

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

BADJI MOKHTAR- ANNABA UNIVERSITY
UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA



جامعة باجي مختار- عنابة

Année : 2019

Faculté: Sciences de l'Ingéniorat
Département: Electronique

MEMOIRE

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

**Diagnostic des Défauts d'Excentricité d'une Machine
Asynchrone par la Méthode d'Ondelettes**

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Automatique

Spécialité : Automatique et Informatique Industrielle

Par :

BELASSEL Atef

DEVANT Le JURY

Président : M. RAMDANI Professeur UBM Annaba

Directeur de mémoire : F. ARBAOUI MCA UBM Annaba

Examineurs : M. BENOURET Professeur UBM Annaba

M. BEKAIK MCA UBM Annaba

REMERCIEMENTS

Premièrement, je voudrai adresser mes remerciements à Dieu le tout puissant pour la volonté, la santé et la patience qu'il m'a donné durant toutes ces longues années d'études.

Mes remerciements s'adressent à mon promoteur Dr F. ARBAOUI, pour avoir proposé et dirigé ce mémoire et pour son continuel suivi tout le long de la réalisation et la correction de ce mémoire.

Je remercie également tous les membres de jury pour avoir accepté de juger mon travail.

Je tiens à remercier vivement toute personne, qui m'a aidé de près ou de loin à accomplir ce travail.

Dédicaces

Je dédie ce travail à :

Ma mère,

La mémoire de Mon père,

Ma femme,

Mes enfants, Raid et Rahef

Mes sœurs et mes frères,

Mes amis.

ملخص

العنوان: تشخيص العيوب في الآلة الغير متزامنة الثلاثية عن طريق تحويل الموجات المنفصلة

تتطلب ضرورات السلامة التشغيلية للمحركات الكهربائية تكامل أنظمة المراقبة للكشف عن حالات الفشل وتشخيصها. لذلك يجب علينا تزويد المحركات غير المتزامنة بأداة مراقبة لمنع الأعطال والتوقف في الوقت المناسب.

بشكل عام، تكمن أخطاء المحرك الكهربائي في أوضاع التشغيل المختلفة، الحمل، البيئة، وما إلى ذلك، ومن بين هذه الأخطاء يمكن ذكر أخطاء الانحراف المركزي للآلة الكهربائية.

نقترح في هذا العمل تقنية معالجة الإشارات لتشخيص عيوب الانحراف المركزي للآلة الكهربائية القائمة على تحليل بارك وتحويل الموجات المنفصل. يعتبر هذا الأخير أداة مثالية نظرًا لقدرته على تحليل الإشارات (في النظام غير الثابت).

تم إجراء الاختبارات عن طريق المحاكاة الرقمية في بيئة Matlab / Simulink والنتائج التي تم الحصول عليها تبين بوضوح إمكانية استخراج التوقع للكشف عن العيوب وتقدير شدتها.

Résumé

Titre : Diagnostic des Défauts d'Excentricité d'une Machine Asynchrone par la Méthode d'Ondelettes

Les impératifs des sûretés de fonctionnement des entraînements électriques nécessitent l'intégration de systèmes de surveillances pour la détection et le diagnostic des défaillances. Donc il faut doter les moteurs asynchrones d'un outil de surveillance pour éviter ou du moins prévenir les pannes et les arrêts intempestifs.

En général, les défauts d'entraînement électriques résident dans les différents modes de fonctionnement, la charge, l'environnement...etc. Parmi ces défauts, on peut citer les défauts d'excentricité.

Nous proposons dans ce travail une technique de traitement des signaux pour le diagnostic des défauts d'excentricité basée sur l'analyse de Park et la transformée en ondelettes discrète. Cette dernière est considérée comme un outil idéal en raison de son aptitude d'analyse des signaux (régime non stationnaire).

Les tests ont été réalisés par simulation numérique sous l'environnement Matlab/Simulink et les résultats obtenus montrent clairement la possibilité d'extraire les signatures pour détecter et les défauts et estimer leur sévérité.

Abstract

Title: Eccentricity Fault Diagnosis in an Induction Motor Drive Using the Wavelet Transform

The imperatives of operating safety of electrical drives require the integration of monitoring systems for the detection and diagnosis of failures. So we must equip the asynchronous motors with a monitoring tool to prevent or prevent failures and untimely stops.

In general, electrical drive faults reside in the various operating modes, the load, the environment, and so on. These defects include eccentricity defects.

We propose in this work a signal processing technique for the diagnosis of eccentricity defects based on Park analysis and discrete wavelet transform. The latter is considered an ideal tool because of its signal analysis capability (non-stationary regime).

The tests were carried out by numerical simulation under the Matlab / Simulink environment and the results obtained clearly show the possibility of extracting the signatures to detect and the defects and to estimate their severity.

Liste des figures

Figure 1.1	Eléments de constitution d'une MAS à cage d'écureuil	02
Figure 1.2	Répartition des défauts de la machine asynchrones	03
Figure 1.3	Structure d'un roulement à billes	04
Figure 1.4	Défauts d'enroulement du stator du moteur à induction	05
Figure 1.5	Défauts d'excentricité (a) : statique, (b) : dynamique	07
Figure 2.1	Structure du rotor à cage d'écureuil	14
Figure 2.2	Représentation du modèle triphasé- triphasé	14
Figure 2.3	Rotor à cage d'écureuil	16
Figure 2.4	Circuit équivalent des mailles rotoriques	16
Figure 2.5	Schéma de principe du découplage pour la MAS par analogie avec la machine à courant continu.	21
Figure 2.6	Schéma bloc de la commande vectorielle indirecte	22
Figure 2.7	Modèle Simulink pour la commande indirecte (IFOC)	23
Figure 2.8	Commande par un régulateur PI classique	24
Figure 2.9	Commande par un régulateur PI classique avec changement sens de rotation	25
Figure 3.1	Excentricité statique	28
Figure 3.2	Excentricité dynamique	29
Figure 3.3	Excentricité mixte	30
Figure 3.4	Schéma de simulation en SUMILINK de modèle réduit	31
Figure.3.5	Caractéristiques de la machine avec un défaut d'excentricité statique de 10%	33
Figure. 3.6	Caractéristiques de la machine avec un défaut d'excentricité dynamique 20%	35
Figure 3.7	Caractéristiques de la machine avec un défauts d'excentricité mixte	37
Figure 4.1	Entrefer de la machine avec rotor excentrique	41
Figure 4.2	Commande vectorielle indirect cas sain	44
Figure 4.3	Commande vectorielle indirect avec défaut d'excentricité 5%	44
Figure 4.4	Commande vectorielle indirect avec défaut d'excentricité 10%	45
Figure 4.5	Commande vectorielle indirect avec défaut d'excentricité 20%	45
Figure 4.6	Analyse du courant statorique par le Vecteur de Park pour le cas sain et le cas de défaut d'excentricité mixte	46
Figure 4.7	TOD multi niveau du courant de la phase Ias cas d'une machine sain	48
Figure 4.8	TOD multi niveau du courant de la phase Ias avec défaut d'excentricité 5%	48
Figure 4.9	TOD multi niveau du courant de la phase Ias avec défaut d'excentricité ME10%	49
Figure 4.10	TOD multi niveau du courant de la phase Ias avec défaut d'excentricité ME20%	49
Figure 4.11	Variation de l'énergie dans les bandes de fréquence (db4) Machine saine Machine avec défaut d'excentricité mixte 5%,10%,20%.	49

Liste des tableaux

Tableau 4.1	Bandes de fréquences détails et approximations	47
--------------------	--	----

Liste des abréviations

MAS	Machine Asynchrone.
FFT	Transformée de Fourier rapide
TOC	Transformée en Ondelettes Continues
TOD	Transformée en Ondelettes Discrètes
MCSA	Courant Moteur Analyse de Signature
FOC	Field Oriented Control
IFOC	Indirecte Field Oriented Control
PI	Correcteur Proportionnel Intégral
LF	Logique Floue

Liste des symboles

C_e	Couple électromagnétique [N.m]
e	l'épaisseur de l'entrefer [m]
f_s	fréquence d'alimentation [Hz]
N_s	Nombre de spires statoriques par phase
N_r	Nombre de barres rotorique
μ_0	Perméabilité magnétique de l'air
L_{sp}	Inductance propre statorique [H]
L_{sf}	Inductance de fuite rotorique [H]
L_b	Inductance d'une barre rotorique [H]
L_e	Inductance total de l'anneau de court-circuit [H]
L_{sc}	Inductance cyclique [H]
I_e	Courant dans l'anneau de court- circuit [A]
$[V_S], [V_r]$	les vecteurs tensions statoriques et rotoriques.
$[I_S], [I_r]$	les vecteurs courants statoriques et rotoriques.
$[\psi_s], [\psi_r]$	les vecteurs flux statoriques et rotoriques.
V_{Sa}, V_{Sb}, V_{Sc}	Tensions d'alimentation des phases statoriques.
V_{ra}, V_{rb}, V_{rc}	Tensions d'alimentation des phases rotoriques.
ψ_{rk}	Flux magnétique crée par une maille rotorique [wb].
R_{bk}	Résistance de la barre K [Ω]
R_{bfk}	Résistance de la barre défaillante [Ω]
d, q	Indices pour les composantes de PARK directe et Quadrature.
p	Nombre de paires de pôle.
C_r	Couple résistant.
Ω	Vitesse angulaire de rotation.
J	Moment d'inertie de la partie tournante de la machine.
M_{sr}	Mutuelle cyclique entre le stator-le rotor [H]
M_s	Mutuelle entre phase statorique [H]
a	Angle électrique entre deux mailles rotorique [rd]
θ_s	Position des grandeurs statoriques [rd].
θ_r	Position du rotor [rd].
X	Variable d'entrée.
X_{ref}	Grandeurs de consigne ou de référence.
Ψ	Ondelette mère.

TABLE DES MATIÈRES

Remerciement

Dédicace

Résumé

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des symboles

Liste des abréviations

INTRODUCTION GENERALE.....I

CHAPITRE I : ETAT DE L'ART

I.1 Introduction.....	2
I.2 Constitution de la machine asynchrone.....	2
I.2.1 Construction de la machine.....	2
I.3 Principaux défauts d'une machine asynchrone triphasée.....	3
I.3.1 Défauts de roulements.....	3
I.3.2 Défauts statoriques.....	4
I.3.3 Défauts de barres rotoriques.....	5
I.3.4 Défaut d'excentricité.....	6
I.3.4.1 Excentricité statique.....	6
I.3.4.2 Excentricité Dynamique.....	7
I.3.4.3 Excentricité mixte.....	7
I.4 Méthodes de diagnostic par suivi des grandeurs mesurable.....	8
I.4.1 Analyse de l'entrefer.....	8
I.4.2 Analyse Vibratoire.....	8
I.4.3 Analyse des courants statorique et du courant de Park.....	8
I.5 Les Méthodes Moderne de diagnostic.....	9
I.5.1 La logique floue.....	9
I.5.2 Les réseaux de neurones.....	9
I.5.3 Les systèmes Neuro-Flous.....	10
I.6 Les Méthodes de traitement du signal.....	10
I.6.1 Transformée de Fourier Rapide (TFR).....	10
I.6.2 Transformée de Fourier à fenêtre glissante (TFFG).....	10
I.6.3 Analyse D'ondelette.....	10
I.7 Conclusion.....	11

CHAPITRE II : MODELISATION ET COMMANDE DE LA MACHINE ASYNCHRONE

II.1 Introduction.....	13
II.2 Modèle Multi-enroulements.....	13
II.3 Modèles applicables à la machine asynchrone.....	14
II.3.1 Modèle triphasé- triphasé.....	14
II.4 Equations du système.....	15
II.4.1 Equations des tensions statoriques.....	15
II.4.2 Equations des tensions rotoriques.....	16
II.4.3 Modèle réduit de la machine asynchrone.....	18
II.5 La Commande vectorielle par orientation du flux (CV-OF).....	21
II.5.1 Contrôle vectoriel indirect.....	21
II.5.2 Structure de la commande vectorielle indirecte.....	22
II.6 Résultats de simulation et interprétations.....	23
II.7 Conclusion	25

CHAPITRE III : MODELISATION DE DIFFERENTS DEFAUTS D'EXCENTRICITE DE MAS

III.1 Introduction.....	27
III. 2 Etude de défauts d'excentricité.....	27
III.2.1 Modélisation des fonctions de l'entrefer et la perméance.....	27
III.2.1.1 Entrefer.....	27
III. 2.1.2 Perméance.....	28
III. 2.1.3 Excentricité statique.....	28
III. 2.1.4 Excentricité dynamique.....	29
III. 2.1.5 Excentricité mixte.....	29
III.2.2 Validation des Résultats de simulations.....	30
III.2. 2.1 Simulation d'excentricité statique (10%).....	31
III.2.2.2 Simulation d'excentricité dynamique (20%).....	34
III.2.2.3 Simulation d'excentricité mixte statique (10%) et dynamique (20%).....	36
III.3 Interprétation des résultats.....	38
III.4 Conclusion.....	39

CHAPITRE IV : APPLICATION DE L'ANALYSE D'ONDELETTE

IV.1 Introduction.....	41
IV.2 Modélisation des défauts d'excentricités	41
IV.2.1 Calcul de la perméance.....	42
IV.3 Résultats de simulation par régulateur PI.....	43
IV.4 Analyse par le vecteur de Park.....	45
IV.5 Analyse par la transformée en ondelettes	47
IV.6 Conclusion.....	50
CONCLUSION GENERALE.....	51
ANNEXE	52
BIBLIOGRAPHIE.....	53

INTRODUCTION GENERALE

La machine asynchrone fait l'objet de très nombreuses applications grâce à son faible et sa grande robustesse électromécanique. Elle est de plus en plus choisie pour équiper des actionneurs industriels de toute puissance et dont la gamme de vitesse est très étendue et même dans le domaine de positionnement.

Les performances du contrôle de la machine sont influencées par des défauts qui peuvent être inhérent à la machine elle-même ou dues aux conditions de fonctionnement. Si un défaut n'est pas détecté, il peut se développer et entraîner des situations catastrophiques. Donc, il est intéressant de détecter les défauts à leur début afin de minimiser les coûts de maintenance et d'éviter les temps d'arrêt imprévus. Une variété de défauts de la machine ont été étudiés dans la littérature, tels que les cassures de barres ou d'anneaux d'extrémité, les courts circuits entre phase, et les excentricités, etc. et plusieurs méthodes ont été développées, ces dernières décennies, et appliquées efficacement pour le diagnostic et l'identification des différents défauts.

Le travail réalisé dans le cadre de ce mémoire de Master est la détection des défauts d'excentricité dans la machine asynchrone à vitesse variable contrôlée par la commande vectorielle utilisant des régulateurs PI classiques. Les outils d'analyse et diagnostic utilisés sont l'analyse par le vecteur de Park et la transformée par ondelettes. Pour élucider cette étude, nous avons organisé ce mémoire en quatre chapitres :

- Dans le premier chapitre, nous situons les éléments de construction de la machine à cage d'écureuil ainsi que les différents défauts qui s'y manifestent.
- Dans le second, on dresse une synthèse des modèles les plus couramment et appliqués à la modélisation et la commande de la machine asynchrone.
- Au troisième chapitre, on élabore une modélisation des différents défauts d'excentricité de la MAS en considérant les trois défauts d'excentricités : statique, dynamique et mixte.
- Enfin, pour le quatrième chapitre il s'agit de l'étude de la détection des défauts d'excentricité de la machine asynchrone à vitesse variable commandée. La phase de détection des défauts d'excentricité à la machine utilise deux approches, à savoir l'analyse de Park et la transformée par ondelettes.

Nous terminons ce travail avec une conclusion générale où nous dresserons des perspectives pour les travaux de recherches futurs.

CHAPITRE I

Etat de l'art

1.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous introduirons une analyse des différents défauts pouvant apparaître dans la machine asynchrone triphasés à cage d'écurieil ainsi que les techniques de diagnostic à base de traitement du signal utilisées pour la détection de ces défauts.

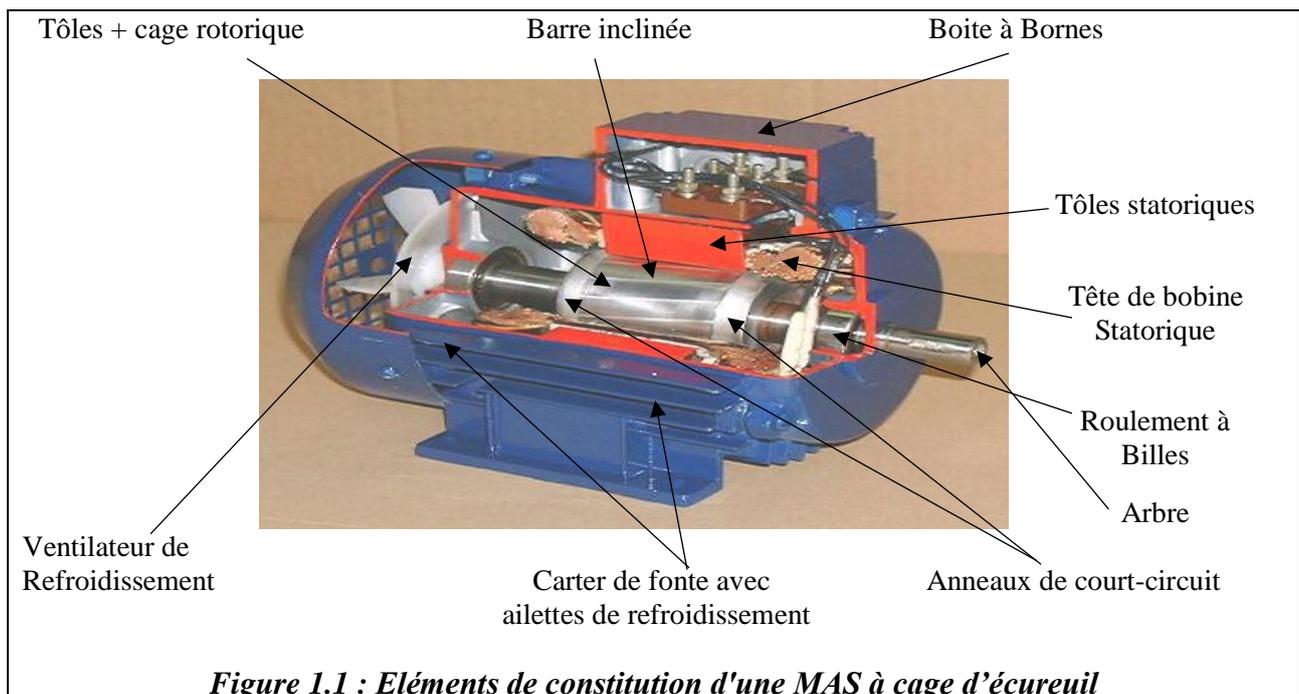
1.2 Constitution de la machine asynchrone

Cette première partie porte sur une brève présentation des machines asynchrones triphasées à cage de moyenne puissance [1].

1.2.1 Construction de la machine

La machine asynchrone est constituée des principaux éléments suivants :

- ✓ Le stator (partie fixe) constitué de disques en tôles magnétiques portant les enroulements chargés de magnétiser l'entrefer.
- ✓ Le rotor (partie tournante) constitué de disques en tôles magnétiques empilés sur l'arbre de la machine portant un enroulement.
- ✓ Les organes mécaniques permettent la rotation du rotor et le maintien des différents sous-ensembles.



I.3 Principaux défauts d'une machine asynchrone triphasée

Les défauts dans les moteurs à induction peuvent être divisés en quatre catégories principales, défauts de barre cassés de rotor, les défauts d'excentricité, les défauts liés au stator et les défauts de palier ou roulement. La répartition de chaque défaut, basée sur les enquêtes des défauts des moteurs à induction dans, est montrée dans la *figure 1.2* [2]

✓

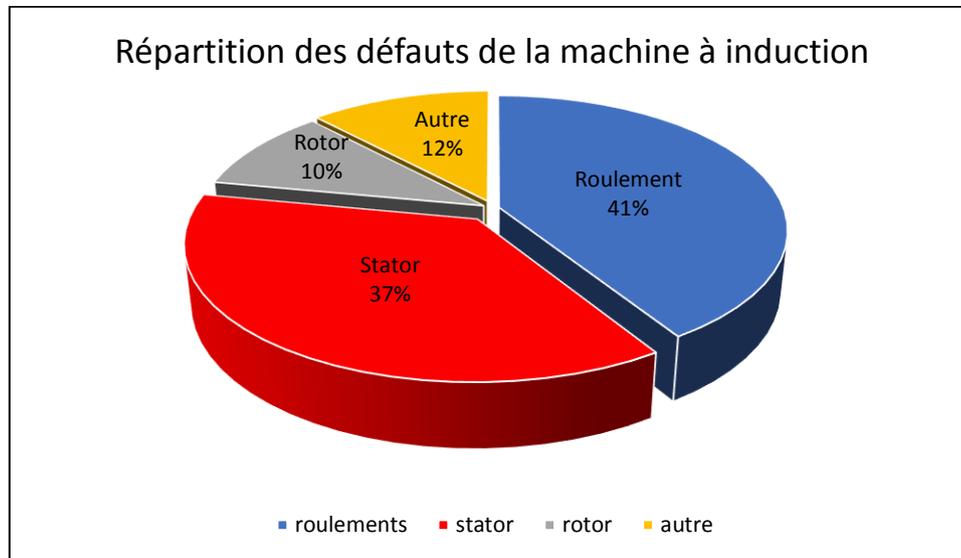


Figure 1.2 : Répartition des défauts de la machine asynchrones

I.3.1 Défauts de roulements

Les défauts de roulements sont la cause la plus fréquente de défauts dans les moteurs asynchrones [3], ce qui est de 40 % des défaillances totales du moteur à induction. Ils peuvent être classés en 3 types différents, qui sont :

- Un défaut de la cage interne.
- Un défaut de la cage externe.
- Un défaut de billes.

Les défauts de roulements sont généralement détectés en analysant l'amplitude des composants de la fréquence de défaut de roulement, pendant le fonctionnement en régime permanent, où les amplitudes des composants ont tendance à augmenter à mesure que la gravité de défaut augmente.

