



**République Algérienne Démocratique et
Populaire**



**Ministre de l'Enseignement Supérieur et de
la Recherche Scientifique**

Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued

FACULTE DES SCIENCE ET TECHNOLOGIE

Mémoire de fin d'étude

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de

LICENCE ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et technologies

Spécialité : Génie mécanique

Option : Electromécanique industriel

Thème

**Diagnostic Des Défauts Statoriques Et Rotoriques
Dans la Machine Asynchrone**

Devant le jury

Président : Mr Y.GUERFI
Examineur : Mr S.LARGOT
Rapporteur : Mr A.ANNANE

Présenté par

AYADI BILAL
LAIB BACHIR
GUEMARI ELHADI

2014/2015

Remerciements

Qu'il me soit d'abord permis de remercier et d'exprimer ma gratitude envers le bon Dieu, qui m'a donné la patience et le courage pour que je puisse continuer ce travail.

Je tiens à exprimer toute ma gratitude à Monsieur *Annane Adel*, Maître Assistant au sein du l'université d'el oued, qui a assuré la direction de ce travail. Au cours de cette année, j'ai profité d'un encadrement scientifique de qualité. Je le remercie pour ses conseils pertinents et éclairés, son aide était pour moi d'une importance capital dans la réalisation de ce travail. Qu'il trouve ici l'expression de ma profonde reconnaissance.

Je remercie aussi tous les enseignants et les responsables du Département de mécanique de l'Université d'el oued pour leur aide et leur encouragement.

Sans oublier mes collègues dans le domaine de la recherche et durant les années d'étude, je tiens à les remercier vivement.

Enfin, Je voudrais associer à mes remerciements toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à l'aboutissement de ce travail.

Résumé

Ce travail s'inscrit dans la thématique de la surveillance et diagnostic des défauts de la machine asynchrone à cage d'écureuil en présence des défauts de types:

- court circuit entre spires,
- déséquilibre d'une phase de la tension d'alimentation,
- rupture des barres rotorique,

La thématique du diagnostic de défaut se base sur l'application de deux techniques de traitement de signal qui est une solution efficace pour le problème de diagnostic des défauts: l'une se base sur l'analyse spectrale du courant statorique (FFT).

Mots clés : Machine asynchrone, défaut rotorique, cassure de barres, court circuit inter spire, défaut de déséquilibre, diagnostic, FFT

Abstract

This work fits into the theme of the monitoring and fault diagnosis of squirrel cage induction machine cage with faulty:

- inter turn short circuit,
- supply voltage imbalance,
- broken rotor bars,

The thematic fault diagnosis is based on the application of two techniques of signal processing which is an effective solution of the fault diagnosis problem: one is based from spectral analysis of the stator current using (FFT)

Keywords: Asynchronous machine, rotor failure, broken rotor bars, inter turn short circuit, unbalance fault, diagnosis, FFT.

SOMMAIRE

Nomenclature
Liste des figures
Liste des tableaux

Introduction générale	1
-----------------------------	---

Chapitre I

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

I.1.	Introduction	3
I.2	Présentation du système à étudier	3
I.2.1	Constitution de la machine asynchrone à cage	3
I.2.2	Principe de fonctionnement de la machine asynchrone	3
I.3	Défaillances dans la machine asynchrone à cage.....	4
I.3.1	Défauts rotorique.....	6
I.3.1.1	Cassure des barres.....	6
I.3.1.2	Défauts d'excentricité.....	6
I.3.1.3	Défauts de roulement.....	7
I.3.2	Défauts statorique.....	8
I.4	Principe du diagnostic des défauts dans la machine asynchrone.....	9
I.5	Méthode de diagnostic et de détection des défauts dans la machine asynchrone...	9
I.5.1	Méthodes sans modèle.....	9
I.5.1.1	Diagnostic par analyse des vibrations mécaniques	10
I.5.1.2	Diagnostic par mesure du flux magnétique axial de fuite	11
I.5.1.3	Diagnostic par l'analyse des tensions statorique induites.....	11
I.5.1.4.2	Diagnostic par mesure du couple électromagnétique.....	11
I.5.1.5	Diagnostic par mesure de la puissance instantanée.....	11
I.5.1.6	Diagnostic par analyse du courant statorique.....	11
I.5.1.7	Diagnostic par analyse du vecteur de Park.....	12
I.5.1.8	Diagnostic par utilisation des techniques d'intelligence artificielle (AI).....	12
I.5.2	Techniques de traitement de signal utilisées dans le diagnostic.....	12
I.5.2.1	Transformée de Fourier rapide (FFT).....	12
I.6	Conclusion.....	14

Chapitre II

Diagnostic du défaut Statorique de la machine Asynchrone

II.1	Introduction.....	15
II.2	Modèle de la machine asynchrone tenant compte du défaut statorique de type court-circuit	15
II.2.1	Modèle triphasé de la machine en défaut de court-circuit.....	16
II.2.2	Modèle de défaut statorique de la machine asynchrone dans le repère de Park....	19
II.2.3	Modélisation de la machine dans la repère de Park lié au stator.....	22
II.3	Représentation sous forme d'état du modèle du défaut de court-circuit de la machine asynchrone.....	23
II.4	Résultat de la Simulation	24
II.5	Analyse spectrale du courant statorique par FFT.....	28

II.6	Conclusion.....	29
------	-----------------	----

Chapitre III

Diagnostic du défaut rotorique de la machine asynchrone

III.1	Introduction.....	30
III.2	Modèle de défaut rotorique de la machine asynchrone.....	30
III.3	Modélisation du défaut de rupture des barres.....	31
III.3.1	Schéma équivalent.....	33
III.4	Représentation d'état du modèle de défaut rotorique	35
III.5	Résultat de la simulation.....	37
III.6	Analyse du courant statorique par la FFT.....	38
III.7	Conclusion.....	39
	Conclusion générale et perspectives.....	40

Annexe

Références bibliographiques

Nomenclature

U_s	tensions statoriques suivant les axes a_s, b_s, c_s .
$U_{\alpha\beta s}$	composante α et β des tensions statoriques
$U_{dq s}$	composante d et q des tensions statoriques
i_s	courants statoriques suivant les axes a_s, b_s, c_s
$i_{\alpha\beta s}$	composante α et β des courant statorique
$i_{dq s}$	composante d et q des courant statorique
i_r	courants rotoriques suivant les axes a_r, b_r, c_r
$i_{\alpha\beta r}$	composante α et β des courant rotorique
$i_{dq r}$	composante d et q des courant rotorique
$i_{\alpha\beta m}$	composante α et β des courant magnétisant
$i_{dq m}$	composante d et q des courant magnétisant
Φ_s	flux statoriques suivant les axes a_s, b_s, c_s .
$\Phi_{\alpha\beta s}$	composante α et β des flux statoriques
$\Phi_{dq s}$	composante d et q des flux statoriques
i_{cc}	courant de court circuit dans les spires court -circuitées
$i_{\alpha\beta cc}$	composante α et β du courant de court circuit dans les spires court -circuitées
$i_{dq cc}$	composante d et q du courant de court circuit dans les spires court -circuitées
Φ_{cc}	flux de la bobine de court circuit B_{cc}
$\Phi_{\alpha\beta cc}$	composante α et β du flux de la bobine de court circuit B_{cc}
$\Phi_{dq cc}$	composante d et q du flux de la bobine de court circuit B_{cc}
R_{sx}	Résistance propre d'une phase statorique
R_{rx}	Résistance propre d'une phase rotorique
R_{cc}	Résistance de la bobine de court circuit B_{cc}
L_{sx}	Inductance propre d'une phase statorique
L_{rx}	Inductance propre d'une phase rotorique
L_{cc}	Inductance de la bobine de court circuit B_{cc}
L_{psx}	Inductance principale d'une phase statorique
L_{prx}	Inductance propre d'une phase rotorique
L_m	Inductance magnétisante
L_{fsx}	Inductance de fuite statorique
L_{frx}	Inductance de fuite rotorique
L_{sxy}	Inductance mutuelle entre phases statoriques
L_{rxy}	Inductance mutuelle entre phases rotoriques
$M_{sx,ry}$	Inductance mutuelle entre phase statorique x et une phase rotorique y
M_{ccs}	Inductance mutuelle entre phase statorique et la bobine de court-circuit
M_{ccr}	Inductance mutuelle entre phase rotorique et la bobine de court-circuit
θ	angle électrique de la position du rotor
θ_{cc}	angle repérant la phase en défaut type court-circuit
θ_0	angle repérant la phase en défaut type rupture de barre
$P(\theta)$	Matrice de rotation d'angle θ
Q_{ck}	Quadripôle représentant un défaut de court-circuit sur la phase k
$Q(\theta_{ck})$	Matrice situant l'angle du bobinage en court-circuit
$Q(\theta_0)$	Matrice situant l'angle de barre cassé au rotor
P	Nombre de paires de pôles
f_v	coefficient de frottement
J	Moment d'inertie

G	glissement
C_{em}	couple électromécanique
ω_r	Vitesse angulaire électrique du rotor
ω_{rep}	Vitesse angulaire du repère de référence
C_r	couple résistant
n_{cc}	Nombre de spires court-circuitées au stator
n_{cck}	Pourcentage de spires court-circuitées dans la phase k
η_0	pourcentage de barres cassées
n_{bc}	Nombre total de barres au rotor
FFT	Transformation de Fourier rapide
MAS	Machine asynchrone

Liste des figures

1.1 Photos d'une machine asynchrone, stator et rotor de la machine	3
1.2 Principaux défauts dans la machine asynchrone et leurs causes	5
1.3 Représentation de l'excentricité statique et dynamique dans la machine asynchrone	6
1.4 Dimension du roulement à bille	8
1.6 Exemples de dégâts dus au défaut de court-circuit statorique d'un moteur asynchrone	10
1.7 Mesures vibratoires sur la machine asynchrone	11
1.8 Représentation temporelle vers fréquentielle	14
2.1 court-circuit de spires sur la phase b du stator	16
2.2 Enroulement triphasés avec défaut de court-circuit	17
2.3Premier modèle de court-circuit dans repère lié au stator de la machine asynchrone	22
2.4Modèle général de court-circuit dans le repère de Park lié au rotor de la machine Asynchrone	23
2.5 courants statorique pour un défaut statorique de 25% de spires court-circuitées sur la phase a_s	25
2.6 Vitesse de la machine pour un défaut de 25% des spires court-circuitées sur la phase a_s	26
2.7 couple électromagnétiques de la machine avec un défaut de court-circuit 25% de spires	26
2.8 Courants statorique pour déséquilibre de 4% sur la tension d'alimentation de la phase a_s	27
2.9 Vitesse de la machine pour un déséquilibre de 4% sur la tension d'alimentation de phase a_s	27
2.10 couple électromagnétique pour un déséquilibre de 4% sur la tension d'alimentation de la phase a_s	27
3.1Modèle par dipôles élémentaires du rotor en défaut	35
3.2 Premier modèle de la machine avec défauts rotoriques	34
3.7 Spectre du courant statorique pour une machine en régime sain et avec défaut rotorique	39

Introduction générale :

Durant ce dernier siècle, l'accroissement optimal de la compétitivité mondiale en matière de production dans un contexte international très concurrentiel a poussé les industriels à chercher comment assurer et à maîtriser la disponibilité et la sûreté de fonctionnement de leurs outils de production. Ces exigences en matière de sûreté de fonctionnement ont fait émerger une nouvelle science de l'ingénieur qui est la surveillance des équipements industriels. Cette dernière englobe la détection et le diagnostic des défaillances. La détection d'une défaillance a pour but principal d'améliorer et d'augmenter la disponibilité des systèmes afin de réduire les coûts de la maintenance et d'éviter un arrêt brusque de la production. Par contre le diagnostic de défauts a pour rôle la localisation (déterminer quelle partie du système est affectée) et l'identification de ce défaut (quantification du défaut). Actuellement le domaine de diagnostic est devenu un outil essentiel de la maintenance corrective et par conséquent, les entreprises équipées par des systèmes de surveillance ont tendance de plus en plus à automatiser la procédure de maintenance.

La machine asynchrone, de par sa construction, est la machine la plus robuste et la moins chère du marché. Cette machine est largement utilisée dans la plus part des entraînements électriques dans plusieurs domaines industriels, notamment pour des applications à vitesse constante ou à vitesse variable. Comme toute autre machine, la machine asynchrone n'est pas à l'abri d'un dysfonctionnement. Elle peut être affectée par des défauts électriques ou mécaniques au niveau du stator, ou du rotor, ou les deux en même temps. Les causes des défauts peuvent être dues à un simple problème de fabrication ou à une utilisation non conforme de la machine. Parfois le milieu dans lequel la machine est utilisée peut être responsable à la détérioration de la machine (milieu corrosif, milieu chimique,...). De ce fait, un arrêt brusque dû à une anomalie quelconque peut engendrer des pertes financières (pertes de production, la remise en état de l'outil de production, les retards de livraison) et matériels inévitables. Par conséquent, il est recommandé de détecter de façon précoce un défaut afin d'y remédier dans des délais les plus brefs et minimiser les effets induits (arrêt d'une chaîne de production, pertes de produits, etc...). Ceci a poussé la majorité des industriels à doter leurs chaînes de production par des systèmes sophistiqués de détection et de diagnostic de défauts. Ces deux dernières fonctions ont pour objectif d'une part l'amélioration de la sécurité des êtres humains et des biens et d'autre part l'augmentation des gains de productivité résultant de l'accroissement de la disponibilité des équipements et d'une gestion efficace des opérations de maintenance. Un système de surveillance n'a pas pour vocation de remplacer l'homme mais pour l'aider dans sa prise de décision finale.

Durant maintenant plus d'une vingtaine d'années, les exigences de sûreté de fonctionnement et de productivité des installations industrielles ont motivé, dans leur domaine applicatif respectif, un effort important de recherche et de développement pour la détection et le diagnostic des défauts.

Le travail réalisé dans le cadre de ce mémoire présente la détection des défauts statorique et rotorique dans la machine asynchrone. Les outils d'analyse et diagnostic de défaut sont à base de l'utilisation du spectre par le biais de la transformée de Fourier (FFT) Pour mener cette étude, le mémoire est structuré en trois chapitres:

Le premier chapitre, est consacré sur l'état de l'art du diagnostic de défaut de la machine asynchrone. Une citation des divers défauts pouvant affecter le bon fonctionnement de la machine asynchrone ainsi que les différentes méthodes de détection et diagnostique de ces défauts sont représentés.

Le second chapitre est réservé en premier lieu ; à la modélisation et la simulation du modèle de défaut de type court circuit entre spires de la machine asynchrone à cage dans le repère de Park. Ainsi, l'étude est menée pour le cas de la machine alimentée par une tension déséquilibrée en vue d'étudier l'effet du défaut sur le diagnostic. En second lieu ; la détection des deux défauts de court circuit et du déséquilibre de la tension en utilisant les méthodes de traitement de signal du courant statorique à base de l'FFT.

Le troisième chapitre, est consacré au diagnostic du défaut de type cassure de barre rotorique, pour cela en vue de réduire la complexité, un modèle de défaut dans le repère de Park de la machine asynchrone à cage est présenté. Deux techniques d'analyse spectrale du courant statorique sont utilisées en régime stationnaire à base FFT.

Chapitre I

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

I.1 Introduction

Dans ce chapitre, on essaye de décrire le comportement du système à étudier à savoir la machine asynchrone triphasée à cage d'écureuil. Après avoir cité les différents défauts pouvant survenir dans la machine et leurs causes, on essaye d'abord de parler brièvement des techniques de base couramment utilisées dans le domaine du diagnostic des défauts. Enfin, une citation des méthodes de modélisation de la machine en vue du diagnostic des défauts rotorique et statorique sera effectuée.

I.2 Présentation du système à étudier

I.2.1 Constitution de la machine asynchrone à cage

La machine asynchrone, souvent appelée machine à induction, comporte deux parties essentielles, l'une fixe appelée stator portant un bobinage triphasé logé dans les encoches et relié à la source d'alimentation et l'autre mobile ou rotor qui peut être soit bobiné soit à cage d'écureuil. Ces deux parties sont coaxiales et séparées par un entrefer (Figure. 1.1).

Dans ce chapitre, on considère le cas d'une machine asynchrone à cage d'écureuil. Toutefois, on admette que sa structure est électriquement équivalente à celle d'un rotor bobiné dont les enroulements sont en court-circuit.

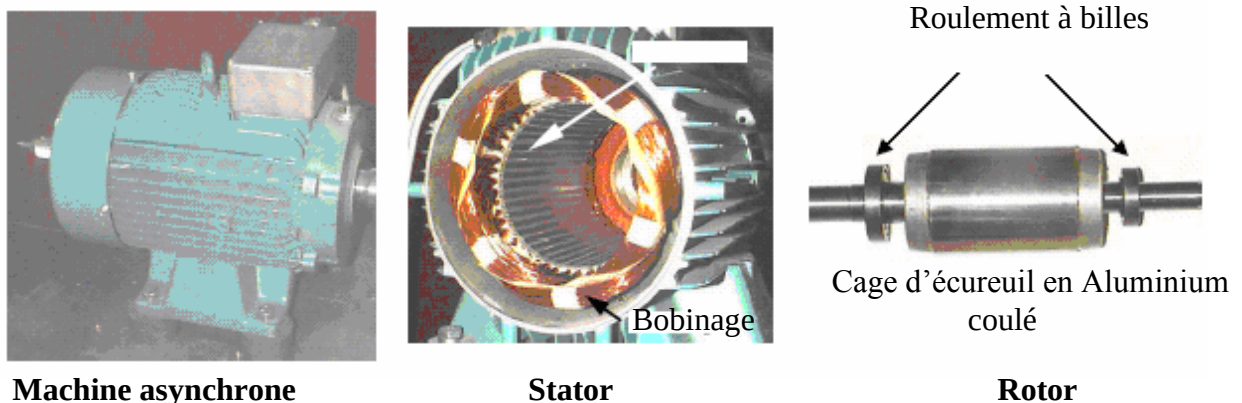


Figure 1.1 : Photos d'une machine asynchrone, stator et rotor de la machine

1.2.2 Principe de fonctionnement de la machine asynchrone

Le principe de fonctionnement de la machine asynchrone est basé entièrement sur les lois de l'induction; la machine asynchrone est considérée comme un transformateur à champ magnétique tournant dont le stator étant comparable à l'enroulement primaire et le rotor à l'enroulement secondaire en court-circuit.

