

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE DE M'SILA
FACULTE DES SCIENCES ET DES SCIENCES DE L'INGENIORAT

DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE

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

OPTION : COMMANDE ELECTRIQUE

THÈME

**DIAGNOSTIC DES DEFAUTS ROTORIQUES
DANS LES
MACHINES ASYNCHRONES TRIPHASÉES A CAGES**

Proposé et dirigé par :

Monsieur : S. BELHAMDI

Présenté par :

ZEROUTI Tayeb
OULD SASS Boubakar

Année Universitaire : 2008 / 2009

OPTION: COMMANDE ELECTRIQUE

Proposé et dirigé par : Monsieur : S. BELHAMDI

Présenté par : T. ZEROUTI
B. OULD SASS

Thème :

**DIAGNOSTIC DES DEFAUTS ROTORIQUES
DANS LES
MACHINES ASYNCHRONES TRIPHASÉES A CAGES**

Résumé :

La croissance de machine asynchrone multi-enroulement, essentiellement due à sa simplicité de construction, son faible coût d'achat et de fabrication, sa robustesse mécanique ou encore sa quasi-absence d'entretien. Leur 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 sans onduteur et puis avec onduteur.

Mots Clés :

Machines Asynchrones, Diagnostic, Modèle réduit, Onduteur, Rupture de barre.

ملخص :

إن التطورات الحاصلة في مجال إلكترونيك الاستطاعة لدارة التحكم الآلي أدت إلى استعمال متزايد للماكينات اللامتزامنة في أنظمة الدوران الكهربائية وباللجوء إلى الماكينات اللامتزامنة وميزاتها المختلفة خاصة تلك المرتبطة بصلابتها استطاعتها الكتلية وكلفتها الصناعية. وكذلك مراقبتها وصيانتها. اذن من المهم جدا تطوير ادوات التشخيص من أجل الكشف المبكر عن الخلل الذي يمكن أن يظهر في الماكينات. موضوع عملنا يتمحور حول نموذجية ماكينة لا متزامنة من أجل إظهار تلك الانكسارات في قضبان الدوار.

كلمات مفاتيح :

محرك لا متزامن, تشخيص, خلل الدوار, نموذج مبسط.

Remerciements

Remerciements

Le travail présenté dans ce mémoire a été effectué au département d'électrotechnique de l'université de M'sila.

Nos remerciements vont premièrement à Dieu tout puissant pour la volonté, la santé et la patience, qu'il nous a donnée durant toutes ces longues années.

*Ainsi, nous tenons également à exprimer nos vifs remerciements à notre encadreur **Monsieur Saàd BELHAMDI** pour avoir d'abord proposé ce thème, pour suivi continué tout le long de la réalisation de ce mémoire et qui n'a pas cessé de nous donner ses conseils et remarques, ainsi que son épouse.*

Nos sincères remerciements à messieurs les membres du jury pour l'honneur qu'ils nous font en participant au jugement de ce travail.

Nos remerciements vont aussi à tous les enseignants du département d'électrotechnique qui ont contribué à notre formation.

Enfin nous tenons à exprimer notre reconnaissance à tous nos amis et collègues pour leur le soutien moral et matériel...

Sommaire

INTRODUCTION GENERALE.....01-02

CHATITRE I : Les Différents Défauts de la Machine Asynchrone

I .1.Introduction.....	03
I.2.Les différentes défauts dans les systèmes électromécaniques	03
I.2.1 Défauts rotoriques.....	04
I.2.1.1 Ruptures de barres.....	04
I.2.1.2 Ruptures d'anneaux.....	05
I.2.1.3 Excentricité statique et dynamique.....	05
I.2.2 Défauts statoriques.....	06
I.2.2.1 Court-circuit entre spires.....	07
I.2.2.2 Court-circuit entre phases.....	07
I.2.2.3 Court-circuit phase/bâti.....	08
I.2.2.4 Défauts de circuit magnétique.....	08
I.2.3 Défauts mécaniques.....	08
I.2.3.1 Défauts roulements.....	08
I.2.3.2 Autres défautes mécaniques.....	09
I.3 Les méthodes de diagnostic.....	09
I.3.1 Les méthodes internes.....	10
I.3.1.1 La méthode du modèle.....	10
I.3.1.2 La redondance analytique et matérielle.....	11
I.3.2 Les méthodes externes.....	11
I.3.2.1 Diagnostic par systèmes experts.....	11
I.3.2.2 Les méthodes de reconnaissance des formes.....	12
I.4 Conclusion.....	13

CHATITRE II : Modélisation de la MAS multi-enroulement

I .1.Introduction	14
--------------------------------	-----------

➤ Interprétation des résultats.....	49
B- Cas d'une machine avec onduleur de tension	49
B-1- machine sain.....	49
B-2- Cas d'une machine avec défaut rotorique	51
B-2-a- Cas d'une cassure de deux barres adjacentes.....	51
B-2-b- Cas d'une cassure de deux barres espacées.....	53
B-2-c- Cas d'une cassure de trois barres adjacentes.....	55
B-2-d- Cas d'une cassure de trois barres espacées.....	57
B-3 Interprétation des résultats.....	59
III.3 Conclusion.....	59
CONCLUSION GENERALE.....	60
ANNEXE.....	61
Bibliographie.....	63

Index des figures

CHAPITRE I

<i>Figure. I.1. Proportion des défauts.....</i>	04
<i>Figure. I.2. Modélisation schématique de l'excentricité statique et dynamique.....</i>	06
<i>Figure .I.3. Principe de fonctionnement de la méthode du modèle.....</i>	10

CHAPITRE II

<i>Figure II.1 : Induction magnétique produite par une maille rotorique.....</i>	16
<i>Figure II.2 : Schéma électrique équivalent des mailles rotoriques.....</i>	19
<i>Figure II.3 : Schéma d'un onduleur triphasé et de sa charge.....</i>	29
<i>Figure II.4 : Vecteur de tension crée par l'onduleur.....</i>	31
<i>Figure. II.5: Principe de la commande MLI.....</i>	32
<i>Figure II .6 : Génération d'un MLI naturelle pour un signal de la porteuse de 20HZ.....</i>	33
<i>Figure II.7: Génération d'une MLI naturelle pour un signal de la porteuse de 40Hz.....</i>	33

CHAPITRE III

<i>FigureIII.1 : Schéma de simulation en SIMULINK de modèle réduit.....</i>	36
<i>Figure III. 2 : Simulation avec modèle réduit : machine en charge (Cr=3.5N.m)Alimentation sans onduleur</i>	
<i>Figure (a) : La vitesse de rotation.....</i>	37
<i>Figure(b) : Le couple électromagnétique.....</i>	37
<i>Figure(c) : Courant statorique</i>	37
<i>Figure(d) : Courant dans la barre 1</i>	37
<i>Figure(e) : Courant I_{dr}.....</i>	38
<i>Figure(f) : Courant I_{ds}</i>	38
<i>Figure III. 3 : Simulation avec le modèle réduit : machine en charge Cr=3.2 N.m avec rupture successive des barres '1 puis 2' à partir de t=1s(sans onduleur)</i>	
<i>Figure (a) : La vitesse de rotation.....</i>	39
<i>Figure(b) : Le couple électromagnétique.....</i>	39

<i>Figure(c) : Courant statorique</i>	39
<i>Figure(d) : Courant dans la barre 1.....</i>	39
<i>Figure(e): Courant dans la barre 2.....</i>	40
<i>Figure(f): Courant dans la barre 7.....</i>	40
<i>Figure(g) : Courant I_{dr}.....</i>	40
<i>Figure(h) : Courant I_{ds}.....</i>	40

FigureIII.4 : Simulation avec modèle réduit : machine en charge, saine puis défectueuse à partir de $t=1s$ (sans onduteur)

<i>Figure (a) : La vitesse de rotation.....</i>	41
<i>Figure(b) : Le couple électromagnétique.....</i>	41
<i>Figure(c) : Courant statorique.....</i>	42
<i>Figure(d) : Courant dans la barre 1.....</i>	42
<i>Figure(e): Courant dans la barre 2.....</i>	42
<i>Figure(f): Courant dans la barre 7.....</i>	42
<i>Figure(g) : Courant I_{dr}</i>	43
<i>Figure(h) : Courant I_{ds}.....</i>	43

Figure III. 5 : Simulation avec le modèle réduit : machine en charge $Cr=3.2 N.m$ avec rupture successive des barres '1, 2 et 3' à partir de $t=1s$ (sans onduteur)

<i>Figure (a) : La vitesse de rotation.....</i>	44
<i>Figure(b) : Le couple électromagnétique.....</i>	44
<i>Figure(c) : Courant statorique.....</i>	44
<i>Figure(d) : Courant dans la barre 1.....</i>	44
<i>Figure(e): Courant dans la barre 2.....</i>	45
<i>Figure(f): Courant dans la barre 3.....</i>	45
<i>Figure(g) : Courant I_{dr}.....</i>	45
<i>Figure(h) : Courant I_{ds}.....</i>	45

FigureIII.6 : Simulation avec le modèle réduit : machine en charge $Cr=3.2 N.m$ avec rupture des barres espacées '1, 8 et 11' à partir de $t=1s, 2s$ et $3s$

<i>Figure (a) : La vitesse de rotation.....</i>	47
<i>Figure(b) : Le couple électromagnétique.....</i>	47
<i>Figure(c) : Courant statorique.....</i>	47
<i>Figure(d) : Courant dans la barre 1.....</i>	47
<i>Figure(e): Courant dans la barre 8.....</i>	48
<i>Figure(f): Courant dans la barre 11.....</i>	48
<i>Figure(g) : Courant I_{dr}.....</i>	48
<i>Figure(h) : Courant I_{ds}.....</i>	48

Figure III. 7 : *Simulation avec modèle réduit : machine en charge ($Cr=3.5N.m$) avec onduleur*

<i>Figure (a) : La vitesse de rotation.....</i>	49
<i>Figure(b) : Le couple électromagnétique.....</i>	49
<i>Figure(c) : Courant statorique.....</i>	50
<i>Figure(d) : Courant dans la barre 1.....</i>	50
<i>Figure(e) : Courant I_{dr}.....</i>	50
<i>Figure(h) : Courant I_{ds}.....</i>	50

Figure III. 8 : *Simulation avec le modèle réduit : machine en charge $Cr=3.2 N.m$ avec rupture successive des barres '1 puis 2' à partir de $t=1s$ (avec onduleur)*

<i>Figure (a) : La vitesse de rotation.....</i>	51
<i>Figure(b) : Le couple électromagnétique.....</i>	51
<i>Figure(c) : Courant statorique.....</i>	52
<i>Figure(d) : Courant dans la barre 1.....</i>	52
<i>Figure(e): Courant dans la barre 2.....</i>	52
<i>Figure(f): Courant dans la barre 7.....</i>	52
<i>Figure(g) : Courant I_{dr}.....</i>	53