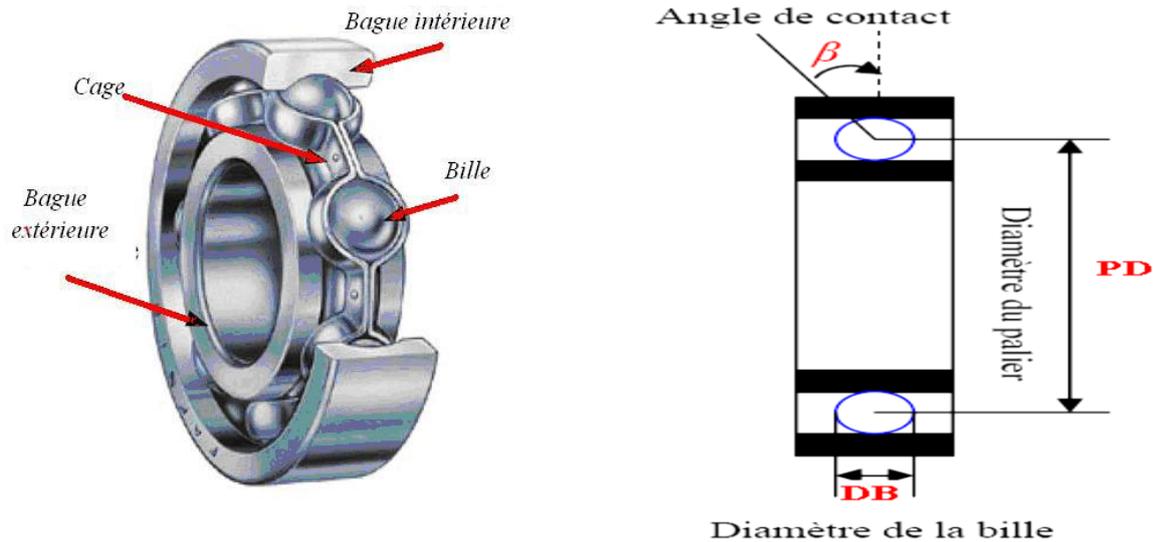


Figure 1.3 : Structure d'un roulement à billes

Les défauts de roulement peuvent se manifester comme des défauts de l'asymétrie du rotor. Ils sont généralement classés dans la catégorie des défauts liés à l'excentricité, or les défauts liés aux roulements à billes peuvent se manifester aux fréquences de vibrations, tels que :

$$f_{db} = \frac{D_b}{D_c} f_r \left\{ 1 - \left[\frac{D_b}{D_c} \cos(\theta) \right]^2 \right\} \quad (1.1)$$

La fréquence de répétition sera pour la cage intérieure comme extérieure décrite par :

$$f_{dbex / dbext} = (N_b / 2) f_r \left[1 - \frac{D_b}{D_c} \cos(\theta) \right] \quad (1.2)$$

Où

f_r : fréquence de rotation mécanique ; N_b : est le nombre de billes ; D_b : est le diamètre d'une bille ;

D_c : est la distance du centre des billes ; θ : angle de contact de la bille avec la cage.

1.3.2 Défauts statoriques

Les défauts liés au stator, également connus sous le nom de défauts de court-circuit, se produisent lorsque les enroulements du stator sont court-circuités en raison d'une défaillance de l'isolation. Les défauts de court-circuit peuvent être causés par une collision entre le stator et le rotor, la contrainte de tension imposée par la commutation rapide des onduleurs, et les problèmes d'isolation dus aux défauts de fabrication, à la contamination, à la surchauffe et à l'usure [8].

Il y a 3 types de défauts de court-circuit, qui sont :

- Défauts court-circuit entre spires.
- Défauts court-circuit entre phase.
- Défauts phase à la terre.

Les défauts liés au stator représentent le deuxième plus grand nombre de défauts, soit environ 37% pour les moteurs à induction. Ils sont généralement détectés en utilisant la technique de surveillance de l'état d'équilibre. La présence de défauts de stator produit une fréquence de défaut caractéristique suivante :

$$f_{st} = f \cdot \left(k \pm \frac{n \cdot (1 - g)}{p} \right) \quad (1.3)$$

Avec $k=1, 3$ et $n=1, 2, 3 \dots, (2p-1)$, et

g : glissement ; p : nombre de paire de pôles ; f : fréquence de l'alimentation.

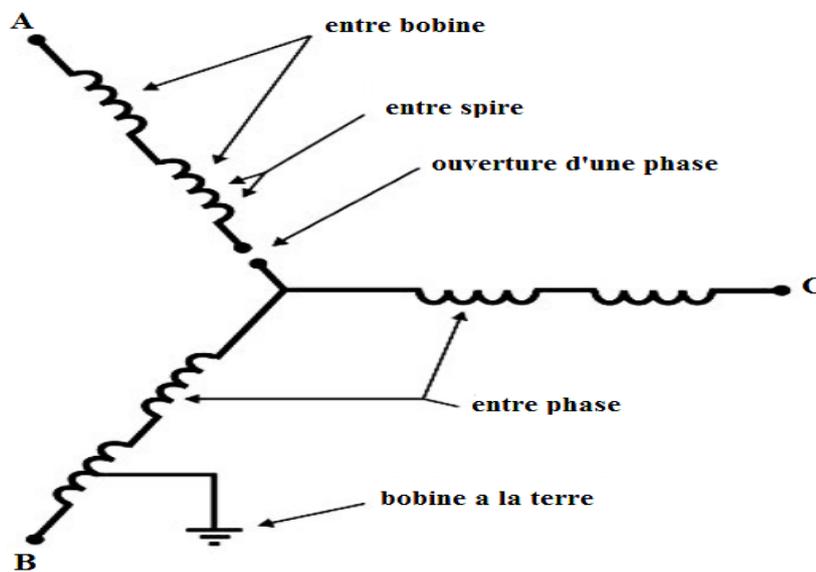


Figure 1.4 : Défauts d'enroulement du stator du moteur à induction

1.3.3 Défauts de barres rotoriques

Les défauts de barre cassés de rotor ne représentent qu'environ 10% des pannes totales du moteur à induction.

La présence de défauts de barres de rotor cassés dans un moteur produit des fréquences de défaut caractéristiques :

$$f_b = (1 \pm 2kg) f \quad (1.4)$$

Avec $k=1, 2, 3, \dots$, g : est le glissement et f est la fréquence d'alimentation.

D'autres composantes spectrales peuvent apparaître dans le spectre du courant à des fréquences données par l'expression ci-dessous :

$$f_b = \left[\frac{k}{p/2} (1-g) \pm g \right] f_1. \quad (1.5)$$

Avec $\frac{k}{p/2} = 1, 3, 5, 7, 9, 11, \dots$

Les défauts de cassures de barres génèrent également dans les signaux du couple et de la vitesse des composantes de fréquences $2gf$ et $4gf$.

Les phénomènes qui peuvent accompagner la rupture de barres dans une cage rotorique sont :

- a) Contraintes thermiques dues aux surcharges thermiques, points chauds, pertes excessives, et/ ou étincelles ;
- b) Contraintes magnétiques dues aux forces électromagnétiques, traction magnétique déséquilibrée, bruit et/ou vibrations électromagnétiques.
- c) Contraintes résiduelles dues aux problèmes de construction.
- d) Contraintes dynamiques engendrées par les couples de l'arbre et/ou les forces centrifuges ;
- e) Contraintes de l'environnement causées par l'humidité et la poussière.
- f) Contraintes mécaniques dues aux pertes dans les tôles, la fatigue des parties du rotor et le défaut de roulements.

1.3.4 Défaut d'excentricité :

Il existe deux types de défauts d'excentricité associés aux moteurs à induction : l'excentricité statique et l'excentricité dynamique. Quand l'excentricité est statique, l'épaisseur d'entrefer entre le stator et le rotor varie, mais la position de l'entrefer minimum reste fixe. L'excentricité dynamique (DE) existe lorsque l'axe de rotation coïncide avec l'axe du stator mais pas avec l'axe du rotor, l'emplacement de l'entrefer minimum change alors avec la position angulaire du rotor et tourne avec lui. Pour l'excentricité mixte (ME), les deux défauts (SE) et (DE) sont présents en même temps et l'axe de rotation est différent des deux axes du stator et du rotor.

1.3.4.1 Excentricité statique

Peut-être causée par des défauts de fabrication du noyau du stator (c'est-à-dire de forme ovale) et les problèmes d'installation, où le rotor peut ne pas être monté exactement dans le centre du stator.

I.3.4.2 Excentricité Dynamique

Peut-être causée par des défauts de fabrication du rotor, où le diamètre du rotor n'est pas concentrique avec le centre de l'arbre, et les problèmes de roulement, où il pourrait y avoir un mouvement radial dans le roulement dû à des défauts d'usure ou de fabrication. Quand l'excentricité est dynamique, la différence d'entrefer entre le stator et le rotor varie mais la position de l'entrefer minimum tourne avec le rotor.

La présence de l'excentricité se manifeste par l'apparition d'harmoniques dans le spectre du courant à des fréquences (f_{ecc}) données par l'expression ci-dessous :

$$f_{ecc} = f_1 [(k_{nb} \pm n_d) (1 - g) / p \pm v] \tag{1.6}$$

Avec $k=1,2,3,\dots$, f_1 : la fréquence d'alimentation, n_b : le nombre des barres rotoriques et n_d : le nombre d'ordre d'excentricité. $n_d=0$: pour l'excentricité statique et $n_d=1, 2, 3,\dots$ pour l'excentricité dynamique, g : le glissement, p : le nombre de paires de pôles et v : l'ordre des harmoniques de temps de la f.m.m, ($v=\pm 1, \pm 3, \pm 5, \pm 7,\dots$ etc.).

I.3.4.3 Excentricité mixte

En présence d'excentricités statique et dynamique, c'est à dire une excentricité mixte, il y aura une apparition des harmoniques de basses fréquences (f_m) et de la fréquence de la fondamentale donnée par la relation ci-dessous :

$$f_m = |f_1 \pm kf_r| \tag{1.7}$$

Avec $k=1,2,3,\dots$ et $f_r=f_1(1-g)/p$. et f_1 : est la fréquence fondamentale

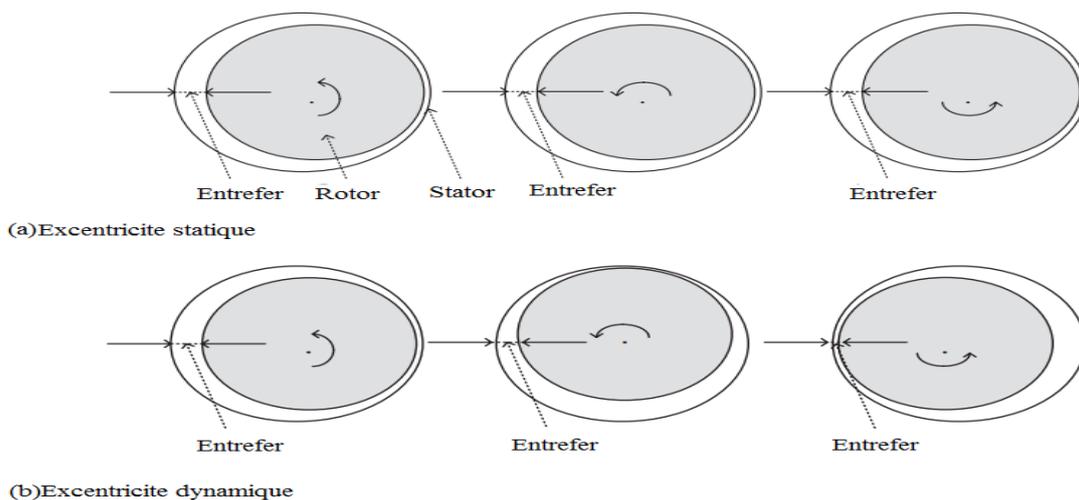


Figure 1.5 : Défauts d'excentricité (a) : statique, (b) : dynamique

Les signaux de vibrations, peuvent être aussi utilisés pour détecter les défauts liés à l'excentricité. Dans le cas d'excentricité mixte, les composantes de basses fréquences de vibrations du stator sont données par :

$$f = 2f_1 \pm f_r \quad (1.8)$$

D'autres approches, telles que celle utilisant les vecteurs de Park du courant statorique peut être utilisées pour détecter l'excentricité dans le moteur asynchrone à cage d'écurieul.

1.4 Méthodes de diagnostic par suivi des grandeurs mesurables (sans connaissance à priori)

On peut citer quelque méthodes tel que :

1.4.1 Analyse de l'entrefer

Le couple d'entrefer est produit par la liaison de flux et les courants d'une MI. Les couples pulsés mesurés d'une MI obtenus à partir de capteurs de couple couplés à l'arbre MI ou au support de stator sont différents de la valeur réelle des couples d'entrefer. La raison en est que le rotor, l'arbre et le châssis de la MI ainsi que sa charge mécanique constituent un système de ressort de torsion individuel, et ils ont donc leur propre fréquence naturelle. En outre, la plupart des capteurs de couple mécaniques ont leurs propres fréquences et largeurs de bande [9].

1.4.2 Analyse Vibratoire

Une MI idéal génère des vibrations minimales en fonctionnement et tout dysfonctionnement dans les parties internes de la machine provoque la vibration intensive [5]. En conséquence, le signal de vibration est analysé pour détecter un développement possible d'une condition défectueuse dans les MIs. Cette technique est généralement utilisée pour le diagnostic des défauts mécaniques, tels que les problèmes de roulement, les défauts d'engrenage, désalignement de rotor et déséquilibre de masse. La vibration du cadre du stator pourrait également être due à un défaut d'enroulement, déséquilibre de la tension d'alimentation [6], [7].

Les vibrations sont mesurées directionnellement, radialement ou axialement, et les transducteurs sont souvent placés sur les roulements si le but est la détection des défauts mécaniques [1].

1.4.3 Analyse des courants statorique et du courant de Park

Au cours des dernières années, la surveillance du courant du stator, bien connu sous le nom de l'analyse des signatures courant moteur (ASCM) a été efficacement utilisée.

Une autre méthode d'analyse du courant est l'analyse par l'approche vectorielle de Park. Elle est basée sur l'identification d'un modèle de courant spécifié obtenu après une transformation des

courants statoriques triphasés en un système biphasé équivalent. Dans des conditions idéales, équilibré les courants triphasés conduisent à un vecteur de Park qui est un motif circulaire centré à l'origine. Dans le cas de défauts, le motif vectoriel de Park devient elliptique. L'ellipticité du motif a été jugée proportionnelle à la gravité de défauts, et son orientation par rapport à l'axe verticale dépend de la phase défectueuse. L'épaisseur relative du motif a été utilisée pour diagnostiquer les défauts de cassure de barres.

La relation qui décrit la transformation de Park est [4] :

$$\begin{cases} i_d = \sqrt{\frac{2}{3}}(i_{sa}) - \frac{1}{\sqrt{6}}(i_{sb}) - \frac{1}{\sqrt{6}}(i_{sc}) \\ i_q = \frac{1}{\sqrt{2}}(i_{sb}) - \frac{1}{\sqrt{2}}(i_{sc}) \end{cases} \quad (1.9)$$

1.5 Les Méthodes moderne de diagnostic

De nos jours, les méthodes de diagnostic basées sur l'intelligence artificielle utilisant la logique floue, le réseau de neurones, etc. sont de plus en plus utilisés par les chercheurs avec un certain succès.

1.5.1 La logique floue

La logique floue permet de combiner des informations floues de différents signaux, ensemble pour prendre une décision plus précise.

La logique floue est particulièrement adaptée à la surveillance de l'état de la machine puisque dans la pratique, les opérateurs sont concernés par l'état du moteur en termes de variables linguistiques, par exemple l'état de la machine est défini par trois cas « sain » ou « endommagé » ou « gravement endommagé » [8].

1.5.2 Les réseaux de neurones

En utilisant les RNA (réseaux de neurones artificiels) dans le moteur à induction, on peut identifier les défauts dans le moteur à induction à savoir un défaut mécanique ou électrique. Ainsi, le RNA synthétise l'interconnexion entre différentes variables d'entrée avec les variables de sortie qui indiquent la gravité de défauts. Ces variables peuvent être courant, tension ou glissement. L'inconvénient de cette approche est la spécificité du réseau retenu pour une application donnée et la masse considérable des données nécessaires à la phase d'apprentissage.

1.5.3 Les systèmes Neuro-Flous

Les systèmes neuro-flous permettent de combiner les avantages de deux techniques complémentaires. Les systèmes flous fournissent une bonne représentation des connaissances. L'intégration de réseaux de neurones au sein de ces systèmes améliore leurs performances grâce à la capacité d'apprentissage de réseaux de neurones.

1.6 Les Méthodes de traitement du signal

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.

1.6.1 Transformée de Fourier Rapide (TFR)

Cette transformation se prêtant à l'analyse des phénomènes stationnaires des systèmes en régimes permanents donne la description du signal temporel dans le domaine fréquentiel avec une résolution fréquentielle constante sur une échelle linéaire de fréquence. L'un des inconvénients majeurs des techniques spectrales basées sur la transformées de Fourier rapides (FFT) est qu'elles ne fournissent des résultats utiles que si le fonctionnement à vitesse de rotation et couple de charge de la machine est constante. La nécessité de trouver d'autres techniques de traitement de signal pour les signaux non stationnaires devient donc nécessaire.

1.6.2 Transformée de Fourier à fenêtre glissante (TFFG)

La transformée de Fourier à fenêtre glissante est définie comme étant le résultat de la multiplication répétée de la série temporelle $x(t)$ par une fenêtre courte localisée dans le temps, dans laquelle on considère quel signal est localement stationnaire, puis on décale cette fenêtre le long du signal afin d'analyser entièrement.

1.6.3 Analyse par ondelettes

L'introduction de techniques de transformation en ondelettes qui permettent la détection des défauts pendant le démarrage transitoire. Les transformées en ondelettes peuvent aussi améliorer les performances dans les cas où le bruit est important puisque les transformées en ondelettes se comportent comme des filtres permettant l'extraction des caractéristiques sur lesquelles on peut effectuer la détection de défauts (FD).

La transformée en ondelettes a été introduite avec l'idée de résoudre les inconvénients de la transformée de Fourier. La transformée en ondelettes assure à la fois une analyse temps-fréquence et une analyse de l'échelle de temps avec une caractéristique multi-résolution.

- **Énergie en ondelettes :** Le diagnostic de défaut est basé sur l'observation et la comparaison entre l'énergie associée à chaque niveau. Le signal du courant de stator contient des informations incluses dans chaque bande de fréquences qui résulte de la décomposition du paquet d'ondelettes. La valeur d'énergie pour chaque bande de fréquence est définie par :

$$E_j = \sum_{k=1}^n D_{j,k}^2(n) \quad (1.10)$$

Où j : est le niveau de détail, et D_{jk} est le signal de détail au niveau j et n est le nombre total d'échantillons du signal. Les valeurs d'énergie des niveaux de décomposition contiennent les informations de diagnostic nécessaires. Le tracé de ces valeurs peut être utilisé pour diagnostiquer des fautes dans la MI à cage d'écureuil et il peut également évaluer le degré de gravité de la faute.

1.7 Conclusion

Ce chapitre a été, essentiellement dédié à l'état de l'art des méthodes de surveillance et de diagnostic de la machine asynchrone à cage d'écureuil. Une description d'une manière non exhaustive de la constitution de la machine asynchrone à cage d'écureuil a été présentée, ainsi que les différents types des défauts qui peuvent affecter la machine et leurs origines. En fin, un panorama sur les méthodes utilisées dans le diagnostic des défauts de la machine a été présenté. L'étude détaillée des divers défauts affectant le fonctionnement de la machine nécessite l'élaboration de modèle de la machine en défaut.

L'identification des défauts d'un moteur à induction est la tâche la plus intrigante pour les chercheurs. Beaucoup de recherches ont examiné les machines à induction à vitesse constante, qui sont relativement faciles à contrôler, mais il y a aussi des travaux considérables sur les machines à vitesse variable, qui sont complexes.

CHAPITRE II

Modélisation et Commande de la Machine Asynchrone

II.1 Introduction

La modélisation d'une machine électrique est une phase primordiale en vue de diagnostic. En un premier temps, les méthodes ont utilisé des modèles simples (modèle *abc* et *dq*), négligeant un certain nombre de phénomènes. Ces modèles sont fréquemment affectés par les transformations et le changement d'axes de référence. Donc, conduit à des interprétations théoriques qui ne peuvent pas être utilisées pour analyser des effets localisés tels que les barres cassées dans le rotor de la machine en les distinguant des effets provenant d'autres incidents. D'autre part, ces modèles sont imprécis et ne décrivent qu'un fonctionnement sain de la machine. Ainsi, il a fallu s'orienter vers des modèles plus sophistiqués (modèle multi-enroulements) pour une description dans la méthode de détection.

Le but de ce chapitre est de présenter une synthèse des modèles les plus couramment appliqués à la modélisation de la machine asynchrone.

II.2 Modèle Multi-enroulements

L'objectif est avant tout de posséder un modèle de la machine asynchrone qui met en évidence l'influence des défauts étudiés sur les grandeurs mesurables de la machine (courants, vitesse, couple, ...).

Pour ce faire, on va modéliser le rotor de la machine par des mailles reliées entre elles électriquement et couplées magnétiquement, afin de disposer d'un modèle mathématique où les paramètres mesurables apparaissent explicitement et ne nécessitent pas d'outils de calcul complexes.

On a introduit dans notre étude le modèle de la machine asynchrone où on considère le stator de constitution symétrique pour avoir une force magnétomotrice sinusoïdale dans l'entrefer et le rotor à une structure de mailles (voir figure 2.1).

