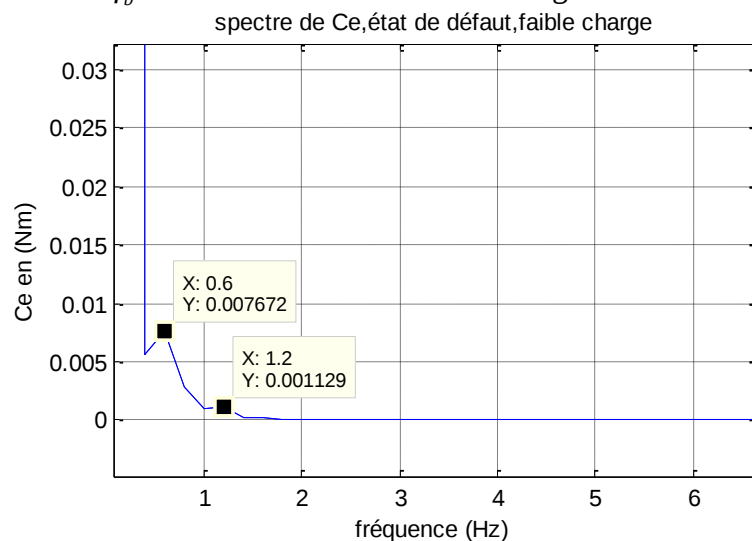


Figure 3.11 Spectre du couple électromagnétique, état de défaut, faible

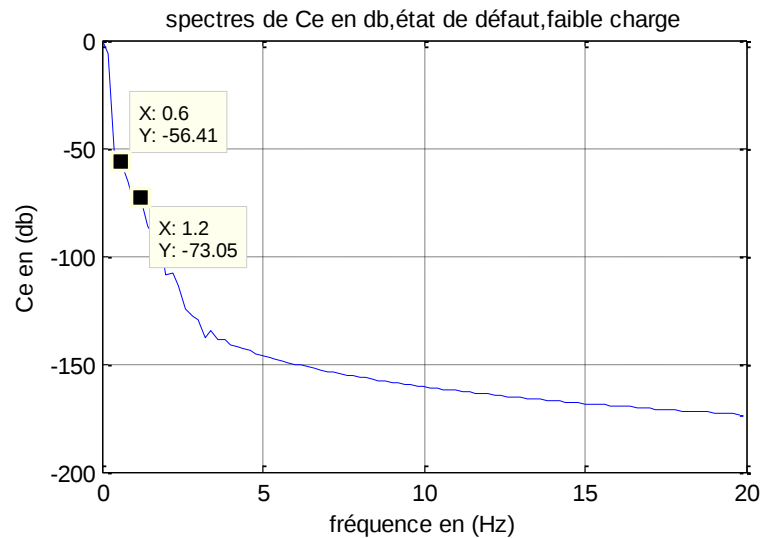


Figure 3.12 Spectre du couple électromagnétique en dB, état de défaut, faible charge

Il en est de même pour les spectres de la vitesse et du couple électromagnétique comme c'est montré aux figures 3.9 à 3.12.

3.4 État de défaut, moyenne charge

En suivant la même procédure que précédemment pour la simulation mais en augmentant la valeur du couple à 10 Nm soit la moitié de la valeur nominale. Les résultats acquis sont présentés aux figures 3.13 à 3.19.

On observe que les amplitudes des harmoniques représentant le défaut rotorique ont augmentées et que ces derniers se sont éloignés du fondamental dans le spectre du courant statorique (figure 3.13) et que beaucoup d'autres respectant la formule (3.1) sont apparus lorsque la charge a augmentée. Tandis que les harmoniques dans les spectres de la vitesse et du couple électromagnétique se sont éloignés des fréquences de leur valeur moyenne et qu'aussi d'autres se sont apparus en respectant l'expression $2g f_s$ tels qu'ils sont montrés aux figures 3.15 à 3.18.

