

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE DE M'SILA

FACULTE DES SCIENCES ET SCIENCES DE L'INGENIEUR

DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME

D'INGENIEUR D'ETAT EN GENIE ELECTROTECHNIQUE

OPTION : ELECTROMECHANIQUE

THEME

*Simulation Des Machines Asynchrones à Cage
Modèle Multi-enroulements Dédicée Au Diagnostic
Des Défauts*

Proposé et dirigé par :

M^r BELHAMDI Saâd

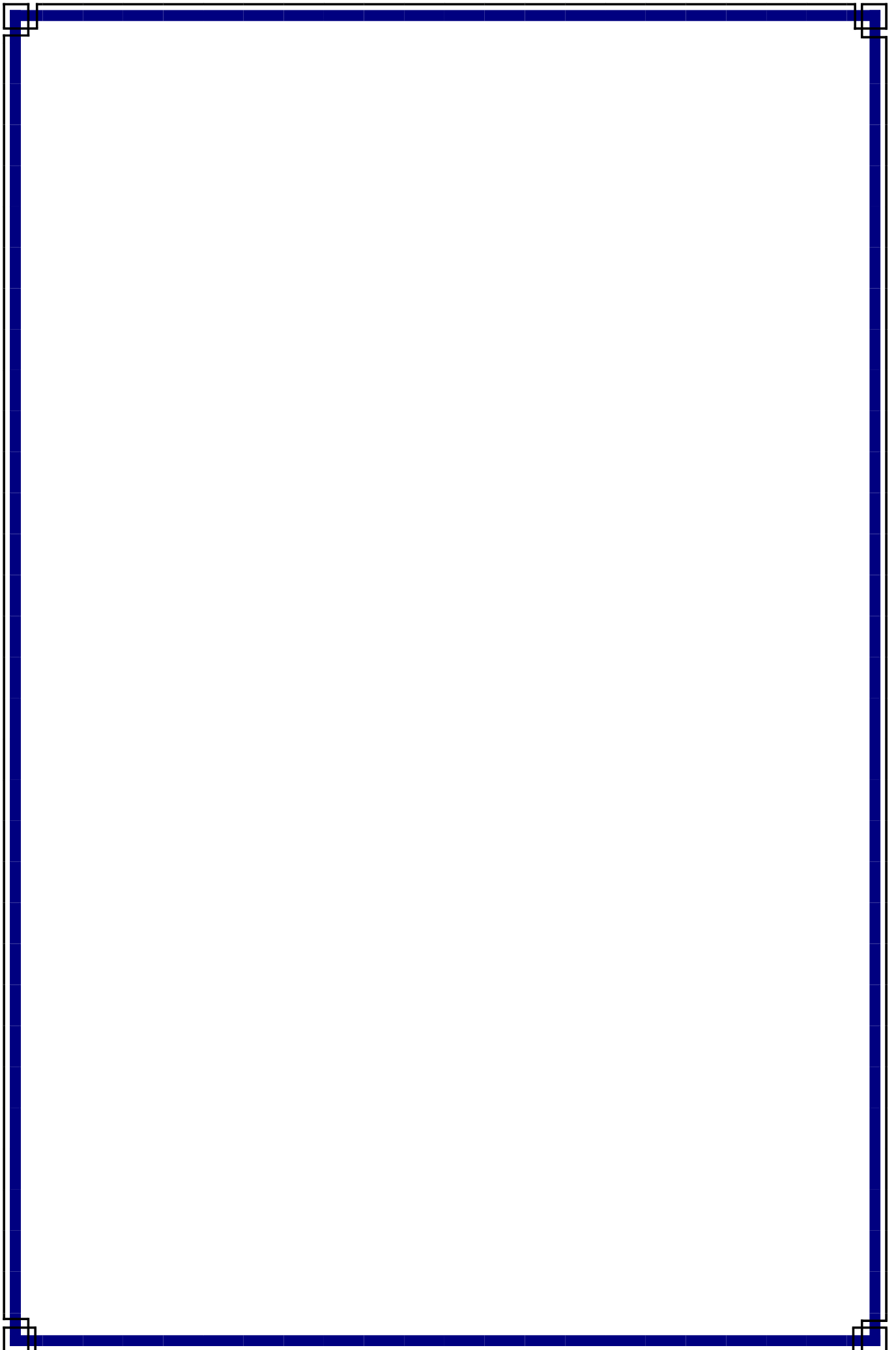
présenté par :

- BELACEL Mounir

- RAHALI Said

- SACI Azzouz

Année Universitaire: 2006 / 2007



REMERCIEMENT

*A l'issue de cette fin de travail nous adressons nos remerciements
premièrement à dieu tout puissant pour la volonté, la santé et la patience
qu'il nous a donnée durant toutes ces longues années d'études.*

*Nos remerciements s'adressent à notre promoteur S.BELHAMDI pour
avoir proposer et diriger ce modeste travail et pour son continuel suivi tout
le long de la réalisation et la correction de ce mémoire.*

*Nous remercions également tous les membres de jury d'avoir
accepter de juger notre travail.*

*Nous tenons à remercier vivement toute personne qui nous a aidé de
prés ou de loin à accomplir ce travail.*

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE.....1

CHAPITRE I : LES DIFFÉRENTS DÉFAUTS DANS LA MACHINE ASYNCHRONE

I.1 Introduction.....3

I.2 Les défauts qui peuvent surgir sur le système électromécanique.....3

I.2.1 Défauts dûs au réseau d'alimentation.....3

I.2.2 Défauts dûs à la machine asynchrone à cage d'écureuil.....4

 A. Défaillances d'ordre électriques.....4

 ❖ Défauts statoriques.....4

 a- Court-circuit spire neutre.....4

 b- Court-circuit au milieu de la phase.....5

 c- Court-circuit entre phases.....5

 ❖ Défauts rotoriques.....6

 a- Les cassures des barres.....6

 b- Cassure d'une portion d'anneau de court- circuit.....7

 B. Défaillances d'ordre mécanique.....7

 a- Défauts des roulements à billes.....8

 b- Excentricité.....9

I.3 Etude statistique.....10

I.4 Causes des déffailances.....10

I.4.1 Cause des défauts statoriques.....11

I.4.2 Cause des défauts rotoriques.....11

I.4.3 Cause des défauts de roulement à billes.....11

I.5 Méthodes de diagnostic.....11

I.5.1 Méthodes internes.....12

I.5.2 Méthodes externes.....	12
I.5.3 Méthodes inductives.....	13
I.5.4 Méthodes déductives.....	13
I.6 Modèle de la machine asynchrone à cage.....	13
I.6.1 Approche analytique	13
I.6.2 Approche numérique.....	14
I.7 Conclusion.....	14

**CHAPITRE II : MODÉLISATION DE LA MACHINE
MULTI-ENROULEMENT**

II-1 Introduction.....	15
II-2 Modèle multi-enroulements du moteur asynchrone.....	15
II-2-1 Calcule des inductances.....	16
2-1-1 Partie statorique.....	16
2-1-2 Partie rotorique.....	17
2-1-3 Mutuelle entre stator et rotor.....	19
II-3 Mise en équations.....	20
3-1 Equations statorique.....	20
3-2 Equations rotorique.....	21
3-3 Equation d'état de la machine.....	23
3-4 Transformation de PARK.....	25
3-5 Equation mécanique.....	28
II-4 Modèle de taille réduit.....	30
II-5 Conclusion	33

**CHAPITRE III : SIMULATION D'UNE MACHINE
MULTI-ENROULEMENT**

III.1 Introduction.....	34
III.2 Simulation du modèle de la machine asynchrone.....	34
- Résultat de simulation.....	34
III.3 Modèle de taille réduit.....	34
A- Cas d'une machine saine.....	36

➤ Interprétation des résultats.....	40
B- Cas d'un défaut de cassure de barre.....	40
<i>a</i> - Cassure de deux barres adjacentes.....	40
➤ Interprétation des résultats.....	47
b - Cassure de deux barres espacées.....	48
➤ Interprétation des résultats.....	54
III.4 Conclusion.....	55

CHAPITRE IV : ANALYSE SPECTRALE

IV.1 Introduction.....	56
IV.2 Techniques d'analyses des défauts	56
IV.3 Analyse spectrale.....	56
➤ Méthodes non- paramétrique.....	57
➤ Méthodes paramétriques.....	57
IV.4 Analyse cepstrale.....	57
IV.5 Méthodes de détections de fréquence connues.....	57
IV.6 Méthodes temps- fréquence et temps –échelle.....	57
➤ Temps – fréquence.....	57
➤ Temps- échelle.....	58
IV.7 Résultat de simulation d'analyse spectrale.....	58
IV.8 Analyse de quelques signaux.....	59
IV. 9 Analyse spectrale du courant statorique.....	59
IV.10 Analyse spectrale des défauts rotoriques.....	60
IV. 11 Conclusion.....	64
<i>CONCLUSION GENERALE</i>	65

ANNEXE

Annexe 1.....	67
Annexe 2.....	68

Notation et symboles

N_s : nombre de spires statoriques par phase

N_r : nombre de barres rotorique

n : entier naturel

F.m.m: force magnétique

s, r : indices stator et rotor respectivement

e : l'épaisseur de l'entrefer [m]

f_s : fréquence d'alimentation [Hz]

μ_0 : perméabilité magnétique de l'air

l : longueur active du circuit magnétique [m]

L_{sp} : inductance propre statorique [H]

L_{sf} : inductance de fuite rotorique [H]

L_b : inductance d'un barre rotorique [H]

L_e : inductance total de l'anneau de court-circuit [H]

L_{sc} : inductance cyclique statorique [H]

I_e : courant dans l'anneau de court- circuit [A]

I_{bk} : courant de barre [A]

I_{rk} : courant dans la boucle rotorique [A]

I_{ek} : courant dans un portion d'anneau [A]

I_a, I_b, I_c : courants des phases statorique [A]

I_{ds}, I_{qs} : composantes biphasées du courant statorique direct et en quadrature [A]

V_{abc} : les tensions statorique [V]

ϕ_{abc} : les flux statorique [Wb]

ϕ_{rk} : le flux magnétique crée par une maille rotorique [Wb]

ϕ_s : flux magnétique par pole crée par le courant statorique [Wb]

M_s : mutuelle entre phase statorique [H]

θ_r : position du rotor [rd]

θ_s : position des grandeurs statoriques [rd]

M_{sr} : mutuelle cyclique entre le stator [H]

a : angle électrique entre deux mailles rotorique [rd]

B_s : induction magnétique crée dans l'entrefer par le courant statorique [T]

R : rayant moyen de l'entrefer

R_e : résistance totale de l'anneau de court-circuit [Ω]

R_r : résistance de l'enroulement rotorique [Ω]

R_s : résistance de l'enroulement statorique [Ω]

R_{bk} : résistance de la barre [Ω]

R_{bfk} : résistance de la barre défaillante [Ω]

R_b : résistance d'une barre rotorique à l'état sain [Ω]

r_s : résistance d'une phase statorique [Ω]

d, q : indices pour les composantes de PARK directe et quadrature, respectivement

C_e : couple électromagnétique [N.m]

j : moment d'inertie [Kg.m²]

K_0 : coefficient de frottement

ω_r : vitesse de rotation mécanique

P : la puissance [W]

P : opérateur de Laplace

p : nombre de paires de pôles

θ : Angle décrivant une position particulière dans l'espace, mesuré par rapport à une référence fixée par rapport au stator

g : glissement

Index des figures

Chapitre I

Figure I.1: Court circuits spire neutre.....	5
Figure I.2: Court circuit au milieu de la phase.....	5
Figure I.3: Court circuit entre phases différentes.....	5
Figure I.4: Défaut d'une barre cassée.....	7
Figure I.5 : Rupture d'une et deux portions adjacentes d'anneau de court-circuit.....	7
Figure I.6: Dimensions du roulement à billes.....	8
Figure I.7: Les défauts d'excentricité.....	10

Chapitre II

Figure II.1 : Structure de la cage du rotor.....	17
Figure II.2: Induction magnétique produite par une maille du rotor.....	18
Figure II.3 : Schéma équivalent des mailles rotoriques.....	21
Figure II.4 : Modèle de la machine dans le repère de Park.....	25

Chapitre III

Figure III .1 : Schéma de simulation en SIMULINK de modèle réduit	35
Figure III .2 : Simulation avec modèle réduit en charge à l'état sain ($C_r=3.5N.m$)	
a : Le couple électromagnétique.....	37
b : La vitesse de rotation.....	37
c : Courant statorique.....	38
d : Courant dans la barre 1.....	38
e : Courant dans la barre2.....	39
f : Courant I_{dr}	39
g : Courant I_{qr}	40

FigureIII.3 : Simulation avec modèle réduit : machine en charge $C_r=3.5N.m$ avec rupture successive des barres (1et2) à partir de $t=1s$

a : Couple électromagnétique.....	41
b : Vitesse de rotation.....	42
c : Courant statorique.....	43
d : Les courants des barres rotoriques	
- <i>Courant de la barre 1</i>	44
- <i>Courant de la barre 2</i>	45
- <i>Courant de la barre 7</i>	46
e : Courant des barres rotoriques (1, 2, 6 et 7).....	47

FigureIII.4 : Simulation avec modèle réduit : machine en charge $C_r=3.5N.m$ avec rupture de deux barres espacées (1et7) à partir de $t=1s$

a : couple électromagnétique.....	48
b : Vitesse de rotation.....	49
c : Courant statorique.....	50
d : les courants des barres rotoriques	
- <i>Courant de la barre 1</i>	51
- <i>Courant de la barre 2</i>	52
- <i>Courant de la barre 7</i>	53
e : Courant des barres rotoriques.....	54

Chapitre IV

Figure IV.1 : Courant statorique état sain.....	58
Figure IV.2 : Courant statorique avec une barre cassée.....	58
Figure IV.3 : Spectres du couple et vitesse et courant statorique.....	59
Figure IV.4 : Les différentes fenêtre de FFT pour une seule cassure dans la barre (2).....	60
Figure IV.5 : Fenêtre de hamming de l'analyse spectral pour un moteur sain.....	61
Figure IV.6 : L'augmentation de la résistance de barre cassée est 10 fois.....	62
Figure IV.7 : L'augmentation de la résistance de barre cassée est 100 fois.....	62
Figure IV.8 : Fenêtre de hanning pour différentes cassures de barre.....	62
Figure IV.9 : Le spectre de courant statorique pour les glissements (2%, 4%, 6.66%).....	63

INTRODUCTION GENERALE

Les machines asynchrones sont largement utilisées dans l'industrie. Assurer leur continuité de fonctionnement nécessite la mise en place de programmes de maintenance préventive et corrective. En effet, la fiabilité et la sûreté de leur fonctionnement permettent en partie d'assurer la sécurité des personnes, la qualité du service et la rentabilité des installations .

Cependant, nul système complexe n'est pas l'abri d'une défaillance, il faut donc mettre en œuvre des systèmes de surveillance et prévoir des redondances matérielles dans les équipements. Depuis quelques années et grâce à l'évolution des techniques informatiques, il est possible de faire appel aux systèmes de supervision et de diagnostic. Leur rôle est de signaler la présence des dysfonctionnements dans le processus. Le diagnostic utilise les informations contenues dans les signatures afin de trouver la cause du défaut avec si possible tous les détails possibles tels que le temps d'apparition et l'amplitude. L'un des principaux axes d'intérêt du diagnostic consiste à chercher le modèle le plus adapté pour décrire et interpréter les effets des défauts sur le processus.

Actuellement, la plupart des machines électriques des équipements industriels sont asynchrone multi-enroulement, du fait de leur robustesse et de leur faible coût. Mais les machines subissent de plus en plus de perturbations aux quelles sont sensibles.

Concernant la machine asynchrone, les principaux défauts électriques recensés sont les court circuits entre spires des bobinages du stator (dus au vieillissement des isolants), les dégradations des anneaux au rotor et tous les problèmes de barres (ruptures ou imperfections).

Depuis longtemps déjà, la rupture des barres dans les moteurs a fait l'objet de nombreux travaux .d'autres recherches ont suivi dans la même voie ,ou ont été initiés dans le diagnostic des autres défaut de la machine (mésalignement entre la machine et la charge,

excentricité du rotor, usure des paliers) les défauts ont souvent été étudiés dans le cadre d'applications industrielles à vitesse constante et par analyse spectrale des courants de ligne, généralement fondée sur l'analyse de Fourier.

Dans ce contexte, le mémoire comporte quatre chapitres organisés comme suit :

- ◆ Le premier chapitre traite les différents défauts qui peuvent apparaître dans les machines asynchrones et leurs causes aussi que les différentes méthodes de diagnostic.
- ◆ Le deuxième chapitre est consacré à la présentation et la formulation mathématique du modèle multi-enroulement de la machine asynchrone triphasée à cage.
- ◆ Pour le troisième chapitre on présente les résultats de simulation du modèle de taille réduite multi-enroulement de la machine à l'état sain et avec défaut.
- ◆ Dans le quatrième chapitre on va étudier l'analyse des défauts à travers l'analyse spectrale du courant, en utilisant la transformation de Fourier rapide FFT, et on termine par une conclusion générale et perspective.

CHAPITRE I

LES DIFFÉRENTS DÉFAUTS DANS LA MACHINE ASYNCHRONE

SOMMAIRE

I.1 Introduction

***I.2 Les défauts qui peuvent surgir sur le
système électromécanique***

I.3 Etude statistique

I.4 Causes des Défaillances

I.5 Méthodes de diagnostic

I.6 Modèle de la machine asynchrone à cage

I.7 Conclusion

I.1 Introduction

De nombreuses défaillances peuvent apparaître sur les machines asynchrones. Elles peuvent être électriques, mécaniques ou magnétiques. Leurs causes sont très variées.

Dans ce chapitre, nous présentons en premier lieu les différents défauts qui peuvent survenir tant au stator qu'au rotor de la machine, citons leurs causes sur le comportement de la machine.

Afin de mieux situer notre travail, il a été nécessaire de regarder quelles sont les différentes méthodes de diagnostic actuellement utilisées pour détecter la présence d'une anomalie au sein de la machine asynchrone.

Nous avons choisi de décrire les méthodes les plus couramment rencontrées pour le diagnostic des défauts électriques et/ou mécaniques en précisant leurs points faibles et leurs points forts.

I.2 Les défauts qui peuvent surgir sur le système électromécanique

I.2.1 Défauts dûs au réseau d'alimentation

Les réseaux et les installations électrique sont le siège d'incidents de nature aléatoire dans les plus fréquents sont : [1]

- Les courts –circuits entre les phases.
- Les coupures d'une des phases d'alimentation.
- Le déséquilibre des tensions d'alimentation.

Les répercussions de ces incidents sur la continuité de service et fonctionnement des équipements, dépendent de la nature de défaut. Ce dernier se produise dans les réseaux aériens soit par :

- Des contraintes climatiques (pluie, foudre,...)
- D'environnement (branches d'arbres, plombs de chasses,...)
- Par suite de l'interconnexion des différents réseaux.

Il en résulte que les installations électriques peuvent subir un nombre difficilement prévisible de perturbations de tension dont l'influence se caractérise par soit une chute de tension transitoire, soit une coupure brève. Dans les cas les plus grave, cela provoque la coupure de longue durée.

I.2.2 Défauts dûs à la machine asynchrone à cage d'écureuil

Bien que la machine asynchrone ait la réputation d'être robuste. Elle peut présenter comme tout autre machine électrique, des défaillances d'ordre électrique ou mécanique notre objectif, est détecter ces défauts en cour d'évolution, en cour d'apparition [2].

A. Défaillances d'ordre électriques

Les défaillances d'origine électrique peuvent, dans certain cas, être la cause d'un arrêt de la machine (au même titre que les défaillances d'ordre mécanique). Ces défaillances se séparent en deux catégories bien distinctes. Nous pouvons citer les défauts qui apparaissent au niveau des circuits électriques statoriques et celle qui apparaissent au niveau des circuits électriques rotoriques [3].

❖ Défauts statoriques

Le court-circuit de spires est donc le défaut le plus nuisible et le plus fréquemment rencontré au stator. Ce sont des pannes dues à un court circuit dans une ou plusieurs phases statoriques. Ce type de défaut provoque une détérioration de la machine. Il conduit à un déséquilibre de phases, ce qui perturbe les commandes développées sur la base du modèle de Park. Un défaut de court-circuit est une connexion directe entre deux points du bobinage. Il peut se manifester soit entre les spires au milieu du bobinage ou bien entre une spire et le neutre. On distinct trois types de court-circuit au niveau du stator [4].

a- Court-circuit spire neutre

Le courant dans la phase concernée a une amplitude supérieure par rapport au courant des autres phases. Toutefois, les courants qui parcourent ces phases sont amplifiés par rapport au cas de la machine saine. Plus important est le nombre de spires en court-circuit, plus forte est l'augmentation des courants. De plus le facteur de puissance diminue avec l'augmentation de nombre de spires en court-circuit. Ce qui explique la modification des bobinages, qui implique une variation de l'inductance propre de la phase affectée également par le défaut et affecte les autres par couplage magnétique.

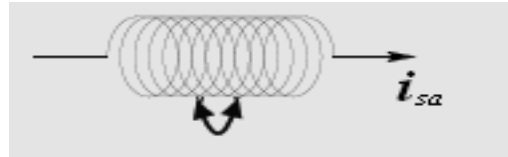


Figure I. 1: Court-circuit spire neutre

b- Court-circuit au milieu de la phase

Le court-circuit entre spires loin du neutre augmente les courants dans les phases statoriques, dans les barres, et les portions d'anneaux du circuit rotorique.

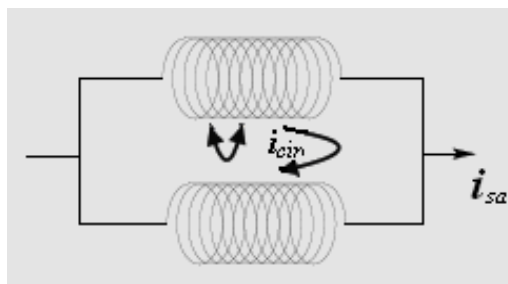


Figure I.2 : Court-circuit au milieu de la phase

c- Court-circuit entre phases différentes

L'apparition d'un court-circuit proche de l'alimentation entre deux phases, induirait une des courants très forts conduisant à la fusion des conducteurs. Cependant, un court-circuit proche du neutre engendre un déséquilibre sans provoquer la fusion des conducteurs. De plus, les courants des barres sont amplifiés lors de l'apparition du défaut.

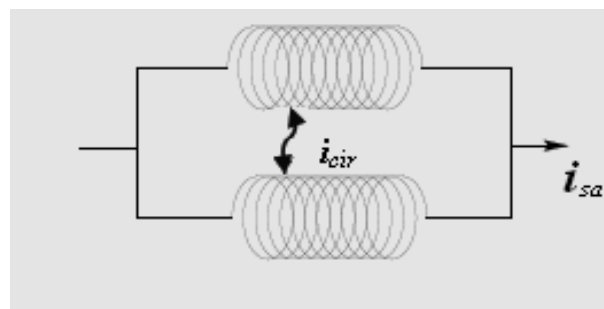


Figure I.3 : Court-circuit entre phases différentes

❖ Défauts rotoriques

Le problème des ruptures de barres dans les moteurs asynchrones a été à l'origine des premiers travaux de recherche sur le diagnostic des machines tournantes. L'émergence de nombreux travaux de recherche, notamment ceux des mécaniciens par analyse vibratoire, a contribué à une avancée prometteuse du diagnostic des machines tournantes à vitesse constante (machine asynchrone, alternateurs, etc.). Les défauts rotoriques typiques des machines asynchrones sont dus à un défaut de fabrication, ou à un défaut d'utilisation .

On peut citer les principaux [5] [2] :

- Une rupture partielle ou totale d'une barre au rotor survenant généralement à cause de l'échauffement dû aux sollicitations.
- Une barre résistive due à la présence de poches d'air dans les encoches rotoriques. Ce défaut se produit lors de la fabrication car la phase du coulage de l'aluminium dans les tôles empilées n'est pas parfaitement maîtrisée (absence d'étanchéité totale).
- Une rupture de soudure au niveau de l'anneau de court-circuit, notamment pour les fortes puissances.
- Une rupture de portion d'anneau de court-circuit.

Une défaillance au niveau de la cage rotorique se situe généralement à la jointure entre une barre et un anneau de court-circuit. En effet, les barres rotoriques et les anneaux de court-circuit ne pouvant pas être construits d'un seul bloc (sauf pour les machines de petites puissances), une soudure est pratiquée aux extrémités de chaque barre pour relier ces dernières aux deux anneaux de court-circuit. La fragilité de ces soudures, par rapport aux barres et aux anneaux fabriqués d'un seul bloc, provoque, à ces endroits précis, une fragilité de la cage d'écureuil.

a. Les cassures des barres

Ces défauts apparaissent au niveau du rotor. Ce sont les défauts les plus fréquents. Ils se présentent par des ruptures totales ou partielles d'une (s) barre (s) au niveau de la cage d'écureuil. Ils se traduisent par une augmentation de la résistance équivalente d'un enroulement rotorique. Ces pannes rotoriques engendrent malheureusement des ondulations dans le couple électromagnétique qui elles mêmes provoquent des oscillations de la vitesse de rotation de la machine. Ce qui génère des défauts mécaniques en plus dans la machine.

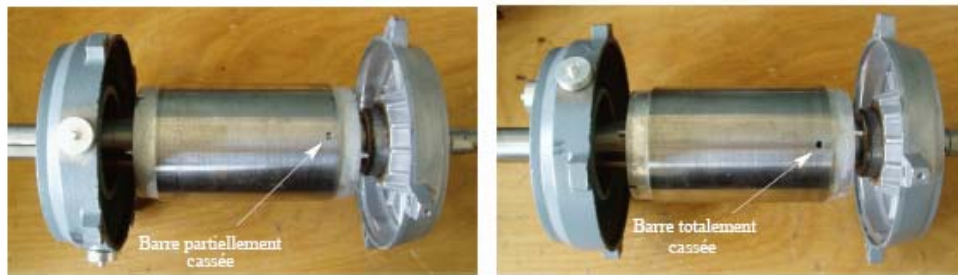


Figure I.4 : Défaut d'une barre cassée

b. Cassure d'une portion d'anneau de court-circuit [12]

Les cassures de portion d'anneaux sont dues soit à des bulles de coulées ou aux dilatations entre les barres et les anneaux. Les anneaux de court-circuit véhiculent des courants plus importants que ceux des barres rotoriques. Un mauvais dimensionnement des anneaux, une détérioration des conditions de fonctionnement ou une surcharge du couple et donc de courant peuvent entraîner leur cassure. La cassure d'une portion d'anneau engendre un comportement similaire à celui de la cassure de barres.