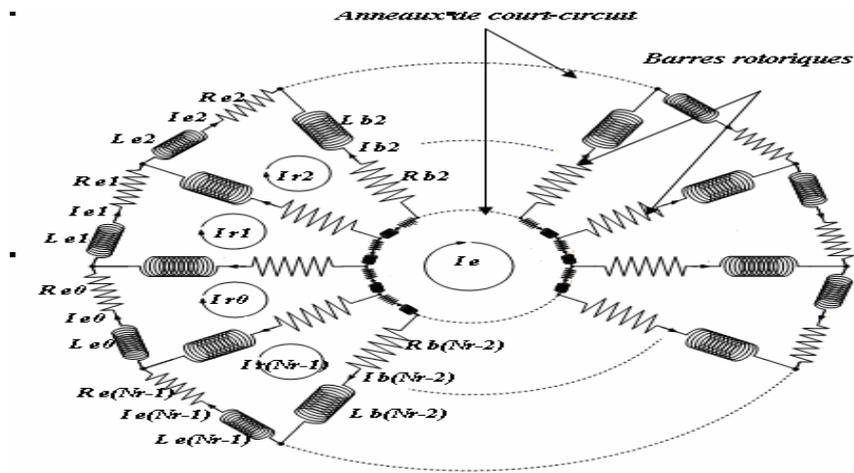


Figure 2.1 Structure du rotor à cage d'écureuil

II.3 Modèles applicables à la machine asynchrone

II.3.1 Modèle triphasé- triphasé

En considérant les hypothèses simplificatrices suivantes [11] :

- Les pertes fer sont négligées.
- La saturation du circuit magnétique est négligée.
- L'effet d'extrémité des têtes des bobines est négligé.
- Le stator est considéré lisse et l'entrefer constant (l'effet des encoches est négligé).
- Les harmoniques, dans ce modèle, de toute origine autre temporelle sont négligés.
- La cage rotorique est assimilée à un système triphasé dont les phases sont en court-circuit.

On présente le modèle dans le repère a, b, c d'une machine. Dans le plan triphasé, la représentation des circuits statoriques et rotoriques, illustrée par la figure 2.2.

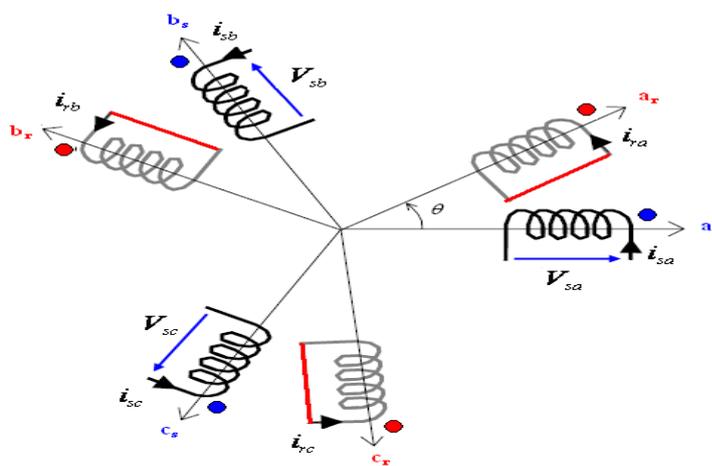


Figure 2.2 Représentation du modèle triphasé- triphasé

II.4 Equations du système

II.4.1 Equations des tensions statoriques

Les équations de tensions statoriques de la machine peuvent être écrites sous la forme matricielle suivante :

$$\begin{cases} [V_s] = [R_s] [I_s] + \frac{d[\varphi_s]}{dt} \\ [\varphi_s] = [L_{ss}] [I_s] + [L_{sr}] [I_r] \end{cases} \quad (2.1)$$

Où les expressions des vecteurs de tension et de courant sont définies comme suit :

$$\begin{cases} [V_s] = [v_{sa} \ v_{sb} \ v_{sc}]^T \\ [I_s] = [i_{sa} \ i_{sb} \ i_{sc}]^T \\ [I_r] = [i_{r1} \ i_{r2} \ i_{r3} \ \dots \ i_{rn} \ i_{re}]^T \end{cases} \quad (2.2)$$

La matrice de résistance statorique est d'ordre 3x3 :

$$R_s = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

La matrice des inductances de magnétisation statoriques $[L_{ss}]_{3 \times 3}$ est exprimée sous la forme suivante :

$$L_{ss} = \begin{bmatrix} L_{s1p} & L_{s1s2} & L_{s1s3} \\ L_{s2s1} & L_{s2p} & L_{s2s3} \\ L_{s3s1} & L_{s3s2} & L_{s3p} \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

$$L_{sip} = 3/2L_s + L_{sf}$$

La matrice $[L_{sr}]_{3 \times (nr+1)}$ constitue les inductances de couplage entre les phases statoriques et les mailles rotoriques, elle est donnée par la relation :

$$L_{sr} = \begin{bmatrix} L_{s1r1} & L_{s1r2} & \dots & L_{s1r(nb-1)} & L_{s1rn} & 0 \\ L_{s2r1} & L_{s2r2} & \dots & L_{s2r(nb-1)} & L_{s2rn} & 0 \\ L_{s3r1} & L_{s3r2} & \dots & L_{s3r(nb-1)} & L_{s3rn} & 0 \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

La dernière colonne de la matrice inductances mutuelles entre stator et les segments des anneaux de court-circuit sont négligées est représenté par un zéro.

Aussi, L_{s1ri} présente l'inductance mutuelle entre la phase "1" et la $i^{\text{ème}}$ maille rotorique. De même pour les phases "2" et "3".

On peut écrire la dérivée du flux statorique de l'équation (2.1) sous la forme suivante [14] :

$$\frac{d[\phi_s]}{dt} = [L_{ss}] \frac{d[I_s]}{dt} + \frac{d[L_{sr}]}{dt} [I_r] + [L_{sr}] \frac{d[I_r]}{dt} \tag{2.6}$$

II.4.2 Equations des tensions rotoriques

La représentation du rotor nous sensibilise au fait qu'un rotor peut être remplacé par un ensemble de mailles couplées magnétiquement où chaque maille est constituée d'un grand nombre de résistances et d'inductances. On peut y distinguer les résistances de portion d'anneau R_e , les inductances de portions d'anneau L_e , les résistances de barres R_b , et les inductances de barre L_b , (figure 2.4). Un défaut se traduira alors par une élévation de la résistance soit d'une portion d'anneau, soit d'une barre [15].

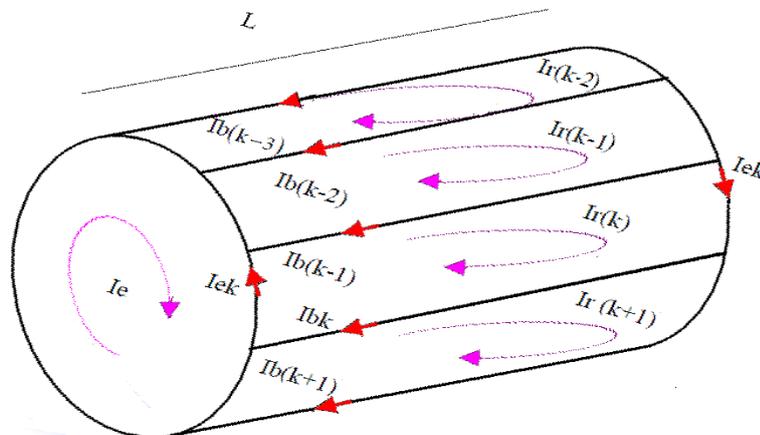


Figure 2.3 Rotor à cage d'écureuil.

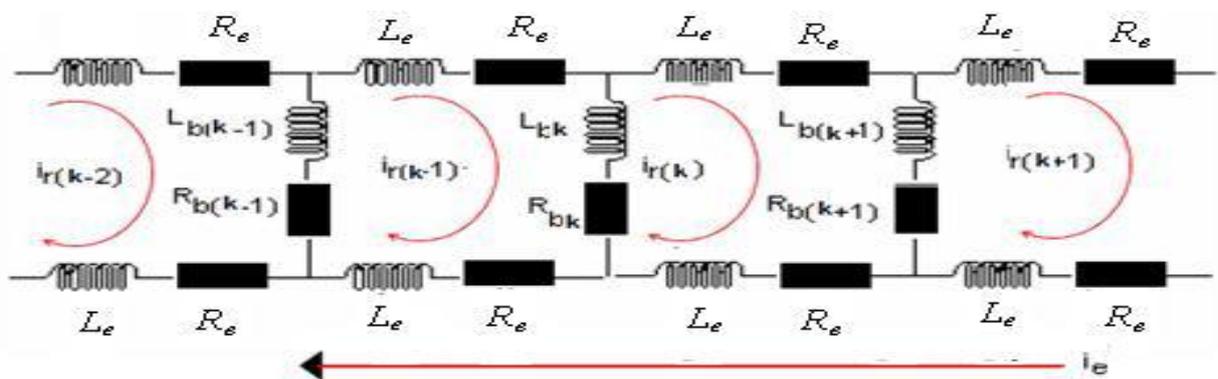


Figure 2.4 Circuit équivalent des mailles rotoriques

En appliquant la loi de Kirchhoff à une maille k , on obtient l'équation :

$$2.(R_b + \frac{R_e}{Nr}).i_k - R_b.(i_{k+1} + i_{k-1}) - \frac{R_e}{Nr}.i_e + \frac{d}{dt}[(L_{rKrK}) + 2(L_b + \frac{R_e}{Nr}).i_k + (L_{rkrk+1} - l_b).i_{k+1} + (L_{rkrk-1} - l_b).i_{k-1} + \dots - \frac{L_e}{Nr}.i_e + L_{rks1}.i_{s1} + \dots + L_{rksm}] = 0 \tag{2.7}$$

On peut généraliser cette équation à toutes les mailles rotoriques, ce qui conduit à l'équation générale du rotor :

$$\begin{cases} [V_r] = [R_r] [I_r] + \frac{d[\phi_r]}{dt} \\ [\phi_r] = [L_{rr}] [I_r] + [L_{rs}] [I_s] \end{cases} \tag{2.8}$$

Où, $[V_r] = [v_{r1} \ v_{r2} \ v_{r3} \ \dots \ v_{rNr} \ v_e]^T = [0]_{Nr+1}^T$

Puisque le rotor est court-circuité, alors les tensions des mailles rotoriques et des segments d'anneau de court-circuit sont nulles.

La matrice de résistance rotorique $[R_r]$ est une matrice symétrique contient tous les résistances des mailles ; elle est de l'ordre $(Nr+1) \times (Nr+1)$ exprimée par la relation ci-après :

$$[R_r] = \begin{bmatrix} 2(R_r + \frac{R_e}{Nr}) & -R_b & 0 & \dots & 0 & -R_b & \frac{-R_e}{Nr} \\ -R_b & 2(R_r + \frac{R_e}{Nr}) & -R_b & 0 & \dots & 0 & \frac{-R_e}{Nr} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -R_b & 0 & \dots & 0 & -R_b & 2(R_r + \frac{R_e}{Nr}) & \frac{-R_e}{Nr} \\ \frac{-R_e}{Nr} & \frac{-R_e}{Nr} & \dots & \dots & \dots & \frac{-R_e}{Nr} & R_e \end{bmatrix} \tag{2.9}$$

La dernière ligne et la dernière colonne représentent les résistances des segments des anneaux de court-circuit.

Le flux rotorique (ϕ_r) est donné par :

$$[\phi_r] = [L_{rr}] [I_r] + [L_{rs}] [I_s] \tag{2.10}$$

Où, $[L_{rr}]$ est la matrice des inductances mutuelles entres barres et anneau de court-circuit du rotor de $(n_b+1) \times (n_b+1)$ éléments. Elle est donnée par la relation ci-dessous :

$$[L_{rr}] = \begin{bmatrix} L_{rp} + 2(L_b + \frac{L_e}{Nr}) & L_{r1r2} - L_b & \dots & L_{r1r(Nr-1)} & L_{r1rNr} - L_b & \frac{-L_e}{Nr} \\ L_{r2r1} - L_b & L_{rp} + 2(L_b + \frac{L_e}{Nr}) & \dots & L_{r2r(Nr-1)} & L_{r2rNr} & \frac{-L_e}{Nr} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ L_{r(Nr-1)r1} & L_{r(Nr-1)r2} & \dots & L_{rp} + 2(L_b + \frac{L_e}{Nr}) & L_{r(Nr-1)rNr} - L_b & \frac{-L_e}{Nr} \\ L_{rNr1} - L_b & L_{rNr2} & \dots & L_{rNr(Nr-1)} - L_b & L_{rp} + 2(L_b + \frac{L_e}{Nr}) & \frac{-L_e}{Nr} \\ \frac{-L_e}{Nr} & -L_e & \dots & \frac{-L_e}{Nr} & \frac{-L_e}{Nr} & L_e \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

et $[L_{rs}]$ est la matrice des inductances de couplage entre les mailles rotoriques et les phases statoriques, donnée par la relation :

$$[L_{rs}] = [L_{sr}]^{-1} \quad (2.12)$$

En rassemblant les équations (2.1) et (2.8), on obtient un système global d'équations électriques de la machine, qui peut s'écrire sous la forme suivante :

$$\begin{bmatrix} [L_{ss}] & [L_{sr}] \\ [L_{rs}] & [L_{rr}] \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} [I_s] \\ [I_r] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [V_s] \\ [V_r] \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} [Rs] & [0] \\ [0] & [Rr] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [I_s] \\ [I_r] \end{bmatrix} \rightarrow [L] \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} [I_s] \\ [I_r] \end{bmatrix} - [R] \begin{bmatrix} [I_s] \\ [I_r] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [V_s] \\ [V_r] \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

II.4.3 Modèle réduit de la machine asynchrone

Le modèle de moteur peut être représenté par un équivalent en deux phases, nous utilisons la transformation de Clarke ou de Park pour passer des grandeurs triphasées statoriques (a, b, c) aux grandeurs diphasées (d,q).

En vue d'alléger le temps de calcul, on élimine l'angle θ de la matrice de couplage en choisissant le repère le plus adéquat et qui est celui du rotor. Dans ce repère, toutes les grandeurs ont une pulsation ω_s en régime permanent.

Cette caractéristique peut être utilisée pour l'analyse des défauts de rupture de barres rotoriques et d'excentricité dans la machine par l'observation du courant I_{ds} .

Pour ce faire, nous avons appliqué une transformation de Park étendue qui permet de passer des Nr grandeurs équilibrées vers deux grandeurs dq .

Nous pouvons définir un vecteur d'état $[X]$ qui, après l'application de cette matrice de transformation, donnera :

$$\begin{cases} [X_{odqs}] = [T(\theta_s)][X_{abc}] \Rightarrow [X_{abc}] = [T(\theta_s)]^{-1} [X_{odqs}] \\ [X_{odqr}] = [T_{3Nr}(\theta_r)][X_{rk}] \Rightarrow [X_{rk}] = [T_{3Nr}(\theta_r)]^{-1} [X_{odqr}] \end{cases} \quad (2.14)$$

Avec la matrice $[T_{3Nr}(\theta_r)]$

$$[T_{3Nr}(\theta_r)] = \frac{2}{Nr} \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & \cdots & \cdots & \frac{1}{2} \\ \cos(\theta_r) & \cdots & \cdots & \cos(\theta_r - (Nr-1)p \frac{2\pi}{Nr}) \\ \sin(\theta_r) & \cdots & \cdots & \sin(\theta_r - (Nr-1)p \frac{2\pi}{Nr}) \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

$$[T_{3Nr}(\theta_r)]^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & \cos(\theta_r) & \sin(\theta_r) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & \cos(\theta_r - (Nr-1)p \frac{2\pi}{Nr}) & \sin(\theta_r - (Nr-1)p \frac{2\pi}{Nr}) \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

L'équation des phases statorique est donnée :

$$[V_s] = [R_s][I_s] + \frac{d}{dt} \langle [L_s][I_s] \rangle + \frac{d}{dt} \langle [M_{sr}][I_{rk}] \rangle \quad (2.17)$$

L'application de la transformation donne :

$$\begin{aligned} [V_{odqs}] &= \langle [T(\theta_s)][R_s][T(\theta_s)]^{-1} \rangle [I_{odqs}] + \langle [T(\theta_s)][L_s][T(\theta_s)]^{-1} \rangle \frac{d}{dt} [I_{odqs}] \\ &+ \langle [T(\theta_s)][L_s] \frac{d}{dt} \langle [T(\theta_s)]^{-1} \rangle \rangle [I_{odqs}] + \langle [T(\theta_s)][M_{sr}][T_{3Nr}(\theta_r)]^{-1} \rangle \frac{d}{dt} [I_{odqr}] \\ &+ \langle [T(\theta_s)] \frac{d}{dt} \langle [M_{sr}][T_{3Nr}(\theta_r)]^{-1} \rangle \rangle [I_{odqr}] \end{aligned} \quad (2.18)$$

L'équation des mailles rotorique est donnée :

$$[V_r] = [R_r][I_{rk}] + \frac{d}{dt} \langle [L_r][I_{rk}] \rangle + \frac{d}{dt} \langle [M_{rs}][I_s] \rangle \quad (2.19)$$

Après simplifications, nous obtenons un modèle de taille réduite pour la machine asynchrone défini par la nouvelle matrice d'inductance du modèle dq équivalent, en considérant que toutes les barres sont saines, est obtenu par l'expression :

$$[L] = \begin{bmatrix} L_{sc} & 0 & \frac{-N_r}{2} M_{sr} & 0 & 0 \\ 0 & L_{sc} & 0 & \frac{-N_r}{2} M_{sr} & 0 \\ \frac{-3}{2} M_{sr} & 0 & L_{sc} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{-3}{2} M_{sr} & 0 & L_{sc} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & L_e \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

Avec

$$L_{rc} = L_{rp} - M_{rr} + 2 \frac{L_e}{Nr} + 2L_b(1 - \cos \frac{2\pi}{Nr}) \quad (2.21)$$

La même façon pour la nouvelle matrice de résistance du modèle dq équivalent Nous la nouvelle matrice est déterminer par :

$$[R] = \begin{bmatrix} R_s & -\omega.L_{sc} & 0 & \frac{-N_r}{2} .\omega.M_{sr} & 0 \\ \omega.L_{sc} & R_s & \frac{-N_r}{2} .\omega.M_{sr} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_r & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_e \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

Avec $R_r = 2 \frac{R_e}{Nr} + 2R_b(1 - \cos \frac{2\pi}{Nr})$ (2.23)

Donc, en considérant que toutes les barres sont saines on pourra écrire le modèle global sous la forme :

$$\begin{bmatrix} L_{sc} & 0 & \frac{-N_r}{2} M_{sr} & 0 & 0 \\ 0 & L_{sc} & 0 & \frac{-N_r}{2} M_{sr} & 0 \\ \frac{-3}{2} M_{sr} & 0 & L_{rc} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{-3}{2} M_{sr} & 0 & L_{rc} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & L_e \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \\ I_{dr} \\ I_{qr} \\ I_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & -\omega.L_{sc} & 0 & \frac{-N_r}{2} .\omega.M_{sr} & 0 \\ \omega.L_{sc} & R_s & \frac{-N_r}{2} .\omega.M_{sr} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_r & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \\ I_{dr} \\ I_{qr} \\ I_e \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

Le couple électromagnétique développé par le moteur asynchrone est obtenu de manière générale par l'expression :

$$C_e = \frac{3}{2} p M_{sr} \frac{d}{d\theta} \begin{bmatrix} -\cos \theta & -\cos(\theta + \frac{2\pi}{16}) & \dots & \dots & -\cos(\theta + k \frac{2\pi}{16}) \\ -\sin \theta & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{16}) & \dots & \dots & -\sin(\theta + k \frac{2\pi}{16}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{r1} \\ I_{r2} \\ \vdots \\ \vdots \\ I_{r15} \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

$$C_e = \frac{3}{2} p M_{sr} \left[I_{ds} \sum_{k=0}^{Nr-1} I_{rk} \sin k \frac{2\pi}{16} + I_{qs} \sum_{k=0}^{Nr-1} I_{rk} \cos k \frac{2\pi}{16} \right] \quad (2.26)$$

II.5 La Commande vectorielle par orientation du flux (CV-OF)

L'aspect le plus important de la commande vectorielle de la machine asynchrone est le découplage du courant du stator en deux composantes, utilisées pour générer le flux magnétisant et le couple électromagnétique [16]. Le découplage consiste à établir un ensemble des transformations mathématiques pour passer d'un système possédant une double non linéarité structurelle à un système linéaire qui assure l'indépendance entre la création du flux et la production du couple comme dans une machine à courant continu à excitation séparée [17] (figure 2.5).

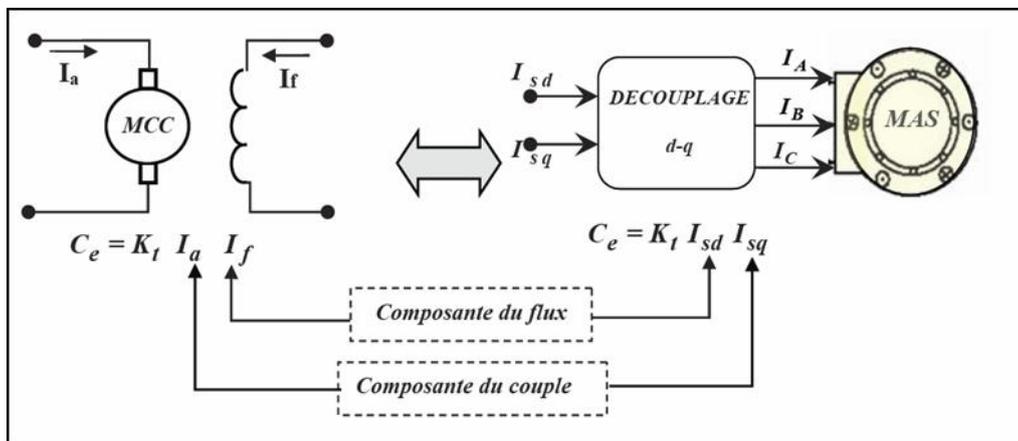


Figure 2.5. Schéma de principe du découplage pour la MAS par analogie avec la machine à courant continu.

II.5.1 Contrôle vectoriel indirect

Dans cette méthode, on n'a donc besoin ni de capteur, ni d'estimateur ou observateur de flux. Si l'amplitude du flux rotorique réel n'est pas utilisée, sa position doit être connue pour effectuer les changements de coordonnées. Ceci exige la présence d'un capteur de position du rotor. Mise à part l'adjonction d'un capteur de position, cette commande indirecte est plus simple que la commande directe, mais les résultats obtenus sont de performances plus fiables.