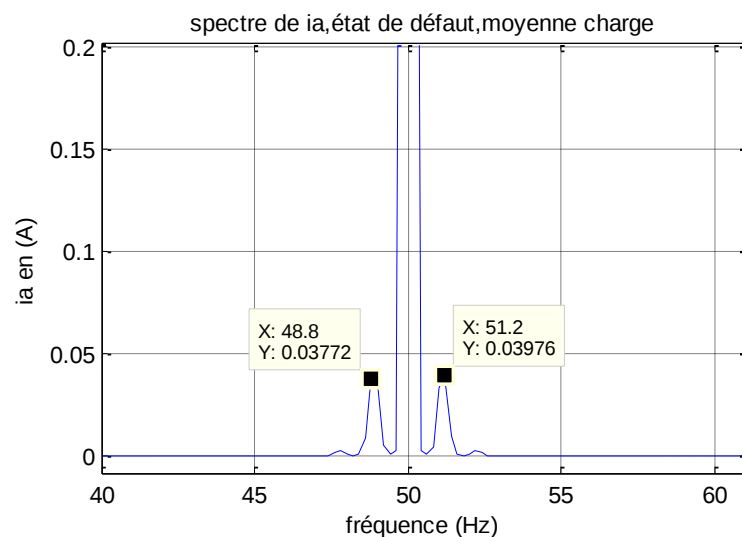


Figure 3.13 Spectre du courant statorique, état de défaut, moyenne charge

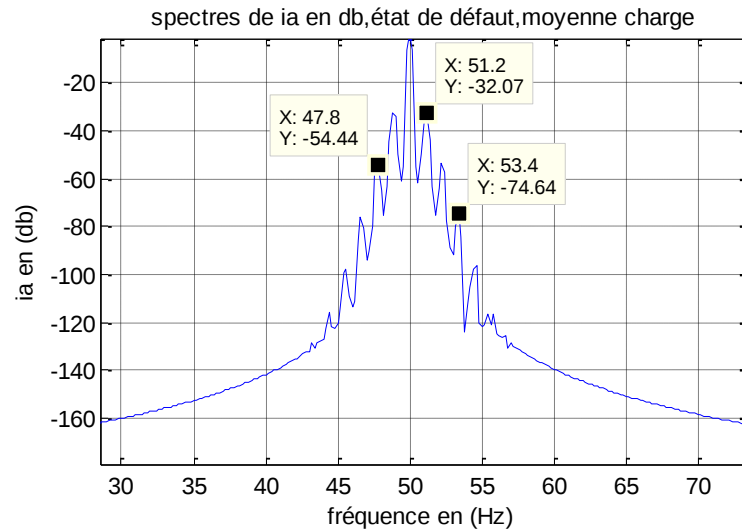


Figure 3.14 Spectre du courant statorique en dB, état de défaut, moyenne charge

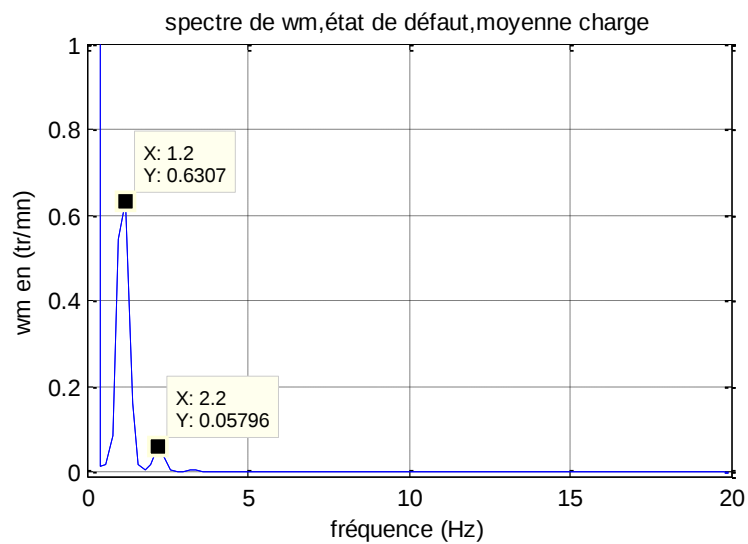


Figure 3.15 Spectre de la vitesse, état de défaut, moyenne charge

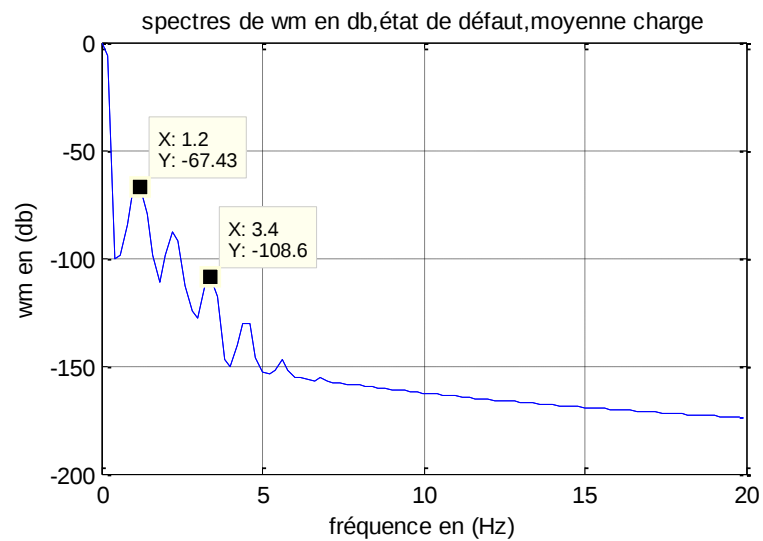


Figure 3.16 Spectre de la vitesse en dB, état de défaut, moyenne charge

