

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche scientifique



Université Mohamed Khider Biskra

Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Mécanique
Filière : Electrotechnique
Option : Commande Electrique

Réf:.....

Mémoire de Fin d'Etudes
En vue de l'obtention du diplôme:

MASTER

Thème

modélisation d'un moteur asynchrone avec défaut rotorique

Présenté par :
BOUDJELIDA Imad
Soutenu le : 24 Juin 2018

Devant le jury composé de :

Pr. BENCHOUIA.Mohamed .T professeur
Pr.SAHRAOUI Mohamed MCA
Pr. BETKA Achour professeur

Président
Encadreur
Examineur

Année universitaire : 2018 / 2019

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la recherche scientifique



Université Mohamed Khider Biskra

Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrique
Filière : Electrotechnique
Option : commande Electrique

Mémoire de Fin d'Etudes
En vue de l'obtention du diplôme:

MASTER

Thème

Modélisation d'un moteur asynchrone avec défaut rotorique

Présenté par :

Boudjelida Imad

Avis favorable de l'encadreur :

SAHRAOUI Mohamed Signature

Avis favorable du Président du Jury

Pr. BENCHOUIA.Mohamed .T

Signature

Cachet et signature

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche scientifique



Université Mohamed Khider Biskra

Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrique
Filière : Electrotechnique
Option : commande Electrique

Thème :

Modélisation d'un moteur asynchrone avec défaut rotorique

Proposé par : Boudjelida Imad
Dirigé par : SAHRAOUI Mohamed

RESUMES (Français et Arabe)

Résumé

Les progrès réalisés en matière d'électronique de puissance de circuits de commande en automatique ont contribué à l'utilisation grandissante des machines asynchrones dans les systèmes d'entraînements électriques. Le recours aux machines asynchrones est surtout lié à 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

ملخص

ساهمت التطورات في إلكترونيات طاقة دائرة التحكم الآلية في زيادة استخدام الآلات غير المتزامنة في أنظمة القيادة الكهربائية. ويرتبط استخدام الآلات غير المتزامنة بشكل أساسي إلى متانتها وقوتها الضخمة وتكلفة التصنيع. صيانتها ومراقبتها تجعل المنشآت مربحة. لذلك من المهم تطوير أدوات تشخيص للكشف عن الاعطاب المبكرة التي قد تظهر في هذه الأجهزة

ويستند هدف عملنا إلى نمذجة الآلة غير المتزامنة لمحاكاة فواصل القضبان وتطبيق طريقة معالجة الإشارة المناسبة لتكون قادرة على اكتشاف الاعطاب

. [كلمات] مفتاحية: محرك غير متزامن, عطب الدوار, التشخيص,

نموذج متعدد اللف, التحليل الطيفي

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à ceux qui ont passés leur vie rêvant de voir ce jour-ci, à ceux qui mon entourés d'amour et de tendresse, à:

Au la fleur de ma vie... ma très chère mère en témoignage de ma profonde et ma grande reconnaissance pour sa tendresse, sa patience, son sacrifie tout au long de mes études.

Mon honorable et très cher père qui a sacrifié sa vie qu'on puisse se trouver à ce niveau et qui m'a été source de réussite.

Au mes très chers frère

Au mes très chers sœurs

A toute ma famille

A mes très chers amis.

REMERCIEMENTS

Avant tous je remercie Dieu le tout puissant qui m'a donné le courage, la patience, l'aide et la volonté de réaliser ce modeste travail.

*Je tiens à remercier vivement notre encadreur Mr: **SAHRAOUI Mohamed** qui a sacrifié un grand effort afin de me permettre de mener à bien le présent travail et à qui j'exprime ma gratitude et mon respect.*

*Nous remercions aussi les membres de jury, **Mr. GBETKA** ,, et **Mr.BENCHWIYA** Qui nous ont fait l'honneur d'accepter de juger notre travail.*

Mes remerciements aux enseignants du département d'électrotechnique.

Enfin, je ne serai terminé sans exprimer mes remerciements à ma famille et mes amis.

Liste des Tableaux

| | |
|---|-----------|
| Tableau III.1: Comparaison entre les résultats de simulation et ceux réels..... | 28 |
| Tableau IV.1 : L'amplitude des composantes $(1\pm 2g)fs$ et $(1\pm 4g)fs$ (en dB) pour différent nombre de barres cassées(adjacentes , espacées)..... | 54 |
| Tableau IV.3 : L'amplitude des composantes $(1\pm 2g)fs$ (en dB) pour différente portions d'anneaux de court circuit cassées..... | 56 |

Liste des figures

| | |
|--|-----------|
| Figure I.1 : Différents court circuits au stator. | 4 |
| Figure I.2 : Différents types de la dissymétrie de l'entrefer..... | 6 |
| Figure I.3 : Excentricité statique (a) et dynamique(b) et mixte(c) | 6 |
| Figure I.4 : Dimensions du roulement à bille..... | 7 |
| Figure II.1 : Structure de la cage du rotor. | 13 |
| Figure II.2 : Induction magnétique produite par une maille rotorique. | 14 |
| Figure II.3 : schéma équivalent des mailles rotorique..... | 17 |
| Figure II.4 : principe de la transformation de PARK..... | 20 |
| Figure II.5 : schéma équivalent de la cage rotorique (a). état sain (b). avec une barre rompue..... | 26 |
| Figure III.1 : Evolution des grandeurs électromécaniques pour un moteur à l'état sain..... | 28 |
| Figure III.2 : L'évolution des grandeurs électriques pour un moteur à l'état sain.. | 29 |
| Figure III.3 : Le courant rotorique dans la barre 1 | 30 |
| Figure III.4 : Influence de la rupture de la barre 1 sur les barres adjacentes..... | 30 |
| Figure III.5 : La valeur efficace des courants dans les barres rotoriques, pour un moteur à l'état sain..... | 31 |
| Figure III.6 : La valeur efficace des courants dans les barres rotoriques, pour moteur avec une barre cassée (la barre 1)..... | 31 |
| Figure III.7 : : simulation avec le modèle global, en charge $C_r = 9$ N.m avec rupture de deux barres adjacent (1 et 2), à partir de $t=1$ s: | |
| a) Couple électromagnétique..... | 32 |
| b) Courant statorique..... | 33 |

| | |
|---|----|
| c) vitesse de rotation..... | 33 |
| d) Courants des barre rotorique..... | 34 |
| e) Comparaisons entre les courants des barres 1,2 et 7,8..... | 35 |
| f) Courant effcace rotorique..... | 35 |

Figure III.8: simulation avec le modèle global, en charge $C_r = 9 \text{ N.m}$ avec rupture de deux barres espacés (1 et 7), à partir de $t=1\text{s}$:

| | |
|--------------------------------------|----|
| a) Couple électromagnétique..... | 36 |
| b) Courant statorique..... | 37 |
| c) vitesse de rotation..... | 38 |
| d) Courants des barre rotorique..... | 39 |
| e) Courants de la barre 1..... | 39 |
| f) Courants de la barre 2..... | 40 |
| g) Courants de la barre 7..... | 40 |
| h) Courants de la barre 8..... | 41 |
| i) Courant effcace rotorique..... | 41 |

Figure III.9: simulation avec le modèle global, en charge $C_r = 9 \text{ N.m}$ avec rupture d'anneau :

| | |
|--------------------------------------|----|
| a) Couple électromagnétique..... | 42 |
| b) Courants des barre rotorique..... | 43 |
| c) Courants de la barre 1..... | 44 |
| d) Courants de la barre 2..... | 44 |
| e) Courants de la barre 7..... | 45 |
| f) Courant effcace rotorique..... | 45 |

Figure IV.1 : courant statorique en régime permanent pour un moteur sans défaut.....48

Figure IV.2: Le courant statorique en régime permanent pour un moteur avec une barre cassée 49

Figure IV.3 : Spectre du courant statorique obtenu avec une résolution de 4.7Hz, pour un moteur avec une barre cassé.50

Figure IV.4 : Spectre linéaire du courant statorique avec une résolution de 0.1Hz et pour une barre cassée.....50

| | |
|--|-----------|
| Figure IV.5 : Spectre logarithmique du courant statorique pour une barre cassée, avec une résolution de 0.1Hz | 51 |
| Figure IV.6 : Spectre logarithmique du courant statorique pour un moteur en charge avec une barre cassée avec une résolution de 0.1Hz. (Agrandissement autour du fondamental)..... | 51 |
| Figure IV.7: Spectre du courant de la machine saine | 52 |
| Figure IV.8 : Spectre du courant de la machine avec une barre cassée..... | 52 |
| Figure IV.9 : Spectre du courant de la machine avec deux barres adjacentes cassées..... | 53 |
| Figure IV.10 : Spectre du courant de la machine avec deux barres espacées est rompe..... | 53 |
| Figure IV.11 : Le spectre du courant statorique lors des défauts dans les portions d'anneaux de court circuit.: | |
| a) rupture une portion d'anneau..... | 54 |
| b) rupture deux portion d'anneau adjacente..... | 55 |
| c) rupture deux portion d'anneau espacées..... | 55 |

Sommaire

| | |
|--|----|
| Introduction Générale | 1 |
| <i>Chapitre I : Les différents défauts dans la machine asynchrone</i> | |
| I-1 Introduction | 3 |
| I.2 Éléments de constitution de la machine asynchrone | 3 |
| I-3 Causes des défauts | 3 |
| I-4 Différents défauts dans la machine asynchrone à cage | 4 |
| 4-1 Défauts statorique | 4 |
| 4-2 Défauts rotorique | 5 |
| 4-2-1 Défauts de cassure de barre | 5 |
| 4-2-2 Défauts d'excentricité | 5 |
| 4-2-3 Défauts dû au roulement | 7 |
| I-5 Conséquences des défauts | 8 |
| I-6 Méthodes de diagnostic | 8 |
| 6-1 Méthodes externes | 8 |
| 6-2 Méthodes internes | 8 |
| I-7 Modèle de la machine asynchrone à cage | 9 |
| 7-1 Approche analytique | 9 |
| 7-2 Approche numérique | 9 |
| I-8 Conclusion | 10 |
| <i>Chapitre II : Modèle Multi enroulement de la machine asynchrone</i> | |
| II-1 Introduction | 11 |
| II.2 Modèle multi enroulements de la machine asynchrone | 11 |
| 2-1 Hypothèses simplificatrices | 11 |
| 2-2 Calcul des inductances | 12 |
| 2-2-1 Partie statorique | 12 |
| 2-2-2 Partie rotorique | 13 |
| 2-2-3 Mutuelles inductances entre stator et rotor | 15 |
| II-3 Mise en Equations | 16 |
| 3-1 Equations statorique | 16 |
| 3-2 Equations rotorique | 17 |
| 3-3 Equations d'état de la machine | 18 |

| | |
|---|-----------|
| 3-4 Transformation de PARK..... | 19 |
| I-4 Expression du couple électromagnétique | 24 |
| I-5 Prise en compte du défaut dans le modèle | 25 |
| I-6 Conclusion..... | 26 |
| <i>Chapitre III : Résultat de simulation de la machine Multi enroulements</i> | |
| III-1 Introduction..... | 27 |
| III-2 Simulation du modèle de la machine asynchrone | 27 |
| 2-1 Cas d'une machine saine..... | 27 |
| 2-2 Cas d'une machine avec défaut rotorique..... | 30 |
| A) Cassure de la barres 1..... | 30 |
| b) Cassure de deux barres adjacentes..... | 32 |
| c) Cassure de deux barres espacées..... | 36 |
| d) Rupture d'une portion d'anneau..... | 42 |
| III-3 Conclusion..... | 46 |
| <i>Chapitre IV: Analyse spectrale</i> | |
| IV -1 Introduction..... | 47 |
| IV-2 Analyse spectrale | 47 |
| 2-1 Méthodes non- paramétriques..... | 48 |
| 2-2 Méthodes paramétriques..... | 48 |
| IV-3 Résultat de simulation d'analyse spectrale..... | 48 |
| IV-4 Effet du nombre de barres cassées sur les harmoniques $(1\pm 2k)fs$..... | 52 |
| IV-5 Ruptures des portions d'anneaux de court-circuit..... | 54 |
| IV-6 Conclusion..... | 56 |
| Conclusion Générale | 57 |
| Bibliographie..... | 58 |
| Annexe..... | 59 |

Introduction générale

Le cadre de ce travail, est le diagnostic des défauts rotoriques dans les moteurs asynchrones triphasés à cage d'écureuil, Le moteur asynchrone à cage d'écureuil était réservée aux entraînements électriques à vitesse constante à cause de la difficulté de sa commande et de la difficulté du suivi de ses paramètres rotoriques. Cependant, cette machine présente également de nombreux avantages,[BOU 01] tels que : sa robustesse, son coût de fabrication relativement faible et un système d'entretien minimum.

Toutes ces qualités justifient l'utilisation de cette machine dans l'industrie. De plus, le développement de l'électronique de puissance facilite la commande de cette machine rendant ainsi les machines à cage d'écureuil très utilisées dans le domaine industriel.

Certaines utilisations de moteurs asynchrones ne tolèrent pas les pannes intempestives. Ces pannes peuvent être d'origine mécanique (excentricité du rotor, défaut sur accouplement, défauts des roulements, ...) ou électrique et magnétique (court circuit dans les bobinages statoriques, cassures des barres ou de portions d'anneaux de court-circuit, cassure de dents ,...). D'autres imperfections peuvent aussi être dues également aux éléments de l'entraînement, on citera à titre d'exemples les défauts dans l'alimentation, dans la charge ou dans les réducteurs mécaniques.

La surveillance de la machine asynchrone à cage est un moyen de garantir le bon fonctionnement des systèmes. Le diagnostic fait partie de la surveillance. Il a pour objectif de détecter d'une manière précoce un défaut avant qu'il ne conduise à une défaillance totale dans l'installation industrielle. Les deux principales tâches de diagnostic sont : la détection et la localisation des défauts [ABE 02]. La détection consiste à signaler l'existence du défaut, tandis que la localisation à pour objet de trouver le type de défaut.

Malgré l'originalité de cette nouvelle approche, l'analyse des signaux fait toujours appel au même type d'outils mathématiques pas l'analyse fréquentielle pas la transformée de fourier.

Une étude faite sur les pannes de machines asynchrones, a montré que près de 40 % sont liées aux roulement, 38 % sont concentrées au niveau du stator et 10 % au niveau du rotor, le reste (12 %) touche d'autres parties de la machine. Les ruptures des barres ou d'anneaux de court-circuit ont fait l'objet de nombreux travaux [SAH03].

Dans ce mémoire nous sommes intéressés au diagnostic des défauts au niveau du rotor dans un moteur asynchrone à cage d'écureuil .

L'étude a été répartie en quatre chapitres :

- ◆ Dans le premier chapitre, on présente les causes et les natures des différents défauts et aussi les méthodes de diagnostic et le modèle de la machine asynchrone, dans un moteur à cage d'écureuil.
- ◆ 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 va présente les résultats de simulation du modèle multi enroulement (à l'état sain et avec cassure de barre et portion d'anneau).
- ◆ Dans le quatrième chapitre on va étudié l'analyse des défauts à travers de l'analyse spectrale du courant, en utilisant transformation de fourier rapide FFT. Et on termine par une conclusion générale

Chapitre I

Les différents défauts dans la machine asynchrone

| | | |
|--------------|---|----|
| I-1 | Introduction..... | 3 |
| I.2 | Éléments de constitution de la machine asynchrone..... | 3 |
| I-3 | Causes des défauts..... | 3 |
| I-4 | Différents défauts dans la machine asynchrone à cage..... | 4 |
| 4-1 | Défauts statorique..... | 4 |
| 4-2 | Défauts rotorique..... | 5 |
| 4-2-1 | Défauts de cassure de barre..... | 5 |
| 4-2-2 | Défauts d'excentricité | 5 |
| 4-2-3 | Défauts dû au roulement | 7 |
| I-5 | Conséquences des défauts | 8 |
| I-6 | Méthodes de diagnostic..... | 8 |
| 6-1 | Méthodes externes..... | 8 |
| 6-2 | Méthodes internes..... | 8 |
| I-7 | Modèle de la machine asynchrone à cage | 9 |
| 7-1 | Approche analytique..... | 9 |
| 7-2 | Approche numérique..... | 9 |
| I-8 | Conclusion..... | 10 |

I.1. Introduction

La sécurité des système présente une importance majeure dans les processus industriels, toute défaillance de l'instrumentation conduit à la génération d'information fausses, la machine asynchrone est très répandue dans le milieu industriel grâce à sa robustesse, malgré ses qualités la machine asynchrone à cage d'écureuil peut présenter des défauts structurels, parmi lesquels la rupture totale ou partielle de barre rotorique et portion d'anneau.

Dans ce chapitre on va présenter les différents défauts au niveau de la machine asynchrone.

I.2 Éléments de constitution de la machine asynchrone

La connaissance des éléments de constitution des machines asynchrones permet de comprendre de quelle façon le système est réalisé physiquement. Les machines asynchrones triphasées peuvent se décomposer, du point de vue mécanique, en trois parties distinctes :

- ✓ le stator, partie fixe de la machine où est connectée l'alimentation électrique;
- ✓ le rotor, partie tournante qui permet de mettre en rotation la charge mécanique;
- ✓ les paliers, partie mécanique qui permet la mise en rotation de l'arbre moteur.

I-3 Causes des défauts

Les origines des défauts sont souvent de nature différentes, mais sont généralement fortement liées les uns aux autres, on cite comme causes majeures [BEL 05] :

- a) Causes thermiques : balourds thermique, points chauds, températures ambiantes élevées.
- b) Entourage du moteur (tension transitoire d'alimentation, inverseurs, air de refroidissement, mauvais courant de charge, sur charge, corrosion humidité...)
- c) Causes mécaniques et mauvais emploi du moteur (résonance avec la commande de la vitesse, chocs en service, vibrations, jeu excessifs, balourds mécaniques....)
- d) Les vices de fabrication.
- e) Erreurs pendant la réparation (taille et type impropriété d'enroulement, roulement inadéquat).
- f) Equissement de la durée de vie du moteur.

I-4 Différents défauts dans la machine asynchrone à cage

I-4-1 Défauts statoriques

A partir des études théorique, il a été montré que le courant statorique avait un spectre enrichi par la création d'un court-circuit au stator, les fréquences additionnelles sont données par la relation suivante [BEL 05] [HUB 02] :

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

Où f_{cc} : fréquence de court-circuit , n : entier naturel

Les différents courts-circuits sont représentés dans la figure ci-dessous :

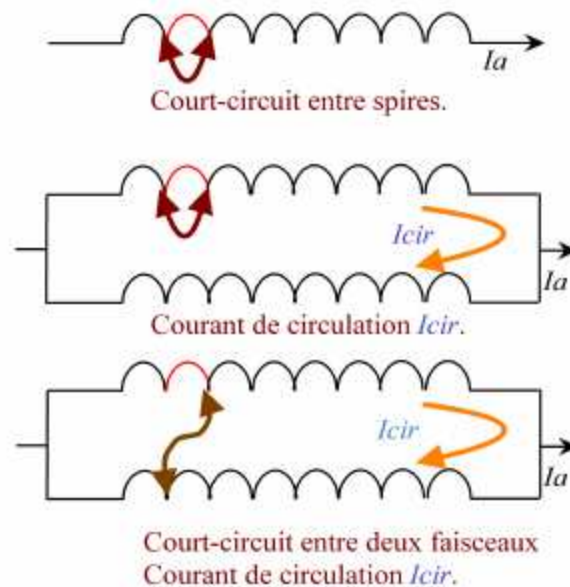


Figure I.1 : Différents court circuits au stator

Dans ces deux derniers cas, il peut y avoir existence d'un courant de circulation (I_{cir}) dans ces deux faisceaux car la différence de potentiel est différente entre les extrémités de ceux-ci, il y'a aussi autres défauts statorique

- coupure d'une phase,
- défaut d'isolation,
- défauts du circuit magnétique (rupture de tôle).

I-4-2 Défauts rotorique

L'analyse du spectre du courant statorique en régime permanent fournit des indications sur les défaillances rotorique telles que les ruptures de barres, d'anneaux de court-circuit ou l'excentricité d'entrefer [BEL 05] [HUB 02].

I-4-2-1 Défaut de cassure de barre

La cassure de barre rotorique provoque une dissymétrie du rotor. Le résultat de la dissymétrie réside dans la création d'un champ tournant de sens opposé a celui génère par le stator, et cela à la fréquence de glissement par conséquent, il y'aura création d'un courant supplémentaire dans le bobinage statorique, la relation de la fréquence est donnée sous la forme :

$$f_{bc} = (1 \pm 2kg)f_s \quad (I.2)$$

f_{bc} : fréquence de barre cassé .

I-4-2-2 Défaut d'excentricité [HUB 02]

Ceux-ci provoquent la variation de l'entrefer dans le moteur, la répartition non homogène des courants dans le rotor et le déséquilibre des courants statoriques. Le déséquilibre des efforts sur les barres génère un couple global non constant. Quand l'excentricité devient grande, les forces radiales résultantes créées par le stator avec la bande du frottement du rotor provoquent des dommages du stator et du rotor.

La géométrie du rotor peut présenter des dissymétries d'ordre naturel. Celles-ci relèvent de trois catégories d'excentricité de l'entrefer (Fig I.2 et I.3) à savoir :

- ✓ L'excentricité statique : lorsque l'axe du stator coïncide avec l'axe de rotation et non avec l'axe du rotor.
- ✓ L'excentricité dynamique : lorsque l'axe de rotation du rotor ne coïncide pas avec l'axe de symétrie du stator.
- ✓ L'excentricité mixte : lorsque l'axe de rotation du rotor ne coïncide pas avec les axes de symétrie du rotor et du stator.

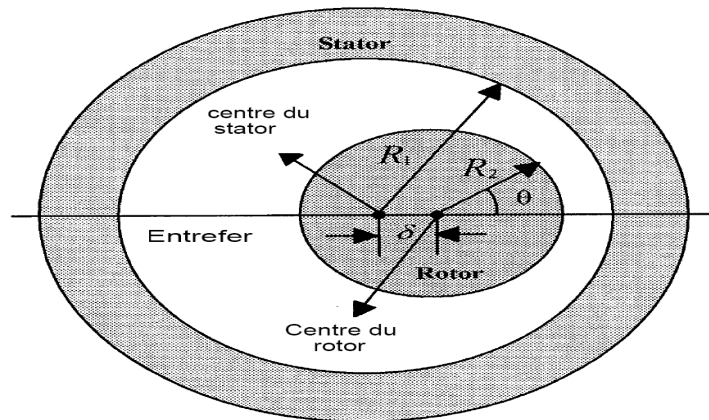


Figure I.2: Différents types de la dissymétrie de l'entrefer [ABE 02]

Tel que :

R_1 : Rayon interne statorique, R_2 : Rayon externe rotorique, γ : distance entre le centre de rotation et le centre du stator.