Cette méthode de contrôle indirect est très sensible aux variations des paramètres de la machine due à la saturation magnétique et la variation de température, surtout la constante de temps rotorique T_r .

Dans ce qui suit, nous appliquons la commande vectorielle indirecte à la machine asynchrone alimentée par un convertisseur tension.

II.5.2 Structure de la commande vectorielle indirecte

La structure de contrôle vectoriel basé sur l'orientation du flux de rotor d'une machine à induction triphasée alimentée par un onduleur de tension est explicitée dans la figure 2.6.

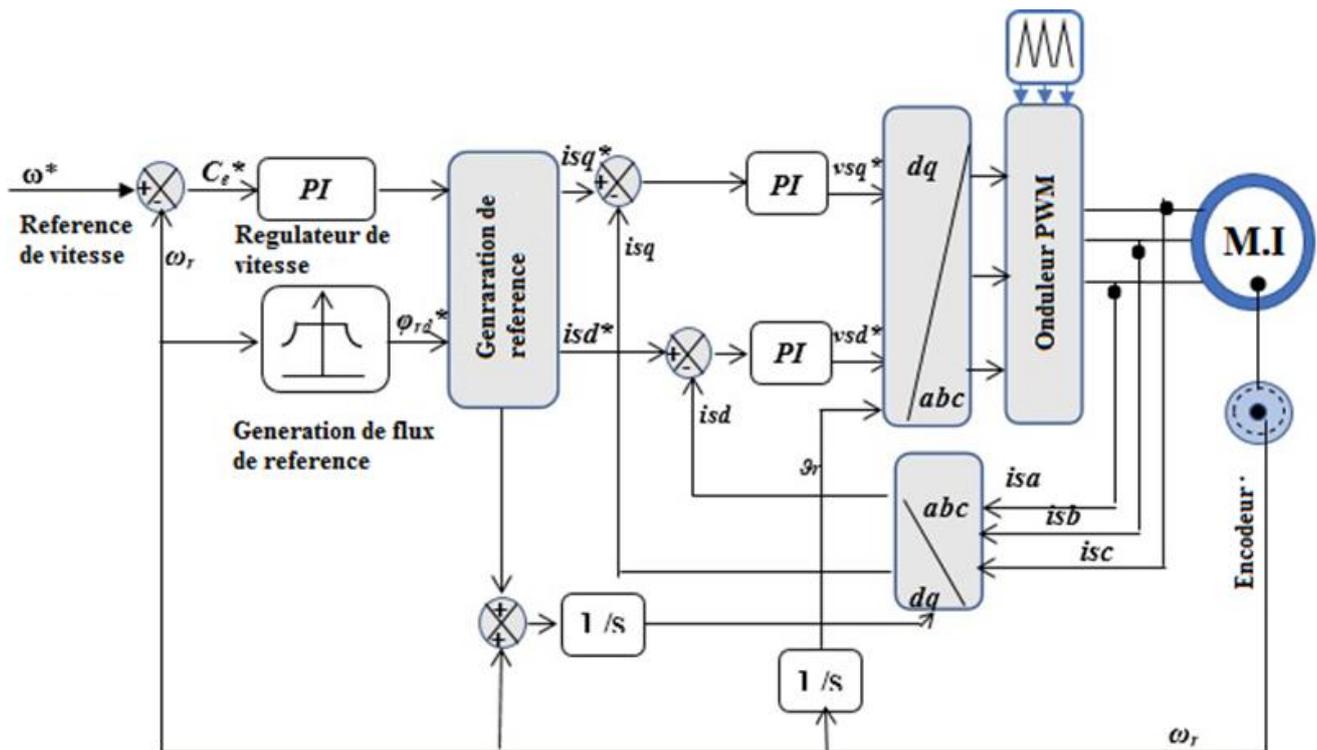


Figure 2.6 Schéma bloc de la commande vectorielle indirecte

Le schéma nécessite le contrôle en boucle fermée du courant de flux et du courant de couple en (boucle interne) et du contrôle de vitesse en (boucle externe). Le système utilise trois contrôleurs PI, à savoir le contrôleur de vitesse et les contrôleurs de courant d'axe d-q.

L'avantage d'utiliser une référence liée au champ de rotation rotorique est d'avoir des amplitudes constantes. Il est alors plus facile de faire la régulation, en agissant sur les variables i_{ds} et i_{qs} . Les grandeurs ϕ_r et C_e sont commandés séparément. Le schéma sous Simulink de la commande vectorielle indirecte est donné par la figure 2.7 ci-dessous.

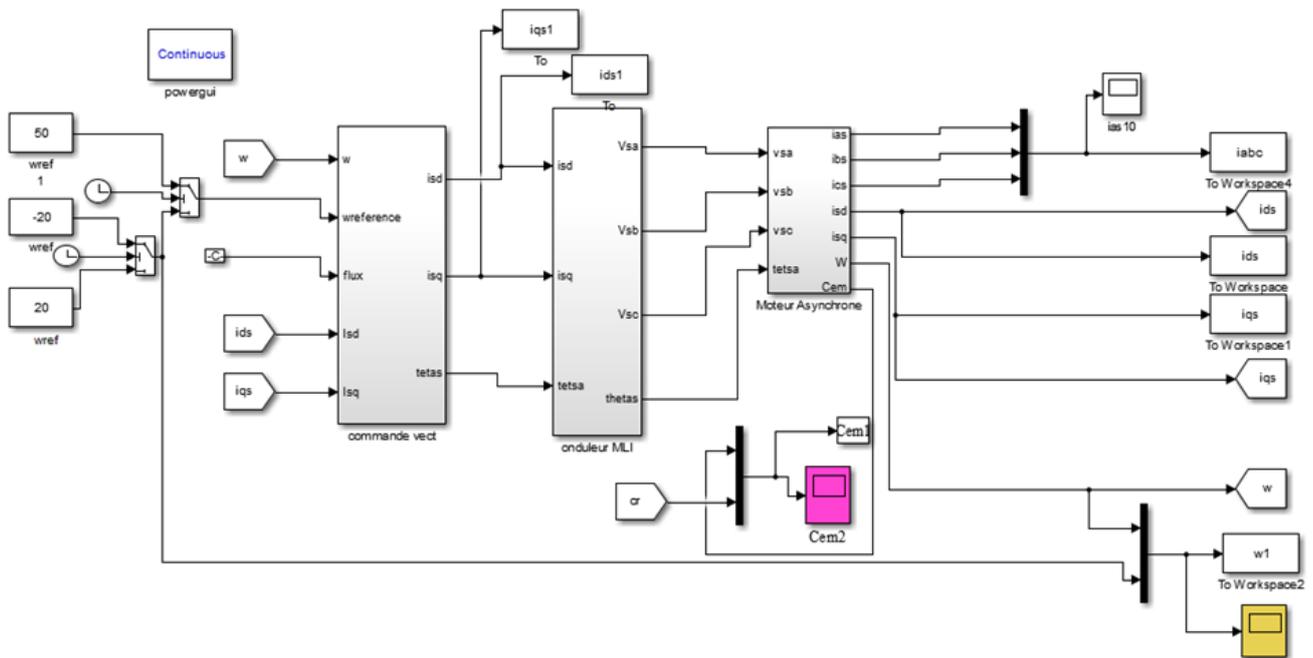


Figure 2.7 Modèle Simulink pour la commande indirecte (IFOC)

II.6 Résultats de simulation et interprétations

Les essais de simulations suivants ont été développés avec association d'un onduleur de tension. Les performances de notre commande ont été testées à partir de la simulation des modes de fonctionnement suivants :

Dans le premier essai, nous avons simulé le comportement de la machine avec une référence de vitesse à 100 rad /s lors d'un démarrage à vide avec application d'un échelon de couple charge de 3.5 N.m pendant l'intervalle $1s < t < 2.5s$.

La *figure 2.8* montre l'évolution du couple électromagnétique, de la vitesse, des courants statorique I_{sa} , I_{sb} , I_{sc} et des courants de barres rotoriques I_{rb0} , I_{rb1} , I_{rb2} , I_{rb3} . Lors de l'application de la charge, le couple suit parfaitement la référence avec une influence sur la vitesse qui rejoint par la suite sa valeur de référence.

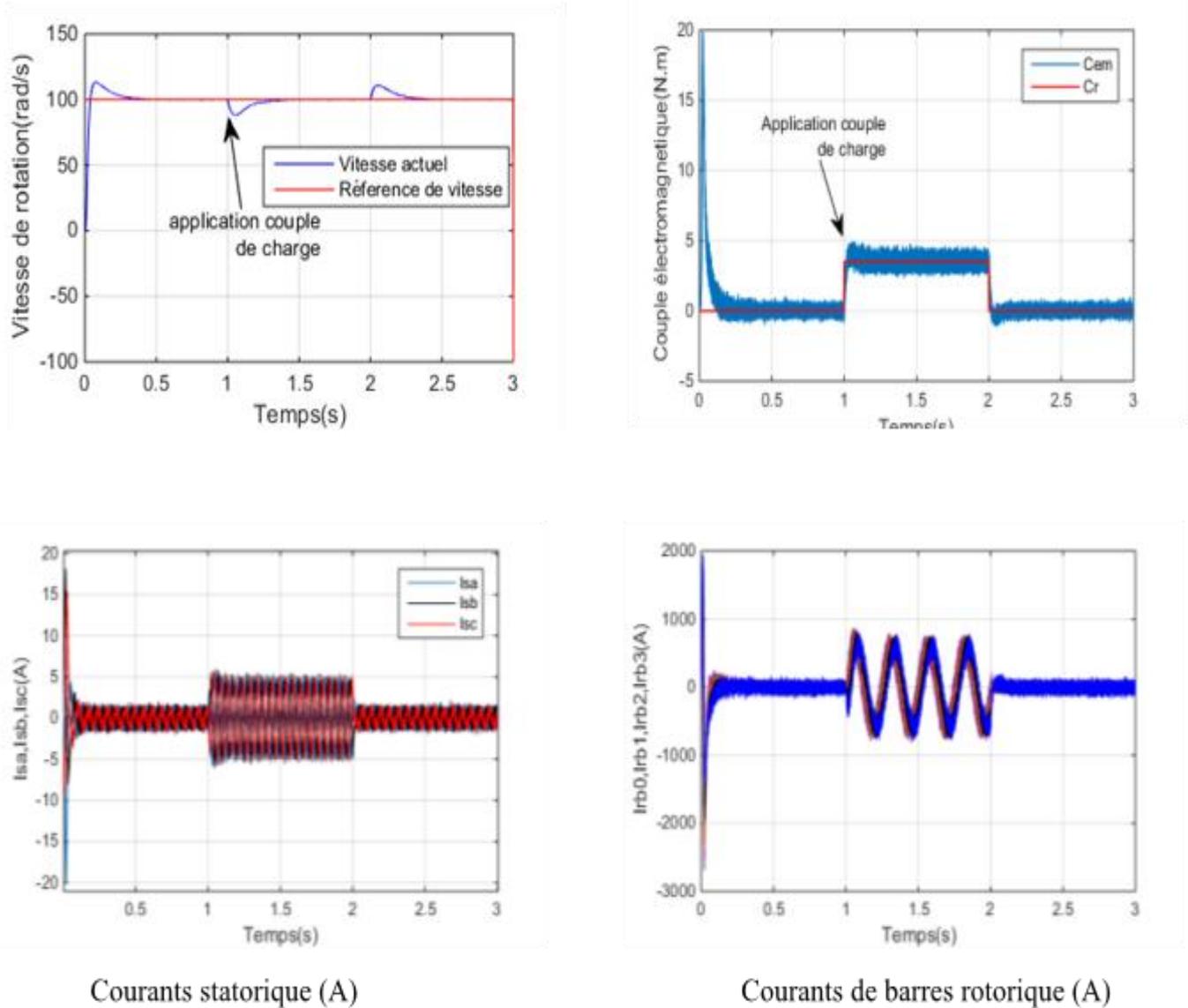


Figure 2.8 Commande par un régulateur PI classique

Dans un deuxième essai, nous avons simulé le comportement de la machine asynchrone avec un changement de la consigne de vitesse de $[+ 100 \text{ à } -100]$ rad/sec, à partir de l'instant $t=2$ sec, avec une application d'une perturbation de charge pendant des instants $0.8s < t_1 < 1.8s$ et $2.8s < t_2 < 3.8s$

Les figures 2.9 montrent les performances de la commande vectorielle appliquée à la machine. On note un rejet de la perturbation et une bonne poursuite de la référence de vitesse avec un temps de réponse très court et sans dépassement. Après l'application du couple de charge, il y a une correction de l'erreur. Toutefois, un pic de couple important apparaît au moment de l'inversion de la vitesse ce qui est néfaste pour le bon fonctionnement de la machine.

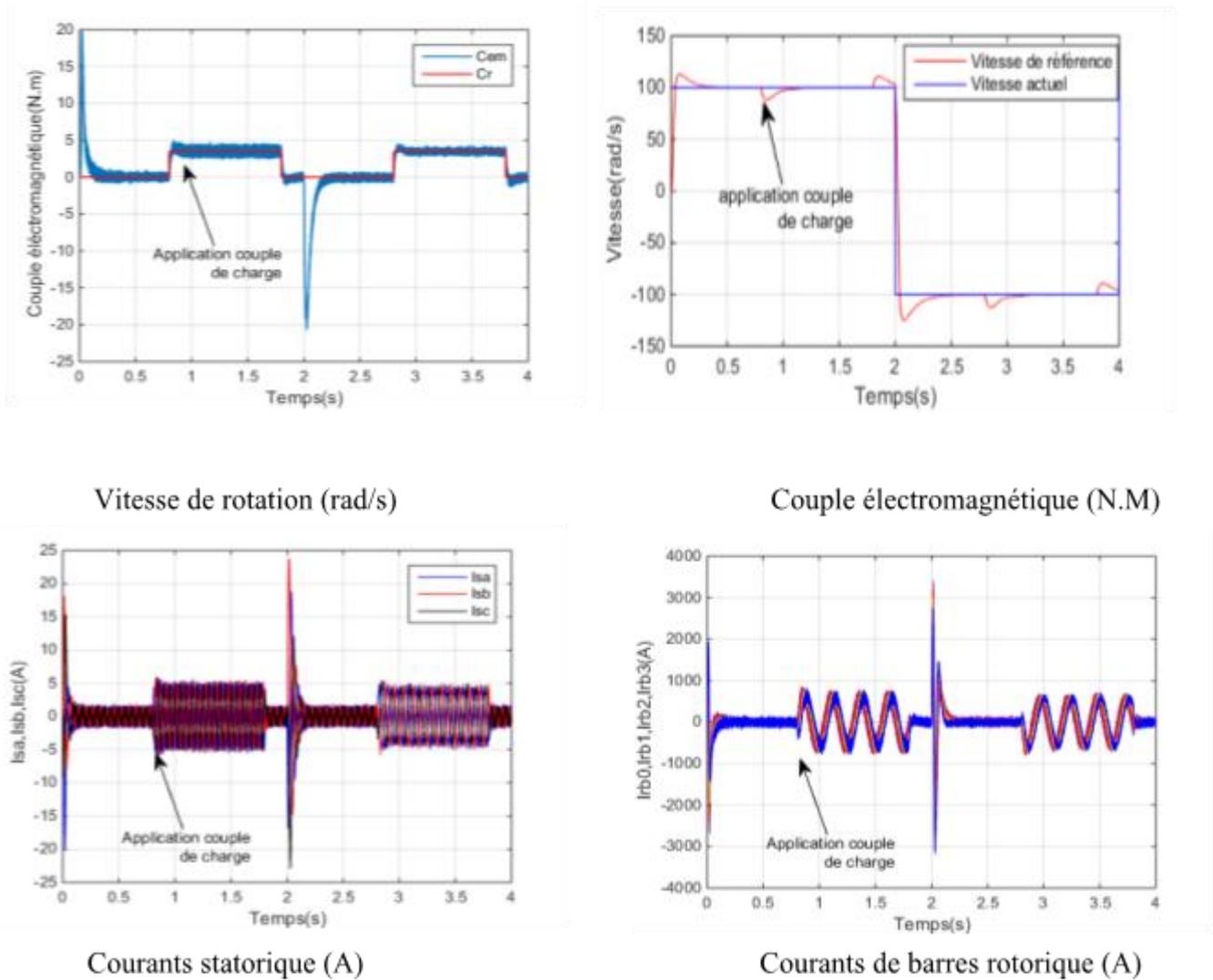


Figure 2.9 *Commande par un régulateur PI classique avec changement sens de rotation*

II.7 Conclusion

Ce chapitre a été consacré à la modélisation de la machine asynchrone à cage d'écureuil par l'approche multi-enroulement avec association onduleur tension bien adapté à la simulation des défauts rotoriques envisagés. Dans la deuxième phase, nous avons procédé à la transformation du modèle multi-enroulements en modèle réduit, pour faciliter l'étude et minimiser le temps de calcul.

L'étude de la commande de la machine asynchrone, par la méthode du flux orienté indirecte avec un réglage classique a été élaborée. Les résultats de simulation, sous plusieurs conditions de fonctionnement, ont été rapportés. Ces régulateurs sont robustes vis-à-vis des conditions de fonctionnement. De plus, ils ont montré un bon comportement en régulation et en poursuite, et un rejet de perturbation acceptable.

CHAPITRE III

Modélisation des Différents Défauts d'Excentricité de la MAS

III.1 Introduction

Dans ce chapitre, on s'intéressera à l'étude par simulation numérique des différents types de défauts d'excentricités. On commencera par l'étude des défauts qui apparaissent dans la vitesse de rotation, tels que le courant des 5 premières barres de la cage rotorique, et le courant statorique, ainsi que couple électromagnétique. On considère, aussi les différents défauts d'excentricités : statique, dynamique et mixte.

La dernière partie de ce chapitre est réservée à l'interprétation des résultats de la simulation effectuée sous l'environnement Matlab/Simulink.

Les techniques de détection des défauts sont basées sur une analyse spectrale du courant statorique.

III. 2 Etude de défauts d'excentricité

III.2.1 Modélisation des fonctions de l'entrefer et la perméance

III.2.1.1 Entrefer

Pour traiter le défaut d'excentricité, on doit utiliser une expression de l'entrefer qui tient compte de ce type de défaut [18]. La fonction de l'entrefer se présente sous la forme (3.1).

$$e = (\theta_s, \theta_r) = e_0 - a_1 \cdot \cos(\theta_s) - a_2 \cdot \cos(\theta_s - \theta_r) \quad (3.1)$$

Avec :

$$a_1 = \text{eps} e_0 \quad (3.2)$$

a_1 : Quantité d'excentricité statique.

eps : Pourcentage d'excentricité statique.

Et.

$$a_2 = \text{epd} e_0 ; \quad (3.3)$$

a_2 : Quantité d'excentricité dynamique.

epd : Pourcentage d'excentricité dynamique.

La fonction inverse de l'entrefer est de la forme suivante :

$$e^{-1}(\theta_s, \theta_r) = \frac{1}{e_0 (1 - a_3 \cdot \cos(\theta_s - \theta_{r1}))} \quad (3.4)$$

Avec

$$a_3 = \sqrt{a_1^2 + 2 \cdot a_1 \cdot a_2 \cos(\theta_r) + a_2^2} \quad (3.5)$$

$$\theta_{r1} = \arctan \left(\frac{a_2 \cdot \sin(\theta_r)}{a_1 + a_2 \cdot \cos(\theta_r)} \right) \quad (3.6)$$

Donc, on peut l'écrire comme suite :

$$e^{-1}(\theta_s, \theta_r) = A_1 + A_2 \cdot \cos(\theta_s, \theta_r) \quad (3.7)$$

III. 2.1.2 Perméance

L'expression de la perméance qui tient compte du défaut de l'excentricité [19] est :

$$p_r(\theta_s, \theta_r) = \mu_0 \cdot A_1 + \mu_0 \cdot A_2 \cdot \cos(\theta_s - \theta_{r1}) \quad (3.8)$$

avec

$$A_1 = \frac{1}{e_0 \cdot \sqrt{1 - a_3^2}} \quad (3.9)$$

$$A_2 = \frac{1}{e_0 \cdot \sqrt{1 - a_3^2}} \left(\frac{1 - \sqrt{1 - a_3^2}}{a_3} \right) \quad (3.10)$$

III. 2.1.3 Excentricité statique

Dans le cas de l'excentricité statique, le rotor est décalé du centre de l'alésage stator mais tourne toujours autour de son axe. Pour ce type de défaut, la longueur de l'entrefer dans la direction radiale n'est plus uniforme. Elle est caractérisée par deux grandeurs essentielles : de l'entrefer un est maximale et l'autre minimale. Les positions de ces deux grandeurs sont fixes par rapport à la référence statorique. On peut la modéliser par la fonction suivante [20] :

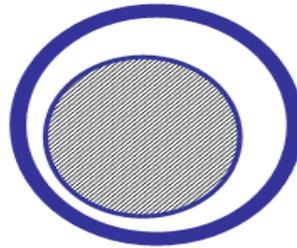


Figure 3.1 Excentricité statique

Si $A_1 = 0$

$$\Rightarrow a_3 = a_1 \quad \Rightarrow A_1 = \frac{1}{e_0 \cdot \sqrt{1 - a_1^2}} \quad (3.11)$$

$$A_2 = \frac{2}{e_0 \cdot \sqrt{1 - a_1^2}} \left(\frac{1 - \sqrt{1 - a_1^2}}{a_1} \right) \quad \Rightarrow \theta_1 = 0 \quad (3.12)$$

$$e = (\theta_s) = e_0 - a_1 \cdot \cos(\theta_s) \quad (3.13)$$

Et, la perméance sera :

$$p(\theta_s) = \mu_0 \cdot A_1 + \mu_0 \cdot A_2 \cdot \cos(\theta_s) \quad (3.14)$$

θ_s : Représente la position angulaire d'un point fixe d'entrefer par rapport au référentiel statorique.

e_0 : est la longueur uniforme de l'entrefer.

III. 2.1.4 Excentricité dynamique

Le rotor est positionné au centre de l'alésage mais ne tourne plus autour de son axe [21].