Figure(h) : Courant I_{ds}.....	53
Figure III.9 : Simulation avec modèle réduit : machine en charge, saine puis défectueuse à partir de $t=1s$ (avec onduleur)	
Figure (a) : La vitesse de rotation.....	53
Figure(b) : Le couple électromagnétique.....	53
Figure(c) : Courant statorique	54
Figure(d) : Courant dans la barre 1.....	54
Figure(e): Courant dans la barre 2.....	54
Figure(f): Courant dans la barre 7.....	54
Figure(g): Courant I_{dr}.....	55
Figure(h): Courant I_{ds}.....	55
Figure III. 10 : Simulation avec le modèle réduit : machine en charge $Cr=3.2 N.m$ avec rupture successive des barres '1, 2 et 3' à partir de $t=1s$ (avec onduleur)	
Figure (a) : La vitesse de rotation.....	55
Figure(b) : Le couple électromagnétique.....	55
Figure(c) : Courant statorique.....	56
Figure(d) : Courant dans la barre 1.....	56
Figure(e): Courant dans la barre 2.....	56
Figure(f): Courant dans la barre 3.....	56
Figure(g): Courant I_{dr}	56
Figure(h): Courant I_{ds}.....	56
Figure III. 11 : Simulation avec le modèle réduit : machine en charge $Cr=3.2 N.m$ avec rupture successive des barres '1, 8 et 11' à partir de $t=1s$ (avec onduleur)	
Figure (a) : La vitesse de rotation.....	57
Figure(b) : Le couple électromagnétique.....	57
Figure(c) : Courant statorique.....	57
Figure(d) : Courant dans la barre 1.....	57

<i>Figure(e): Courant dans la barre 8.....</i>	58
<i>Figure(f): Courant dans la barre 11.....</i>	58
<i>Figure(g): Courant I_{dr}</i>	58
<i>Figure(h): Courant I_{ds}.....</i>	58

Notation et symboles

N_s : nombre de spires statoriques par phase

N_r : nombre de barres rotorique

n : entier naturel

s, r : indices stator et rotor respectivement

e : l'épaisseur de l'entrefer [m]

F : fréquence d'alimentation [Hz]

μ_0 : perméabilité magnétique de l'air

l : longueur active du circuit magnétique [m]

L_{sp} : inductance propre statorique [H]

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

L_b : inductance d'un barre rotorique [H]

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

L_{sc} : inductance cyclique statorique [H]

L_{rc} : inductance cyclique rotorique [H]

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

I_{bk} : courant de barre [A]

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

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

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

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

V_{abc} : les tensions statorique [V]

Φ_{abc} : les flux statorique [Wb]

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

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

M_s : mutuelle entre phase statorique [H]

θ_r : position du rotor [rad]

θ_s : position des grandeurs statoriques [rad]

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

a : angle électrique entre deux mailles rotorique [rad]

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

R : rayant moyen de l'entrefer

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

R_r : résistance de l'enroulement rotorique [Ω]

R_s : résistance de l'enroulement statorique [Ω]

R_{bk} : résistance de la barre [Ω]

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

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

r_s : résistance d'une phase statorique [Ω]

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

C_e : couple électromagnétique [N.m]

j : moment d'inertie [Kg.m²]

f : coefficient de frottement [Nms]

ω_r : vitesse de rotation mécanique

P : la puissance [W]

S : opérateur de Laplace

p : nombre de paires de pôles

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

g : glissement

RNA : Réseaux de Neurones Artificiels

MAS : Machine Asynchrone

INTRODUCTION GENERALE

La paternité de la machine asynchrone est controversée. Elle pourrait être attribuée à trois inventeurs : en 1887, Nikola Tesla dépose un brevet sur la machine asynchrone, puis en mai de l'année suivante cinq autres brevets. Pendant la même période Galileo Ferraris publie des traités sur les machines tournantes, avec une expérimentation en 1885, puis une théorie sur le moteur asynchrone en avril 1888. En 1889, Michail Ossipowitsch Doliwo-Dobrowolski, électricien allemand d'origine russe, invente le premier moteur asynchrone à courant triphasé à cage d'écureuil qui sera construit industriellement à partir de 1891.

La croissance de ce type de machine électrique, essentiellement due à sa simplicité de construction, son faible coût d'achat et de fabrication, sa robustesse mécanique ou encore sa quasi-absence d'entretien, la machine asynchrone est aujourd'hui très couramment utilisée comme moteur dans une gamme de puissance allant de quelques centaines de watts à plusieurs milliers de kilowatts, est telle que nous la trouvons maintenant dans tous les domaines industriels et en particulier dans les secteurs de pointe comme l'aéronautique, le nucléaire, la chimie ou encore les transports ferroviaires. Toute proportion gardée, il est clair ces moteurs nous conduisent à porter une attention de plus en plus sérieuse quant à leur fonctionnement et leur disponibilité.

Les défauts qui apparaissent dans la machine électrique ont des causes variées. Ils peuvent être dûs au vieillissement des constituants du moteur ou bien aux conditions d'utilisation ou tout simplement à un défaut de fabrication dont l'effet serait imperceptible lors de la mise en service [LO 99].

les principaux défauts électriques recensés sont les court circuits entre spires des bobinages du stator (dus au vieillissement des isolants), les dégradations des anneaux au rotor et tous les problèmes de barres (ruptures ou imperfections). Depuis longtemps déjà, la rupture des barres dans les moteurs a fait l'objet de nombreux travaux .D'autres recherches ont suivi dans la même voie ,ou ont été initiés dans le diagnostic des autres défaut de la machine (mésalignement entre la machine et la charge, excentricité du rotor, usure des paliers) les défaut ont souvent été étudiés dans le cadre d'applications industrielles à vitesse constante[CM 07].

Le diagnostic des machines électriques s'est fortement développé dans le monde industriel car la volonté d'obtenir une chaîne de production de plus en plus sûre devient, pour certaines applications, indispensable. Les chaînes de production doivent être dotées de systèmes de

protection fiables car une quelconque défaillance, même la plus anodine, peut mener à un dommage matériel ou corporel inévitable. C'est pour éviter ces problèmes que la recherche, sur le plan mondial, s'emploie depuis plusieurs dizaines d'années à élaborer des méthodes de diagnostic. Celles-ci ont pour premier objectif de prévenir les utilisateurs d'un risque possible pouvant apparaître en un point particulier du système [GD 04].

Le travail proposé s'attarde sur le diagnostic des machines asynchrones triphasées à cage d'écureuil.

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

- Le premier chapitre traite les différents défauts qui peuvent apparaître dans les machines asynchrones et leurs causes aussi que les différentes méthodes de diagnostic.
- Le deuxième chapitre est consacré à la présentation et la formulation mathématique du modèle multi-enroulement de la machine asynchrone triphasée à cage.
- Pour le troisième chapitre on présente les résultats de simulation du modèle réduit multi-enroulement de la machine à l'état sain et avec défaut sans ondulateur et puis avec ondulateur.

I.1. INTRODUCTION

Les entrainements électriques à base de machine asynchrone sont largement utilisés dans les applications industrielles en raison de leur faible coût, de leurs performances et de leur robustesse. Cependant, des modes de fonctionnements dégradés peuvent apparaître durant la vie de la machine [TR 08].

De nombreuses défaillances peuvent apparaître sur les machines asynchrones. Elles peuvent être électriques, mécaniques ou magnétiques. Leurs causes sont très variées. Les défaillances d'origine électrique peuvent être séparées en deux catégories bien distinctes. Nous pouvons citer les défaillances qui apparaissent au niveau des circuits électriques statoriques et celles qui apparaissent au niveau des circuits électriques rotoriques.

Dans ce chapitre, nous présentons en premier lieu les différents défauts qui peuvent survenir tant au rotor de la machine, citons leurs causes sur le comportement de la machine. Il a été nécessaire de regarder quelles sont les différentes méthodes de diagnostic actuellement utilisées pour la présence d'une anomalie au sein de la machine asynchrone.

I.2. Les différentes défauts dans les systèmes électromécaniques

Les défaillances peuvent être d'origines diverses, électriques, mécaniques et magnétiques. Leurs causes sont multiples et peuvent se classer en trois groupes [ON 93]:

- ❖ Les générateurs de pannes ou initiateurs de défauts : surchauffe du moteur, défaut électrique (court-circuit), survoltage d'alimentation, problème d'isolation électrique, usure des éléments mécaniques (roulements à billes), rupture de fixations, etc.
- ❖ Les amplificateurs de défauts : surcharge fréquente, vibrations mécaniques, environnement humide, échauffement permanent, mauvais graissage, vieillissement, etc.
- ❖ Les vices de fabrication et les erreurs humaines : défauts de fabrication, défectuosité des composants, protections inadaptées, mauvais dimensionnement de la machine.

Ces défauts peuvent être classés selon les statistiques suivantes(figure I.1): [BE 05]

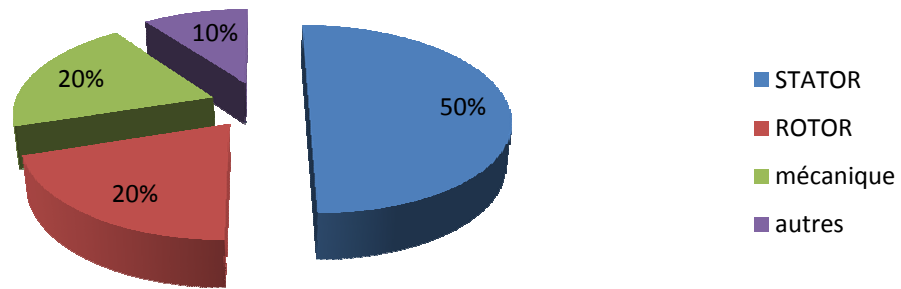


Figure. I.1. Proportion des défauts

I.2.1 Défauts rotoriques [ON 93]

Pour le rotor, les défaillances sont essentiellement dues à un problème :

- Thermique (surcharge,...)
- Electromagnétique (force en $B_2(t)$,...)
- Résiduel (déformation,...)
- Dynamique (arbre de transmission,...)
- Mécanique (roulement,...)
- Environnemental (agression,...)

Les défauts qui sont les plus récurrents, localisés au niveau du rotor, peuvent être définis comme suit :

- Rupture de barres
- Rupture d'une portion d'anneau de court-circuit
- Excentricité statique et dynamique

I.2.1.1 Ruptures de barres

La cassure ou rupture de barre est un des défauts les plus fréquents au rotor. Elle peut se situer soit au niveau de son encoche soit à l'extrémité qui la relie à l'anneau rotorique. La détérioration des barres réduit la valeur moyenne du couple électromagnétique et augmente l'amplitude des oscillations, qui elles-mêmes provoquent des oscillations de la vitesse de rotation, ce qui engendre des vibrations mécaniques et donc, un fonctionnement anormal de la machine. La grande amplitude de ces oscillations accélère la détérioration de la machine. [ON 93]

Les fréquences, engendrées autour de la fréquence du fondamental de la tension d'alimentation par un défaut dû à la cassure d'une barre ou de portion d'anneau, sont données par l'expression [BE 05][SH 03]:

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

avec :

k:entier naturel

Par contre, les harmoniques d'espace génèrent eux aussi des fréquences données par :

$$f_b = f_s \left\{ 1 \pm k \frac{(1-g)}{p} \right\} \quad (I.2)$$

avec :

k : entier naturel impair

I.2.1.2 Ruptures d'anneaux[ON 93]

La rupture de portion d'anneau est un défaut qui apparaît aussi fréquemment que la cassure de barres. Ces ruptures sont dues soit à des bulles de coulées ou aux dilatations différentielles entre les barres et les anneaux.