Suite à l'apparition de ces défauts, la machine continue à fonctionner, il est donc très difficile de détecter ces défaillances si la machine est en régime de défauts. Le courant que conduit une barre cassée se répartit sur les autres barres, ces dernières seront surchargées, ce qui conduit à leurs ruptures, et par la suite la rupture d'un nombre plus important de barres, dans la machine.

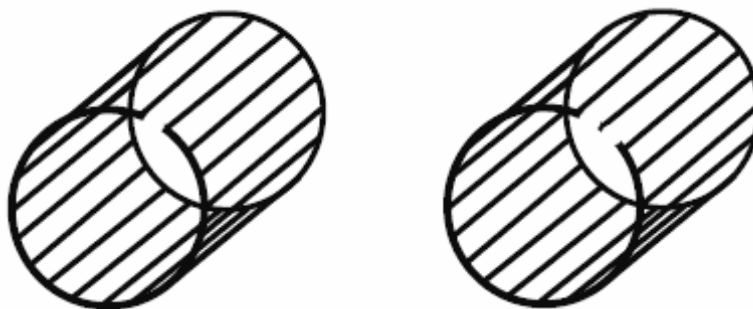


Figure I.5: Rupture d'une et deux portions adjacentes d'anneau de court-circuit.

B. Défaillances d'ordre mécanique

Les défaillances d'ordre mécaniques sont, en général, les plus rencontrées parmi tous les défauts que compte la machine asynchrone. Ces défauts peuvent apparaître au niveau des roulements à billes, des flasques ou encore de l'arbre moteur [6] [7].

a- Défauts des roulements à billes

Les roulements à billes jouent un rôle très important dans le fonctionnement de tout type de machines électriques. Les défauts des roulements peuvent être causés par un mauvais choix de matériau à l'étape de fabrication. Les problèmes de rotation au sein de la culasse de roulement, causés par un enroulement abîmé, écaillé ou fissuré, peuvent créer des perturbations au sein de la machine. Nous savons que des courants électriques circulent au niveau des roulements d'une machine asynchrone ce qui, pour des vitesses importantes, peut provoquer la détérioration de ces derniers.

La graisse, qui permet la lubrification et la bonne rotation des roulements peut, dans certaines applications, se rigidifier et causer une résistance à la rotation. Les défauts des roulements se manifestent comme de défauts d'asymétrie au rotor qui sont usuellement rangés dans la catégorie des défauts relatifs à l'excentricité. Un défaut de roulement se manifeste par la répartition continue du contact défectueux avec la cage de roulement extérieur comme intérieur.

La relation entre les vibrations des roulements a billes et le spectre du courant statorique est basé sur le fait que toutes les excentricités interfèrent sur le champ dans l'entrefer de la machine asynchrone.

Pour les harmoniques contenus dans le spectre du courant statorique peuvent être décrits par ces expressions [9] [8]:

$$f_{roul} = |f_s \pm k f_v|$$

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

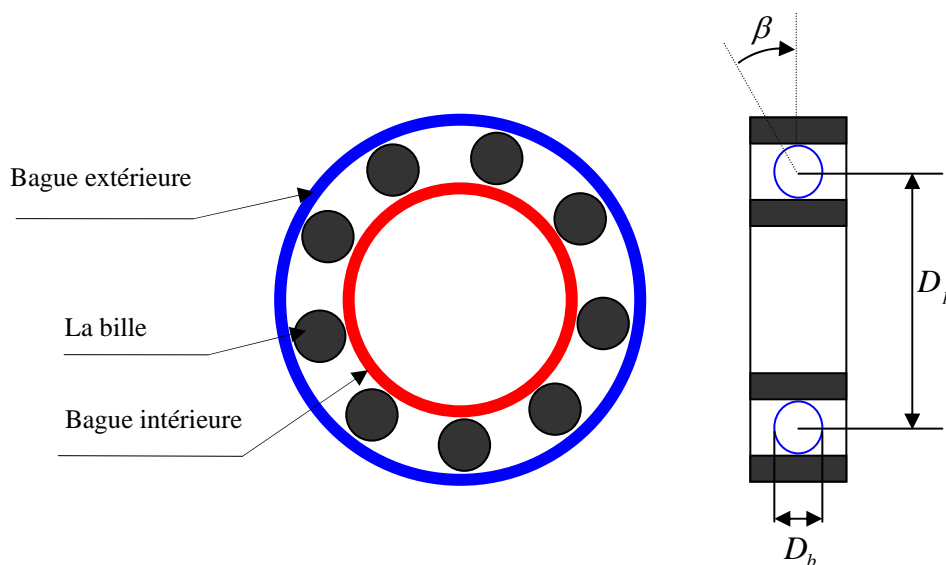


Figure I. 6: Dimension du roulement à billes

Avec :

D_b : diamètre de la bille

D_p : diamètre du palier

β : angle de contact

Les fréquences caractéristiques des vibrations dépendent de l'élément de roulement affecté par un défaut et sont liées aux paramètres physiques. Les fréquences de vibration qui caractérisant les défauts des roulements à billes sont [10] :

- Défaut au niveau d'une bille :

$$f_b = \frac{D_p}{D_b} f_{rot} \left[1 - \left(\frac{D_b}{D_p} \cos(\beta) \right) \right]^2$$

- Défaut sur la bague intérieure :

$$f_{b.int} = \frac{n_b}{2} f_{rot} \left[\left(1 + \frac{D_b}{D_p} \cos(\beta) \right) \right]$$

- Défaut sur la bague extérieure :

$$f_{b.ext} = \frac{n_b}{2} f_{rot} \left[\left(1 - \frac{D_b}{D_p} \cos(\beta) \right) \right]$$

Où f_{rot} : fréquence de rotation du rotor

Pour des dimensions courantes où le nombre billes comprises entre 6 et 12, pour cela, il est usuel d'appliquer les deux relations suivantes :

$$f_{b.int} = 0.6 n_b f_{rot}$$

$$f_{b.ext} = 0.4 n_b f_{rot}$$

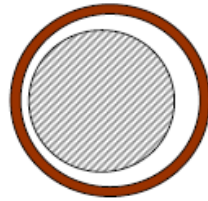
b- Excentricité

La variation de la longueur de l'entrefer entraîne des variations dans la densité du flux d'entrefer. Les enroulements statoriques sont électriquement affectés. On retrouve alors ces effets dans le spectre des courants On distingue généralement trois cas d'excentricité [11] :

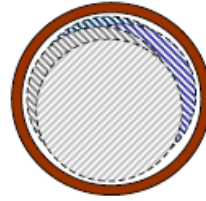
- l'excentricité statique, le rotor est déplacé du centre de l'alésage stator mais tourne toujours autour de son axe.

- l'excentricité dynamique, le rotor est positionné au centre de l'alésage mais ne tourne plus autour de son axe.
- l'excentricité mixte, associant les deux cas précédemment cités.

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



Excentricité statique



Excentricité dynamique

Figure I.7: Les défauts d'excentricité

I.3 Étude statique

Une étude statistique, effectuée en 1988 par une compagnie d'assurance allemande des systèmes industriels sur les pannes des machines asynchrones de moyenne puissance (de 50 kW à 200 kW) a donné les résultats suivants [3] :

60%	défauts dans le stator.
22%	défauts dans le rotor.
18%	autres défauts.

Une autre étude statique faite sur des machines de grande puissance (de 100kW à 1MW) donne les résultats suivants :

Enroulements stator	13%	Couplage magnétique	4%
Défauts au rotor	8%	Roulements	41%
Autres	34%		

I.4 Causes des défaillances

Les causes des défauts sont multiples. Elles peuvent être classées en trois groupes les initiateurs de défauts, les amplificateurs de défauts et les défauts de fabrication.

La majorité de tous les défauts du rotor et du stator sont provoqués par une combinaison des divers efforts qui agissent sur ces deux composants de la machine.

I.4.1 Causes des défauts statoriques

Les défauts statoriques peuvent être due à plusieurs raisons, parmi lesquelles : [12] [3]

- un grand noyau du stator ou la température d'enroulements est élevé.
- Attachement lâche à la fin de l'enroulement.
- contamination due à l'huile, moisissure et saleté.
- Cycle de démarrage fréquent.
- Surtension, décharges électriques, Les fuites dans les systèmes de refroidissement.

I.4.2 Causes des défauts rotorique

Comme pour le stator, les raisons pour les cassures des barres rotoriques et de rupture d'une portion d'anneau de court circuit sont nombreuses :

- Effort thermique due à l'échauffement de l'anneau du court-circuit et la différence de la température dans la barre pendant le démarrage (effet de peau).
- Effort magnétique causé par les forces électromagnétiques (flux de fuite d'encoche, l'excentricité de l'entrefer), bruits et vibration électromagnétiques.
- Effort dynamique du au couple de charge, aux forces centrifuges ainsi que les efforts cycliques.
- effort environnementale causées par la contamination, l'abrasion des matériels rotoriques due aux particules chimiques.

I.4.3 Causes des défauts de roulement à billes

Souvent mêmes sous des conditions normales de fonctionnement avec équilibre de charge et un bon alignement, les défauts dues à la fatigue peuvent prendre place. Autres les fatigues dues au fonctionnement interne normal inhérentes à l'excentricité.

Autres causes externes peuvent exister, telles que :

- contamination et corrosion causées par l'eau et l'acide...
- lubrification impropre.
- installation impropre de roulement, du au désalignement de la machine.

I.5 Méthode de diagnostic [14]

La sélection de la méthode de diagnostic la plus appropriée à un système industriel donné ne peut se faire qu'auprès un recensements des besoins et des connaissances disponibles.

On peut classer les méthodes de diagnostic en premier lieu dans les deux grandes familles :

- Les méthodes internes et externes.
- Les méthodes inductives et déductives.

I.5.1 Méthodes internes

Les méthodes internes dépendent de la connaissance obtenue à partir de modèles mathématiques du système.

Cette famille de méthodes est principalement dérivée des techniques utilisées par les automaticiens.

A partir des techniques d'identification de paramètres, il devient possible de mettre en oeuvre la méthode du problème inverse. Le diagnostic de défaillance est possible en suivant en temps réel l'évolution des paramètres physiques ou bien en utilisant l'inversion de modèles de type " Boite noire " [1] [13].

Elles impliquent une connaissance approfondie du fonctionnement sous la forme de modèles mathématiques qui devront être obligatoirement validés expérimentalement avant toute utilisation industrielle. Les méthodes de diagnostic internes se regroupent en trois grandes familles :

- La méthode de modèle.
- Les méthodes d'identification de paramètres.
- Les méthodes d'estimation du vecteur d'état.

I.5.2 Méthodes externes

Les méthodes externes utilisent la connaissance issue de l'expertise humaine. Ces méthodes se basent sur l'analyse des signaux que fournit la machine lors de son fonctionnement. Les signaux utilisables peuvent être :

flux d'entrefer, puissance instantanée, courant statorique et vibrations acoustiques.

L'analyse des signaux est réalisée en régime permanent car le nombre de points d'acquisition est suffisant pour faire tous les types d'analyse. Le régime transitoire est riche en information fréquentielle mais à cause de sa faible durée, il limite le nombre de points d'acquisition, ce qui rend l'analyse difficile et moins précise [1] [12].

I.5.3 Méthodes inductives

Les méthodes de diagnostic correspondant à une approche montante ou recherche en avant il s'agit de trouver le défaut à partir de ses effets sur le système. Ces méthodes utilisent un mécanisme de raisonnement en avant qui a pour objectif d'interpréter les symptômes ainsi que leurs combinaisons afin de trouver le défaut.

I.5.4 Méthodes déductives

Le raisonnement en arrière est la principale caractéristique de ces méthodes. Les méthodes déductives doivent trouver quels sont les effets dans les systèmes. Une vérification des " effets trouvés par rapport aux "effets possibles" permet de confirmer ou d'infirmer l'existence du défaut. Ce qui justifie notre raisonnement.

Le diagnostic peut utiliser soit un seul type de raisonnement (avant et arrière) soit une combinaison de raisonnement (avant et arrière). dans ce dernier cas, le raisonnement est appelé raisonnement mixte ou avant arrière. la connaissance " priori " de la cause " défaut " implique la connaissance de certains effets [1] [13].

I. 6 Modèle de la machine asynchrone à cage

La modélisation et la simulation des machines constituent une étape primordiale en matière de diagnostic. Elles permettent la compréhension du fonctionnement défectueux, la vérification sur prototype virtuel de l'efficacité des algorithmes de détection de défaut et elles apportent également la possibilité de construire des bases de données sur les manifestations électriques et magnétiques de ces défauts. Parmi les approches de modélisations existantes, on cite [1] [13]:

I. 6.1 Approche analytique

Les modélisations analytiques reposent sur le concept d'inductance, notion qui caractérise par une relation linéaire entre le flux et le courant.

Cette approche globale des phénomènes électromagnétiques permet d'établir un schéma électrique équivalent de la machine, la théorie des circuits permet de trouver les équations différentielles caractérisant le fonctionnement de la machine [1] [15].

I.6.2 Approche numérique

On cite deux méthodes :

- La méthode des réseaux de perméance

Elle consiste à découper la machine en plusieurs tubes du flux, caractérisés par des perméance Le mouvement de la machine est pris en compte par l'intermédiaire de perméance d'entrefer variable selon la position du rotor.en considération la saturation magnétique [9].

- La méthode des éléments finis

Il s'agit de découper la machine en éléments de tailles suffisamment petites, pour que le matériau magnétique puisse être considéré comme linéaire sur les surfaces correspondantes, et à partir des équations de MAXWELL, il est possible d'exprimer le problème à résoudre.

La méthode des éléments finis permet de reproduire fidèlement le comportement électromagnétique de la machine, et de simuler les défauts d'une manière plus proche de la réalité. Cependant, les moyens et le temps de calcul freinent l'utilisation de telles méthodes en simulation des algorithmes de détection des défauts.

I.7 Conclusion

Nous avons montré les défaillances qui peuvent arrêter intempestif de la machine asynchrone à cage d'écureuil. Nous nous sommes volontairement attardés sur les bobinages statoriques en détaillant les différents défauts fréquemment rencontrés, de même, au rotor. Nous avons dénombré les principaux défauts qui peuvent survenir soit dans la phase de fabrication, soit dans celle d'utilisation. Nous avons cité les causes de ces défaillances sur le comportement de la machine, et d'après l'étude statistique, on constate que, Les contraintes mécaniques sont les plus grandes pour ce type de machines ; ce qui explique la domination des défauts de roulements par rapport aux défauts électriques. C'est pour pallier ce problème que le diagnostic de défauts a pris une importance de plus en plus grandissante dans les milieux industriels.

Dans la continuité de la présentation, nous avons abordé les différentes méthodes de diagnostic qui sont utilisées pour la représentation et la détection des ruptures de barres au rotor.

L'analyse et l'interprétation de ces méthodes de diagnostic nécessitent la connaissance au préalable d'un bon modèle de la machine qui sera l'objet du second chapitre.

CHAPITRE II

MODÉLISATION DE LA MACHINE MULTI -ENROULEMENT

SOMMAIRE

II-1 Introduction

***II-2 Modèle multi-enroulements du moteur
asynchrone***

II-3 Mise en équations

II-4 Modèle de taille réduit

II-5 Conclusion

II.1 Introduction

La mise en point d'une procédure de diagnostic, à base de modèles analytiques pour les machines asynchrones, nécessite la synthèse d'un modèle décrivant complètement de la machine non pas d'une façon moyenne, comme pour la commande, mais d'une façon plus exacte et plus fine en intégrant certains paramètres de la machine. Le modèle simple (d, q), négligeant un certain nombre de phénomènes, ses modèles sont fréquemment affectés par les transformations et le changement d'axe. Donc, il a fallu s'orienter vers le modèle multi-enroulement pour une description adaptée aux défauts. La modélisation décrite dans ce chapitre a pour objet de représenter les barres pour une machine asynchrone à cage, nous avons privilégié l'approche analytique afin de disposer d'un modèle mathématique ne nécessitant pas d'outils de calcul complexe.

II.2 Modèle multi-enroulement d'une machine asynchrone

L'objectif est de procéder à un développement d'un modèle de la machine asynchrone qui mette en évidence l'influence des défauts étudiés sur les grandeurs mesurables de la machine, principalement les courants. Deux approches sont possibles, la première s'appuie sur la distribution des champs et des courants en tout point de la machine et permet de simuler son fonctionnement en régime des défauts. La seconde approche retenue ici consiste à interpréter la machine du point de vue de la théorie des circuits pour faciliter la simulation et la mise au point des problèmes de rupture de barres et d'anneaux de court circuit [1] [2].

En Considérant les hypothèses de départ simplificatrices suivantes :

- l'entrefer est constant, l'effet d'encoche est négligé.
- perméabilité relative du fer très grande.
- la répartition dans l'entrefer de la force magnétomotrice et du flux sont sinusoïdaux.
- pas de saturation, effet pelliculaire nul, courants de Foucault négligeable hors des barres rotoriques.

En plus de ces hypothèses, on suppose que le stator est sain, de constitution symétrique.

II.2.1 Calcul des inductances

II.2.1.1 Partie Statorique [1]

En premier temps, on suppose que les enroulements statoriques sont idéalement distribués autour du périmètre de l'entrefer de telle sorte que l'induction résultante puisse être sinusoïdale, dans ce cas l'expression de la F.m.m sera :

$$F(\theta) = \frac{2 \cdot N_s \cdot I_s}{\pi p} \cos(\theta) \quad (\text{II-1})$$

D'après le théorème d'Ampère on peut écrire :

$$F(\theta) = \oint H \cdot dl = \frac{N_s \cdot I_s}{p} \quad (\text{II-2})$$

Partant de l'expression (II-2) l'induction maximale dans l'entrefer est :

$$B_{\max} = \mu_0 \frac{N_s \cdot I_s}{2 \cdot p \cdot e} \quad (\text{II-3})$$

La décomposition de l'induction devient :

$$B(\theta) = \frac{2 \cdot \mu_0 \cdot N_s \cdot I_s}{e \cdot \pi \cdot p} \cos(p\theta) \quad (\text{II-4})$$

Le flux magnétique dans l'entrefer est obtenu par l'intégration de l'expression (II - 4):

$$\phi_s = \iint_s B_s \, ds = \int_{-\frac{\pi}{2p}}^{\frac{\pi}{2p}} B_s \cdot R \cdot l \cdot d\theta \quad (\text{II-5})$$

On obtient :

$$\phi_s = \frac{4}{\pi} \mu_0 \frac{N_s}{e \cdot p^2} R \cdot l \cdot I_s \quad (\text{II-6})$$

Le flux total traversant l'enroulement de la phase "a" est :

$$\psi_{sa} = N_s \cdot \phi_s = N_s \cdot I_s \cdot \frac{2 \cdot \mu_0 \cdot N_s \cdot R \cdot l}{e \cdot p \cdot \pi} \int_{-\frac{\pi}{2p}}^{\frac{\pi}{2p}} \cos(p\theta) d\theta \quad (\text{II-7})$$

$$\text{Donc : } \psi_{as} = L_{sp} \cdot I_s \quad (\text{II-8})$$

L'inductance principale de la phase a statorique d'après (II -7) est donnée par :

$$L_{sp} = 4\mu_0 \frac{N_s^2}{e.p^2.\pi} .R.l \tag{II-9}$$

Le flux de fuite est donné par :

$$\phi_{fs} = L_{fs} .I_s \tag{II-10}$$

L'inductance totale de la phase « a » est égale à la somme de l'inductance de magnétisation et la l'inductance de fuite :

$$L_{as} = L_{sp} + L_{fs} \tag{II-11}$$

Puisque les enroulements statoriques sont symétriques, les inductances propres des trois phases sont considérées égaux ($L_{as} = L_{bs} = L_{cs} = L_s$).

II.2.1.2 Partie rotorique

La figure (II-1) illustre la modélisation du rotor par son schéma électrique équivalent, le rotor a été décomposé en circuit élémentaire (mailles) constitué de deux barres et de deux portions d'anneaux les reliant à chaque extrémité. Cette topologie des circuits rotoriques nous permettra d'envisager la rupture de n'importe quelle barre ou de portion d'anneau [1].

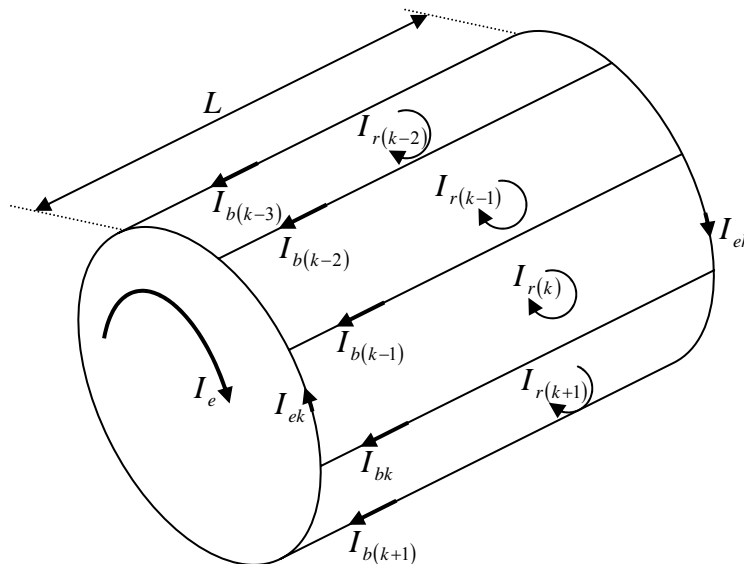


Figure II.1 : Structure de la cage du rotor

La figure (II-2) représente en fonction de (θ) , l'allure de l'induction magnétique supposée radiale produite par une maille rotorique dans l'entrefer en remarque que contrairement au stator, elle ne peut se ramener au fondamental de sa décomposition en série de Fourier [1][15].

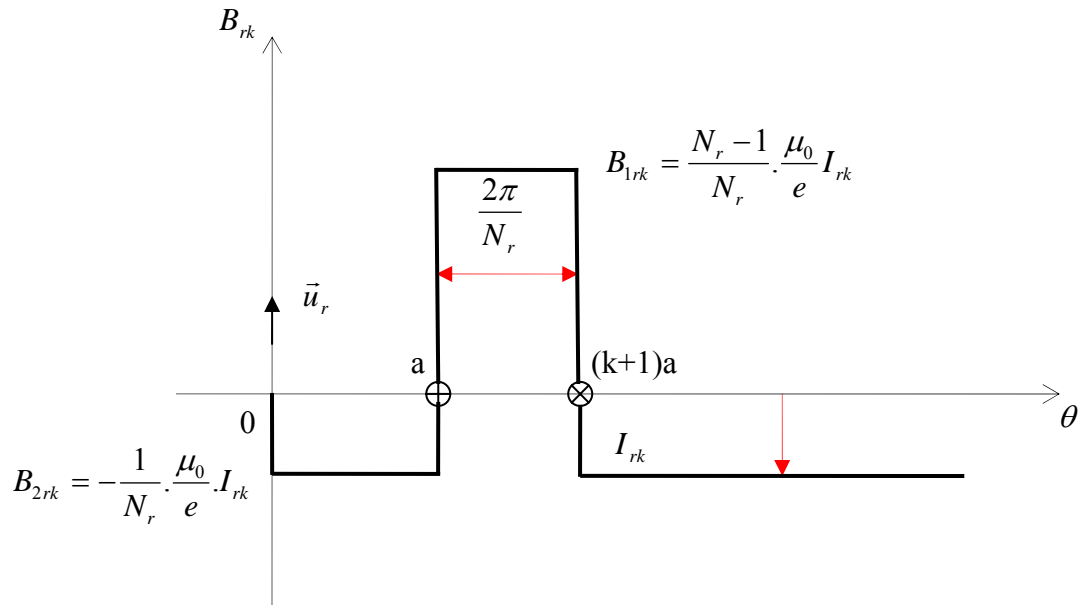


Figure II.2 : Induction magnétique produite par une maille du rotor

La distribution spatiale du champ dû à la $k^{ème}$ boucle de courant rotorique, est considérée comme étant rectangulaire, l'inductance principale et l'inductance mutuelle d'une maille rotorique sont données par l'expression du flux propre de la maille k.

On a donc :

$$\begin{aligned} \phi_{rpk} &= \int_{ka}^{(k+1)a} B_{1rk} R l d(\theta) \\ \phi_{rpk} &= \frac{N_r - 1}{N_r^2} \frac{\mu_0}{e} \cdot 2\pi R l I_{rk} \end{aligned} \tag{II-12}$$

L'inductance propre d'une boucle rotorique est :

$$L_{rp} = \frac{N_r - 1}{N_r^2} \frac{\mu_0}{e} \cdot 2\pi R l \tag{II-13}$$

L'inductance totale de la $K^{ème}$ maille rotoriques est égale à la somme de son inductance principale, des inductances de fuite des deux barres et des inductances de fuites de deux portions d'anneaux de court circuit fermant la maille k.

$$L_{rr} = L_{rp} + 2L_b + 2L_e \quad (II-14)$$

Les mailles rotoriques sont magnétiquement couplées par l'intermédiaire du flux rotorique d'entrefer, le flux traversant la $j^{ème}$ maille produit par le courant i_{rk} circulant dans la maille k est donné par :

$$\begin{aligned} \phi_{rjrk} &= \int_0^l dz \int_{ja}^{(j+1)a} B_{2rk} R.l d(\theta) \\ \phi_{rjrk} &= \int_0^l dz \int_{ja}^{(j+1)a} \left(-\frac{1}{N_r} \frac{\mu_0}{e} R.l.I_{rk} \right) d(\theta) \end{aligned} \quad (II-15)$$

D'après l'équation (II-15) on obtint l'inductance mutuelle :

$$M_{rr} = -\frac{1}{N_r^2} \frac{\mu_0}{e} 2\pi.l.R \quad (II-16)$$

II.2.1.3 Mutuelle inductances entre stator et rotor

L'induction produite par la bobine de la phase n dans la $K^{ème}$ maille rotorique est donnée par :

$$B_{msr} = \frac{2\mu_0 N_s I_s}{ep\pi} \cos\left(p\theta - n\frac{2\pi}{3}\right) \quad (II-17)$$

Avec :

$$n = (1, 2, 3).$$

Le flux traversant la maille k sera formé par :

$$\phi_{rka} = \int_0^l dz \int_{ka}^{(k+1)a} B_{msr} R.l d(\theta)$$

On obtient :

$$\phi_{rka} = -\frac{2\mu_0}{ep\pi} N_s \cdot R.l.I_s \frac{1}{p} \left[\sin\left(p\theta - n\frac{2\pi}{3}\right) \right]_{ka}^{(k+1)a} \quad (II-18)$$

L'inductance mutuelle entre la phase « a » du stator et la maille rotorique est :

$$M_{rka} = -M_{sr} \cos\left(p\theta - n\frac{2\pi}{3} + ka\right) \quad (\text{II-19})$$

Avec :

$$M_{sr} = \frac{4\mu_0 \cdot N_s \cdot R \cdot l}{\pi \cdot e \cdot p^2} \sin\left(\frac{a}{2}\right) \quad ; \quad a = p \frac{2\pi}{N_r}$$

II.3 Mise en équation

L'objectif de cette étape est de trouver un modèle adéquat de la machine asynchrone pour la simulation.