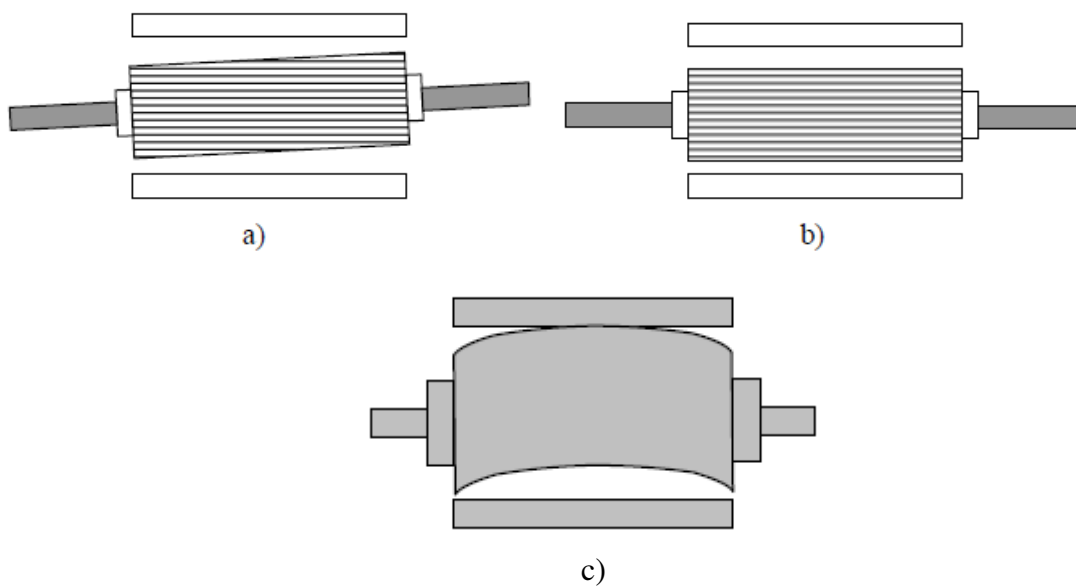


Figure I.3: Excentricité statique (a) et dynamique(b) et mixte(c)

Les fréquences induites proche, du fondamental, sont données par [HUB 02] :

$$f_{exe} = [1 \pm n(\frac{n-g}{p})] f_s \tag{I.3}$$

f_{exe} : Fréquence d'excentricité

Une seconde approche consiste à utiliser une expression liant le défaut de barre casée à celle de l'excentricité et des encoches au rotor. C'est ainsi qu'une équation sous forme compacte, fait apparaître les harmoniques de fréquences relatives à ces défauts et qui dépendent pour beaucoup du nombre de pair de pôles.

Les causes de l'excentricité peuvent être dues au positionnement incorrect des paliers lors de l'assemblage, à l'usure des paliers ou à la torsion de l'arbre.

I-4-2-3 Défaut dû au roulement

La relation entre les vibrations des roulements à billes et le spectre du courant statorique est basée sur le fait que toutes les excentricité interfèrent sur le champ dans l'entrefer de la machine asynchrone, pour cela les harmoniques contenus dans le spectre du courant statorique peuvent être décrits par l'expression [SAH 03] :

$$f_{roul} = f_s \pm k f_v \quad (\text{I.4})$$

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

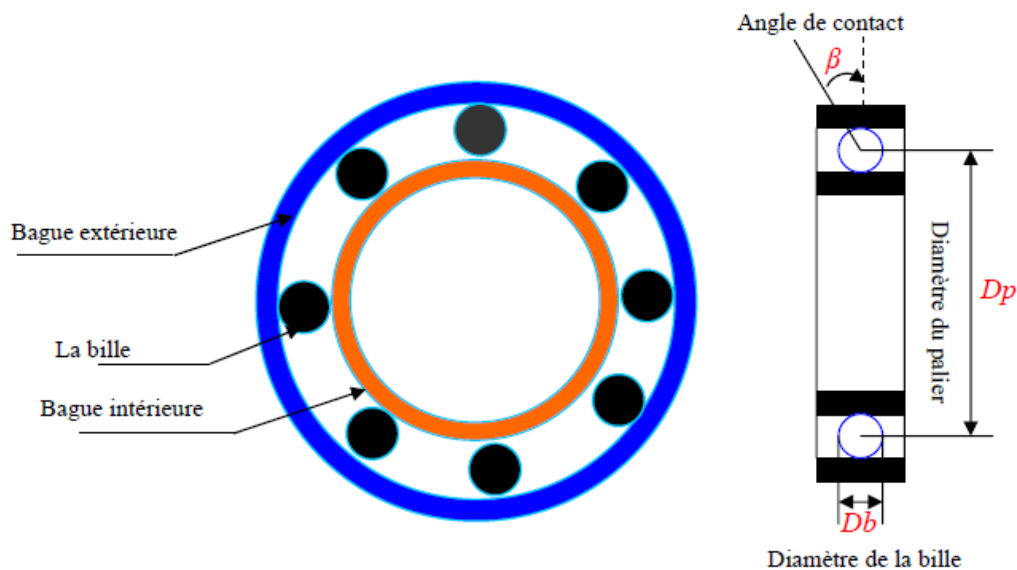


Figure I.4: Dimensions du roulement à bille

Les fréquences caractéristiques des vibrations dépendent de l'élément du roulement affecté par un défaut et sont liées aux paramètres physiques du roulement.

I-5 Conséquences des défauts

Les défauts qui surviennent sur les machines asynchrones conduisent à de multiples problèmes qui affectent la rentabilité de l'installation globale, et qui peuvent aller jusqu'à l'arrêt total. On cite parmi les conséquences des défauts :

- Effectuassions au niveau du couple et de la vitesse
- Appel supplémentaire de courant
- Déséquilibre au niveau de la tension et de courant de ligne
- Augmentation des arrêts non programmés, des pertes de production et par conséquent le rendement global

I-6 Méthodes de diagnostic [BEL 05] [ABE 02]

Le raisonnement et la connaissance sont deux éléments clés dans la solution d'un problème. Le diagnostic est au niveau conceptuel une distribution systématique des symptômes en diverses catégories de défauts. Par rapport à la connaissance et au raisonnement deux grandes classes des méthodes de diagnostic existant :

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

I-6-1 Méthodes externes

Les méthodes externes de diagnostic supposent qu'aucun modèle n'est disponible pour décrire les relations de cause à effet. La seule connaissance repose sur l'expertise humaine acquise par apprentissage, ces méthodes se basent sur l'analyse des signaux issus de la machine lors de son fonctionnement, les signaux utilisables peuvent être :
Flux d'entrefer, puissance instantanée, courant statorique et vibration, bruit acoustique.

I-6-2 Méthodes internes

La connaissance du modèle permet de décrire les relations de cause à effet, ces méthodes requièrent une connaissance approfondie du fonctionnement sous la forme de modèle mathématique, ces méthodes utilisent un modèle pour reproduire le comportement du système.

On distingue ces méthodes suivant le modèle utilisé:

- *Modèle de simulation* : les modèles analytiques utilisés dans ce mode sont représentés par des équations d'état ou des fonctions de transfert.
- *Observateur (estimateur)* ce modèle est décrit sous une représentation de variable d'état.

- *Estimation paramétrique* : c'est la détermination des vecteurs des paramètres qui gouvernent le comportement dynamique du système.
- *Modélisation des signaux* : dans cette méthode , le contenu spectral, l'évolution temporelle des variables mesurées sont exploitées pour détecter et localiser les défauts, l'analyse spectrale est très utilisée pour détecter des défaillances dans les machines électriques .

I-7- 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. Il est important donc, de synthétiser un modèle adapté au problème à traiter, décrivant le comportement de la machine non pas de la façon moyenne, comme pour la commande, mais d'une façon la plus fine possible.

Plusieurs voies de modélisation existent, elles sont actuellement utilisées pour examiner des problèmes tels que la commande, la conception ou la surveillance.

Parmi les approches de modélisations existantes, on cite deux [BEL 05] [ABE 02]:

I-7-1 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 [BEL 05] .

I-7-2 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 perméances. Le mouvement de la machine est pris en compte par l'intermédiaire de perméance d'entrefer variable selon la position du rotor. Cette tient en compte aussi la saturation.[SAH03].

• 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-8 Conclusion

Dans ce chapitre vous avons présentés des notions très importantes en diagnostic, tels que les défauts pouvant affecter la machine asynchrone, leurs causes et leurs conséquences, ainsi que les méthodes utilisées en diagnostic. Notre travail est consacré à l'étude et à la détection des cassures de barres et d'anneaux de court-circuit dans la cage rotorique d'un moteur asynchrone. Pour cela, il faut disposer d'un bon modèle mathématique, décrivant le comportement dans l'état sain et avec défaut. Ceci fait l'objet du chapitre suivant.

Chapitre II

Modèle Multi enroulement de la machine asynchrone

| | | |
|--------------|---|----|
| II-1 | Introduction..... | 11 |
| II.2 | Modèle multi enroulements de la machine asynchrone..... | 11 |
| 2-1 | Hypothèses simplificatrices | 11 |
| 2-2 | Calcul des inductances..... | 12 |
| 2-2-1 | Partie statorique..... | 12 |
| 2-2-2 | Partie rotorique..... | 13 |
| 2-2-3 | Mutuelles inductances entre stator et rotor..... | 15 |
| II-3 | Mise en Equations..... | 16 |
| 3-1 | Equations statorique..... | 16 |
| 3-2 | Equations rotorique..... | 17 |
| 3-3 | Equations d'état de la machine..... | 18 |
| 3-4 | Transformation de PARK..... | 19 |
| I-4 | Expression du couple électromagnétique | 24 |
| I-5 | Prise en compte du défaut dans le modèle | 25 |
| I-6 | Conclusion..... | 26 |

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 .

Les modèles simples (d, q), négligeant un certain nombre de phénomènes, 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 rotoriques.

La modélisation décrite dans ce chapitre a pour objet de représenter les barres ou les anneaux de court circuit pour une machine asynchrone à cage. Dans cette perspective, nous avons développé un modèle basé sur un circuit maillé représentant la cage rotorique, nous avons privilégié l'approche analytique afin de disposer d'un modèle mathématique ne nécessitant pas d'outils de calcul complexe. Dans cette perspective, nous avons développé un modèle basé sur un circuit maillé représentant la cage rotorique.

II-2 Modèle multi enroulement d'une machine asynchrone

II.2.1. Hypothèses simplificatrices

Pour pouvoir nous concentrer sur la simulation des ruptures de barres et de portions d'anneaux de court-circuit, nous avons modélisé le rotor par des mailles reliées entre elles électriquement et couplées magnétiquement, où une maille est constituée de deux barres et les deux portions d'anneaux qui les relie. Chaque barre et segment d'anneau sont caractérisés par une résistance et une inductance (Figure II.3) [RIT 94][ABE 99].

Pour notre modélisation, nous avons été amenés à faire quelques hypothèses simplificatrices :

- perméabilité relative de fer très grande;
- entrefer lisse et constant (effet d'excentricité négligeable, champ radial);
- distribution sinusoïdale de la force magnétomotrice statorique;
- effet pelliculaire nul – courants de Foucault négligeables

Avec ces hypothèses, et en supposant un stator sain, de constitution symétrique, nous avons calculé les différents paramètres du modèle [RIT 94], [ABE 02].

II-2-2 Calcul des inductances

II-2-2-1 Partie Statorique [BEL 05]:

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

$$F_m(\theta) = \frac{2N_s i_a}{p\pi} (\cos\theta) \quad (\text{II.1})$$

θ : est un angle électrique décrivant une position dans l'espace

la décomposition de l'induction sera :

$$B_s(\theta) = \frac{2\mu_0 N_s i_a}{ep\pi} (\cos\theta) \quad (\text{II.2})$$

Par conséquent, le flux magnétique dans l'entrefer est obtenu par l'intégration de l'expression on écrit :

$$\Phi_s = \iint B_s ds = \int_{-\frac{\pi}{2p}}^{\frac{\pi}{2p}} B_s R d\theta \quad (\text{II.3})$$

On obtient :

$$\Phi_s = \frac{4}{\pi} \mu_0 \frac{N_s}{ep^2} R l i_a \quad (\text{II.4})$$

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

$$\Psi_{sa} = N_s \Phi_s = N_s i_a \frac{N_s}{ep^2} R l \int_{-\frac{\pi}{2p}}^{\frac{\pi}{2p}} \cos(\theta) d\theta = L_{sp} i_a \quad (\text{II.5})$$

L'inductance principale (magnétisante) de la phase "a" statorique est donnée donc par:

$$L_{sp} = L_{ms} = 4\mu_0 \frac{N_s^2}{ep^2 \pi} R l \quad (\text{II.6})$$

L'inductance totale (propre) de la phase "a", est égale à la somme de l'inductance de magnétisation et l'inductance de fuite :

$$L_{as} = L_{sp} + L_{fs} \quad (\text{II.7})$$

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

L'inductance mutuelle entre les phases statoriques est :

$$M_s = -\frac{L_{sp}}{2} \tag{II.8}$$

II.2.2.2. Partie Rotorique

La figure II-1 illustre la modélisation du rotor par son schéma électrique équivalent, le rotor a été décomposé en circuit élémentaire (maille) constitué de deux barres et de deux portions d'anneaux de court-circuit reliant les extrémités des barres. Cette topologie des circuits rotoriques, nous permettra d'envisager la rupture de n'importe quelle barre ou de portion d'anneau[BEL 05].

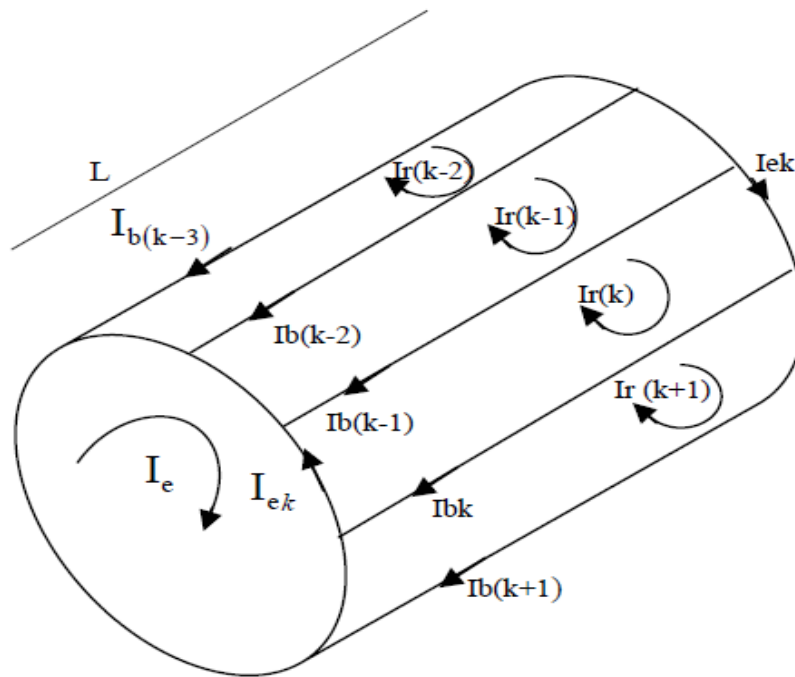


Figure II.1 : Structure de la cage du rotor

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

[BEL 05] [BAN 00].

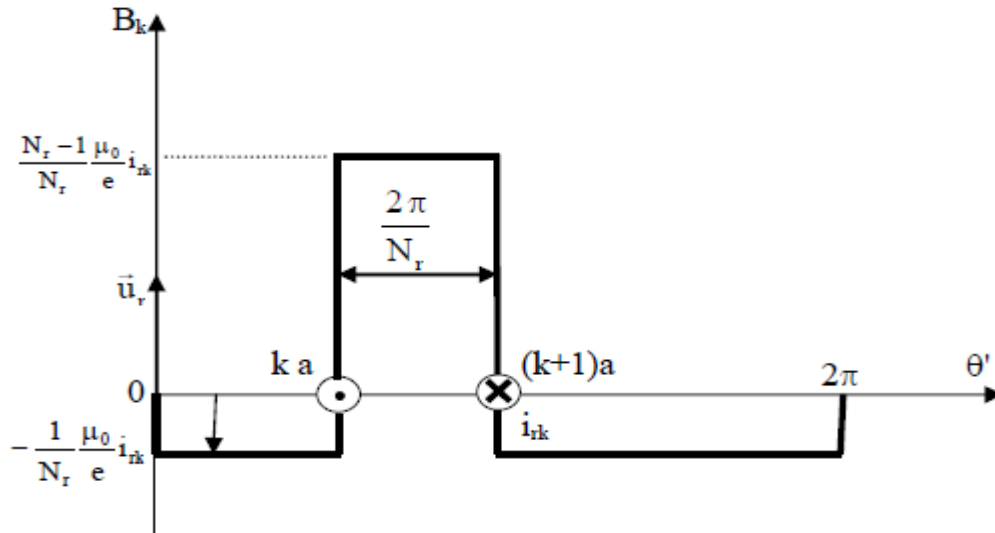


Figure II.2 : Induction magnétique produite par une maille rotorique

Chaque maille rotorique, considérée comme une bobine à une seule spire, parcourue par un courant i_{rk} , est le siège d'un flux principale exprimé par :

$$\Phi_{rk} = \int_0^1 dZ \int_{Ka}^{(k+1)a} \left(\frac{N_r - 1}{N_r} \frac{\mu_0}{e} R i_{rk} \right) d\theta' = \frac{N_r - 1}{N_r^2} \mu_0 \frac{2\pi R l}{e} i_{rk} \quad (\text{II.9})$$

L'inductance principale d'une maille rotorique est :

$$L_{rp} = \frac{N_r - 1}{N_r^2} \mu_0 \frac{2\pi}{e} R l \quad (\text{II.10})$$

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

$$L_{rr} = L_{rp} + 2L_b + 2L_e/N_r \quad (\text{II.11})$$

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

$$\Phi_{rjrk} = \int_0^1 dZ \int_{ja}^{(j+1)a} \left(-\frac{1}{N_r} \frac{\mu_0}{e} R i_{rk} \right) d\theta' \quad (\text{II.12})$$

D'après l'équation (II.13) l'inductance mutuelle entre mailles rotoriques non adjacentes, est exprimée par la relation suivante :

$$M_{rr} = -\frac{1}{N_r^2} \frac{2\pi\mu_0}{e} Rl \quad (\text{II.13})$$

L'inductance mutuelle entre la $k^{\text{ème}}$ maille et les mailles adjacentes est donnée par :

$$M_{r_{k(k-1)}} = M_{r_{k(k+1)}} = M_{rr} - L_b \quad (\text{II.14})$$

II-2-2-3-Inductance Mutuelle entre stator et rotor [SAH 03]

La transformation dans le repère lié au rotor de l'équation (II.2), donne :

$$B_s(\theta') = \frac{2\mu_0 N_s i_a}{ep\pi} [\cos(\theta' + \omega_r t)] \quad (\text{II.15})$$

$$\text{Avec : } \theta = \theta' + \omega_r t$$

D'où le flux traversant la maille k , produit par le courant i_a , est donné par :

$$\Phi_{rk a} = \int_0^1 dZ \int_{K_a}^{(k+1)a} B_s(\theta') R d\theta' \quad (\text{II.16})$$

L'intégrale de l'équation ci-dessus conduit à :

$$\Phi_{rk a} = L_{sr} i_a \cos(\omega_r t + k a) \quad (\text{II.17})$$

L'inductance mutuelle entre la maille k et la phase "a" est donnée donc par la relation suivante :

$$M_{rk a} = L_{sr} \cos(\omega_r t + k a) \quad (\text{II.18})$$

$$\text{Avec : } L_{sr} = \frac{4\mu_0 N_s Rl}{ep^2\pi} \sin\left(\frac{a}{2}\right) \quad (\text{II.19})$$

$a = p \frac{2\pi}{N_r}$ est l'angle électrique entre deux maille rotorique.

De même, les inductances mutuelles entre la $k^{\text{ème}}$ et les phases "b" et "c", sont exprimées par :

$$M_{rk b} = L_{sr} \cos\left(\omega_r t + k a - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (\text{II.20})$$

$$M_{rk c} = L_{sr} \cos\left(\omega_r t + k a - \frac{4\pi}{3}\right) \quad (\text{II.21})$$

II-3 Mise en équation

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

II-3 –1 Equations statorique

Les équations de la tension et du flux statorique sont :

$$\begin{cases} [v_{abc}] = [R_s][i_{abc}] + \frac{d}{dt} [\phi_{abc}] \\ [\phi_{abc}] = [L_s][i_{abc}] + [M_{sr}][i_{rk}] \end{cases} \quad (II.22)$$

Avec :

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

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

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

$$[\phi_{abc}] = [\phi_a \ \phi_b \ \phi_c]^T, \text{ le vecteur de flux statoriques .}$$

La matrice des résistances statopriques est :

$$[R_s] = \begin{bmatrix} r_s & 0 & 0 \\ 0 & r_s & 0 \\ 0 & 0 & r_s \end{bmatrix} \quad (II.23)$$

La matrice d'inductance statorique s'écrit :

$$[L_s] = \begin{bmatrix} L_{as} & M_s & M_s \\ M_s & L_{bs} & M_s \\ M_s & M_s & L_{cs} \end{bmatrix} \quad (II.24)$$

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

$$[M_{sr}] = \begin{bmatrix} \dots & L_{sr} \cos(\theta_r + k a) & \dots \\ \dots & L_{sr} \cos\left(\theta_r + k a - \frac{2\pi}{3}\right) & \dots \\ \dots & L_{sr} \cos\left(\theta_r + k a - \frac{4\pi}{3}\right) & \dots \end{bmatrix} \quad (II.25)$$

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

II-3 -2 Equations rotorique

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

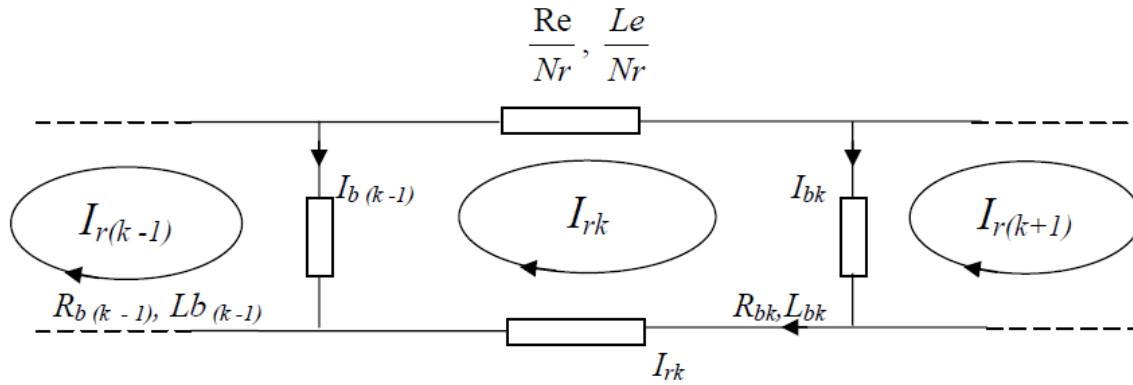


Figure II-3 schéma équivalent des mailles rotorique

Sachant que :

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

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

$$R_{bk} i_{r(k-1)} + \left(2 \frac{R_e}{N_r} + R_{b(k-1)} + R_{bk} \right) i_{rk} - R_{bk} i_{r(k+1)} - \frac{R_e}{N_r} i_e + \frac{d}{dt} \Phi_{rk} = 0 \quad (II.26)$$

Avec :

$$\begin{aligned} \Phi_{rk} = & \left(L_{rp} + 2L_b + 2 \frac{L_e}{N_r} \right) i_{rk} - M_{rr} \sum_{j=0}^{N_r-1} i_{rj} - L_b (i_{r(k-1)} + i_{r(k+1)}) - \frac{L_e}{N_r} i_e \\ & - L_{sr} \left[\cos(\theta_r + k a) ; \cos\left(\theta_r + k a - \frac{2\pi}{3}\right) ; \cos\left(\theta_r + k a - \frac{4\pi}{3}\right) \right] [i_{abc}] \end{aligned} \quad (II.27)$$

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

$$\frac{R_e}{N_r} \sum_{k=0}^{N_r-1} i_{rk} + \frac{L_e}{N_r} \sum_{k=0}^{N_r-1} \frac{d}{dt} i_{rk} - R_e i_e - L_e \frac{d}{dt} i_e = 0 \quad (II.28)$$

II-3 –3 Equation d'état de la machine

L'équation globale des tensions est donnée par :

$$[v] = [R] [I] + [L] \frac{d[I]}{dt} + \frac{d[L]}{dt} [I] \tag{II.29}$$

Avec :

$[v] = [v_a \ v_b \ v_c \ ; \ 0 \ 0 \ 0 \ ; \ 0]^T$, le vecteur global des tensions ($N_r+4 \times 1$), il contient les trois tensions statoriques et les N_r tensions des mailles rotoriques, ainsi que la tension de l'anneau de court-circuit.