Comme il est difficile de le détecter ,ce défaut est généralement groupé, voir confondu, avec la rupture de barres dans les études statistiques. Ces portions d'anneaux de court-circuit véhiculent des courants plus importants que ceux des barres rotoriques. De ce fait, un mauvais dimensionnement des anneaux, une détérioration des conditions de fonctionnement (température, humidité,...) ou une surcharge de couple et donc de courants, peuvent entraîner leur cassure.

La rupture d'une portion d'anneau déséquilibre la répartition des courants dans les barres rotoriques et de ce fait, engendre un effet de modulation d'amplitude sur les courants statoriques similaire à celui provoqué par la cassure de barres.

I.2.1.3 Excentricité statique et dynamique

Parfois, la machine électrique peut être soumise à un décentrement du rotor, se traduisant par des oscillations de couple (décalage entre le centre de rotation de l'arbre et le centre du rotor, figure 1.2). Ce phénomène est appelé excentricité (statique et dynamique) dont l'origine peut être liée à un positionnement incorrect des paliers lors de l'assemblage, à un défaut roulement (usure), à un défaut de charge, ou à un défaut de fabrication (usinage).

Trois cas d'excentricité sont généralement distingués[ON 93] :

- l'excentricité statique, le rotor est déplacé du centre de l'alésage stator mais tourne toujours autour de son axe
 - l'excentricité dynamique, le rotor est positionné au centre de l'alésage mais ne tourne plus autour de son axe
 - l'excentricité qu'on pourrait qualifier de 'mixte', associant les deux cas précédemment cités.
- On peut représenter l'excentricité statique et dynamique de la manière suivante [BE 05]:

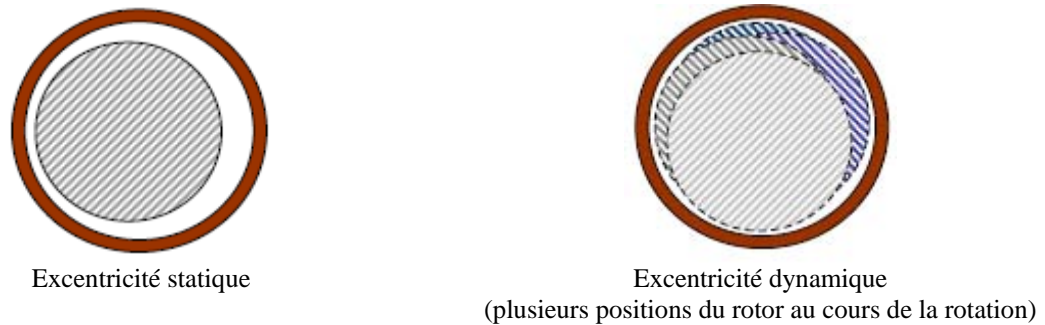


Figure. 1.2. *Modélisation schématique de l'excentricité statique et dynamique*

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 figure (I.2).

Pour l'excentricité statique les fréquences des harmoniques qui apparaissent peuvent être données par l'équation (I.3) [BE 05] :

$$f_{ex} = f_s \left[1 \pm \frac{n.N_r(1-g)}{p} \right] \quad (I.3)$$

Par contre pour l'excentricité dynamique, on a :

$$f_{ex} = f_s [1 \pm 2.n(1 - g)] \quad (I.4)$$

Dans le cas d'un désalignement, on a :

$$f_{ex} = f_s \left[1 \pm \frac{n(1-g)}{p} \right] \quad (I.5)$$

L'origine du désalignement est introduite dans le paragraphe suivant.

I.2.2 Défauts statoriques [ON 93]

Pour le stator, les défaillances sont principalement dues à un problème :

- Thermique (surcharge,...)
- Electrique (diélectrique,...)
- Mécanique (bobinage,...)
- Environnemental (agression,...)

Les défauts qui sont les plus récurrents, localisés au niveau du stator, peuvent être définis comme suit :

- Défaut d'isolant
- Court-circuit entre spires
- Court-circuit entre phases
- Court-circuit phase/bâti
- Déséquilibre d'alimentation
- Défaut de circuit magnétique

I.2.2.1 Court-circuit entre spires [ON 93]

Un court-circuit entre spires de la même phase est un défaut assez fréquent. Cette défaillance a pour origine un ou plusieurs défauts d'isolant dans l'enroulement concerné. Il entraîne une augmentation des courants statoriques dans la phase affectée, une légère variation de l'amplitude sur les autres phases, modifie le facteur de puissance et amplifie les courants dans le circuit rotorique. Ceci a pour conséquence une augmentation de la température au niveau du bobinage et, de ce fait, une dégradation accélérée des isolants, pouvant provoquer ainsi, un défaut en chaîne (apparition d'un 2^{ème} court-circuit). Par contre, le couple électromagnétique moyen délivré par la machine reste sensiblement identique hormis une augmentation des oscillations proportionnelle au défaut.

I.2.2.2 Court-circuit entre phases[ON 93]

Ce type de défaillance peut arriver en tout point du bobinage, cependant les répercussions ne seront pas les mêmes selon la localisation. Cette caractéristique rend difficile une analyse de l'incidence de ce défaut sur le système.

L'apparition d'un court-circuit proche de l'alimentation entre phases, induirait des courants très élevés qui conduiraient à la fusion des conducteurs d'alimentation et/ou à la disjonction par les protections. D'autre part, un court-circuit proche du neutre entre deux phases engendre un déséquilibre sans provoquer la fusion des conducteurs.

Les courants statoriques sont totalement déséquilibrés et ce déséquilibre est proportionnel au défaut qui apparaît. Les courants dans les barres ainsi que dans les anneaux sont augmentés lors de l'apparition de ce défaut. La détection de ce type de défaut peut reposer sur le déséquilibre des courants de phases.

I.2.2.3 Court-circuit phase/bâti[ON 93]

Le bâti a généralement un potentiel flottant, mais pour des raisons de liaisons mécaniques, il est souvent relié à la masse. Si le potentiel est flottant, un court-circuit entre l'enroulement et le bâti n'a pas d'importance du point de vue matériel, excepté les effets capacitifs, le bâti prend alors le potentiel de l'enroulement à l'endroit du court-circuit. Par contre, au niveau de la sécurité des personnes, ce type de défaut peut être très dangereux et il est alors nécessaire de mettre en place des dispositifs de protection (disjoncteurs différentiels).

En présence de ce type de défaillance, la tension de la phase concernée ne change pas.

Cependant le courant circulant dans cette phase augmente avec la réduction de la résistance et de l'inductance. Cette augmentation du courant se traduit par une augmentation de la température pouvant entraîner des défauts d'isolant dans l'enroulement. De plus, cette défaillance va générer une composante homopolaire entraînant l'apparition d'un couple pulsatoire. Une mesure du courant de fuite pourrait permettre de détecter ce type de défaut.

I.2.2.4 Défauts de circuit magnétique

Ces défauts aboutissent dans la plupart des cas à une dissymétrie au niveau du fonctionnement de la machine, qui à son tour peut accentuer le problème par des phénomènes de surchauffe, de surtension, d'élévation importante du courant, etc. [ON 93]

I.2.3 Défauts mécaniques**I.2.3.1 Défauts roulements** [ON 93][GD 04][SH 03]

Les roulements à billes jouent le rôle d'interface électromécanique entre le stator et le rotor.

En outre, ils représentent l'élément de maintien de l'axe de la machine permettant d'assurer une bonne rotation du rotor. Dans l'article, l'auteur présente la plupart des défauts survenant dans les roulements des moteurs à induction ainsi que les raisons de leur vieillissement.

Comme il a été présenté précédemment, ce type de défaut est le plus fréquent sur les machines de fortes puissances. Il est généralement lié à l'usure du roulement et plus précisément une dégradation des billes, ou de la bande de roulement. Ses causes possibles sont :

- L'usure due au vieillissement
- La température de fonctionnement élevée
- La perte de lubrification
- L'huile contaminée (par des paillettes métalliques issues de la dégradation des billes ou de la bande de roulement)
- Le défaut de montage
- Les courants d'arbres

Les conséquences directes de cette défaillance sur les roulements sont :

- Des trous dans les gorges de roulement intérieures et extérieures
- L'ondulation de leur surface de roulement
- L'attaque des billes
- La corrosion due à l'eau
- Défaut de graissage, problème dû à la température
- Décollement, effritement de surface provoqué par une surcharge

Sur le système, ce type de défaut se traduit par des oscillations du couple de charge, une apparition de pertes supplémentaires et un jeu entre la bague interne et la bague externe du roulement entraînant des vibrations par les déplacements du rotor autour de l'axe longitudinale de la machine. Dans le cas le plus défavorable, la présence d'un roulement défectueux peut amener au blocage du moteur.

1.2.3.2 Autres défauts mécaniques[ON 93]

Au stator, il n'y a pas de pièces mobiles donc a priori pas de défaillances mécaniques. Cependant, il peut apparaître des phénomènes d'oxydation liés à l'environnement de la machine et plus précisément au taux de salinité qui influe sur l'étanchéité et les contacteurs.

I.3 Les méthodes de diagnostic

Le diagnostic qu'il soit médical ou bien industriel est toujours basé sur la comparaison entre le comportement du procédé défaillant et les connaissances du comportement sain ou de son modèle.

La comparaison nécessite des indicateurs , des symptômes révélateurs qui, une fois analysés permettent d'abord de détecter le comportement défaillant, d'en déduire la fonction ou l'élément en dysfonctionnement (localiser), puis d'en déterminer la cause et enfin , si possible d'y remédier [CO 08].

I.3.1 Les méthodes internes

Cette famille de méthodes est principalement dérivée des techniques utilisées par les automaticiens. A partir de modèles physiques ou de comportement validé par les techniques d'identification de paramètres, il devient possible de mettre en oeuvre la méthode du problème inverse .Le diagnostic de défaillance est possible en suivant en temps réel l'évolution des paramètres physiques ou bien en utilisant l'inversion de modèles de type « boîte noire» .Les méthodes de diagnostic internes se regroupent en deux grandes familles :

- la méthode du modèle .
- la méthode de redondance analytique et matérielle [CO 08] .

I.3.1.1 La méthode du modèle

La méthode du diagnostic basée sur le modèle consiste à comparer les grandeurs déduites d'un modèle représentatif du fonctionnement des différentes entités du processus avec les mesures directement observées sur le processus industriel. La figure (I.3) représente le fonctionnement d'un système de détection de défaillances utilisant l'approche basée sur le modèle [MO 99] .