Son modèle est donné par les relations suivantes :

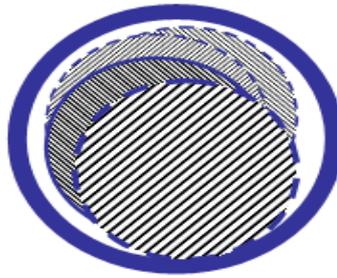


Figure 3.2 Excentricité dynamique

Si $A_1 = 0$

$$\Rightarrow a_3 = a_2 \quad \Rightarrow A_1 = \frac{1}{e_0 \cdot \sqrt{1 - a_2^2}} \quad (3.15)$$

$$A_2 = \frac{2}{e_0 \cdot \sqrt{1 - a_2^2}} \left(\frac{1 - \sqrt{1 - a_2^2}}{a_2} \right) \quad (3.16)$$

$$\theta_{r1} = \arctan \left(\frac{a_2 \cdot \sin(\theta_r)}{a_2 \cdot \cos(\theta_r)} \right) \quad (3.17)$$

$$e^{-1}(\theta_s, \theta_r) = A_1 + A_2 \cdot \cos(\theta_s, \theta_{r1}) \quad (3.18)$$

Et la perméance sera :

$$p(\theta_s, \theta_r) = \mu_0 \cdot A_1 + \mu_0 \cdot A_2 \cdot \cos(\theta_s - \theta_{r1}) \quad (3.19)$$

III. 2.1.5 Excentricité mixte

L'excentricité mixte est un défaut rotorique englobant les deux types de défauts d'excentricité statique et dynamique [22],[23].

Si $a_1 \neq 0$ et $a_2 \neq 0$

Donc, on a un pourcentage de défaut d'excentricité statique (esp) et une autre dynamique (epd).

L'équation de la variation de l'entrefer dans ce cas, devient comme suite :

$$e = (\theta_s, \theta_r) = e_0 - a_1 \cdot \cos(\theta_s) - a_2 \cdot \cos(\theta_s - \theta_r) \quad (3.20)$$

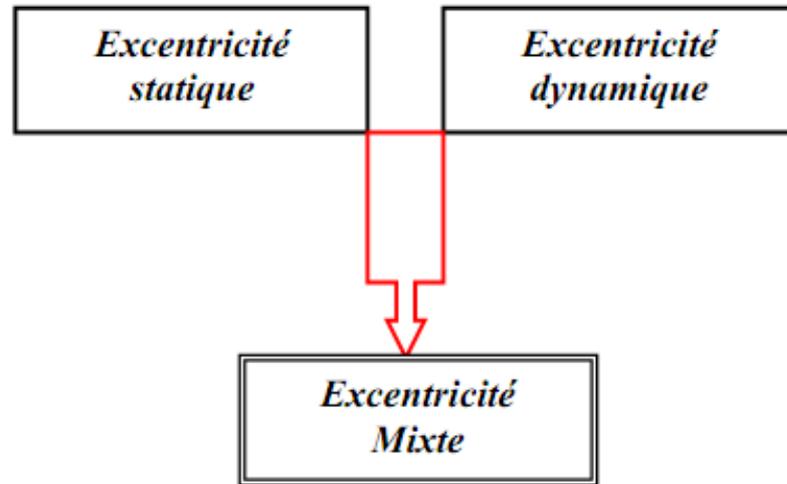


Figure 3.3 Excentricité mixte

III.2.2 Validation des Résultats de simulations

Nous présentons dans cette partie la simulation des grandeurs de la machine (vitesse, couple, courants des phases statoriques, les courants des barres rotoriques, la variation d'entrefer) pour des essais d'excentricité statique, dynamique, et excentricité mixte.

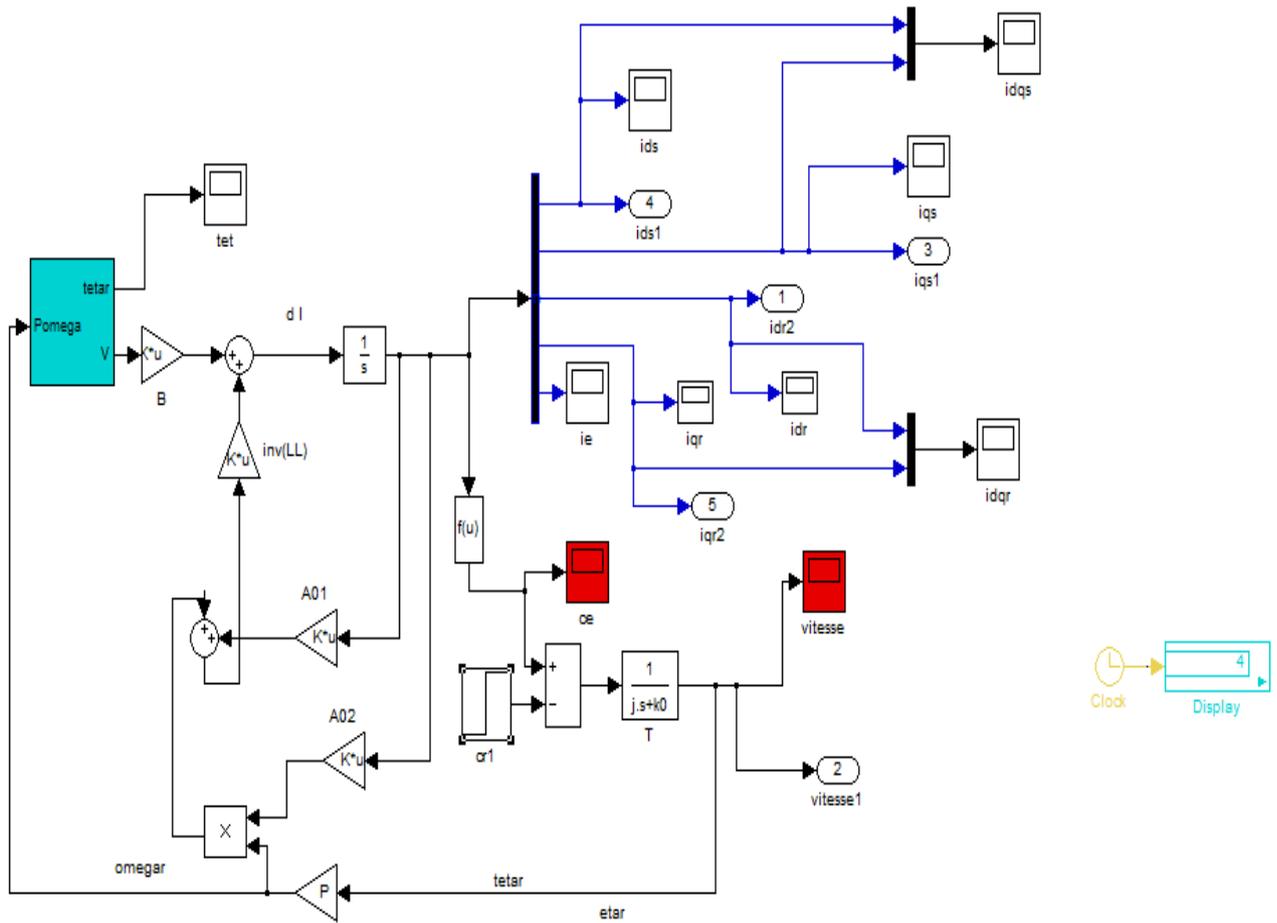
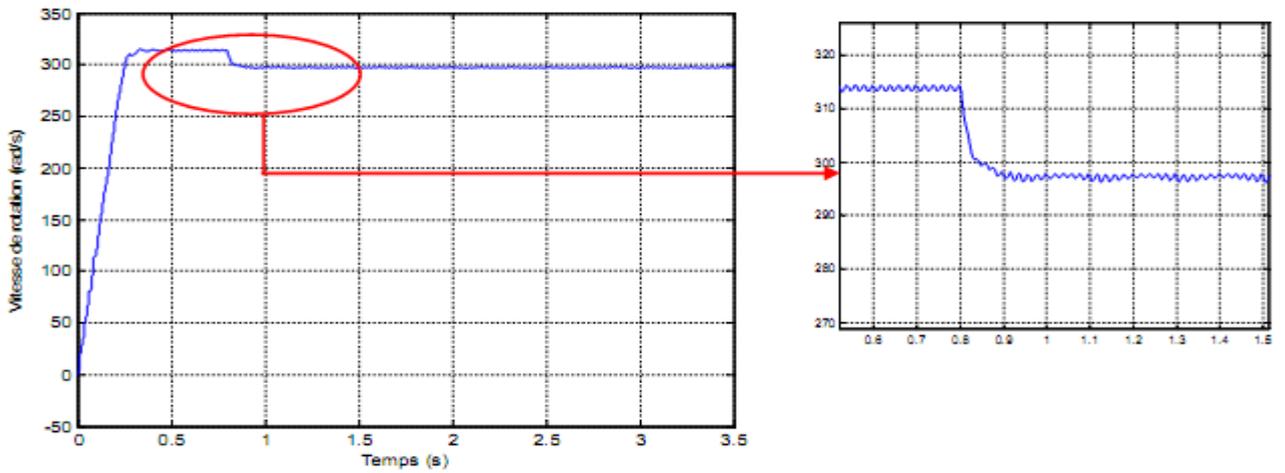
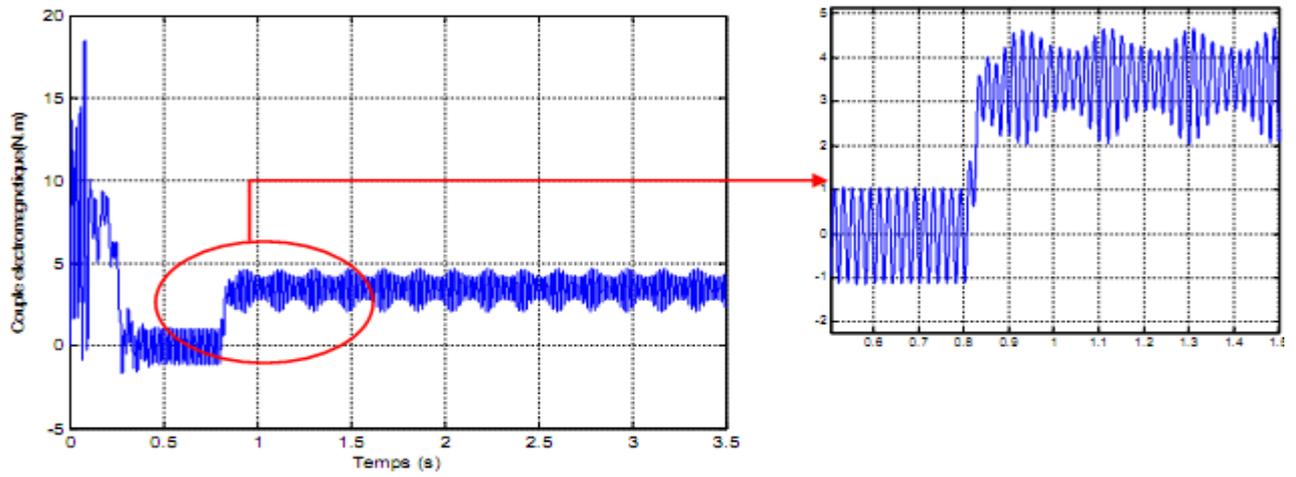


Figure 3.4 : Schéma de simulation en SUMILINK du modèle réduit

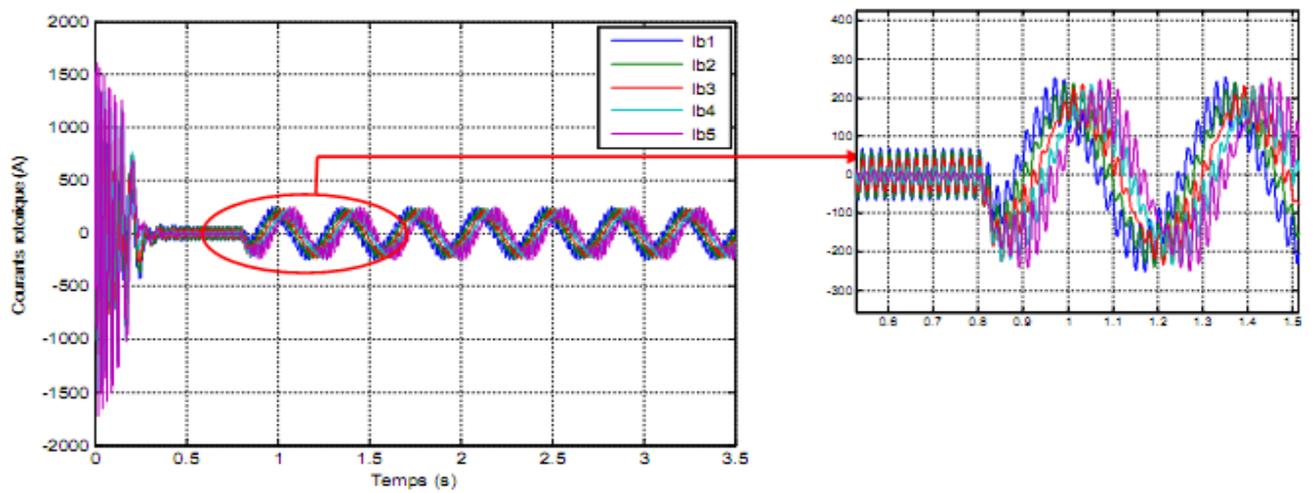
III.2. 2.1 Simulation d'excentricité statique (10%)



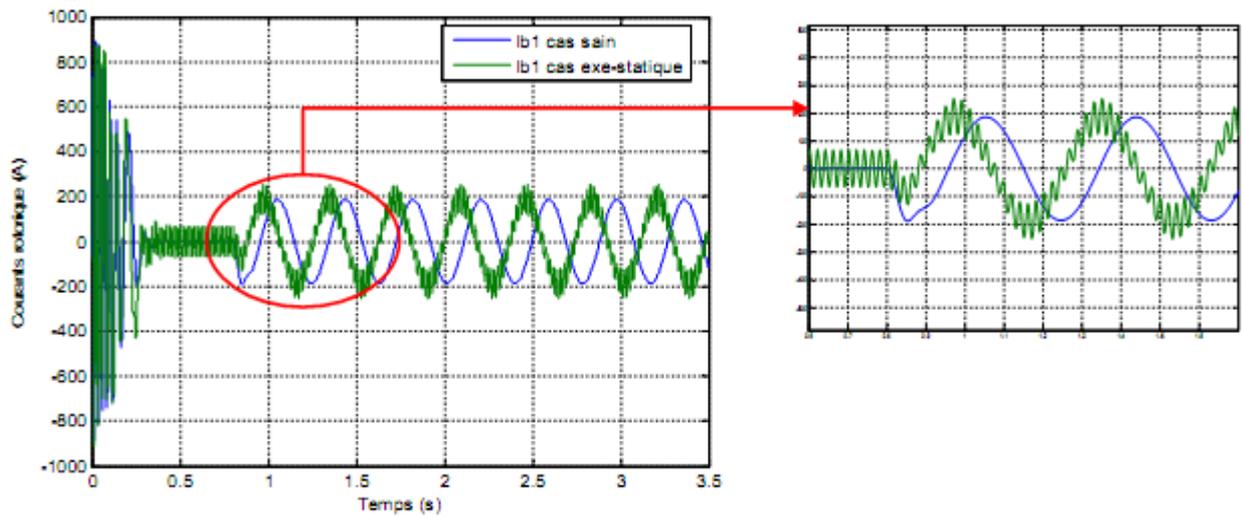
a- Vitesse de rotation



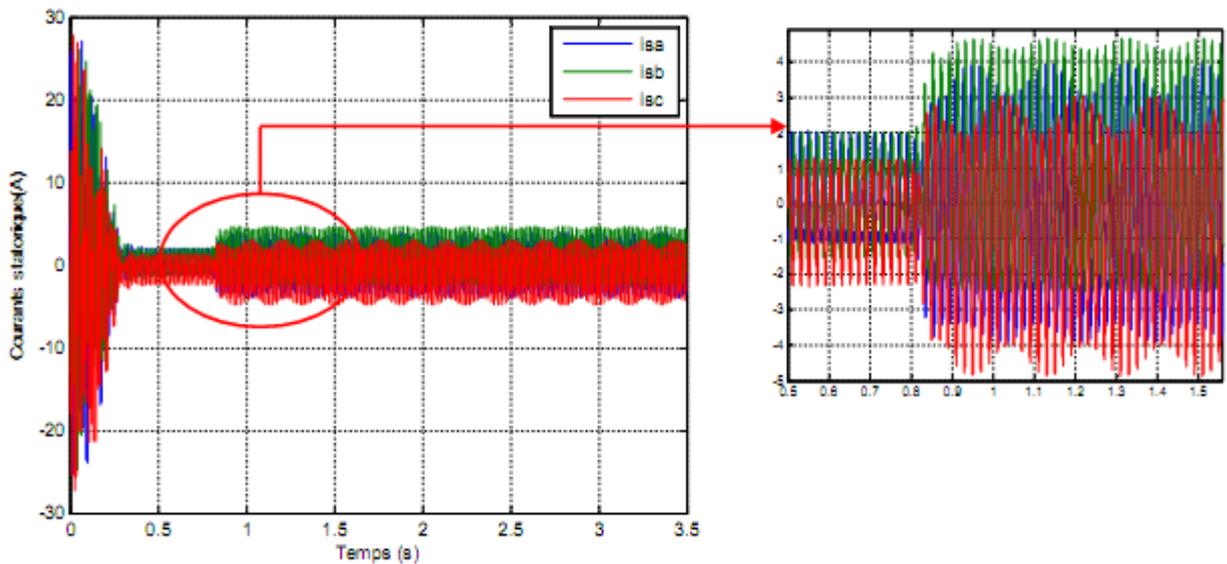
b- Couple électromagnétique



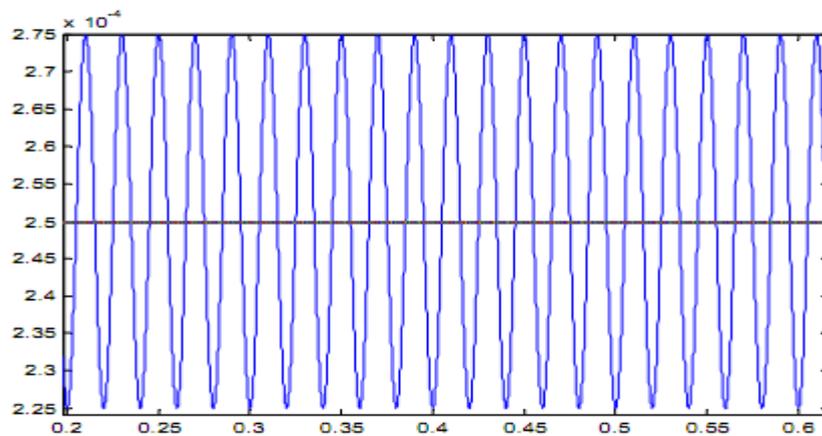
c- Courant des 5 premières barres rotoriques



d- Courants rotoriques d'une barre saine et une autre en défaut



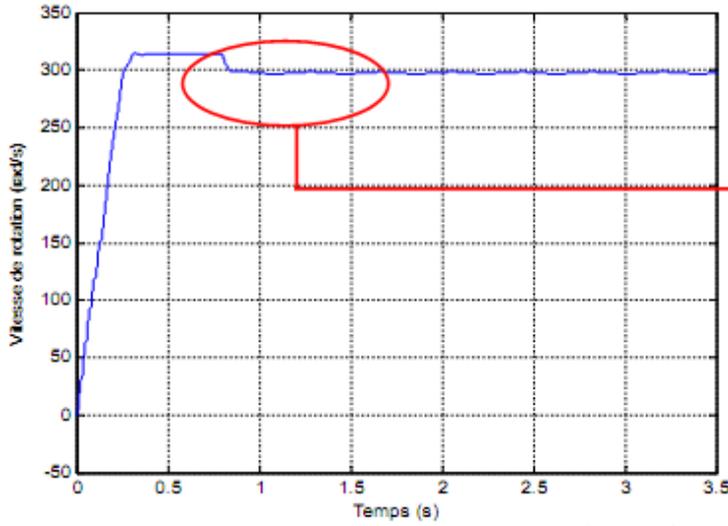
e- Courants statoriques des phases "a, b, c" lors d'un défaut d'excentricité statique



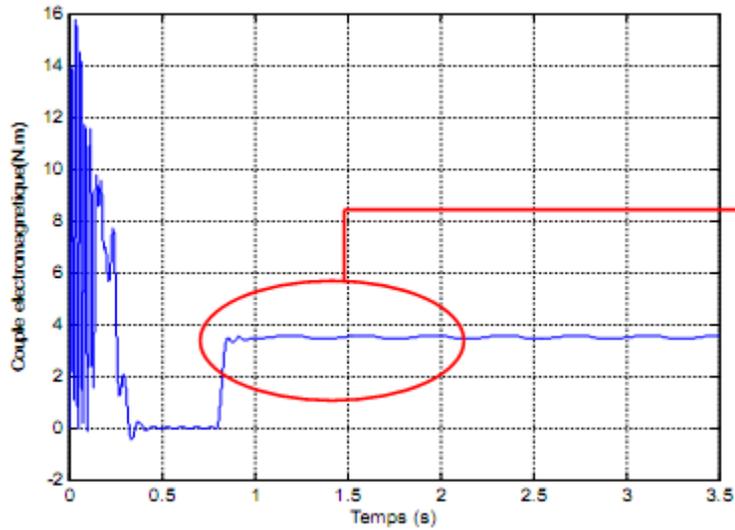
f- Variation de l'entrefer lors d'une excentricité statique de 10%

Figure 3.5 Caractéristiques de la machine avec un défaut d'excentricité statique de 10%