$[I] = [i_a \ i_b \ i_c \ ; \ i_{r0} \ i_{r1} \ \dots \ i_{rk} \ \dots \ i_{r(N_r-1)} \ ; \ i_e]^T$, le vecteur global des courants ($N_r+4 \times 1$), il contient les trois courants statoriques et les N_r courants des mailles rotoriques, ainsi que le courant de l'anneau de court-circuit .

La matrice globale des résistances est :

$$[R] = \begin{bmatrix} [R_s] & \vdots & [0] \\ \dots & \vdots & \dots \\ [0] & \vdots & [R_r] \end{bmatrix}$$

La matrice des résistances rotoriques.

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

(II.30)

La matrice globale des inductances est donnée par :

$$[L] = \begin{bmatrix} [L_s] & \vdots & [M_{sr}] \\ \dots & \vdots & \dots \\ [M_{sr}]^T & \vdots & [L_r] \end{bmatrix}$$

La matrice des inductances rotoriques :

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

(II.31)

La dérivée de la matrice globale des inductances est :

$$\frac{d[L]}{dt} = \begin{bmatrix} [0] & \vdots & \left[\frac{d[M_{sr}]}{dt} \right] \\ \dots & \vdots & \dots \\ \left[\frac{d[M_{sr}]^T}{dt} \right] & \vdots & [0] \end{bmatrix}$$

On remarque que la matrice [Msr] dépend du temps, ce qui nécessite l'inversion de la matrice inductance [L], de dimension Nr+4, à chaque pas de calcul. Pour rendre cette matrice constante, on applique la transformation de Park sur les équations de tensions statoriques. Le repère de Park doit être lié au rotor.

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 (o, 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 (o, d, q) peut être réduit à un repère biphasé (d, q) [BEL 05].

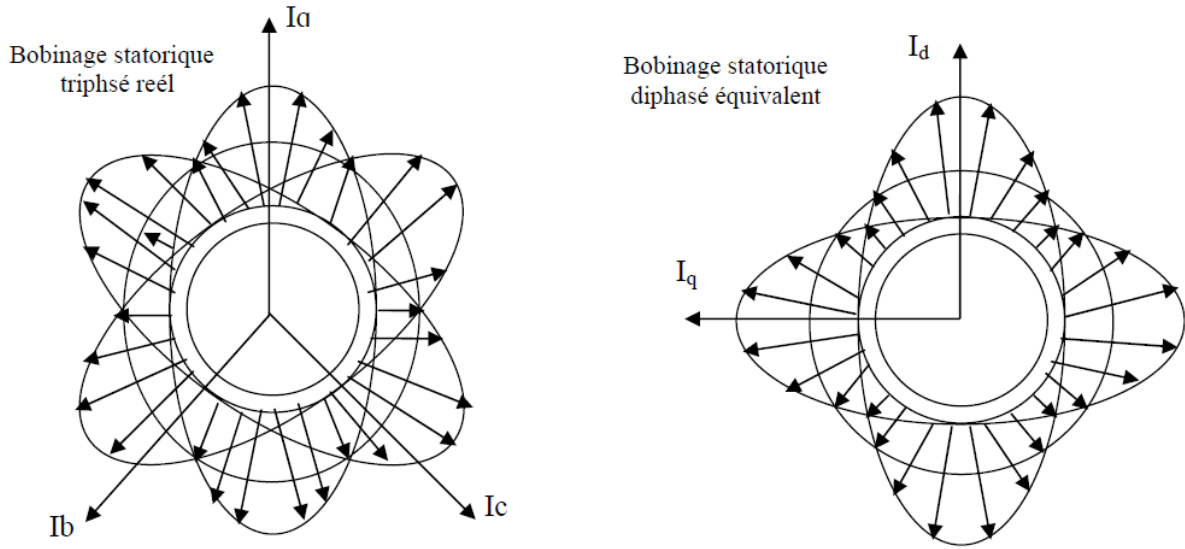


Figure II.4 :principe de la transformation de PARK

La matrice de Park modifiée est définie par :

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \cos \theta & -\sin \theta \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \cos(\theta - \frac{2\pi}{4}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{4}) \end{bmatrix} \quad (\text{II.32})$$

La dérivée de la matrice de Park est :

$$\frac{d[P(\theta)]}{dt} = -\sqrt{\frac{2}{3}} \omega \begin{bmatrix} 0 & \sin \theta & \cos \theta \\ 0 & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ 0 & \sin(\theta - \frac{2\pi}{4}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{4}) \end{bmatrix} \quad (\text{II.33})$$

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

$$[T] = \begin{bmatrix} [P(\theta)] & \vdots & [0] \\ \dots & \vdots & \dots \\ [0]^T & \vdots & [1] \end{bmatrix} \quad (\text{II.34})$$

L'inverse de la matrice globale de Park est :

$$[T]^T = \begin{bmatrix} [P(\theta)]^{-1} & \vdots & [0] \\ \dots & \vdots & \dots \\ [0]^T & \vdots & [1] \end{bmatrix} \quad (\text{II.35})$$

[1] : est la matrice identité de dimension $(N_r+1) \times (N_r+1)$.

Sachant que :

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

$$[I] = [T] [I_{tr}], \text{ avec: } [I_{tr}] = [i_{os} \ i_{ds} \ i_{qs} \ \vdots \ i_{r0} \ i_{r1} \ \dots \ i_{rk} \ \dots \ i_{r(N_r-1)} \ \vdots \ i_e]^T$$

A partir de l'équation (II.29):

$$[T] [V_{tr}] = [R] [T] [I_{tr}] + \frac{d[L]}{dt} [T] [I_{tr}] + [L] \frac{d[T]}{dt} [I_{tr}] + [L] [T] \frac{d[I_{tr}]}{dt} \quad (\text{II.36})$$

$$[V_{tr}] = \left(\underbrace{[T]^{-1}[R][T]}_A + \underbrace{[T]^{-1} \frac{d[L]}{dt} [T]}_B + \underbrace{[T]^{-1}[L] \frac{d[T]}{dt}}_C \right) [I_{tr}] + \underbrace{[T]^{-1}[L][T]}_D \frac{d[I_{tr}]}{dt} \quad (\text{II.37})$$

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

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

$$A = [T]^{-1}[R][T] = \begin{bmatrix} [P(\theta)]^{-1}[R_s][P(\theta)] & \vdots & [0] \\ \dots & \vdots & \dots \\ [0]^T & \vdots & [R_r] \end{bmatrix} \quad (\text{II.38})$$

$$B = [T]^{-1} \frac{d[L]}{dt} [T] = \begin{bmatrix} [P(\theta)]^{-1}[L_s] \frac{d[P(\theta)]}{dt} & \vdots & [0] \\ \dots & \vdots & \dots \\ [M_{sr}] \frac{d[P(\theta)]}{dt} & \vdots & [0] \end{bmatrix} \quad (\text{II.39})$$

$$C=[T]^{-1}[L] \frac{d[T]}{dt} = \begin{bmatrix} [0] & \vdots & [P(\theta)]^{-1} \frac{d[M_{sr}]}{dt} \\ \dots & \vdots & \dots \\ [P(\theta)] \frac{d[M_{sr}]}{dt} & \vdots & [0] \end{bmatrix} \quad (II.39)$$

$$D=[T]^{-1}[L][T] = \begin{bmatrix} [P(\theta)]^{-1}[L_s][P(\theta)] & \vdots & [P(\theta)]^{-1}[M_{sr}] \\ \dots & \vdots & \dots \\ [M_{sr}]^T [P(\theta)] & \vdots & [L_r] \end{bmatrix} \quad (II.40)$$

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

$$\begin{bmatrix} V_{os} \\ V_{ds} \\ V_{qs} \\ \dots \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ \dots \\ 0 \end{bmatrix} = [L_{tr}] \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{os} \\ i_{ds} \\ i_{qs} \\ \dots \\ i_{r0} \\ \vdots \\ i_{rk} \\ \vdots \\ i_{r(Nr-1)} \\ \dots \\ i_e \end{bmatrix} + [R_{tr}] \begin{bmatrix} i_{os} \\ i_{ds} \\ i_{qs} \\ \dots \\ i_{r0} \\ \vdots \\ i_{rk} \\ \vdots \\ i_{r(Nr-1)} \\ \dots \\ i_e \end{bmatrix} \quad (II.41)$$

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

La matrice [Rtr] est donnée par :

$$\begin{bmatrix}
 R_s & -w_r L_{sc} & \vdots & \dots & \dots & \dots & w_r M_{sr} \sin ka & \dots & \dots & \dots & \vdots & 0 \\
 w_r L_{sc} & R_s & \vdots & \dots & \dots & \dots & -w_r M_{sr} \cos ka & \dots & \dots & \dots & \vdots & 0 \\
 \dots & \dots & \vdots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \vdots & \dots \\
 0 & 0 & \vdots & R_{b0} + R_{b(N_r-1)} + 2\frac{R_e}{N_r} & -R_{b0} & \ddots & 0 & \ddots & \ddots & -R_{b(N_r-1)} & \vdots & \frac{R_e}{N_r} \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots & \vdots \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots & \vdots \\
 0 & 0 & \vdots & 0 & \ddots & -R_{b(k-1)} & R_{bk} + R_{b(k-1)} + 2\frac{R_e}{N_r} & -R_{bk} & \ddots & 0 & \vdots & \vdots \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots & \vdots \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots & \vdots \\
 0 & 0 & \vdots & -R_{b(N_r-1)} & \ddots & 0 & \ddots & \ddots & -R_{b(N_r-2)} & R_{b(N_r-1)} + R_{b(N_r-2)} + 2\frac{R_e}{N_r} & \vdots & \frac{R_e}{N_r} \\
 \dots & \dots & \vdots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \vdots & \dots \\
 0 & 0 & \vdots & \frac{R_e}{N_r} & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \frac{R_e}{N_r} & \vdots & R_e
 \end{bmatrix}
 \tag{II.42}$$

La matrice [Ltr] est donnée par :

$$\begin{bmatrix}
 L_{sc} & 0 & \vdots & \dots & \dots & \dots & -M_{sr} \cos ka & \dots & \dots & \dots & \vdots & 0 \\
 0 & L_{sc} & \vdots & \dots & \dots & \dots & -M_{sr} \sin ka & \dots & \dots & \dots & \vdots & 0 \\
 \dots & \dots & \vdots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \vdots & \dots \\
 \vdots & \vdots & \vdots & L_{rp} + 2L_p + 2\frac{L_e}{N_r} & M_{rr} - L_b & \ddots & \ddots & M_{rr} & \ddots & M_{rr} - L_b & \vdots & \frac{L_e}{N_r} \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots & \vdots \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots & \vdots \\
 -\frac{3}{2}M_{sr} \cos ka & -\frac{3}{2}M_{sr} \sin ka & \vdots & M_{rr} - L_b & \ddots & M_{rr} - L_b & L_{rp} + 2L_p + 2\frac{L_e}{N_r} & M_{rr} - L_b & M_{rr} & \ddots & \vdots & \vdots \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots & \vdots \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots & \vdots \\
 \vdots & \vdots & \vdots & M_{rr} - L_b & \ddots & M_{rr} & \ddots & \ddots & M_{rr} - L_b & L_{rp} + 2L_p + 2\frac{L_e}{N_r} & \vdots & \frac{L_e}{N_r} \\
 \dots & \dots & \vdots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \vdots & \dots \\
 0 & 0 & \vdots & \frac{L_e}{N_r} & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \frac{L_e}{N_r} & \vdots & L_e
 \end{bmatrix}
 \tag{II.43}$$

A ces équations, on ajoute les équations électromécaniques afin d'avoir la vitesse électrique de rotation et la position θ_r du rotor.

$$\frac{d}{dt} \varpi_m = \frac{1}{J} (C_e - C_r - k_0 \varpi_m) \tag{II.44}$$

$$\frac{d}{dt} \theta_r = \varpi_r \tag{II.45}$$

II-4 Expression du couple électromagnétique

Il faut d'abord, trouver les expressions des composantes biphasées Ψ_{ds} et Ψ_{qs} du flux statorique.

On a :

$$\begin{bmatrix} [\Psi_{odqs}] \\ [\Phi_{kr}] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [P(\theta)]^{-1} & [0] \\ [0] & [1] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [L_s] & [M_{sr}] \\ [M_{sr}]^T & [L_r] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [P(\theta)]^{-1} & [0] \\ [0] & [1] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [i_{odqs}] \\ [i_{kr}] \end{bmatrix} \quad (\text{II.46})$$

$$\iff \begin{bmatrix} [\Psi_{odqs}] \\ [\Psi_{kr}] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [P(\theta)]^{-1}[L_s][P(\theta)] & [P(\theta)]^{-1}[M_{sr}] \\ [M_{sr}]^T[P(\theta)] & [L_r] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [i_{odqs}] \\ [i_{kr}] \end{bmatrix} \quad (\text{II.47})$$

On aura :

$$[\Psi_{odqs}] = [P(\theta)]^{-1}[L_s][P(\theta)][i_{odqs}] + [P(\theta)]^{-1}[M_{sr}][i_{kr}] \quad (\text{II.48})$$

Après le calcul on obtient :

$$\begin{cases} \Psi_{os} = (L_s + 2M_s) i_{os} \\ \Psi_{ds} = (L_s - M_s) i_{ds} + \sqrt{\frac{3}{2}} L_{sr} \sum_{k=0}^{Nr-1} i_{rk} \cos(k a) \\ \Psi_{qs} = (L_s - M_s) i_{qs} + \sqrt{\frac{3}{2}} L_{sr} \sum_{k=0}^{Nr-1} i_{rk} \sin(k a) \end{cases} \quad (\text{II.49})$$

Or, pour un moteur alimenté par une source triphasée, la puissance instantanée s'écrit :

$$\begin{aligned} p_s(t) &= [v_{abc}]^T [i_{abc}] \\ &= ([P(\theta)][v_{abc}]^T [P(\theta)] [i_{odqs}]) \\ &= [v_{odsq}]^T [i_{odqs}] \end{aligned} \quad (\text{II.50})$$

Les équations de tensions dans un repère lié au rotor sont données par :

$$\begin{cases} v_{ds} = r_s i_{ds} + \frac{d\Psi_{ds}}{dt} - \omega_r \Psi_{qs} \\ v_{qs} = r_s i_{qs} + \frac{d\Psi_{qs}}{dt} - \omega_r \Psi_{ds} \end{cases} \quad (\text{II.51})$$

En remplaçant les tensions vds et vqs dans l'expression (II.51), on obtient :

$$p_{sa}(t) = r_s (i_{ds}^2 + i_{qs}^2) \left(i_{ds} \frac{d\Psi_{ds}}{dt} + i_{qs} \frac{d\Psi_{qs}}{dt} \right) + \omega_r (i_{qs} \Psi_{ds} - i_{ds} \Psi_{qs}) \quad (II.52)$$

Le troisième terme, représente la puissance électromagnétique transmise au rotor à travers l'entrefer par l'intermédiaire du champ tournant. Donc le couple électromagnétique est:

$$T_e = p(i_{qs} \Psi_{ds} - i_{ds} \Psi_{qs}) \quad (II.53)$$

En remplaçant Ψ_{ds} et Ψ_{qs} par leurs expressions, on obtient :

$$T_e = \sqrt{\frac{3}{2}} p L_{sr} \left\{ i_{qs} \sum_{k=0}^{Nr-1} i_{rk} \cos(k a) - i_{ds} \sum_{k=0}^{Nr-1} i_{rk} \sin(k a) \right\} \quad (II.54)$$

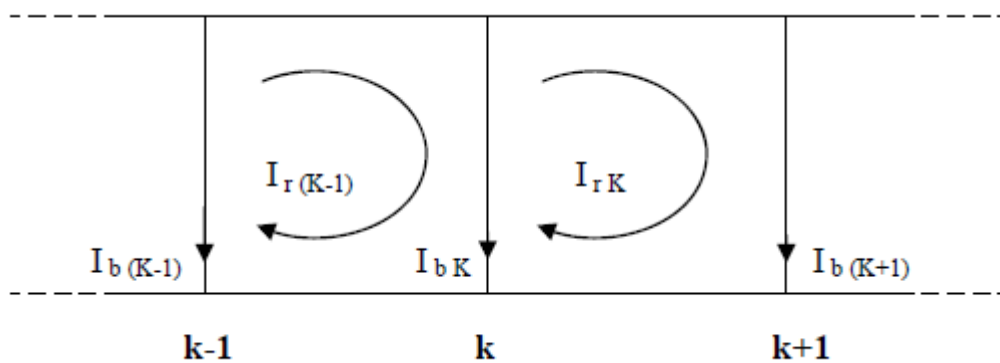
II-5 Prise en compte du défaut dans le modèle

Il est assez difficile de décrire exactement la succession des phénomènes physiques entrant en jeu lors d'une rupture d'une barre.

On peut modéliser la cassure d'une barre par l'annulation du courant qui traverse cette barre. [TOL 95].

Les matrices des inductance et des résistances sont modifiées de tel façon que : si la barre k est rompue, le courant I_{bk} dans cette barre s'annule. Dans ce cas, le courant dans la maille (k-1) devient égal au courant dans la maille (k), c'est-à-dire, ($I_r(k-1) = I_{rk}$) figure(II-4).

Ceci est traduit dans les matrices des inductances et les matrices des résistances par l'addition de deux colonnes et de deux lignes liées aux courant $I_r(k-1)$ et I_{rk} , ou d'autre terme l'ordre du système est réduit [BEL 05] [SAH 03].



(a)

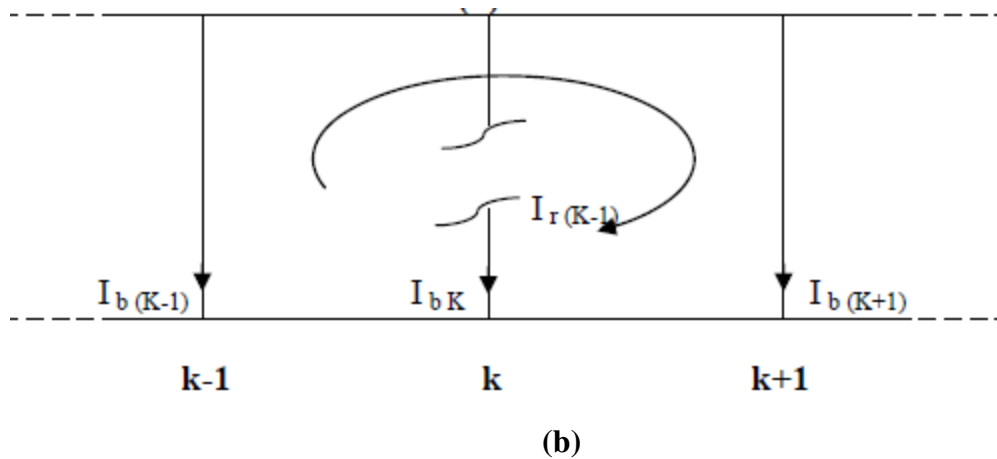


Figure II-5 : schéma équivalent de la cage rotorique
(a). état sain **(b)**. avec une barre rompue

A comparé entre les résultats de simulation, lorsqu'on modélise la cassure d'une barre par la méthode décrite ci-dessus, et les résultat expérimentaux, il a trouvé que cette méthode est limitée ceci est dû aux hypothèses simplificatrices, puisque dans le modèle Mathématique on a négligé les courants de fuite entre les barres.

En réalité, et d'après Kerszenbaum [KER 84], le courant dans une barre rompue n'est jamais nul, il existe toujours un courant qui passe tangentiellement à travers les tôles du rotor vers les barre adjacentes.

Il est possible de modéliser ce phénomène par l'addition d'une résistance de grande valeur par rapport à la résistance de la barre rotorique rompue.

II-6 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 ou d'anneau 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

Résultat de simulation de la machine multi enroulements

| | |
|--|----|
| III-1 Introduction..... | 27 |
| III-2 Simulation du modèle de la machine asynchrone | 27 |
| 2-1 Cas d'une machine saine..... | 27 |
| 2-2 Cas d'une machine avec défaut rotorique..... | 30 |
| A) Cassure de la barres 1..... | 30 |
| b) Cassure de deux barres adjacentes..... | 32 |
| c) Cassure de deux barres espacées..... | 36 |
| d) Rupture d'une portion d'anneau..... | 42 |
| III-3 Conclusion..... | 46 |

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 rotorique, le couple et la vitesse de rotation ainsi que les valeurs efficaces des courants des barres et les courants des barres cassées. La modulation est effectuée dans différentes conditions de fonctionnement : la machine à l'état sain et avec défaut. En suite, on présente une analyse détaillée des différents défauts rotorique. Cette analyse a pour objectif d'analyser les phénomènes observés sur les performances du moteur .

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

III-2 Simulation du modèle de la machine asynchrone

A l'aide d'un logiciel mathématique en utilisant MATLAB qui permet de mettre en évidence le comportement de la machine asynchrone, MATLAB est un système de très grandes performances pour plusieurs domaines de recherche, le secret de ce pouvoir réside dans ces multiples applications et ces outils efficaces qu'il offre fonction et visualisation. La résolution des équations différentielles obtenues est réalisée par la méthode de Runge-Kutta d'ordre 4.

III-2-1 Cas d'une machine saine

Les paramètres du moteur, utilisé pour la simulation [VAS 94], sont présentés dans l'annexe 1. Les figures (III.1.a et b) et (III.2.a et b) montrent, respectivement, l'évolution du couple électromagnétique et la vitesse de rotation ainsi que le courant statorique et le courant dans la barre 1, lors d'un démarrage à vide sous une tension nominale avec une alimentation sinusoïdale équilibrée. A l'instant $t=1s$, nous procédons à un échelon de couple résistant nominal de 3.5 Nm. Le couple électromagnétique vient équilibrer le couple résistant (figure III.1.a), la vitesse diminue à la vitesse nominale (figure III.1.b) et le courant augmente à la valeur nominale (figure III.2.a).

Le tableau III.1 montre que les résultats de la simulation sont en bonne concordance qualitative et quantitative avec ceux réels du moteur [VAS 94].

| Paramètres | Résultats réels [VAS 94] | Résultats calculés (simulation) | Erreur relative (%) |
|--------------------|-----------------------------|------------------------------------|------------------------|
| Puissance | 450 (w) | 45.14 (w) | 1.14 |
| Courant statorique | 1.7 (A) | 1.6 (A) | 5.88 |
| Vitesse | 2895 (tr/min) | 2899 (tr/min) | 0.1 |

Tableau III.1 : Comparaison entre les résultats de simulation et ceux réels.