Ce fonctionnement est reposé sur le principe de l'interaction électromagnétique du champ tournant, créé par le courant triphasé fourni à l'enroulement statorique par le réseau. Et des courants induits dans l'enroulement rotorique lorsque les conducteurs de ce dernier sont coupés par le champ tournant.

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

$$n = \frac{f}{p} \quad (1.1)$$

Où f : est la fréquence d'alimentation.

P : représente le nombre de paire de pôles.

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

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

I.3 Défaillances dans la machine asynchrone à cage

La machine asynchrone est considérée comme robuste mais peut être soumise à des contraintes au cours de son fonctionnement : longue durée, conditions dures, ce qui provoque sa défaillance. Les principaux défauts de la machine asynchrone peuvent être classés par catégories dans deux types: mécaniques et électriques. Les sources des défauts de la machine peuvent être internes, externes ou dues à l'environnement. Les défauts internes peuvent être classifiés concernant leurs origines c'est à dire électrique et mécanique. Habituellement, d'autres types de défauts de roulement et de refroidissement se rapportent aux défauts de rotor parce qu'ils appartiennent aux pièces mobiles. La figure (1.2) présente l'arbre de défaut de la machine asynchrone [BOU 08].

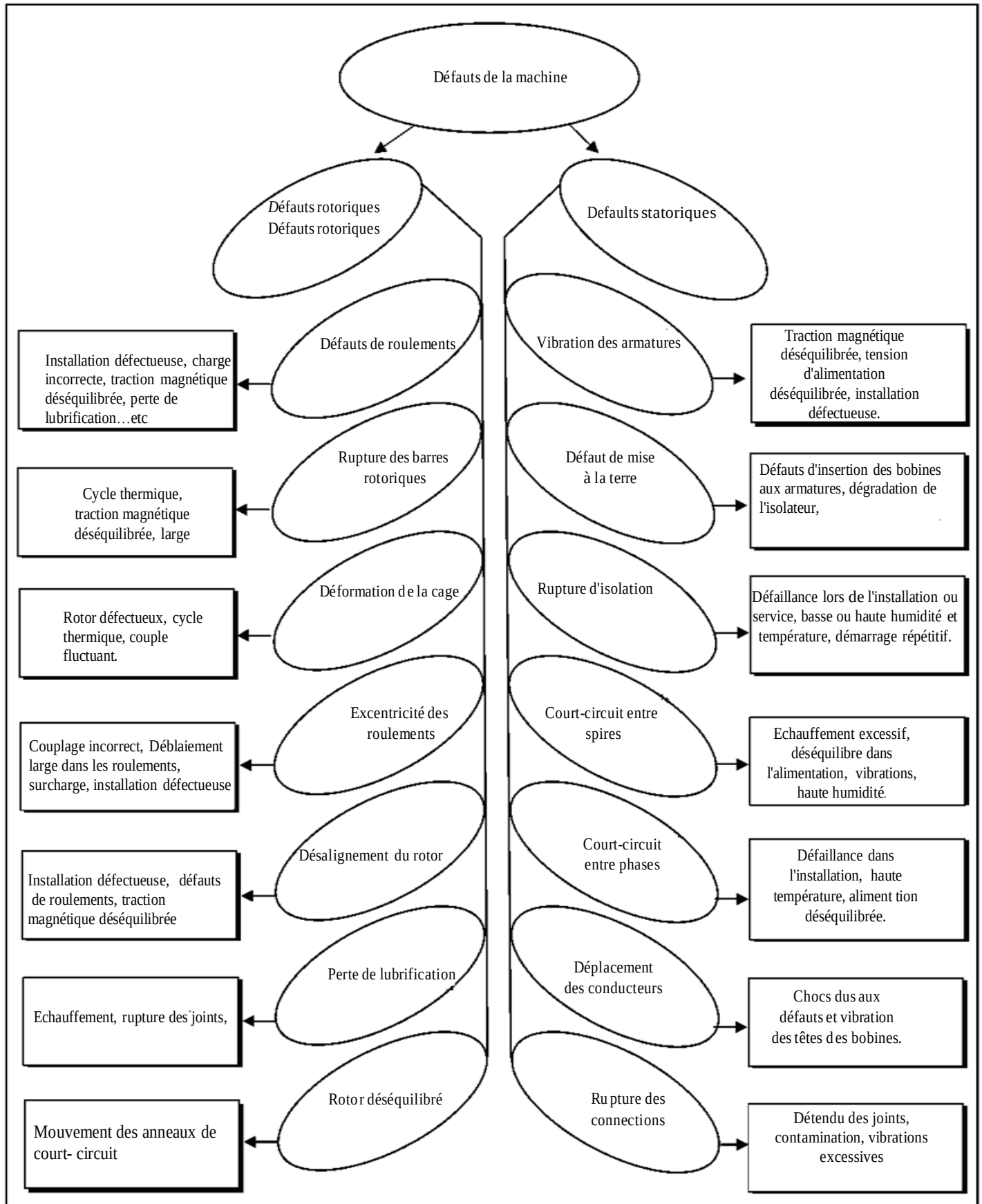


Figure 1.2: Principaux défauts dans la machine asynchrone et leurs causes

I.3.1 Défaits rotorique

I.3.1.1 Cassure des barres

La rupture des barres rotorique d'une machine asynchrone est un des défauts les plus couramment étudiés, en raison de sa simplicité de réalisation. Ce défaut induit des modifications dans les courants statorique et entraine donc l'apparition d'harmoniques caractéristiques dans le spectre de ce signal. En effet, lors du défaut d'une rupture de barre, des harmoniques de flux sont produites et induisent des harmoniques de courant dans l'enroulement statorique aux fréquences autour de la fréquence fondamentale f_s telles que

[MEN 07]:

$$f_{brc} = f_s(1 \pm 2.k.g) \quad \text{avec} \quad k=1,2,3 \dots \quad (1.2)$$

g : glissement.

f_s : Fréquence d'alimentation statorique

1.3.1.2 Défaits d'excentricité

La variation d'épaisseur de l'entrefer entraine des variations dans la densité du flux d'entrefer. Les enroulements statorique sont électriquement modifiés. ce qui entraine des effets dans le spectre des courants [MEN 07]. Il existe deux types d'excentricité:

- **Excentricité statique:** déformation du corps du stator, positionnement incorrecte du rotor,
- **Excentricité dynamique:** le centre du rotor n'est plus confondu avec le centre de rotation.

L'apparition des deux types d'excentricité au même temps est généralement appelée:
excentricité mixte.

L'excentricité dans la machine à induction augmente l'apparition des composantes additionnelles dans le spectre du courant, leurs fréquences sont données par des composantes fréquentielles suivantes:

$$f_{exc} = f_s \left(1 \pm k \cdot \frac{(1-g)}{p} \right) \quad \text{avec} \quad k=1,2,3 \dots \quad (1.3)$$

p : nombre de paire de pôles.

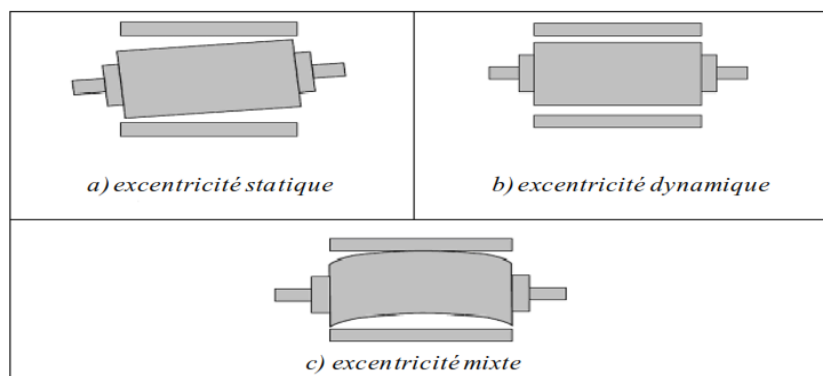


Figure1.3 : Représentation de l'excentricité statique et dynamique dans la machine asynchrone

I.3.1.3 Défauts de roulement

Les roulements se composent généralement de deux bagues, une intérieure et autre extérieure entre lesquelles existe un ensemble de billes ou de rouleaux tournants (figure 1.4). En fonctionnement normal la défaillance est due à la fatigue commence par des petites fissures situées au-dessous des surfaces du chemin de roulement et de l'élément roulant, qui se propage graduellement sur la surface. Tout changement de l'uniformité du roulement produit des vibrations qui génèrent dans le courant statorique des raies spectrales de fréquences **[BOU07]**.

$$f_{roul} = |f_s - k \cdot f_v|$$

Où $k=1,2,3,\dots$ est un entier et f_v est l'une des fréquences caractéristiques des vibrations.

Les fréquences caractéristiques des vibrations dépendent de l'élément du roulement affecté par un défaut et sont liées aux paramètres du roulement. Les fréquences des vibrations qui caractérisent les défauts des roulements à bille sont:

- **Défauts au niveau d'une bille**

$$f_b = \frac{PD}{BD} f_{rot} \left[1 - \left(\frac{BD}{PD} \cos(\beta) \right)^2 \right] \quad (1.4)$$

- **Défauts sur la bague intérieure**

$$f_{b.int} = \frac{n_b}{2} f_{rot} \left[1 + \frac{BD}{PD} \cos(\beta) \right] \quad (1.5)$$

- **Défauts sur la bague extérieure**

$$f_{b.int} = \frac{n_b}{2} f_{rot} \left[1 - \frac{BD}{PD} \cos(\beta) \right] \quad (1.6)$$

Où BD le diamètre d'un élément roulant, PD la distance entre les centres des billes diamétralement opposées, n_b est le nombre d'éléments roulants, β angle de Contact des billes avec les bagues du roulement et f_{rot} est la fréquence de rotation du rotor **[BOU 07]**

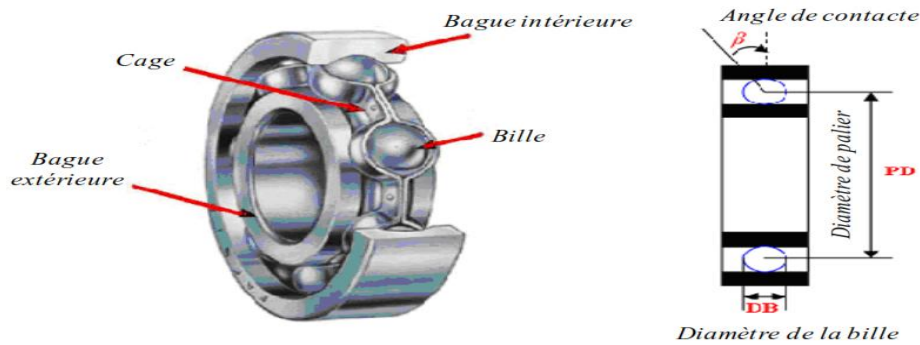


Figure1.4: Dimension du roulement à bille

I.3.2 Défauts statorique

L'apparition d'un défaut au niveau des circuits électriques statorique de la machine asynchrone peut avoir des origines diverses. On peut citer à titre d'exemple, les défauts de type courts-circuits inter-spires qui apparaissent à l'intérieur des encoches statoriques. Ce type de défauts peut être causé par une dégradation des isolants des spires du bobinage statorique.

On peut citer aussi les courts-circuits qui apparaissent entre une phase et le neutre, entre une phase et la carcasse métallique de la machine ou entre deux phases statoriques. Les courts-circuits entre spires est donc le défaut le plus fréquemment rencontré au stator, la fréquence caractéristique de ce défaut est [NAN O5] :

$$f_{cc} = f_s \left[\frac{n}{p} (1 - g) \pm k \right] \quad (1.7)$$

avec $n=1,2,3,\dots$ et $k=1,3,5,\dots$

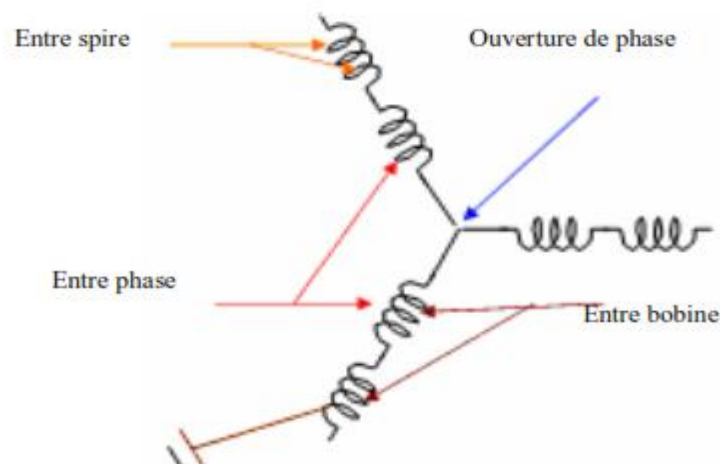


Figure 1.5: Représentation des différents défauts statoriques possible

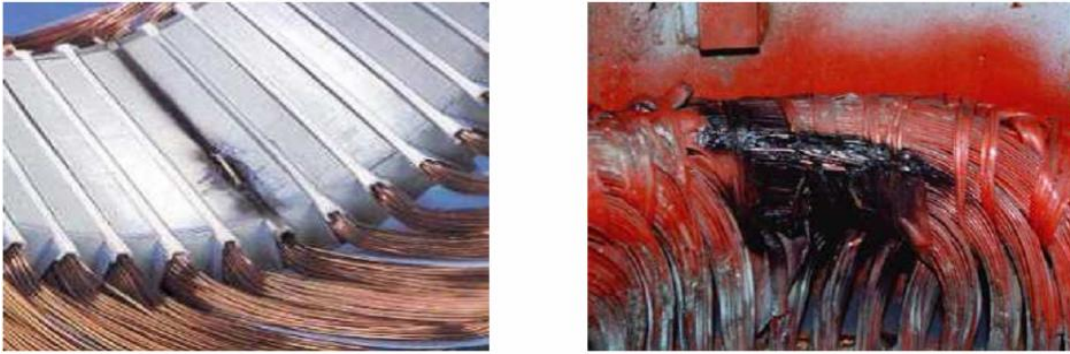


Figure 1.6: Exemples de dégâts dus au défaut de court-circuit statorique d'un moteur asynchrone

I.4 Principe du diagnostic des défauts dans la machine asynchrone

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

- extraction des informations issues de capteurs de la machine pour obtenir des indicateurs de défauts ou résidus. Le résidu représente la différence entre l'observation et valeur de référence. Avant de chercher la cause du défaut, il est important de valider l'information fournie par les résidus.
- la Valeur du résidu doit être quantifiée afin de produire des symptômes. Le problème d'évaluation des résidus consiste à définir le seuil à partir duquel on déclarera le défaut.
- la décision constitue la dernière étape de la tâche du diagnostic. A partir de la comparaison de la signature actuelle avec celle de l'expérience, il s'agit de déclarer, dans un premier temps, si l'élément est défaillant ou non. Dans un second temps, si l'élément est défaillant, il faut trouver la cause de l'anomalie [MEN 07].

I.5 Méthode de diagnostic et de détection des défauts dans la machine asynchrone

I.5.1 Méthodes sans modèle

Ces méthodes sont basées soit sur le traitement de signaux issus de capteurs de grandeurs X physiques affectées par les défauts ou soit par des systèmes experts mettant en œuvre des techniques d'intelligence artificielle. Puisque les allures temporelles ne donnent pas beaucoup d'information, on est obligé d'aller vers les techniques de traitement de signal.

Les méthodes se basant sur l'analyse des signaux d'acquisition ont l'avantage d'être indépendante des fluctuations internes du système. Ainsi, l'information contenue dans les signaux n'est pas affectée par une éventuelle erreur de modélisation.

Plusieurs techniques de traitement de signal ont été utilisées depuis longtemps pour analyser le contenu spectral des différents signaux issus des machines électriques tels que: les courants, les puissances, le couple, la vitesse, le flux, les Vibrations, . . etc. Dans ce qui suit, on présente brièvement les transformées de Fourier rapide (FFT) et la transformée en ondelettes (TO).

I.5.1.1 Diagnostic par analyse des vibrations mécaniques

Le diagnostic des défauts en utilisant les Vibrations mécaniques est la méthode la plus utilisée dans la pratique [HAN 03]. D'après [CAM 86], [WIL 00], [CAR 98], 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.

$$\sigma(\theta, t) = \frac{B_s^2(\theta, t)}{2\mu_0} \quad (1.8)$$

La distribution de l'induction magnétique dans l'entrefer est le produit de la force magnétomotrice F_m et de la perméance (P).

$$\psi_s = F_{mm} \cdot P \quad (1.9)$$

Les vibrations de la machine peuvent être captées par des accéléromètres placés sur les paliers selon les directions axiale, verticale et radiale. Les spectres des signaux de vibrations issus du moteur avec défaut sont comparés avec ceux de références enregistrées lorsque la machine était en bon état. Cette méthode permet la détection aussi bien des défauts électriques que mécaniques puisque la force magnétomotrice contient les effets des asymétries du stator ou du rotor et la perméance dépend de la variation de l'entrefer. Cependant, le coût des capteurs de vibration qui est relativement élevé, ainsi que les difficultés rencontrées dans la connexion de ces capteurs (problème d'accessibilité) représentent les limites et les inconvénients de cette méthode.