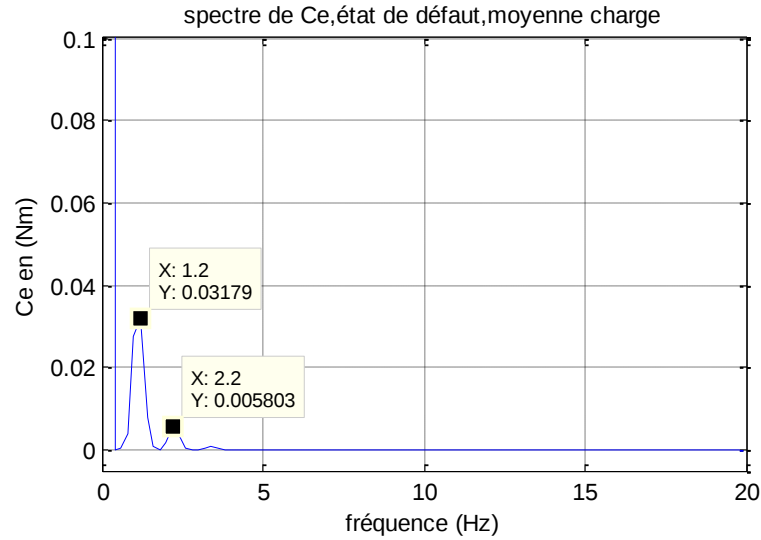


Figure 3.17 Spectre du couple électromagnétique, état de défaut, moyenne charge

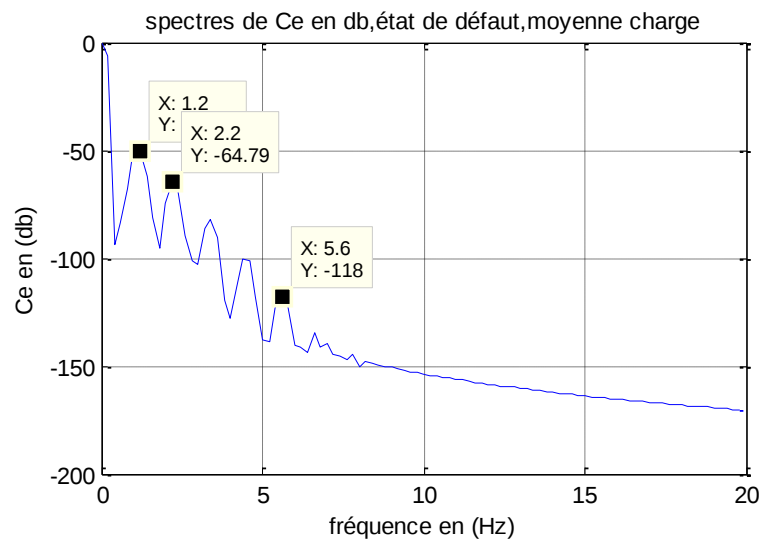


Figure 3.18 Spectre du couple électromagnétique en dB, état de défaut, moyenne charge

3.5 État de défaut, forte charge

Aussi la simulation pour les fortes charges (20 Nm) a été effectuée avec le même procédé précédent et les résultats sont rassemblés aux figures 3.19 3.26.