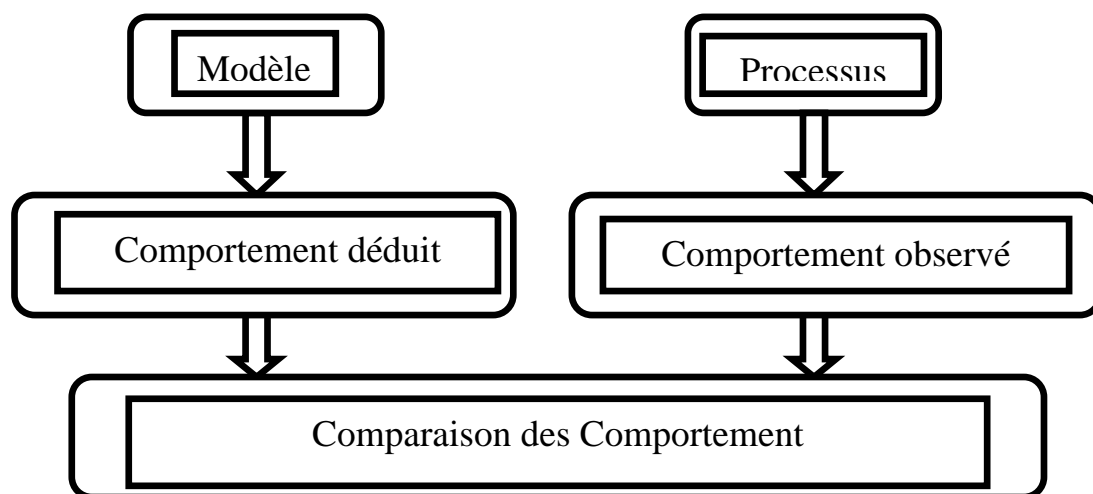


Figure I.3. Principe de fonctionnement de la méthode du modèle

En général, pour des processus continus dotés de systèmes de régulation, il est judicieux d'utiliser un modèle prenant séparément en compte les chaînes de régulation, les actionneurs et les sous ensembles du processus industriel. [DO 00] Comme il a été utilisé en pour un système d'entraînements électriques, le modèle possède une structure identique à Celle du processus. La comparaison des comportements sert à la détection des écarts entre les signaux d'état normaux et anormaux.

I.3.1.2 La redondance analytique et matérielle [CO 08]

La redondance analytique se base sur la connaissance d'un modèle mathématique du système à surveiller, ce modèle placé dans les mêmes conditions que le système est calculé en temps réel, fournit les relations de redondances nécessaires à la comparaison du procédé avec le modèle .

D'un côté, il existe une méthode par la redondance matérielle qui consiste à doubler ou à tripler l'équipement et plusieurs actionneurs plusieurs capteurs et plusieurs systèmes de commande . L'utilisation de cette méthode est essentiellement réservée aux cas où la continuité de service est obligatoire (avionique). En effet, elle apporte l'avantage une fois.

La défaillance détectée, d'utiliser la partie de l'équipement encore saine c'est une méthode chère et complexe.

I.3.2 Les méthodes externes [CO 08]

Les méthodes de diagnostic externes s'appliquent dans les situations où la modélisation des mécanismes reliant les causes des défaillances et des dégradations ne sont pas techniquement modélisables, ou bien ne présentent pas d'intérêt économique compte tenu des enjeux recherches.

Dans cette catégorie on retrouve toutes les méthodes basées sur l'intelligence artificielle. L'intelligence artificielle est presque vieille que l'informatique, les premiers travaux et réalisation datent de début des années 50, l'expression "intelligence artificielle" a été proposée par "J. Me carthy" en 1956. parmi ces méthodes on peut citer : les systèmes experts, la logique floue ,les reconnaissances des formes et les RNA.

I.3.2.1 Diagnostic par systèmes experts [BD 92]

Un système expert doit fournir des réponses associées à une situation donnée sachant que la complexité du domaine étudié ne permet pas d'établir a priori toutes les configurations

possibles des situations ; ainsi un spécialiste du dépannage réalise son diagnostic à l'aide d'une description partielle de la situation.

A partir de l'ensemble de symptômes dont il dispose, il peut déduire toutes les conclusions possibles, élaborer de nouvelles hypothèses et approfondir son diagnostic en exploitant des informations supplémentaires collectées sur le système à diagnostiquer .

Un système expert est constitué de plusieurs éléments principaux dont on peut citer .

a. La base de connaissances :

La base de connaissances est souvent la partie stable du système, elle est immédiatement exécutée dès l'appel du système et c'est elle qui rassemble les connaissances nécessaires à la résolution des problèmes du domaine.

b. La base de faits :

Les faits sont les objets élémentaires de l'application ; la base de faits que au départ contiennent les informations initiales relatives au domaine s'enrichit progressivement de conclusions ou de nouveaux faits déduits par le moteur d'inférence.

c. Le moteur d'inférence :

Le moteur d'inférence exploite de façon indépendante les informations contenues dans la base de faits et la base de connaissances pour fournir une solution au problème donné.

Par ailleurs, le moteur d'inférence produit dans son mécanisme de raisonnement de nouveaux faits qui sont mémorisés dans la base de faits.

par des fonctions d'appartenance. La fuzzification fournit une série de variables floues, réunies par un vecteur, qui va être introduit au bloc d'inférence.

Dans le bloc inférence, les valeurs des variables linguistiques sont liées par plusieurs règles qui doivent tenir compte du comportement statique et dynamique du système (causes des effets du système à diagnostiquer).

Dans la dernière étape, il faut transformer la valeur floue (linguistique) en une valeur déterminée, ceci eu faisant dans le bloc défuzzification ; en on rencontre les applications de cette méthode pour le diagnostic des machines synchrones .

I.3.2.2 Les méthodes de reconnaissance des formes [CO 08]

Parmi toutes les approches du diagnostic, la reconnaissance des formes est une technique de définition d'algorithmes permettant de classer des objets dont l'aspect a varié par rapport à un objet type. Il s'agit de définir à quelle forme–type une forme observée ressemble le plus .

Dans ce cas, la forme est définie par un ensemble d' paramètres appelés caractères qui sont les composants du vecteur forme x ; les prototypes sont les points représentatifs du vecteur forme dans l'espace à 'd' dimensions ;

Dans un problème de reconnaissance des formes on suppose généralement que les formes x à classer appartiennent à M catégories bien déterminées appelées classes et notées w_1, w_2, \dots, w_m

Compte tenu du bruit de mesure les vecteurs appartenant à une classe donnée w_i forment une zone particulière dans l'espace de dimension "d".

Le problème de la reconnaissance des formes consiste à déterminer les formes séparant les M classes dans le but de pouvoir ultérieurement classer une nouvelle forme "x" lors de l'opération de classification ou de discrimination .La procédure de diagnostic basée sur les techniques de reconnaissance des formes met en œuvre quatre étapes principal suivants :

- Choix de la signature initiale
- Construction des vecteurs formes
- Réalisation de la base d'apprentissage de représentation des classes
- Acquisition de nouvelles données, (Représentation, classification et détection)

I. 4. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons étudié la définition des termes important utilisés en diagnostic Notre travail est consacré à l'étude des défauts électriques pouvant intervenir dans la cage rotorique d'une machine asynchrone, leurs causes et leurs signatures.

Les méthode de base en diagnostic ont été exposées pour mieux cerner les différentes approches utilisées . Les différentes méthodes qui sont utilisées pour la représentation et la détection des ruptures de barres au rotor ont été également exposées.

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

II.1. INTRODUCTION

Les phénomènes physiques inhérents au fonctionnement du système peuvent être partiellement ou totalement pris en compte dans un modèle, en découlent plusieurs niveaux de modélisation liés aux hypothèses simplificatrices associées. Plus le nombre d'hypothèses est grand, le modèle sera plus simple, Celle-ci nous permet de simuler le comportement de ce système face à différentes sollicitations et d'appréhender ainsi les mécanismes régissant son fonctionnement [KH 05].

Il faut noter cependant qu'il existe plusieurs approches concernant la modélisation des machines électriques,[RO 03] mais dans cet chapitre on considère La modélisation de *Park* . Ce modèle basée sur les équations électriques des machines avec un certain nombre d'hypothèses simplificatrices, et bien adapté à l'élaboration d'algorithmes de commande ,Ainsi que, il a fallu s'orienter vers des modèles plus sophistiqués (modèle multi-enroulement) pour une description adaptée aux défauts[SH 03].

Dans ce chapitre nous avons développé un modèle basé sur un circuit maillé représentant la cage rotorique.

II.2. Modèle multi enroulements de la machine asynchrone

II.2.1. Hypothèses simplificatrices[MA 06][SH 03][BE 05]

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.4).

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

- ❖ Entrefer lisse et constant (effet d'excentricité négligeable, champ radial);
- ❖ Les courants de Foucault dans les parties massives sont négligés,
- ❖ L'effet de peau dans les barres (profondeur de la pénétration du champ électromagnétique en fonction de la fréquence des courants) est négligé,
- ❖ Perméabilité relative de fer très grande;
- ❖ le circuit magnétique est non saturé et à perméabilité constante,

- ❖ Les couplages capacitifs entre les enroulements sont négligés,
- ❖ Effet des encoches négligé,
- ❖ Distribution spatiale sinusoïdale des forces magnétomotrices de entrefer.

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

II.2.2. Calcul des inductances

II.2.2.1. Inductances statoriques

Nous supposons que l'enroulement statorique triphasé est à distribution idéale autour du périphérique de l'entrefer. Par conséquent, le champ résultant a une forme sinusoïdale.

L'induction créée dans l'entrefer : [BE 05]

$$B_s(\theta) = \frac{2\mu_0 N_s i_a}{e p \pi} \cos(\theta) \quad (\text{II.1})$$

Le flux magnétique dans l'entrefer, par pôles, est obtenu par intégration de l'expression (II.1) autour d'un intervalle polaire le long de la machine :

$$\phi_s = \iint_S B_s dS = \int_0^1 dZ \int_{-\frac{\pi}{2p}}^{\frac{\pi}{2p}} B_s R d\theta \quad (\text{II.2})$$

On obtient :

$$\phi_s = \frac{4\mu_0 N_s R l}{\pi e p^2} i_a \quad (\text{II.3})$$

Le flux magnétique total traversant l'enroulement de la phase "a" dû au courant i_a :

$$\phi_{sa} = N_s \phi_s = N_s i_a \frac{2\mu_0 N_s R l}{2p^2 \pi} \int_{-\frac{\pi}{2p}}^{\frac{\pi}{2p}} \cos(\theta) d\theta = L_{sp} i_a \quad (\text{II.4})$$

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

$$L_{sp} = L_{ms} = \frac{4\mu_0 N_s^2 R l}{e \pi p^2} \quad (\text{II.5})$$

L'inductance mutuelle entre les phases statoriques est [GD 04] :

$$M_s = -\frac{L_{sp}}{2} \quad (\text{II.6})$$

Par conséquent, le flux principal et l'inductance cyclique sont donnés par :

$$\Phi_{SP} = \frac{4}{\pi} \mu_0 \frac{N_s^2}{ep^2} R l i_{sa} \quad (II.7)$$

$$L_{sc} = \frac{3}{2} L_{sp} + L_{sf} = \frac{6}{\pi} \mu_0 \frac{N_s^2}{ep^2} R l + L_{sf} \quad (II.8)$$

II.2.2. Inductances rotoriques

Le rotor est décomposé en circuits élémentaires (mailles) constitués de deux barres et de deux portions d'anneaux les reliant à chaque extrémité [BE 05]