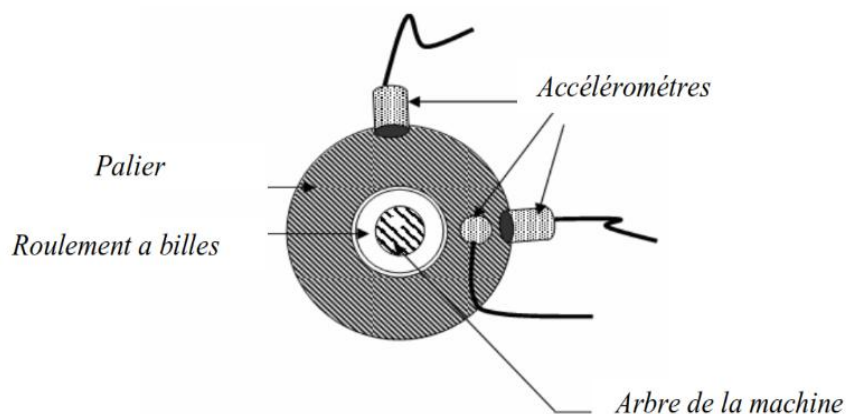


Figure 1.7: Mesures vibratoires sur la machine asynchrone

I.5.1.2 Diagnostic par mesure du flux magnétique axial de fuite

Dans une machine idéal sans défauts, les courants et les tensions statorique 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 [SAH 03].

I.5.1.3 Diagnostic par l'analyse des tensions statorique induites

Cette technique est basée sur l'exploitation du contenu fréquentiel de la tension induite par le flux rotorique dans les enroulements statorique pendant la déconnexion de la machine du réseau. 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 évitées [KHE 09].

I.5.1.4 Diagnostic par mesure du couple électromagnétique

Le couple électromagnétique développé dans la machine, provient de l'interaction entre le champ statorique et celui rotorique. Par conséquent, tout défaut, soit au niveau du stator ou au rotor, affecte directement le couple électromagnétique [HSU 95].

L'analyse spectrale du signale du couple (mesuré ou estimé), donne des informations sur l'état de santé de la machine [SAH 03].

I.5.1.5 Diagnostic par mesure de la puissance instantanée

La puissance instantanée est la somme des produits des courants et des tensions dans les trois phases statorique. Donc, le niveau d'informations apportées par cette grandeur, est plus grand que celui apportées par le courant d'une seule phase. Ceci présente l'avantage de cette méthode par apport aux autres [SAH 03].

L'utilisation de la puissance instantanée pour la détection des défauts dans la machine asynchrone a fait l'objet de nombreux travaux [MAI 92], [LEG 96].

I.5.1.6 Diagnostic par analyse du courant statorique

Parce qu'il est facilement accessible, et vue sa capacité de détecter aussi bien les défauts électromagnétiques que mécaniques, l'analyse du courant statorique occupe une place privilégiée dans le diagnostic par analyse des signaux. Cette technique est connue sous l'abréviation MCSA (Motor Current Signature Analysis). La MCSA était l'objet de plusieurs travaux de recherche, elle consiste à affecter à chaque défaut une signature spectrale le caractérisant. Dans le même contexte, il a été démontré que la sévérité du défaut est fonction de l'amplitude des composantes fréquentielles qu'il génère, et notamment, des raies déjà présentes dans le moteur sain (harmoniques d'espace) [GHQ 05].

I.5.1.7 Diagnostic par analyse du vecteur de Park

Deux versions d'analyse par cette méthode à savoir:

La première utilise les grandeurs biphasées i_{ds} et i_{qs} , qui sont calculées à partir des trois courants d'alimentation, pour l'obtention de la courbe de lissajou: $i_q = f(i_d)$. Le changement de l'épaisseur et de la forme de cette courbe donne une information sur le défaut [SAH 10].

La deuxième est appelée Vecteur de Park Etendu, qui est basée sur l'analyse spectrale du module du Vecteur de Park $\left(\sqrt{i_d^2(t) + i_q^2(t)}\right)$. Elle présente beaucoup d'avantages quant à la détection des défauts statoriques ou rotoriques et même les défauts de roulement [SAH 10].

I.5.1.8 Diagnostic par utilisation des techniques d'intelligence artificielle (AI)

En dépit des diverses techniques mentionnées précédemment, ces dernières années, la surveillance et la détection de défaut des machines électriques se sont éloignées des techniques traditionnelles pour s'orienter Vers des techniques dites d'intelligence artificielle (IA). Ces méthodes sont basées sur la connaissance a priori du système et utilisent un ensemble de règles et de faits (données manipulées par les règles) qui constituent ce qu'on appelle la base de connaissance. Parmi ces méthodes, on peut citer [MEN 07]:

- logique floue,
- réseaux neuronaux,
- reconnaissance des formes.

I.5.2 Techniques de traitement de signal utilisées dans le diagnostic

I.5.2.1 Transformée de Fourier rapide (FFT)

Considérons le signal $X(t)$ à temps continu. Si X est à énergie finie, sa transformée de Fourier à la fréquence f est la suivante [ORA 88] :

$$X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) e^{-2\pi f t} dt \quad (1.10)$$

Son inverse est donnée par:



Figure 1.8 : Représentation temporelle vers fréquentielle

Sa transformée de Fourier discrète de N points avec une période d'échantillonnage T est donnée par :

$$x\left(\frac{f}{NT}\right) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x(kT) e^{-j\frac{2\pi f k T}{NT}} \quad (1.11)$$

et sa relation inverse est donnée par: et sa relation inverse est donnée par:

$$x(kT) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x\left(\frac{f}{NT}\right) e^{-j\frac{2\pi f k T}{NT}} \quad (1.12)$$

La transformée de Fourier rapide (FFT) est un algorithme de calcul rapide de la transformée de Fourier discrète. L'algorithme de base de cette transformée utilise un nombre de points N égal à une puissance de 2, ce qui permet d'obtenir un gain en temps de calcul, par

rapport à un calcul avec la transformée de Fourier discrète, de $\frac{N}{\log_2(N)}$

Cette transformation fait clairement ressortir le contenu fréquentiel du signal $x(t)$. En effet, la FFT décompose le signal $x(t)$ sur une base de Vecteurs propres sinusoïdaux $\left\{e^{2\pi f k T}\right\}_{f \in R}$

Malheureusement, ceci convient pour des signaux stationnaires dont les propriétés statistiques sont invariantes dans le temps. Cependant, en pratique la grande majorité des signaux rencontrés sont non stationnaires et la notion de décomposition sur une somme infinie d'exponentielles complexes propres à la FFT s'avère inadéquate.

Pour mieux décrire ce type de signaux, on fait appel à des représentations faisant intervenir conjointement le temps et la fréquence. Le changement ainsi opéré nous permettra d'analyser les lois du comportement fréquentielle du signal au cours du temps. Dans le cas de l'existence de sauts d'impulsions ou de changements de fréquence par exemple, la FFT ne permet pas de localiser ces événements transitoires qui surviennent dans le signal [CUS 08], [KIA 09]. Ces phénomènes sont non stationnaires et du fait qu'ils sont brefs et souvent à caractère oscillatoire, leur contenu spectral est difficile à mettre en évidence.

Pour résoudre ce problème, GABOR (1964) a introduit la transformée de Fourier à court terme qui se base sur le fenêtrage (Windowing). Il s'agit de segmenter en tranche de temps fixes le signal à analyser et d'appliquer par la suite la Transformée de Fourier à chaque tranche. La suite logique pour la résolution de ce problème a été l'élaboration d'un puissant outil localisé en temps et en fréquences dénommé la transformée en Ondelettes (Wavelets transform).

I.6 Conclusion

Après quelques rappels sur la constitution de la machine asynchrone, ainsi que sur les défaillances pouvant affecter cette machine (excentricité, court-circuit, rupture des barres...), on a présenté les différentes techniques de diagnostic de la machine asynchrone à cage d'écureuil, et nous avons vu que la détection d'un défaut, qu'il soit mécanique ou électrique, sont basées sur le contenu spectral de signaux et le plus

souvent à partir du courant absorbé par la machine asynchrone. La connaissance des éléments de construction de la machine asynchrone à cage permet de trouver un modèle dédié à la simulation donnant ainsi une image approximative de l'état de la machine lors de ses régimes de fonctionnement (sain ou avec défaut) et qui fera l'objet du second chapitre

Chapitre II

Diagnostic du défaut statorique de la machine asynchrone

II.1 Introduction

Le court-circuit des spires constitue le défaut le plus nuisible et le plus fréquemment rencontré au stator des machines électriques. Dans ce chapitre, on présentera le modèle du défaut de type court-circuit entre spires de la machine asynchrone triphasé à cage dans le repère de Park, ainsi, on étudie l'effet provoqué par le déséquilibre de la tension d'alimentation par rapport au défaut de court-circuit. Les techniques de détection des défauts considérées sont à base de l'analyse spectrale du courant statorique utilisant la transformée de Fourier rapide FFT en régime stationnaire et la transformée de l'Ondelette (TOD) en régime variable non stationnaire.

II.2 Modèle de la machine asynchrone tenant compte du défaut statorique de type court-circuit

Il s'agit de modéliser une machine active équivalente dont le stator et le rotor sont toujours constitués en compte l'existence des spires en court-circuit au stator de la machine asynchrone, on introduit une bobine supplémentaire court-circuit dont le nombre de spires est n_{cc} égale au nombre de spires en défaut dans la machine [SCH 99]. Ainsi, en présence du déséquilibre statorique provoqué par le défaut, la machine comporte donc en plus des bobinages triphasés statoriques d'axes (a_s, b_s, c_s) un bobinage en court-circuit qui est à l'origine du champ stationnaire par rapport au stator créé lors du défaut [BAC 02].

La figure (2.1) illustre le stator d'une machine asynchrone à une paire de pôles avec un défaut de court-circuit sur la phase b_s du stator. L'effet du défaut fait apparaître dans la machine un nouveau bobinage B_{cc} dont le nombre de spires est égale au nombre de spires en court-circuit de direction égale à $\frac{2\pi}{3}$ (direction de la phase b_s). Afin de bien caractériser ce défaut, il est nécessaire d'introduire deux paramètres [BAC 02]:

- L'angle électrique noté θ_{cc} repérant le bobinage en court-circuit par rapport à l'axe de référence de la phase a_s . Ce paramètre permet la localisation du bobinage en défaut et ne peut prendre que les trois valeurs $0, \frac{2\pi}{3}$ ou $\frac{4\pi}{3}$ correspondant respectivement à un court-circuit sur les phases a_s, b_s ou c_s .
- Le rapport de court-circuit noté η_{cc} égale au rapport du nombre de spire en court-circuit sur le nombre total de spires dans une phase statorique sans défaut.

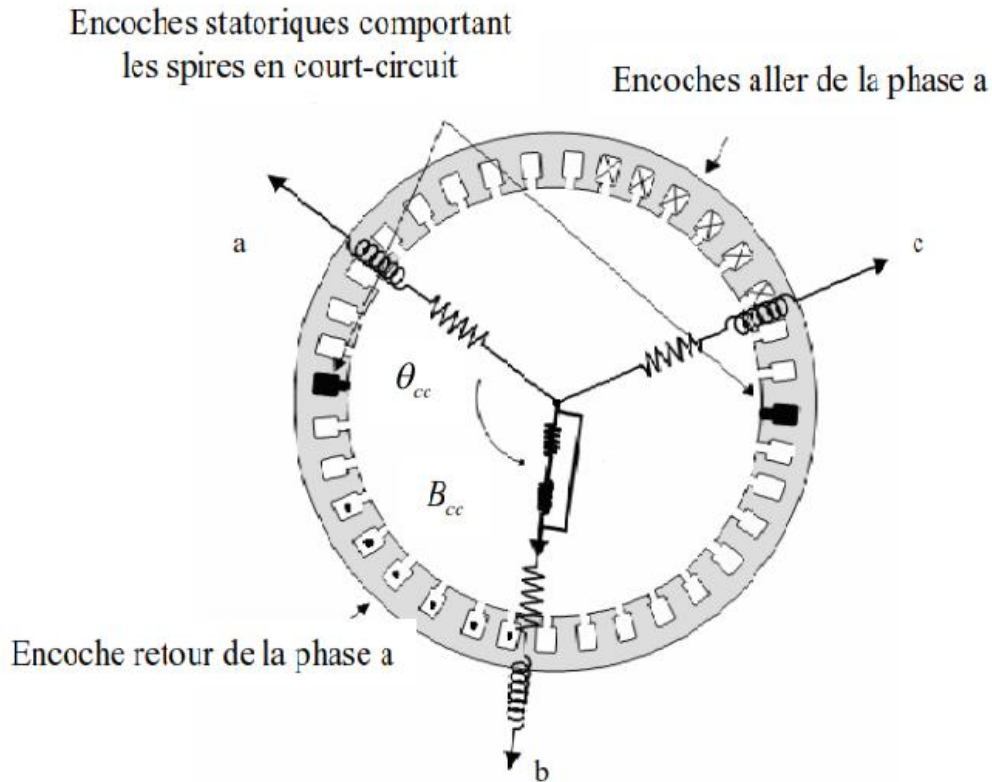


Figure2.1: court-circuit de spires sur la phase b du stator

Selon le modèle établi en référence [BAC 02], on exprime donc les différentes équations de tension et de flux de la machine asynchrone en présence d'un défaut statorique de type court-circuit par l'introduction des paramètres électriques de la bobine en court-circuit " B_{cc} ".

II.2.1 Modèle triphasé de la machine en défaut de court-circuit

On considère que la machine asynchrone à cage d'écureuil est constituée de trois enroulements identiques, à paire de pôle et décalés d'un angle électrique de $\frac{2\pi}{3}$, logés symétriquement dans les encoches du stator et alimentée directement travers le réseau électrique triphasé. Pour le rotor bobine court-circuité, ainsi, il est assimilable à trois enroulements identiques parfaitement symétrique en court-circuit. Ainsi, Les bobinages statoriques sont notés par (a_s , b_s , c_s) et au rotor (a_r , b_r , c_r). L'angle θ caractérise la position angulaire du rotor par rapport au stator, la vitesse angulaire est donc $\omega = \frac{d\theta}{dt}$.

Lorsqu'un court-circuit de spires au stator apparaît, l'application du théorème d'Ampère montre qu'il se crée en plus du champ tournant, une excitation magnétique stationnaire notée H_{cc} de pulsation ω_s due au nouveau bobinage court-circuité B_{cc} parcouru par un courant de court-circuit i_{cc} (figure.2.2) [SCH99].

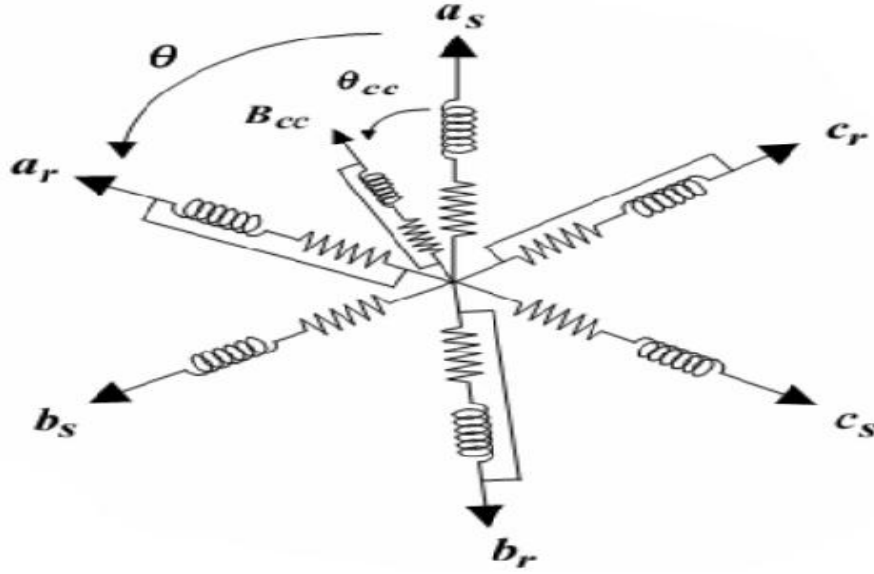


Figure2.2: Enroulement triphasés avec défaut de court-circuit

Le modèle de la machine asynchrone est établi en tentant compte des hypothèses simplificatrices de base suivantes

- La machine est considérée symétrique et entrefer constant,
- La répartition dans l'entrefer de face magnétomotrice et du flux est considérée sinusoïdaux,
- Le circuit magnétique est considéré non saturé et de perméabilité constante,
- Les pertes fer par hystérésis et par courant de Foucault, l'effet de dentures sont considérées négligeables,
- L'effet des encoches est supposé négligeable,

La réduction de spires qui intervient dans une phase à la suite d'un court-circuit est supposée négligeable.