Tout comme les résultats précédents, ces derniers viennent confirmer qu'effectivement les amplitudes des harmoniques relatifs au défaut de cassure de barre augmentent au fur et à mesure que la charge augmente et ceci pour toutes les grandeurs, courant statorique, vitesse de rotation ou couple électromagnétique. De plus ces harmoniques s'écartent du fondamental comme c'est observé sur toutes les figures (3.19 à 3.26) et obéissent à la relation 3.1 pour le courant statorique et à l'écart $2g f_s$ en ce qui concerne la vitesse de rotation et le couple électromagnétique.

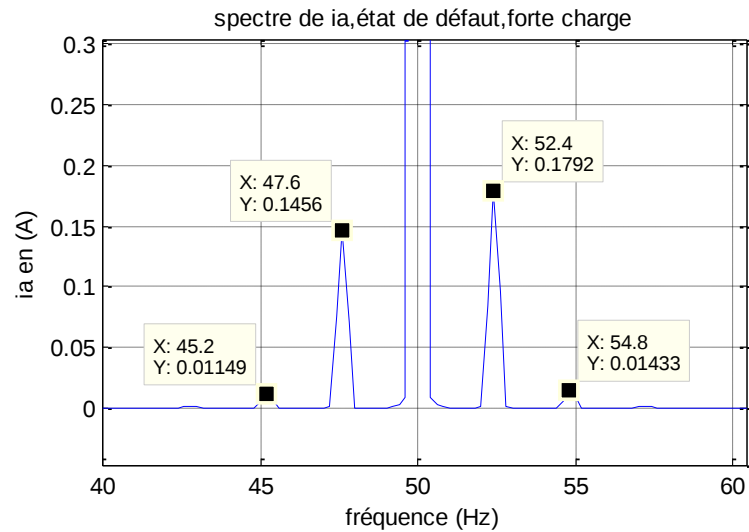


Figure 3.19 Spectre du courant statorique, état de défaut, forte charge

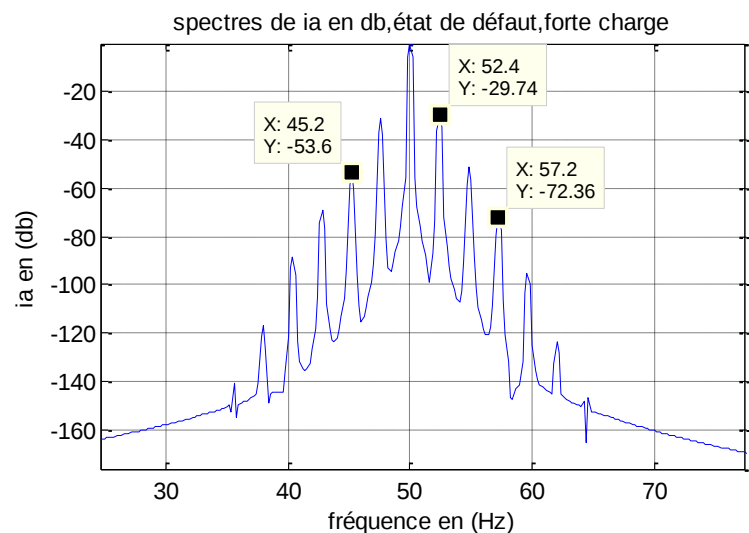


Figure 3.20 Spectre du courant statorique en dB, état de défaut, forte charge

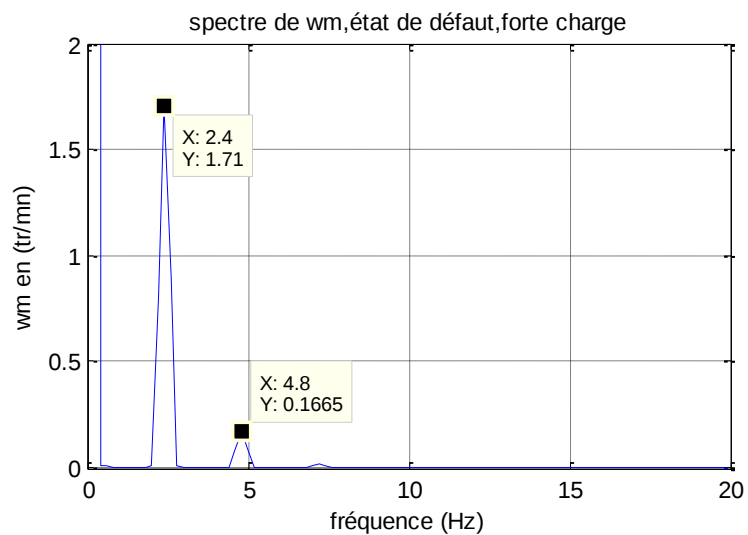


Figure 3.21 Spectre de la vitesse en dB, état de défaut, forte charge

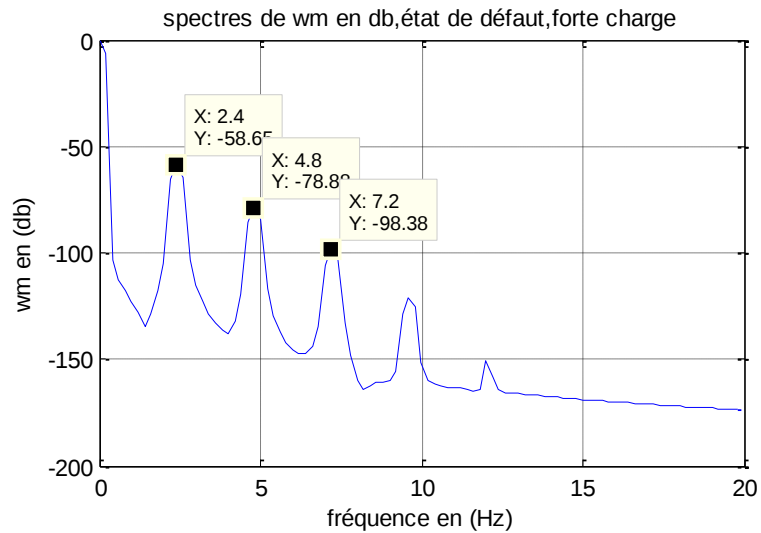


Figure 3.22 Spectre de la vitesse, état de défaut, forte charge

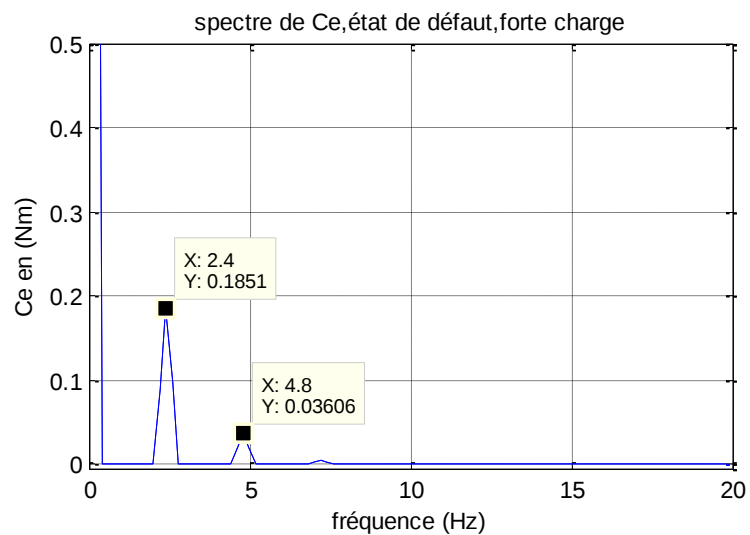


Figure 3.23 Spectre du couple électromagnétique, état de défaut, forte charge

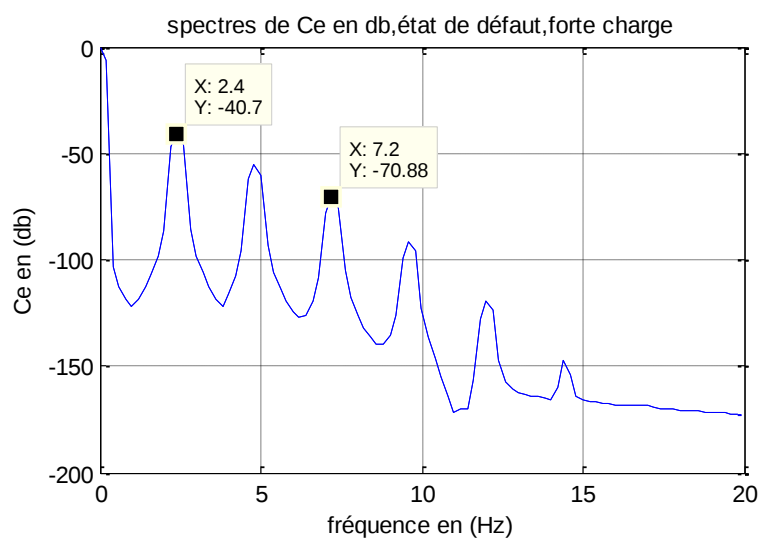


Figure 3.24 Spectre du couple électromagnétique en dB, état de défaut, forte charge

3.6 Conclusion