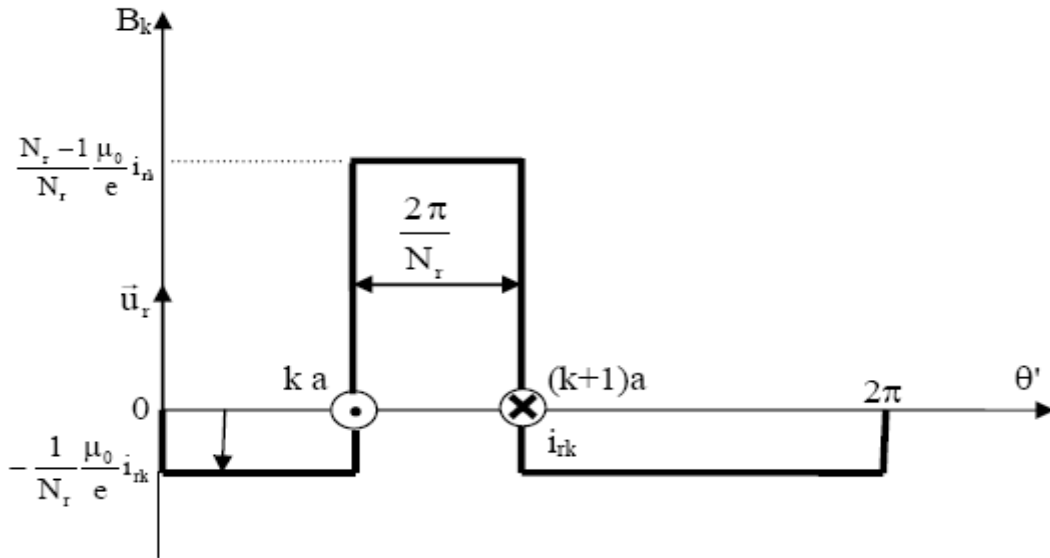


Figure II.1 : Induction magnétique produite par une maille rotorique

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 : [LO 99]

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

Et par la suite, l'inductance principale d'une maille rotorique est :

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

L'inductance totale de la $K^{ème}$ 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. Donc l'expression est donnée par :

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

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

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

Donc, l'inductance mutuelle entre mailles rotoriques non adjacentes, est exprimée par la relation suivante [GD 04] :

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

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

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

L'inductance cyclique rotorique sont donnés par :

$$L_{rc} = L_{rp} - M_{rr} + 2\frac{L_e}{N_r} + 2L_b(1 - \cos a) \quad (II.15)$$

II.2.2.3. Inductance mutuelle stator – rotor

La transformation dans le repère lié au rotor de l'équation (II.2), donne : [BE 05]

$$B_s(\theta') = \frac{2\mu_0 N_s i_s}{e p \pi} \cos[(\theta' + \omega_r t)] \quad (II.16)$$

Avec : $\theta = \theta' + \omega_r t$

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

$$\phi_{rka} = \int_0^1 dz \int_{ka}^{(k+1)a} B_s(\theta') R d\theta' \quad (II.17)$$

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

$$\Phi_{rka} = L_{sr} + i_a \cos[\omega_r t + Ka] \quad (II.18)$$

L'inductance mutuelle entre la maille k et la phase "a" est donnée donc par la relation suivante : [SH 03]

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

Avec:
$$M_{sr} = \frac{4\mu_0 N_s R l}{\pi.e.p^2} \sin\left(\frac{a}{2}\right) \quad (II.20)$$

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

II.2.3. Mise en équations

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

II.2.3.1. Equations de tensions au stator

$$[V_{abc}] = [R_s][i_{abc}] + \frac{d}{dt}[\Phi_{abc}] \quad (II.21)$$

D'où :

$$[\Phi_{abc}] = [L_s][i_{abc}] + [M_{sr}][i_{rk}] \quad (II.22)$$

Avec :

$[V_{abc}] = [V_a \ V_b \ V_c]^T$, le vecteur de tensions statoriques.

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

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

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

[Rs] : matrice des résistances statoriques.

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

[Ls] : matrice des inductances statoriques. [SH 03]

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

[Msr]:matrice des inductances mutuelles entre phases statoriques et mailles rotoriques[BE 05]

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

où : k=0, 1, 2, ..., Nr-1

II.2.3.2. Equations de tensions au rotor

La figure II.2, représente le schéma équivalent de la cage rotorique. [BE 05]

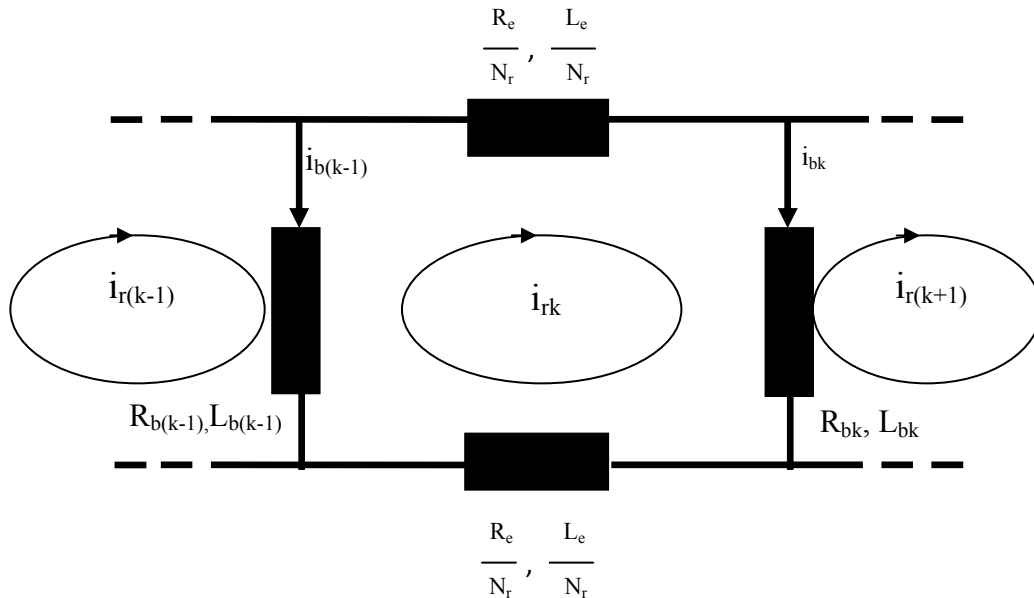


Figure II.2 : Schéma électrique équivalent des mailles rotoriques.

Sachant que :

$$i_{ek} = i_{rk} - i_e$$

$$i_{bk} = i_{rk} - i_{r(k+1)}$$

L'équation de tension pour une maille ' k ' de la cage rotorique est donnée par : [SH 0 3]

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

avec :

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

Il faut compléter le système d'équations des circuits du rotor par celle de l'anneau de courtcircuit, 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.2.3.3. Equation globale des tensions

L'équation globale des tensions est donnée par :

$$[V] = [R][I] + [L] \frac{d[I]}{dt} + \frac{d[L]}{dt} [I] \quad (II.29)$$

Avec :

$[V] = [V_a \ V_b \ V_c \ : \ 0 \ 0 \ \dots \ 0 \ : \ 0]^T$, 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.

$$[R] = \begin{bmatrix} [R_s] & \vdots & [0] \\ \dots & \dots & \dots \\ [0] & \vdots & [R_s] \end{bmatrix}, \text{ la matrice globale des résistances.}$$

Avec :

$[R_r]$: la matrice des résistances rotoriques.

$$[R_r] = \begin{bmatrix} R_{b0} + R_{b(N_f-1)} + 2\frac{R_e}{N_f} & -R_{b0} & \dots & 0 & \dots & \dots & -R_{b(N_f-1)} & \vdots & \frac{R_e}{N_f} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \vdots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \vdots & \dots \\ 0 & \dots & -R_{b(k-1)} & R_{bk} + R_{b(k-1)} + 2\frac{R_e}{N_f} & -R_{bk} & \dots & 0 & \vdots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \vdots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \vdots & \dots \\ -R_{b(N_f-1)} & \dots & 0 & \dots & \dots & -R_{b(N_f-2)} & R_{b(N_f-1)} + R_{b(N_f-2)} + 2\frac{R_e}{N_f} & \vdots & \frac{R_e}{N_f} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \vdots & \dots \\ \frac{R_e}{N_f} & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \frac{R_e}{N_f} & \vdots & R_e \end{bmatrix} \quad (II.30)$$

$$[L] = \begin{bmatrix} [L_s] & \vdots & [M_{sr}] \\ \dots & \dots & \dots \\ [M_{sr}]^T & \vdots & [L_r] \end{bmatrix}, \text{ la matrice globale des inductances.}$$

Avec :

$[L_r]$: matrice des inductances rotoriques.

$$[L_r] = \begin{bmatrix} L_p + 2L_b + 2\frac{L_e}{N_f} & M_{tr} - L_b & \dots & \dots & M_{tr} & \dots & M_{tr} - L_b & \vdots & -\frac{L_e}{N_f} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \vdots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \vdots & \dots \\ M_{tr} - L_b & \dots & M_{tr} - L_b & L_p + 2L_b + 2\frac{L_e}{N_f} & M_{tr} - L_b & M_{tr} & \dots & \vdots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \vdots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \vdots & \dots \\ M_{tr} - L_b & \dots & M_{tr} & \dots & \dots & M_{tr} - L_b & L_p + 2L_p + 2\frac{L_e}{N_f} & \vdots & \frac{L_e}{N_f} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \vdots & \dots \\ \frac{L_e}{N_f} & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & -\frac{L_e}{N_f} & \vdots & L_e \end{bmatrix} \quad (II.31)$$

$$\frac{d}{dt} [L] = \begin{bmatrix} [0] & \vdots & \frac{d}{dt} [M_{sr}] \\ \dots\dots\dots & \vdots & \dots\dots\dots \\ \frac{d}{dt} [M_{sr}]^T & \vdots & [0] \end{bmatrix}, \text{ la dérivée de la matrice globale des inductances.}$$

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.

La matrice de Park modifiée est définie par :

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

La dérivée de la matrice de Park est :

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

La matrice globale de Park de dimension (Nr+4)×(Nr+4) est définie par :

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

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

[1] : est la matrice identité de dimension (Nr+1)×(Nr+1).

Sachant que :

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

$$[I] = [T][I_{tr}], \quad \text{avec: } [I_{tr}] = [i_{0s} \quad i_{ds} \quad i_{qs} \quad i_{r0} \quad i_{r1} \cdots i_{rk} \cdots i_{r(N_r-1)} \quad 0]^T$$

$$\text{Avec: } \begin{cases} V_{ds} = \sqrt{\frac{3}{2}} V_m \cos(\omega_s - \omega_r)t \\ V_{qs} = \sqrt{\frac{3}{2}} V_m \sin(\omega_s - \omega_r)t \end{cases} \quad (\text{II.36})$$

L'équation (II.28) devient :

$$[T][V_{tr}] = [R][T][I_{tr}] + [L] \frac{d[T][I_{tr}]}{dt} + \frac{d[L]}{dt} [T][I_{tr}] \quad (\text{II.37})$$

$$[V_{tr}] = \left([T]^{-1}[R][T] + [T]^{-1}[L] \frac{d[T]}{dt} + [T]^{-1} \frac{d[L]}{dt} [T] \right) [I_{tr}] + [T]^{-1}[L][T] \frac{d[I_{tr}]}{dt} \quad (\text{II.38})$$