II.3.1 Equations statorique

Les équations de la tension et du flux statorique sont :

$$\begin{cases} [V_{abc}] = [R_s][I_{abc}] + \frac{d}{dt}[\phi_{abc}] \\ [\phi_{abc}] = [L_s][I_{abc}] + [M_{sr}][I_{rk}] \end{cases} \quad (\text{II-20})$$

Avec :

$$\begin{aligned} [V_{abc}] &= [V_a \quad V_b \quad V_c]^t \\ [I_{abc}] &= [I_a \quad I_b \quad I_c]^t \\ [I_{rk}] &= [I_{r0} \quad I_{r1} \quad \dots I_{r(N_r-1)}]^t \\ [\phi_{abc}] &= [\phi_a \quad \phi_b \quad \phi_c]^t \end{aligned}$$

La matrice des résistances statoriques est donnée par :

$$[R_s] = \begin{bmatrix} r_s & 0 & 0 \\ 0 & r_s & 0 \\ 0 & 0 & r_s \end{bmatrix}$$

La matrice d'inductance statorique s'écrit :

$$[L_s] = \begin{bmatrix} L_{sp} + L_{sf} & M_s & M_s \\ M_s & L_{sp} + L_{sf} & M_s \\ M_s & M_s & L_{sp} + L_{sf} \end{bmatrix}$$

Les inductances mutuelles entre phases statorique et maille rotorique s'écrit :

$$[M_{sr}] = \begin{bmatrix} \dots & \dots & \dots & -M_{sr} \cos(\theta_r + ka) & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & -M_{sr} \cos(\theta_r + ka - \frac{2\pi}{3}) & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & -M_{sr} \cos(\theta_r + ka - \frac{4\pi}{3}) & \dots & \dots & \dots \end{bmatrix}$$

Avec : $k=1, 2, 3, \dots, N_r - 1$.

II.3.2 Equations rotorique

La figure (II-3) présente une boucle k du rotor, et montre les conventions choisies pour les courants.

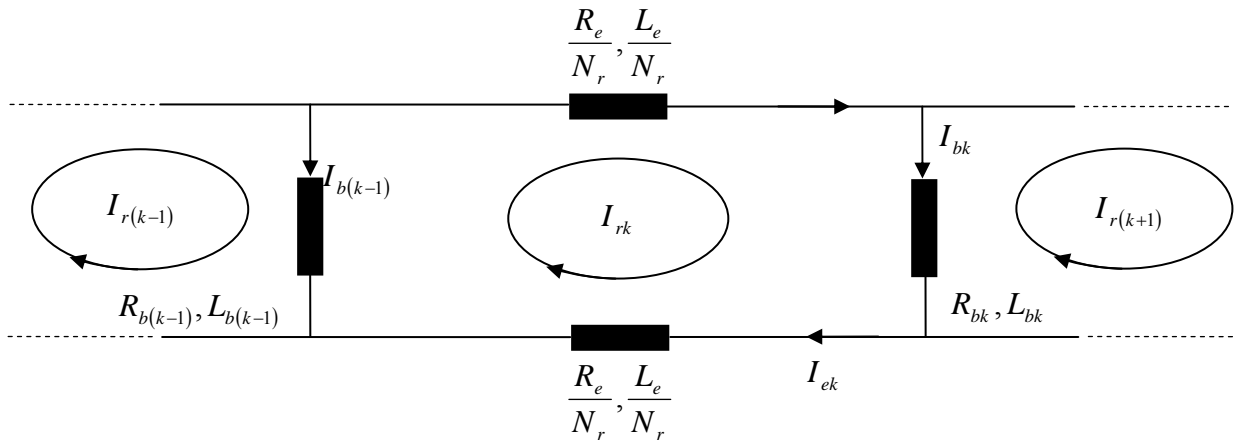


Figure II.3 schéma équivalent des mailles rotorique

Sachant que :

$$\begin{cases} I_{ek} = I_{rk} - I_e \\ I_{bk} = I_{rk} - I_{r(k-1)} \end{cases}$$

L'équation électrique relative à la maille k est :

$$\frac{R_e}{N_r} I_{rk} - R_{b(k-1)} \dot{i}_{b(k-1)} + \frac{R_e}{N_r} I_{ek} + R_{bk} I_{bk} + \frac{d}{dt} \phi_{rk} = 0 \quad (\text{II-21})$$

Le flux ϕ_{rk} totalisé pour un circuit élémentaire k est la somme des termes suivants :

◆ Le flux principal :

$$\phi_{rp} = L_{rp} I_{rk}$$

◆ Le flux mutuel avec les autres circuits du rotor :

$$\phi_{rr} = M_{rr} \sum_{\substack{j=0 \\ j \neq k}}^{N_r-1} I_{rj}$$

◆ Le flux mutuel avec le stator est :

$$\phi_{sr} = M_{sr} \left[\cos(\theta_r + ka) : \cos\left(\theta_r + ka - \frac{2\pi}{3}\right) : \cos\left(\theta_r + ka - \frac{4\pi}{3}\right) \right] [I_{abc}]$$

L'équation (II-21) devient donc :

$$0 = R_{bk} I_{r(k-1)} + \left(2 \frac{R_e}{N_r} + R_{b(k-1)} + R_{bk} \right) I_{rk} - R_{bk} I_{r(k+1)} - \frac{R_e}{N_r} I_e + \frac{d\phi_{rk}}{dt}$$

D'où :

$$\begin{aligned} \phi_{rk} = & \left(L_{rp} + \frac{2L_e}{N_r} + 2L_b \right) I_{rk} - M_{rr} \sum_{\substack{j=0 \\ j \neq 0}}^{N_r-1} I_{rj} - L_b (I_{r(k-1)} + I_{r(k+1)}) - \frac{L_e}{N_r} I_e \\ & - M_{sr} \left[\cos(\theta_r + ka) : \cos\left(\theta_r + ka - \frac{2\pi}{3}\right) : \cos\left(\theta_r + ka - \frac{4\pi}{3}\right) \right] [I_{abc}] \end{aligned} \quad (\text{II-22})$$

Avec : $k=0, 1, 2, \dots, N_r - 1$.

L'équation relative à l'anneau de court-circuit est :

$$\frac{L_e}{N_r} \sum_{k=0}^{N_r-1} \frac{dI_{rk}}{dt} - L_e \frac{dI_e}{dt} - \left(R_e I_e - \frac{R_e}{N_r} \sum_{k=0}^{N_r-1} I_{rk} \right) = 0$$

De même façon on utilise les équations de $I_{e(k)}$ et $I_{b(k)}$ on trouve :

$$\frac{R_e}{N_r} \sum_{k=1}^{N_r} I_{r(k)} + \frac{L_e}{N_r} \sum_{k=1}^{N_r} \frac{d}{dt} I_{r(k)} - L_e \frac{d}{dt} I_e - R_e I_e = 0 \quad (\text{II-23})$$

II.3.3 Equation d'état de la machine

Le système est mis sous la forme canonique suivante :

$$[V] = [R][I] + [L] \frac{d}{dt} [I] + \frac{d[L]}{dt} [I] \quad (\text{II-24})$$

Avec :

$$[V] = [v_a \ v_b \ v_c \ ; \ 0 \ 0 \dots 0 \ ; \ 0]^t : \text{Le vecteur global des tensions } ((N_r + 4) \times 1).$$

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

$$[I] = [i_a \ i_b \ i_c \ ; \ i_{r0} \ i_{r1} \dots i_{rk} \dots i_{r(N_r-1)} \ ; \ i_e]^t : \text{Le vecteur global des courants } ((N_r + 4) \times 1).$$

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

La matrice globale des résistances est :

$$[R] = \begin{bmatrix} [R_s]_{3 \times 3} & : & [0]_{3 \times (N_r + 1)} \\ \dots & \dots & \dots \\ [0]_{(N_r + 1) \times 3} & : & [R_r]_{(N_r + 1) \times (N_r + 1)} \end{bmatrix}$$

La matrice des résistances rotorique :

$$[R_r] = \begin{bmatrix} R_{b0} + R_{b(N_r-1)} + 2\frac{R_e}{N_r} & -R_{b0} & \dots & 0 & \dots & \dots & -R_{b(N_r-1)} & \dots & \frac{R_e}{N_r} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & -R_{b(k-1)} & R_{bk} + R_{b(k-1)} + 2\frac{R_e}{N_r} & -R_{bk} & \dots & 0 & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ -R_{b(N_r-1)} & \dots & 0 & \dots & \dots & -R_{b(N_r-2)} & R_{b(N_r-1)} + R_{b(N_r-2)} + 2\frac{R_e}{N_r} & \dots & \frac{R_e}{N_r} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{R_e}{N_r} & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \frac{R_e}{N_r} & \dots & R_e \end{bmatrix}$$

La matrice globale des inductances est donnée par :

$$[L] = \begin{bmatrix} [L_s]_{3 \times 3} & : & [M_{sr}]_{3 \times (N_r+1)} \\ \dots & \dots & \dots \\ [M_{rs}] & : & [L_r]_{(N_r+1) \times (N_r+1)} \end{bmatrix}$$

La matrice des inductances rotorique :

$$[L_r] = \begin{bmatrix} L_{rp} + 2L_b + 2\frac{L_e}{N_r} & M_{rr} - L_b & \dots & \dots & M_{rr} & \dots & M_{rr} - L_b & \dots & -\frac{L_e}{N_r} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ M_{rr} - L_b & \dots & M_{rr} - L_b & L_{rp} + 2L_b + 2\frac{L_e}{N_r} & M_{rr} - L_b & M_{rr} & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ M_{rr} - L_b & \dots & M_{rr} & \dots & \dots & M_{rr} - L_b & L_{rp} + 2L_p + 2\frac{L_e}{N_r} & \dots & -\frac{L_e}{N_r} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ -\frac{L_e}{N_r} & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & -\frac{L_e}{N_r} & \dots & L_e \end{bmatrix}$$

La dérivée de la matrice globale des inductances est :

$$\frac{d[L]}{dt} = \begin{bmatrix} [0] & \frac{d[M_{sr}]}{dt} \\ \frac{d[M_{sr}]^t}{dt} & [0] \end{bmatrix}$$

II.3.4 Transformation de Park

Pour obtenir un système des équations à coefficients constants, il est usuel de faire appel à une transformation de PARK elle permet le passage du repère réel triphasé (a, b, c) Au repère d'axe (h, d, q). Le système des grandeurs triphasées est tel que la somme instantanée des grandeurs est nulle. Ceci permet d'annuler la composante homopolaire par conséquent, le repère (h, d, q) peut être réduit à un repère biphasé (d, q) [1].

Le modèle de la machine asynchrone dans le repère de Park est schématisé par la figure suivante:

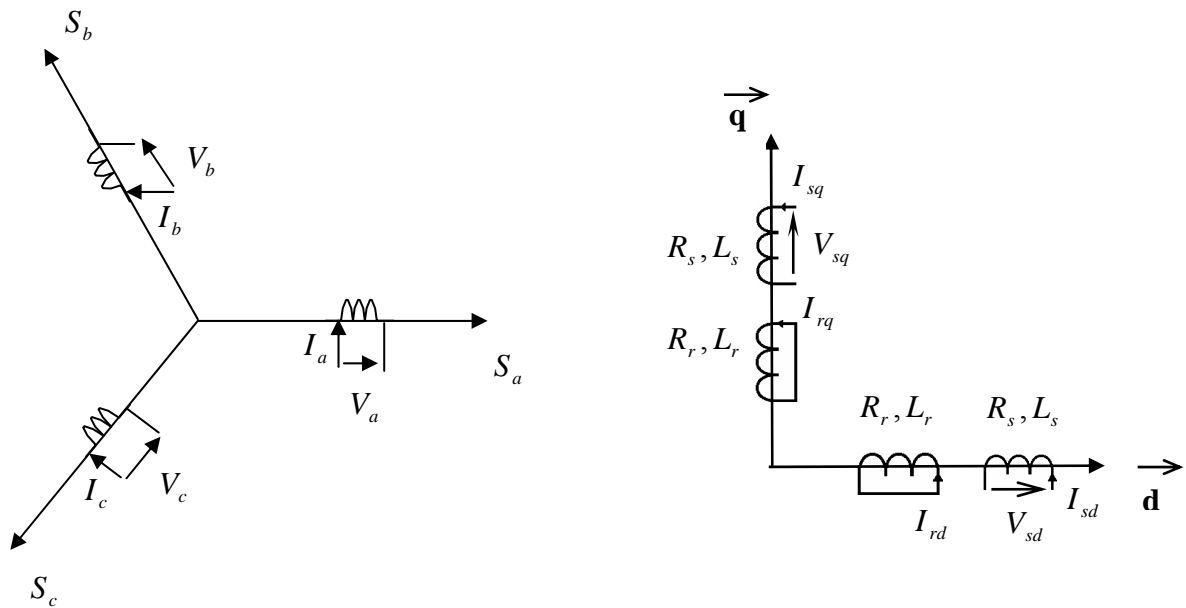


Figure II.4 : Modèle de la machine dans le repère de Park

La matrice de Park modifiée est définie par :

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (II-25)$$

La dérivée de la matrice de Park est :

$$\frac{d}{dt} [P(\theta)] = -\omega \cdot \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 0 & \sin(\theta) & \cos(\theta) \\ 0 & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ 0 & \sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix}$$

On définit la matrice globale de Park de dimension $(N_r + 4) \times (N_r + 4)$ comme :

$$[T] = \begin{bmatrix} [P(\theta)] & : & [0] \\ \dots & \dots & \dots \\ [0]^t & : & [1]_{(N_r+1) \times (N_r+1)} \end{bmatrix} \quad (II-26)$$

L'inverse de la matrice globale de Park est :

$$[T]^{-1} = \begin{bmatrix} [P(\theta)]^{-1} & : & [0] \\ \dots & \dots & \dots \\ [0]^t & : & [1]_{(N_r+1) \times (N_r+1)} \end{bmatrix}$$

Sachant que :

$$[V] = [T][V_{tr}], \quad \text{avec : } [V_{tr}] = [v_{os} \quad v_{ds} \quad v_{qs} \quad \dot{0} \quad 0 \dots \dots 0 \quad \dot{0}]^t$$

$$[I] = [T][I_{tr}], \quad \text{avec : } [I_{tr}] = [i_{os} \quad i_{ds} \quad i_{qs} \quad \dot{i}_{ro} \quad i_{rk} \dots \dots i_{r(N_r-1)} \quad \dot{i}_e]^t$$

A partir de l'équation (II-24):

$$[T][V_{tr}] = [R][T][I_{tr}] + \frac{d[L]}{dt}[T][I_{tr}] + [L]\frac{d[T]}{dt}[I_{tr}] + [L][T]\frac{d[I_{tr}]}{dt}$$

$$[V_{tr}] = \left([T]^{-1} [R] [T] + [T]^{-1} \frac{d[L]}{dt} [T] + [T]^{-1} [L] \frac{d[T]}{dt} \right) [I_{tr}] + [T]^{-1} [L] [T] \frac{d[I_{tr}]}{dt}$$

$$[V_{tr}] = (A + B + C) [I_{tr}] + D \frac{d[I_{tr}]}{dt}$$

Avec les termes A, B, C, D donnés par :

$$A = [T]^{-1} [R] [T] = \begin{bmatrix} [P(\theta)]^{-1} [R_s] [P(\theta)] & : & [0] \\ \dots & & \dots \\ [0] & : & [R_r] \end{bmatrix}$$

$$B = [T]^{-1} [L] \frac{d[T]}{dt} = \begin{bmatrix} [P(\theta)]^{-1} [L_s] \frac{d[P(\theta)]}{dt} & : & [0] \\ \dots & & \dots \\ [M_{sr}]^t \frac{d[P(\theta)]}{dt} & : & [0] \end{bmatrix}$$

$$C = [T]^{-1} \frac{d[L]}{dt} [T] = \begin{bmatrix} [0] & : & [P(\theta)]^{-1} \frac{d[M_{sr}]}{dt} \\ \dots & & \dots \\ \frac{d[M_{sr}]^t}{dt} [P(\theta)] & : & [0] \end{bmatrix}$$

$$D = [T]^{-1} [L] [T] = \begin{bmatrix} [P(\theta)]^{-1} [L_s] [P(\theta)] & : & [P(\theta)]^{-1} [M_{sr}] \\ \dots & & \dots \\ [M_{rs}]^t [P(\theta)] & : & [L_r] \end{bmatrix}$$

La mise en équation du modèle de la machine conduit à un système complet de dimension $N_r + 4$;

$$\begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \\ V_{os} \\ \dots \\ 0 \\ \vdots \\ \vdots \\ 0 \\ \dots \\ 0 \end{bmatrix} = [R_{tr}] \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \\ I_{os} \\ \dots \\ I_{r0} \\ \vdots \\ I_{rk} \\ \vdots \\ \dots \\ I_e \end{bmatrix} + [L_{tr}] \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \\ I_{os} \\ \dots \\ I_{r0} \\ \vdots \\ I_{rk} \\ \vdots \\ \dots \\ I_e \end{bmatrix} \quad (\text{II-27})$$

$[L_{tr}]$ et $[R_{tr}]$ sont les matrices globales des résistances et des inductances après la transformation de Park.

A ces équations, on ajoute les équations électromagnétiques (II-28) (II-29) afin d’avoir la vitesse électrique et la position électrique θ_r du rotor.

$$\frac{d\Omega_r}{dt} = \frac{1}{j} (C_e - C_r - k_0 \omega_m) \quad (\text{II-28})$$

$$\frac{d\theta_r}{dt} = \omega_r \quad (\text{II-29})$$

II.3.5 Equation mécanique

Pour calculer l’expression du couple instantané, il est nécessaire de déterminer la puissance instantanée.

La puissance instantanée absorbée par la machine asynchrone est donnée par l’expression suivante :

$$P_e = V_a I_a + V_b I_b + V_c I_c = [V_{abc}]^t [I_{abc}] \quad (\text{II-30})$$

En appliquant la transformation de PARK à l’équation (II-30), lorsque le système est équilibré (composantes homopolaires est nulles), l’équation (II-30) devient :

$$P_e = V_{ds} I_{ds} + V_{qs} I_{qs}$$

Sachant que :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{d}{dt} \phi_{ds} - \omega_{er} \phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + \frac{d}{dt} \phi_{qs} + \omega_{er} \phi_{ds} \end{cases} \quad (\text{II-31})$$

En remplaçant les tensions par leurs expressions on trouve :

$$P_e = R_s (I_{ds}^2 + I_{qs}^2) + I_{sd} \left(\frac{d\phi_{sd}}{dt} \right) + I_{sq} \left(\frac{d\phi_{sd}}{dt} \right) + \omega_{er} (\phi_{ds} I_{qs} - \phi_{qs} I_{ds}) \quad (\text{II-32})$$

Cette expression est combinée de trois parties ont :

- $R_s (I_{ds}^2 + I_{qs}^2)$: la chute homique dans les enroulements statoriques.
- $\left(I_{ds} \cdot \frac{d\phi_{ds}}{dt} + I_{qs} \cdot \frac{d\phi_{qs}}{dt} \right)$: représente la variation de l'énergie magnétique stockée dans les enroulements du stator.
- $\omega_{er} (\phi_{ds} I_{qs} - \phi_{qs} I_{ds})$: la puissance électromagnétique.

Telle que la puissance électromagnétique égale :

$$P_e = \frac{C_e \omega_r}{p}$$

Par analogie, l'expression du couple sera :

$$C_e = P [\phi_{ds} I_{qr} - \phi_{qs} I_{dr}] \quad (\text{II-33})$$

On remplace ϕ_{ds} et ϕ_{qs} par ces expressions dans l'équation (II-32) et on obtient :

$$C_e = PM [I_{ds} \cdot I_{qr} - I_{qs} \cdot I_{dr}] \quad (\text{II-34})$$

II.4 Modèle de taille réduit

La représentation système par l'expression (II-24) fait apparaître un système d'ordre très élevé car il est constitué de nombre de phases statoriques, du nombre de phases rotoriques et des équations électromécaniques [1].

Nous avons appliqué une transformation de Park étendue au système rotorique de manière à transformer ce système à N_r phases en un système (d, q).

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

$$\begin{aligned} [X_{odqs}] &= [T(\theta_s)] [X_{abcs}] \Rightarrow [X_{abcs}] = [T(\theta_s)]^{-1} [X_{odqs}] \\ [X_{odqs}] &= [T_{3N_r}(\theta_r)] [X_{rk}] \Rightarrow [X_{rk}] = [T_{3N_r}(\theta_r)]^{-1} [X_{odqr}] \end{aligned}$$

Soit la partie statorique :

$$[V_s] = [R_s] [i_s] + \frac{d}{dt} \{ [L_s] [i_s] \} + \frac{d}{dt} \{ [M_{sr}] [i_{rk}] \} \quad (\text{II-35})$$

L'application de la transformation donne :

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

Pour la partie rotorique :

$$[V_r] = [R_r] [i_{rk}] + \frac{d}{dt} \{ [L_r] [i_{rk}] \} + \frac{d}{dt} \{ [M_{rs}] [i_s] \} \quad (\text{II-36})$$

Nous obtenons de la même façon :

$$\begin{aligned} [V_{odqr}] = & \{ [T(\theta_R)] [R_r] [T(\theta_R)]^{-1} \} [i_{odqr}] + \{ [T(\theta_R)] [L_r] [T(\theta_R)]^{-1} \} \frac{d}{dt} [i_{odqr}] \\ & + \{ [T(\theta_R)] [M_{sr}] \frac{d}{dt} [T(\theta_R)]^{-1} \} \frac{d}{dt} [i_{odqr}] + \{ [T(\theta_R)] \frac{d}{dt} [M_{rs}] [T(\theta_s)]^{-1} \} [i_{odqs}] \end{aligned}$$

En choisissant un référentiel lié au rotor, les relations angulaires peuvent s'écrire : $\theta_s = \theta_r$ et $\theta_R = 0$.

Après simplifications nous obtenons un modèle de taille réduite pour la machine asynchrone.

$$\begin{bmatrix} L_{sc} & 0 & -\frac{N_r}{2} M_{sr} & 0 & 0 \\ 0 & L_{sc} & 0 & -\frac{N_r}{2} M_{sr} & 0 \\ -\frac{3}{2} M_{sr} & 0 & L_{rdq} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{3}{2} M_{sr} & 0 & L_{rdq} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & L_e \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \\ i_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \\ V_{dr} \\ V_{qr} \\ V_e \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R_s & -\omega_r L_{sc} & 0 & -\omega_r \frac{N_r}{2} M_{sr} & 0 \\ \omega_r L_{sc} & R_s & \omega_r \frac{N_r}{2} M_{sr} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_{rdq} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_{rdq} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \\ i_e \end{bmatrix} \quad (\text{II-37})$$

Avec :

$$L_{rdq} = L_{rp} - M_{rr} + \frac{2L_e}{N_r} + 2L_e(1 - \cos(a)) \quad (\text{II-38})$$

$$R_{rdq} = 2 \frac{R_e}{N_r} + 2R_b(1 - \cos(a)) \quad (\text{II-39})$$

Dans le cas d'un défaut rotorique, la matrice $[R_r]$ doit être modifiée.

En utilisant la matrice de transformation, nous obtenons une matrice d'ordre 2 pour le rotor.

La matrice de défaut rotorique s'écrit :

$$[R_{rf}] = [R_r] + \begin{bmatrix} 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots \\ & \dots & & & & \dots \\ \vdots & \dots & \vdots & \vdots & & \dots \\ & \dots & & & & \dots \\ 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots \\ 0 & \dots & R'_{bk} & -R'_{bk} & 0 & \dots \\ 0 & \dots & -R'_{bk} & R'_{bk} & 0 & \dots \\ 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & 0 & \dots \end{bmatrix} \quad (\text{II-40})$$

La nouvelle matrice des résistances rotoriques, après transformations, devient :

$$[R_{rfdq}] = [T(\theta_R)][R_{rf}][T(\theta_R)]^{-1} = [T(\theta_R)]\{[R_r] + [R'_r]\}[T(\theta_R)]^{-1} \quad (\text{II-41})$$

La matrice résistance est :

$$[R_{rfdq}] = \begin{bmatrix} R_{rdd} & R_{rdq} \\ R_{rqd} & R_{rqq} \end{bmatrix}$$

Où les quatre termes de cette matrice sont :

$$R_{rdd} = 2.R_b(1 - \cos(a)) + 2 \frac{R_e}{N_r} + \frac{2}{N_r}(1 - \cos(a)) \sum_k R_{bfk} (1 - \cos(2k - 1)a)$$

$$R_{rdq} = -\frac{2}{N_r}(1 - \cos(a)) \sum_k R_{bfk} \cdot \sin(2k - 1)a$$

$$R_{rqd} = -\frac{2}{N_r}(1 - \cos(a)) \sum_k R_{bfk} \cdot \sin(2k - 1)a$$

$$R_{rqq} = 2.R_b(1 - \cos(a)) + 2 \frac{R_e}{N_r} + \frac{2}{N_r}(1 - \cos(a)) \sum_k R_{bfk} (1 + \cos(2k - 1)a)$$

L'indice k caractérise la barre cassée.

Pour la partie mécanique, après l'application de la transformation généralisée sur l'expression du couple, on obtient :

$$C_e = \frac{3}{2} \cdot P \cdot N_r \cdot M_{sr} (I_{ds} \cdot I_{qr} - I_{qs} \cdot I_{dr}) \quad (\text{II-42})$$

La sous-matrice, relative à la résistance rotorique, est un bon indicateur de la présence d'un défaut. En effet, en cas de défaut R_{rdd} et R_{rqd} ne sont plus égaux comme c'est le cas pour la machine saine. En outre, les termes R_{rdq} et R_{rqd} prennent une valeur non nulle, ce qui témoigne de la présence d'un défaut au rotor [1].

II.5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le développement d'un modèle mathématique multi-enroulement qui prend en considération la structure du rotor, le choix d'un tel modèle est imposé par l'objectif de pouvoir simuler une rupture de barre au rotor, ce type de défaut est modélisé par l'augmentation de la résistance de l'élément défectueux. Dans le chapitre suivant, nous présenterons les résultats de la simulation obtenus à l'aide de ce modèle.

CHAPITRE III

SIMULATION D'UNE MACHINE MULTI-ENROULEMENT

SOMMAIRE

III.1 Introduction

***III.2 Simulation du modèle de la machine
asynchrone***

➤ ***Résultat de simulation***

III.3 Modèle de taille réduit

A- Cas d'une machine saine

➤ ***Interprétation des résultats***

B- Cas d'un défaut de cassure de barre

a - Cassure de deux barres adjacentes

➤ ***Interprétation des résultats***

b - Cassure de deux barres espacées

➤ ***Interprétation des résultats***

III.4 Conclusion

III.1 Introduction

Dans ce chapitre, on considère la simulation du modèle multi-enroulements, permettant de représenter les différentes courbes du courant statorique, du courant dans les barres rotoriques, du couple et de la vitesse. La simulation est effectuée dans différentes conditions de fonctionnement : à l'état sain et avec cassure de barre.