Dans ce chapitre avec le modèle (établi au deuxième chapitre) établi sous Matlab/Simulink nous avons procédé à la simulation de la machine saine pour le cas de la pleine charge où s'il y avait défaut il serait apparu. Les résultats temporels ne montrent aucune ondulation ni dans le courant statorique ni dans la vitesse de rotation ou le couple électromagnétique. Aussi les spectres des précédentes grandeurs ne contiennent aucun harmonique lié au défaut de cassure de barre. Par contre, lors de la simulation du défaut de cassure de barre (par augmentation de la résistance des barres) sur le modèle réduit, tous les résultats trouvés prouvent qu'effectivement il y a défaut rotorique comme dans la littérature et dans l'expérimental. Aussi on observe les ondulations sur toutes les grandeurs en temporel. De plus les spectres renferment les harmoniques connus comme signature de défaut rotorique et qui obéissent à la formule 3.1 $f_b = (1 \pm 2kg) \cdot f_s$ citée auparavant. Tout ceci prouve que le modèle réduit issu du modèle multi enroulements illustre de manière très fidèle l'état sain et l'état de défaut.

Conclusion générale

Conclusion générale

Le but de ce travail est de simuler le défaut de cassure de barres avec le modèle réduit issu du très utilisé modèle multi enroulements. Pour cela notre travail a été divisé en trois chapitres. Dans le premier, nous avons rappelé les principaux défauts qui peuvent apparaître dans la machine asynchrone à cage ainsi que leurs origines. Puis, nous avons présenté les différentes techniques de détection et de diagnostic des machines asynchrones. Ensuite dans le deuxième nous avons passé en revue de