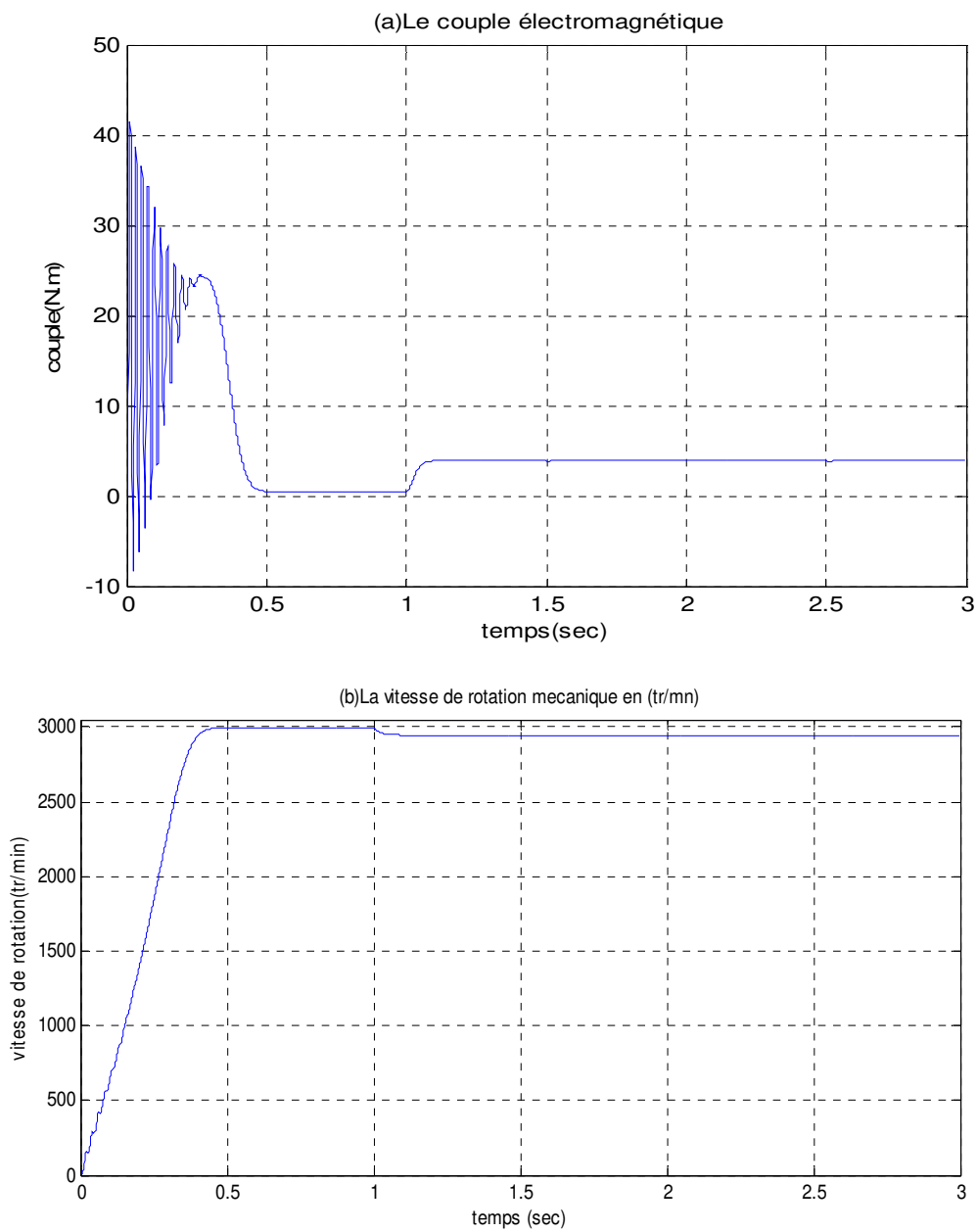


Figure III.1 : Evolution des grandeurs électromécaniques pour un moteur à l'état sain.

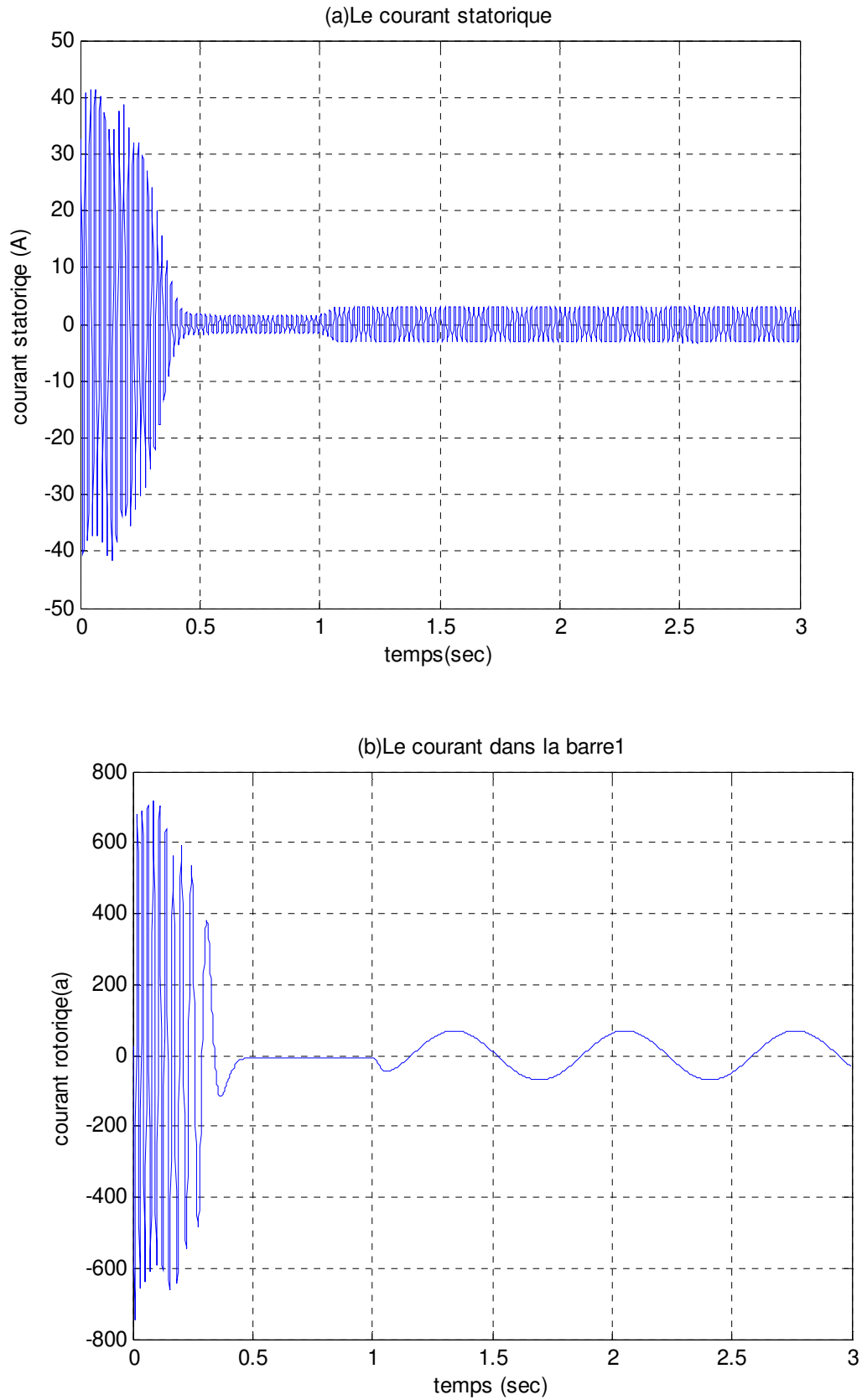


Figure III.2 : L'évolution des grandeurs électriques pour un moteur à l'état sain.

III-2-2 Cas d'une machine avec défaut rotorique

A) Cassure de la barres 1

A l'instant $t=2s$, nous simulons la rupture de la première barre en augmentant sa résistance de 30 fois. Le courant dans cette barre diminue fortement (figure III.3), entraînant une surintensité importante dans les barres adjacentes (figure III.4).

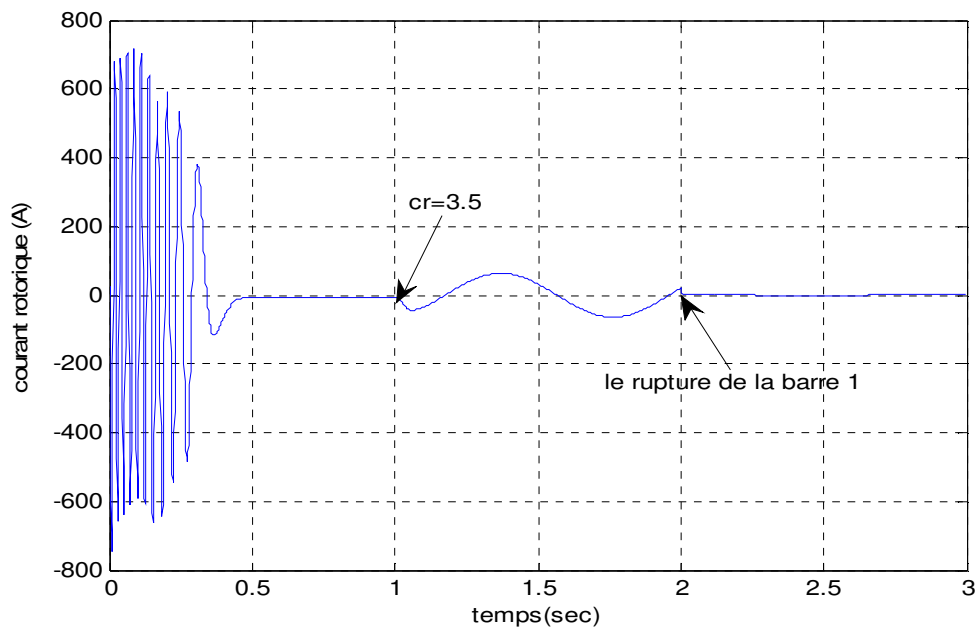


Figure III.3 : Le courant rotorique dans la barre 1

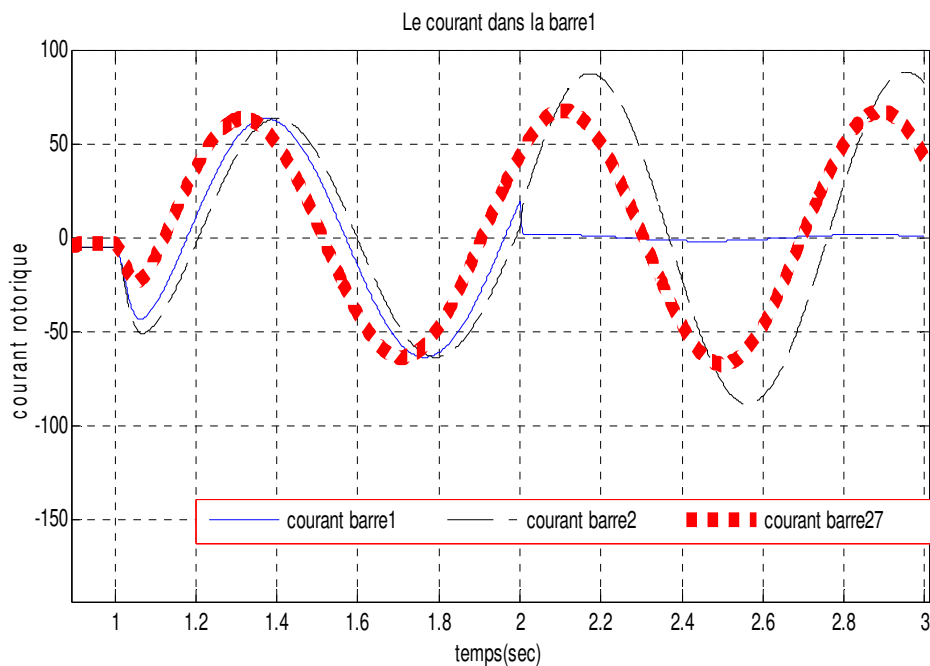


Figure III.4 : Influence de la rupture de la barre 1 sur les barres adjacentes.

Les figures III.5 et III.6 représentent les valeurs efficaces des courants dans les barres rotoriques pendant l'état sain et avec défaut. Elles illustrent bien l'effet de la cassure de la barre 1 sur les courants dans toutes les barres rotoriques et surtout dans les barres en voisinage avec la barre rompue.

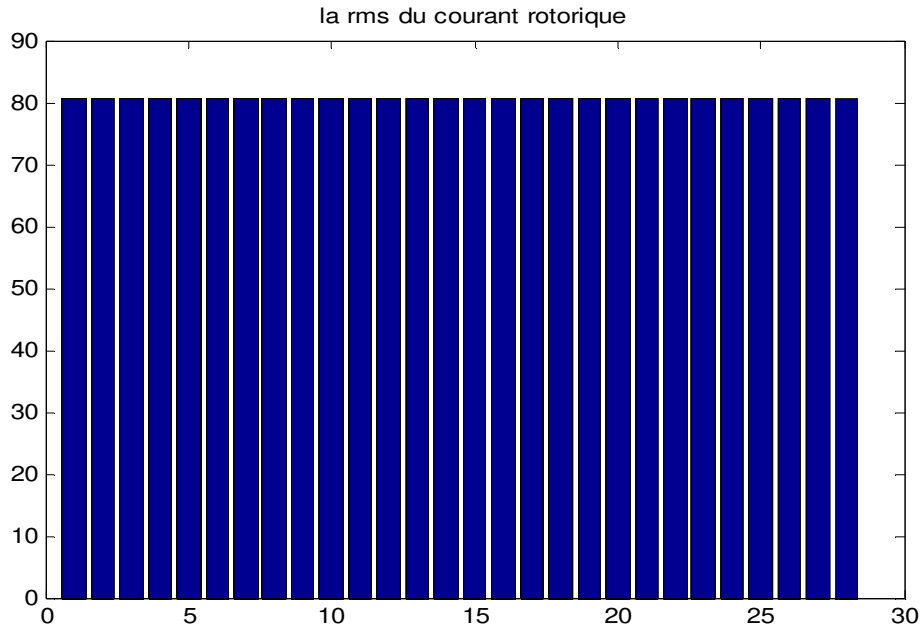


Figure III.5 : La valeur efficace des courants dans les barres rotoriques, pour un moteur à l'état sain.

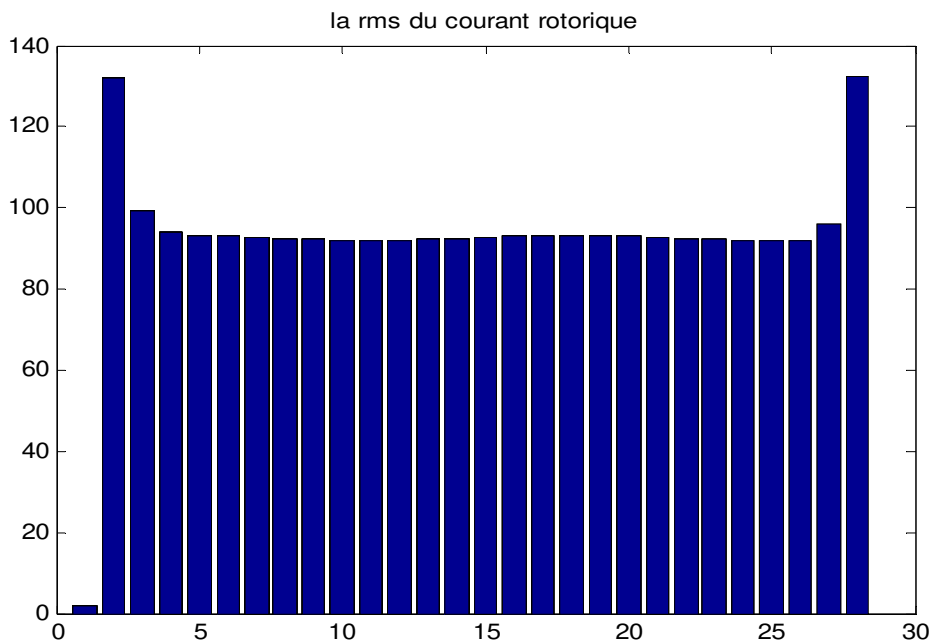
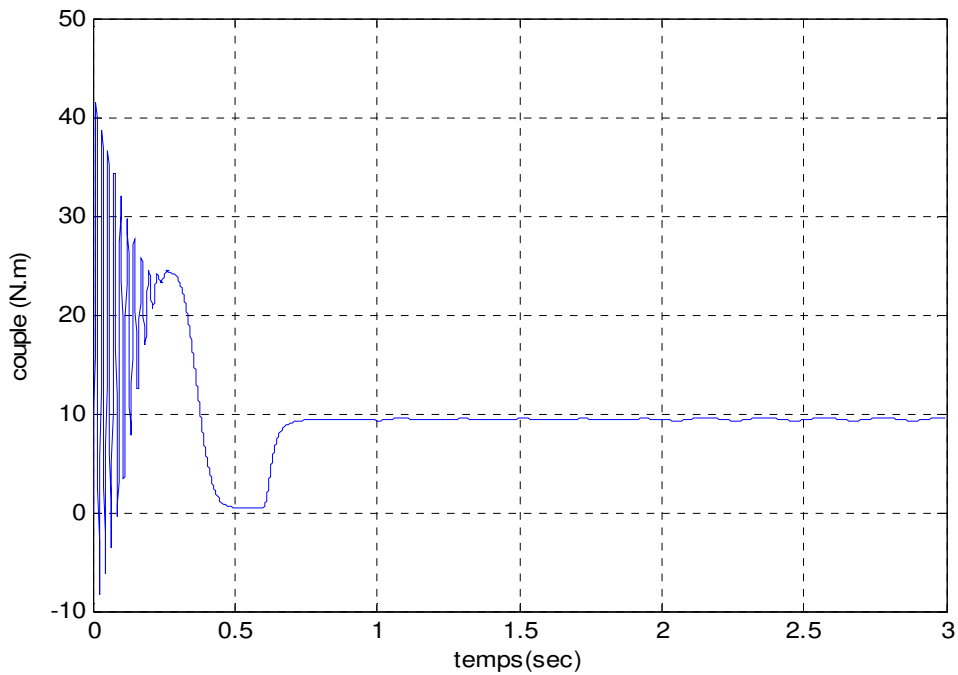


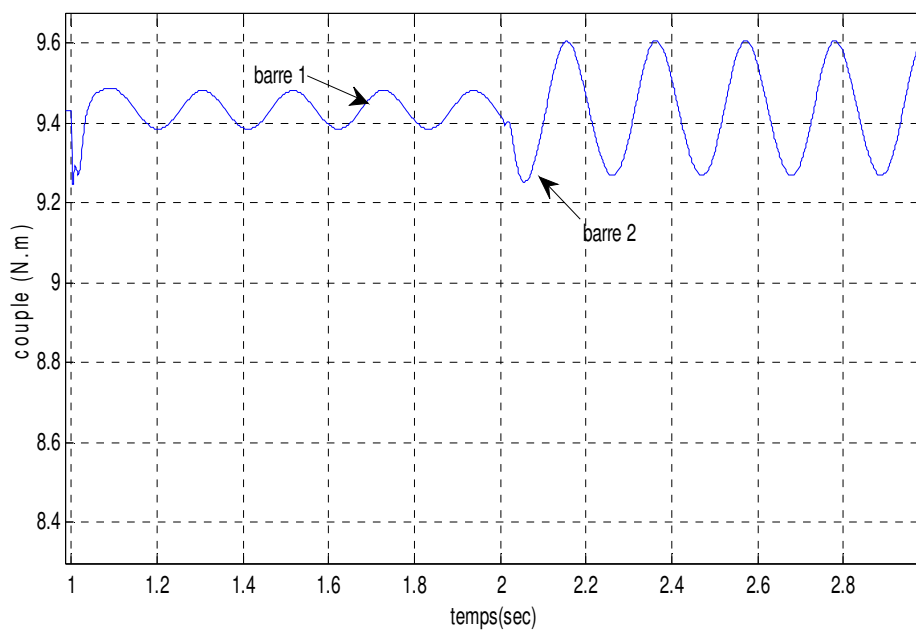
Figure III.6 : La valeur efficace des courants dans les barres rotoriques, pour moteur avec une barre cassée (la barre 1).

B) Cassure de deux barres adjacentes

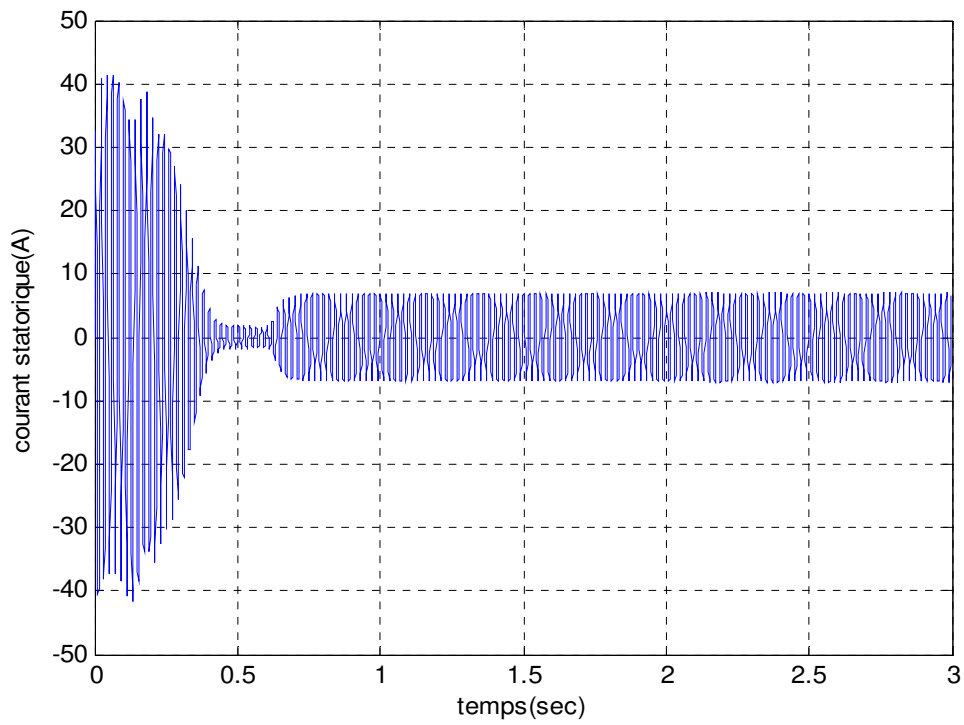
A partir de $t=0.6s$, on va appliqué une charge de 9 N.m ,et à $t=1s$ on simule la rupture de la barre 1, on va augmente la résistance de la barre à $11 \cdot R_b$, à $t=2s$ on simule la rupture de la barre adjacente 2.