En utilisant L'hypothèse de la linéarité, cette situation est donc équivalente à un fonctionnement "commun" produisant un champ tournant et d'un fonctionnement "différentiel" à l'origine d'un champ supplémentaire orient selon l'axe de la bobine en défaut **[BAC 02]**. Les différentes équations de tensions et de flux de la machine asynchrone en présence du défaut de court-circuit s'écrivent alors:

$$\begin{cases} \underline{u}_s = [R_s] \underline{i}_s + \frac{d}{dt} \underline{\Phi}_s \\ \underline{0} = [R_r] \underline{i}_r + \frac{d}{dt} \underline{\Phi}_r \\ 0 = R_{cc} i_{cc} + \frac{d}{dt} \Phi_{cc} \end{cases} \quad (2.1)$$

et

$$\begin{cases} \underline{\Phi}_s = [L_s] \underline{i}_s + [M_{sr}] \underline{i}_r + [M_{scc}] i_{cc} \\ \underline{\Phi}_r = [M_{rs}] \underline{i}_s + [L_r] \underline{i}_r + [M_{rcc}] i_{cc} \\ \Phi_{cc} = [M_{ccs}] \underline{i}_s + [M_{ccr}] \underline{i}_r + [L_{cc}] i_{cc} \end{cases} \quad (2.2)$$

avec:

$$\begin{aligned}
 [R_s] &= \begin{bmatrix} R_{sa} & 0 & 0 \\ 0 & R_{sb} & 0 \\ 0 & 0 & R_{sc} \end{bmatrix}, & [R_r] &= \begin{bmatrix} R_{ra} & 0 & 0 \\ 0 & R_{rb} & 0 \\ 0 & 0 & R_{rc} \end{bmatrix}, \\
 [L_s] &= \begin{bmatrix} L_{psa} + L_{fsa} & -\frac{L_{sab}}{2} & -\frac{L_{sac}}{2} \\ -\frac{L_{sab}}{2} & L_{psb} + L_{fsb} & -\frac{L_{sbc}}{2} \\ -\frac{L_{sac}}{2} & -\frac{L_{sbc}}{2} & L_{psc} + L_{fsc} \end{bmatrix}, \\
 [L_r] &= \begin{bmatrix} L_{pra} + L_{fra} & -\frac{L_{rab}}{2} & -\frac{L_{rac}}{2} \\ -\frac{L_{rab}}{2} & L_{prb} + L_{frb} & -\frac{L_{rbc}}{2} \\ -\frac{L_{rac}}{2} & -\frac{L_{rbc}}{2} & L_{prc} + L_{frc} \end{bmatrix} \\
 [L_s] &= \begin{bmatrix} M_{sa}r_a \cos(\theta) & M_{sa}r_a \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & M_{sa}r_a \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ M_{sa}r_b \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & M_{sb}r_b \cos(\theta) & M_{sb}r_b \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ M_{sc}r_c \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & M_{sc}r_c \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & M_{sc}r_c \cos(\theta) \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

$$[M_{rs}] = [M_{rs}]^T$$

R_{sx}, R_{rx} : Résistance propre d'une phase statorique et rotorique respectivement,

L_{psx} et L_{fsx} : Inductances principale et de fuite statorique respectivement,

$L_{psx} + L_{fsx}$: Inductance propre d'une phase, statorique

$L_{prx} + L_{frx}$: Inductance propre d'une phase rotorique,

L_{sxy}, L_{rxy} : Mutuelle inductance entre deux phases statorique et rotorique respectivement,

$M_{sx ry}$: Mutuelle inductance entre une phase statorique x et une phase rotorique y,

M_{scc}, M_{rcc} : Mutuelle inductance entre une phase statorique ou rotorique et la bobine en court-circuit,

$\theta = P\theta_{\text{mécanique}}$: Angle électrique de la position du rotor,

P: nombre de paire de pôles.

Ainsi, en satisfaisant les hypothèses ci-dessus, on peut écrire:

$$\begin{cases} R_{sx} = R_s \\ R_{ry} = R_r \\ L_{psx} = L_{pry} = L_{sxy} = L_{rxy} = M_{sxry} = L_p \end{cases} \quad (2.3)$$

Pour élaborer un modèle simplifier de la machine, on totalise les fuites magnétiques au stator. Ceci qui permet de réduire le nombre de paramètres dynamique de la machine, ainsi, on peut écrire:

$$\begin{cases} L_{fry} = 0 \\ L_{fsx} = L_f \end{cases} \quad (2.4)$$

Selon [BAC 01], les mutuelles inductances sont décrites par:

$$\begin{cases} M_{sr}(\theta) = \frac{3}{2} L_p T_{32} P(\theta) T_{23} \\ M_{rs}(\theta) = M_{sr}(\theta)^T = \frac{3}{2} L_p T_{32} P(-\theta) T_{23} \end{cases} \quad (2.5)$$

avec:

$$T_{23} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(0) & \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) \\ \sin(0) & \sin\left(\frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\frac{4\pi}{3}\right) \end{bmatrix}, T_{32} = T_{23}^T$$

et

$$P(\theta) = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta + \frac{\pi}{2}\right) \\ \sin(\theta) & \sin\left(\theta + \frac{\pi}{2}\right) \end{bmatrix} : \text{Matrice de rotation d'angle } \theta$$

R_{cc} : Résistance de la phase en court-circuit (de la bobine B_{cc}) qui s'écrit de manière simple en fonction de la résistance R_s des trios phases statoriques sans défaut:

$$R_{cc} = \eta_{cc} R_s \quad (2.6)$$

avec

$$\eta_{cc} = \frac{n}{n} = \frac{\text{Nombre de spires en court-circuit}}{\text{Nombre de spires sur une phase saine}}$$

On peut écrire les différentes inductances et mutuelles de la phase du court-circuit (de la bobine B_{cc}) comme suites:

$$L_{cc} = \eta_{cc}^2 (L_p + L_f) \quad (2.7)$$

$$\begin{cases} [M_{ccs}] = \eta_{cc}^2 L_p \left[\cos(\theta_{cc}) \cos\left(\theta_{cc} - \frac{2\pi}{3}\right) \cos\left(\theta_{cc} + \frac{2\pi}{3}\right) \right] \\ \quad = \sqrt{\frac{3}{2}} \eta_{cc} L_p [\cos(\theta_{cc}) \sin(\theta_{cc})] T_{23} \end{cases} \quad (2.8)$$

$$[M_{scc}] = [M_{ccs}]^T = \sqrt{\frac{3}{2}} \eta_{cc} L_p T_{32} [\cos(\theta_{cc}) \sin(\theta_{cc})]^T \quad (2.9)$$

$$\begin{cases} [M_{ccr}] = \eta_{cc} L_p \left[\cos(\theta_{cc} - \theta) \cos\left(\theta_{cc} - \theta - \frac{2\pi}{3}\right) \cos\left(\theta_{cc} - \theta + \frac{2\pi}{3}\right) \right] \\ \quad = \sqrt{\frac{3}{2}} \eta_{cc} L_p [\cos(\theta_{cc}) \sin(\theta_{cc})] P(\theta) T_{23} \end{cases} \quad (2.10)$$

$$[M_{rcr}] = [M_{ccr}]^T = \sqrt{\frac{3}{2}} \eta_{cc} L_p T_{32} P(\theta) [\cos(\theta_{cc}) \sin(\theta_{cc})]^T \quad (2.11)$$

II.2.2 Modèle de défaut statorique de la machine asynchrone dans le repère de Park

Le principe de cette transformation repose sur le fait qu'un champ tournant crée par un système triphasé équilibré peut l'être aussi à l'identique par un système biphasé de deux bobines décalées de $\pi/2$ dans l'espace, alimentées par des courants déphasés de $\pi/2$ dans le temps. On se donne pour objectif que les forces magnétomotrices et la puissance instantanée soient conservées. Pour simplifier l'étude analytique de la machine, il est très important de fixer le repère. Il existe trois choix importants de système d'axes de référence ayant des spécificités distinctes. Nous pouvons fixer le repère au stator, au rotor au champ tournant. Il est donc intéressant de pouvoir changer de repère selon les besoins de l'utilisateur. Ainsi, pour un référentiel noté (x) tournant à une vitesse ω_{rep} par rapport au stator de la machine asynchrone.

❖ Référentiel fixe par rapport au stator

Ce référentiel s'appelle repère de Park lié au stator. La simulation de la machine dans ce repère n'exige aucune connaissance sur la position du rotor. Il est souvent utilisé dans l'étude des variations importantes de la vitesse de rotation [BOU06]. Dans ces conditions nous avons: $\omega_{rep} = 0$.

❖ Référentiel fixe par rapport au champ tournant :

Ce référentiel tourne à la vitesse de synchronisme $\omega_{rep} = 2\pi f$ ou f la fréquence d'alimentation de la machine. C'est le repère lié au champ tournant. L'avantage d'utiliser ce référentiel est d'avoir des grandeurs constantes en régime permanent [BAG 05].

❖ Référentiel fixe par rapport au rotor

C'est le repère de Park liée au rotor. Il est utilisé lorsqu'on a accès à la position mécanique, du fait de la quasi-continuité des grandeurs électriques. Nous avons dans ce cas [BEN .9]: $\omega_{rep} = \omega$.

Il est à noter que la transformation triphasé-biphasé est effectuée uniquement sur les grandeurs du régime sain (axes triphasés équilibrés de la machine). Le principe du modèle de défaut établi étant de découpler le mode commun (modèle triphasé équilibré) du mode différentiel correspondant à la bobine en défaut, le déséquilibre agit uniquement sur ce dernier. Ainsi, en présence d'un court-circuit, la machine devient certes non équilibrée du fait de la présence d'un champ supplémentaire au stator mais ce déséquilibre est directement traduit par le bobinage de défaut B_{cc} [BAC 02].

Dans notre étude, pour plus de simplicité, on établit en premier lieu un modèle lié au stator et en second lieu, on change le repère lié au rotor où le référentiel est fixe par rapport au rotor, on change le repère lié au rotor où, les signaux électriques sont alors quasi-continus.

II.2.3 Modélisation de la machine dans la repère de Park lié au stator

On définit les grandeurs électriques ramenées au stator comme suit:

$$\begin{cases} \text{grandeurs statorique : } \underline{x}_{\alpha\beta_s} = T_{23} \underline{x}_s \\ \text{grandeurs statorique : } \underline{x}_{\alpha\beta_r} = T_{23} \underline{x}_r \end{cases}$$

Les grandeurs de court-circuit sont localisées sur une direction fixe au stator, leurs projections sur les axes α_s et β_s permettent de leur associer des vecteurs stationnaires par rapport au stator [BAC 02]:

$$i_{\alpha\beta cc} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) \\ \sin(\theta_{cc}) \end{bmatrix} i_{cc} \quad \Phi_{\alpha\beta cc} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_{cc}) \\ \sin(\theta_{cc}) \end{bmatrix} \Phi_{cc} \quad (2.12)$$

Ainsi, les équation (2.1 et 2.2) des tensions et des flux deviennent:

$$\begin{cases} \underline{U}_{\alpha\beta s} = R_s i_{\alpha\beta s} + \frac{d}{dt} \underline{\Phi}_{\alpha\beta s} \\ 0 = R_r i_{\alpha\beta r} + \frac{d}{dt} \underline{\Phi}_{\alpha\beta r} - \omega P \left(\frac{\pi}{2} \right) \underline{\Phi}_{\alpha\beta r} \\ 0 = R_{cc} i_{\alpha\beta cc} + \frac{d}{dt} \underline{\Phi}_{\alpha\beta cc} \end{cases} \quad (2.13)$$

$$\begin{cases} \underline{\Phi}_{\alpha\beta s} = (L_m + L_f) i_{\alpha\beta s} + \sqrt{\frac{2}{3}} \eta_{cc} L_m i_{\alpha\beta cc} \\ \underline{\Phi}_{\alpha\beta r} = L_m (i_{\alpha\beta s} + i_{\alpha\beta r}) + \sqrt{\frac{2}{3}} \eta_{cc} L_m i_{\alpha\beta cc} \\ \underline{\Phi}_{\alpha\beta cc} = \sqrt{\frac{2}{3}} \eta_{cc} L_m Q(\theta_{cc}) (i_{\alpha\beta s} + i_{\alpha\beta r}) + \left(\frac{2}{3} L_m + L_f \right) \eta_{cc}^2 Q(\theta_{cc}) L_m i_{\alpha\beta cc} \end{cases}$$

Avec :

$L_m = \frac{3}{2} L_p$: Inductance magnétisant.

$$Q_{cc} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_{cc}) \\ \sin(\theta_{cc}) \end{bmatrix} [\cos(\theta_{cc}) \quad \sin(\theta_{cc})] = \begin{bmatrix} \cos(\theta_{cc}) & \cos(\theta_{cc}) \sin(\theta_{cc}) \\ \cos(\theta_{cc}) \sin(\theta_{cc}) & \sin(\theta_{cc})^2 \end{bmatrix}$$

θ_{cc} : L'angle électrique repérant le bobinage en court-circuit

Par ressemblance avec l'étude du schéma équivalent ramené au primaire des transformateurs et négligeant l'inductance de fuite ramenée au stator devant l'inductance magnétisant dans l'expression d flux de court-circuit en (2.14), les équations en (2.14) de la machine asynchrone en défaut statorique deviennent :

$$\begin{cases} \underline{\Phi}_{\alpha\beta f} = \underline{\Phi}_{\alpha\beta m} + \underline{\Phi}_{\alpha\beta cc} = L_f i_{\alpha\beta s} + L_m (i_{\alpha\beta s} + i_{\alpha\beta r} - \tilde{i}_{\alpha\beta cc}) \\ \underline{\Phi}_{\alpha\beta r} = \underline{\Phi}_{\alpha\beta m} = L_m (i_{\alpha\beta s} + i_{\alpha\beta r} - \tilde{i}_{\alpha\beta cc}) \\ \tilde{\underline{\Phi}}_{\alpha\beta cc} = \eta_{cc} Q(\theta_{cc}) \underline{\Phi}_{\alpha\beta} \end{cases} \quad (2.15)$$

Avec:

$$\tilde{i}_{\alpha\beta cc} = -\sqrt{\frac{2}{3}} \eta_{cc} i_{\alpha\beta cc}, \quad \tilde{\underline{\Phi}}_{\alpha\beta cc} = \sqrt{\frac{2}{3}} \underline{\Phi}_{\alpha\beta cc}$$

Les termes $\underline{\Phi}_{\alpha\beta f}$ et $\underline{\Phi}_{\alpha\beta m}$ s'apparentent au flux de fuit statorique et au flux magnétisant de la machine. Le flux magnétisant est associé aux lignes de champ magnétique se refermant par le stator et rotor à l'origine du couple électromagnétique [SCH 99].

Ainsi, en l'équation (2.13) du bobinage en défaut ramenée au primaire s'écrit:

$$\tilde{i}_{\alpha\beta cc} = \frac{2}{3} \frac{\eta_{cc}}{R_s} Q(\theta_{cc}) \frac{d}{dt} \phi_{\alpha\beta m} \quad (2.16)$$

En négligeant les chutes de tension dues à R_s et L_f devant les tensions d'entrée $\underline{U}_{\alpha\beta s}$, on peut approcher les tension aux bornes du quadripôle le court-circuit par les tensions d'entée statoriques [SHC 99]. Les courants de ligne sont alors la somme des courant dus au court-circuit et à des court consommés par le modèle classique de Concordia. Ainsi, il devient possible d'exprimer simplement l'équation du bobinage en défaut dans le repère statorique [BAC 02]:

$$\tilde{i}_{\alpha\beta cc} = \frac{2}{3} \frac{\eta_{cc}}{R_s} Q(\theta_{cc}) \underline{U}_{\alpha\beta s} \quad (2.17)$$

La figure (2.3) représente le schéma électrique équivalent de la machine asynchrone en régime dynamique à fuites totalisées au stator ,tenant compte du défaut de court-circuit [BAC 02].

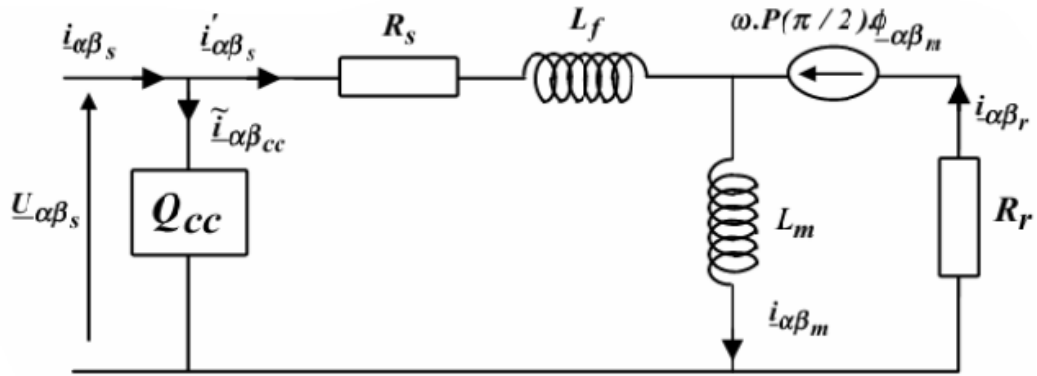


Figure2.3:Premier modèle de court-circuit dans repère lié au stator de la machine asynchrone[BAC 2]

II.2.4 Modélisation dans le repère de Park lié au stator

Le passage des coordonnées (α, β) aux nouvelles coordonnées (d,q) de Park (repère lié au rotor) se fait en appliquant la transformation suivante:

$$\underline{x}_{dq} = P(-\theta) \underline{x}_{\alpha\beta}$$

Les équations électriques de la machine en présence du défaut court-circuit Statorique dans le repère de Park lié au rotor peuvent être écrites:

$$\begin{cases} \underline{U}_{dqs} = R_s i'_{dqs} + \frac{d}{dt} \phi_{dqs} + \omega P\left(\frac{\pi}{2}\right) \phi_{dqs} \\ 0 = R_r i_{dqr} + \frac{d}{dt} \phi_{dqr} \end{cases} \quad (2.18)$$

$$\begin{cases} \phi_{dqs} = (L_f + L_m) i'_{dqs} + L_m i_{dqr} \\ \phi_{dqs} = L_m (i'_{dqs} + i_{dqr}) \end{cases} \quad (2.19)$$

$$\begin{cases} \underline{i}_{dqs} = \underline{i}'_{dqs} + \underline{i}_{dqcc} \\ \underline{i}_{dqs} = \frac{2}{3} \frac{\eta_{cc}}{R_s} P(-\theta) Q(\theta_{cc}) P(-\theta) \underline{U}_{dqs} \end{cases} \quad (2.20)$$

Le mode différentiel est modélisé par le quadripôle Q_{cc} qui étant indépendant de la dynamique du mode commun. Il serait judicieux de généraliser le modèle de défaut pour tenir compte des défauts simultanés sur plusieurs phases en définissant à chaque phase un quadripôle de court-circuit **[BAC 01b]**, comme les trois phases sont référencées par les angles $0, 2\pi/3$ et $4\pi/3$, il suffit donc de définir trois bobinages de court-circuit dont les rapports sont respectivement η_{cc1}, η_{cc2} et η_{cc3} correspondant aux phases (a_s, b_s et c_s) du stator **[BAC 02a]**. Ce qui revient donc à mettre en parallèle trois quadripôles Q_{cck} prenant en charge l'explication d'éventuels bobinages en défaut. Chaque quadripôle sera donc parcouru par un courant $\underline{i}_{dqcc}$ dont l'expression est :

$$\underline{i}_{dqcc} = \frac{2}{3} \frac{\eta_{cck}}{R_s} P(-\theta) Q(\theta_{cck}) P(\theta) \underline{U}_{dqs} \quad (2.21)$$

Avec :

$Q(\theta_{cck})$: Matrice situant l'angle du bobinage en court-circuit.