manière très brève le modèle réduit issu du modèle multi enroulements. Grâce à la simulation faite sur Matlab/Simulink du modèle réduit, nous avons constaté que ce modèle possède les mêmes caractéristiques du modèle dont il est issu (vu dans la littérature). Que ce soit pour l'état sain ou en défaut de cassure de barre, ce modèle prouve son efficacité quant à sa fidélité à reproduire le comportement de la machine et ceci pour toutes les charges, les résultats étaient étudiés dans le domaine temporel où nous avons pu observer les ondulations dues à l'instauration du défaut rotorique dans toutes les grandeurs : courant statorique, vitesse de rotation et couple électromagnétique. Par contre dans le troisième nous avons appliqué la transformée de Fourier (FFT) afin de visualiser les spectres des trois grandeurs citées précédemment dans le domaine fréquentiel, c'est-à-dire nous avons appliqués la technique MCSA. Les résultats collectés ont prouvés l'existence des raies signatures du défaut rotorique lorsqu'il y a défaut et ceci pour toutes les charges. Nous avons observé comme dans la littérature, que les harmoniques qui représentent le défaut rotorique augmentent en amplitude et s'écartent de leur fondamental au fur et à mesure que la charge augmente et obéissent à la formule 3.1 $f_b = (1 \pm 2kg) \cdot f_s$ citée auparavant. Tout ceci prouve que le modèle réduit issu du modèle multi enroulements illustre de manière très fidèle l'état sain et l'état de défaut.