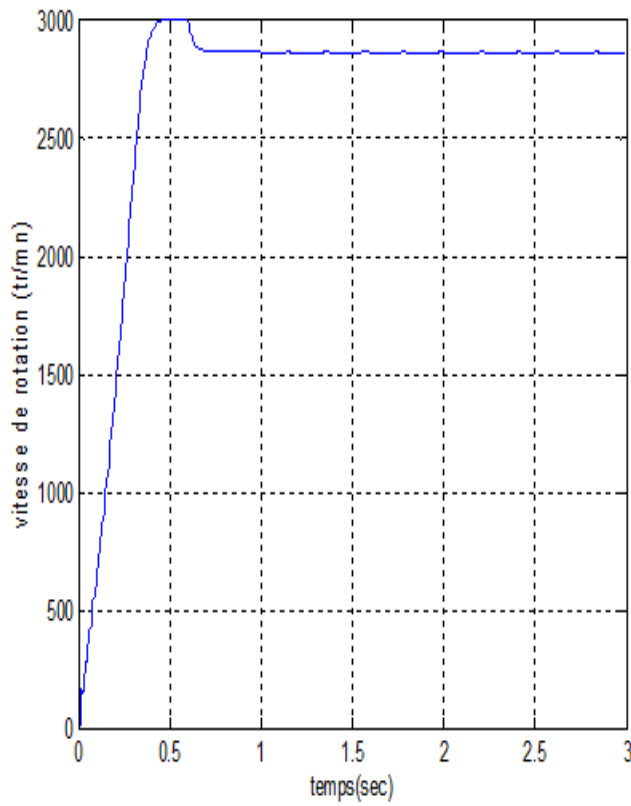
a) Couple électromagnétique



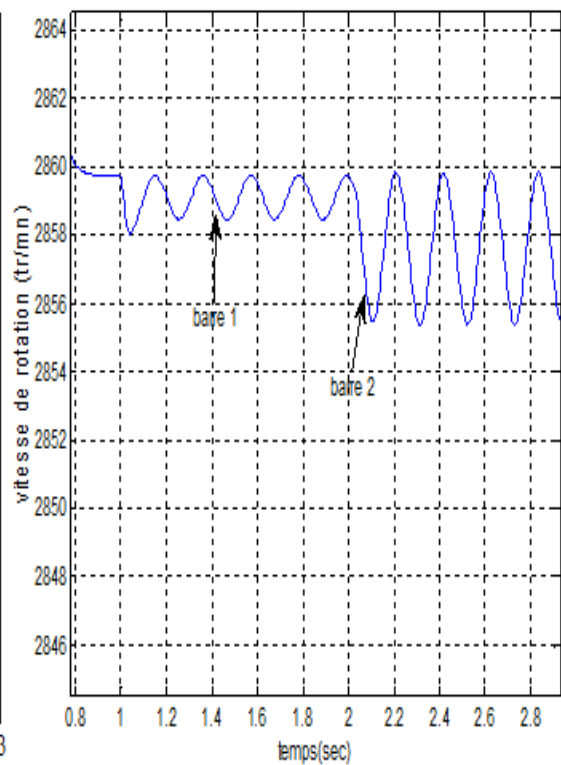
Agrandissement du couple



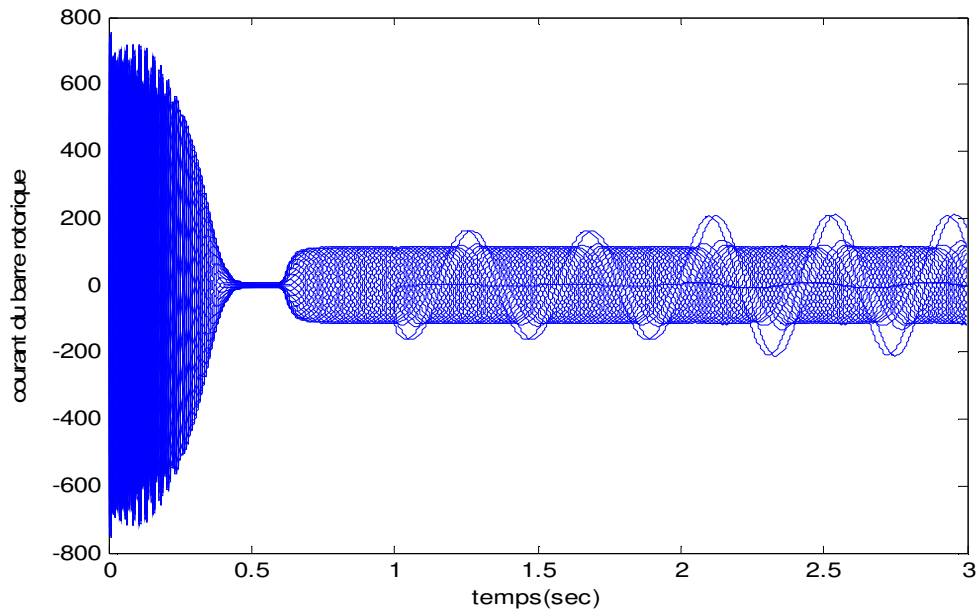
b) Courant statorique



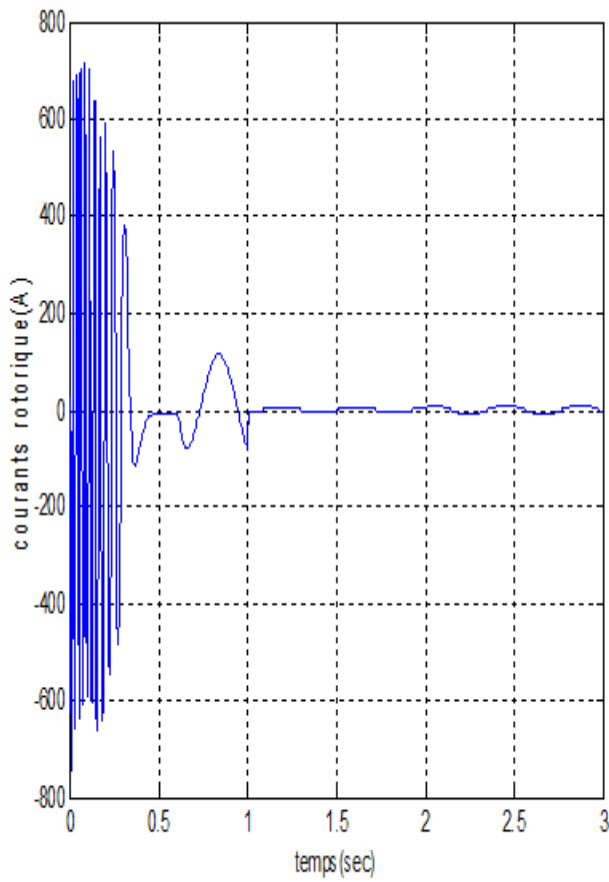
c) Vitesse de rotation



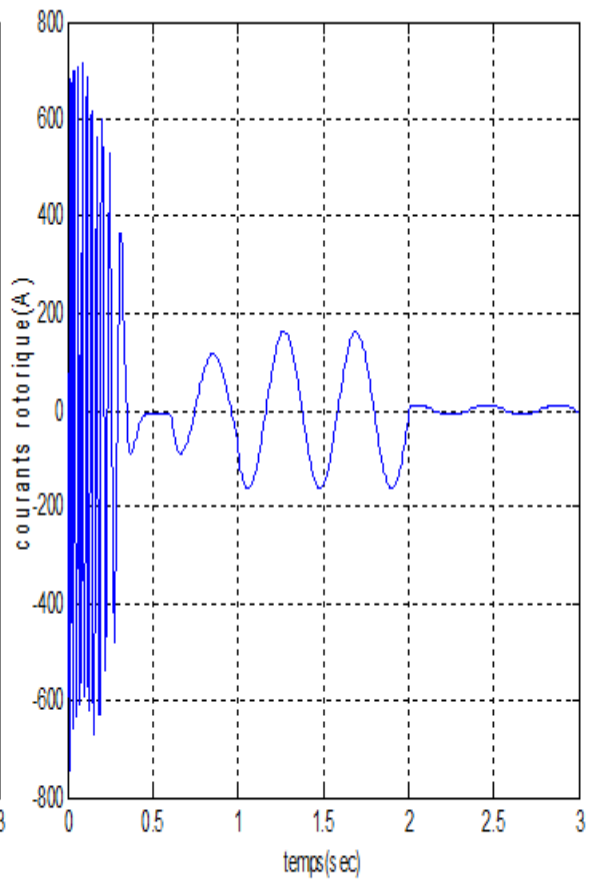
agrandissement de vitesse



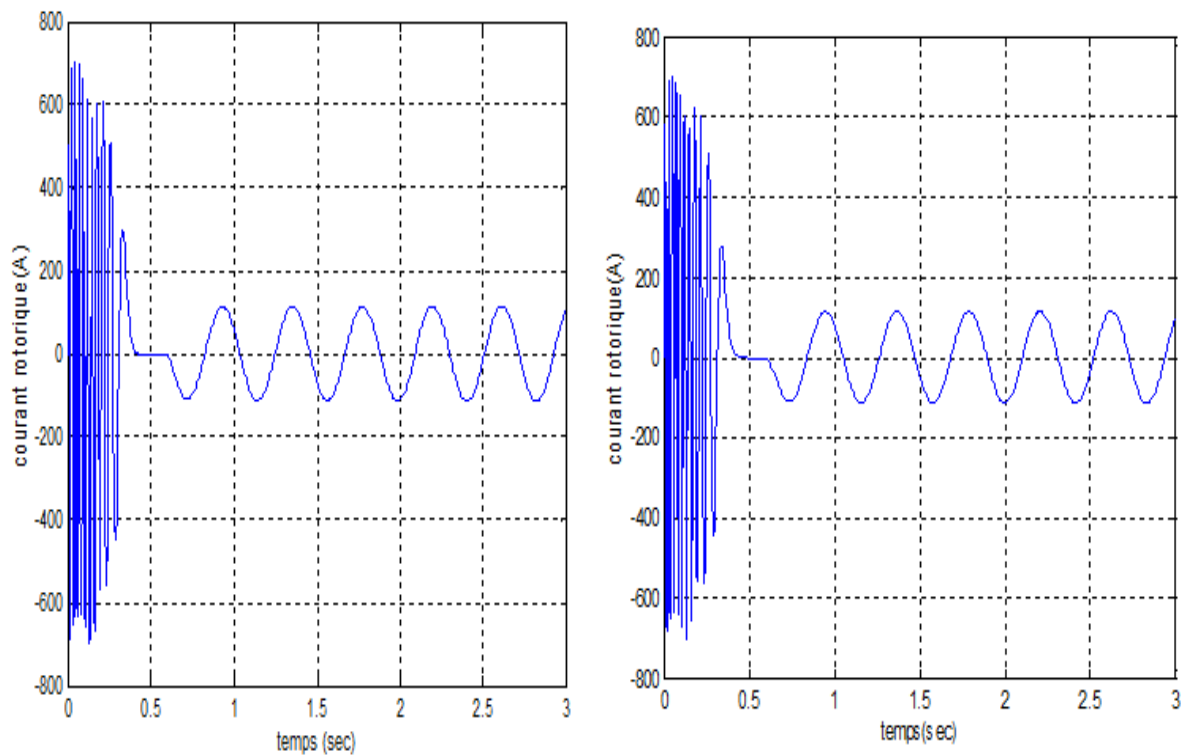
d) Courants des barre rotorique



Courants de la barre 1



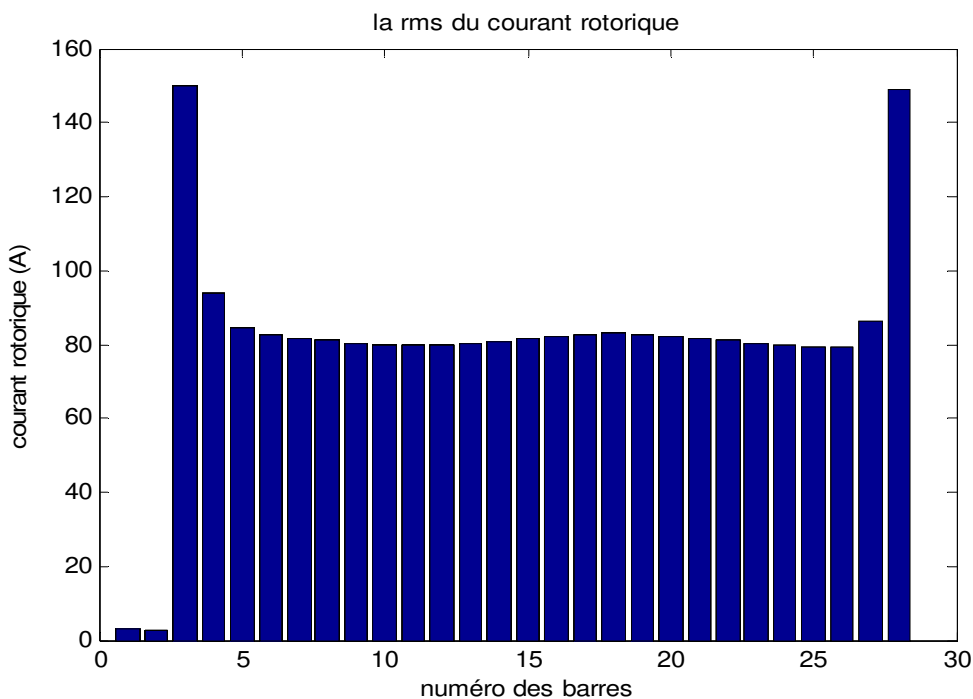
Courant de la barre 2



Courant de la barre 7

Courant de la barre 8

e) Comparaisons entre les courants des barres 1,2 et 7,8



f) Courant efficace rotorique

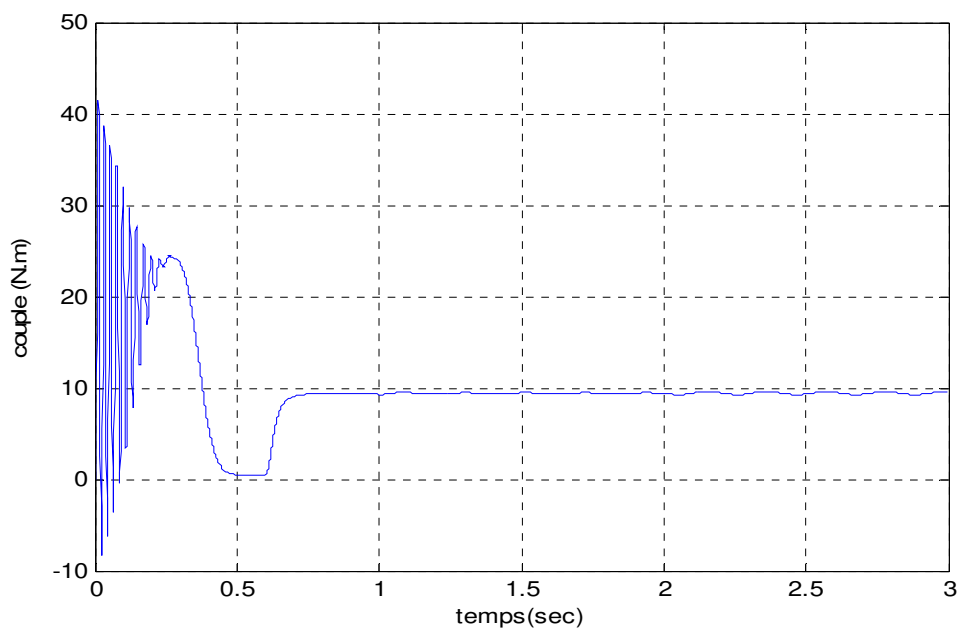
Figure III.7 : simulation avec le modèle global, en charge $C_r = 9 \text{ N.m}$ avec rupture de deux barres adjacent (1 et 2), à partir de $t=1\text{s}$

- **Interprétation des résultats :**

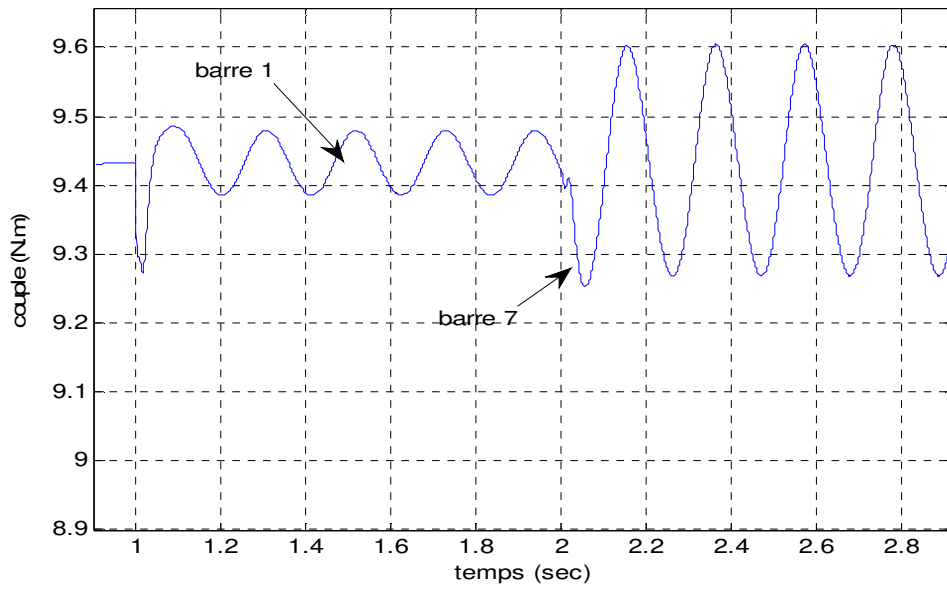
- On remarque dans la figure du couple électromagnétique (a) une augmentation de l'amplitude des ondulations après la rupture de la barre 1, et des ondulations plus grandes que les premières après la rupture de la barre 2.
 - la figure (b) permette de vérifier la modulation de l'enveloppe du courant 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 (c) 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 (d) illustre les courants de toutes les barres rotorique, on peut remarquer que la cassure des barres 1 et 2 affecte sur les ondulations des courants, et la configuration des courants 7 et 8 dans la figure (e) ne change pas par rapport à l'état sain
- Sur la figure (f) on a représenté les valeurs efficaces des courant dans les barres du rotore. On remarque que les barres adjacentes au défaut conduisent plus de courant (environ de 150 A), ce qui entraîne une surchauffe de ces barres et provoque un vieillissement accéléré du moteur.

c) Cassure de deux barres espacées

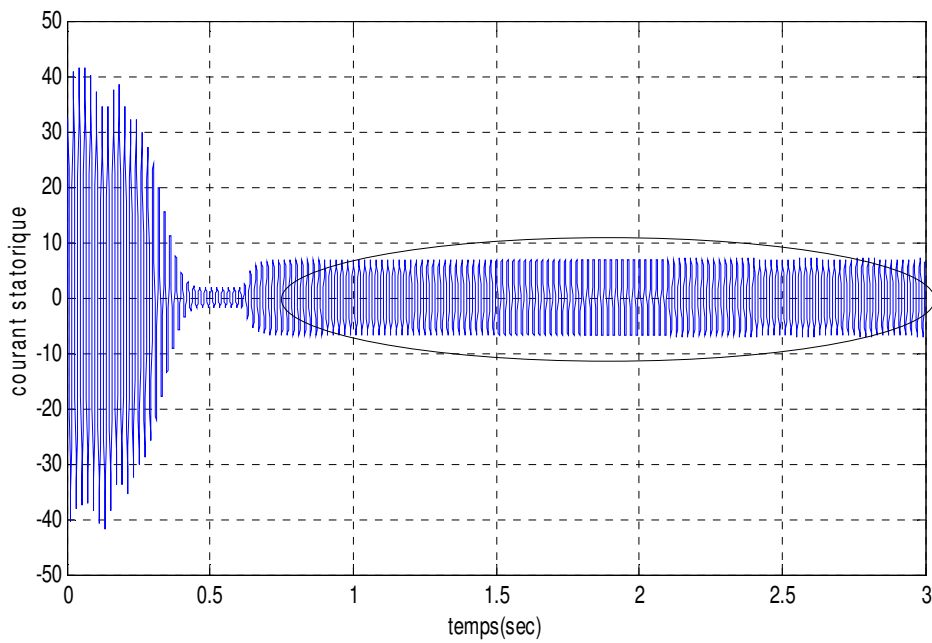
De même manière que la précédente, à partir de $t=1s$ on simule la rupture de la première barre et à l'instant $t=2s$ on simule la rupture de la septième barre.