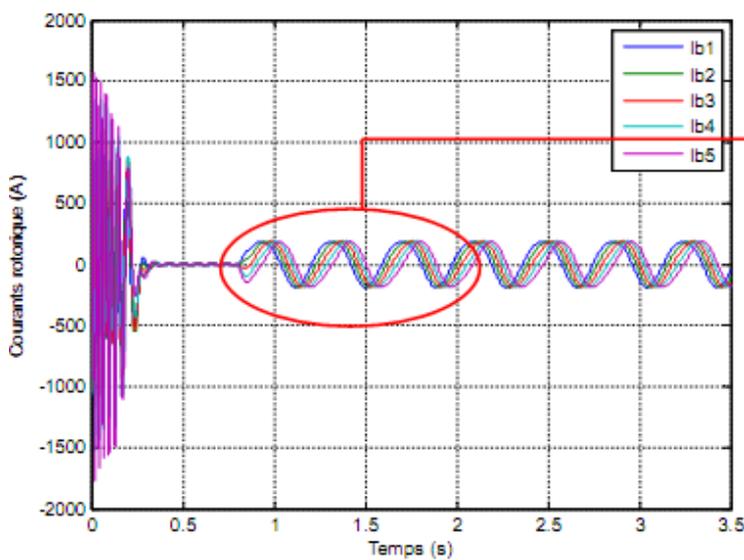
III.2.2.2 Simulation d'excentricité dynamique (20%)



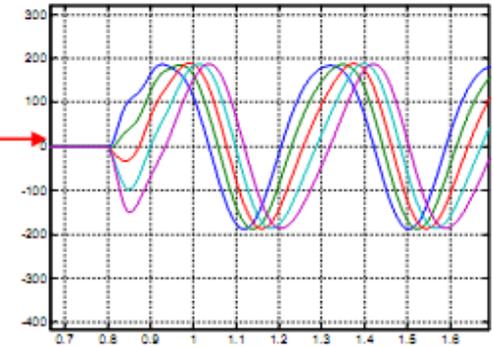
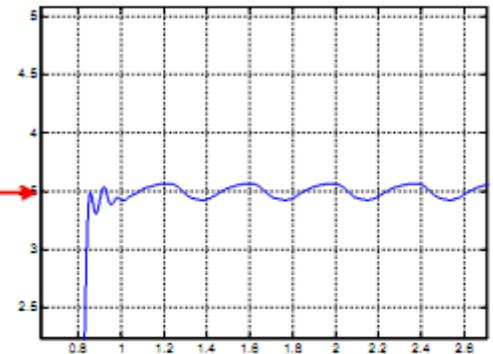
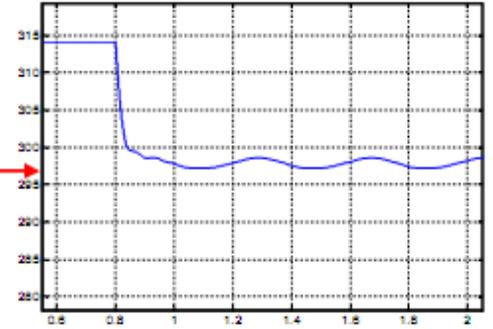
a- Vitesse de rotation

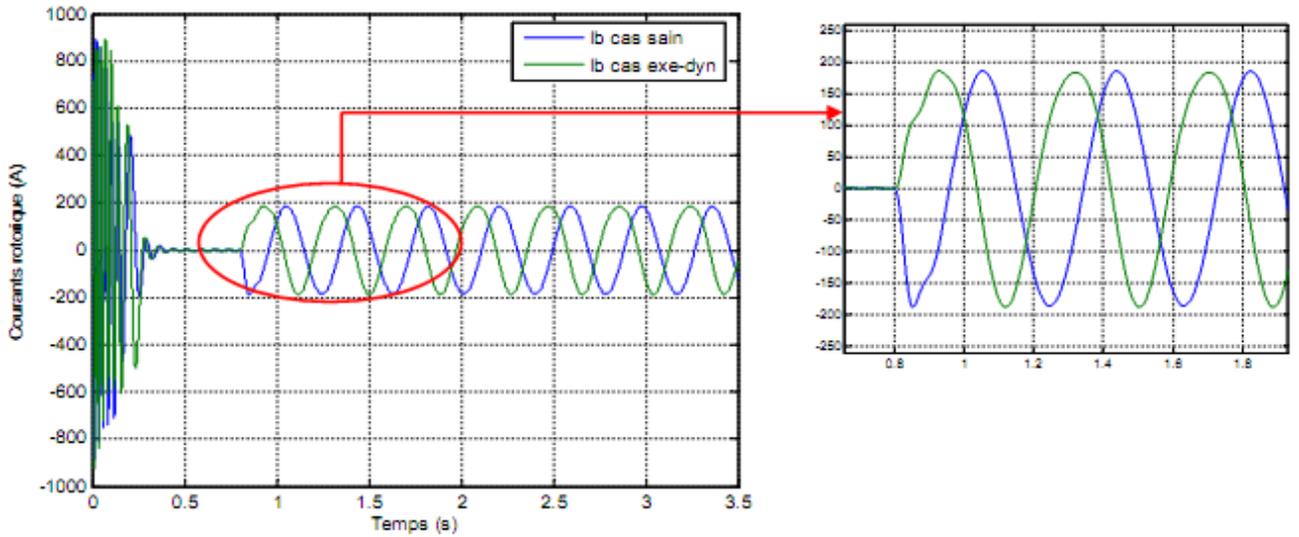


b- Couple électromagnétique

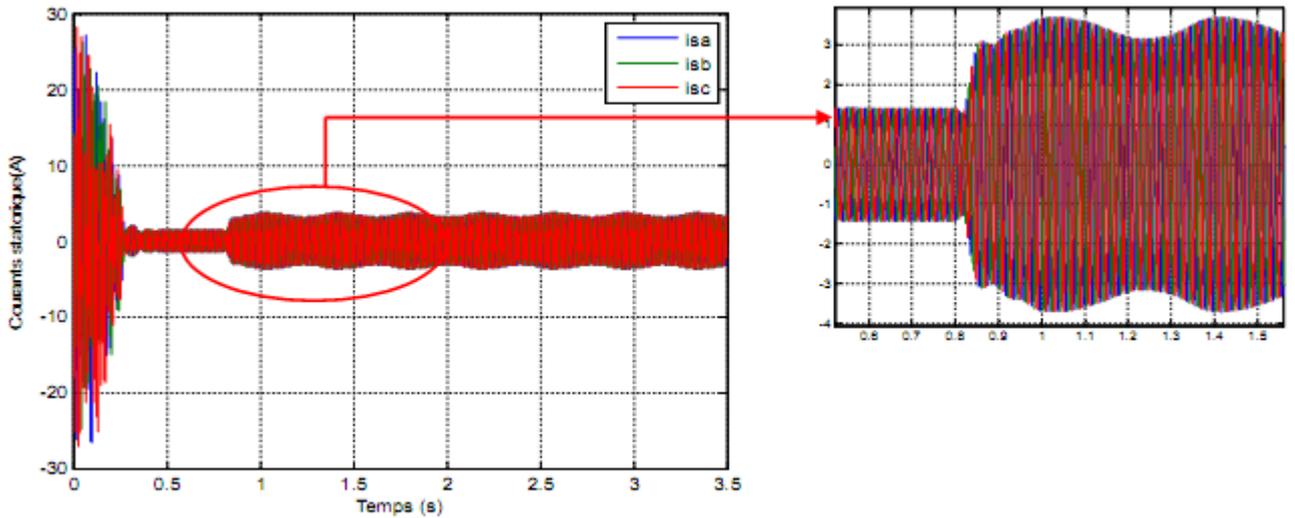


c- Courants des 5 premières barres rotoriques

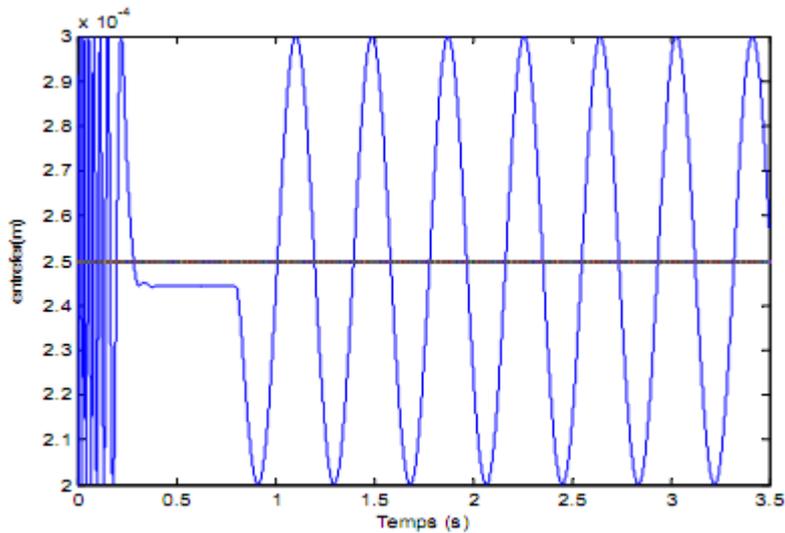




d- Courants rotoriques d'une barre saine et une autre en défaut



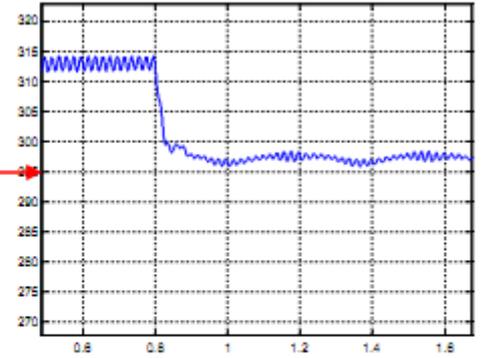
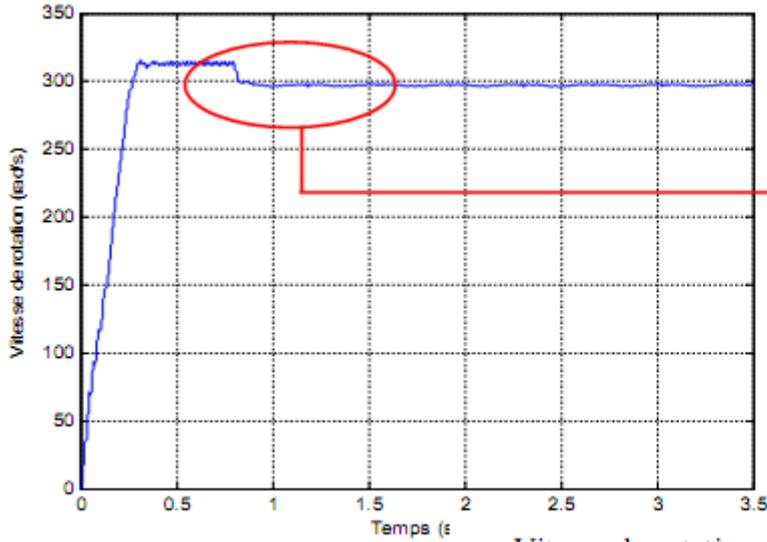
e- Courants statoriques des phases "a, b, c" lors d'un défaut d'excentricité dynamique



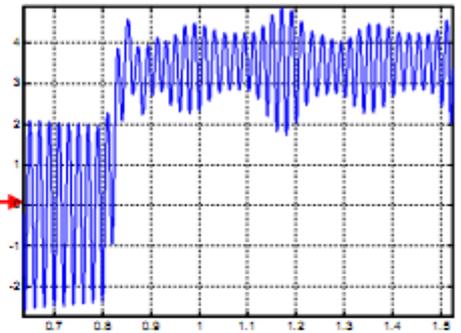
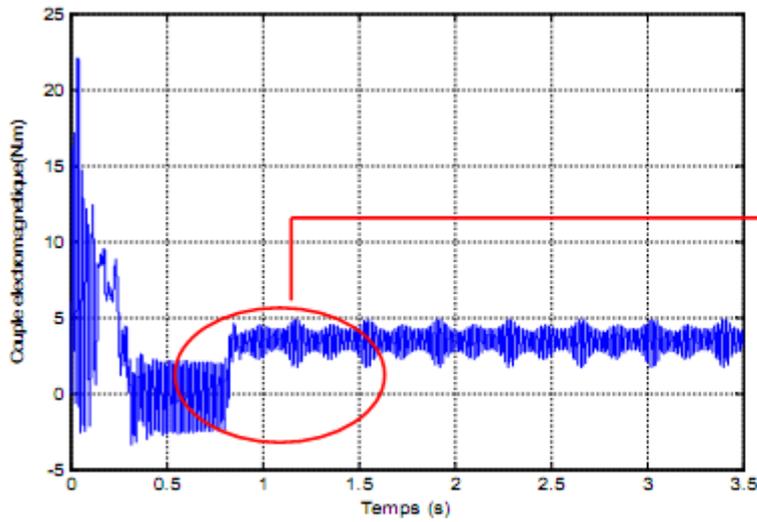
f- Variation de l'entrefer lors d'excentricité dynamique (20%)

Figure 3.6 Caractéristiques de la machine avec un défaut d'excentricité dynamique 20%

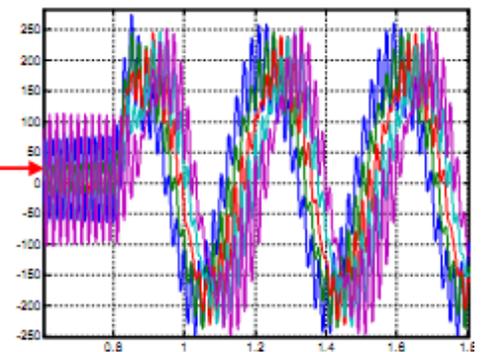
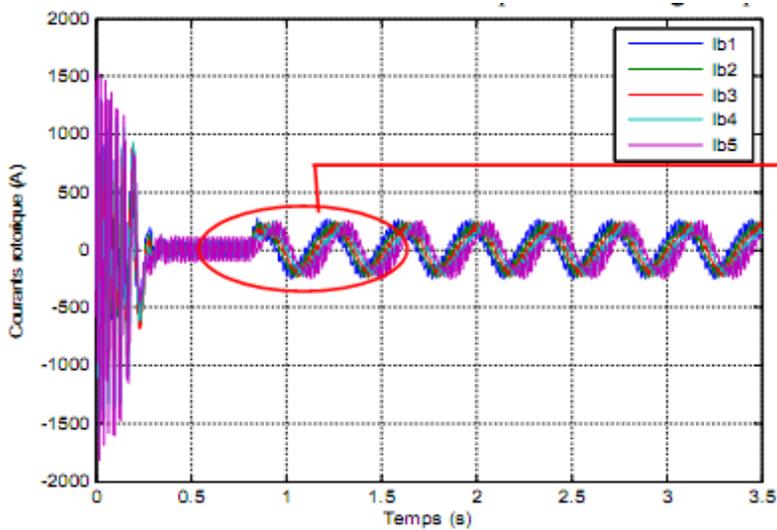
III.2.2.3 Simulation d'excentricité mixte statique (10%) et dynamique (20%)



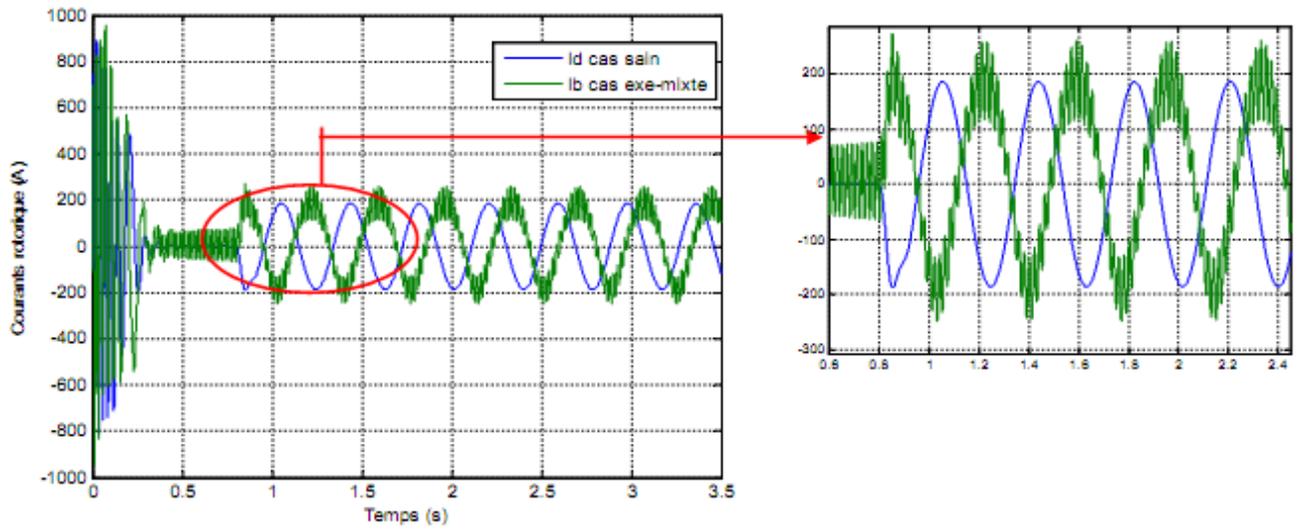
a- Vitesse de rotation



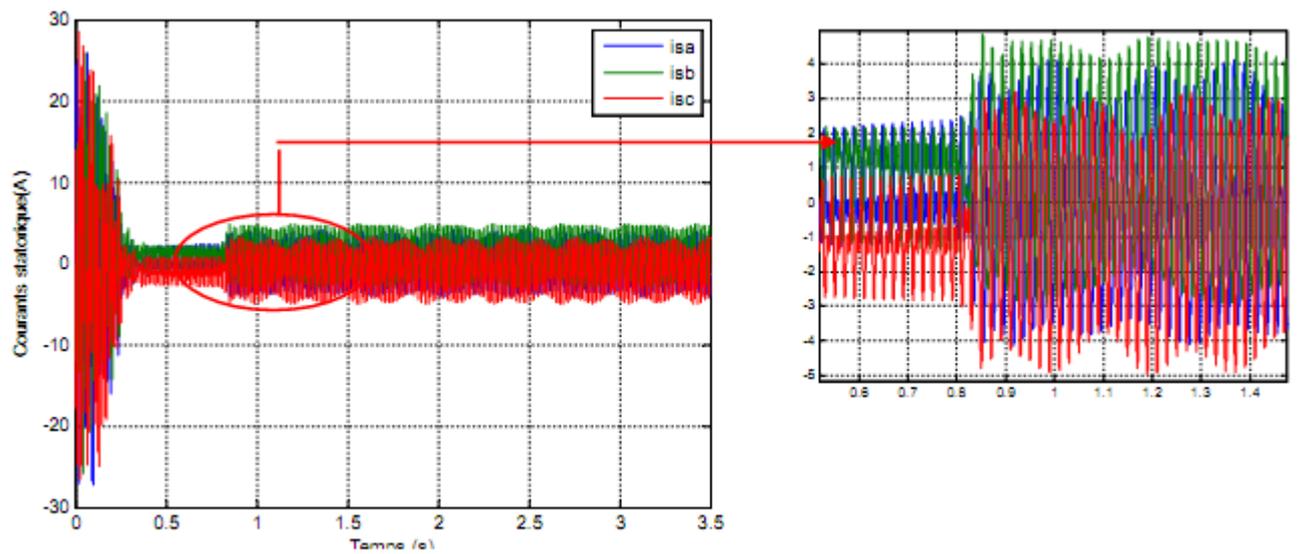
b- Couple électromagnétique



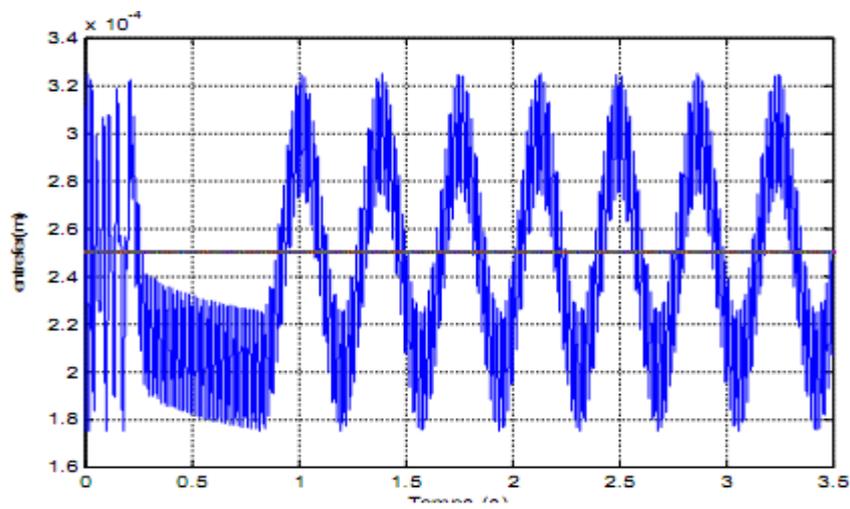
c- Courant des 5 premières barres rotoriques



d- Courants rotoriques d'une barre saine et autre en défaut



e- Courants statoriques des phases "a, b, c" lors d'un défaut d'excentricité mixte



f- Variation de l'entrefer lors d'un excentricité mixte

Figure 3.7 Caractéristiques de la machine avec un défauts d'excentricité mixte

III.3 Interprétation des résultats

Les figures 3. 5.a à 3.5.f présentent respectivement les grandeurs de la machine asynchrone : la vitesse de rotation, le couple électromagnétique, les courants des cinq premières barres rotoriques, le courant d'une barre rotorique lors d'un défaut et dans le cas sain, les trois courants des phases statoriques "a, b, c", la variation de l'entrefer dans le cas de fonctionnement sain et le cas de défaut, lors d'un essai contenant d'abord un démarrage à vide pendant 0.8 seconde. Par la suite, nous avons procédé à une application d'une charge de valeur 3.5 N.m que nous avons maintenu durant le reste de nos essais. On présente des zooms sur des parties pour bien présenter l'influence du défaut sur les grandeurs de la machine.

Le défaut de l'excentricité statique provoque une perturbation sur les grandeurs de la machine. Nous remarquons l'apparition d'oscillations rapides et très rapprochées entre elles.

Elles sont très visibles en comparaison des cas sain et en défauts.

Les figures 3.6.a à 3.6.f présentent respectivement le comportement des grandeurs de la machine lorsqu'un défaut d'excentricité dynamique. Dans cet essai, la vitesse et le couple électromagnétique oscillent moins lentement que dans le cas avec défaut d'excentricité statique (voir figures 3.6.a et 3.6.b). On ne souligne aucune variation sur les courants rotoriques dans la figure 3.5.c, pour bien comparer les résultats voire la figure 3.6.d.