La valeur de la résistance doit être bien déterminée, d'après les chercheurs on prend la valeur de la résistance de la barre cassée comme suit ($R_{bc}=11*R_b$) [13].

III.2 Simulation du modèle de la machine asynchrone

Une fois le modèle de la machine asynchrone à cage établie, nous pouvons aborder l'aspect lié à la simulation de celle-ci en utilisant MATLAB 6.5 SIMILINK. Cela permet de mettre en évidence le comportement du moteur asynchrone dans le cas où le rotor à l'état sain et dans le cas où le rotor à l'état défaillant.

III.2.1 Résultat de simulation

Les paramètres de la machine utilisée en simulation sont donnés à l'annexe 1.

III.3 Modèle de taille réduit

Dans le schéma de simulation figure (III-1), trois blocs différents vont apparaître :

- Un bloc "mécanique" qui traduit l'équation de mouvement expression (II -28).
- Un bloc "électrique" qui traduit l'équation expression (II -37).
- Un bloc "électromécanique" qui traduit l'équation (II -42) du couple.

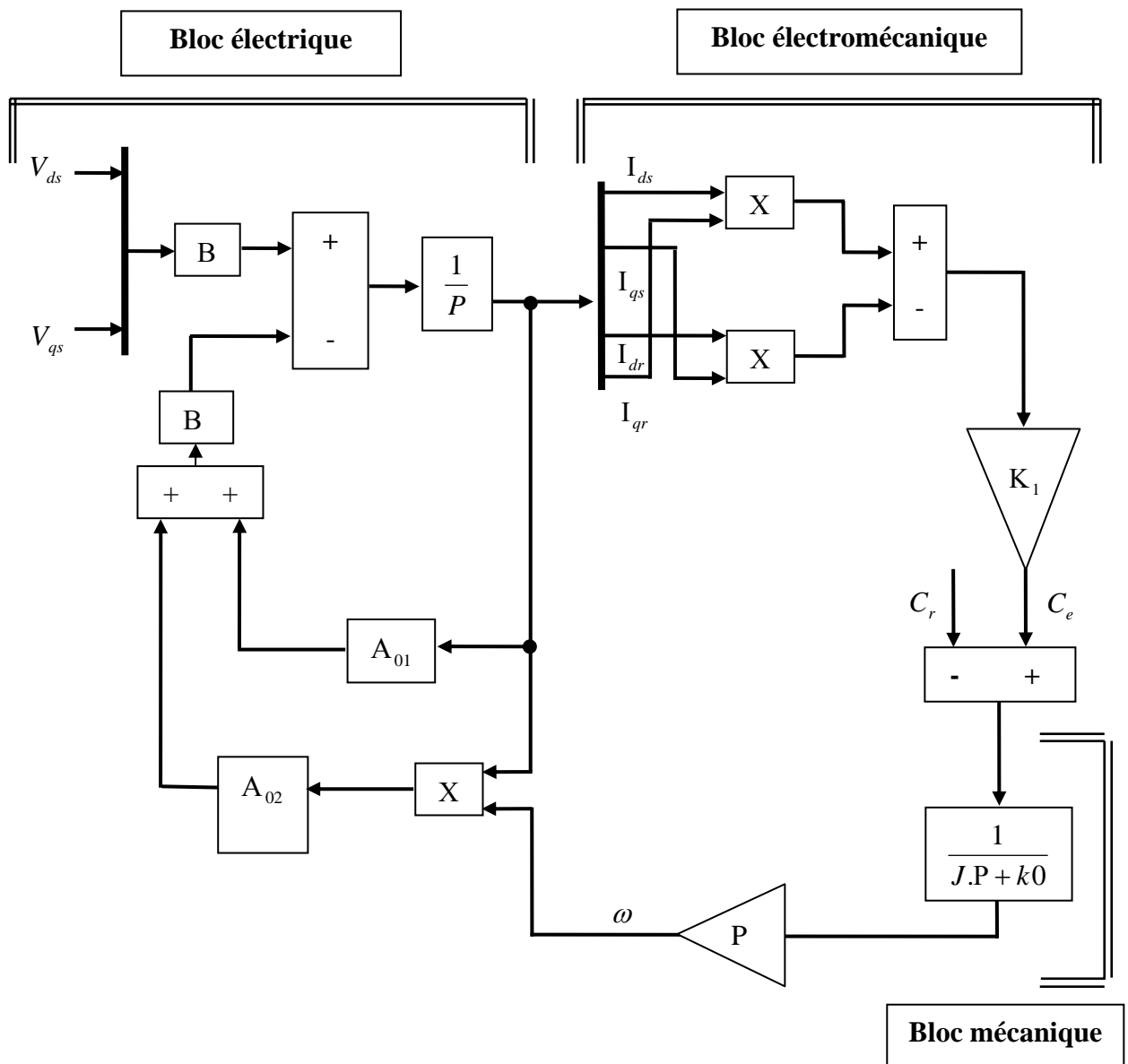


Figure III.1 : Schéma de simulation en SIMULINK de modèle réduit

Avec $K_1 = \frac{3}{2} M_{sr} . P . N_r$

Le modèle (II-37) de la machine multi-enroulements permet de déterminer les matrices inductances et résistances.

La matrice inductances est :

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

$$\text{Soit : } [B] = [L]^{-1}$$

La matrice A est donnée par :

$$A = (A_{01} + \omega_r \cdot A_{02}) \cdot B$$

Avec :

$$[A_{01}] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_{rdd} & R_{rdq} & 0 \\ 0 & 0 & R_{rqd} & R_{rqq} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_e \end{bmatrix}$$

et :

$$[A_{02}] = \begin{bmatrix} 0 & -L_{sc} & 0 & N_r \frac{M_{sr}}{2} & 0 \\ L_{sc} & 0 & -N_r \frac{M_{sr}}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

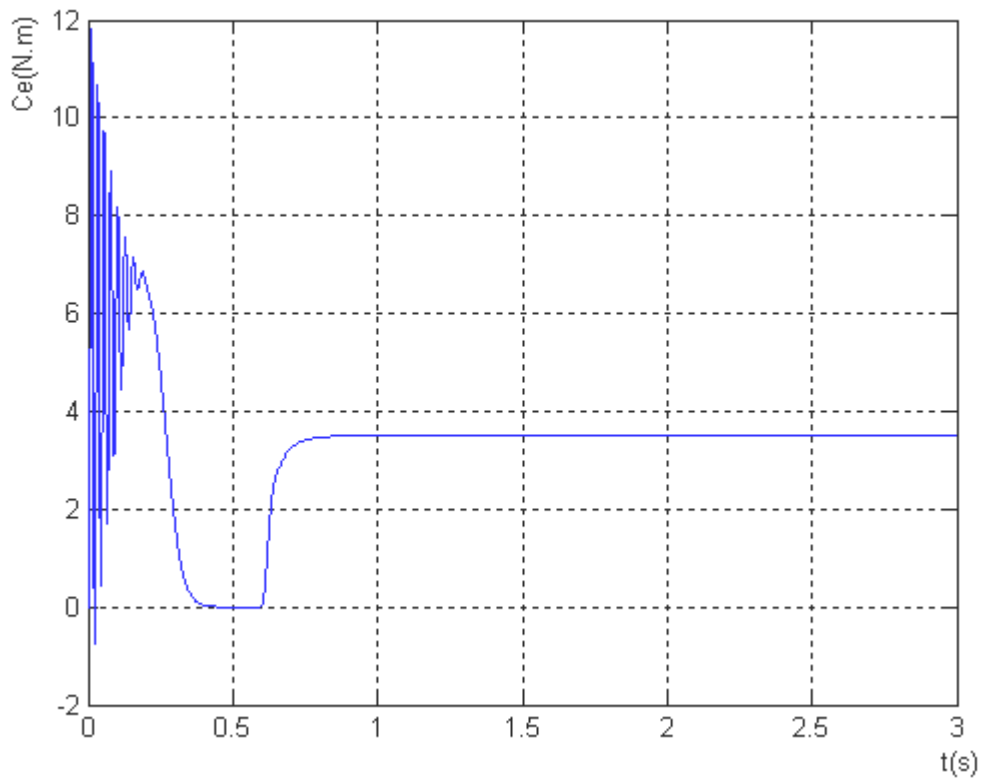
A- Cas d'une machine saine

Pour observer le comportement du modèle simulé, un couple de 3.5 N.m est appliqué à la machine à l'instant $t=0.6s$. Ce couple représente le couple nominal de la machine étudiée.

La simulation du modèle du moteur asynchrone avec un rotor sain, pour le couple électromagnétique, la courbe de la figure (III.2.a). La vitesse est présentée à la figure (III.2.b).

Les courant statoriques et rotoriques sont représentés sur les figure (III.2.c). (III.2.d,e,f,g).

Toutes ces courbes correspondent bien à un fonctionnement normal d'un moteur asynchrone.



Figure(a) : Le couple électromagnétique

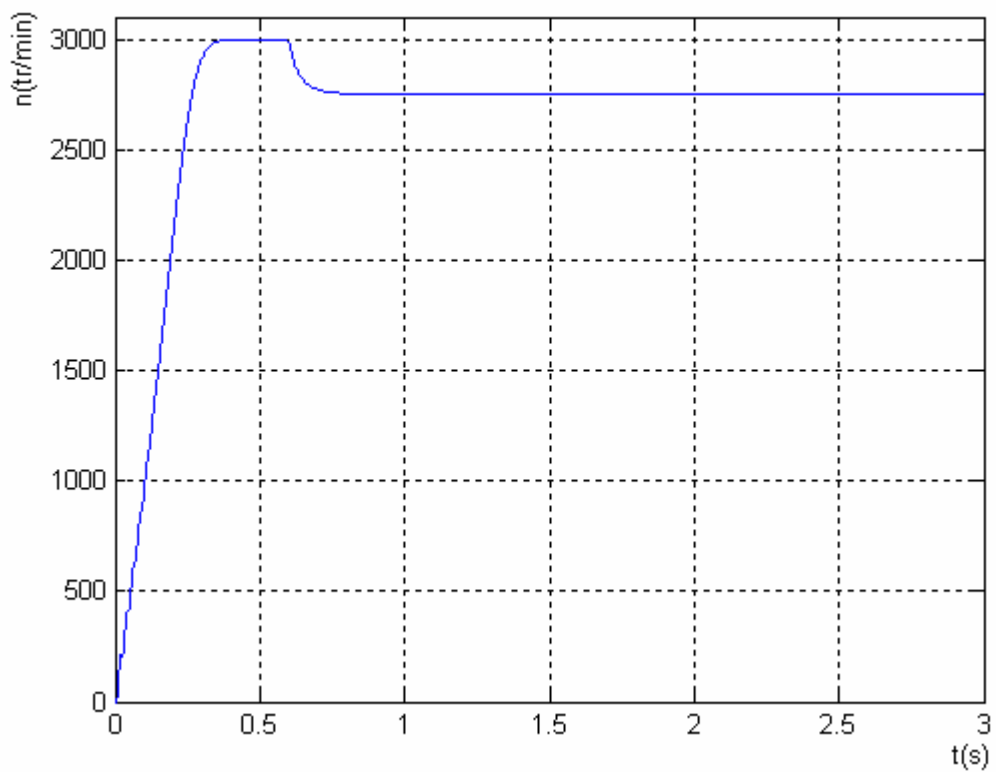


Figure (b) : La vitesse de rotation

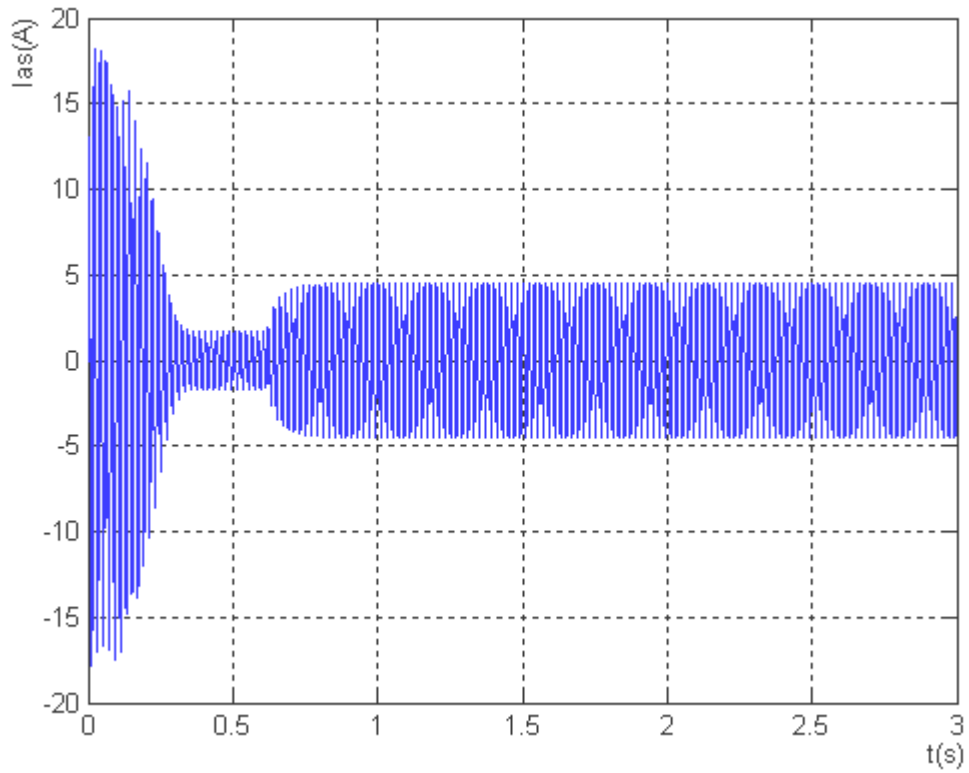


Figure (c) : Courant statorique

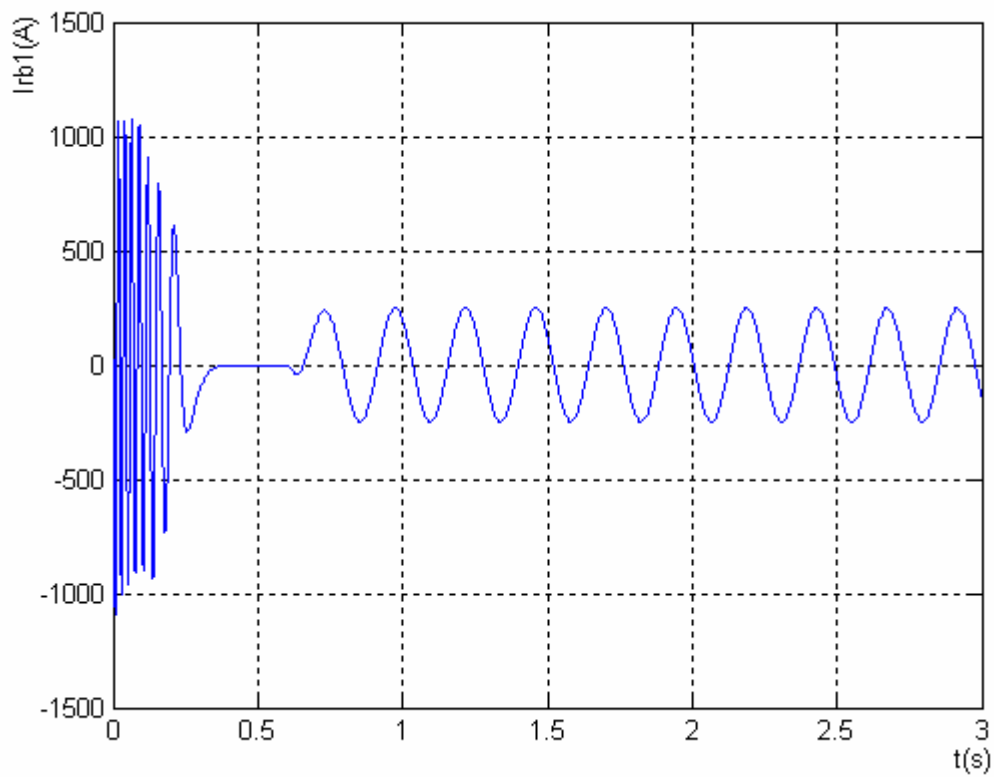


Figure (d) : Courant dans la barre 1

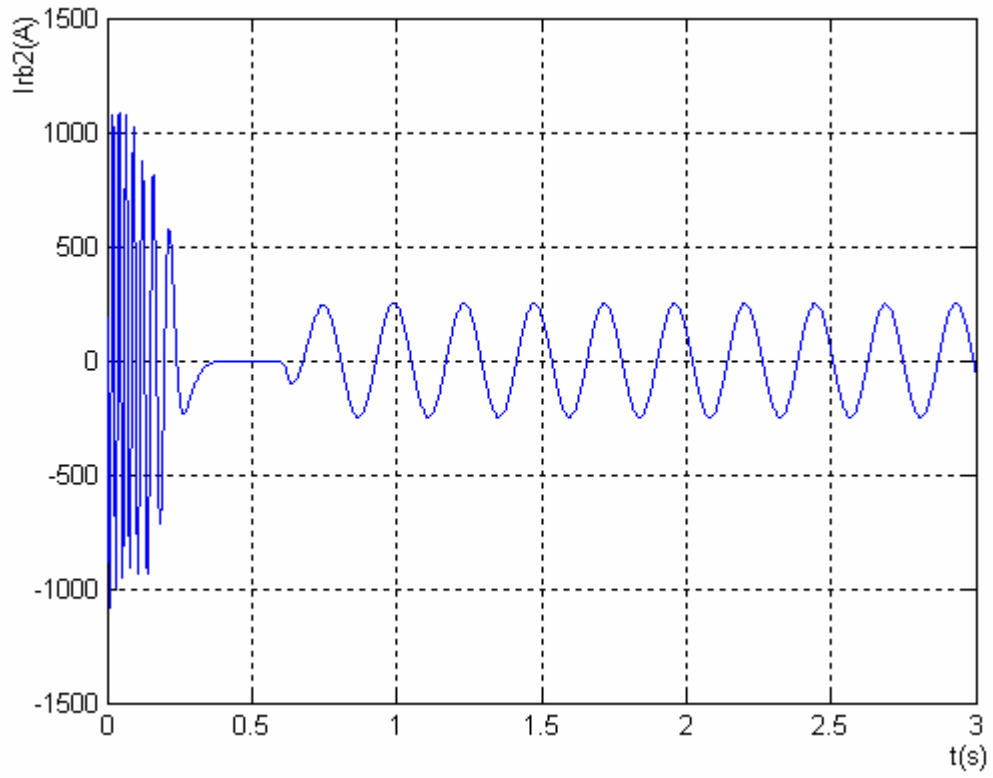


Figure (e) : Courant dans la barre2

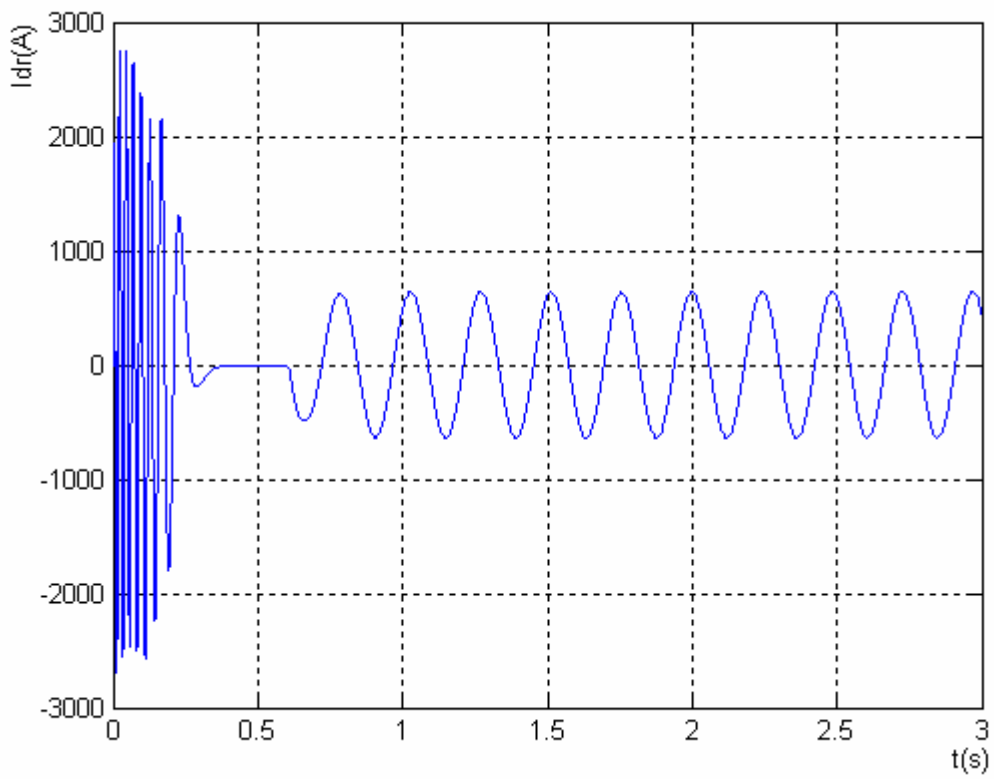


Figure (f) : Courant Idr

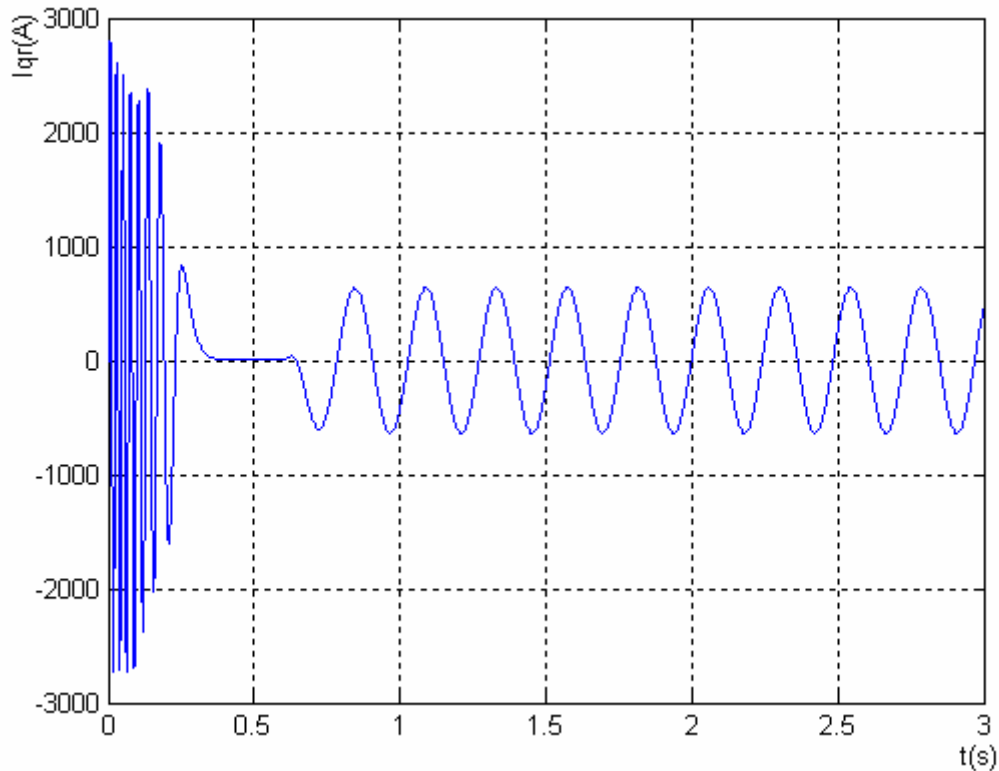


Figure (g) : Courant I_{qr}

Figure III.2 : Simulation avec modèle réduit en charge à l'état sain ($C_r=3.5N.m$)

➤ Interprétation des résultats

À l'instant $t=0.6s$, nous appliquons un échelon de couple résistant $C_r=3.5N.m$. Les courants des barres rotoriques sont très importants. Ils peuvent atteindre 1000A en régime transitoire. Les figures (III.2) montrent l'évolution du couple électromagnétique, de la vitesse et du courants statoriques et rotoriques. Les formes des graphes montrent qu'en phase de démarrage le moteur subit un allongement du régime transitoire. A titre d'exemple, nous prenons la courbe du couple électromagnétique. Cette dernière comprend au début une série d'oscillations d'amplitude élevées qui s'amortissent au cours de l'accélération du moteur, à la fin du régime de démarrage (0.45s. figure III.2.a). Le couple atteint sa valeur maximale, puis s'atténue pour atteindre la valeur du couple résistant.

B- Cas d'un défaut de cassure de barre

a- Cassure de deux barres adjacentes

Dans la simulation suivante, on va supposer deux défauts successifs : rupture de deux barres adjacentes (1.2) :

- rupture de la barre 1 à $t= 1s$.
- rupture de la barre 2 à $t=2s$.