La figure (2.4) représente le schéma électrique équivalent de la machine asynchrone dans le repère de Park avec fuites totalisées au stator tenant compte d'un éventuel défaut de court-circuit sur une des trois phases **[BEN 09]**.

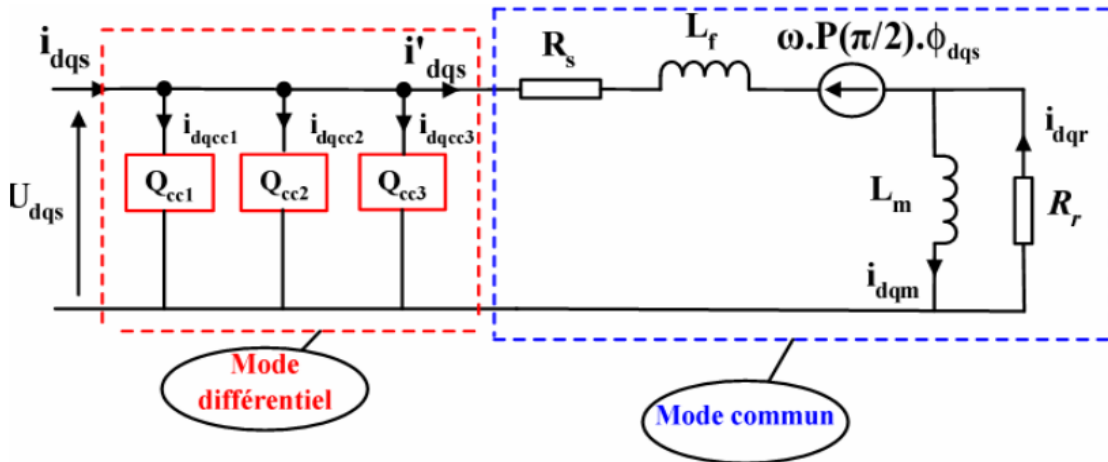


Figure 2.4: Modèle général de court-circuit dans le repère de Park lié au rotor de la machine asynchrone

II.3 Représentation sous forme d'état du modèle du défaut de court-circuit de la machine asynchrone

Le modèle d'état de la machine asynchrone tenant compte du défaut de court-circuit s'obtient en associant le vecteur d'état formé des courants statorique et des flux rotorique avec une entrée et sortie constituée respectivement par des tensions et des courants statorique d'axe d et q . Le modèle d'état de la machine asynchrone peut être donc défini par le système d'équation non linéaires suivant **[BEN 09]**:

$$\begin{cases} \dot{X}(t) = A(\omega)X(t) + Bu(t) \\ Y(t) = CX(t) + Du(t) \end{cases} \quad (2.22)$$

Avec :

$$X = [i'_{ds} \ i'_{qs} \ \phi_{dr} \ \phi_{qr}], u = [U_{ds} \ U_{qs}] \text{ et } Y = [i_{ds} \ i_{qs}]^T$$

et

$$A(\omega) = \begin{bmatrix} -\frac{R_s+R_r}{L_f} & \omega & \frac{R_r}{L_m L_f} & \frac{\omega}{L_f} \\ \omega & -\frac{R_s+R_r}{L_f} & -\frac{\omega}{L_f} & \frac{R_r}{L_m L_f} \\ R_r & 0 & -\frac{R_r}{L_m} & 0 \\ 0 & R_r & 0 & -\frac{R_r}{L_m} \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_f} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_f} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad D = \sum_{K=1}^3 \frac{2}{3} \frac{\eta_{ccK}}{R_s} P(-\theta) Q(\theta_{ccK}) P(\theta)$$

En ajoutant au système (2.22) l'équation mécanique, nous obtenons le modèle complet de la machine en présence du défaut de court-circuit dans le repère de Park liée au rotor.

L'équation mécanique est donnée par:

$$J \frac{d\Omega_m}{dt} = C_{em} - C_r - f_v \Omega_m \quad (2.23)$$

Avec:

J : moment d'inertie du rotor,

f_v : Coefficient de frottement visqueux,

C_r : couple de charge.

L'expression du couple électromagnétique dans le repère de Park avec fuites ramenées au stator est donné par :

$$C_{em} = p(i_{qs}\phi_{dr} - i_{ds}\phi_{qr}) \quad (2.24)$$

Le modèle de la machine dans le repère de Park est donc non linéaire à cause de la présence de la vitesse dans les équations électriques du système d'état.

II.4 Résultat de la Simulation

Une fois le modèle de la machine est établi. On peut aborder l'aspect lié à la simulation sous l'environnement Matlab/Simulink, ce qui offre la possibilité d'observer le comportement Du moteur sous différents états défectueux: court-circuit entre spires au stator et déséquilibre de l'alimentation de la machine.

Les paramètres de la machine utilisée en simulation sont donnés à l'annexe.

• Cas d'un défaut court-circuit entre spire

La simulation du modèle d'état de la machine asynchrone tenant compte du défaut de court-circuit entre spires se fait dans le référentiel de Park lié au rotor et que l'alimentation se fait directement à travers le réseau et à charge moyenne.

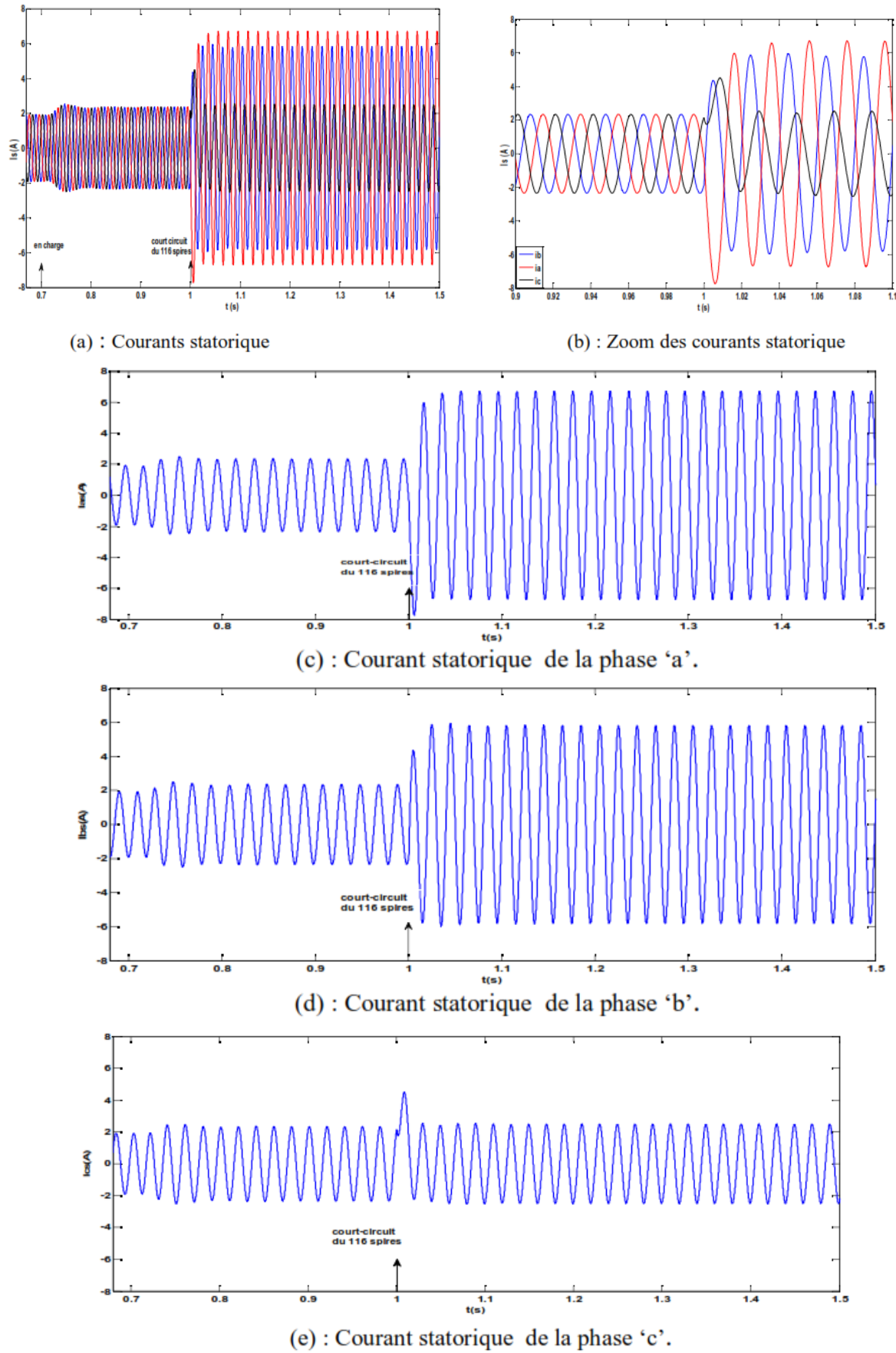


Figure 2.5: courants statorique pour un défaut statorique de 25% de spires court-circuitées sur la phase a_s

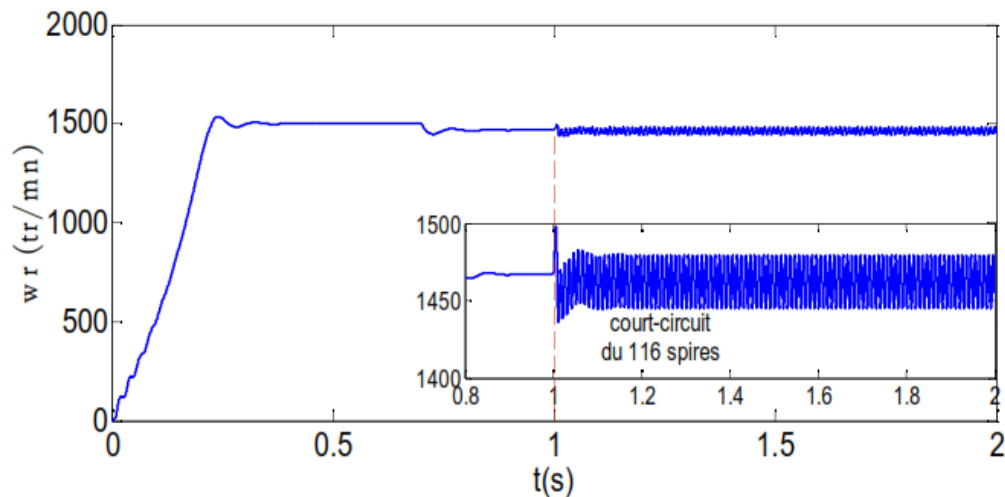


Figure 2.6: Vitesse de la machine pour un défaut de 25% des spires court-circuitées sur la phase

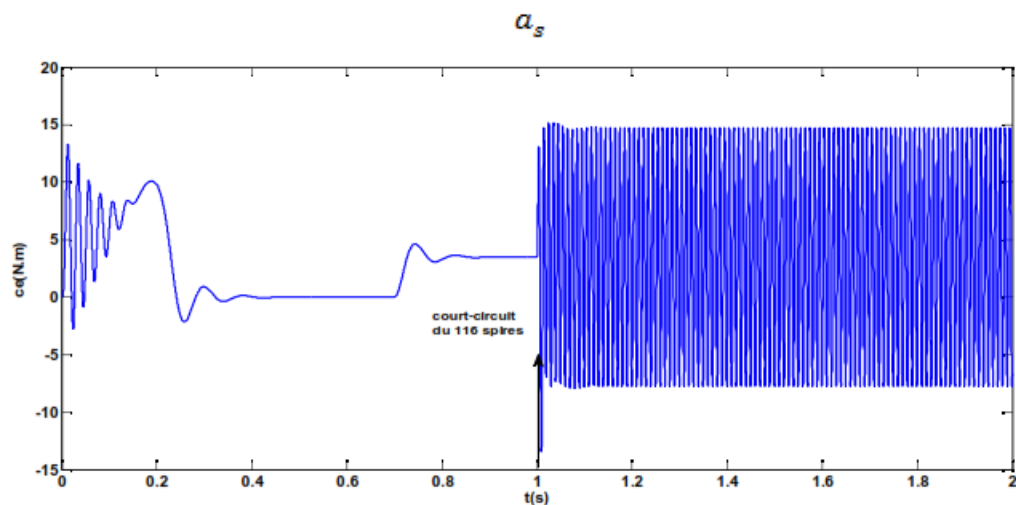


Figure 2.7: couple électromagnétiques de la machine avec un défaut de court-circuit 25% de spires

La figure(2.5) représente les trois courant statorique pour un défaut de court-circuit de 116 spires (soit de 25%) à l'instant $t=1s$ dans la phase a_s . Un déséquilibre se manifeste sous forme d'une augmentation importante au niveau du courant de la phase où s'est produit le défaut et d'une augmentation moins importante pour les deux autres phases(figures 2.5a, 2.5c, 2.5d et 2.5e). Cette augmentation se produit suivant une permutation circulaire directe, En plus du déséquilibre du courant, on remarque aussi un déséquilibre au niveau des déphasage illustrés sur la figure 2.5b qui n'est plus égale à 120° comme en fonctionnement sain. Le défaut de court-circuit de spires dans la phase a_s affecte aussi la vitesse de rotation figure 2.6 et le couple électromagnétique figure 2.7 où ils apparaissent des oscillations qui sont importantes au niveau du couple provoqué par le déséquilibre du courant statorique.

• Cas d'une machine asynchrone saine et une alimentation déséquilibrée

Dans ce cas on considère que la machine est saine, un défaut de déséquilibre de 4% de la tension d'alimentation est réalisé.

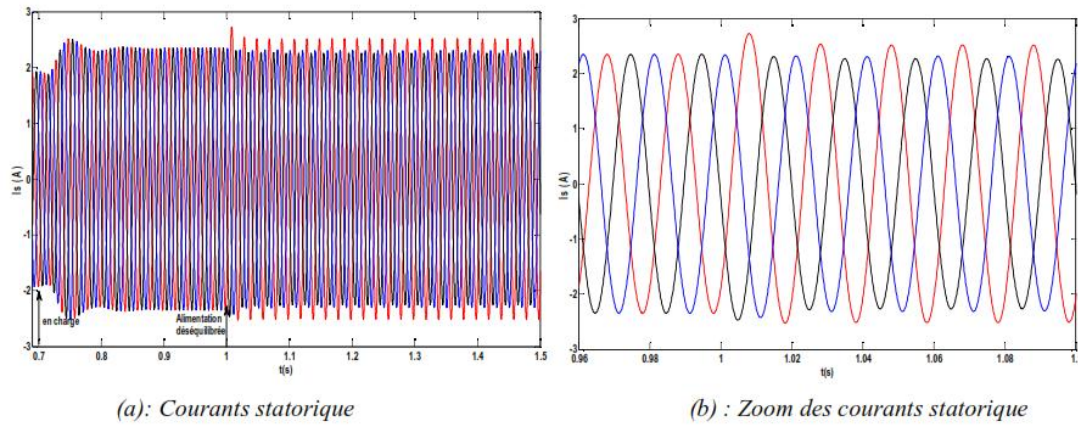


Figure2.8: Courants statorique pour déséquilibre de 4% sur la tension d'alimentation de la phase a_s

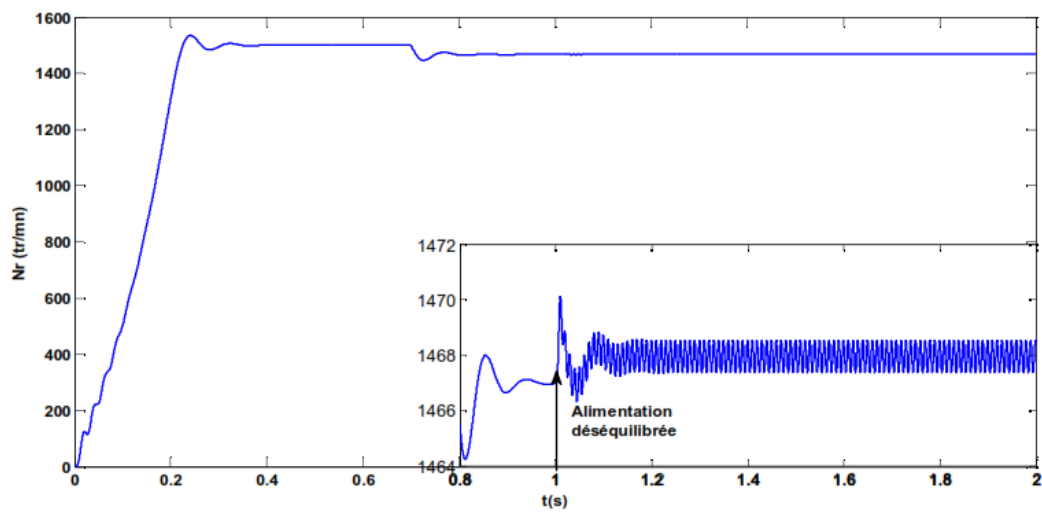


Figure2.9: Vitesse de la machine pour un déséquilibre de 4% sur la tension d'alimentation de phase a_s