Bibliographie

Bibliographie

- [1]SadokBazine, "Conception et Implémentation d'un Méta-Modèle de Machines Asynchrones en Défaut", Thèse de Doctorat, Université de Poitiers, France, 2009.
- [2]Gaëtan Didier, "Modélisation et diagnostic de la machine asynchrone en présence dedéfaillances ", Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy-1, 2004.
- [3]Kerfali Samir, "Contribution à la Surveillance et au Diagnostic des Défaits De la Machine Asynchrone",Thèse Présentée en vue de l'obtention du diplôme de Doctorat, Université Badji Mokhtar Annaba, 2016.
- [4]Azouzi Khaled, "Modélisation d'un moteur asynchrone pour le suivi de la sévérité des défauts rotorique par l'approche de la fonction d'enroulement",Mémoire de Magister (Ecole doctorale), Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf, 2011.
- [5]M. Sahraoui, "Étude Comparative des Méthodes de Diagnostic des Machines Asynchrones",Thèse de Doctorat, Université de Biskra, Algérie, 2010.
- [6]N. Halem, "Modélisation des Machines Asynchrones Triphasées à Cage en Vue du Diagnostic par la Méthode des Éléments Finis", Thèse de Doctorat, Université de Biskra, Algérie, 2015.
- [7]A. Ibrahim, "Contribution au Diagnostic de Machines Électromécaniques : Exploitation des Signaux Électriques et de la Vitesse Instantanée", Thèse de Doctorat, Université de Saint Etienne, France, 2009.
- [8]O. V. Thorsen, M. Dalva, "A Survey of Fault on Induction Motors in Offshore Oil Industry, Petrochemical Industry, Gas Terminals, and Oil Refineries", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 31, N°5, PP. 1186-1196, September 1995.
- [9]Allianz, "Présentation des Avaries. Machines Électriques Tournantes", Cahier des préventions, CP2, 1988.
- [10] A. Abed, "Contribution à l'Étude et au Diagnostic de la Machine Asynchrone", Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy-1, France, Mars 2002.
- [11] M. Sahraoui, "Contribution au Diagnostic d'une Machine Asynchrone Triphasée à Cage", Mémoire de Magistère, Université de Biskra, Algérie, 2003

Résumé:

Le but de ce travail est de simuler le défaut de cassure de barres avec le modèle réduit issu du très utilisé modèle multi enroulements. Pour cela notre travail a été divisé en trois chapitres .

Dans le premier, nous avons rappelé les principaux défauts qui peuvent apparaître dans la machine asynchrone à cage ainsi que leurs origines. Puis, nous avons présenté les différentes techniques de détection et de diagnostic des machines asynchrones. Ensuite dans le deuxième nous avons passé en revue de manière très brève le modèle réduit issu du modèle multi enroulements. Grâce à la simulation faite sur Matlab/Simulink du modèle réduit, nous avons constaté que ce modèle possède les mêmes caractéristiques du modèle dont il est issu (vu dans la littérature).

Mots clés: modèle multi enroulements ,la machine asynchrone , Simulink , Matlab.

الملخص:

الغرض من هذا العمل هو محاكاة خطأ كسر الشريط مع النموذج المصغر من نموذج متعدد اللفات المستخدم على نطاق واسع. لهذا تم تقسيم عملنا إلى ثلاثة فصول.

في الأول ، تذكرنا العيوب الرئيسية التي يمكن أن تظهر في الآلة القفصية غير المتزامنة وكذلك أصولها. بعد ذلك ، قدمنا التقنيات المختلفة للكشف عن الآلات غير المتزامنة وتشخيصها. ثم في الثانية، استعرضنا بإيجاز نموذج المقياس الناتج عن نموذج متعدد اللفات. بفضل المحاكاة التي تم إجراؤها على Matlab / Simulink للنموذج المصغر، وجدنا أن هذا النموذج له نفس خصائص النموذج الذي يأتي منه (كما هو موضح في الأدبيات).

الكلمات المفتاحية: نموذج متعدد اللفات ، آلة غير متزامنة ، Simulink ، Matlab.