La machine était initialement saine et chargée $C_r= 3.5 \text{ N.m}$

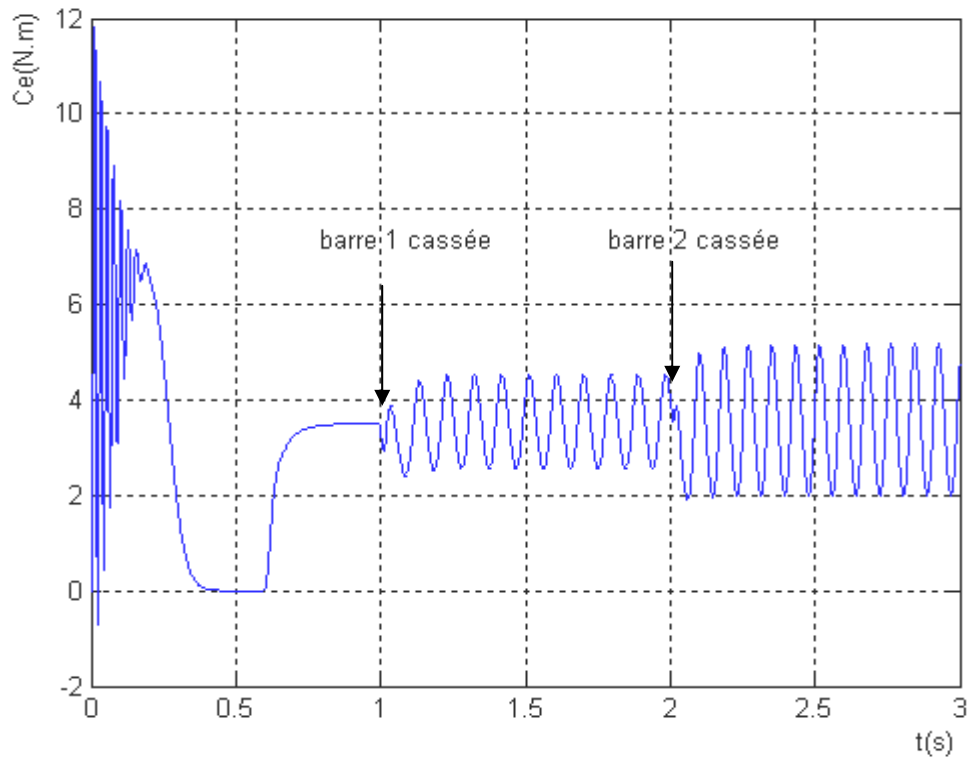
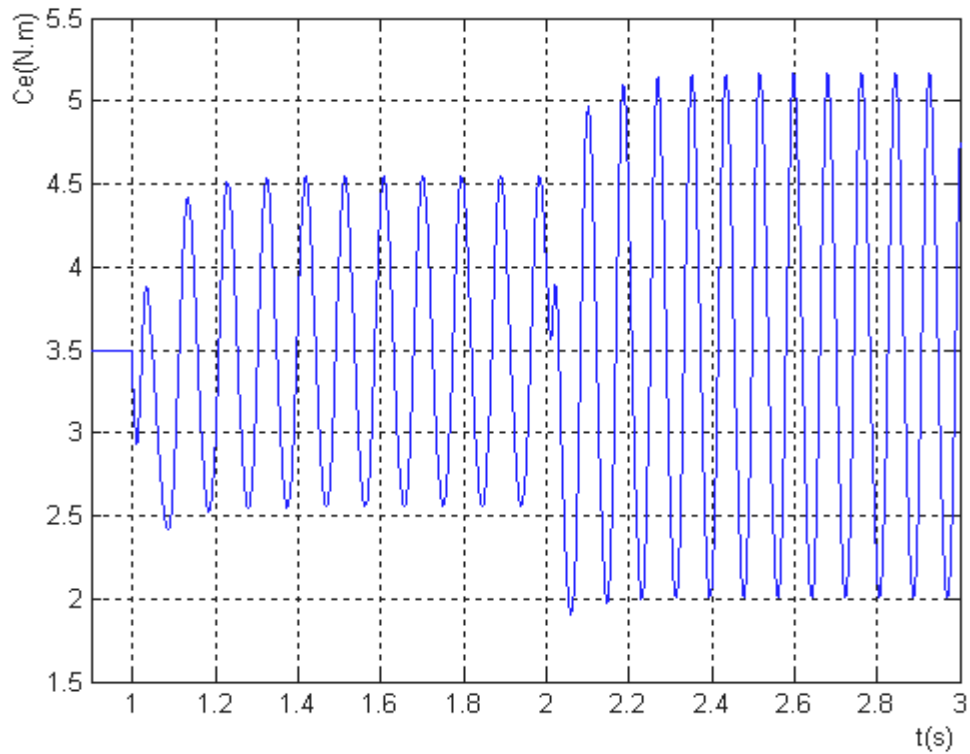
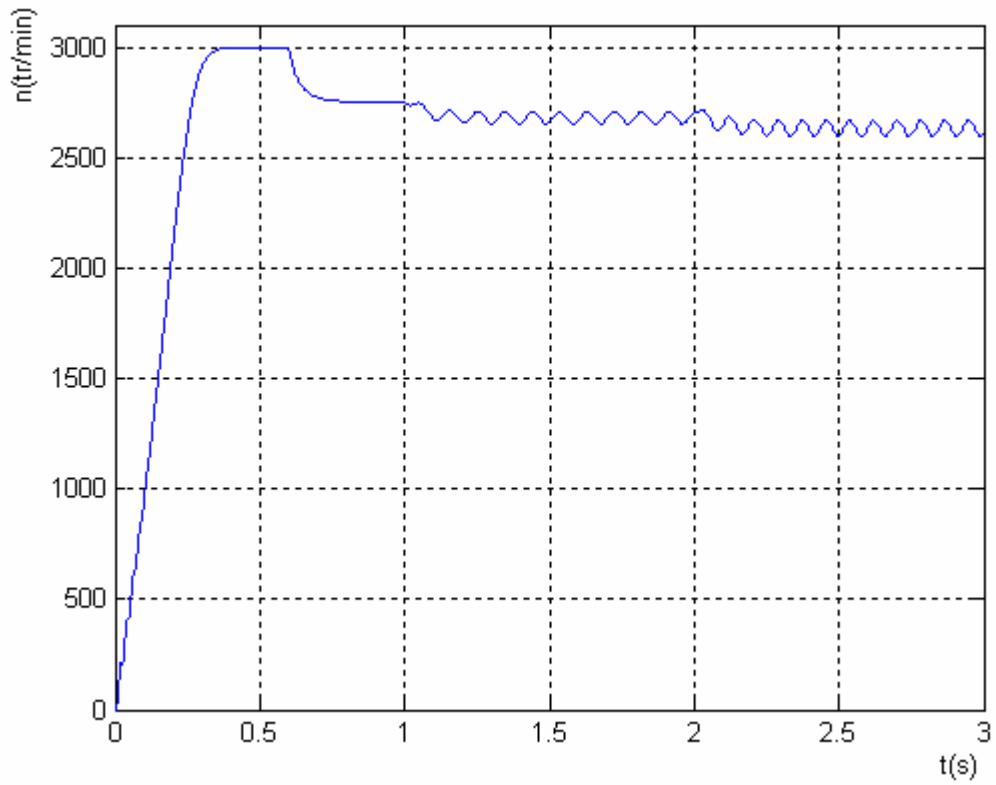


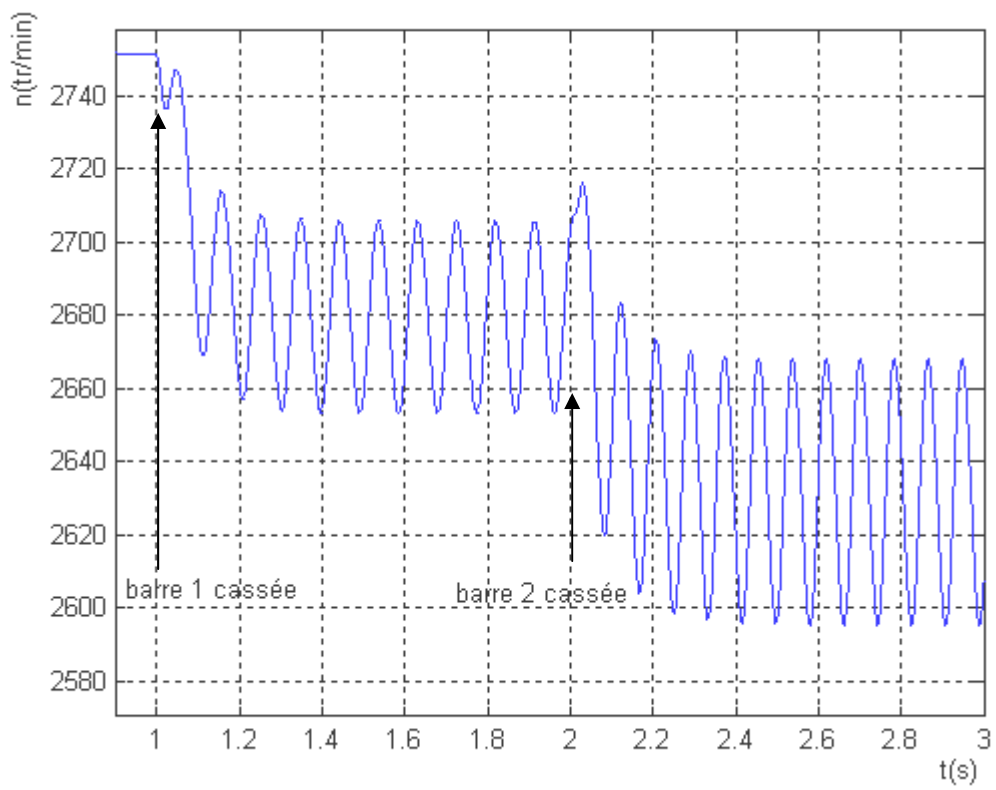
Figure (h) : Couple électromagnétique



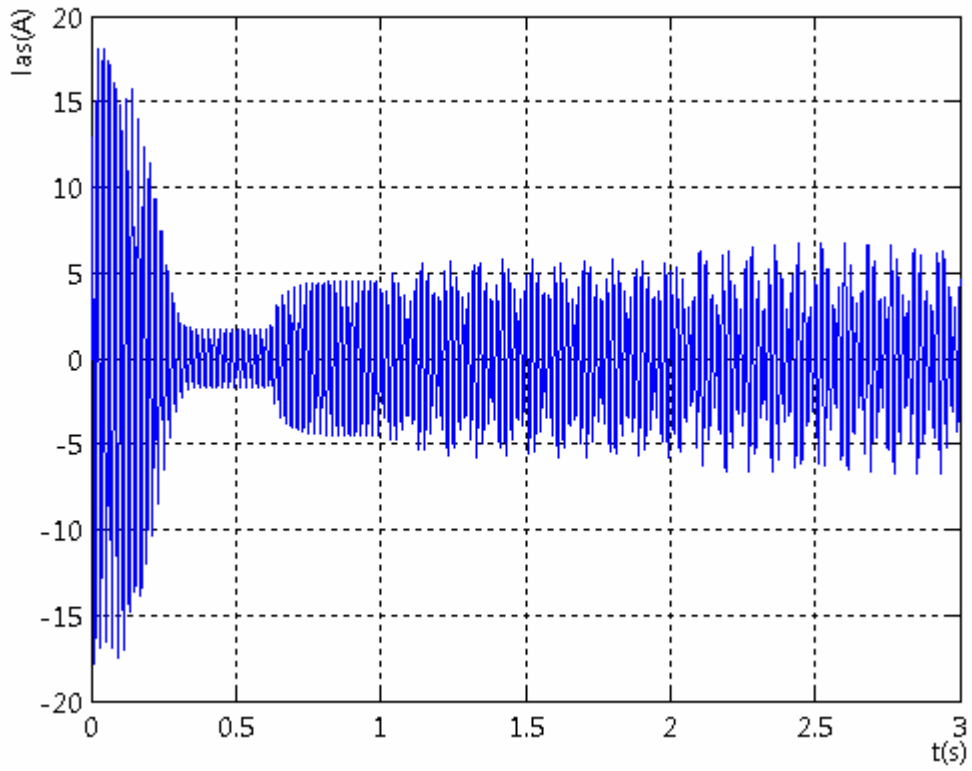
Agrandissement du couple



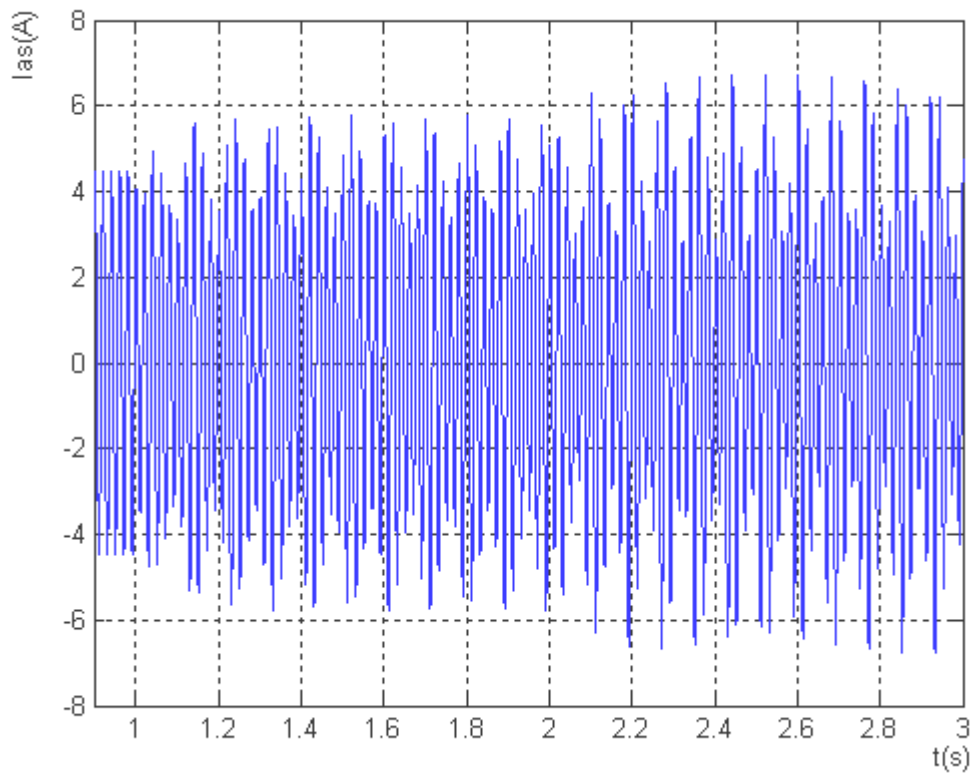
Figure(i) : Vitesse de rotation



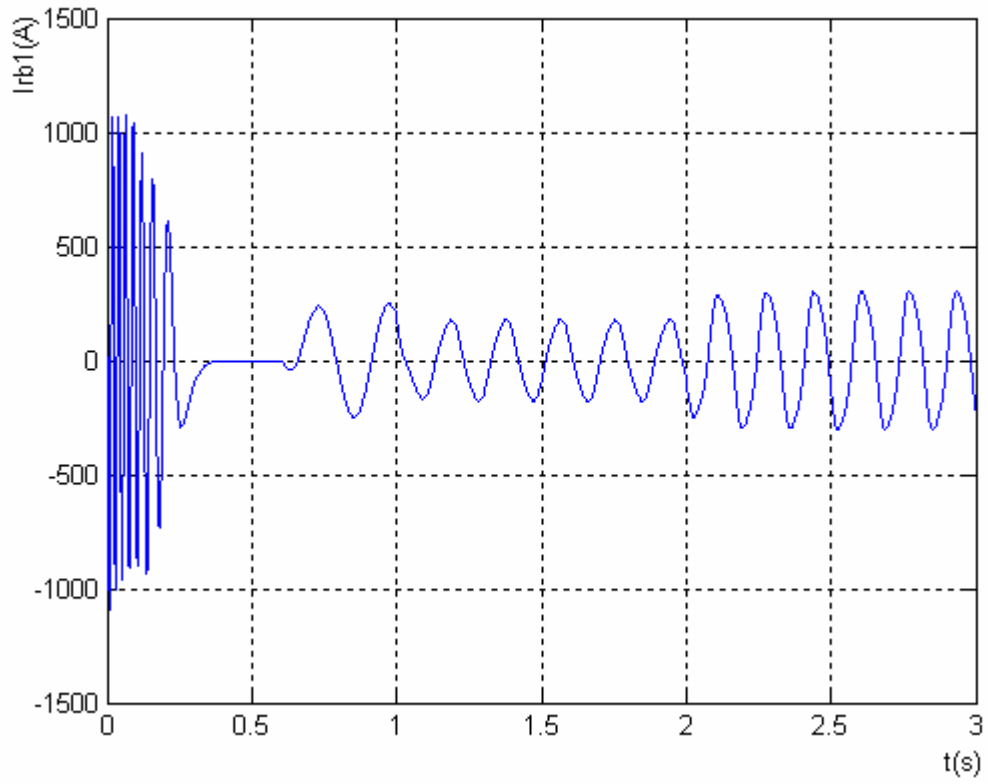
Agrandissement de la vitesse



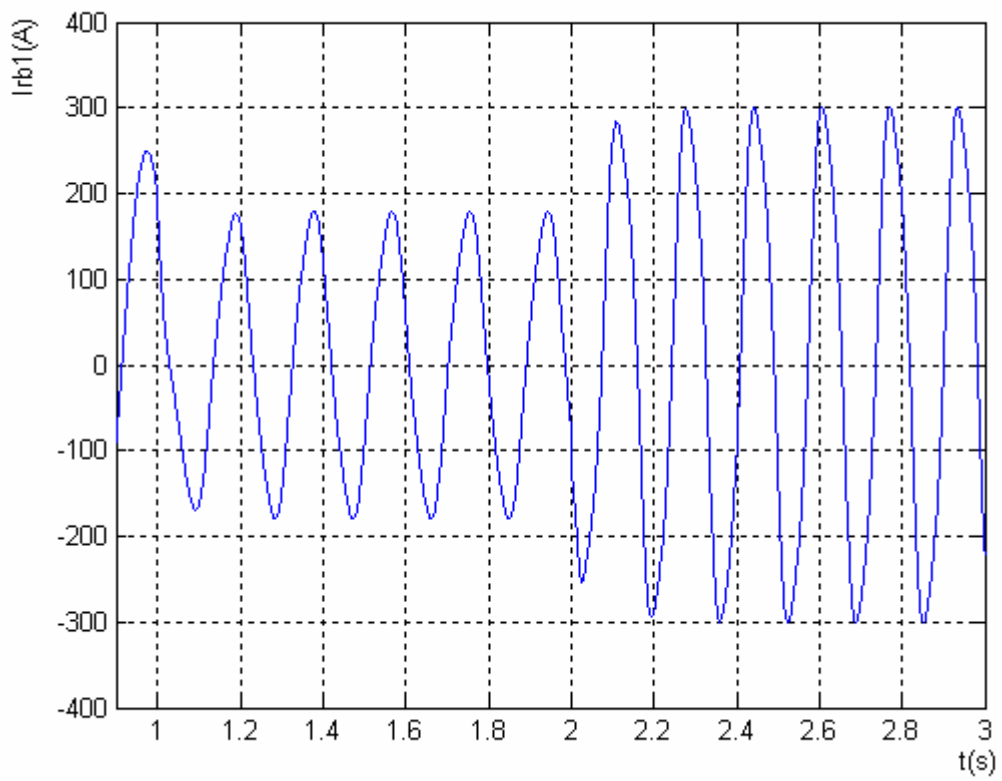
Figure(j) : Courant statorique



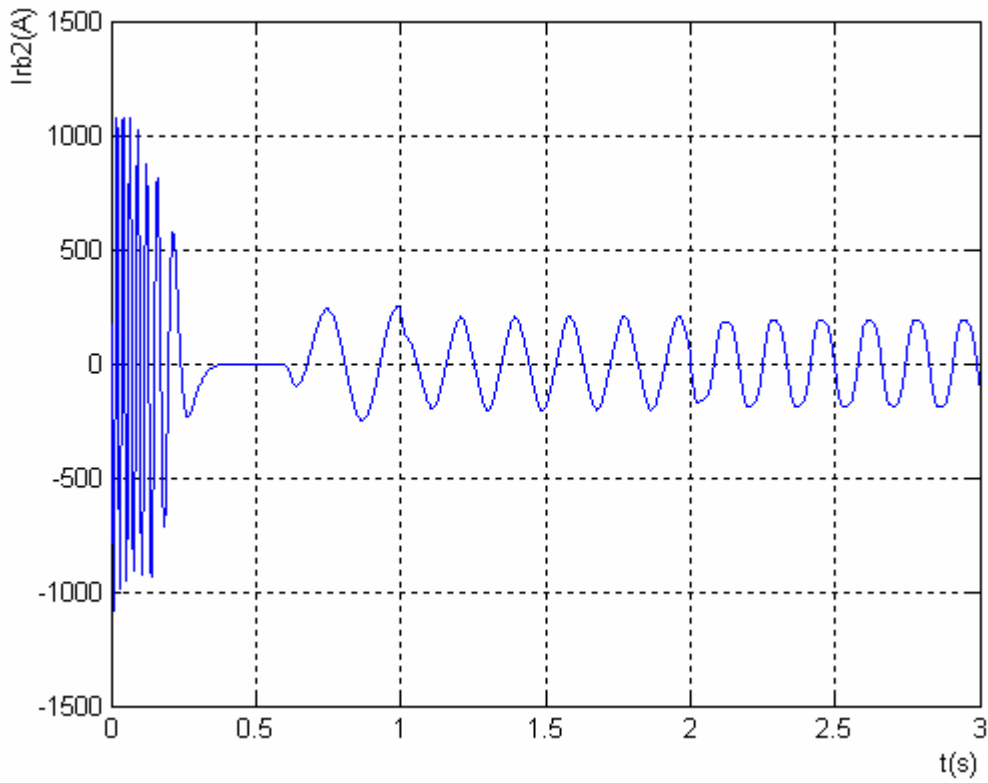
Agrandissement du Courant statorique



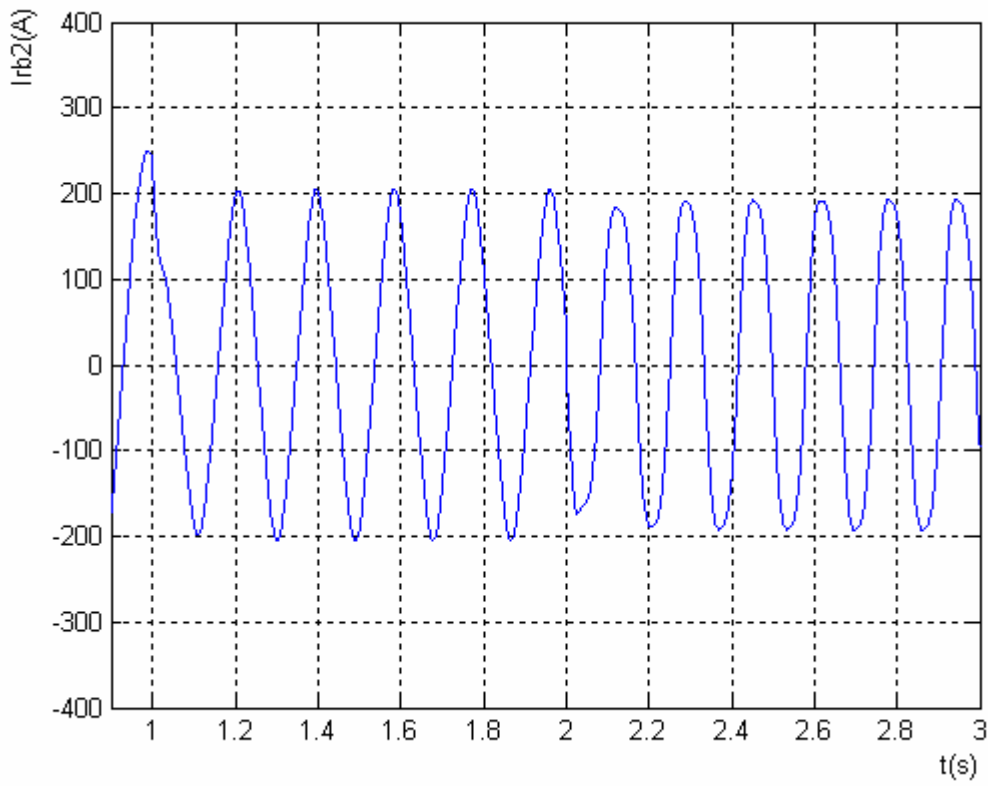
Courant de la barre 1



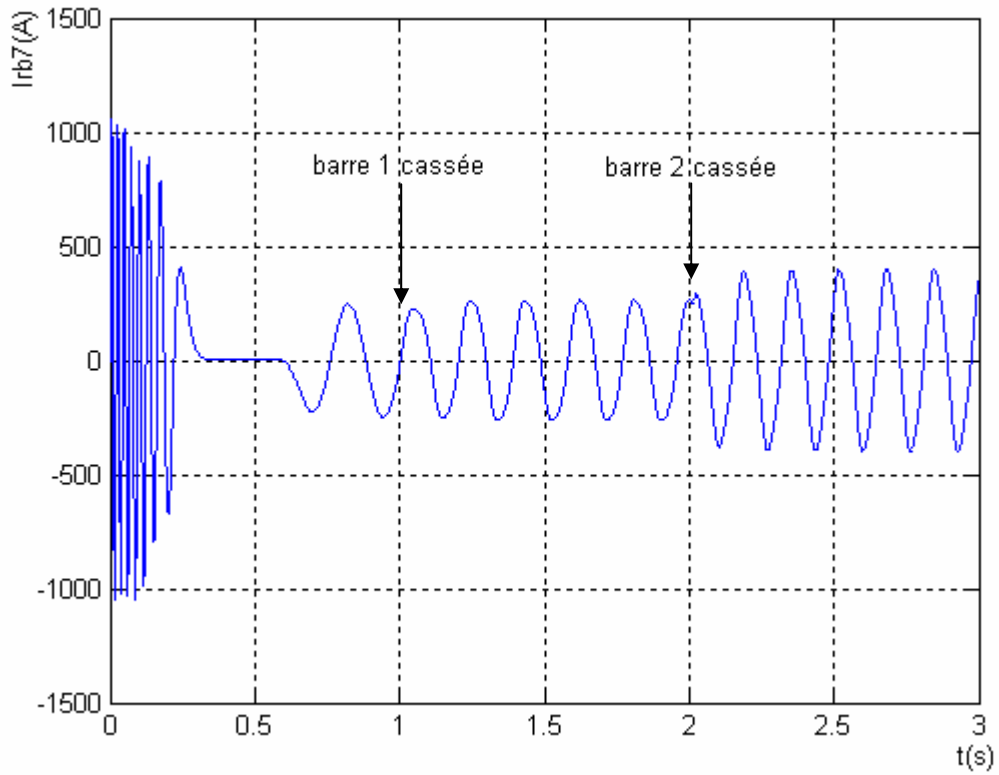
Agrandissement du courant de la barre 1



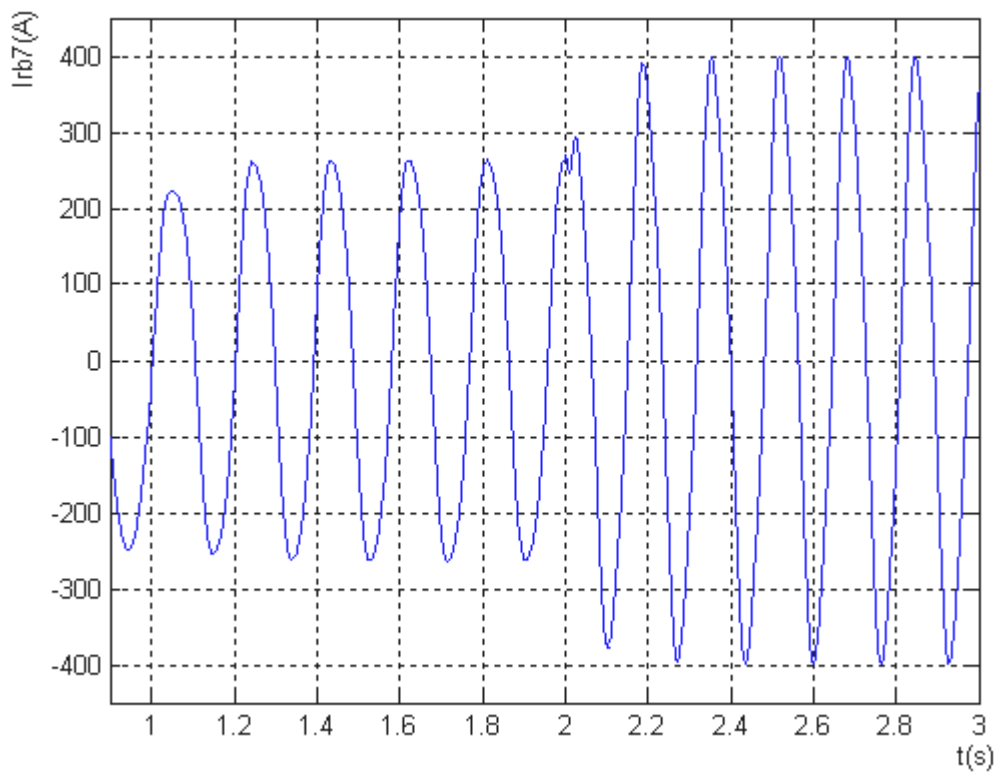
Courant de la barre 2



Agrandissement du Courant de la barre 2



Courant de la barre 7



Agrandissement du Courant de la barre 7

Figure (k) : les courants des barres 1,2 et 7

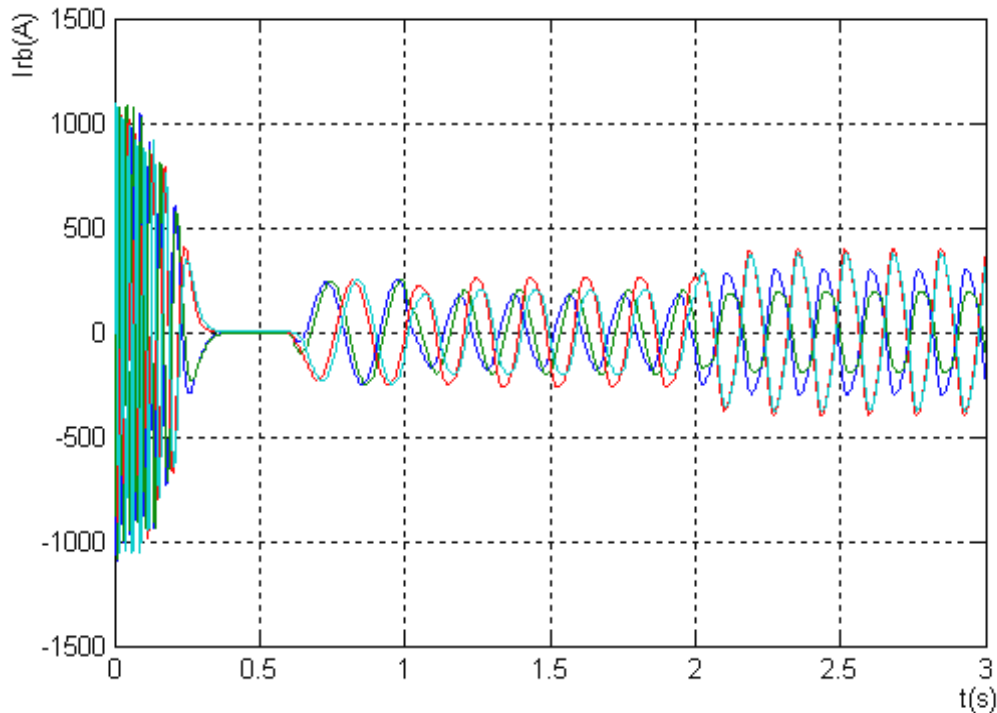


Figure (l) : Courant des barres rotoriques (1, 2, 6 et 7)