On remarque aussi une augmentation de l'amplitude des oscillations des courants statorique rotoriques et statorique (voir figure 3.6.e). La dernière figure de cet essai illustre la variation de l'entrefer lors de la présence de ce type de défaut.

Le défaut, combiné statique et dynamique représente un défaut mixte. Les figures 3.7.a à 3.7.f, montrent les manifestations qui nous avons constaté sur les grandeurs de la machine lors des défauts statique et dynamique.

III.4 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les développements des modèles de défaut de la machine asynchrone puis la simulation.

Nous avons présenté les courbes de simulations des grandeurs mécaniques et électromécaniques à savoir, vitesse, couple, courants des phases statoriques, courants des barres rotoriques, et la variation d'entrefer et ce pour des essais d'excentricité statique, dynamique, et mixte.

La vitesse et le couple électromagnétique oscillent plus en cas d'excentricité dynamique que dans le cas d'excentricité statique.

Il y a aussi une augmentation de l'amplitude des oscillations des courants statoriques et rotoriques ainsi qu'une variation de l'entrefer.

CHAPITRE IV

Application de l'Analyse par Ondelettes

IV.1 Introduction

Afin d'étudier les défauts les plus fréquents pouvant éventuellement apparaître dans le rotor des moteurs asynchrones triphasés nous avons choisi les défauts d'excentricité. Nous mettons en évidence les modifications qu'il faut apporter au modèle du moteur sain. Nous adoptons l'approche de Park [24] pour la détection et le diagnostic d'un tel défaut ainsi que la méthode d'analyse par ondelettes pour extraire les signatures significatives du défaut de la MAS sujette à la commande vectorielle indirect avec un régulateur classique PI [23].

IV.2 Modélisation des défauts d'excentricités

La modélisation du défaut d'excentricité de la machine avec une variation de l'entrefer est une tâche difficile. La difficulté devient de plus en plus grande avec la complexité du système étudié et le calcul des inductances par l'Approche de Fonction d'Enroulement (AFE). On a étudié le modèle multi-enroulement afin d'avoir un modèle représentatif qui reproduit fidèlement le fonctionnement de la machine avec ce type de défaut. La figure 4.1 illustre une machine avec un rotor excentrique où R et r sont respectivement les rayons du stator et du rotor. L'entrefer moyen est représenté par un cercle en ligne discontinue [25], [26].

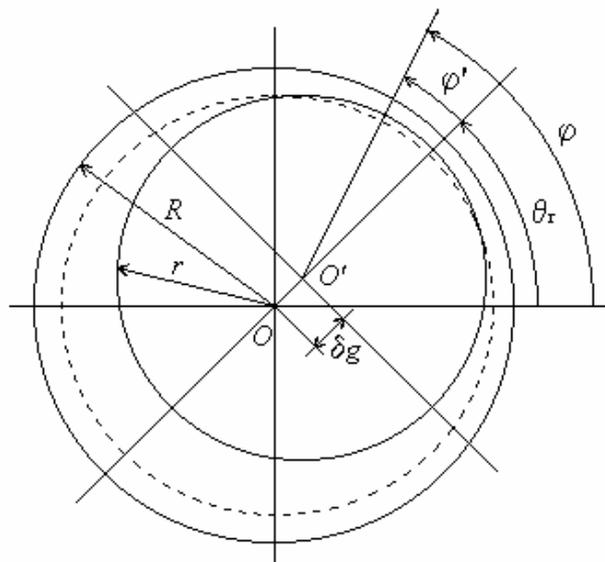


Figure 4.1: Entrefer de la machine avec rotor excentrique

Les centres de rotation O et O' sont respectivement le centre du stator et du rotor, où ϕ et ϕ' représentent respectivement la position d'un point d'un référentiel lié au stator et au rotor. θ_r donne la position du rotor et δ_g représente le décalage entre les deux centres.

Pour analyser un défaut d'excentricité, on doit utiliser une expression de l'entrefer qui tient compte de ce type de défaut, soit :

$$g_e(\theta_s, \theta_r) = e + \delta_s \cos(\theta_s) - \delta_d \cos(\theta_s - \theta_r) \quad (4.1)$$

où

$$\begin{cases} \delta_s = eps * e \\ \delta_d = epd * e \end{cases} \quad (4.2)$$

avec

- g_0 : épaisseur moyenne de l'entrefer ;
- δ_s : quantité d'excentricité statique ;
- eps : pourcentage d'excentricité statique ;
- δ_d : quantité d'excentricité dynamique ;
- epd : pourcentage d'excentricité dynamique.

Pour le calcul des inductances par l'AFE, il est nécessaire d'inverser la fonction d'entrefer. Elle est exprimée dans le cas d'un entrefer non uniforme par l'expression suivante :

$$g_e^{-1}(\theta_s, \theta_r) = \frac{1}{g_0(1 - a_3 \cos(\theta_s - \theta_{r1}))} \quad (4.3)$$

Avec

$$a_3 = \sqrt{\delta_s^2 + 2\delta_s \delta_d \cos(\theta_r) + \delta_d^2} \quad (4.4)$$

$$\theta_{r1} = \arctan\left(\frac{\delta_d \cdot \sin(\theta_r)}{\delta_s + \delta_d \cdot \cos(\theta_r)}\right) \quad (4.5)$$

On peut écrire la fonction d'entrefer inverse selon l'expression suivante :

$$g_e^{-1}(\theta_s, \theta_r) = A_1 + A_2 \cdot \cos(\theta_s, \theta_r) \quad (4.6)$$

La modélisation du fonctionnement du moteur avec le défaut d'excentricité statique est réalisée en remplaçant dans l'expression (4.1) δ_d par 0, et δ_s par 0 pour un défaut d'excentricité dynamique. L'excentricité mixte est réalisée en considérant que la quantité d'excentricité statique et le degré d'excentricité dynamique sont non nulles, soient $\delta_d \neq 0$ et $\delta_s \neq 0$.

IV.2.1 Calcul de la perméance

La perméance par unité de surface correspondante à un entrefer en absence de l'encoche de la surface d'alésage est :

$$P(\theta_s, \theta_r) = \frac{\mu_0}{g_e(\theta_s, \theta_r)} = \mu_0 \cdot g_e^{-1}(\theta_s, \theta_r) \quad (4.7)$$

On obtient une formule de la perméance qui tient compte du défaut d'excentricité :

$$P(\theta_s, \theta_r) = \mu_0 \cdot A_1 + \mu_0 \cdot A_2 \cos(\theta_s - \theta_r) \quad (4.8)$$

$$\text{Avec } A_1 = \frac{1}{g_0 \cdot \sqrt{1 - a_3^2}} \quad \text{et } A_2 = \frac{1}{g_0 \cdot \sqrt{1 - a_3^2}} \left(\frac{1 - \sqrt{1 - a_3^2}}{a_3} \right) \quad (4.9)$$

IV.3 Résultats de simulation par régulateur PI

Les résultats de simulations suivants ont été développés avec association d'un onduleur de tension. Les performances de notre commande ont été testées à partir d'un démarrage en charge de la MAS pour une référence de vitesse de 0 à 20 rad/s avec application d'une consigne du couple de charge en régime établi pour ($t > 0.6s$) suivi d'une inversion du sens de rotation de 20 rad/s à -20 rad/s à l'instant ($t = 2s$). Les résultats de la *figure 4.2* montrent que la commande vectorielle indirecte appliquée à la machine asynchrone dans le cas sain présente des performances intéressantes [27] [28].

Les résultats de simulation des *figures (4.3, 4.4, 4.5)* montrent que l'allure de la courbe de vitesse est similaire à celle obtenue dans le cas sain avec un temps de montée (environ 0.2 s) mais avec des ondulations. Ceci est dû au défaut d'excentricité, au niveau de la forme du courant statorique. Elle se présente sous une forme sinusoïdale avec un pic de démarrage égal à 8A et se stabilise à l'instant $t=0.3s$ en régime permanent presque nul. Lors de l'application d'un échelon de charge de 3.5 N.m le courant se stabilise à une valeur nominale de 5A, lors de démarrage avec des défauts d'excentricité les caractéristiques électromécaniques, vitesse, couple électromagnétique et courants statorique présentent des oscillations considérables dues à la variation de l'entrefer de la machine.

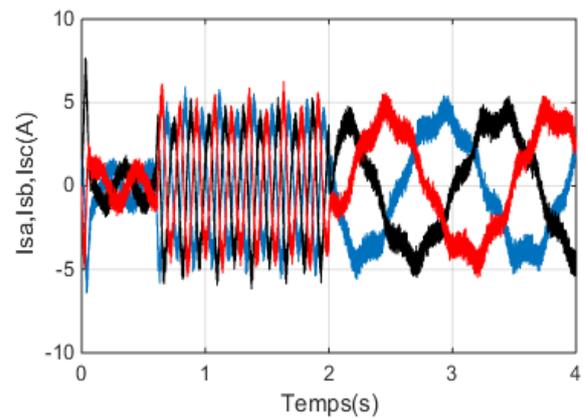
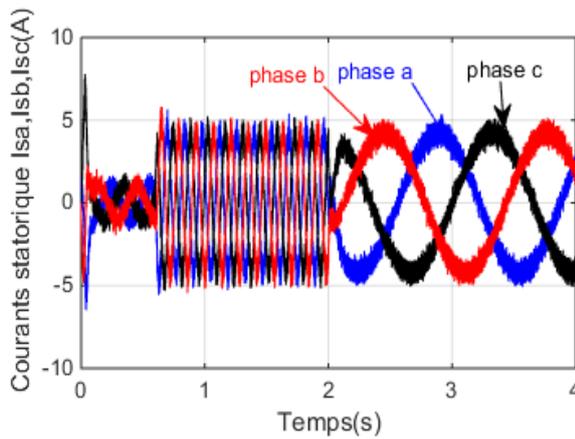
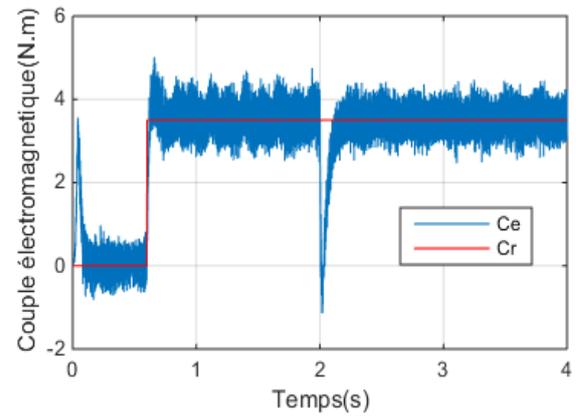
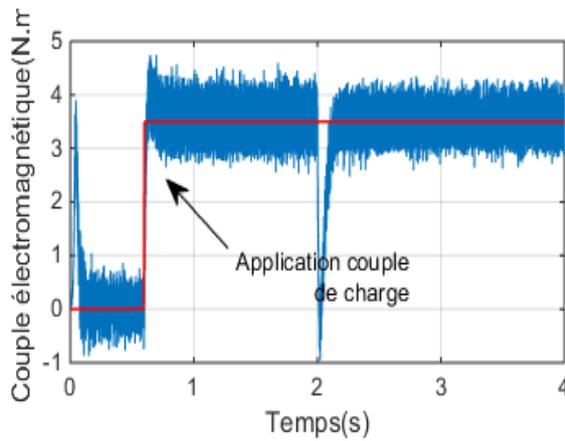
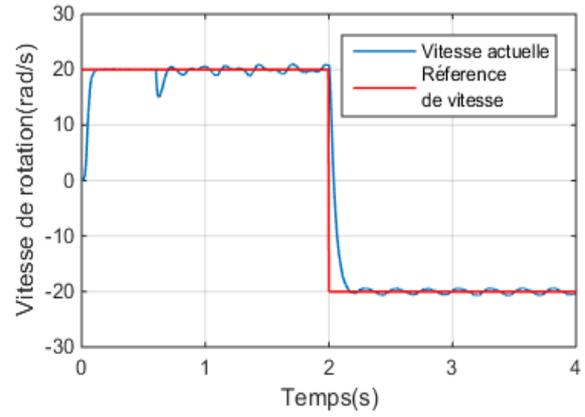
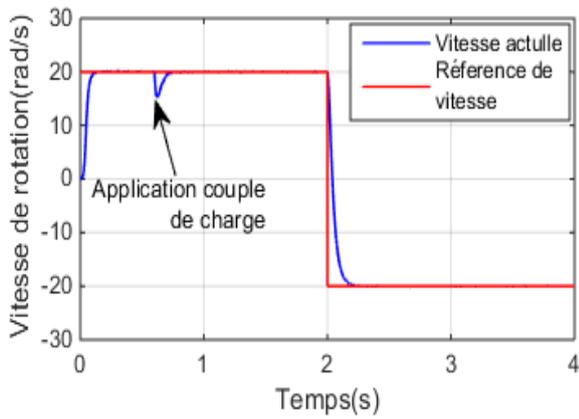


Figure 4.2 Commande vectorielle indirecte cas sain

Figure 4.3 Commande vectorielle indirecte avec défaut d'excentricité 5%

Ces oscillations s'aggravent avec la sévérité du défaut d'excentricité provoquant des ondulations remarquables sur la vitesse de rotation, ce qui présente un danger qui peut détériorer la machine avec le temps.

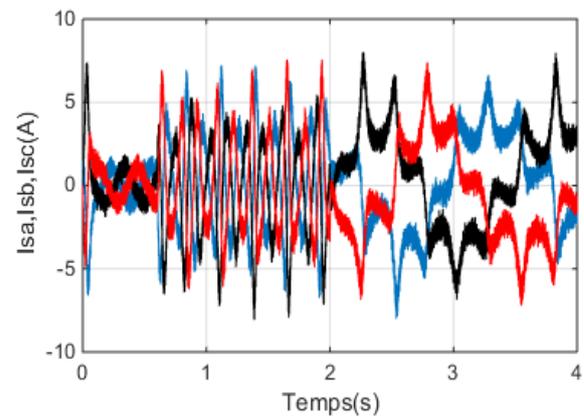
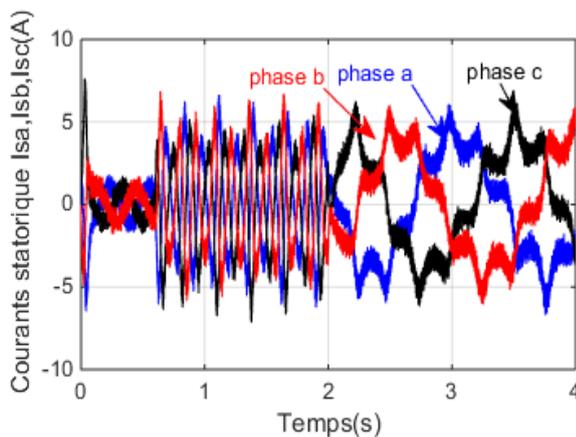
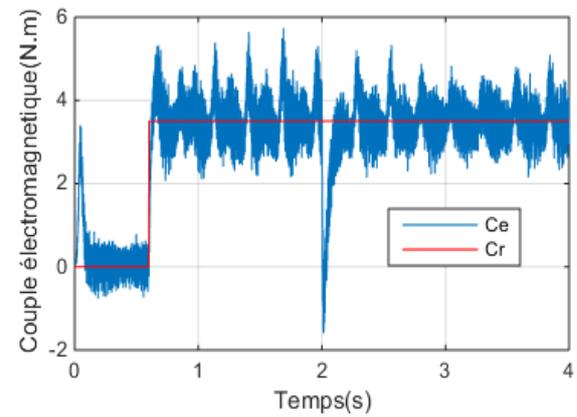
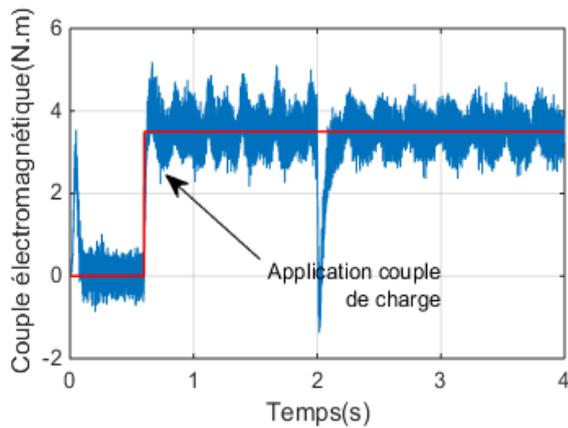
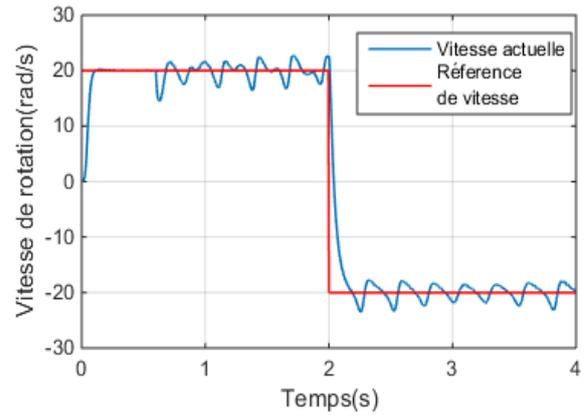
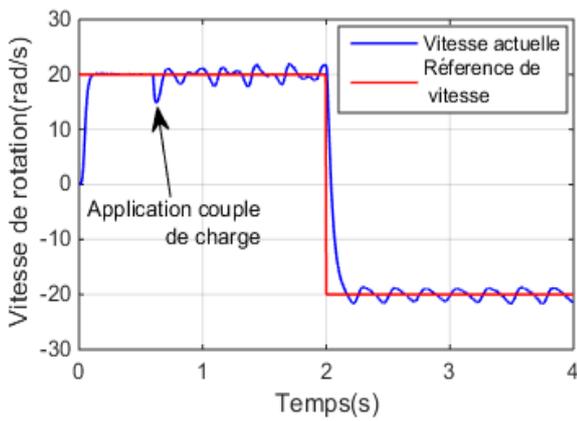


Figure 4.4 Commande vectorielle indirect avec défaut d'excentricité 10%

Figure 4.5 Commande vectorielle indirect avec défaut d'excentricité 20%

IV.4 Analyse par le vecteur de Park

La première méthode pour la détection de l'excentricité est l'analyse des courants statoriques basée sur l'évolution des courants i_{ds} et i_{qs} dans le plan de Park (figure 4.6). Le moteur est initialement testé dans le cas sain, afin d'avoir la forme de Lissajous $i_{sq} = f(i_{sd})$ dans le cas d'un moteur sain. Cette forme de Lissajous obtenue doit être utilisée comme référence pour le reste des relevés dans les cas du moteur défaillant.

Le défaut d'excentricité se manifeste dans le courant statorique par modulation de l'amplitude de ce dernier à la fréquence :

$$f_{ecc} = f_s \left(1 \pm k \left(\frac{1-s}{p} \right) \right) \quad (4.10)$$

Ce phénomène est illustré par le changement de la forme de Lissajous. Les figures (4.6b, 4.6c, 4.6d, et 4.6d), montrent le cas des défauts d'excentricité : ME=5% (SE=5%, DE=5%), ME=10% (SE=10%, DE=10%), ME=20% (SE=20%, DE=20%). La comparaison entre les figures montre clairement que le défaut d'excentricité est facile à détecter par la visualisation de la forme de Lissajous des vecteurs de courants de Park, et l'observation de la forme en fonction de la sévérité.

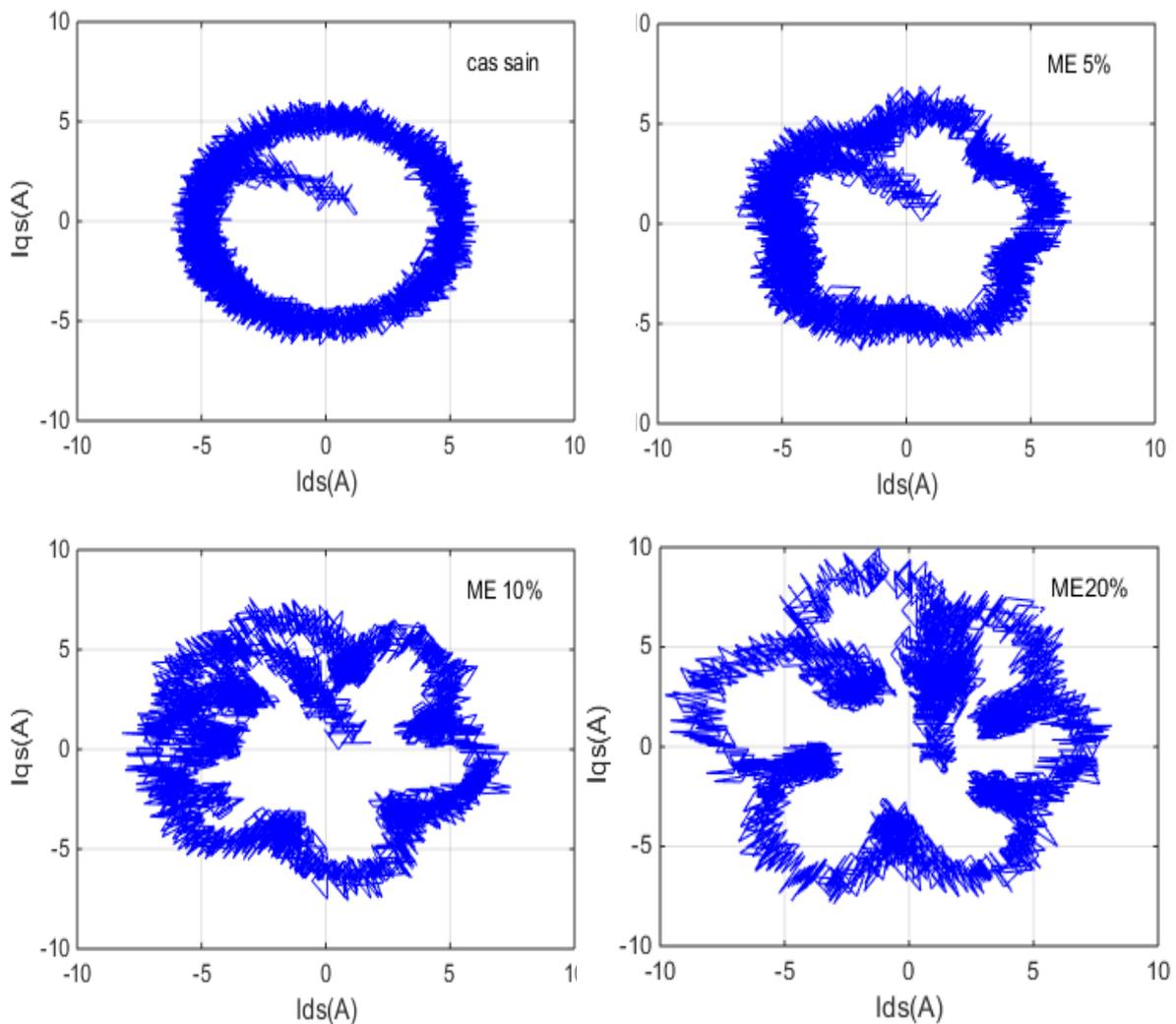


Figure 4.6 Analyse du courant statorique par le Vecteur de Park pour le cas sain et le cas de défaut d'excentricité mixte

IV.5 Analyse par la transformée en ondelettes

La décomposition en multi-niveaux des courants statoriques est réalisée à l'aide de l'ondelette mère Daubechies4 (db4) car la fonction d'échelle réduit au minimum le recouvrement entre les bandes de fréquence qui ne peuvent pas être évitées. En fait, le recouvrement n'affecte pas l'exécution du diagnostic dans une vraie application mais il aide à améliorer l'analyse de l'approximation et des détails. Les niveaux de décomposition nécessaires sont calculés avec la relation suivante :

$$N = \text{int} \left[\frac{\log\left(\frac{f_e}{f_s}\right)}{\log(2)} \right] + 2 = 12 \text{ niveaux} \quad (4.11)$$

Où, dans le cas de notre simulation, la fréquence de fondamental ($f_s = 7 \text{ Hz}$) est obtenue directement par l'analyse fréquentielle du courant du stator, et la fréquence d'échantillonnage $f_e = 10 \text{ kHz}$. Ainsi, le nombre de décompositions appropriées est égal à 12 niveaux. Le tableau 2 indique les différentes bandes de fréquences d'approximation et de détails.