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

Les termes A, B, C et D sont données par :

$$A = [T]^{-1}[R][T] = \begin{bmatrix} [P(\theta)]^{-1}[R_s][P(\theta)] & \vdots & [0] \\ \cdots \cdots \cdots & \vdots & \cdots \cdots \\ [0] & \vdots & [R_r] \end{bmatrix} \quad (\text{II.39})$$

$$B = [T]^{-1}[L] \frac{d[T]}{dt} = \begin{bmatrix} [P(\theta)]^{-1}[L_s][P(\theta)] & \vdots & [0] \\ \cdots \cdots \cdots & \vdots & \cdots \cdots \\ [M_{sr}]^T \frac{d[P(\theta)]}{dt} & \vdots & [0] \end{bmatrix} \quad (\text{II.40})$$

$$C = [T]^{-1} \frac{d[L]}{dt} [T] = \begin{bmatrix} [0] & \vdots & [P(\theta)]^{-1} \frac{d[M_{sr}]}{dt} \\ \cdots \cdots \cdots & \vdots & \cdots \cdots \cdots \\ \frac{d[M_{sr}]^T}{dt} [P(\theta)] & \vdots & [0] \end{bmatrix} \quad (\text{II.41})$$

$$D = [T]^{-1}[L][T] = \begin{bmatrix} [P(\theta)]^{-1}[L_s][P(\theta)] & \vdots & [P(\theta)]^{-1}[M_{sr}] \\ \cdots \cdots \cdots & \vdots & \cdots \cdots \cdots \\ [M_{sr}]^T [P(\theta)] & \vdots & [L_r] \end{bmatrix} \quad (\text{II.42})$$

La mise en équation du modèle de la machine, conduit à un système complet de dimension

N_r+4 :

$$\begin{bmatrix} V_{os} \\ V_{ds} \\ V_{qs} \\ \dots \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ \dots \\ 0 \end{bmatrix} = [L_{tr}] \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{os} \\ i_{ds} \\ i_{qs} \\ \dots \\ i_{r0} \\ \vdots \\ i_{rk} \\ \vdots \\ i_{r(N_r-1)} \\ \dots \\ i_e \end{bmatrix} + [R_{tr}] \begin{bmatrix} i_{os} \\ i_{ds} \\ i_{qs} \\ \dots \\ i_{r0} \\ \vdots \\ i_{rk} \\ \vdots \\ i_{r(N_r-1)} \\ \dots \\ i_e \end{bmatrix} \quad (II.43)$$

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

A ces équations, on ajoute les équations électromagnétiques (II-44) (II-45) afin d'avoir la vitesse électrique et la position électrique θ_r du rotor [BE 05].

$$\frac{d}{dt} \Omega_r = \frac{1}{J} (C_e - C_r - f\omega_m) \quad (II.44)$$

$$\frac{d}{dt} \theta_r = \omega_r \quad (II.45)$$

II.2.3.4 Equation mécanique

La puissance absorbée de la machine asynchrone s'écrit :

$$p_e = V_a i_a + V_b i_b + V_c i_c = V_{ds} i_{ds} + V_{qs} i_{qs} + V_{os} i_{os}$$

Posons:

$$[X_{dqo}] = \begin{bmatrix} X_d \\ X_q \\ X_o \end{bmatrix} \text{ et } [X_{abc}] = \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix}$$

Avec $X=(i, V, \Phi)$ et le flux d'induction totalisé dans l'enroulement.

Soit $[P]$ la matrice de transformation directe, de telle sorte que $[X_{dqo}] = [P] \cdot [X_{abc}]$

Dans ces conditions, la puissance instantanée a pour expression :

$$P_e = [V_{abc}]^t [i_{abc}] = [V_{dqo}]^t [i_{dqo}] \quad (\text{II.46})$$

$$[V_{dqo}] = [R_s] [i_{dqo}] + \frac{d}{dt} [\Phi_{dqo}] + [P] \frac{d[P]^{-1}}{dt} [\Phi_{dqo}] \quad (\text{II.47})$$

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{d}{dt} \Phi_{ds} - \omega_{er} \Phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + \frac{d}{dt} \Phi_{qs} + \omega_{er} \Phi_{ds} \\ V_{os} = R_s I_{os} + \frac{d}{dt} \Phi_{os} \end{cases} \quad (\text{II.48})$$

$$P_e = \left(R_e I_{ds}^2 + \left(\frac{d}{dt} \Phi_{ds} \right) I_{ds} - \omega_{er} \Phi_{qs} I_{ds} \right) + \left(R_s I_{qs}^2 + \left(\frac{d}{dt} \Phi_{qs} \right) I_{qs} + \omega_{er} \Phi_{ds} \right) + \left(R_s I_{os}^2 + \left(\frac{d}{dt} \Phi_{os} \right) I_{os} \right)$$

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

a) la puissance dissipée en pertes joules est :

$$P_j = R_s (I_{ds}^2 + I_{qs}^2)$$

b) la puissance représentant les échanges d'énergie électromagnétique est :

$$P_v = I_{ds} \left(\frac{d\Phi_{ds}}{dt} \right) + I_{qs} \left(\frac{d\Phi_{qs}}{dt} \right)$$

c) la puissance mécanique P_m est:

$$P_m = \omega (\Phi_{ds} I_{qs} - \Phi_{qs} I_{ds})$$

Or la puissance mécanique est égale à $C_e \Omega$ ou à $\frac{C_e \omega}{p}$. On en tire l'expression scalaire du couple.

$$C_e = P [\Phi_{ds} I_{qs} - \Phi_{qs} I_{ds}] \quad (\text{II.49})$$

On remplace Φ_{ds} et Φ_{qs} par ces expression et on obtient :

$$C_e = \frac{3}{2} P \cdot M_{sr} (I_{ds} \sum_{k=0}^{N_r-1} I_{r(k)} \sin(k \cdot a) - I_{qs} \sum_{k=0}^{N_r-1} I_{r(k)} \cos(k \cdot a)) \quad (\text{II.50})$$

II.3 Modèle réduit

La représentation système par l'expression (II.42) fait apparaître un système d'ordre très élevé car il est constitué de nombre de phases rotoriques et des équation électromécanique.

Nous avons appliqué une transformation de Park étendue au système rotorique de manière à transformer ce système à N_r phases en un système (d, q) . [BE 05]

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

$$[X_{odqs}] = [T(\theta_s)][X_{abcs}] \Rightarrow [X_{abcs}] = [T(\theta_s)]^{-1} \cdot [X_{odqs}]$$

$$[X_{odqr}] = [T_{3N_r}(\theta_r)][X_{rks}] \Rightarrow [X_{rks}] = [T_{3N_r}(\theta_r)]^{-1} \cdot [X_{odqr}]$$

Soit la partie statorique :

$$[V_s] = [R_s][i_s] + \frac{d}{dt} \{ [L_s] \cdot [i_s] \} + \frac{d}{dt} \{ [M_{sr}][i_{rk}] \} \quad (II.51)$$

L'application de la transformation donne :

$$\begin{aligned} [V_{odqs}] &= \{ [T(\theta_s)][R_s][T(\theta_s)]^{-1} \} [i_{odqs}] + \{ [T(\theta_s)][L_s][T(\theta_s)]^{-1} \} \frac{d}{dt} [i_{odqs}] \\ &+ \left\{ [T(\theta_s)][L_s] \frac{d}{dt} [T(\theta_s)]^{-1} \right\} [i_{odqs}] + \left\{ [T(\theta_s)][M_{sr}][T_{3N_r}(\theta_r)]^{-1} \right\} \frac{d}{dt} [i_{odqr}] \\ &+ \left\{ [T(\theta_s)] \frac{d}{dt} \left\{ [M_{sr}][T_{3N_r}(\theta_r)]^{-1} \right\} \right\} [i_{odqr}] \end{aligned} \quad (II.52)$$

Pour la partie rotorique :

$$[V_r] = [R_r][i_{rk}] + \frac{d}{dt} \{ [L_r] \cdot [i_{rk}] \} + \frac{d}{dt} \{ [M_{rs}] \cdot [i_s] \} \quad (II.53)$$

Nous obtenons de la même façon :

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

En choisissant un référentiel lié au rotor, les relations angulaires peuvent s'écrire

$$\theta_s = \theta_r \text{ et } \theta_R = 0 .$$

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

$$\begin{bmatrix} L_{sc} & 0 & -\frac{N_r}{2} M_{sr} & 0 & 0 \\ 0 & L_{sc} & 0 & \frac{N_r}{2} M_{sr} & 0 \\ -\frac{3}{2} M_{sr} & 0 & L_{rc} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{3}{2} M_{sr} & 0 & L_{rc} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & L_e \end{bmatrix} \frac{dy}{dx} \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \\ I_{dr} \\ I_{qr} \\ I_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \\ V_{dr} \\ V_{qr} \\ V_e \end{bmatrix} -$$

$$\begin{bmatrix} R_s & -\omega L_{sc} & 0 & -\frac{N_r}{2} \omega M_{sr} & 0 \\ \omega L_{sc} & R_s & -\frac{N_r}{2} \omega M_{sr} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_r & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \\ I_{dr} \\ I_{qr} \\ I_e \end{bmatrix} \quad (\text{II.54})$$

avec :

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

$$R_{rdq} = 2 \frac{R_e}{N_r} + 2 \cdot R_b (1 - \cos(a))$$

Dans le cas d'un défaut rotorique, la matrice $[R_r]$ doit être modifiée. En utilisant la matrice de transformation, nous obtenons une matrice d'ordre 2 pour le rotor.

La matrice de défaut rotorique s'écrit :

$$[R_{rf}] = [R_f] + \begin{bmatrix} 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots \\ & \dots & & & & \dots \\ \vdots & \dots & \vdots & \vdots & & \dots \\ & \dots & & & & \dots \\ 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots \\ 0 & \dots & 0 & R'_{bk} & -R'_{bk} & 0 & \dots \\ 0 & \dots & 0 & -R'_{bk} & R'_{bk} & 0 & \dots \\ 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & 0 & \dots \end{bmatrix} \quad (\text{II.55})$$

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

$$[R_{rfdq}] = [T(\theta_r)][R_{rf}][T(\theta_r)]^{-1} = [T(\theta_r)]\{[R_r] + [R'_r]\}[T(\theta_r)]^{-1} \quad (II.56)$$

La matrice résistance est :

$$[R_{rfdq}] = \begin{bmatrix} R_{rdd} & R_{rdq} \\ R_{rqd} & R_{rqq} \end{bmatrix} \quad (II.57)$$

Où les quatres termes de cette matrice sont :

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

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

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

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

L'indice k caractérise la barre cassée.

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

$$C_e = \frac{3}{2} \cdot p \cdot N_r \cdot M_{sr}(I_{ds}I_{qr} - I_{qs}I_{dr}) \quad (II.58)$$

La sous-matrice, relative à la résistance rotorique, est un bon indicateur de la présence d'un défaut. En effet, en cas de défaut R_{dd} et R_{qq} ne sont plus égaux comme c'est le cas pour la machine saine. En outre, les termes R_{dq} et R_{qd} prennent une valeur non nulle, ce qui témoigne de la présence d'un défaut au rotor [BE 05].

II.4 Modélisation de l'onduleur de tension

L'onduleur de tension est un convertisseur statique qui permet de fournir une tension alternative d'amplitude et de fréquence réglables à partir d'une source de tension continue. L'onduleur de tension est constitué de cellule de commutation généralement à transistor ou thyristor pour les grandes puissances.