FigureIII.3 : Simulation avec modèle réduit : machine en charge $Cr=3.5N.m$

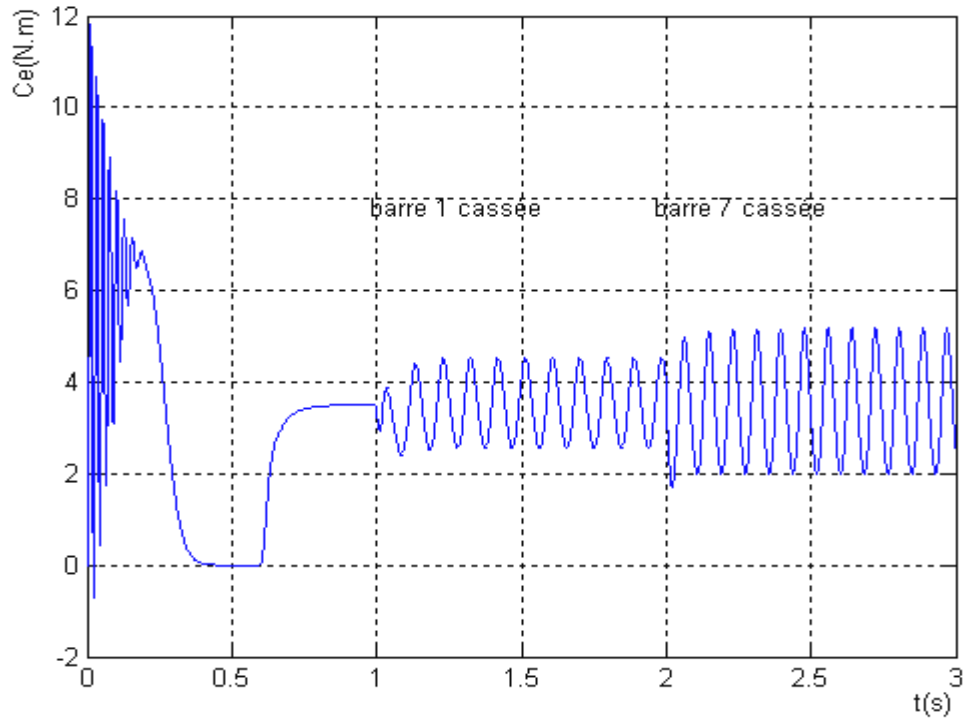
Avec rupture successive des barres (1et2) à partir de $t=1s$

➤ Interprétation des résultats

- On remarque dans la figure du couple électromagnétique (h) une augmentation de l'amplitude des ondulations après la rupture de la barre 1, et des ondulations plus grandes que les premières après la rupture de la barre 2.
- La figure (i) représente l'allure de la vitesse de rotation après la rupture de la barre 1, puis la rupture de la barre 2. On remarque des oscillations après la rupture de la barre 1 et la rupture de la barre 2, par conséquent la valeur moyenne de la vitesse est diminuée.
- La figure (j) permet de vérifier la modulation de l'enveloppe du courant statorique après la rupture d'une barre puis de deux barres (1 et 2). On note également l'augmentation de l'amplitude de modulation quand une deuxième barre est cassée.
- La figure (k) montre l'influence des cassures des barres (1 et 2) sur le courant de la barre 7. On observe l'augmentation de l'amplitude du courant de la barre 7 après la rupture de la barre 1, puis la rupture de la barre 2.
- La figure (l) illustre les courants des barres rotorique 1, 2, 6 et 7. On peut remarquer que la cassure des barres 1 et 2 affecte sur les ondulations des courants des barres 6 et 7, et on constate l'augmentation de l'amplitude de ces derniers.

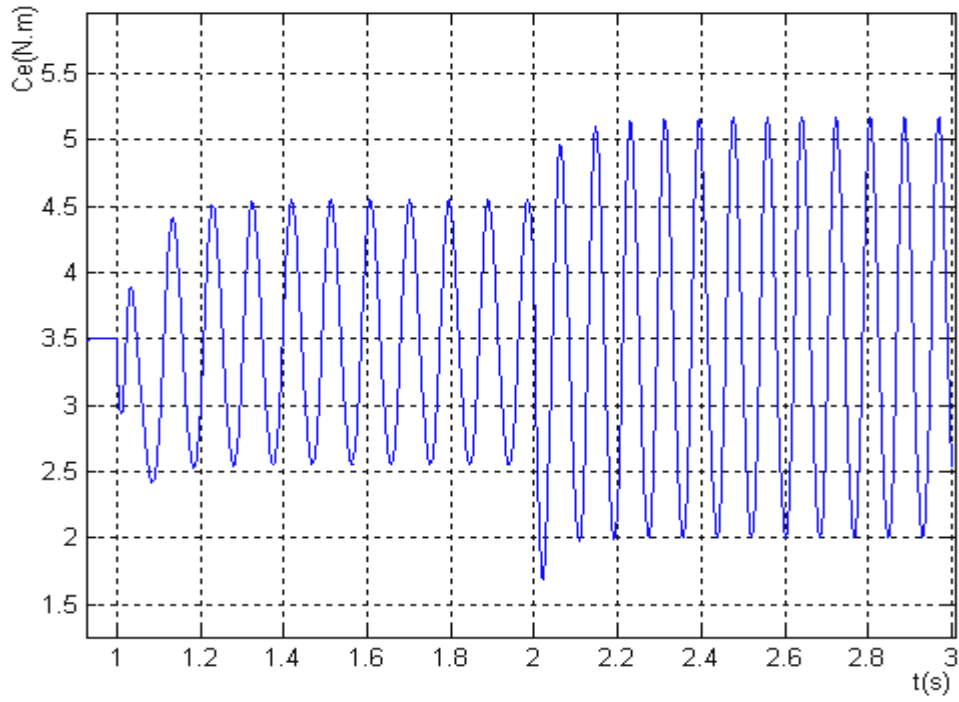
b- Cassure de deux barres espacées

De même manière que la précédente, a partir de $t=1s$ on simule la rupture de la première barre



et à l'instant $t=2s$ on simule la rupture de la septième barre.

Figure (m) : couple électromagnétique



Agrandissement du couple

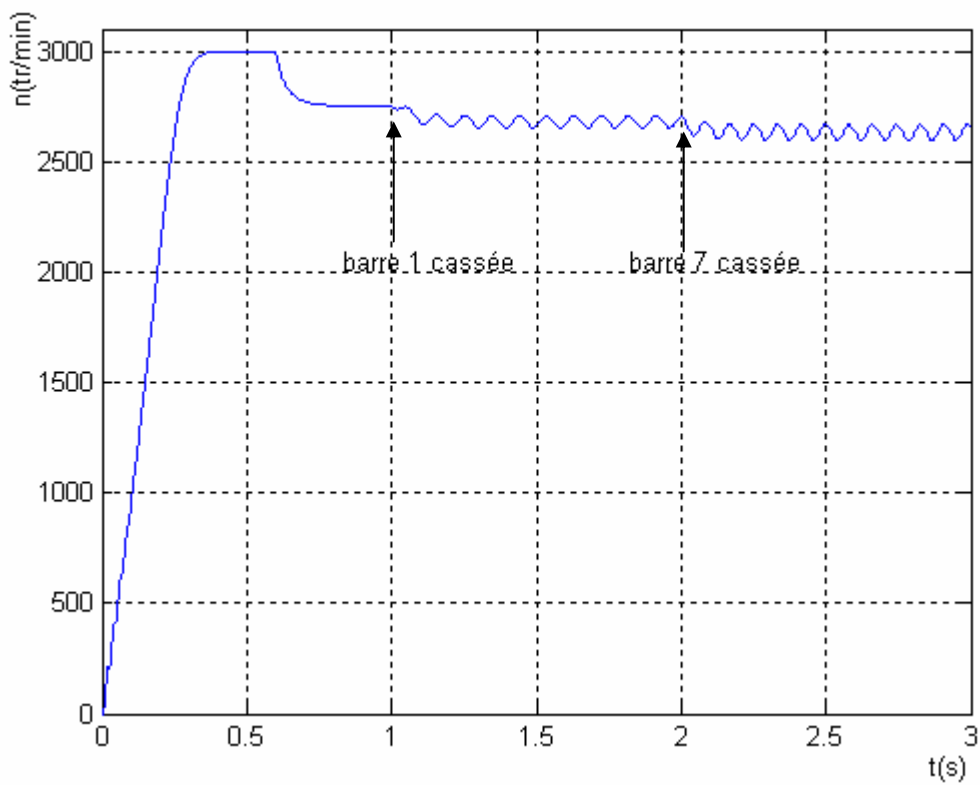
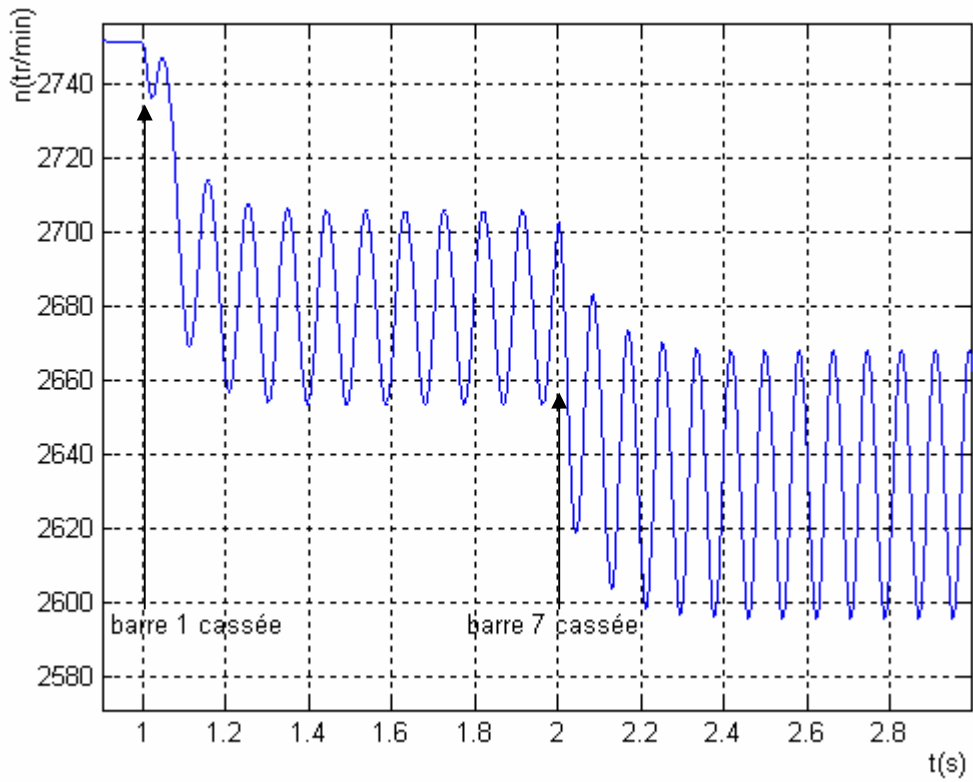


Figure (n) : Vitesse de rotation



Agrandissement de la vitesse

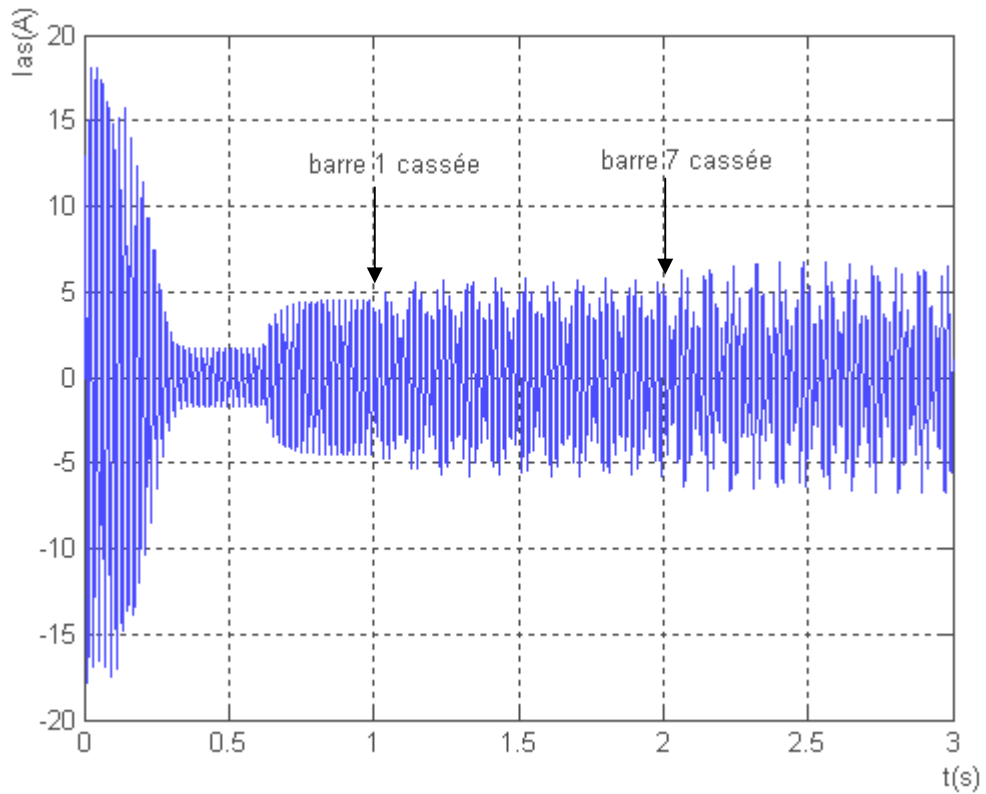
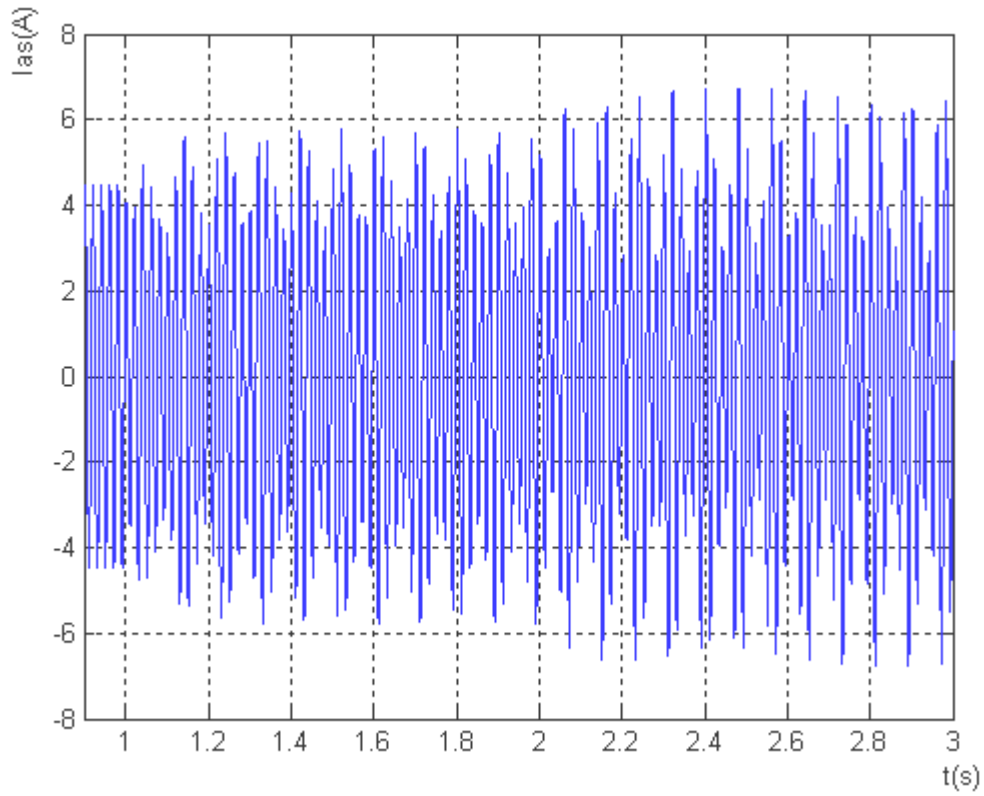
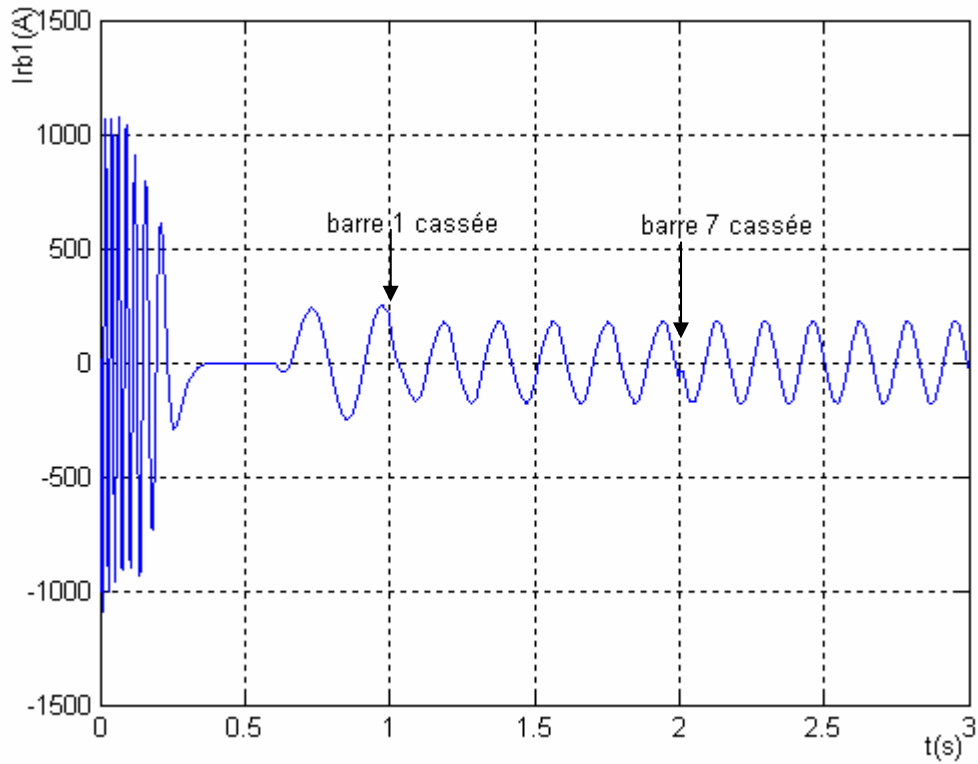