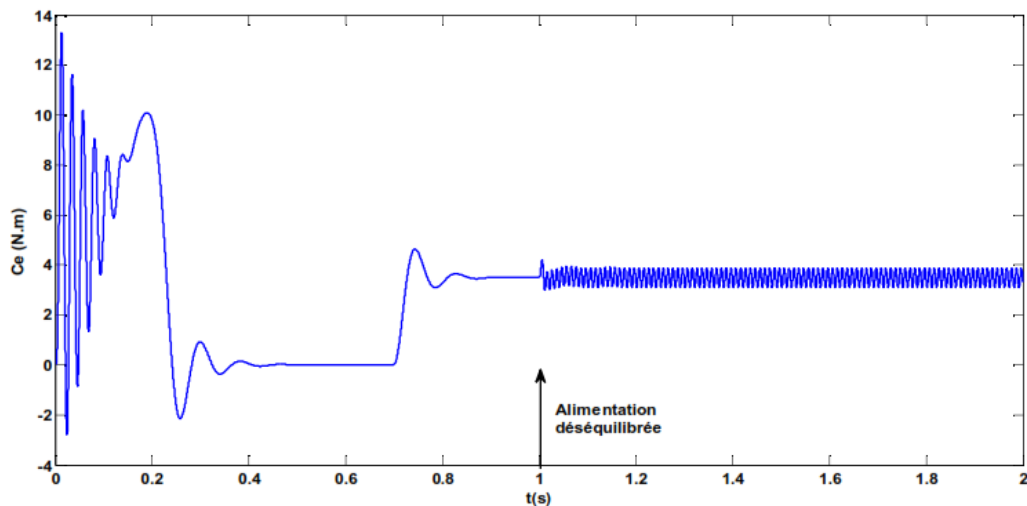


Figure 2.10: couple électromagnétique pour un déséquilibre de 4% sur la tension d'alimentation de la phase a_s

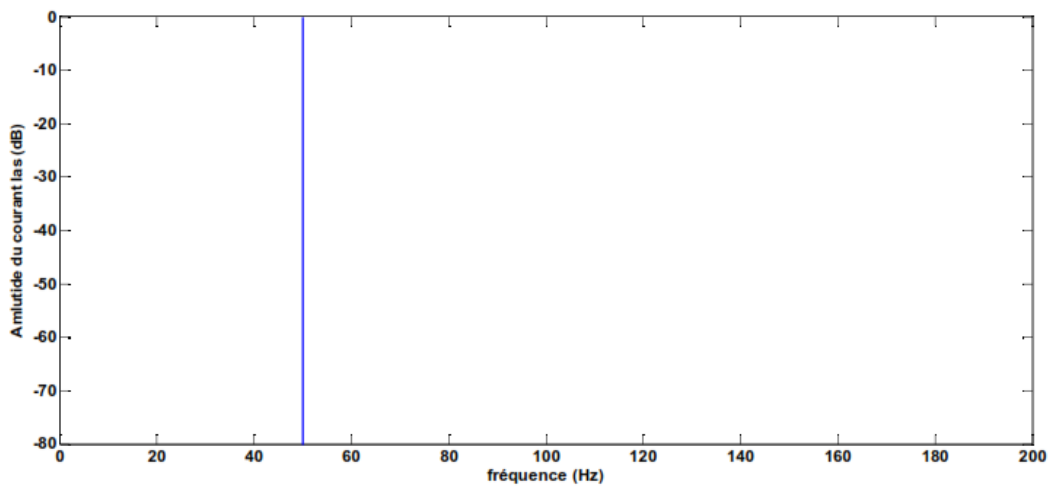
La figure(2.8)représente trios courants statorique pour un déséquilibre de 4% sur la tension d'alimentation de la phase a_s à l'instant $t=1s$. Un déséquilibre se manifeste sous forme d'une augmentation un peu que le défaut court-circuit au niveau du courant de la phase où s'est produit le déséquilibre de tension et les deux autres restent équilibrés. On remarque aussi

les déphasages entre les courants reste inchangé (figure 2.8.a). contrairement au défaut provoqué par le court-circuit des spires.

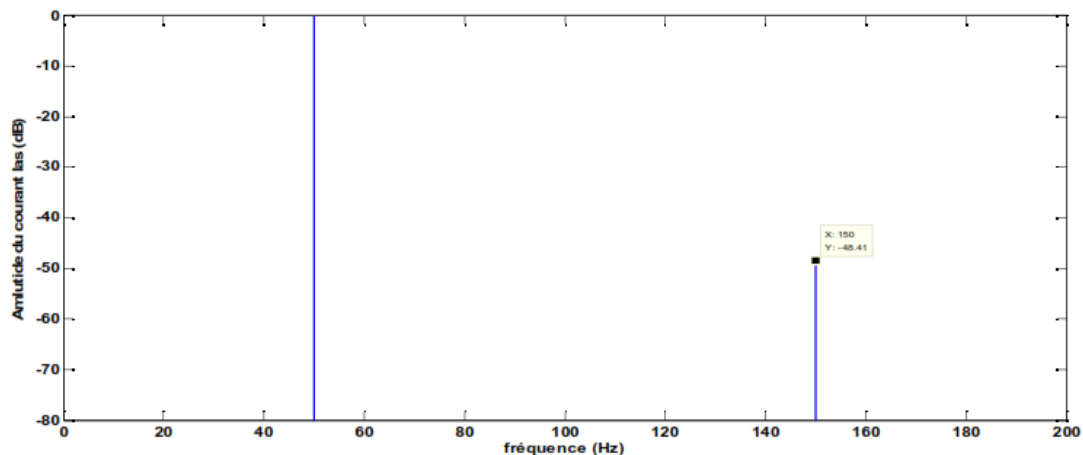
Le déséquilibre de tension dans la phase a_s affecte également la vitesse de rotation figure 2.9 ainsi que le couple électromagnétique figure 2.10 par l'apparitions des pulsations et des vibrations qui sont importantes au niveau du couple provoqué par le déséquilibre du courant statorique, ce qui provoque l'efficacité énergétique et réduit la durée de vie de l'isolation des enroulements de la machine.

II.5 Analyse spectrale du courant statorique par FFT

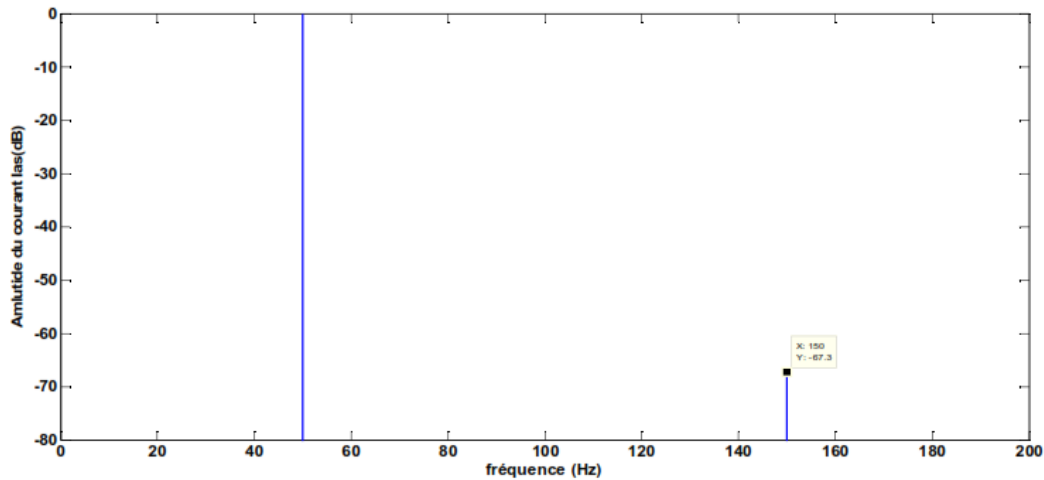
L'analyse spectrale (FFT) du courant statorique se réalise avec un fenêtrage de type Hanning, la période d'échantillonnage est de 10^{-4} pour les cas d'une machine saine et avec défaut de court circuit entre spires au stator et d'une machine saine et avec défaut de court-circuit entre spires au stator et d'un déséquilibre sur les tensions d'alimentation avec charge moyenne 3.5N.m(figure2.11).



(a): Spectre du courant de la phase a_s ; Cas de la machine saine



(b): Spectre du courant de la phase a_s pour une machine en défaut entre spires(25%)



(c): Spectre du courant de la phase a_s pour un déséquilibre de 4% de la tension de la phase a_s

Figure 2.11 : FFT des courants statorique à l'état (a) : sain ; (b) : avec défaut de 25% spires court-circuitées à la phase a_s et (c) : avec une machine alimentée par une tension déséquilibrée (déséquilibre 4% de tension de la phase a_s)

La figure (2.11) représente les spectres du courant i_{as} pour une machine à charge moyenne à l'état sain et en défaut de types court-circuit entre spire et déséquilibre sur la tension d'alimentation.

À l'état sain, on n'observe aucune raie latérale autour de la fondamentale 50 Hz (Figure 2.11a).

Durant le défaut de court-circuit entre spires à la phase a_s (Figure 2.11b), on remarque une seule nouvelle composante de fréquence visible dans les spectres au voisinage du fondamentale à 150 Hz [JOK 00], [GHO 05].

Lors d'un déséquilibre de la tension d'alimentation de la phase a_s (Figure 2.11c), on remarque aussi une seule composante de fréquence voisine au fondamentale correspondant à 150 Hz.

II.6 Conclusion

Ce chapitre a été consacré à la modélisation de la machine asynchrone à cage en vue du pronostique du défaut de court-circuit entre spires au stator de la machine asynchrone. Un modèle simple, essentiellement sensible au changement d'état de court-circuit et du déséquilibre d'alimentation de la machine par le biais du spectre du courant statorique, en utilisant deux techniques à base l'FFT.

Le modèle de défaut rotorique de type cassure ou rupture des barres ainsi son diagnostic par l'analyse spectrale fera l'objet du troisième chapitre.

Chapitre III

Diagnostic du défaut rotorique de la machine asynchrone

III.1 Introduction

Dans ce chapitre, on présentera au début le modèle de défaut rotorique de type rupture de barre de la machine asynchrone triphasé à cage d'écureuil dans le repère de Park en vu de réduire la complexité du modèle, ensuite on utilise en vue la détection de ce défaut deux méthodes de traitement du signale l'une à base de la FFT utilisée en régime permanent et la seconde à base de l'odelette discrète(multi niveau et paquet d'ondelette) en régime transitoire et permanent.

III.2Modèle de défaut rotorique de la machine asynchrone

Dans le cadre du diagnostic, la mise au point d'un modèle est surtout motivée par les possibilités de simuler des défauts. [ABE99],[MAK97],[VAS94] proposent une modélisation multi mailles du rotor de la machine asynchrone à cage d'écureuil faisant intervenir les paramètres électriques des barres et de l'anneau. Outre leur complexité, l'inconvénient de ces modèles est qu'ils nécessitent une connaissance approfondie des paramètres électriques de la machine. Dans le cas d'une approche paramétrique, ces modèles sont inappropriés en raison du nombre élève des paramètres qui les régissent [BAC02].

Comme dans le cas de la modélisation des courts-circuits au stator, le modèle de défaut rotorique explique le déséquilibre à travers un minimum de paramètres qui sont l'image du défaut présent dans la machine .Ces paramètres permettent ainsi de quantifier et de localiser le défaut.

La figure(3.1) illustre la modélisation conventionnelle du rotor par dipôles élémentaires avec une barre cassée [ABE99],[MAN96].

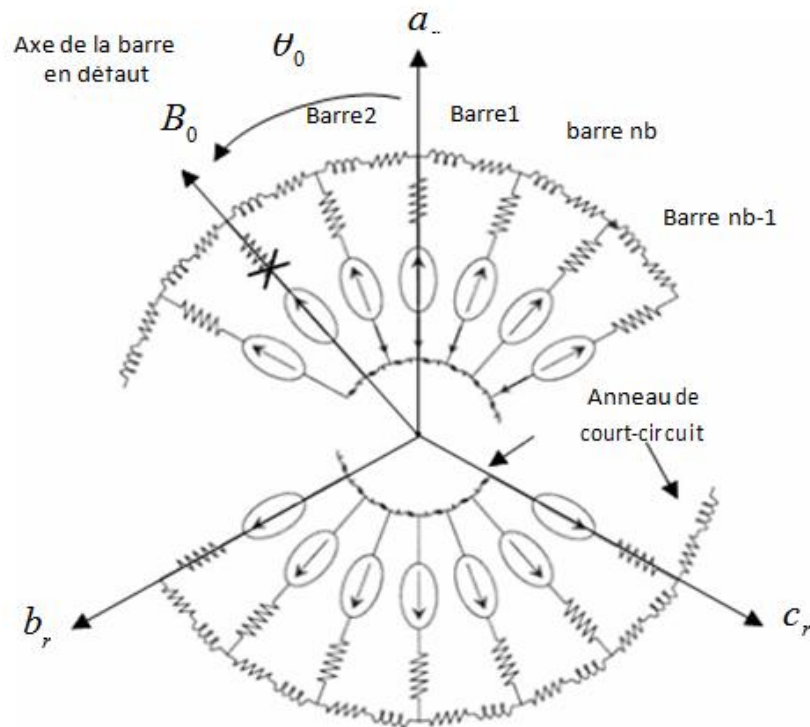


Figure3.1:Modèle par dipoles élémentaires du rotor en défaut [ABE 99]

En effectuant le même raisonnement fait dans le cas de défaut au stator, on suppose que le rotor en défaut est équivalent à un rotor sain, auquel nous ajoutons un bobinage supplémentaire parcouru par un courant fictif i_0 de défaut (se retranchant au courant de la Barre en défaut). Par conséquent le modèle du mode différentiel comporte deux paramètres de défaut permettant la détection et la localisation du défaut de rupture des barres cassées au rotor.

- L'angle électrique θ_0 représente le bobinage en défaut par rapport à l'axe d (axe de l'encoche rotorique dont le courant induit est en phase avec la première phase statorique). Ce paramètre permet la localisation de la barre en défaut.
- Le rapport de défaut noté η_0 égale au rapport du nombre de spires en défaut divisé par le nombre total de spires dans une phase triphasée rotorique fictive sans défaut. Ce Paramètre permet de quantifier le dés équilibres et d'obtenir le nombre de barres cassées.

Le nombre des spires u rotor étant fictif, pour un rotor de n_b barres, si on considère une spire rotorique comme étant une maille constituée de deux barres court-circuitées par deux portions d'anneaux, alors le nombre total des pires rotoriques est égale au nombre de barres au rotor.