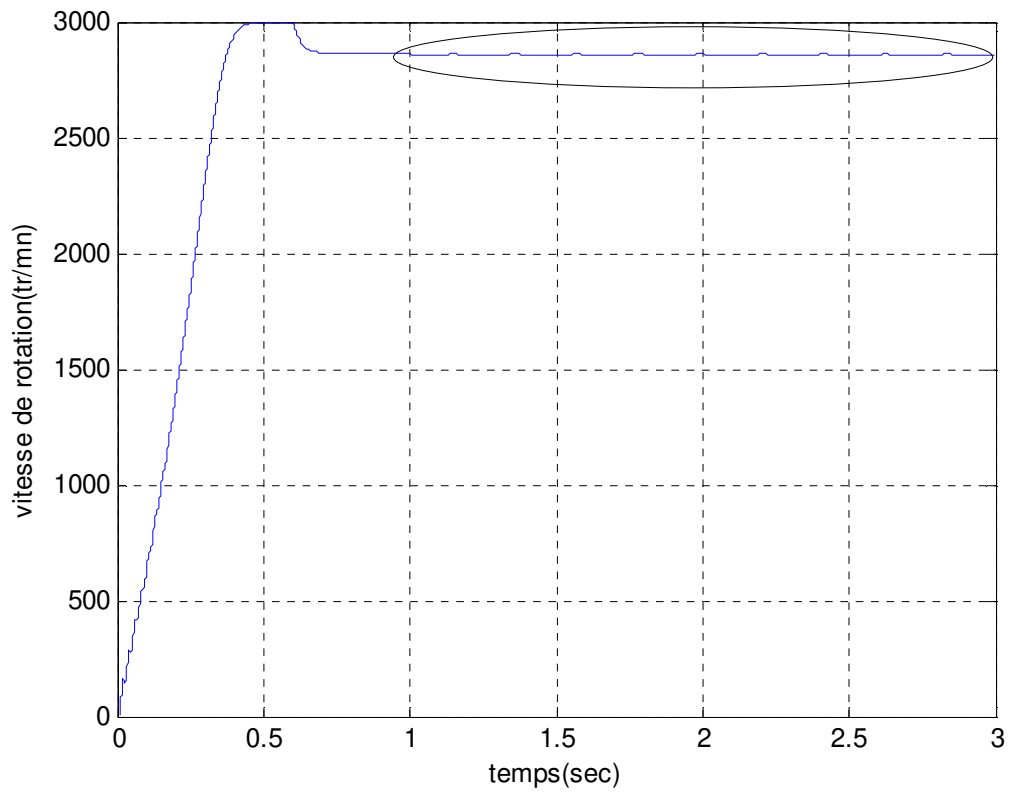
a) Couple électromagnétique



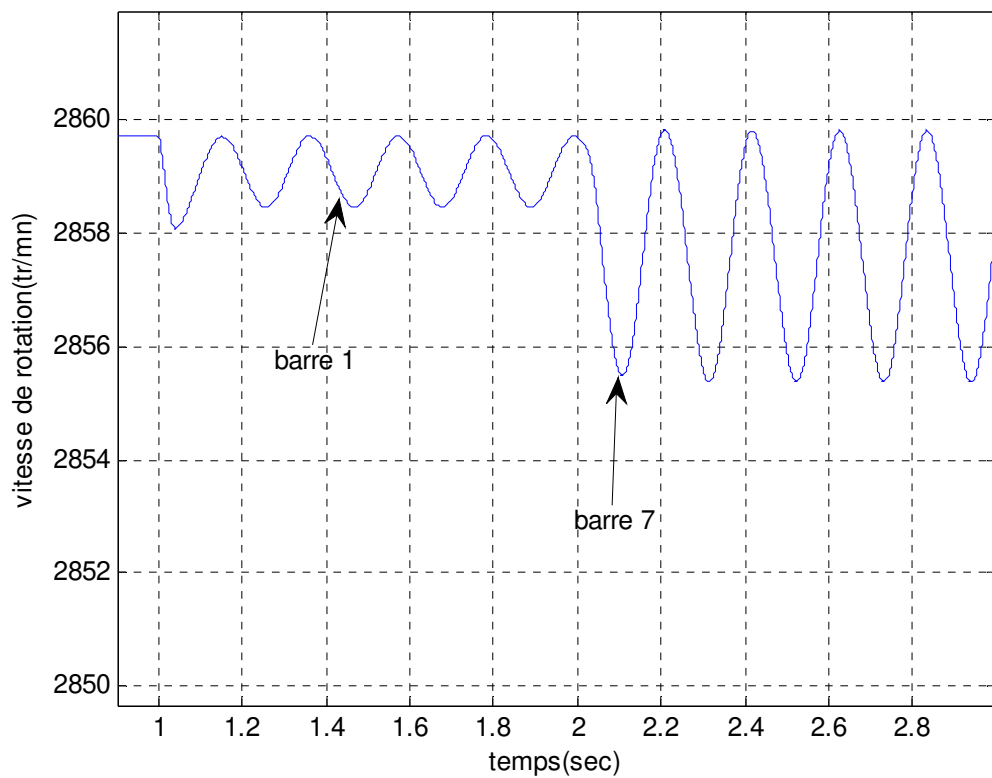
Agrandissement du couple



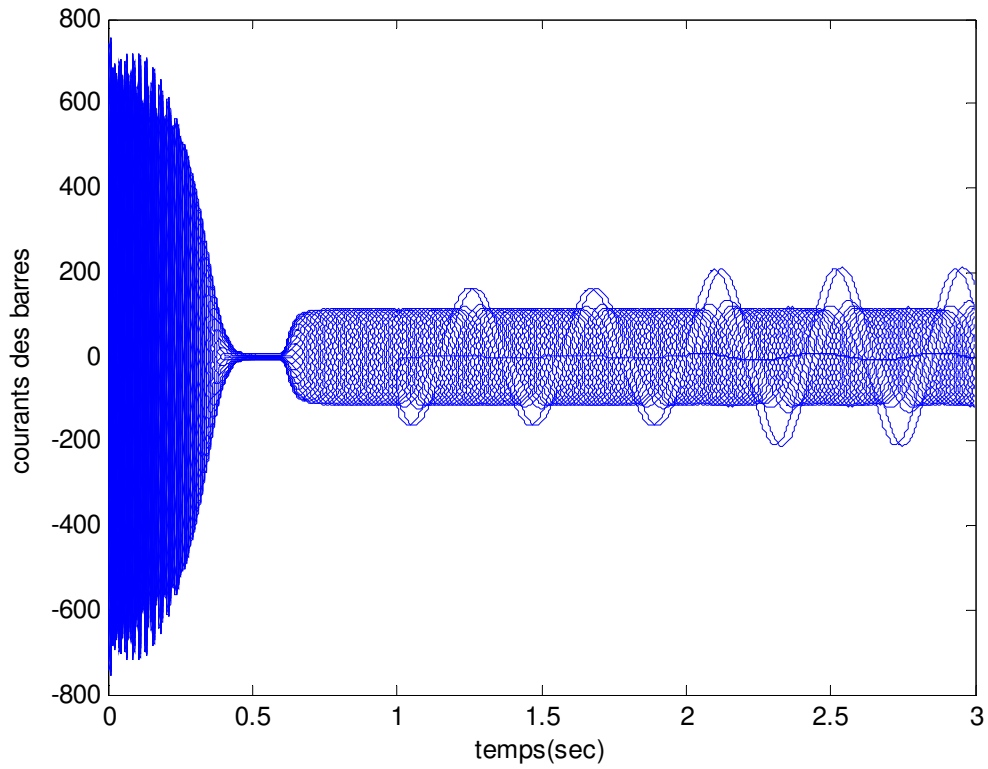
b) Courant statorique



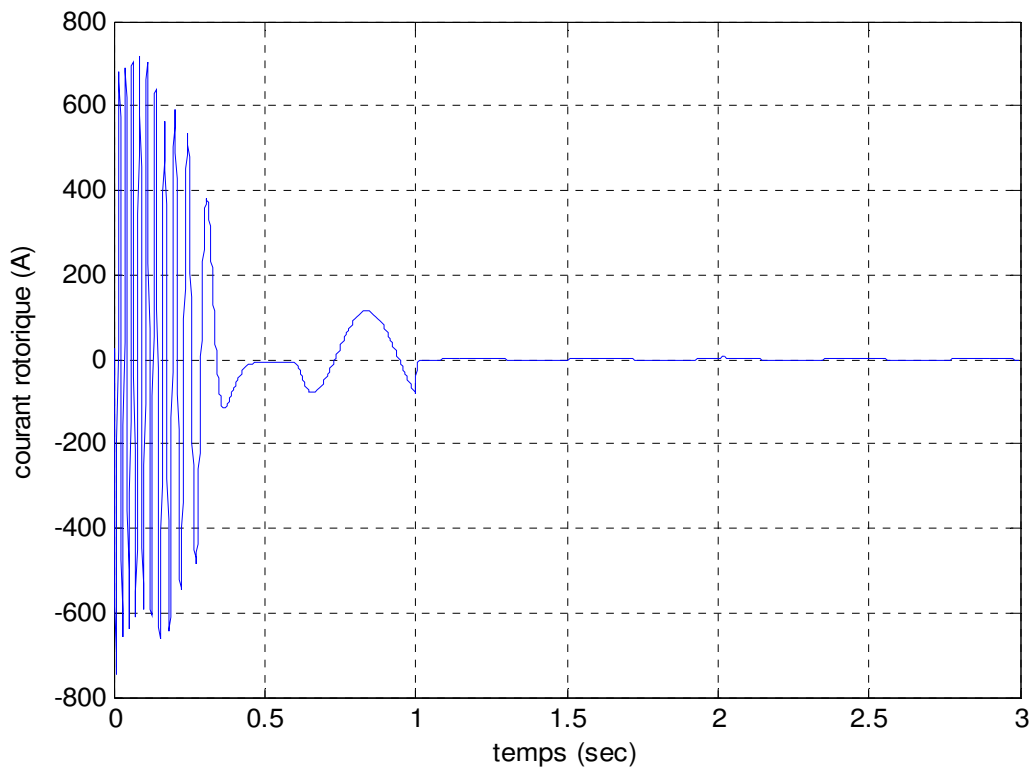
c) Vitesse de rotation



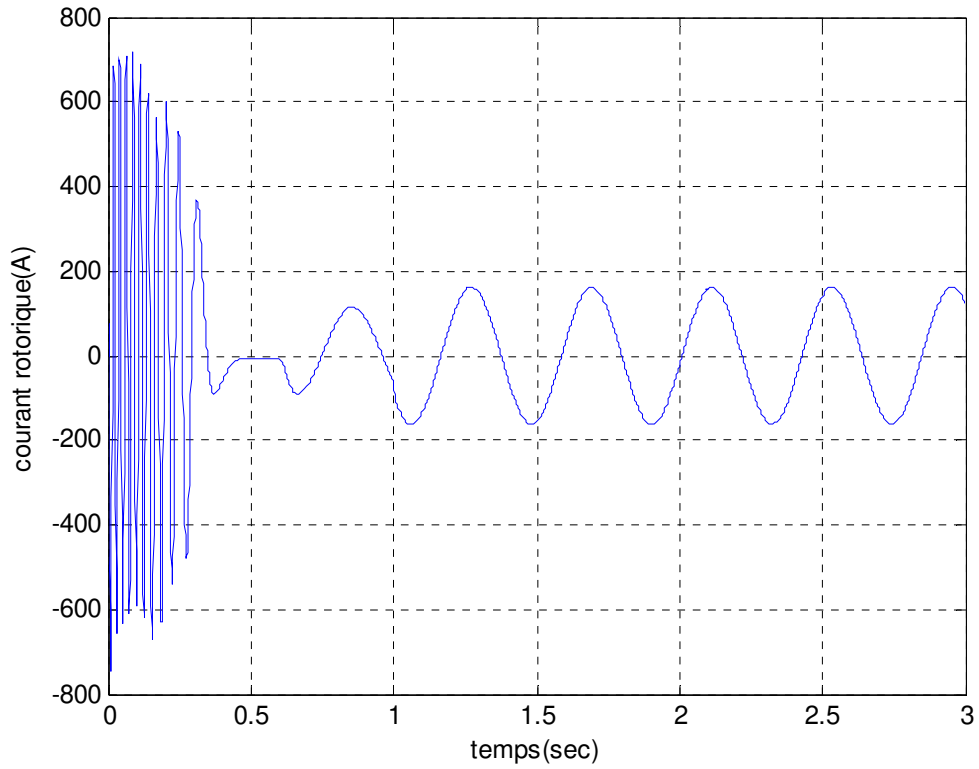
agrandissement de vitesse



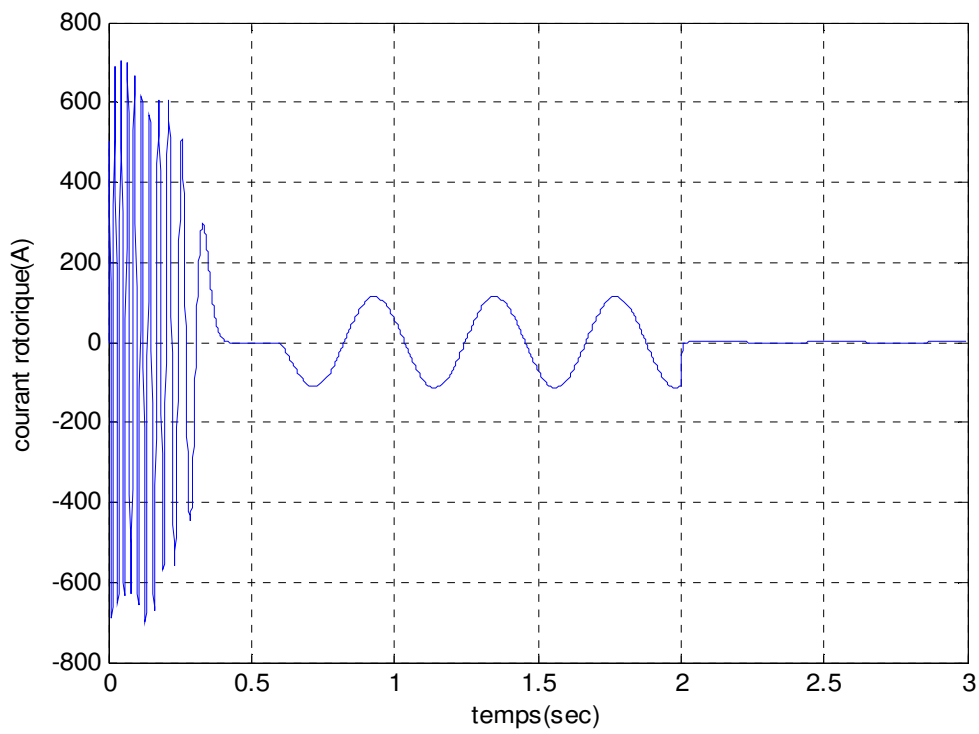
d) Courants des barre rotorique



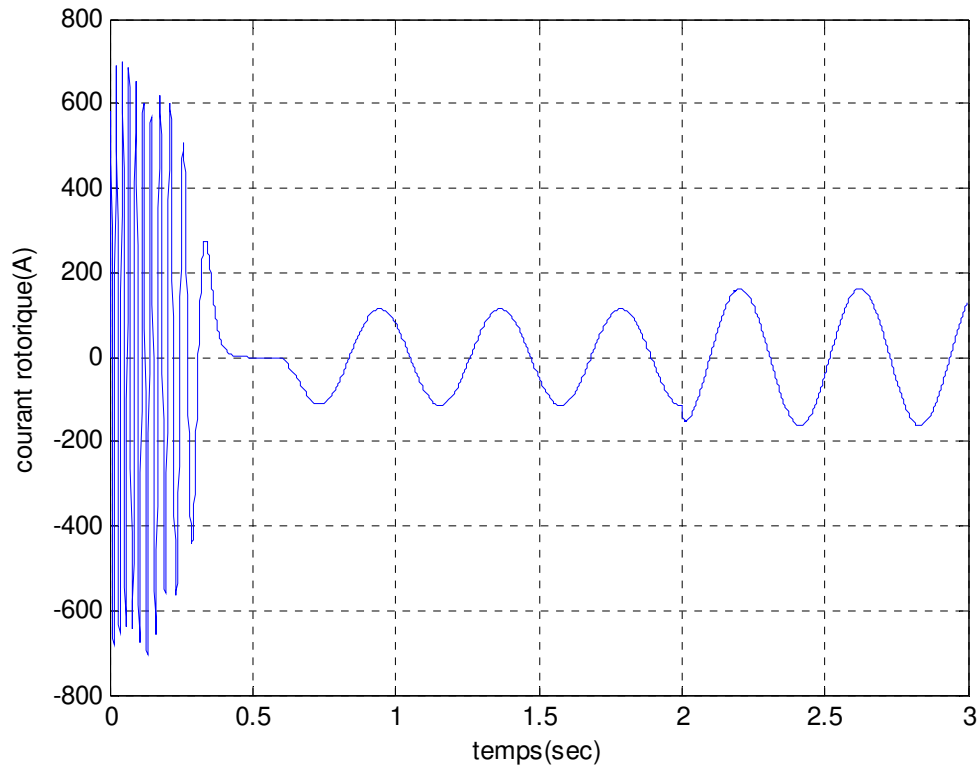
e) Courants de la barre 1



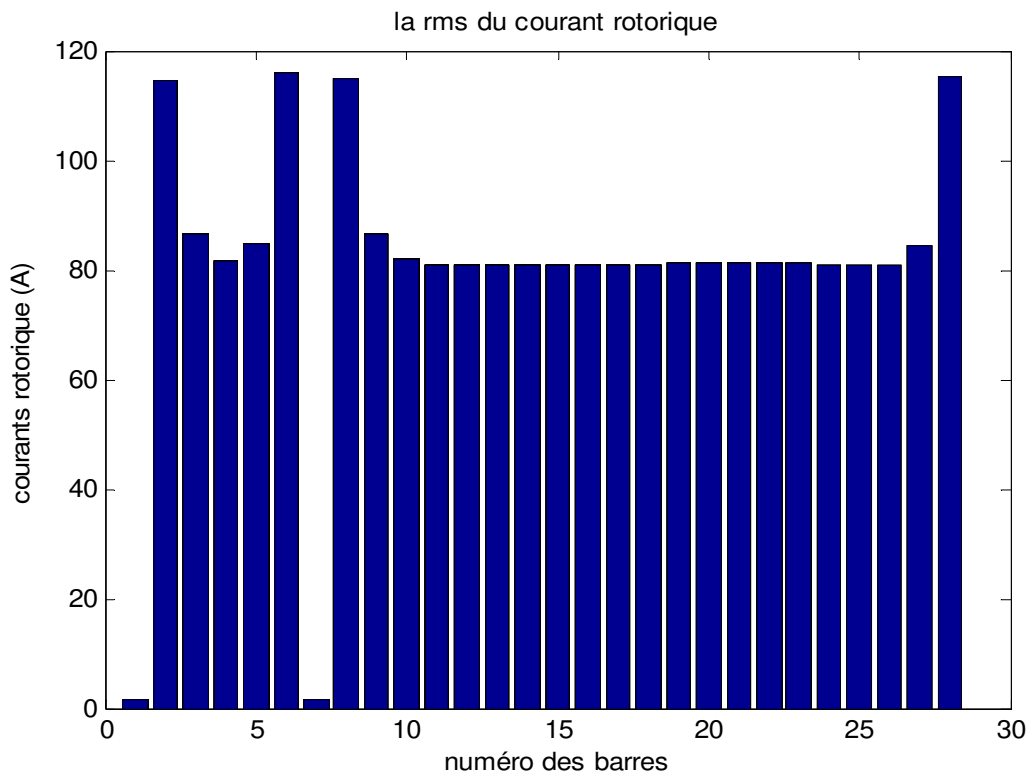
f) Courants de la barre 2



g) Courants de la barre 7



h) Courants de la barre 8



i) Courant efficace rotorique

Figure III.8 : simulation avec le modèle global, en charge $C_r = 9 \text{ N.m}$ avec rupture de deux barres espacés (1 et 7), à partir de $t=1\text{s}$

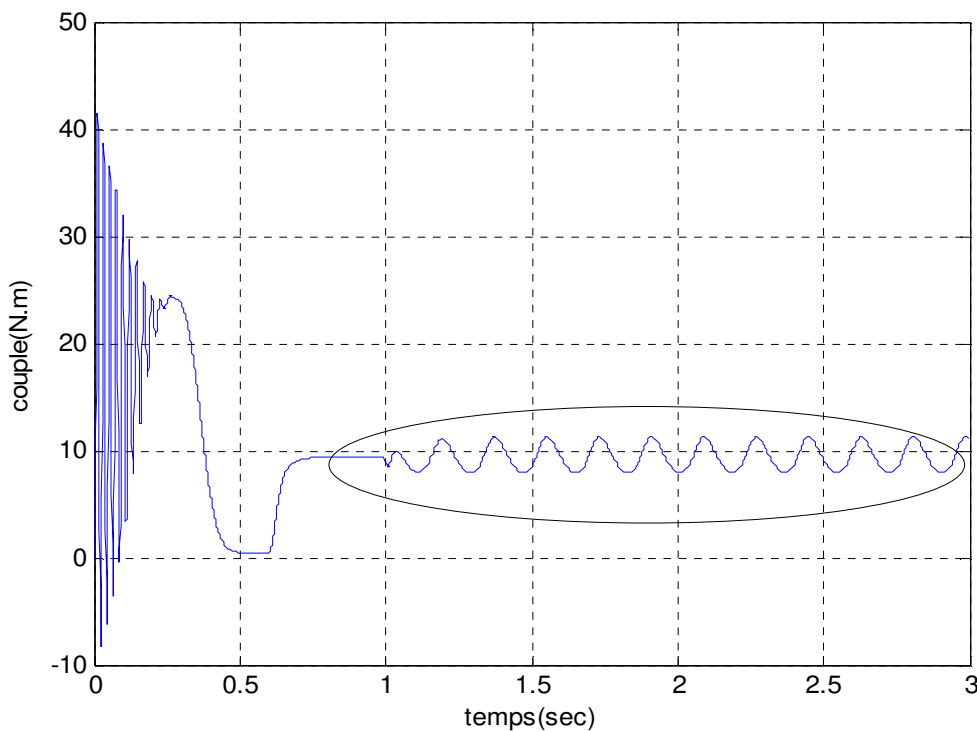
• Interprétation des résultats :

D'après la figure(III- 2) on constate que:

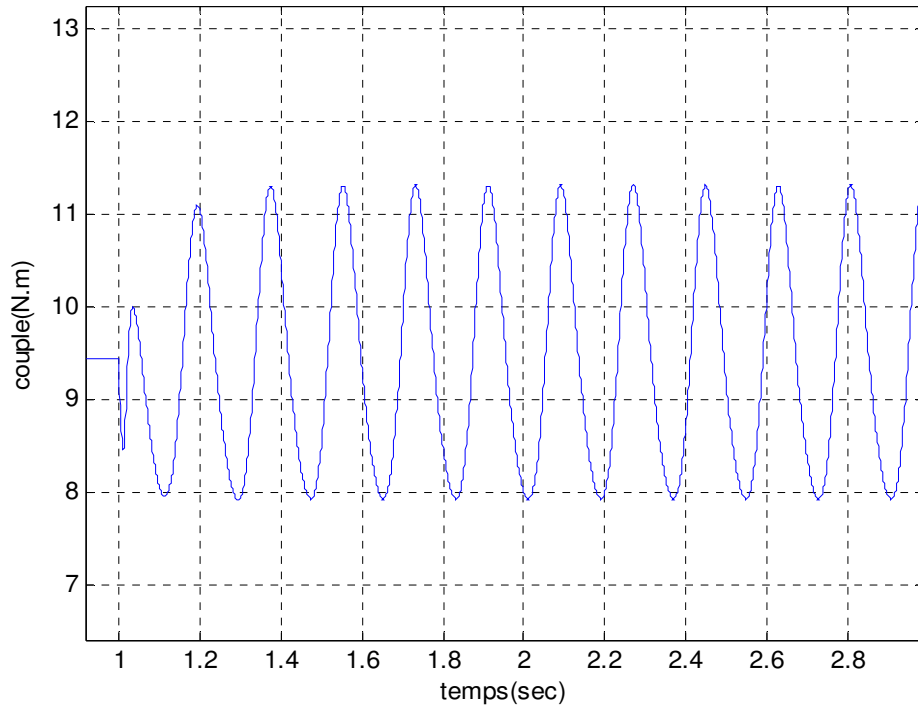
- Des oscillations apparaissent sur le couple électromagnétique et la vitesse de rotation ainsi que d'une modulation d'amplitude sur la courbe du courant statorique , ces oscillations augmentent sensiblement avec le nombre de barres cassées et leurs position (espacées ou adjacentes), la valeur moyenne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

d) Rupture d'une portion d'anneau

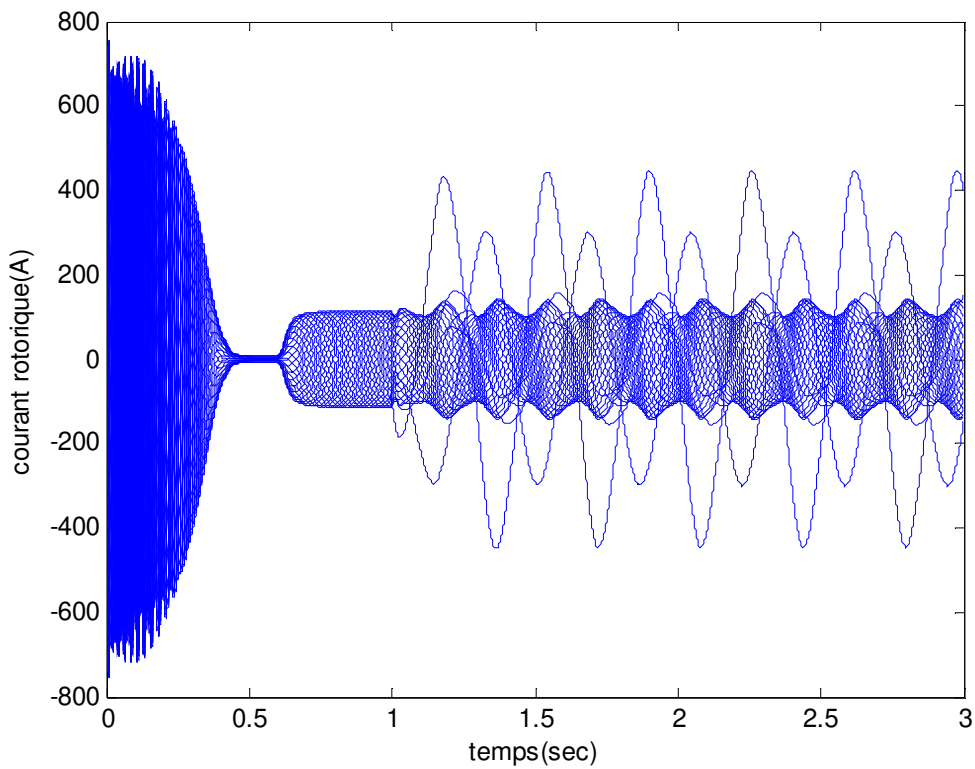
A $t=1s$ on simule la rupture de portion d'anneau