II.4.1. Choix des composants

Les composants de l'électronique de puissances (interrupteurs) sont déterminés par les niveaux de la puissance et la fréquence de commutation. En règle générale, plus les composants sont rapides, plus la puissance commutée est faible et inversement. A titre indicatif, les transistors *MOSFET*, sont considérés comme des composants très rapides mais de puissance relativement faible.[CO 07]

La figure (II.3) montre le schéma d'un onduleur triphasé alimentant le MAS :

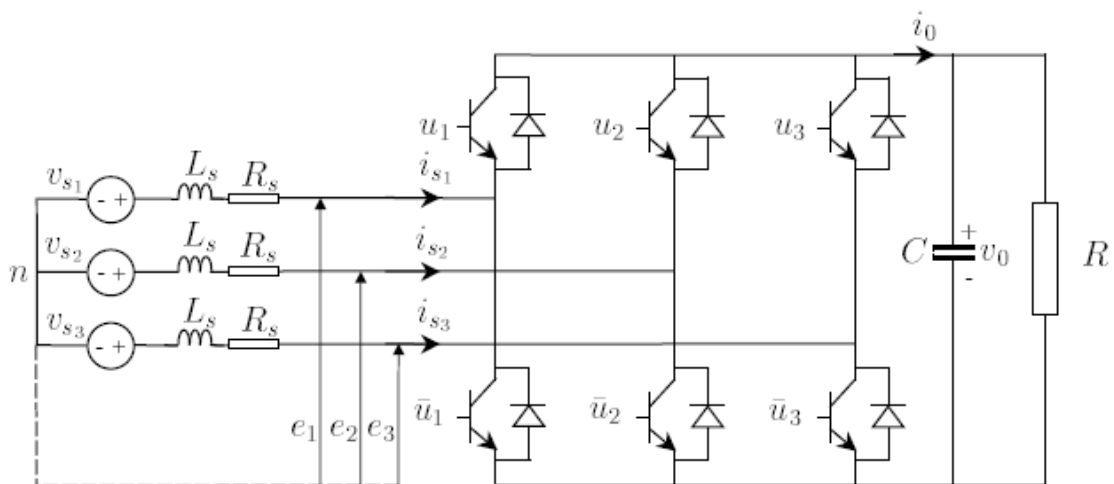


Figure II.3 : Schéma d'un onduleur triphasé et de sa charge.

Pour un onduleur triphasé, les commandes des interrupteurs d'un bras sont complémentaires. Donc pour chaque bras il y a deux états indépendants. Ces deux états peuvent être considérés comme une grandeur booléenne.[CO 07]

- $S_{a,b,c} = 1$: interrupteur du demi-bras haut (a,b ou c) fermé.
- $S_{a,b,c} = 0$: interrupteur du demi-bras bas (a,b ou c) fermé.

Pour simplifier l'étude, on supposera que :

- La commutation des interrupteurs est instantanée,
- La chute de tension aux bornes des interrupteurs est négligeable,
- La charge triphasée, est équilibrée et couplée en étoile avec neutre isolé.

Pour les tensions simples on a :

$$\begin{cases} V_{an} = S_a U_0 - \frac{U_0}{2} \\ V_{bn} = S_b U_0 - \frac{U_0}{2} \\ V_{cn} = S_c U_0 - \frac{U_0}{2} \end{cases} \quad (II.59)$$

Pour les tensions composées u_{ab}, u_{bc} et u_{ca} , on a :

$$\begin{cases} u_{ab} = u_{a0} - u_{b0} \\ u_{ba} = u_{b0} - u_{c0} \\ u_{ca} = u_{c0} - u_{a0} \end{cases} \quad (II.60)$$

u_{a0}, u_{b0} et u_{c0} peuvent être considérées comme des tensions d'entrée à l'onduleur (tensions continues).

Soit "n" l'indice du point neutre du coté alternatif On a:

$$\begin{cases} u_{a0} = u_{an} + u_{n0} \\ u_{b0} = u_{bn} + u_{n0} \\ u_{c0} = u_{cn} + u_{n0} \end{cases} \quad (II.61)$$

u_{an}, u_{bn} et u_{cn} sont les tensions simples de la machine et u_{n0} est la tension fictive entre le neutre de la MAS et le point fictif d'indice "o".

Sachant que la charge est équilibrée et le neutre isolé alors:

$$u_{a0} + u_{b0} + u_{c0} = 0 \quad (II.62)$$

La substitution de (II.62) dans (II.61) aboutit à:

$$u_{n0} = \frac{1}{3} \cdot (u_{a0} + u_{b0} + u_{c0}) \quad (II.63)$$

En remplaçant (II.63) dans (II.61), on obtient:

$$\begin{cases} u_{an} = \frac{2}{3}u_{a0} - \frac{1}{3}u_{b0} - \frac{1}{3}u_{c0} \\ u_{bn} = -\frac{1}{3}u_{a0} + \frac{2}{3}u_{b0} - \frac{1}{3}u_{c0} \\ u_{cn} = -\frac{1}{3}u_{a0} - \frac{1}{3}u_{b0} + \frac{2}{3}u_{c0} \end{cases} \quad (II.64)$$

En utilisant les variables booliennes de l'état des interrupteurs on a:

$$\begin{cases} u_{an} = \frac{U_0}{3}(2S_a - S_b - S_c) \\ u_{bn} = \frac{U_0}{3}(-S_a + 2S_b - S_c) \\ u_{cn} = \frac{U_0}{3}(-S_a - S_b + 2S_c) \end{cases} \quad (II.65)$$

Ou bien sous forme matriciel comme suite:

$$\begin{bmatrix} u_{an} \\ u_{bn} \\ u_{cn} \end{bmatrix} = \frac{U_0}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (II.66)$$

Comme on peut le voir, les combinaisons $(S_a S_b S_c) = (1 1 1)$ et $(0 0 0)$ correspondent au vecteur nul. La figure (II.4) montre les six vecteurs non nuls qui peuvent être créés par un onduleur triphasé.[BE 05]

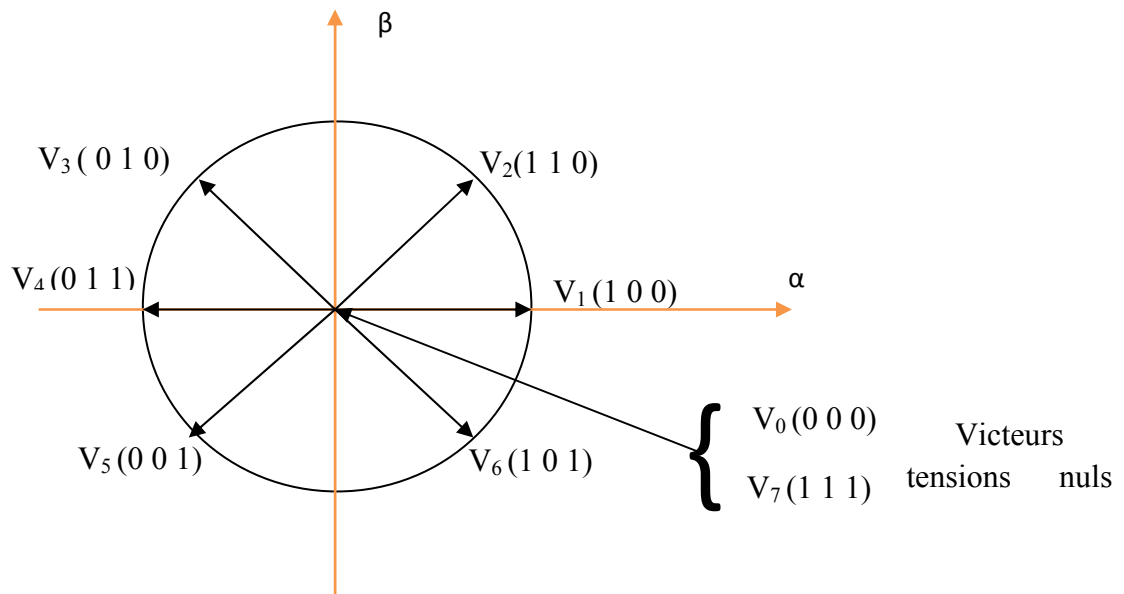


Figure II.4 : Vecteur de tension crée par l'onduleur.

II.4.2 Commande de l'onduleur de tension à MLI naturelle (sinus-triangle)

La technique de la MLI naturelle repose sur la comparaison entre deux signaux :

- Le premier qui est appelé signal de référence (Modulatrice) représente l'image de la sinusoïde qu'on désire à la sortie de l'onduleur. Ce signal est modulable en amplitude et en fréquence.
- Le second qui est appelé signal de la porteuse (Triangulaire) définit la cadence de la commutation des interrupteurs statiques de l'onduleur. C'est un signal de haute fréquence (HF) par rapport au signal de référence.

Pour une référence sinusoïdale, deux Paramètres suffisent pour caractériser la commande [CO 07]:

- L'indice de modulation (m), égal au rapport f_m / f_p des fréquences de modulation et de références.
- Le coefficient de réglage en tension (r), égal au rapport de l'amplitude de la référence à la valeur de Crête de modulation (V_m / V_{pm}).

Le schéma synoptique correspondant à la génération des impulsions par MLI est donné par la figure (II.5) qui consiste à comparer un signal triangulaire (porteuse) avec un signal sinusoïdale (modulatrice).

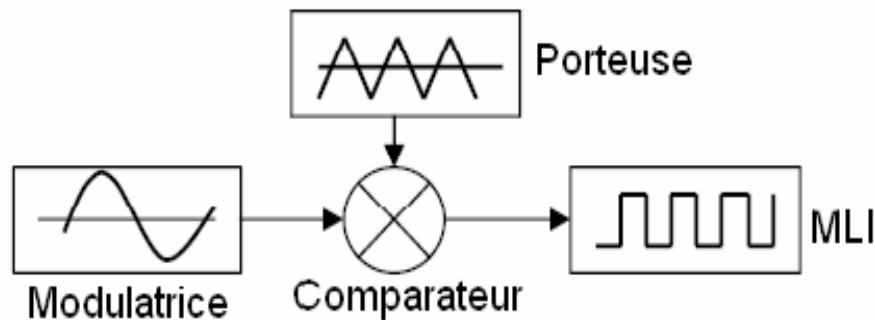
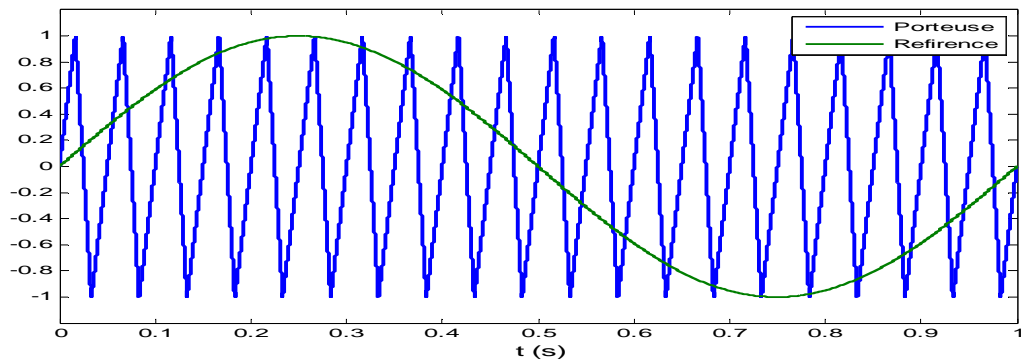


Figure. II.5: Principe de la commande MLI

Les figures(II.6, II.7) représentent deux MLI générées par la comparaison de deux signaux de la porteuse en triangle ayant deux fréquences différentes 20Hz (figure II.6) et 40Hz (figure II.7), avec le même signal sinusoïdal de référence. Ces MLI sont obtenues comme suit :