- Une phase fictive est constituée donc de $\frac{n_b}{3}$ barres. Pour η_{bc} barres cassées sur une phase, l'expression du rapport de défaut η_{bc} est donnée par [BEN 09]:

$$\eta_0 = \frac{3 \cdot b_c}{n_b}.$$

III.3 Modélisation du défaut de rupture des barres

De même que les défauts statoriques, les équations de tension et de flux de la bobine en défaut B_0 exprimées dans le repère biphasé d'axe d et q lié au rotor sont les suivantes:

$$0 = \eta_0 i_0 + \frac{d\phi_0}{dt} \quad (3.1)$$

$$\phi_0 = \frac{2}{3} \eta_0^2 L_m i_0 + \sqrt{\frac{2}{3}} \eta_0 L_m [\cos(\theta_0) \sin(\theta_0)] (i_{dqs} + i_{dqs}) \quad (3.2)$$

avec :
$$\eta_0 = \frac{\text{Nombre des spires fictives en défaut}}{\text{Nombre total des spires fictives sur une phase}}$$

θ_0 : angle repérant le défaut

Le courant i_0 dans le bobinage représentant le défaut est donc à l'origine du champ magnétique H_0 stationnaire par rapport au rotor et dirige selon l'axe θ_0 . Ce champ magnétique est à l'origine du flux ϕ_0 . En projetant i_0 et ϕ_0 sur les axes d et q de Park, on leur associe les vecteurs stationnaires [BAC 02].

$$\underline{i}_{dq_0} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_0) \\ \sin(\theta_0) \end{bmatrix} i_0, \quad \underline{\phi}_{dq_0} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_0) \\ \sin(\theta_0) \end{bmatrix} \phi_0 \quad (3.3)$$

Donc, l'ensemble des équations de la machine au stator, au rotor et au bobinage B_0 dans le repère rotorique est donne par:

$$\begin{cases} \underline{U}_{dqs} = R_s \underline{i}_{dqs} + \frac{d}{dt} \underline{\phi}_{dqs} + P\omega \left(\frac{\pi}{2} \right) \underline{\phi}_{dqs} \\ \underline{0} = \underline{i}_{dqr} + \frac{d}{dt} \underline{\phi}_{dqr} \end{cases} \quad (3.4)$$

$$\begin{cases} \underline{\phi}_{dqs} = L_f \underline{i}_{dqs} + L_m \left(\underline{i}_{dqs} + \underline{i}_{dqr} + \sqrt{\frac{2}{3}} \eta_0 \underline{i}_{dq_0} \right) \\ \underline{\phi}_{dqr} = L_m (\underline{i}_{dqs} + \underline{i}_{dqr}) + \sqrt{\frac{2}{3}} \eta_0 L_m \underline{i}_{dq_0} \end{cases} \quad (3.5)$$

$$\begin{cases} \underline{0} = \eta_0 R_r \underline{i}_{dq_0} + \frac{d}{dt} \underline{\phi}_{dq_0} \\ \underline{\phi}_{dq_0} = \sqrt{\frac{2}{3}} \eta_0 L_m Q(\theta_0) \left(\underline{i}_{dqs} + \underline{i}_{dqr} + \sqrt{\frac{2}{3}} \eta_0 \underline{i}_{dq_0} \right) \end{cases} \quad (3.6)$$

avec:

$$Q(\theta_0) = \begin{bmatrix} \cos(\theta_0)^2 & \cos(\theta_0) \sin(\theta_0) \\ \cos(\theta_0) \sin(\theta_0) & \sin(\theta_0)^2 \end{bmatrix}$$

Par analogie avec le schéma équivalent du transformateur ramène au primaire, les équations de flux de la machine asynchrone en défaut rotorique deviennent:

$$\begin{cases} \underline{\phi}_{dqs} = \underline{\phi}_{dqf} + \underline{\phi}_{dqm} = L_f \underline{i}_{dqs} + L_m (\underline{i}_{dqs} + \underline{i}_{dqr} - \tilde{\underline{i}}_{dq_0}) \\ \underline{\phi}_{dqr} = \underline{\phi}_{dqm} = L_m (\underline{i}_{dqs} + \underline{i}_{dqr} - \tilde{\underline{i}}_{dq_0}) \\ \tilde{\underline{\phi}}_{dq_0} = \eta_0 Q(\theta_0) \underline{\phi}_{dqm} \end{cases} \quad (3.7)$$

avec:

$$\tilde{\underline{i}}_{dq_0} = -\sqrt{\frac{2}{3}} \eta_0 \underline{i}_{dq_0}, \quad \tilde{\underline{\phi}}_{dq_0} = \sqrt{\frac{2}{3}} \underline{\phi}_{dq_0}$$

De même, on peut écrire l'équation de tension du bobinage en défaut ramenée au primaire par:

$$\tilde{\underline{i}}_{dq_0} = \frac{2}{3} \frac{\eta_0}{R_r} Q(\theta_0) \frac{d}{dt} \underline{\phi}_{dqm} = R_0^{-1} \frac{d\tilde{\underline{\phi}}_{dqm}}{dt} \quad (3.8)$$

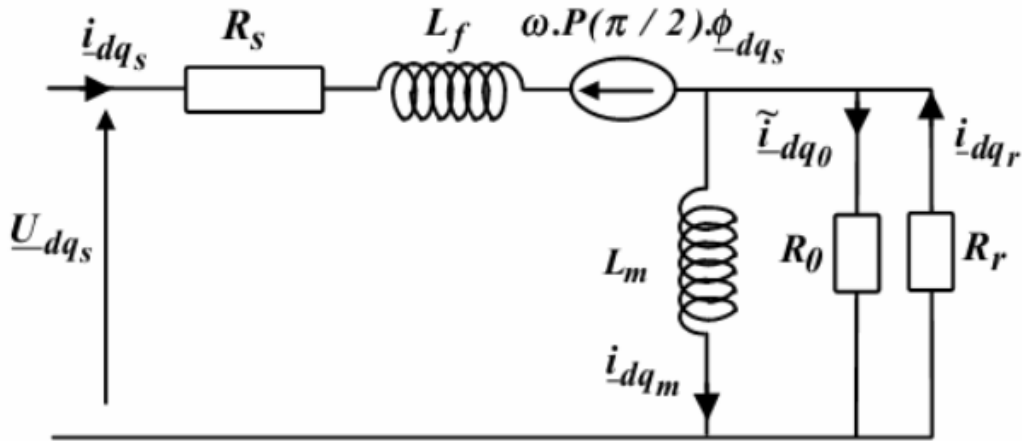


Figure 3.2 : Premier modèle de la machine avec défauts rotoriques [BAC 02].

La figure (3.2) représente le schéma équivalent de la machine asynchrone en défaut de rupture de barres dans le repère de Park lié au rotor.

III.3.1 Schéma équivalent

D'après l'équation (3.8), la bobine B_0 repères en tant le défaut se ramène à un simple quadripôle résistif mis en parallèle avec l'inductance magnétisante et la résistance rotorique. Dans le repère de Park, la mise en équation d'état d'un tel système reste complexe; il s'avère plus judicieux d'établir le schéma équivalent de la machine avec résistance rotorique et résistance de défaut totalisé au rotor. Ainsi, la résistance équivalente R_{eq} est la mise en parallèle de la résistance rotorique R_r la résistance de défaut R_0 . L'expression de la matrice résistance équivalente au rotor est alors obtenue comme suit [BAC 02]:

$$\begin{aligned} R_{eq}^{-1} &= R_r^{-1} + R_0^{-1} \\ &= R_r^{-1} + \frac{2}{3}\eta_0 R_r^{-1} Q(\theta_0) \end{aligned} \quad (3.9)$$

En inversant pour obtenir l'expression de la matrice résistance équivalente:

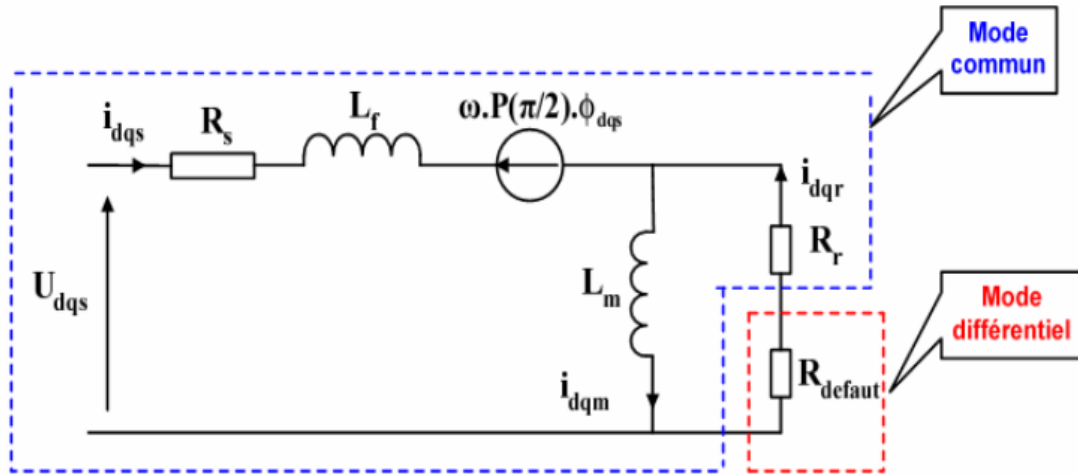
$$\begin{aligned} [R_{eq}] &= [R_r] + [R_{défaut}] \\ &= [R_r] - \frac{\alpha}{1-\alpha} Q(\theta_0) [R_r] \end{aligned} \quad (3.10)$$

avec:

$$\begin{aligned} [R_r] &= R_r \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \\ \alpha &= \frac{2}{3}\eta_0 \end{aligned}$$

$$\begin{bmatrix} \cos(\theta_0)^2 & \cos(\theta_0) \sin(\theta_0) \\ \cos(\theta_0) \sin(\theta_0) & \sin(\theta_0)^2 \end{bmatrix}$$

La figure (3.3) représente le schéma électrique équivalent de la machine asynchrone avec défaut rotorique, les fuites ramenées au stator. La rupture de barre au rotor est représentée par la résistance équivalente au rotor qui ce dernier est la mise en série de la résistance saine R_r et d'une matrice résistance de défaut $R_{\text{défaut}}$.



III.4 Représentation d'état du modèle de défaut rotorique

On remarque à partir de la figure (3.3) le modèle de la machine asynchrone avec défaut rotorique et le même que celui de la machine en fonctionnement sain sauf que la résistance rotorique est remplacée par la résistance équivalente. La machine asynchrone peut être donc décrite par le système d'équations suivant:

$$\begin{cases} \dot{X}(t) = A(\omega)X(t) + Bu(t) \\ Y(t) = CX(t) + Du(t) \end{cases} \quad (3.10)$$

avec:

$$X = [i_{ds} \ i_{qs} \ \Phi_{dr} \ \Phi_{qr}]^T, u = [U_{ds} \ U_{qs}]^T \text{ et } Y = [i_{ds} \ i_{qs}]^T$$

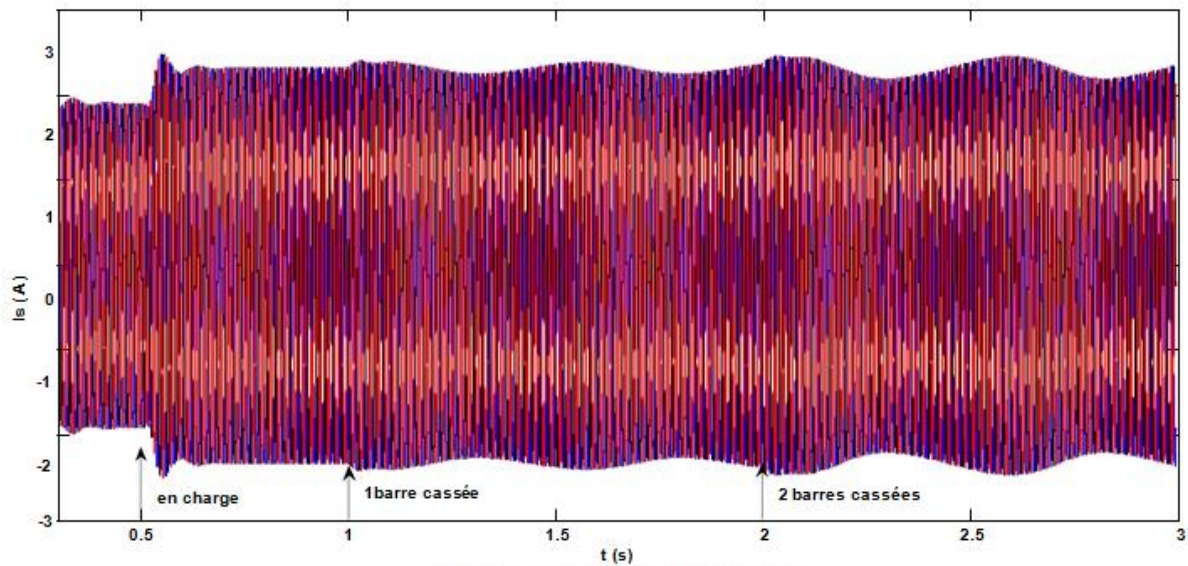
et

$$A(\omega) = \begin{bmatrix} -([R_s] + [R_s])L_f^{-1}\omega P\left(\frac{\pi}{2}\right) & \left([R_{sq}]L_m^{-1} - \omega P\left(\frac{\pi}{2}\right)\right)L_f^{-1} \\ [R_{sq}] & -[R_{sq}]L_m^{-1} \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_f} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_f} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

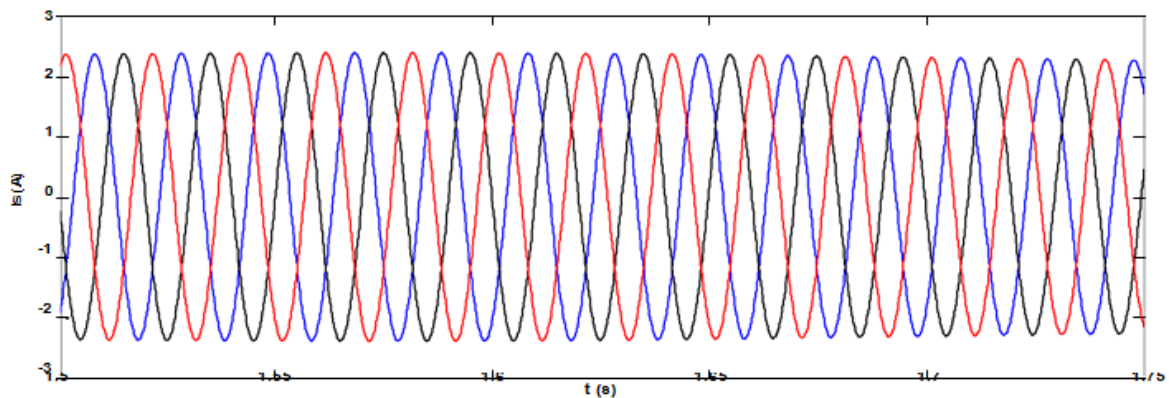
$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad [R_{sq}] = [R_r] \left(1 - \frac{\alpha}{1 + \alpha} Q(\theta_0)\right)$$

III.5 Résultat de la simulation

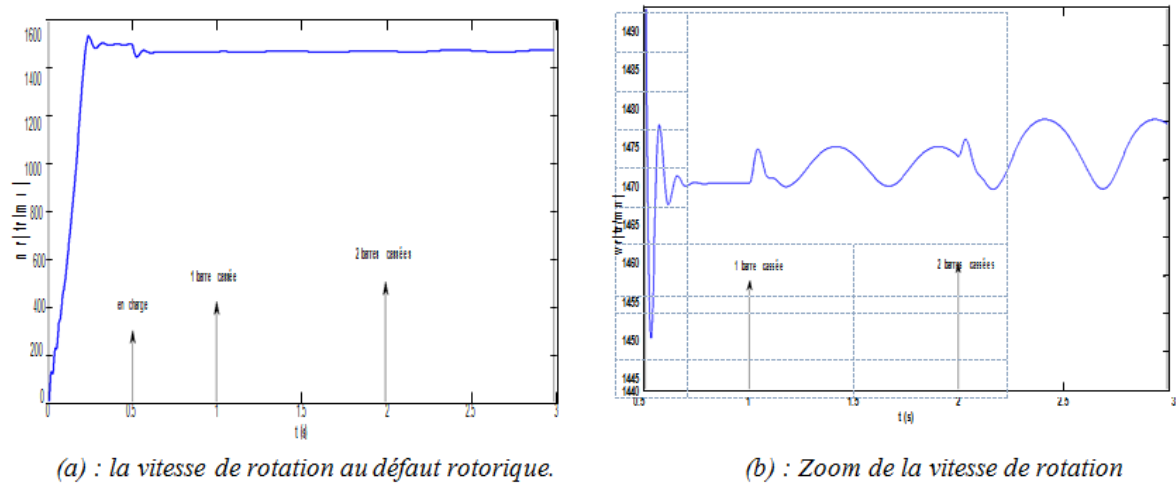
La simulation de la machine est effectuée au début en fonctionnement à vide, la charge de 3.5N.m est appliquée à $t=0.5s$, le défaut d'une barre est introduit à $t=1s$, le second défaut de barre est introduit à $t=2s$. Les résultats obtenus sont comme suit:



(a) : les courants statoriques

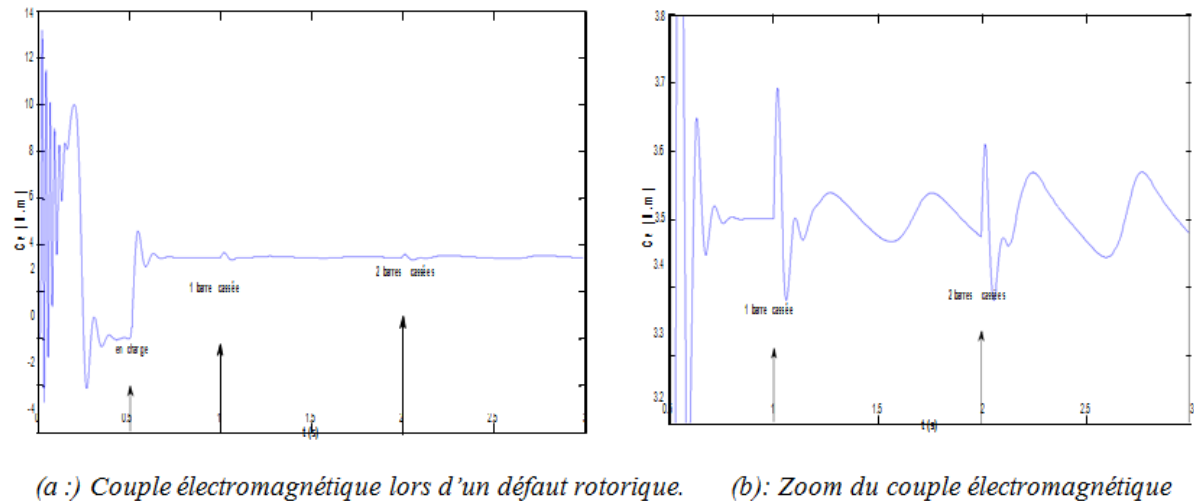


(b) : zoom de courants statoriques.

Figure 3.4: Courants statorique de la machine avec défaut de rupture de barres au rotor.

(a) : la vitesse de rotation au défaut rotorique.

(b) : Zoom de la vitesse de rotation

Figure 3.5: Vitesse de rotation de la machine avec défaut des barres cassées au rotor

(a) : Couple électromagnétique lors d'un défaut rotorique.