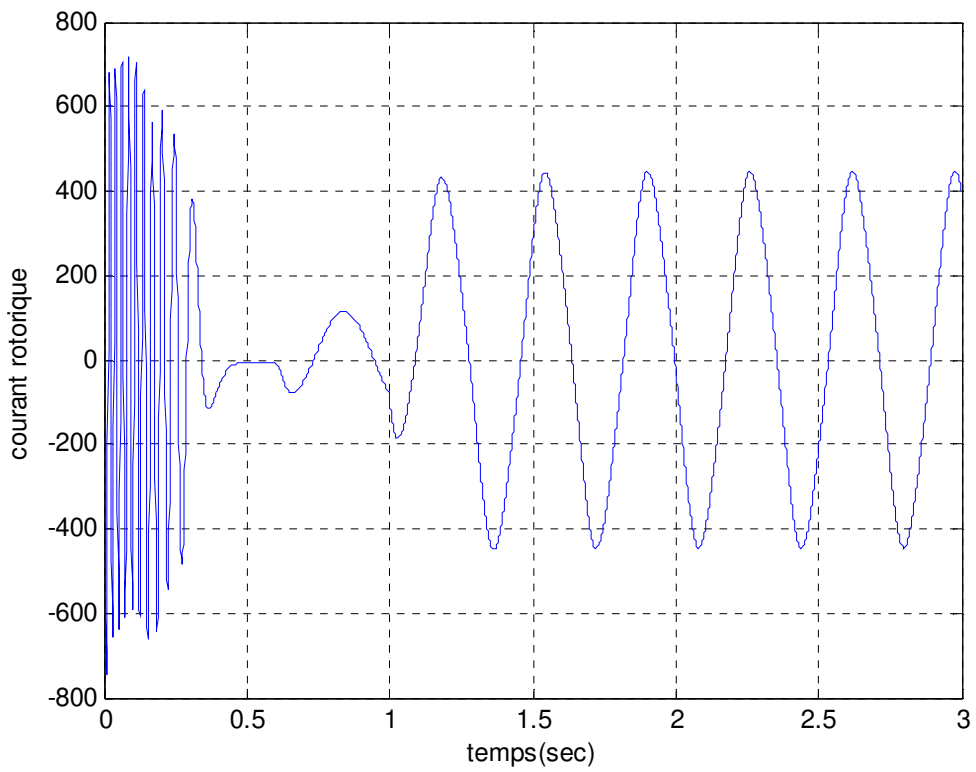
a) Couple électromagnétique



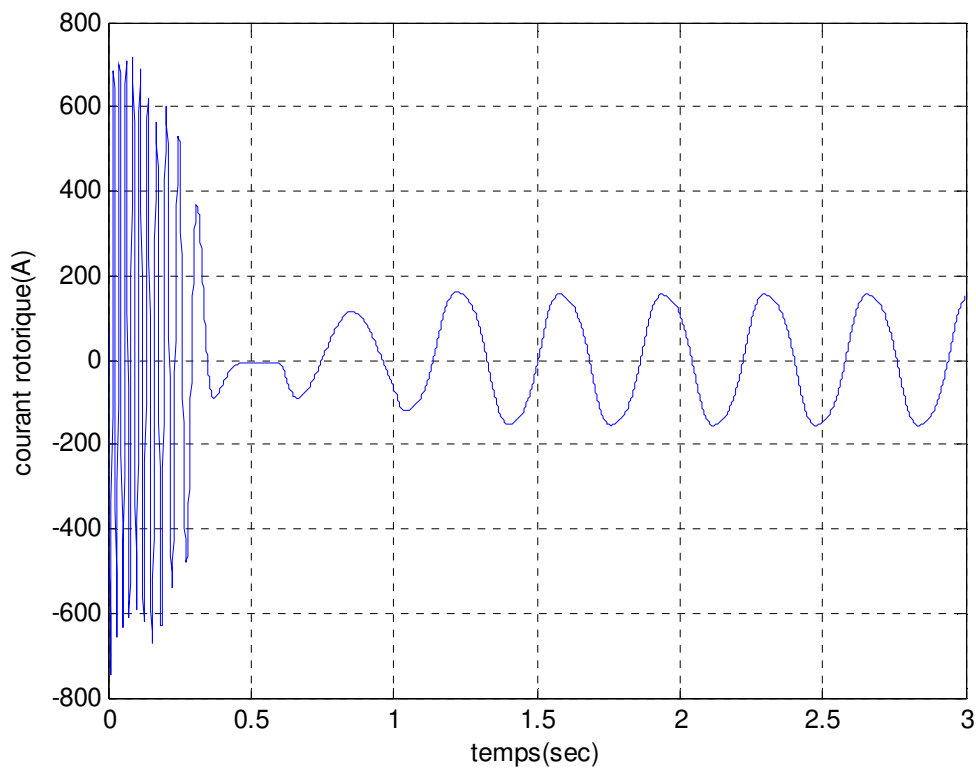
Agrandissement du couple



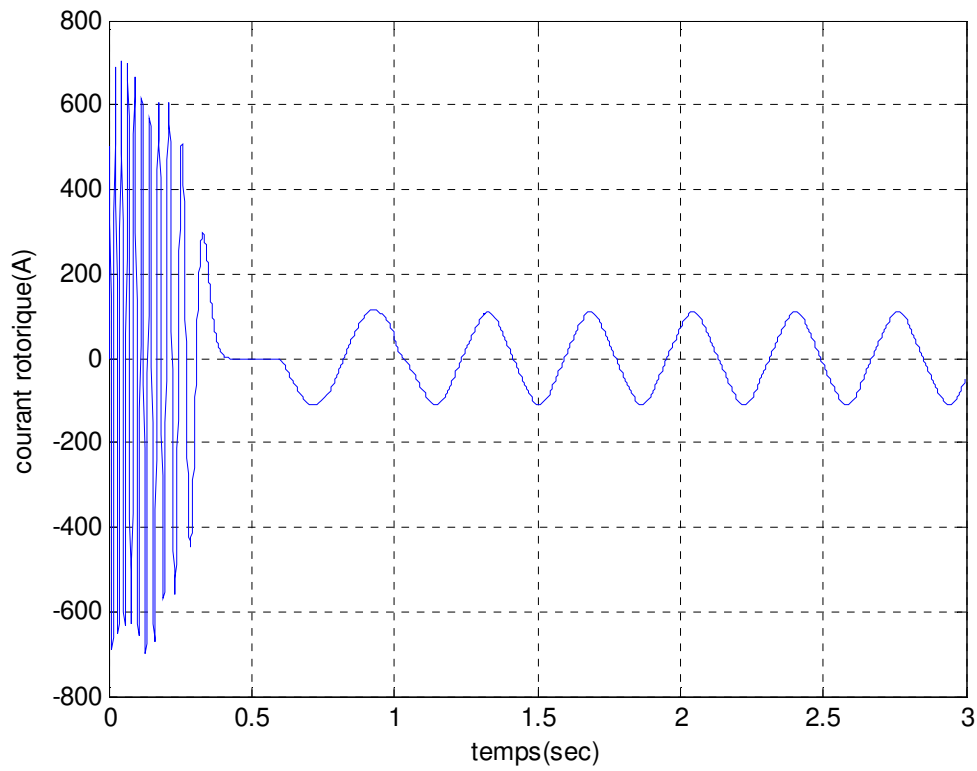
b) Courant des barres rotorique



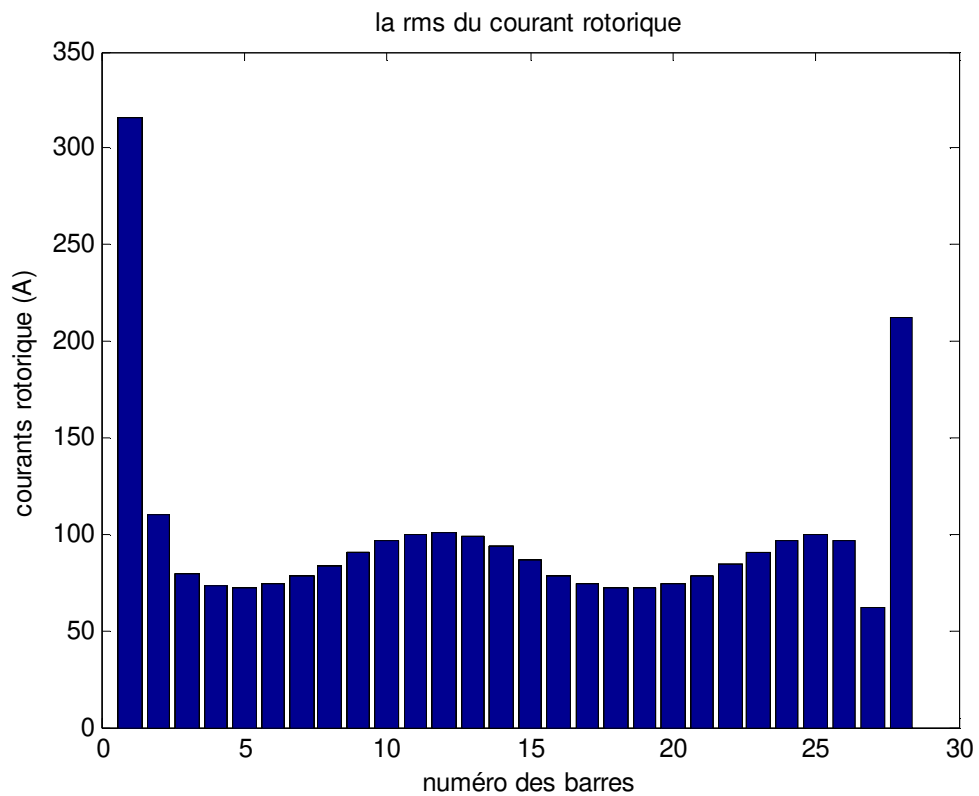
e) Courant de la barre 1



d) Courant de la barre 2



e) Courant de la barre 7



f) Courant efficace rotorique

Figure III.9 : simulation avec le modèle global, en charge $C_r = 9$ N.m avec rupture d'anneau

- **Interprétation des résultats :**

La figure III-9 illustre l'effet de la cassure de portion d'anneau sur les performances de la machine.

- Des oscillations apparaissent sur le couple et la vitesse de rotation et nous remarquons que leur comportement est globalement analogue à celui qui apparaît dans les cas de la cassure de barre.
- On remarque sur la figure (b) qui représente le courant des barres rotorique pour la rupture d'une portion d'anneau , la modulation d'amplitude qui s'accroît selon la position de portion
- La rupture de la portion influe sur les courants efficaces des barres du rotor c'est à dire provoque un déséquilibre, on remarque que le courant dans la barre 1 atteint une valeur importante ce qui traduit par des pertes Joule plus importantes.

III-3 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une simulation d'un moteur asynchrone triphasé à cage, pendant les différentes conditions de fonctionnement (en charge, variations de rupture de barres et portion d'anneau). 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, on peut constater que ces oscillations sont proportionnelles 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 la cassure de deux barres adjacentes est plus grande par rapport à deux barres espacées. On remarque aussi que le temps du régime transitoire augmente avec la sévérité du défaut de barre.

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 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

| | |
|--|----|
| IV -1 Introduction..... | 47 |
| IV-2 Analyse spectrale | 47 |
| 2-1 Méthodes non- paramétriques..... | 48 |
| 2-2 Méthodes paramétriques..... | 48 |
| IV-3 Résultat de simulation d'analyse spectrale..... | 48 |
| IV-4 Effet du nombre de barres cassées sur les harmoniques (1±2kg)fs..... | 52 |
| IV-5 Ruptures des portions d'anneaux de court-circuit..... | 54 |
| IV-6 Conclusion..... | 56 |

IV-1- Introduction

Pour effectuer le diagnostic dans une installation, les opérateurs de maintenance analysent 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 défauts dans les machines électriques, en particulier les ruptures de barres au rotor, la dégradation des roulements, les excentricités, les court-circuit dans les bobinages. Les méthodes d'analyse spectrale sont principalement utilisées dans les machines directement alimentées par le réseau et fonctionnant en régime permanent [BEL 05] [ABE 02]

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. .

Nous présenterons dans ce chapitre, l'analyse spectrale du courant statorique en utilisant La transformé de Fourier rapide (FFT). Nous montrerons comment cette méthode permet de déterminer le contenu fréquentiel du courant statorique, et donc de retrouver les raies associées aux défauts de barres ou de portions d'anneaux de court circuit. L'influence du nombre de barres cassées (ou portions d'anneaux), leurs mutuelles position, ainsi que la variation du glissement, sur les raies caractérisant le défaut sera présentée

IV-2 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 [GHO 05].

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

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

IV-2-1 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.
- soit par le calcul du spectre sur la fonction d'auto corrélation [BEL 05] [ABE 02].

IV-2-2 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 [BEL 05]

IV-3 Résultat de simulation d'analyse spectrale

L'apparition du défaut se manifestera dans le courant statorique par la modulation de son amplitude à la fréquence 2gfs. Nous avons visualisé le courant statorique en régime permanent dans l'état sain (Figure IV.1), puis avec une barre cassée (figure IV.2).

D'après ces figures, 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.

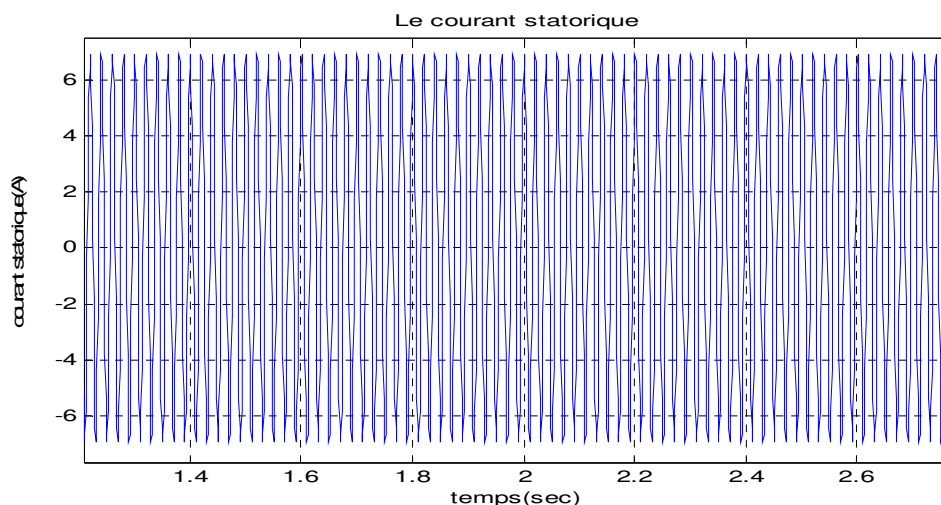


Figure IV.1 : Le courant statorique en régime permanent pour un moteur sans défaut.

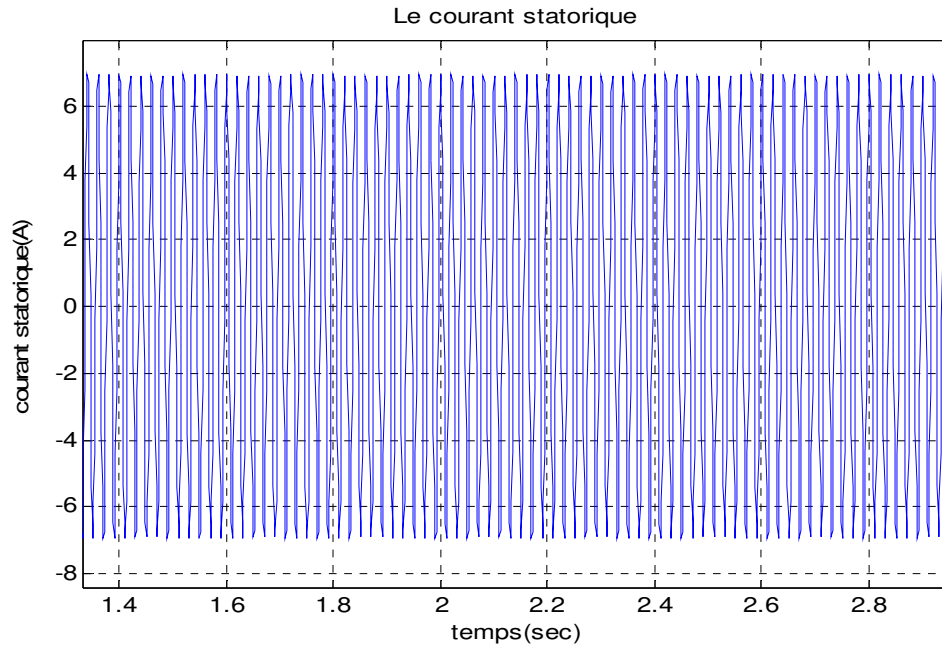


Figure IV.2 : Le courant statorique en régime permanent pour un moteur avec une barre cassée.

Pour mieux discerner les bandes latérales, il faudrait que l'acquisition du signal ainsi que son analyse, soient faites sous certaines conditions qui sont nécessaires.

- Nous avons effectué une simulation pour une machine avec une barre cassée en pleine charge, soit un glissement de 4.7%;
- La durée de l'acquisition est déterminée par la fréquence d'échantillonnage F_e ainsi que la résolution fréquentielle souhaitée, $\Delta f = F_e/N$;

Supposons par exemple, une tranche du signal statorique contient 210 points avec $F_e=1000\text{Hz}$, la résolution obtenue est 4.7Hz. Cependant, comme la montre la figure IV.3, on n'observe aucune raie associée au défaut.

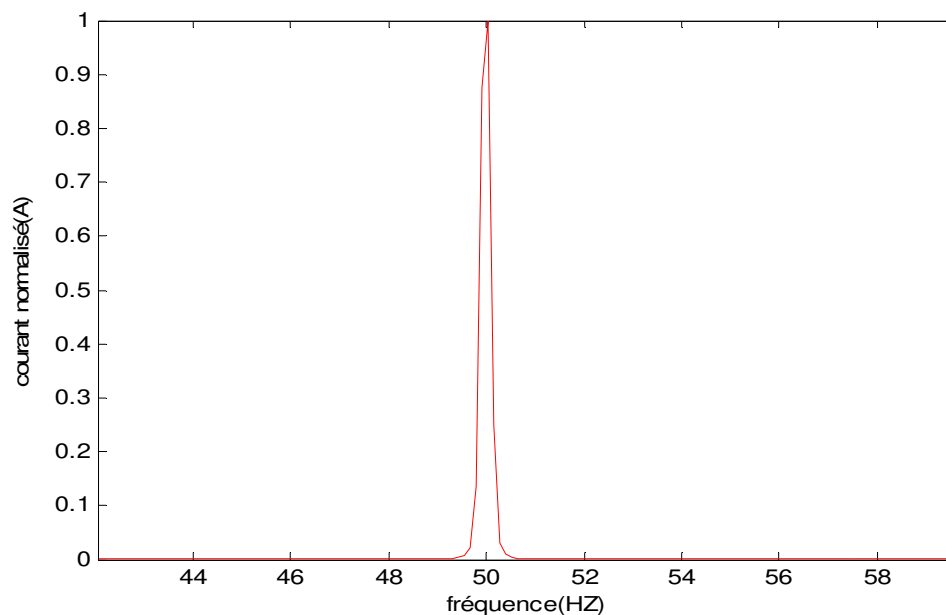


Figure IV.3 : Spectre du courant statorique obtenu avec une résolution de 4.7Hz, pour un moteur avec une barre cassée

- Les fréquences qu'on cherche dépendent du glissement. Ce qui implique que la résolution du spectre doit séparer les fréquences $(1 \pm 2g)fs$ pour des valeurs faibles de glissement.

Reprenons maintenant l'exemple précédent, avec une durée d'acquisition de 10 secondes, (10000 points) ce qui implique que : $\Delta f = f_e/N = 0.1$ Hz, ce qui est nettement suffisant pour séparer les raies qui sont à une distance de $\pm 2gfs = 4.7$ Hz (figure IV.4, IV.5 et IV.6).

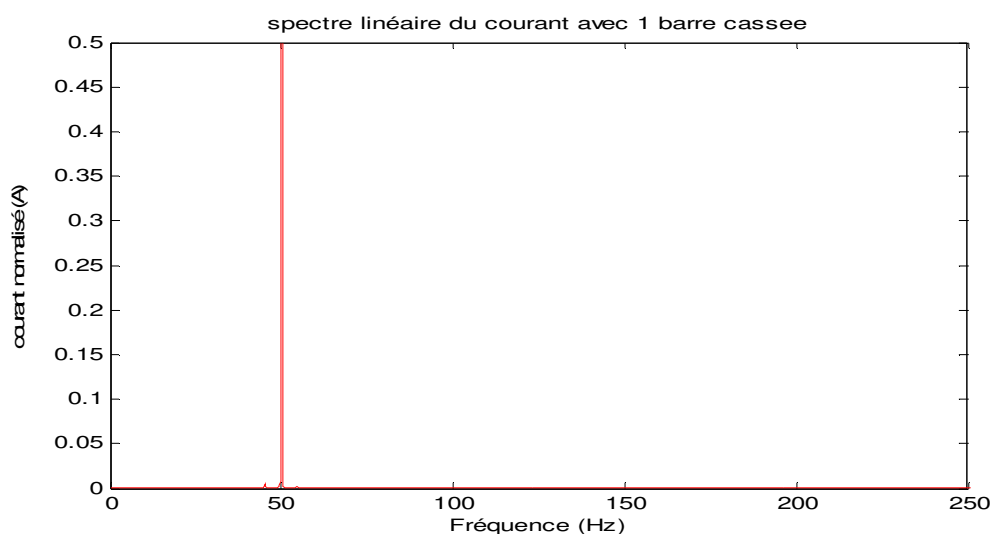


Figure IV.4 : Spectre linéaire du courant statorique avec une résolution de 0.1Hz et pour une barre cassée

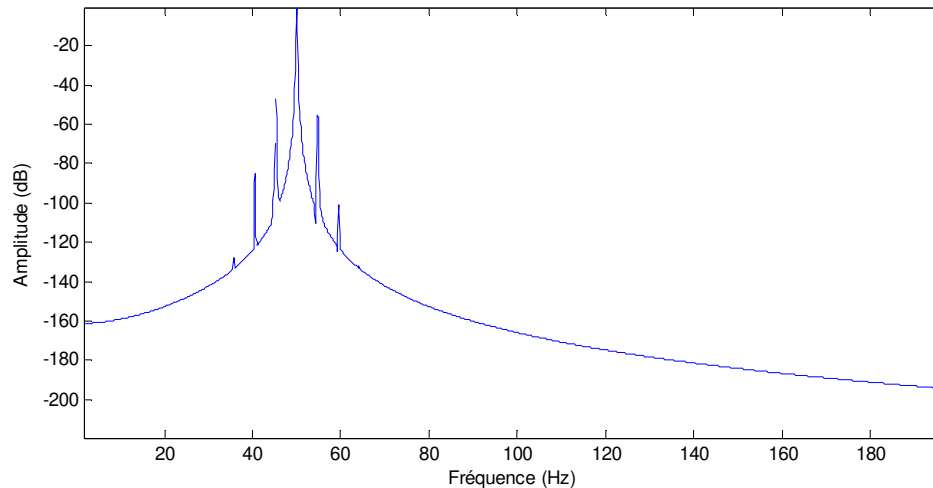


Figure IV.5 : Spectre logarithmique du courant statorique pour une barre cassée, avec une résolution de 0.1Hz.