<i>Niveau</i>	<i>Bandes de fréquences Approximations</i>	<i>Bandes de fréquences Détails</i>
7	0-39.0625	39.0625-78.125
8	0-19.531	19.531-39.0625
9	0-9.76	9.76_-19.531
10	0-4.88	4.88-9.76
11	0-2.44	2.44-4.88
12	0-1.22	1.22-2.44

Tableau 4.1 Bandes de fréquences détails et approximations

Les figures (4.7, 4.8, 4.9, 4.10) montrent la variation de l'énergie dans les bandes de fréquence de décomposition de l'ondelette multi-niveau pour le cas d'une machine saine à vide et en charge et avec défauts d'excentricité mixte ME=5%, ME=10%, ME=20%.

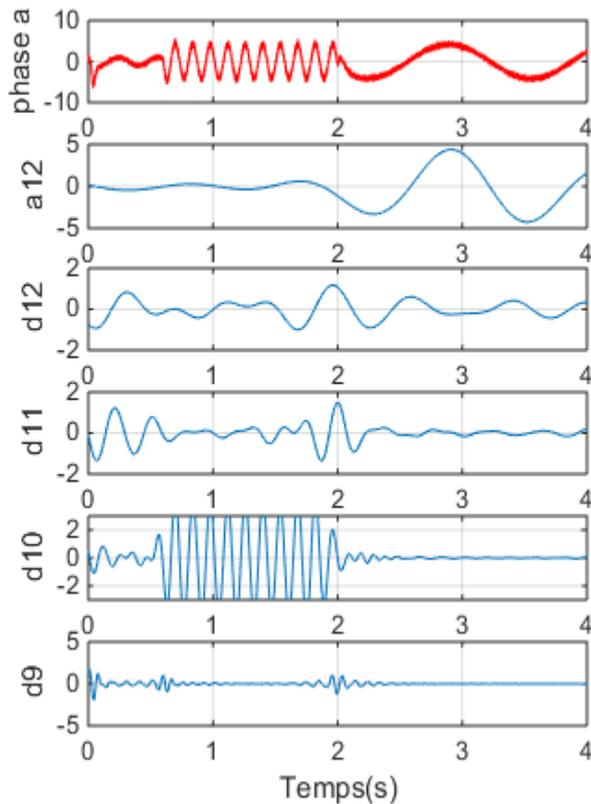


Figure 4.7 TOD multi niveau du courant de la phase I_{as} cas d'une machine saine

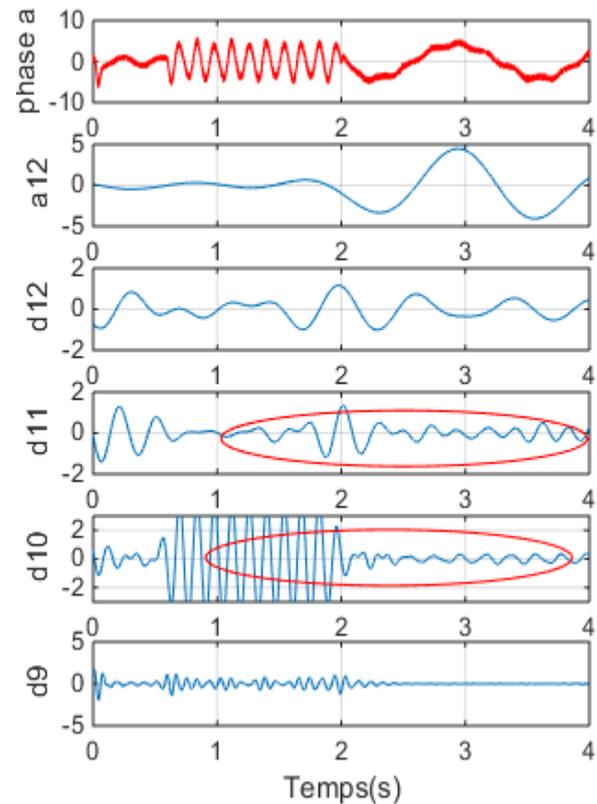


Figure 4.8 TOD multi niveau du courant de la phase I_{as} avec défaut d'excentricité 5%

Le calcul de l'énergie emmagasinée dans chaque niveau de décomposition confirme l'augmentation observée dans les signaux de détail surtout dans le niveau d10 et d11 qui correspond à la bande située au voisinage et au-dessous du fondamental. On voit clairement l'effet du défaut d'excentricité, l'énergie emmagasinée dans le niveau d10.

La figure 4.11 montre la variation de l'énergie dans les bandes de fréquence dans le cas d'une machine saine et avec quatre degrés de défaut d'excentricité mixte : (ME 10%, ME 20%, ME 25%, ME 30%) par l'analyse du courant statorique de la phase I_{sa} pour les cas saine et défectueux. L'énergie stockée dans chaque niveau de décomposition confirme l'augmentation observée des signaux de détail et d'approximation surtout dans le niveau d10 et d11 (voir tableau 4.1). Ceci correspond à la bande de voisinage et inférieure du fondamental $f_s = 7\text{Hz}$. L'effet du défaut d'excentricité mixte se manifeste clairement par l'énergie stockée dans le niveau 10. L'augmentation diffère selon le niveau de gravité de défaut. L'énergie, correspondant au niveau 10, dans le cas sain est de 19,69%, dans le cas de (ME 10%) elle augmente à 23,37%, dans le cas de (ME 20%) l'énergie accumulée est de 25,7%, pour le cas de (ME 25%) l'énergie stockée est d'environ 32,79% et enfin (ME30%) l'énergie est de manière remarquable de 36,25%.

Nous pouvons voir que la différence entre le cas sain et les cas défectueux est très claire, et l'augmentation de l'énergie diffère selon le niveau de gravité de défaut.

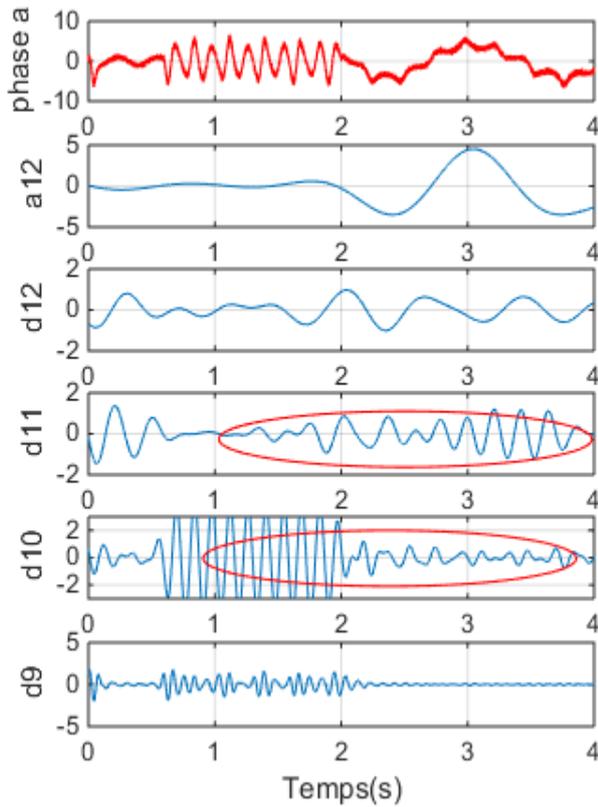


Figure 4.9 TOD multi niveau du courant de la phase Ias avec défaut d'excentricité ME10%

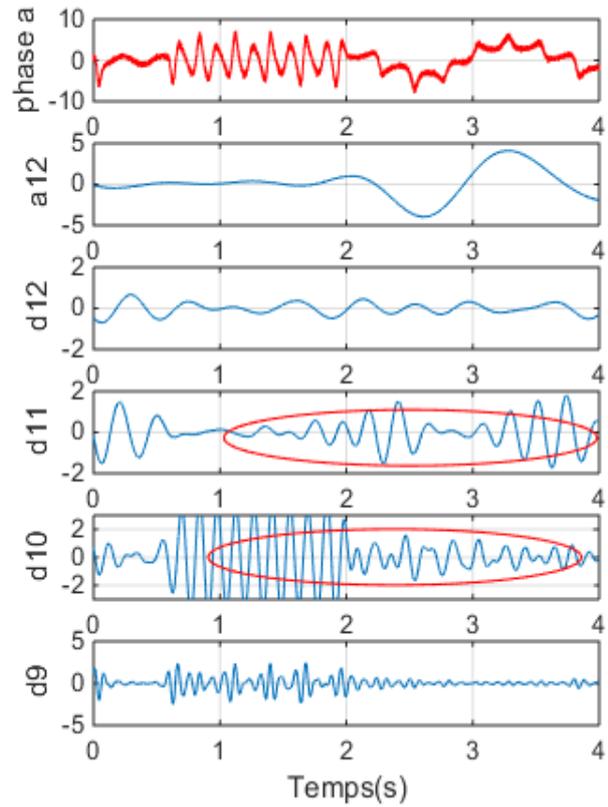


Figure 4.10 TOD multi niveau du courant de la phase Ias avec défaut d'excentricité ME20%

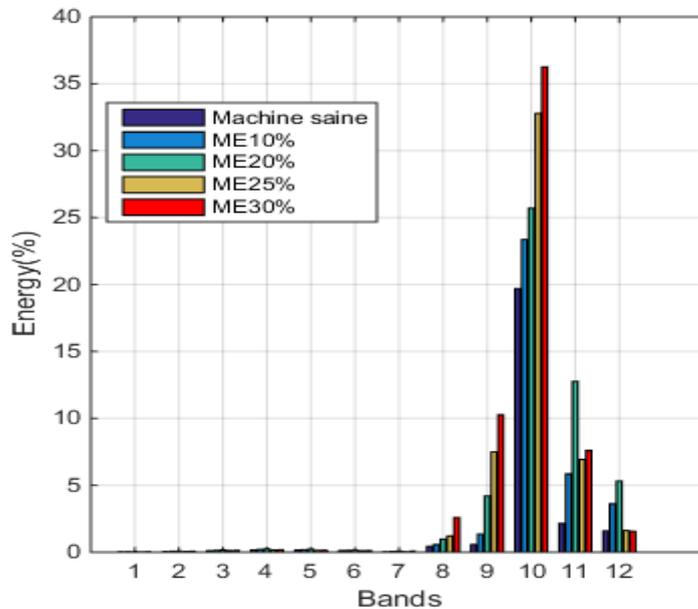


Figure 4.11 Variation de l'énergie dans les bandes de fréquence (db4) Machine saine, Machine avec défaut d'excentricité mixte 5%,10%,20%

IV.6 Conclusion :

Dans ce chapitre on a montré les performances dynamiques et statiques de la commande vectorielle avec régulateur classique (PI). D'après les tests de robustesse, les résultats de simulations montrent que la commande vectorielle avec des régulateurs classiques (PI) donne des performances satisfaisantes, mais elle est un peu sensible aux défauts d'excentricité et aux variations paramétriques.

Dans la deuxième partie, basée sur le diagnostic des défauts d'excentricité, nous avons utilisé deux méthodes. La première méthode est basée sur le vecteur de Park, où les formes de Lissajous du courant obtenues donnent une indication claire de la présence ou non d'un défaut d'excentricité. L'autre méthode est basée sur l'analyse par la méthode des ondelettes discrètes, TOD. Les résultats de la simulation de la transformation en ondelettes donnent les informations utiles pour décider de la situation défectueuse, en particulier en présence d'un défaut d'excentricité.

Les résultats ont montré que le niveau d'énergie augmente simultanément avec le degré croissant du défaut d'excentricité. Cependant, l'énergie dans le cas sain présente toujours le plus bas niveau. Par conséquent, il est conclu que la technique utilisée peut être utilisée comme un outil fiable pour la détection de défaut d'excentricité ainsi pour identifier le degré de sa sévérité.

CONCLUSION GENERALE

Dans ce travail, on a choisi comme modèle d'état de la machine asynchrone, Certains paramètres du modèle triphasé de la machine asynchrone sous sa forme classique varient en fonction de la position relative entre le stator et le rotor.

En vue de diagnostiquer des défauts de la machine asynchrone, un modèle multi-enroulements, a été adopté.

En conséquence ce travail a été consacré à la modélisation en présence de défaut d'excentricité 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.

Les approches proposées, basées sur la transformée en ondelettes discrète du signal, peuvent être prolongées pour le diagnostic et la discrimination entre d'autres types de défauts dans les machines électriques.

La technique des ondelettes, la détection de la non-stationnarité dans un signal est exploitée à travers une décomposition du courant statorique. Les résultats montrent l'efficacité de la technique dans ce type de défauts et peut être plusieurs défauts similaires tels que les régimes transitoires.

ANNEXE A

Paramètre du moteur utilisé

$$P_n = 1.1 \text{ kw}$$

$$U = 220/380 \text{ v}$$

$$f = 50 \text{ Hz}$$

$$I_n = 4.5/2.6 \text{ A}$$

$$\Omega_n = 2850 \text{ tr/mn}$$

$$R_r = 6.3 \ \Omega$$

$$R_s = 7.828 \ \Omega$$

$$J = 0.006093 \text{ Kgm}^2$$

$$R = 0.03575 \text{ m (Rayon)}$$

$$L = 0.065 \text{ m (Longueur)}$$

$$e = 0.00025 \text{ m}$$

$$N_s = 160 \text{ spires par phase}$$

$$N_r = 16$$

$$L_{fs} = 0.018 \text{ H}$$

$$R_b = 150 \cdot 10^{-6} \ \Omega$$

$$R_e = 72 \cdot 10^{-6} \ \Omega$$

$$L_b = 10^{-7} \text{ H}$$

$$L_e = 10^{-7} \text{ H}$$

$$K_0 = 0.000725 \text{ N.ms /rd}$$

$$P = 1$$

BIBLIOGRAPHIE

- [01] : G. Didier, " Modélisation et diagnostic de la machine asynchrone en présence de défaillances", Thèse de doctorat, l'Université Henri Poincaré, Nancy-I, 2003.
- [02] : L.Bagli, "Modélisation et Commence de la Machine Asynchrone" note de cours-IUFM de Lorraine 2005
- [03] : G.Didier, Modélisation et diagnostic de la machine asynchrone en présence de défaillances, Thèse de Doctorat, U.Nancy, France, 2004.
- [04] : S. M. A. Cruz "Stator winding fault diagnosis in three-phase using synchronous motors, by the extended Park's vector approach", IEEE Trans. Ind. Appl. 2000.
- [05] : H. Henao, C.Demian, G.A.Capolino, "A frequency-domain detection of stator winding faults in induction machines using an external flux sensor", IEEE Trans. Ind. Appl., Vol.39, pp. 1272–1279, Sept/Oct. 2003.
- [06] : J.R.Cameron, W.T.Thomson, A.B.Dow, "Vibration and current monitoring for detecting air gap eccentricity in large induction motors", IEE Proceedings, Vol. 133, no.3,pp. 155-163, May 1986.
- [07] : W.R.Finley, M.M.Hodowanec, W.G.Holter, "An analytical approach to solving motor vibration problems", IEEE Transactions on Industry Application, Vol.363, no. 5, pp. 1467-1480. Sept. /Oct. 2000.
- [08] : P. Vandergheynst, J.F. Gobbers, "Directional Dyadic Wavelet Transforms: Design and Algorithms", IEEE transactions on image processing, Vol.11, N°. 4, pp.363-372, April 2002.
- [09] : M. Ayad, D. Chikouche, "Application de la transformée en ondelette à l'analyse des signaux vibratoires d'un system d'engrenage en vue d'un diagnostic précoce", 4th International Conference on Computer Integrated Manufacturing CIP'2007.
- [10] : A. Abed, L. Baghli, H. Razik, A. Razzoug, " Modelling Induction Motor for diagnostic purposes " In Proceeding EPE '99; 7-9 Septembre 1999, Lausanne, Suisse
- [11] : L. Baghli, "contribution à la commande de la machine asynchrone, utilisation de la logique floue, des réseaux neurones et des algorithmes génétiques " Université Henri Poincaré – Nancy, Janvier 1999.
- [12] : H. Merabet, T. Bahi, "Comportement du Moteur Asynchrone lors de cassures de barres et portions d'anneaux" International Conférence On Systems And Processing Information May 2-4, 2009, Guelma, Algeria.

[13] : H. Merabet, T. Bahi, I. Atoui, M. Mohammedi “Technique de surveillance de la machine de l’état de fonctionnement du moteur asynchrone d’une chaîne de pompage” 1^{er} Séminaire International sur la maintenance industrielle et la Sécurité Industrielle, Université 20 Août 1955 Skikda, 09 et 10 Mai 2009.

[14] : N. Moubayed, “ Détection et localisation des défauts dans les convertisseurs statiques”, 6th International conférence On Electromechanical and power Systems, October 4-6, 2007 Chisinau, Rep ; Moldova.

[15] : P. Geraldo, H. Yahoui, “ Diagnostic et surveillance des turboalternateurs de centrale nucléaire”, J3eA, Journal sur l’enseignement des sciences et technologies de l’information et des systèmes, Volume 4, Hors-série 4,2(2005).

[16] : S. Chacko, C.N. Bhende, S. Jain, R.K. Nema, Modeling and simulation of field oriented control induction motor drive and influence of rotor resistance variations on its performance, 2016, Electrical and Electronics Engineering : An International Journal, vol. 5, no 1.

[17] : T. Ameid, A. Menacer¹, H. Talhaoui I. Harzelli¹, Broken rotor bar fault diagnosis using fast Fourier transform applied to field-oriented control induction machine : simulation and experimental study, 2017, Int. J Adv Manuf. Technol., vol. 92, no. 1-4, pp. 917-928.

[18] : W.T. Thomson, M. Fenger, “Current Signature Analysis to Detect Induction Motor Faults”, In IEEEIAS magazine, July/August 2001, pp. 26-34.

[19] : Antonino-Daviua,_, P. Joverb, M. Rieraa, A. Arkkiob, J. Roger-Folcha “DWT analysis of numerical and experimental data for the diagnosis of dynamic eccentricities in induction tors”, Mechanical Systems and Signal Processing 21 (2007) 2575–2589.

[20] : V.ostic, “dynamics of saturated electric machine”, IEEE trans. Ind.applicat,vol32,no4,pp910-917,jul/aug.1996.

[21] : S. Nandi, H.A. Toliyat, “Condition monitoring and fault diagnosis of electrical motors”, A review, IEEE Transactions on Energy Conversion 20 (4) (2005) 719–729.

[22] : H.A toliyat, M.s Arefeen and A.G parlos “a method for dynamic simulation of air gap eccentricity in induction machines”, IEEE trans. ind. appl., vol32, no4, pp.910 917, jul/aug.1996.

[23] :Y. SOUFI Modélisation et diagnostic d’une association convertisseur machine électrique, Thèse de Doctorat, Université de Annaba, 2012.

[24] : BOUDIAF Adel Contribution au Diagnostic des Défauts dans les Machines Tournantes par Analyse Multi résolution. Thèse Doctorat, Université de Guelma, 2016

[25] : Onel Y I, Benbouzid M El H, Induction Motor Bearing Failure Detection and Diagnosis: Park and Concordia Transform Approaches Comparative Study, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol. 13, No. 2, April 2008.

- [26] : K. Yahia, A.J.M. Cardoso, A. Ghoggal, S.E. Zouzou, Induction motors air-gap-eccentricity detection through the discrete wavelet transform of the apparent power signal under non-stationary operating conditions, 2014, *ISA Transactions*, vol.53(2),pp 603-611.
- [27] :N. Bessous, S. E. Zouzou, W. Bentrah, S. Sbaa, M. Sahraoui, Diagnosis of bearing defects in induction motors using discrete wavelet transform, *Int. J. Syst. Assur. Eng. Manag.*, 2015.
- [28] :R Rouaibia, F Arbaoui, T Bahi ,Detection of Eccentricity Fault in Closed-Loop Induction Motor Drive using Wavelet Transform, *ICRAES proceedings*, pp 125-130,2016.