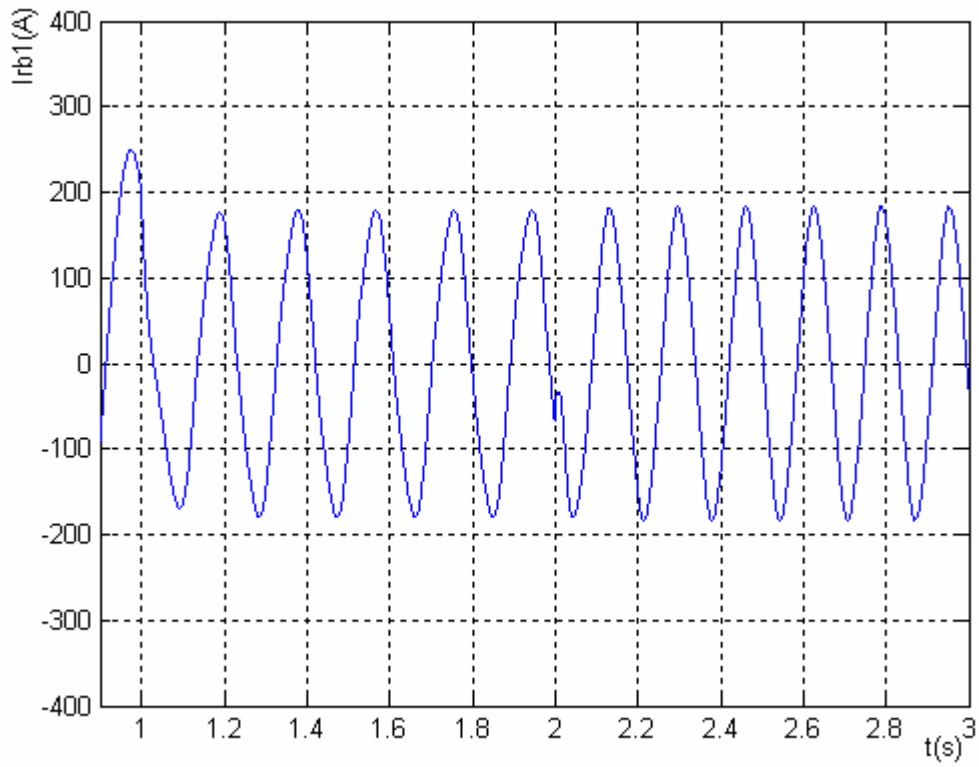
Figure (o) : Courant statorique



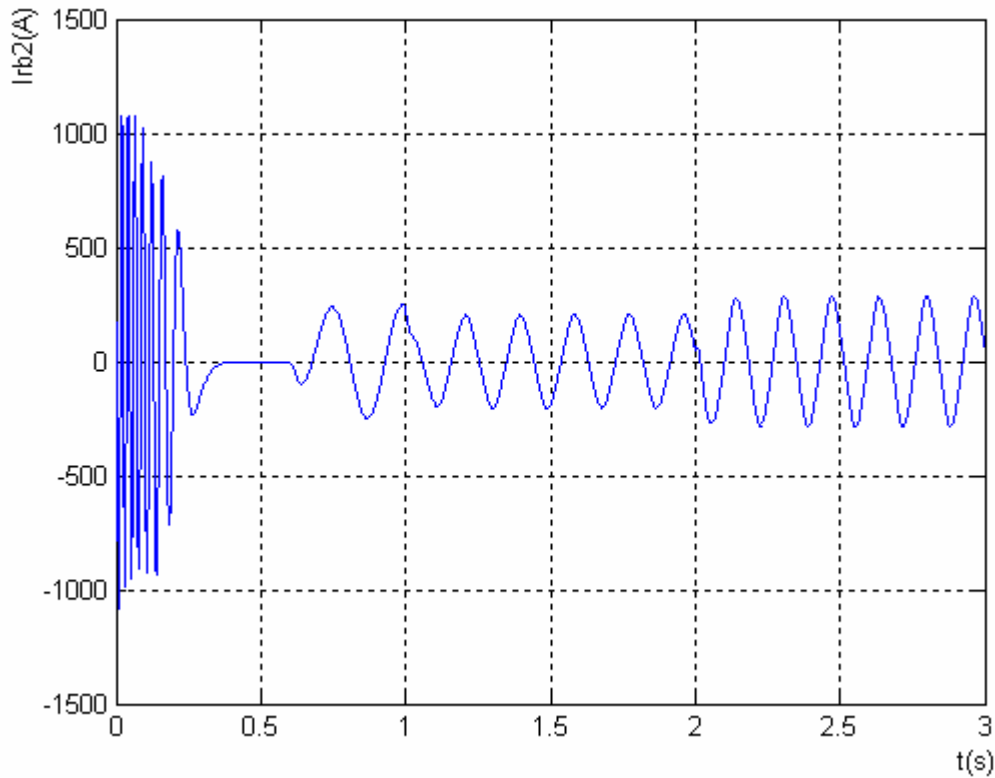
Agrandissement du courant statorique



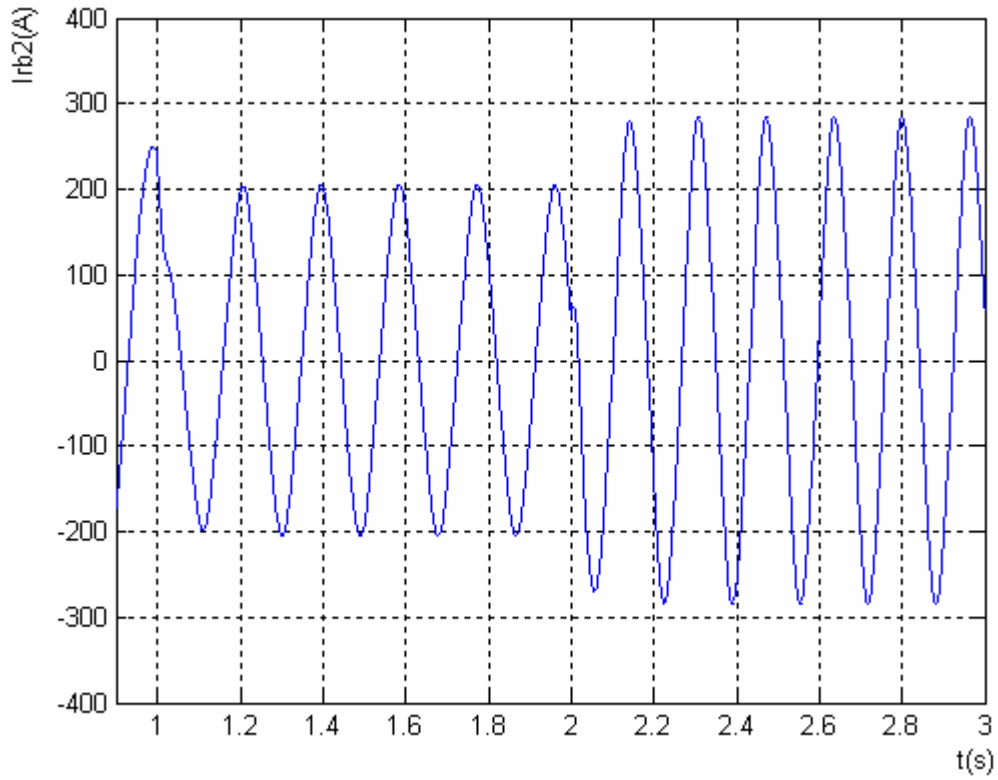
Courant de la barre 1



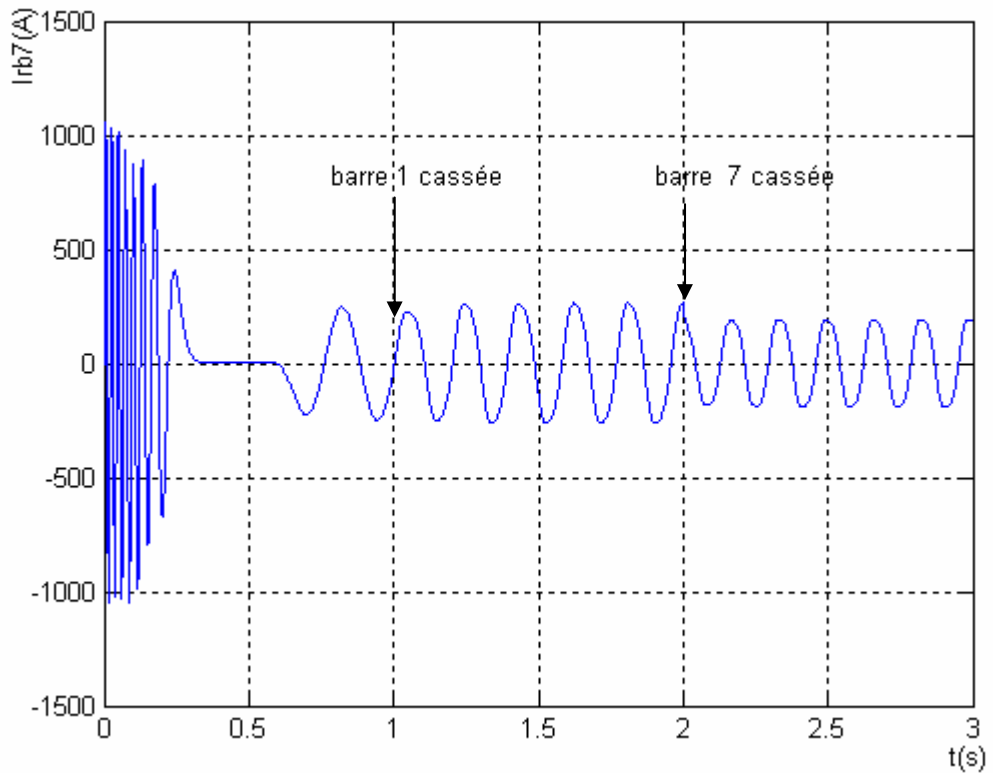
Agrandissement du Courant de la barre 1



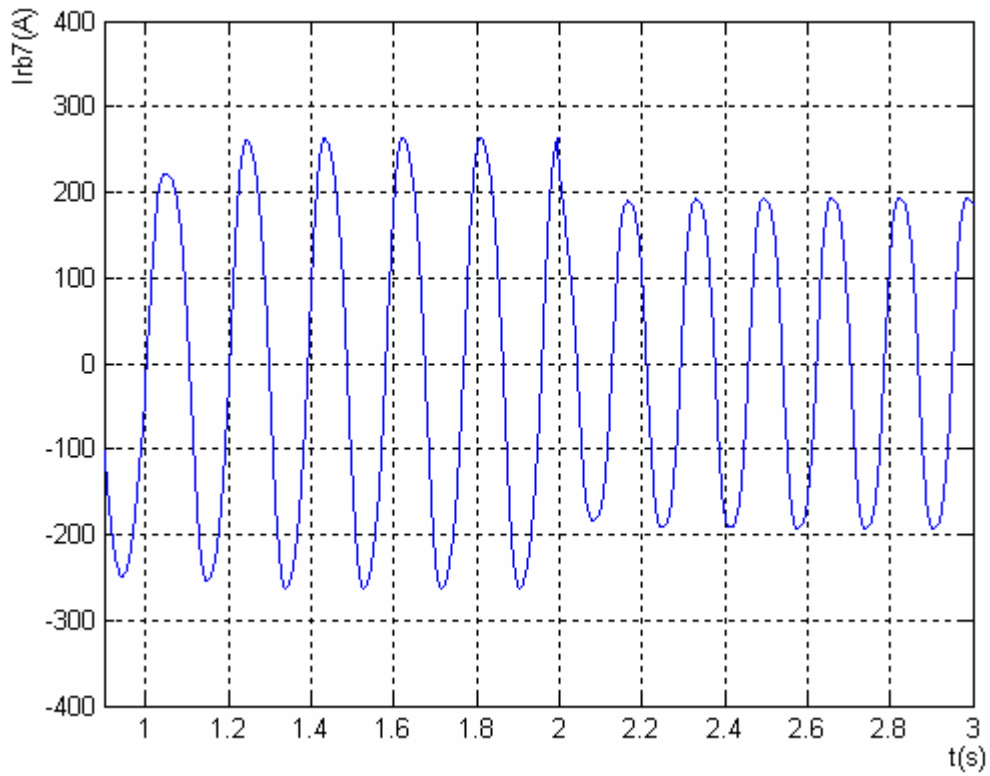
Courant de la barre 2



Agrandissement Courant de la barre 2



Courant de la barre 7



Agrandissement Courant de la barre 7

Figure (p): les courants des barres 1,2 et 7

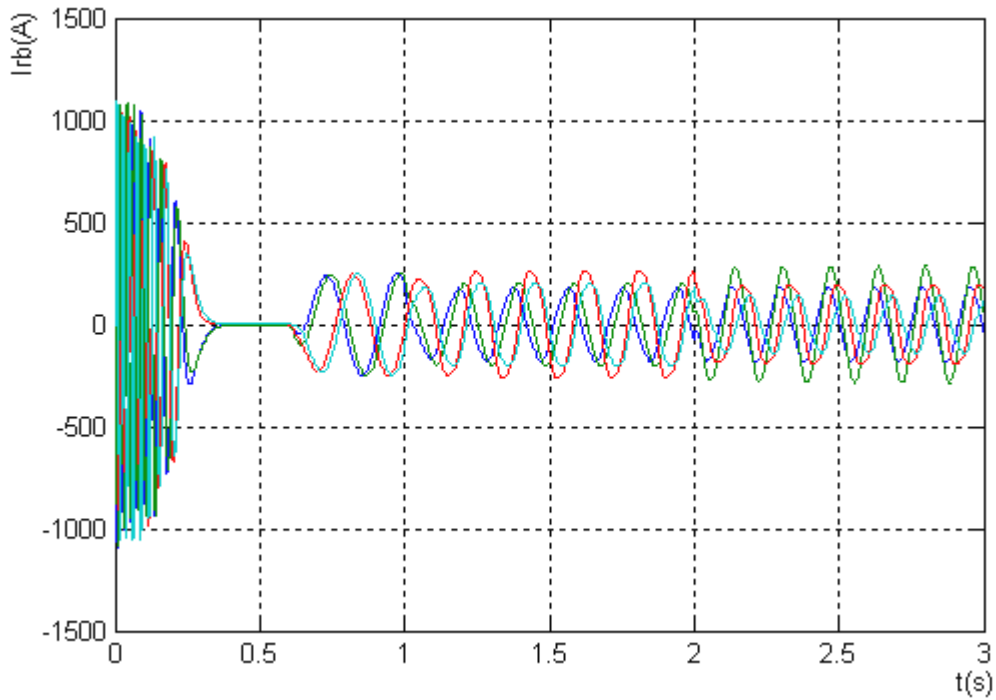


Figure (q) : Courant des barres rotoriques

Figure III.4 : Simulation avec modèle réduit : machine en charge $Cr=3.5N.m$

Avec rupture de deux barres espacées (1et7) à partir de $t=1s$

➤ **Interprétation des résultats**

D'après la figure (III- 4) on constate que :

- Des oscillations apparaissent sur le couple électromécanique et la vitesse de rotation ainsi que d'une modulation d'amplitude sur la courbe du courant statorique, ces oscillations augmentent sensiblement avec le nombre de barres cassées et leurs position (espacées ou adjacentes), la valeur moyenne de la vitesse est diminué fortement, mais le couple maintient sa valeur moyenne.
- L'amplitude des courants des barres cassées diminue à cause de leurs cassures, on voit bien que la cassure des barres rotorique déséquilibre leurs amplitudes des courants.

III.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une simulation d'un moteur asynchrone triphasé à cage, pendant les différentes conditions de fonctionnement. Nous avons trouvé que la rupture d'une barre provoque des oscillations dans le couple et dans la vitesse, ainsi qu'une modulation de l'enveloppe du courant statorique. L'amplitude de ces oscillations augmente avec le nombre de barres cassées. On voit bien que l'amplitude du couple, la vitesse de rotation et le courant statorique dans le cas de cassure de deux barres adjacentes est plus grand par rapport à deux barres espacées. Nous avons remarqué que la durée du régime transitoire augmente avec la sévérité du défaut de barres.

On mesure toutes les difficultés à exploiter directement les résultats pour détecter un défaut, et tout particulièrement quand il s'agit de la première barre cassée, seules les méthodes basées sur l'analyse spectrale des signaux, issus de la machine, offrent une porte de sortie pour le diagnostic de ce type de défaut. Ceci fait l'objet du chapitre suivant.

CHAPITRE IV

ANALYSE SPECTRALE

SOMMAIRE

IV.1 Introduction

IV.2 Techniques d'analyses des défauts

IV.3 Analyse spectrale

➤ ***Méthodes non- paramétrique***

➤ ***Méthodes paramétriques***

IV.4 Analyse cepstrale

***IV.5 Méthodes de détections de fréquence
connues***

***IV.6 Méthodes temps- fréquence et temps –
Echelle***

➤ ***Temps – fréquence***

➤ ***Temps- échelle***

IV.7 Résultat de simulation d'analyse spectrale

IV.8 Analyse de quelques signaux

IV. 9 Analyse spectrale du courant statorique

IV.10 Analyse spectrale des défauts rotoriques

IV.11 Conclusion

IV.1 Introduction

Ce chapitre est consacré à l'étude et l'analyse spectrale, différentes méthodes sont présentées, dans le but de retirer des informations qui sont contenues dans le signal d'origine. L'interprétation directe des résultats temporels est difficile, pour cela on passe à l'analyse fréquentielle.

IV.2 Techniques d'analyses des défauts

Pour effectuer le diagnostic dans une installation, les opérateurs de maintenance analyse un certain nombre de paramètres, tel que la température, le bruit, les vibrations...

En s'appuyant sur leur expérience, ces symptômes ne sont que la manifestation flagrante d'une modification des caractéristiques temporelles et fréquentielles d'un certain nombre de grandeurs mesurables.

L'analyse spectrale du signal, est utilisée depuis de nombreuses années pour détecter des défaillances dans les machines électriques, en particulier les ruptures de barres au rotor, la dégradation des roulements, les excentricités, les court circuits dans les bobinages. Les méthodes d'analyse spectrale sont principalement utilisées dans les machines directement alimentées par le réseau et fonctionnant en régime permanent [1] [13].

Toutes les méthodes de traitement de signal disponibles pour le diagnostic des machines tournantes peuvent être classées dans quatre groupes différents : l'analyse spectrale, l'analyse cepstrale, l'analyse temporelle, l'analyse temps -fréquence ou temps- échelle. Dans ce qui suit, on présente quelques méthodes qui sont utilisées dans le diagnostic des ruptures de barres.

IV.3 Analyse spectrale

L'analyse spectrale est certainement la méthode la plus naturelle pour le diagnostic des barres cassées. En règle générale, la seule grandeur intéressante accessible au stator est le courant et l'intérêt de son analyse spectrale est de pouvoir détecter et identifier l'élément défectueux en fonction de sa fréquence [13].

Pour obtenir le spectre en fréquence, il existe plusieurs méthodes. On distingue principalement deux approches :

- les méthodes non -paramétriques,
- les méthodes paramétriques,

► Méthodes non- paramétriques

Pour ces méthodes, on trouve tous les estimateurs à base d'analyse de Fourier.

Les spectres basés sur l'utilisation de la transformation de Fourier sont obtenus :

- Soit par le calcul direct sur des segments d'échantillons temporels, puis au moyen de la transformée de Fourier, des segments pondérés par une fenêtre d'apodisation.
- Soit par le calcul du spectre sur la fonction d'auto corrélation [1].

► Méthodes paramétriques

Les méthodes d'analyse fréquentielles paramétriques sont basées sur la détermination d'un modèle représentant le signal à analyser et pour lequel les paramètres sont utilisés pour estimer le spectre de puissance. L'estimation du spectre nécessite trois étapes. La première consiste à sélectionner un type de modèle. Ensuite, on estime les paramètres du modèle retenu en utilisant les échantillons du signal. La dernière étape enfin, concerne l'estimation spectrale à partir des paramètres du modèle estimé [1].

IV.4 Analyse cepstrale

Cette méthode est utilisée en analyse vibratoire et dans le cas du diagnostic de réducteurs. Il a été prouvé qu'en calculant le cepstre, on identifie clairement la présence des raies.

IV.5 Méthodes de détections de fréquence connues

Ces méthodes reposent sur le principe que les défauts se caractérisent par l'apparition ou le renforcement d'une raie à une fréquence fixe ou proportionnelle à la vitesse de rotation de la machine.

IV.6 Méthodes temps- fréquence et temps -échelle

► Temps - fréquence

Les méthodes d'analyse temps – fréquence ont été développées pour l'étude des signaux non stationnaires. Plus généralement, elles s'appliquent à des signaux dont le contenu fréquentiel ou les propriétés statistiques évoluent au cours du temps. Pour décrire cette évolution temporelle, il faut réaliser une analyse spectrale évolutive, d'où les méthodes temps fréquence. Parmi les techniques de l'analyse temps fréquence, la transformation de Wigner –Ville permet des diagnostics précis. Cette transformation est une fonction réelle qui définit une distribution d'énergie dans le plan temps- fréquence. Elle peut être interprétée comme une densité spectrale instantanée [12] [1].

Cependant, cette analogie est tempérée par l'existence de valeurs négatives qui en rendent l'interprétation délicate. Des procédures de lissage (fréquentiel et temporel) par fenêtrage permettent de réduire les interférences entre les différentes composantes fréquentielles du signal. La représentation temps fréquence a permis ainsi de mettre en évidence la modulation de fréquence linéaire en fonction du temps. Le temps de calcul d'une représentation temps-fréquence peut être prohibitif. De plus l'inter-présentation d'une image est souvent difficile [8].

► Temps- échelle

Ce mode de représentation est utilisé pour détecter des phénomènes qui se déroulent sur des échelles de fréquence différentes rencontrés dans un signal. La transformation en ondelette a été formalisée par Grossman et Morle.

IV.7 Résultat de simulation d'analyse spectrale

Nous présenterons dans ce chapitre, l'analyse spectrale du courant statorique, du couple et de la vitesse en utilisant la transformé de Fourier rapide (FFT). Nous montrerons comment cette méthode permet de déterminer le contenu fréquentiel du courant statorique, du couple et de la vitesse de rotation, et donc de retrouver les raies associées aux défauts de barres ou d'anneaux. Nous montrerons aussi, l'influence de barres adjacentes (1 et 2) et espacées (1 et 7).

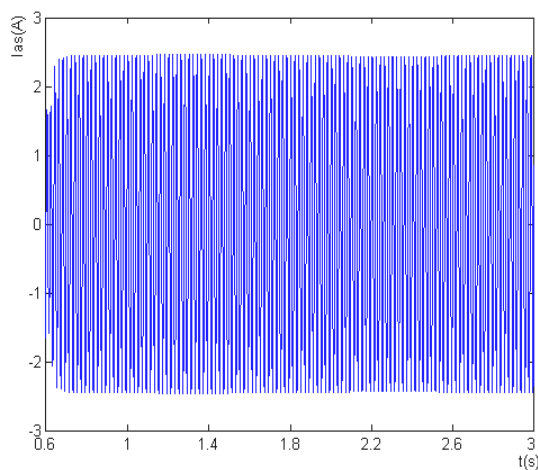


Figure IV.1 : Courant statorique
état sain

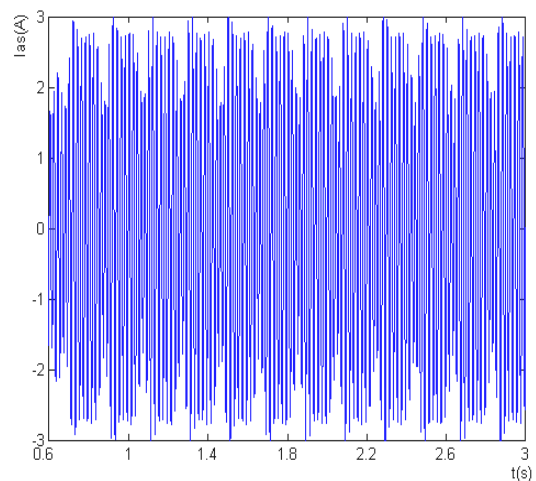


Figure IV.2 : Courant statorique
avec une barre cassée

D'après les figures (IV.1) et (IV.2) on constate qu'il est difficile d'analyser directement le courant statorique. Car, il est clair que l'ordre des grandeurs de la modulation est relativement faible. Seule la représentation fréquentielle du signal du courant statorique, donne des renseignements précieux sur sa composition.

L'analyse par FFT permet de mettre en évidence les raies présentes dans le spectre du signal. Nous présentons les résultats de simulation de l'analyse du courant statorique par FFT en régime permanent en charge.

IV.8 Analyse de quelques signaux

Lorsqu'une machine passe vers un nouveau mode de fonctionnement (anomalies), la détection précoce de l'évolution vers ce mode non désiré permet d'anticiper le diagnostic et d'éviter les risques à partir l'analyse spectrale des signaux, l'objectif de cette partie consiste à choisir le meilleur signal pour se traiter entre les signaux de couple, vitesse et le courant statorique :

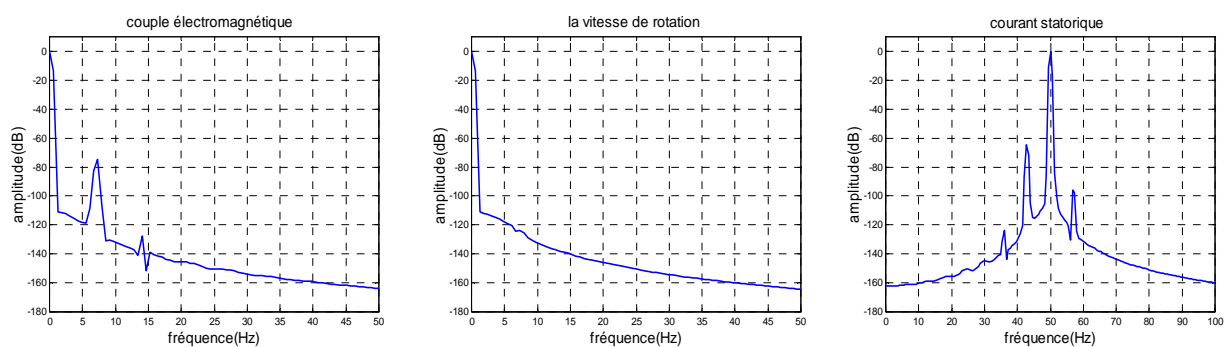


Figure IV.3 : Spectres du couple et vitesse et courant statorique

La visualisation des raies dans le courant statorique permet d'expliquer le défaut en évidence et d'obtenir plus d'information sur le défaut Figure IV.3.

IV. 9 Analyse spectrale du courant statorique

Comme nous avons vu précédemment, il existe de nombreux types de fenêtres qui privilégient des aspects particuliers par rapport aux autres. Il convient donc de choisir la fenêtre adéquate pour le signal en fonction du problème particulier que l'on doit résoudre.

Cette caractéristique porte essentiellement sur quatre points :

- la largeur et la hauteur du lobe principale,
- la hauteur du premier lobe secondaire,
- l'atténuation des lobes secondaires,

Il faudra donc rechercher la meilleure fenêtre qui sera utilisé dans l'analyse d'une seule cassure de barre rotorique.

IV.10 Analyse spectrale des défauts rotoriques

- Différents types de fenêtres

Pour chercher la meilleure fenêtre, on considère le cas d'une seule cassure de barre rotorique pour les différentes fenêtres de l'analyse spectrale Figure IV.4.

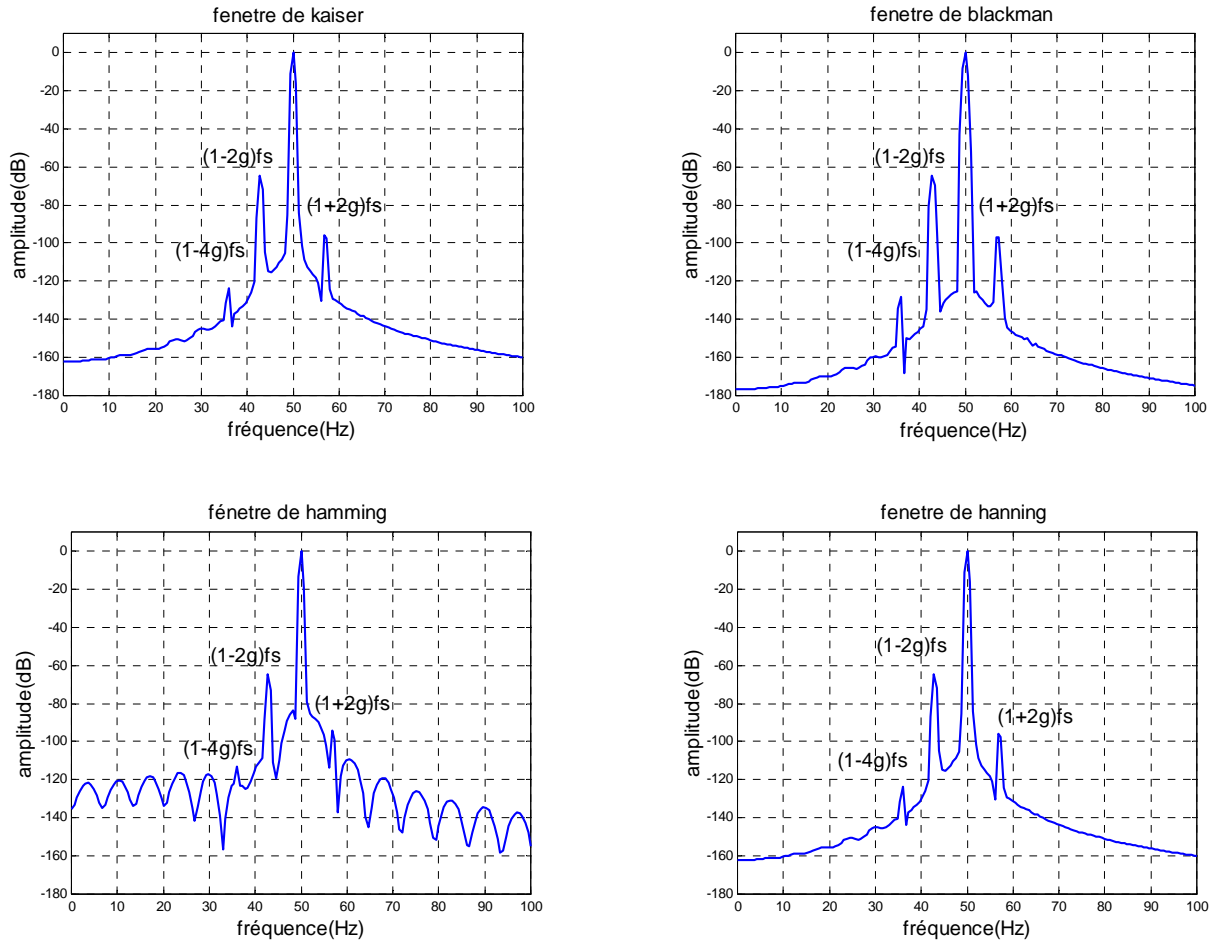


Figure IV.4 : Les déférentes fenêtre de FFT pour une seule cassure dans la barre (2)

Le tableau suivant explique la différence entre les fenêtres consid er es :

f(Hz)/A(dB)	kaiser	blackman	hanning	hamming
f ₁ (Hz) / A ₁ (dB)	56.6 / -96.1	56.9 / -97.2	56.6 / -96.6	56.9 / -95.0
f ₂ (Hz) / A ₂ (dB)	42.6 / -65.5	42.1 / -64.4	42.8 / -65.0	42.6 / -65.5
f ₃ (Hz) / A ₃ (dB)	/	/	/	/
f ₄ (Hz) / A ₄ (dB)	35.7 / -123.3	35.7 / -127.7	36.1 / -124.4	36.1 / -111.6

et la solution analytique donne : f₁ = 57.8848 (Hz), et f₂ = 42.1152 (Hz),

avec : f_{1,2} = (1 ± 2kg)f_s, et A_{1,2} leurs amplitudes

f_{3,4} = (1 ± 4kg)f_s, et A_{3,4} leurs amplitudes

On remarque une petite différence entre la fenêtre de Hanning et celle de Blackman est l'épaisseur des raies obtenues, elles sont plus importantes avec le fenêtrage de type Hanning. Par conséquent, nous apercevons bien que le fenêtrage de type Hanning est le plus adéquat pour faire ressortir les raies du spectre qui nous permettent de détecter le défaut rotorique. Nous effectuons donc une analyse spectrale du courant d'une phase statorique avec un fenêtrage de type Hanning. Le résultat de cette analyse pour un rotor sain est donné par la Figure IV.3. Seule la raie due au fondamental apparaît sur le spectre du courant statorique, ce qui est tout à fait normal étant donné que le moteur asynchrone comme son modèle ne présente aucun défaut et que le fondamental de la force magnétomotrice est considéré sinusoïdale le long de l'entrefer.