En comparant les figures IV.4 et IV.5, nous remarquons que le spectre logarithmique fait apparaître des informations, qui ne sont pas décelables sur le spectre linéaire. On peut effectivement, identifier sur la figure IV.6 les harmoniques caractérisant le défaut de barres rotoriques, à la fréquence 45.29Hz et 54.81Hz.

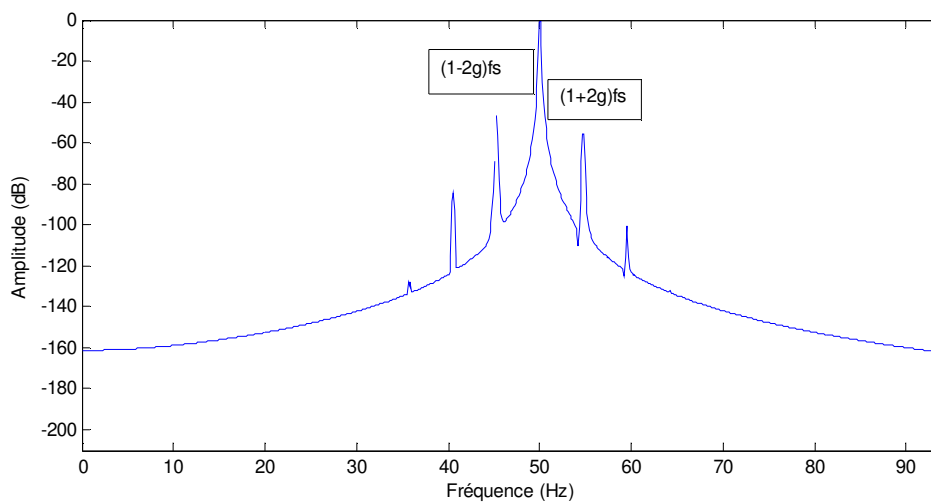


Figure IV.6 : Spectre logarithmique du courant statorique pour un moteur en charge avec une barre cassée avec une résolution de 0.1Hz. (Agrandissement autour du fondamental)

IV-4 Effet du nombre de barres cassées sur les harmoniques (1 ± 2 kg)fs

La figure IV.7, représente le spectre du courant statorique d'un moteur sain. C'est évident qu'on n'observe aucune raie latérale. Il est important de noter qu'en réalité, il y a toujours un certain degré d'asymétrie naturelle (de construction) dans le rotor, ce qui engendre l'apparition des raies, mais avec des amplitudes faibles [THO 01].

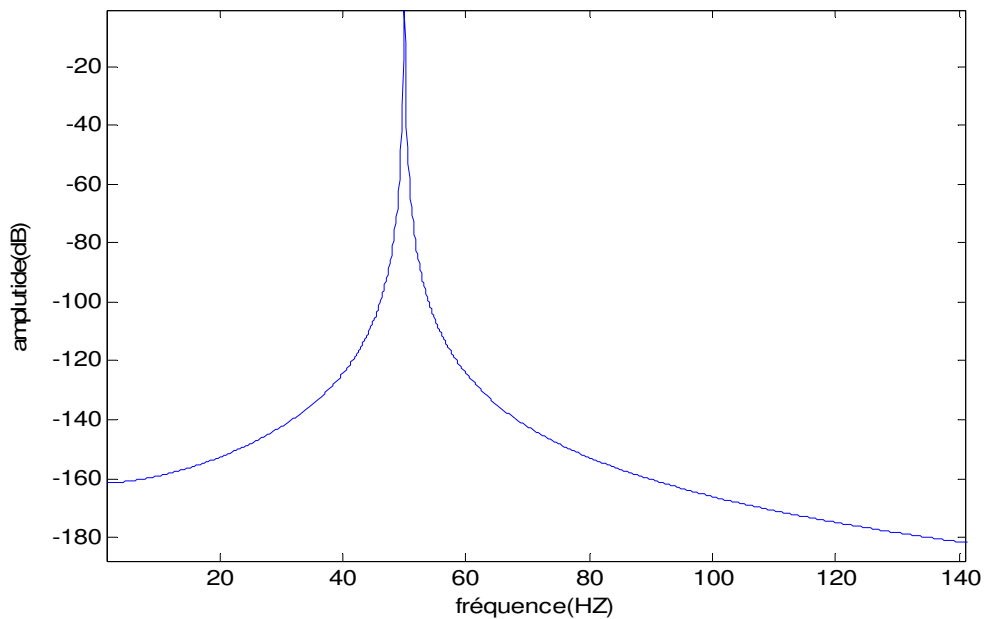


Figure IV.7 : Spectre du courant de la machine saine .

Lorsqu'on introduit une barre cassée, on remarque l'apparition des raies latérales aux fréquences

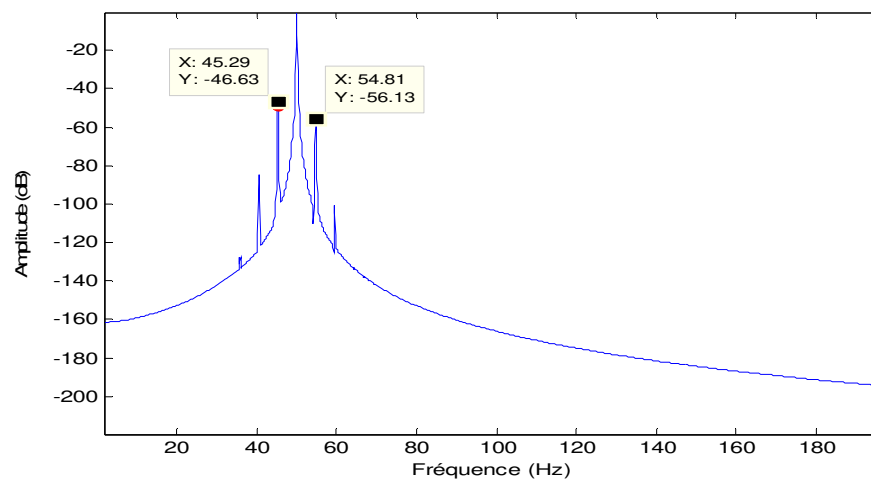


Figure IV.8 : Spectre du courant de la machine avec une barre cassée.

Lorsque une deuxième barre adjacente est rompue, on observe une augmentation de 10.5dB sur la raie $(1-2g)fs$, et une augmentation de 12.04 dB sur la raie $(1+2g)fs$ (figure IV.9). On remarque aussi, l'apparition des raies aux fréquences [40.4 Hz et 59.5 Hz] qui correspondent à $(1\pm 4g)fs$, mais avec des amplitudes faibles [-63.45dB et -80.27dB].

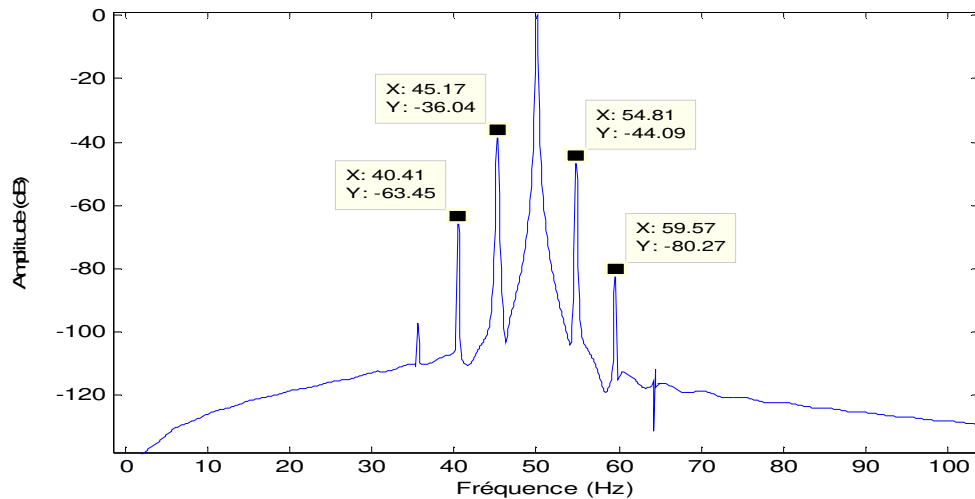


Figure IV.9 : Spectre du courant de la machine avec deux barres adjacentes cassées.

Dans le cas où deux barres non adjacentes sont cassées (les barres 1 et 7). La figure IV.10 montre que les amplitudes des harmoniques $(1\pm 2g)fs$ deviennent moins importantes (-54.32 dB) par rapport au cas de deux barres adjacentes (-36.04 dB), On observe aussi, l'apparition des raies aux fréquences [40.41 Hz et 59.57 Hz] qui correspondent à $(1\pm 4g)fs$, mais avec des amplitudes très faibles [-99.35dB et -113.5dB].

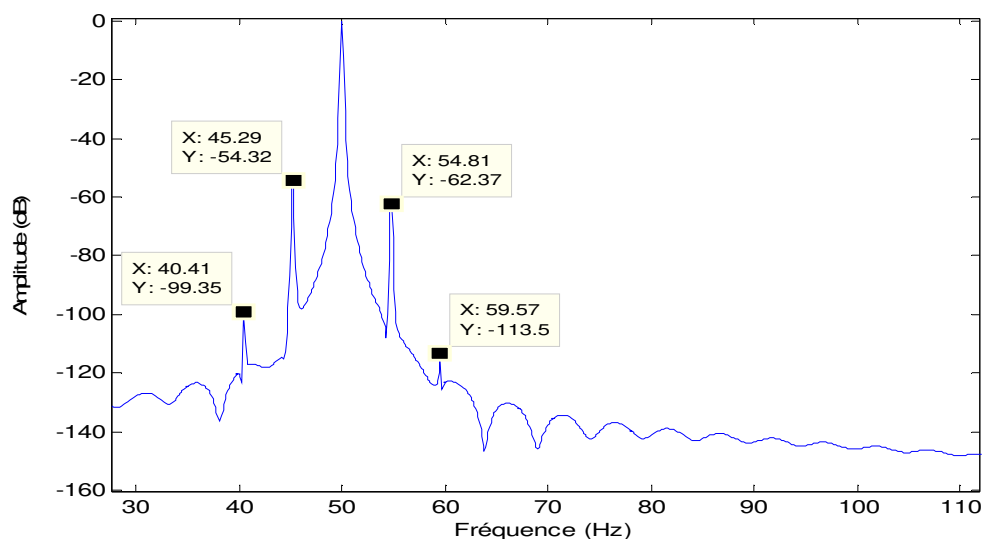


Figure IV.10 : Spectre du courant de la machine avec deux barres espacées est rompue

Le tableau IV.1, résume tout ce qu'on a dit précédemment sur l'effet du nombre de barres cassées .Au vu des résultats des différentes simulations, on peut affirmer que la manifestation des raies $(1\pm 2k)fs$ est un signe de l'existence du défaut et leurs amplitudes indiquent le degré de sévérité du défaut.

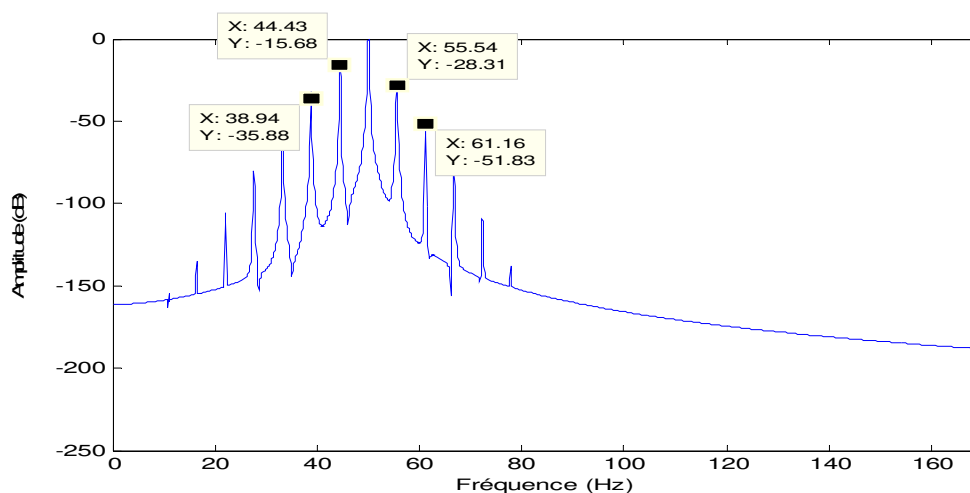
| L'état du moteur | $(1-2g)fs$ | $(1+2g)fs$ | $(1-4g)fs$ | $(1+4g)fs$ |
|--------------------------------|------------|------------|------------|------------|
| Sain | - | - | - | - |
| 1 barre cassée | -46.63 | -56.13 | -84.82 | -100.8 |
| 2 barre cassée (adjacentes) | -36.04 | -44.09 | -63.45 | -80.27 |
| 2 barre cassée (espacées) | -54.32 | -62.37 | -99.35 | -113.5 |

Tableau IV.1 : L'amplitude des composantes $(1\pm 2g)fs$ et $(1\pm 4g)fs$ (en dB) pour différent nombre de barres cassées(**adjacentes** , **espacées**)

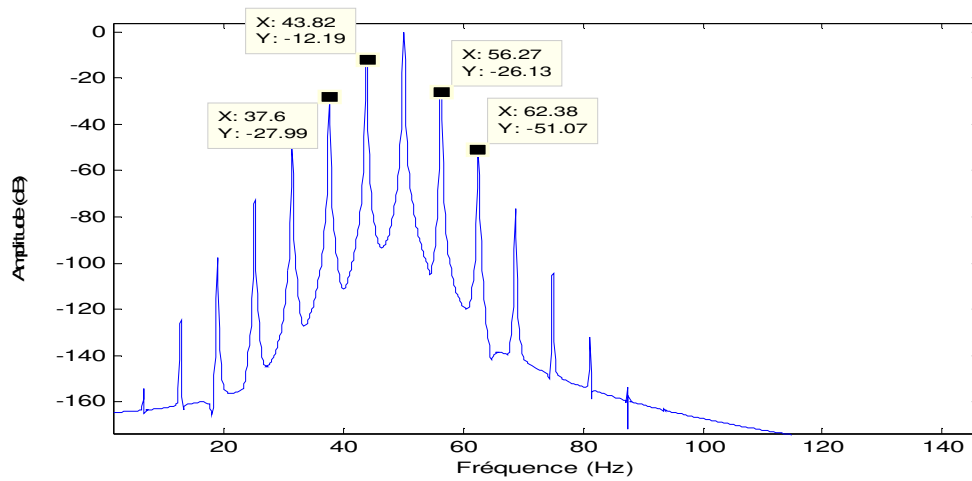
IV-5 Ruptures des portions d'anneaux de court-circuit

Les figures IV.14.a, b et c, représentent le spectre du courant statorique pendant la rupture une portion d'anneau de court-circuit (Figure IV.14.a), puis deux portion adjacente (Figure IV.14.b) et enfin deux portion espacées (Figure IV.14.c).

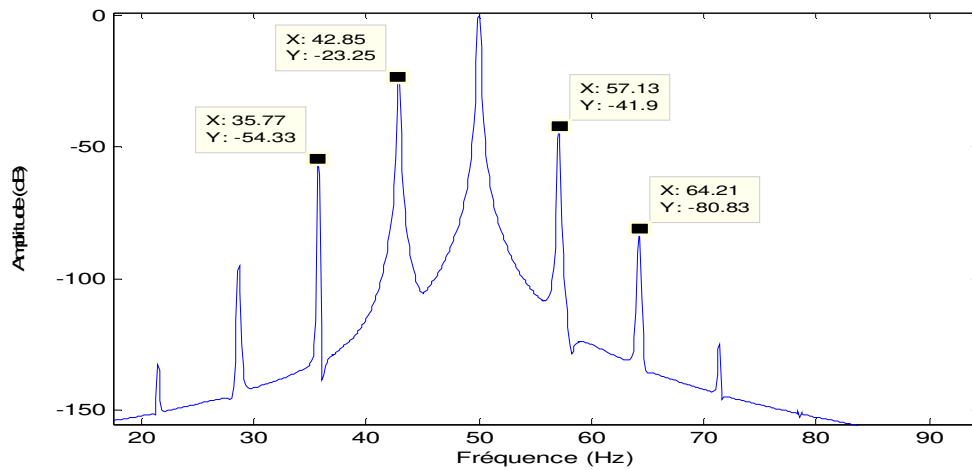
On remarque que les cassures des portions d'anneaux de court-circuit, font apparaître des composantes aux fréquences $(1\pm 2k)fs$. Donc ce type de défaut se manifeste de la même façon que les défauts de barres rotoriques.



a) rupture une portion d'anneau



b) rupture deux portion d'anneau adjacente



c) rupture deux portion d'anneau espacées

Figure IV.11 : Le spectre du courant statorique lors des défauts dans les portions d'anneaux de court circuit.

Le tableau IV.2, montre l'influence du nombre des portions cassées et leurs mutuelles positions sur les amplitudes des raies $(1 \pm 2k)fs$. On constate que ce type du défaut est plus sévère que celui dû aux cassures de barres.

| L'état du moteur | (1-2g)fs | (1+2g)fs | (1-4g)fs | (1+4g)fs |
|--------------------------------|----------|----------|----------|----------|
| Une portion cassée | -15.68 | -28.31 | -35.88 | -51.83 |
| Deux portions adjacent cassées | -12.19 | -26.13 | -27.99 | -51.07 |
| Deux portions espacées cassées | -23.25 | -41.9 | -54.33 | -80.83 |

Tableau IV.2 : L'amplitude des composantes $(1\pm 2g)fs$ (en dB) pour différente portions d'anneaux de court circuit cassées

IV-6 Conclusion

L'analyse spectrale du courant statorique, par la transformer 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 et de portions d'anneaux de court-circuit. 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 d'arriver aux conclusions suivantes :

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

La comparaison entre tous ces méthodes, du point de vu sensibilité au degré de sévérité du défaut, nous a permis de constater que l'analyse de courant statorique reste la meilleure méthode pour détecter les ruptures de barres rotoriques

Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire s'inscrit dans le cadre du diagnostic des défauts dans les moteurs asynchrones triphasés. 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.

Les ruptures de barres et de portion d'anneau de court-circuit ont été le centre de notre intérêt dans ce présent travail.

Au début de ce travail, nous avons rappelé les différents défauts qui peuvent affectés le bon fonctionnement de la machine asynchrone triphasée 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 dq pour l'étude de la machine asynchrone, il permet de simuler le comportement de la machine lors des défaillances de barres rotoriques et de portion d'anneau.

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 construit un programme de simulation à l'aide du MATLAB. Ceci nous a permis de visualiser les performances de la machine, en considérant les différentes conditions de fonctionnement de la machine (sans et avec défauts).

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) et la rupture d'une portion d'anneau de court-circuit.

A la fin de ce travail on a fait état d'une méthode permettant la surveillance d'une machine asynchrone triphasée 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.

Bibliographie

[ABE 99] : A. Abed, L. Baghli, H. Razik, A. Rezzoug, «Modelling Induction Motors for Diagnostic Purposes», EPE'99 – Lausanne, 1999.

[ABE 02]:ABED Aicha «Contribution à l'étude et Au Diagnostic de la Machine Asynchrone»,Thèse de Doctorat Université Henri, Nancy Soutenu Publiquement le 28 mars 2002

[BAN 00] : J. F. Bangura, N. A. Demerdash, «Comarison Between Characterization and Diagnosis of Broken Bars/End-Ring Connectors and Airgap Eccentricities of Induction Motors in ASD's Using a Coupled Finite Element-State Space Method», IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 15, No. 1, March 2000, pp. 47-56.

[BEL 05] : BELHAMDI Saad « Prise en Compte D'un Défaut Rotorique Dans la Commande d'un Moteur Asynchrone »Thèse de Magister , Université Mohamed Khider Biskra, Soutenu 2005

[BOU 01] : BOUMEGOURA.T, "Recherche de Signale électromagnétique des défauts dans une machine asynchrone et synthèse d'observateurs en vue du diagnostic", thèse de doctorat Ecole centrale de Lyon France, 2001.

[GHO 05] : GHOGGAL Adel : « Diagnostic de la Machine Asynchrone Triphasée : Dédié à la Détection Des Défauts »Thèse de Magister, Université de Batna , Soutenu 2005

[HUB 02] : HUBERT Razik « Le Contenu Spectral Du Courant Absorbé Par La Machine Asynchrone En Cas de Défaillance »Faculté des Sciences , Nancy, CEDEX , juin 2002.

[KER 84] : I. Kerszenbaum, C. F. Landy, «The Existance of Large Inter – Bar Currents in Three Phase Squirrel Cage Motors with Rotor – Bar and/or End – Ring Faults», IEEE Transactions on Power Apparatus and System, Vol 103, n°7, July 1984, pp 1854-1862.

[RIT 94] : E. Ritchie, X. Deng, T. Jokinen, « Dynamic Model of Three Phase Squirrel Cage Induction Motors with Rotor Faults», ICEM'94, Paris France, 1994, pp. 694-698.

[SAH 03] : SAHRAOUI Mohamed «Contribution aux Diagnostic des Machines Asynchrone Triphasées à cage »Université Mohamed Khider Biskra,10 /2003

[TOL 95] : H. A. Toliyat, T. A. Lipo, «Transient Analysis of Cage Induction Machines Under Stator, rotor bars and end – ring Faults», IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol 10, N°6, June 1995, pp. 241-247.

[VAS 94] : P. Vas, F. Filippeti, G. Franceschini, C. Tassoni, « Transient Modelling Oriented to Diagnostics of Induction Machines with rotor Asymetries», Proc. ICEM'94, Paris, France 1994, vol. 2, pp. 62-67.

Annex 1: 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]

f_e : fréquence d'échantillonnage .

Δf : Résolution fréquentielle.

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 [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]

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]

Ψ_{sa} : Flux magnétique total créé par i_a et traversant l'enroulement de la phase "a"[Wb].

Ψ_{ds}, Ψ_{qs} : Composantes biphasés du flux statorique[Wb].

F_m : La force magnétomotrice de la phase "a".

θ_r : position du rotor [rd]

θ_s : position des grandeurs statoriques

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_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

w_r : vitesse de rotation mécanique

w_s : pulsation statorique

P : la puissance [W]

P: opérateur de Laplace

p : nombre de pairs de pôles

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

g : glissement

[R], [L] : Matrices globales des résistances et des inductances avant la transformation du Park.

[Rtr], [Ltr] : Matrices globales des résistances et des inductances après la transformation du Park.

Annexex 2:

Paramètre du moteur utilize

La these de Nancy:

```
P0=3;  
Ns=86;  
Nr=28;  
Rs=3.86;  
Lfs=0.009594;  
P=1;  
rb=28.56*1e-6;  
re=15.74*1e-6;  
rs=2.86;  
Le=1e-7;  
Lb=1e-7;  
r=0.0516;  
l=0.125;  
g=0.000172;  
J=0.023976;  
f=50;  
v=230;  
k0=0.0014439;  
rs=Rs;  
mu0=4*pi*1e-7;  
a=2*pi*P/Nr;  
ws=2*pi*f;
```