(b): Zoom du couple électromagnétique

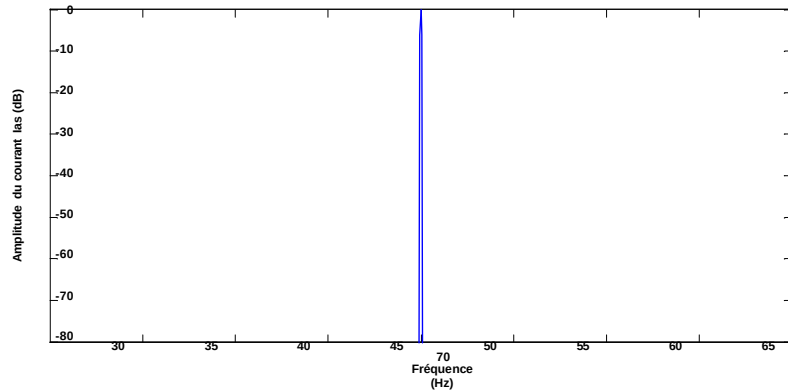
Figure 3.6: Couple électromagnétique de la machine avec défaut des barres cassées au rotor

D'après la figure (3.4a), on constate que lors d'un défaut de rupture de barres au rotor, il y a apparition d'ondulations identiques sur les trois courants statorique, l'amplitude de cette ondulation est proportionnelle au nombre de barres cassées dont on remarque que l'amplitude des oscillations augmente avec l'augmentation du nombre de barres cassées. On remarque aussi que les courants statorique restent toujours déphasés par 120° entre eux (figure 3.4b).

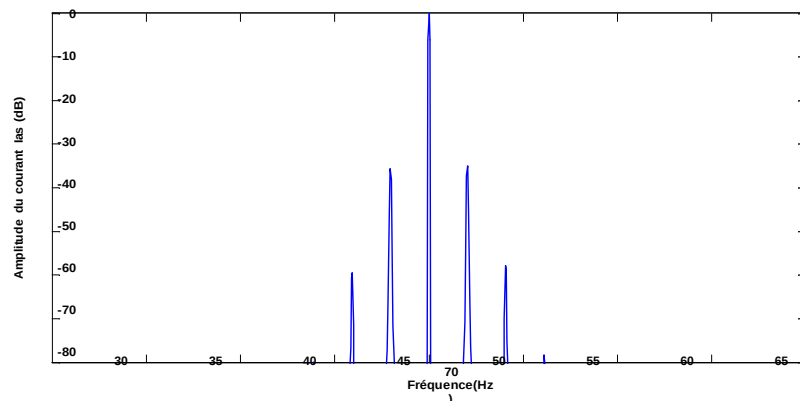
De même, le défaut rotorique fait apparaître des ondulations au niveau de la vitesse et du couple électromagnétique comme le montre respectivement la figure (3.5) et (3.6). Les ondulations du couple fait augmenter la vibration du moteur et accélèrent la détérioration de ce dernier

III.6 Analyse du courant statorique par la FFT

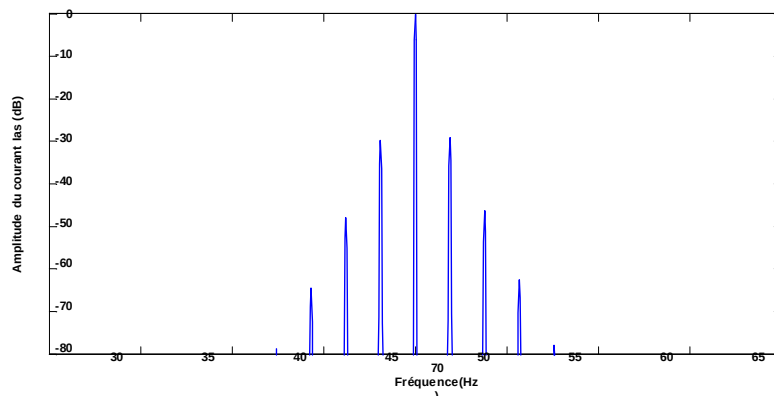
On considère que la machine est alimentée directement à travers un réseau triphasé avec une charge moyenne de 3.5N.m. L'analyse spectral par la FFT est effectuée sur le courant d'une phase statorique pour un rotor sain et avec défaut des barres cassées, avec un fenêtrage de type "Hanning", l'acquisition s'est effectuée à une période d'échantillonnage de 10^{-4} sur une durée totale de 20s. Ces résultats sont représentés sur la figure (3.7).



(a) : Machine saine



(b) : Machine avec une seule barre cassée



(c) : Machine avec deux barres cassées

Figure 3.7: Spectre du courant statorique pour une machine en régime sain et avec défaut rotorique.

En fonctionnement sain de la machine, on n'observe aucune raie latérale autour du fondamentale à 50 Hz (figure 3.7a), qui représente le contenu spectral du courant statorique en régime permanent. En fonctionnement avec défaut d'une et deux barres cassées (figures 3.7 b et 3.7c), il y a une apparition des raies latérales au voisinage du fondamentale correspondant aux raies de défaut. On constate l'apparition de raies en symétrie autour de la fréquence fondamentale. La différenciation entre une et deux barres cassées ne semble pas évidente même si l'amplitude des raies augmente avec celle du défaut.

La cassure d'une barre rotorique crée dans l'entrefer de la machine, un champ tournant inverse de fréquence gfs . L'interaction de ce champ tournant avec la vitesse rotorique crée une composante de fréquence $(1-2g)fs$ dans le spectre du courant statorique. La présence de cette harmonique dans le courant statorique induit une oscillation au niveau du couple électromagnétique de la machine de fréquence $2gfs$. Cette oscillation du couple crée inévitablement une oscillation de la vitesse rotorique à la même fréquence qui induit une nouvelle composante de fréquence $(1+2g)fs$ dans le spectre du courant statorique. Et par un processus identique, on obtient une série d'harmoniques de fréquences données par : $(1 \pm 2kg)fs$ avec $k = 1, 2, 3, \dots$

Dans les deux tableaux ci-dessous (tableau 3.1 et 3.2), on a résumé les fréquences des harmoniques induites dans les courants statoriques déduite et calculer suite à un défaut de barres (une et deux barres cassées). Ces fréquences sont calculées de la formule $(1 \pm 2kg)fs$ et déduites avec l'allure de FFT directement.

$g = 2.04\%$ $f_s = 50\text{Hz}$	$(1 - 4g)f$	$(1 - 2g)f$	$(1 + 2g)f$	$(1 + 4g)f$
f_{calculer} (Hz)	45.93	47.96	52.4	54.07
$f_{\text{déduite}}$ (Hz)	45.95	47.95	52.05	54.05
Amplitude(dB)	-59.42	-35.66	-34.93	-57.87

Tableau 3.1: Fréquences calculées et déduites, en cas d'un défaut d'une seule barre cassée

$g = 1.90\%$	$(1 - 6g)f$	$(1 - 4g)f$	$(1 - 2g)f$	$(1 + 2g)f$	$(1 + 4g)f$	$(1 + 6g)f$
f_{calculer} (Hz)	44.31	46.20	48.10	51.89	53.79	55.69
$f_{\text{déduite}}$ (Hz)	44.32	46.21	48.11	51.89	53.79	55.68
Amplitude(dB)	-64.54	-47.89	-29.79	-29.1	-46.35	-62.49

Tableau 3.2: Fréquences calculées et déduites, en cas d'un défaut de deux barres cassées

Selon ces tableaux, on remarque que les fréquences $(1 \pm 2.k.g).f_s$ des raies latérales déduites des courbes de l'analyse spectrale correspondent aux valeurs théoriques (calculées) de ces fréquences. Ainsi, on constate que les raies de défaut de deux barres augmente plus que défaut à une seule barre cassées, ce dernier est plus illustré surtout à l'harmonique $(1 \pm 6g)f_s$ que au défaut d'une seule barre est très petite qui on ne peut être vu, par contre au défaut de deux barres il est très claire.

III.7 Conclusion

Ce chapitre a été consacré à la modélisation de la machine asynchrone à cage tenant compte du défaut de rupture de barres, le modèle simple est essentiellement sensible au changement d'état de la machine, ensuite, le diagnostic est réalisé pour la détection du défaut par la technique de traitement de signale FFT qui est une méthode classique, elle nous a donné de bon résultat pour la détection du défaut de cassures de barres mais cela a pris longtemps et il faut d'être en régime stationnaire.

Ce mémoire a été consacré à la modélisation et à l'utilisation des méthodes de diagnostic en vue de la surveillance des entraînements électriques, et plus particulièrement la machine asynchrone à cage d'écureuil.

L'étude est basée sur deux objectifs principaux, le premier est la modélisation et la simulation des défauts statorique, rotorique et le second c'est l'utilisation la méthode d'analyse du signal en vue du diagnostic et la détection des défauts dans la machine, à base de la transformation de Fourier rapide (FFT) .

Pour mener cette étude, une modélisation et la simulation dans le repère de Park des défauts de court circuit entre spire de la phase as et du déséquilibre de la tension d'alimentation sont présentés, un modèle simple de défaut basé sur l'association de modèle réellement représentatifs des défauts avec le mode commun (sain) et le mode différentiel (de défaut). Une technique de détection est utilisée où l'effet du défaut se manifeste par l'analyse FFT du courant statorique à travers l'apparition des raies de défaut à la fréquence de 150Hz pour les deux types de défauts; ce qui rend le pronostic délicat (ressemblance).

Un second type de défaut au rotor a été étudié à travers la mise au point de modèles de défaut de cassure de barre de la machine. La mise en œuvre du modèle de défaut est considérée simple tenant en compte du déséquilibre de la matrice de résistance rotorique en situation de défaut. Les résultats obtenus montrent que la FFT peut indiquer la présence du défaut de rupture de barre par la présence des raies vis-à-vis le fondamentale.

En perspective, pour améliorer notre étude du diagnostic des défauts de la machine, l'étude pourrait être élargie en considérant d'autre type des défauts (excentricité, roulements....) et d'autre outil de diagnostic et de détection avancées (réseaux neurones, logique floue, neuro flou) ou par estimation paramétriques surtout en régime variable.

Un modèle de défaut mixtes ou combiné de type statorique et rotorique simultanés sera établi à savoir le court-circuit entre spires ou le déséquilibre d'une phase de la tension d'alimentation et la rupture de barre

Les paramètres de la machine asynchrone triphasée utilisée sont :

Puissance nominale	1.1 kW
Fréquence nominale	50 Hz
Tension nominal	400/230 V
Courant nominal	2.6/4.3 A
Vitesse nominale	1425 tr/mn
Nombre de paire de pôles	2
Nombre de barres au rotor	28
Nombre des encoches du stator	48
Nombre de spires par phase	464

Références bibliographiques

Références bibliographiques.

- [ABE 99] A. ABED, L. BAGHLI, H. RAZIK & A. REZZOUG "Modelling induction motors for diagnosis purposes" EPE'99, Lausanne, Suisse, pp.1-8, September 1999.
- [ABE 02] A. ABED, "Contribution à l'Etude et au Diagnostic de la Machine Asynchrone", Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy-1, mars 2002.
- [ANT 06] J. A. Antonino-Daviu, M. Riera-Guasp, J. R. Folch, M. P. M. Palomares, "Validation of a New Method for the Diagnosis of Rotor Bar Failures via Wavelet Transform in Industrial Induction Machines," IEEE Transactions on Industry Application, Vol. 42, No. 4, pp. 990–996, Jul./Aug. 2006.
- [BAC01a] S. BACHIR, S. TNANI, J.C. TRIGEASSOU, and G. CHAMPENOIS "Diagnosis by parameter estimation of stator and rotor faults occurring in induction machines", European Power Electronics EPE'01, Aout 2001, Graz (Autriche).
- [BAC01b] S. BACHIR, S.TNANI, T. POINOT, J.C. TRIGEASSOU, "Stator Fault Diagnosis in Induction Machines by Parameter Estimation", IEEE SDEMPED'01, 1-3 September 2001, pp.235-239, Grado-Italie.
- [BAC 02a] S. BACHIR, S. TNANI, J.C. TRIGEASSOU, "Diagnostic en ligne des défauts statoriques sur la machine asynchrone", Colloque GEVIQ'2002 – Marseille 12&13 Juin 2002.
- [BAG 99] L. BAGHLI, "Contribution à la commande de la machine asynchrone, utilisation de la logique floue, des réseaux de neurones, et des algorithmes génétiques", Thèse de Doctorat de l'Université Henri Poincaré, Nancy-I, France, 14 janvier 1999.
- [BAG 05] L. BAGHLI, "Modélisation et commande de la machine asynchrone", IUFM de Lorraine, 2005
- [BOU 01] T. BOUMEGOURA, "Recherche de signature électromagnétique des défauts dans une machine asynchrone et synthèse d'observateurs en vue de diagnostic", Thèse de Doctorat de l'Ecole centrale de Lyon, France, Mars 2001.
- [BOU 05] M. BOUZID, N. MRABET, K. JELASSI, S. MOREAU "Faulty Inter-turns Short-Circuit Phase Detector by Neural Network" Artificial and Computational Intelligence for Decision, Control, and Automation (ACIDCA), 06 November 2005 Tozeur Tunisia.
- [BOU 06] M. BOUHARAKET, "Etude de l'évolution des courants rotoriques d'une machine asynchrone à cage en régime dynamique", Thèse de Doctorat d'Université de Batna, Algérie, 15 février 2006.
- [BOU 07] R.Bousseksou Modélisation analytique des machines Asynchrone application au diagnostic. Mémoire de Magister. Université Mentouri Constantine. Algérie 2007.

- [CAM 86]** J. R. Cameron and al. "Vibration and Current Monitoring for Detecting Airgap eccentricity in Large Induction Motors", I EE Proceedings, Vol. 133, Pt. B, No. 3, May 1986, pp. 155-163.
- [CAR 98]** Caryn M. Riley, Student Member, IEEE, Brian K. Lin, Thomas G. Habetler, Senior Member, IEEE, and Randy R. Schoen, Member, IEEE, "A Method for Sensorless On-Line Vibration Monitoring of Induction Machines", IEEE Trans. on Ind. Appl., Vol. 34, No. 6, Nov. /Dec. 1998.
- [CUS 08]** J. Cusido, L. Romeral, J. A. Ortega, J. A. Rosero, A. Garcia, "Fault detection in induction machines using power spectral density in wavelet decomposition," IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 55, No. 2, pp. 633–643, Feb. 2008.
- [GAO 12]** M. Gaouaoui Diagnostic par reconnaissance des formes : Application à la machine asynchrone. Thèse de Magister. Université mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou. Algérie 2012
- [GHO 05]** A. Ghoggal, "Diagnostic de la machine asynchrone triphasée: modèle dédié à la détection des défauts, " Thèse de Magistère, Université de Batna, Algérie, May 2005.
- [HEN 03]** H. Henao, and al. "A frequency-domain detection of stator winding faults in induction machines using an external flux sensor," IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 39, No. 5, pp. 1272–1279, Sep./Oct. 2003
- [HSU 95]** J. S. Hsu, "Monitoring of Defects in Induction Motors Through Air-Gap Torque Observation", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 31, No.5, Sept./Oct. 1995, pp. 1016-1021.
- [JOK 00]** M. G. Joksimovic, J. Penman and N. Art hur, "T he detection of inter-turn short circuits in the stator winding of operating motors,» IEEE Trans. Industrial Electronics, vol. 47, no. 5, October 2000, pp. 1078-1084.
- [KIA 09]** S. H. Kia, H. Henao, G. A. Capolino, "Diagnosis of broken-bar fault in induction machines using discrete wavelet transform without slip estimation," IEEE Transactions on Industry Application, Vol. 45, No. 4, pp. 107– 121, Jul/ Aug. 2009.
- [KHE 94]** M. Khelif, "Contribution à l'étude et la prédiction des défauts de vieillissement par fatigue thermique des composants d'électronique de puissance", Thèse de doctorant, Ecole Centrale de Lyon, CEGELY, 1994.
- [KHE 09]** A.Khatir. Etude comparative des modèles des machines asynchrones utilisés en diagnostic des défauts .Thèse de Magister .Université Ferhat Abbas de Sétif .Algérie 2009.
- [LEG 96]** S. E. Legowski, A and al., "Instantaneous Power as Medium for the Signature Analysis of Induction Motors". IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 32, No.4, July/August 1996, pp. 904-909.

- [LUJ 99]** L. Ljung, "System identification: Theory for the user", 2nd ed., PTR Prentice Hall Saddle River, N.J., 1999.
- [MAI 92]** R. Maier, "Protection of Squirrel-Cage Motor Utilizing Instantaneous Power and Phase Information", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 28, No. 2, March/April 1992, pp. 376-380.
- [MEN 07]** A. Menacer, "Contribution à l'identification des paramètres et des états d'une machine à induction pour diagnostic et développement de commande robuste: robustesse vis-à-vis de défauts", Thèse de doctorat, Université de Batna, Décembre
- [MOR 99]** S. MOREAU, "Contribution à la modélisation et à l'estimation paramétrique des machines électriques à courant alternatif : application au diagnostic", Thèse de Doctorat de l'Université de Poitiers, Novembre 1999.
- [NAN 05]** S. Nandi, H.A. Toliyat, and Xiaodong Li, "Condition Monitoring and Fault Diagnosis of Electrical Motors-A Review", IEEE Transaction on Energy conversion, Vol. 20, No. 4, December 2005.
- [ORA 88]** E. Oran Brigham, "Fast Fourier transform and its applications," Prentice Hall, 1988.
- [SAH 03]** M. Sahraoui, "Contribution aux diagnostics des machines asynchrones triphasées à cage," Mémoire de Magistère, Université Mohamed Khider, Biskra, Décembre 2003.
- [SAH 10]** M. Sahraoui, " Etude comparative des méthodes de diagnostic des machines asynchrones," Thèse de Doctorat, Université de Biskra, Déc. 2010.
- [WIL 00]** W. R. Finley, M. M. Hodowanec, W. G. Holter, "An analytical approach to solving motor vibration problems," IEEE Transactions on Industry Application, Vol. 36, No. 5, pp. 1467-1480. Sept. /Oct. 2000