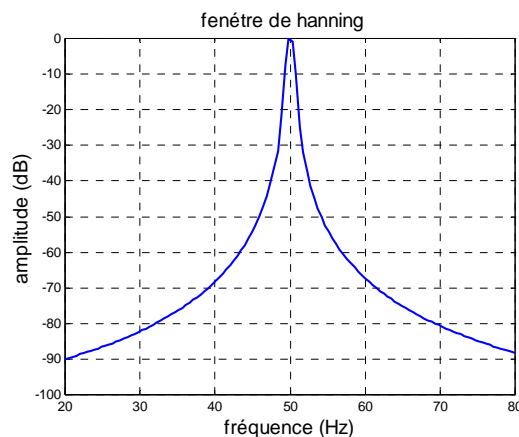


Figure IV.5 : Fenêtre de hamming de l'analyse spectral pour un moteur sain

Lors de la simulation du moteur sain, on n'observe aucune raie latérale Figure IV.5.

Nous allons maintenant effectuer l'analyse du courant statorique en présence d'un défaut rotorique qui se traduit par une élévation de la résistance d'une barre de +10 fois. Le spectre du courant est donné par la Figure IV.6. Nous observons l'apparition de raies autour du fondamental. Ces raies sont le résultat du défaut créé au rotor, mais ils ne sont pas clairs.

Pour mettre plus en évidence ce phénomène, nous avons provoqué un défaut sur l'enroulement rotorique d'une valeur de +100 fois. L'analyse spectrale du courant statorique dans ce cas à la Figure IV.5. Et pour montrer la différence entre les deux dernières Figures, on a ce titre.

• **Effet de sévérité de la fissure sur le spectre de courant statorique**

Pour remarquer l'effet de sévérité d'une fissure, on effectue une cassure de trois barres pour les deux choix de résistance de barre cassée +10 fois et +100 fois.

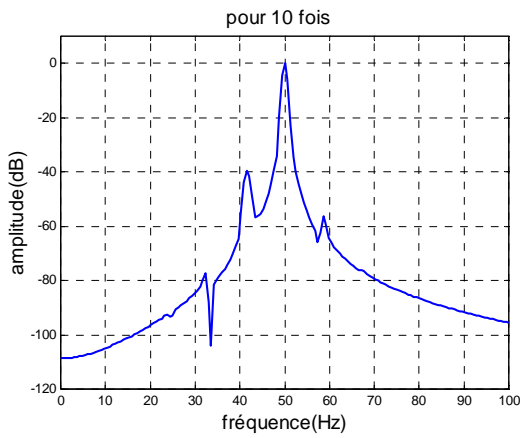


Figure IV.6 : L'augmentation de la résistance de barre cassée est 10 fois

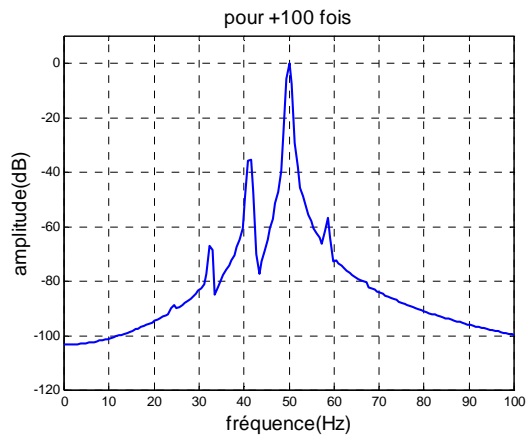


Figure IV.7 : L'augmentation de la résistance de barre cassée est 100 fois

On remarque que la valeur de résistance de la barre cassée introduit une variation dans le spectre du courant statorique surtout les deux raies secondaires Figure IV.6 et IV.7, pour ça on va utiliser le choix de +100 fois.

• **Effet de nombre et de la position des barres cassées**

Dans cette partie on considère des défauts, mais pour différentes barres cassées tenant compte le nombre et la position de cassure.

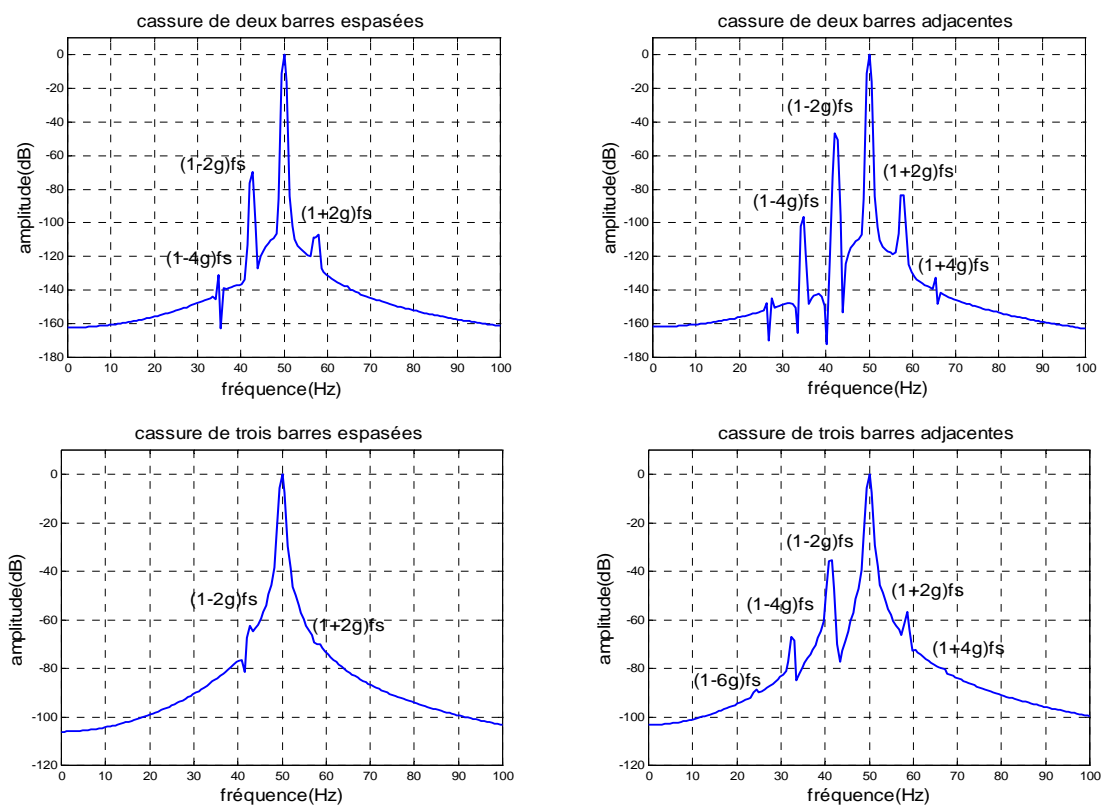


Figure IV.8 : Fenêtre de hanning pour différentes cassures de barre

A l'aide du modèle de simulation, on peut mettre en évidence les phénomènes liés aux défauts du rotor par l'apparition de raies sur le spectre du courant statorique en régime permanent Figure IV.8, ces raies ont une amplitude qui croit en fonction de l'augmentation de nombre de barres défectueuses et leurs positions, on utilise le tableau suivant pour comparais les différentes cassures tel que:

Cassure de	seule Barre	Deux barres espacés	trois barres espacés	Deux barres adjacents	trois barres adjacents
f_1 / A_1	56.9 / -97.2	42.3 / -70.5	58.7 / -69.8	57.6 / -84.4	58.5 / -56.9
f_2 / A_2	42.3 / -66.1	57.6 / -107.2	42.1 / -62.2	41.9 / -47.7	41.2 / -35.2
f_3 / A_3	/	64.5 / -138.3	/	65.4 / -132.7	66.5 / -79.7
f_4 / A_4	42.3 / -66.1	34.7 / -130.5	40.0 / -75.9	34.7 / -97.7	32.2 / -67.1

Ce tableau met en évidence l'influence du nombre de barres cassées et leurs mutuelles position sur le spectre de courant statorique, pour les valeurs de fréquence de $f_{1,2}$ est presque le même pour les différents types de cassures, mais pour les fréquences $f_{3,4}$ il y a un petit différence ou l'absence de cette fréquence à cause de l'absence de cet raies. La remarque essentielle est la variation de l'amplitude de raies, cela qui leur augmentation proportionné au nombre de barres cassées et l'intervalle entre barres

• **Influence de la charge sur le spectre de courant statorique**

Pour montre l'effet de la charge (glissement) sur le spectre de courant statorique, on réalise une cassure du trois barres adjacents avec les glissements successives suivantes(2%, 4%, 6.66%) :

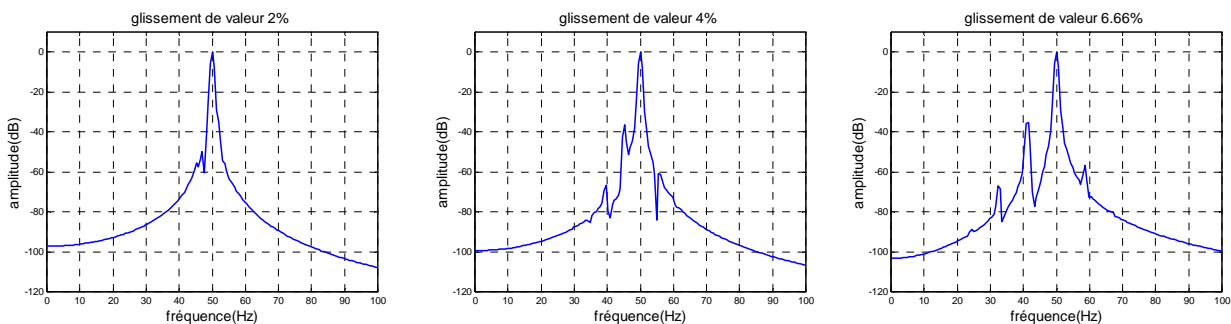


Figure IV.9 : Le spectre de courant statorique pour les glissements (2%, 4%, 6.66%)

On remarque que pour des glissements faibles, l'espacement entre les raies spectrales devient très faible et l'analyse des signaux est alors plus délicate. L'intervalle entre ces raies devient plus large, lorsque la machine est bien chargée. La variation du glissement sur l'intervalle d'étude occasionne donc la non stationnarité des raies du courant statorique Figure IV.9. On peut

constater que le glissement est un paramètre extrêmement important à prendre en considération dans la formulation du diagnostic.

IV. 11 Conclusion

L'analyse spectrale du courant statorique utilisant la transformée de Fourier rapide, nous a permis de déterminer la composition fréquentielle de ce signal et donc de retrouver les raies associées au défaut de barres. Nous avons montré que le bon choix de la résolution fréquentielle, permet de séparer les composantes les plus proches du fondamental. Les résultats de la simulation nous ont permis de conclure :

- Les amplitudes des harmoniques $(1 \pm 2g)f_s$ associées au défaut, augmentent avec le nombre de barres cassées.
- Les amplitudes des harmoniques $(1 \pm 2g)f_s$ dépendent aussi de la position mutuelle de barres cassées.

La charge est un paramètre important à prendre en considération. En effet, le diagnostic des défauts devient plus délicat lorsque la charge est proche de zéro.

CONCLUSION GENERALE

Le travail présenté dans ce mémoire s'inscrit dans le cadre du diagnostic des défauts dans les machines asynchrones multi-enroulements. Nous avons focalisé l'étude sur les moteurs à cage pour deux raisons, la première est parce que les moteurs asynchrone à cage sont les plus répandus dans le monde industriel, tandis que la deuxième réside dans le fait que d'un point de vue structure multi enroulements.

Au début de ce travail, nous avons rappelé les différents défauts qui peuvent affectés le bon fonctionnement de la machine asynchrone multi-enroulement à cage, ainsi que leurs causes. Les méthodes du diagnostic et les approches utilisées pour la modélisation sont aussi représentés. Nous avons développé un modèle (d, q) pour l'étude de la machine asynchrone, il permet de simuler le comportement de la machine lors des défaillances de barres rotoriques.

Afin de représenter le comportement de la machine, lors d'un fonctionnement normal (état sain et avec défaut) nous avons développé un modèle mathématique multi- enroulement pour la cage rotorique.

Ce modèle, conduit à un gain notable en termes de temps de calcul tout en introduisant l'apparition d'un défaut par un changement significatif des résistances de la sous matrice liée au rotor.

Ensuite, nous avons abordé l'aspect lié à la simulation à l'aide du MATLAB 6.5, SIMULINK. Ceci nous a permis de visualiser les performances de la machine, en considérant les différentes conditions de fonctionnement de la machine (état sain, et avec défaut).

Nous avons fait la simulation des performances de la machine (le couple, la vitesse de rotation, le courant statorique...) à l'état sain puis avec défaut de deux barres cassées (adjacentes et espacées).

A la fin de ce travail on a fait état d'une méthode permettant la surveillance d'une machine asynchrone multi-enroulement lorsqu'un défaut apparaît. Pour cette surveillance nous avons développés un modèle de la machine qui permet d'étudier les phénomènes répercutés sur les performances de la machine. L'analyse spectrale ayant recours à la procédure de la transformée de Fourier rapide (FFT), l'analyse spectrale de ces performances a permis de détecter et de quantifier la valeur des défaut survenue sur la partie rotorique de la machine.

Comme perspective, utilise le modèle réduit pour la commande vectorielle (PI, MG...), utilise la transformation de synchronisme pour analyser le courant statorique.

Bibliographie

Annexe

Paramètre du moteur utilisé

P	puissance nominale	1.1Kw
V	tension nominale de ligne	220 v
<i>f_s</i>	fréquence d'alimentation	50Hz
<i>p</i>	nombre de paire de pôle	1
R	diamètre moyen	35.76mm
L	la longueur	65mm
<i>e</i>	épaisseur d'entrefer	0.2mm
<i>N_r</i>	nombre de barres	16
<i>N_s</i>	nombre de spire par phase	160
<i>R_s</i>	résistance d'une phase statorique	7.58Ω
<i>R_r</i>	résistance d'une barre rotorique	150μΩ
<i>R_e</i>	résistance d'une portion d'anneau	150μΩ
<i>L_e</i>	inductance de fuite d'anneau de court-circuit	0.1μH
<i>L_b</i>	inductance de fuite d'une barre rotorique	0.1μH
<i>L_{fs}</i>	inductance de fuite statorique	26.5mH
<i>K₀</i>	coefficient de frottement	0
J	moment d'inertie	5.4 10 ⁻³ Kgm ²

- La matrice $[R_{rr}]$ est donnée par :

$$\begin{bmatrix} R_s & -\omega L_{sc} & \vdots & \dots & \dots & \dots & \omega M_{sr} \sin ka & \dots & \dots & \dots & \vdots & 0 \\ \omega L_{sc} & R_s & \vdots & \dots & \dots & \dots & -\omega M_{sr} \cos ka & \dots & \dots & \dots & \vdots & 0 \\ \dots & \dots & \vdots & \dots & \dots & \dots & \vdots & \dots & \dots & \dots & \vdots & \dots \\ 0 & 0 & \vdots & R_{b0} + R_{b(N_r-1)} + 2\frac{R_\ell}{N_r} & -R_{b0} & \ddots & 0 & \ddots & \ddots & -R_{b(N_r-1)} & \vdots & \frac{R_\ell}{N_r} \\ \dots & \dots & \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots & \dots \\ \dots & \dots & \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots & \dots \\ 0 & 0 & \vdots & 0 & \ddots & -R_{b(k-1)} & R_{bk} + R_{b(k-1)} + 2\frac{R_\ell}{N_r} - R_{bk} & \ddots & \ddots & 0 & \vdots & \dots \\ \dots & \dots & \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots & \dots \\ \dots & \dots & \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots & \dots \\ 0 & 0 & \vdots & -R_{b(N_r-1)} & \ddots & 0 & \ddots & \ddots & -R_{b(N_r-2)} & R_{b(N_r-1)} + R_{b(N_r-2)} + 2\frac{R_\ell}{N_r} & \vdots & \frac{R_\ell}{N_r} \\ \dots & \dots & \vdots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \vdots & \dots \\ 0 & 0 & \vdots & \frac{R_\ell}{N_r} & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \frac{R_\ell}{N_r} & \vdots & R_\ell \end{bmatrix}$$

- La matrice $[L_{rr}]$ est donnée par :

$$\begin{bmatrix} L_{sc} & 0 & \vdots & \dots & \dots & \dots & -M_{sr} \cos ka & \dots & \dots & \dots & \vdots & 0 \\ 0 & L_{sc} & \vdots & \dots & \dots & \dots & M_{sr} \sin ka & \dots & \dots & \dots & \vdots & 0 \\ \dots & \dots & \vdots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \vdots & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & L_{rp} + 2L_p + 2\frac{L_\ell}{N_r} & M_{rr} - L_b & \ddots & \ddots & M_{rr} & \ddots & M_{rr} - L_b & \vdots & \frac{L_\ell}{N_r} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots & \dots \\ -\frac{3}{2}M_{sr} \cos ka & -\frac{3}{2}M_{sr} \sin ka & \vdots & M_{rr} - L_b & \ddots & M_{rr} - L_b & L_{rp} + 2L_p + 2\frac{L_\ell}{N_r} & M_{rr} - L_b & M_{rr} & \ddots & \vdots & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & M_{rr} - L_b & \ddots & M_{rr} & \ddots & \ddots & M_{rr} - L_b & L_{rp} + 2L_p + 2\frac{L_\ell}{N_r} & \vdots & \frac{L_\ell}{N_r} \\ \dots & \dots & \vdots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \vdots & \dots \\ 0 & 0 & \vdots & \frac{L_\ell}{N_r} & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \frac{L_\ell}{N_r} & \vdots & L_\ell \end{bmatrix}$$

Bibliographie

BIBLIOGRAPHIE

- [1] **S. Belhamdi.** "Prise en compte d'un défaut rotorique dans la commande d'un moteur asynchrone". *Thèse de Magistère, Université Mohamed khidre Biskra. 2005.*
- [2] **H. Razik.** "Le contenu spectral du courant absorbé par la machine asynchrone en cas de Défaillance, état de l'art". *La revue 3EI n°29, pages 48-52. Juin 2002.*
- [3] **E. Schaeffer.** "Diagnostic des machines asynchrones modèles et outils paramétriques dédiés à la simulation et à la détection de défauts". *Thèse de doctorat. Université de Nantes 1999.*
- [4] **J. Penman, H. G. Sedding, W. T. Fink.** "Detection and location of interturn's short circuits in in the stator windings of operating motors". *IEEE Trans. Energy conversion, vol.9, dec.1994.*
- [5] **S. Bachir.**"Contribution au diagnostic de la machine asynchrone par estimation Paramétrique".*Thèse doctorat. Université de Poitiers. Décembre 2002*
- [6] **A. H. Bonnett.** "Root cause ac motor failure analysis with a focus on shaft failures". *IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 36(5):1435-1448, September/ October 2000.*
- [7] **J. Povinelli, F. Bangura.** "Diagnostics of Eccentricities and Bar/End-Ring Connector Breakages in Polyphase Induction Motors Through a Combination of Time-Series Data Mining and Time-Stepping Coupled FE-State-Space Techniques". *IEEE Transactions on Industry Applications, VOL. 39, NO. 4, JULY/AUGUST 2003.*
- [8] **G. Didier.** "Modélisation et diagnostic de la machine asynchrone en présence de défaillances". *Thèse doctorat. Université Henri Poincaré, Nancy-I. Octobre 2004*
- [9] **M. Sahraoui.** "Contribution aux diagnostic des machines asynchrones triphasées à cage". *Mémoire de Magistère, Université Mohamed Khider, Biskra, Décembre 2003.*

- [10] **A. Ghoggal** . "Diagnostic de la machine asynchrone triphasée : Modèle Dédié à la Détection des défauts". *Mémoire de Magistère, Université de Batna* , 2005.
- [11] **R.Casimir**. "Diagnostic des défauts des machines asynchrones par reconnaissance des formes". *Thèse doctorat. Ecole centrale de Lyon. décembre 2003.*
- [12] **T. Boumegoura**. "Recherche de signature électromagnétique des défauts dans une machine asynchrone et synthèse d'observateurs en vue de diagnostic".*Thèse Doctorat Ecole centrale de Lyon. Mars 2001.*
- [13] **A. Abed**. "Contribution à l'Etude et Diagnostic de la machine asynchrone". *Thèse de Dotorat, Université Henri Poincaré, Nancy-I. mars 2002.*
- [14] **G.Zwinnelsten**. "Diagnostic des défaillances, théorie et pratique pour les systèmes industriels". *Ed. Hermes paris. 1995.*
- [15] **L. Baghli**. "contribution à la commande de la machine asynchrone, utilisation de la logique floue, des réseaux de neurones et des algrithemes génétique". *Thèse doctorat Nancy France, 1999.*

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME

D'INGENIEUR D'ETAT EN GENIE ELECTROTECHNIQUE

OPTION : ELECTROMECHANIQUE

Proposé et dirigé par : M^r BELHAMDI Saâd

Présenté par : RAHALI.S, BELACEL. M & SACI. A

THEME :

SIMULATION DES MACHINES ASYNCHRONES À CAGE MODELE

MULTI -ENROULEMENTS "DEDIÉE AU DIAGNOSTIC

DES DÉFAUTS "

Résumé :

Les entraînements électriques utilisent de plus en plus les moteurs asynchrones à cause de leur robustesse, leur puissance massique et coût de fabrication. Leurs maintenance et surveillance permettent de rentabiliser les installations. Il est donc important de développer des outils de diagnostic pour détecter d'une manière précoce les défauts pouvant apparaître dans ces machines.

L'objectif de notre travail s'articule autour de la modélisation de la machine asynchrone pour la simulation des ruptures de barres et de l'application de la méthode appropriée du traitement de signal pour pouvoir détecter le défaut.

Mots Clés :

Moteur asynchrone, Défaut rotorique, Diagnostic, Modèle multi-enroulement, Analyse spectrale (FFT).

Notation et symboles

N_s : nombre de spires statoriques par phase

N_r : nombre de barres rotorique

n : entier naturel

F.m.m: force magnétique

s, r : indices stator et rotor respectivement

e : l'épaisseur de l'entrefer [m]

f_s : fréquence d'alimentation [Hz]

μ_0 : perméabilité magnétique de l'air

l : longueur active du circuit magnétique [m]

L_{sp} : inductance propre statorique [H]

L_{sf} : inductance de fuite rotorique [H]

L_b : inductance d'un barre rotorique [H]

L_e : inductance total de l'anneau de court-circuit [H]

L_{sc} : inductance cyclique statorique [H]

I_e : courant dans l'anneau de court- circuit [A]

I_{bk} : courant de barre [A]

I_{rk} : courant dans la boucle rotorique [A]

I_{ek} : courant dans un portion d'anneau [A]

I_a, I_b, I_c : courants des phases statorique [A]

I_{ds}, I_{qs} : composantes biphasées du courant statorique direct et en quadrature [A]

V_{abc} : les tensions statorique [V]

ϕ_{abc} : les flux statorique [Wb]

ϕ_{rk} : le flux magnétique crée par une maille rotorique [Wb]

ϕ_s : flux magnétique par pôle crée par le courant statorique [Wb]

M_s : mutuelle entre phase statorique [H]

θ_r : position du rotor [rd]

θ_s : position des grandeurs statoriques [rd]

M_{sr} : mutuelle cyclique entre le stator [H]

a : angle électrique entre deux mailles rotorique [rd]

B_s : induction magnétique crée dans l'entrefer par le courant statorique [T]

R : rayant moyen de l'entrefer

R_e : résistance totale de l'anneau de court-circuit [Ω]

R_r : résistance de l'enroulement rotorique [Ω]

R_s : résistance de l'enroulement statorique [Ω]

R_{bk} : résistance de la barre [Ω]

R_{bfk} : résistance de la barre défaillante [Ω]

R_b : résistance d'une barre rotorique à l'état sain [Ω]

r_s : résistance d'une phase statorique [Ω]

d, q : indices pour les composantes de PARK directe et quadrature, respectivement

C_e : couple électromagnétique [N.m]

j : moment d'inertie [Kg.m²]

K_0 : coefficient de frottement

ω_r : vitesse de rotation mécanique

P : la puissance [W]

P : opérateur de Laplace

p : nombre de paires de pôles

θ : Angle décrivant une position particulière dans l'espace, mesuré par rapport à une référence fixée par rapport au stator

g : glissement

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE DE M'SILA

FACULTE DES SCIENCES ET DES SCIENCES DE L'INGENIEUR

DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME
D'INGENIEUR D'ETAT EN GENIE ELECTROTECHNIQUE

OPTION : ELECTROMECHANIQUE

THEME

*Simulation Des Machines Asynchrones À Cage
Modèle Multi-enroulements "Dédiée Au Diagnostic
Des Défauts"*

Proposé et dirigé par :

M^r BELHAMDI Saâd

présenté par :

- RAHALI Said

- BELACEL Mounir

- SACI Azzouz

Promotion: 2006 / 2007

REMERCIEMENT

*A l'issue de cette fin de travail nous adressons nos remerciements
premièrement à dieu tout puissant pour la volonté, la santé et la patience
qu'il nous a donnée durant toutes ces longues années d'études.*

*Nos remerciements s'adressent à notre promoteur S.BELHAMDI pour
avoir proposer et diriger ce modeste travail et pour son continuel suivi tout
le long de la réalisation et la correction de ce mémoire.*

*Nous remercions également tous les membres de jury d'avoir
accepter de juger notre travail.*

*Nous tenons à remercier vivement toute personne qui nous a aidé de
prés ou de loin à accomplir ce travail.*