L'impulsion imposée au bras de l'onduleur

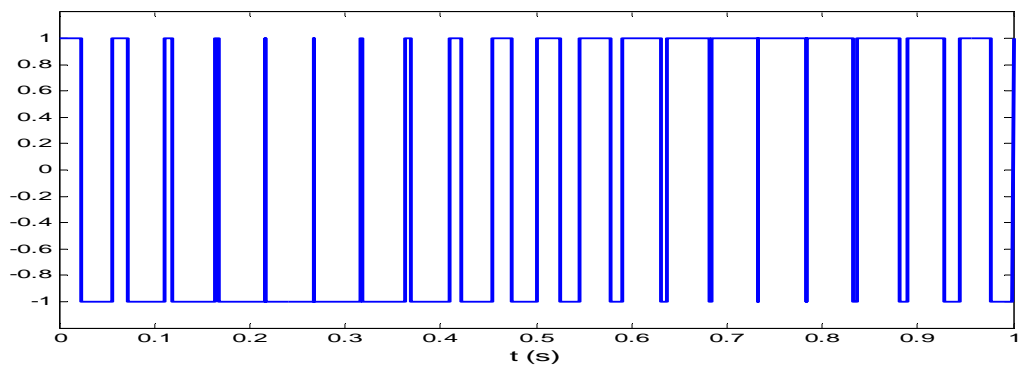
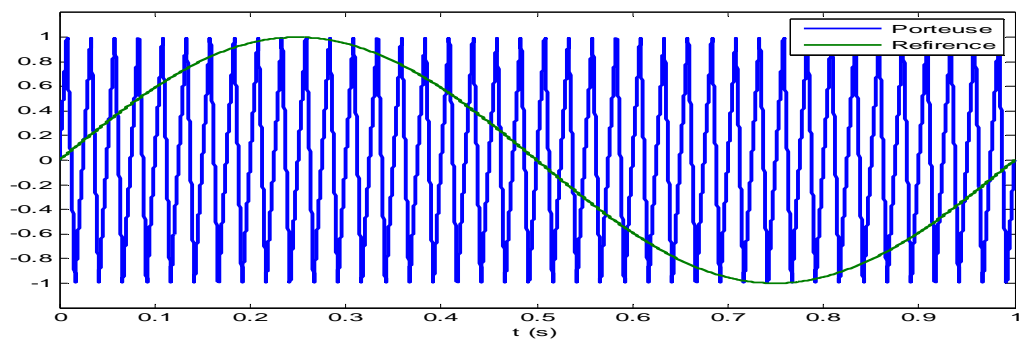


Figure II.6 : Génération d'une MLI naturelle pour un signal de la porteuse de 20HZ



L'impulsion imposée au bras de l'onduleur

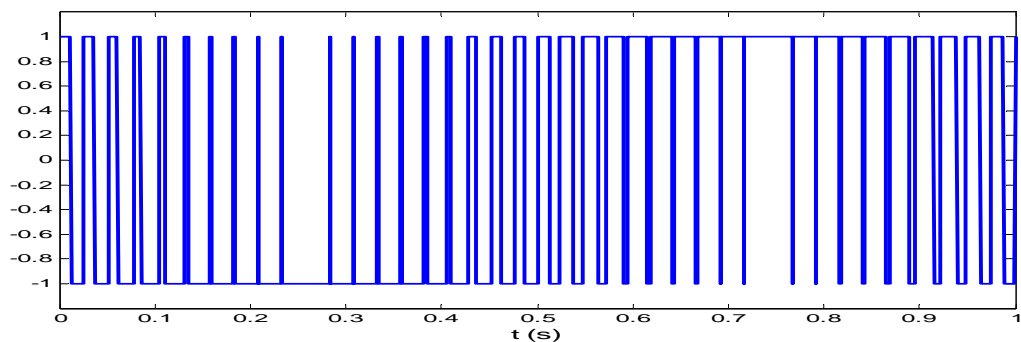


Figure II.7: Génération d'une MLI naturelle pour un signal de la porteuse de 40Hz.

La modulation sinus-triangle présente l'inconvénient de générer des impulsions dissymétriques par rapport à une période de la porteuse. Ainsi, les instants de commutation ne peuvent être exprimés sous forme analytique simple, ce qui rend délicate la mise en œuvre dans les applications numériques.

L'avantage majeur de la technique de modulation sinus-triangle naturelle est de réduire la pollution (élimination d'harmoniques non désirés) ou de minimiser les oscillations sur la vitesse, le couple et les courants; ce qui permettra de réduire la pollution en harmoniques dans le réseau électrique avec minimisation des pertes dans le système et donc amélioration du rendement.

II.5 Conclusion

Nous avons fait état d'une méthode permettant la surveillance d'une machine asynchrone multi-enroulement lorsqu'un défaut rotorique. Pour cette surveillance, nous avons développé un modèle de la machine asynchrone qui permet d'étudier le phénomène répercuté sur le courant statorique .

On considère que le rotor est constitué de plusieurs éléments, chaque élément de la cage est décrit par un circuit électrique équivalent de N_r grandeurs. Puis, on a fait la transformation de N_r grandeurs vers deux grandeurs, pour faciliter l'étude.

La modélisation d'un système physique sont une étape essentielle qui précède toute implémentation matérielle, Dans les langues évoluées, cette tâche est réalisée par l'élaboration des programmes informatiques spécifiques qui dérivent le comportement du système.

Dans chapitre suivant nous avons simulé ce modèle- sur MATLAB.

III.1.INTRODUCTION

On considère la simulation du modèle multi enroulements, permettant de représenter les différentes courbes du vitesse de rotation , du couple , du courant statorique, et du courant dans les barres rotoriques. La simulation est effectuée dans différentes conditions de fonctionnement : la machine à l'état sain et avec défaut, sans onduleur et avec onduleur .

La valeur de la résistance doit être bien déterminer, d'après les chercheurs on prend la valeur de la résistance de la barre cassée comme suit ($R_{bc}=30*R_b$)

Aujourd'hui la simulation est trais important dans les études physiques , dans ce chapitre nous avons utilise MATLAB.

Il permet de résoudre des équations différentielles pouvant comporter certains types de non linéarités. Il comporte des modules qui peuvent réaliser des fonctions comme la Sommation, l'Intégration, Multiplication, le Retard ,etc. Dans le cas d'une intégration, il est impératif de spécifier la valeur initiale (elle est d'ailleurs prise égale à zéro par défaut). Il offre également plusieurs méthodes de résolution numérique des équations différentielles (Euler ,Runge Kutta d'ordre 3, Runge Kutta d'ordre 5, Adams, Gear, etc) en choisissant convenablement le pas d'integration adapter à la dynamique du système à résoudre.

➤ Résultat de simulation

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

III. 2 .Modèle réduit

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

- Un bloc "mécanique" qui traduit l'équation de mouvement expression (II -44).
- Un bloc "électrique" qui traduit l'équation expression (II -54).
- Un bloc "électromécanique" qui traduit l'équation (II -58) du couple.

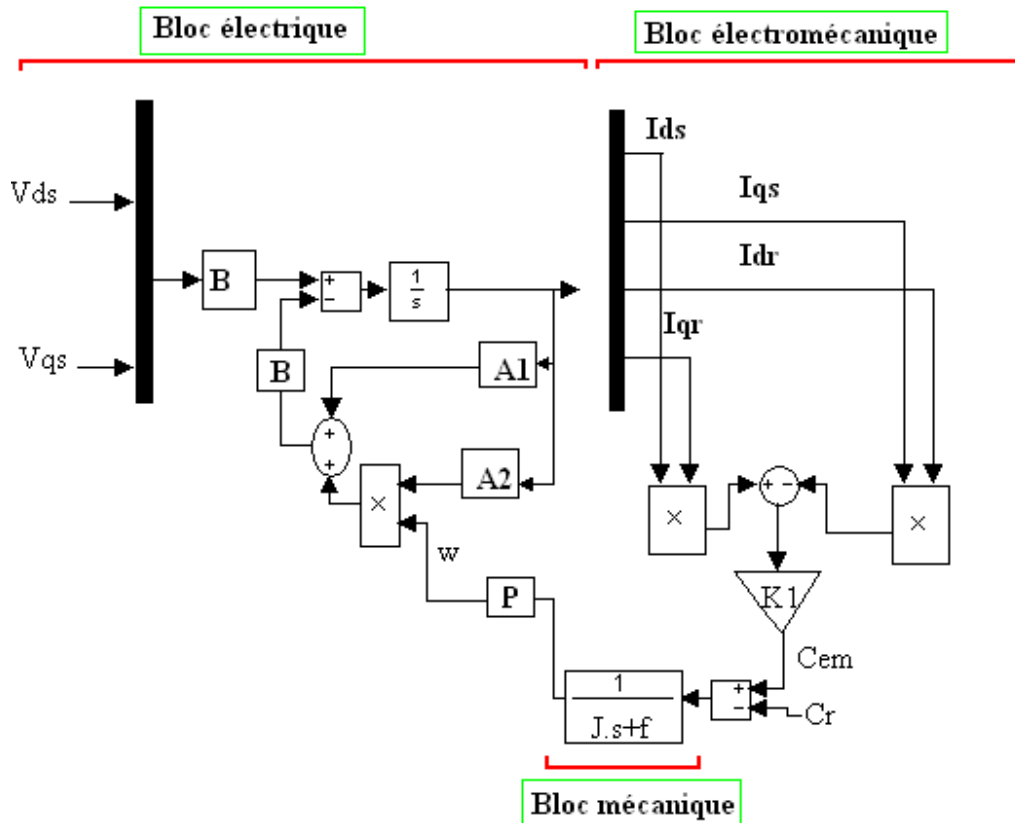


Figure III.1 : Schéma de simulation en SIMULINK de modèle réduit

Avec: $K_1 = \left(\frac{3}{2}\right) \cdot p \cdot N_r M_{sr}$

A- Cas d'une machine sans onduleur de tension

A-1 machine sain

Pour observer le comportement du modèle simulé, un couple résistant $C_r = 3.5 \text{ Nm}$ est appliqué à la machine à l'instant $t=0.6s$. Ce couple représente le couple nominal de la machine réelle étudiée.

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

Les courants statoriques sur la figure (III-2-c) et le courant dans la barre rotorique sur la figure (III-2-d).

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

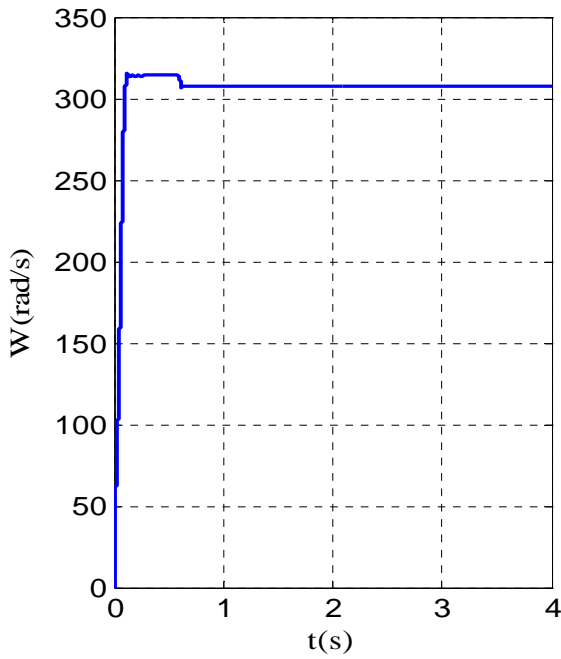
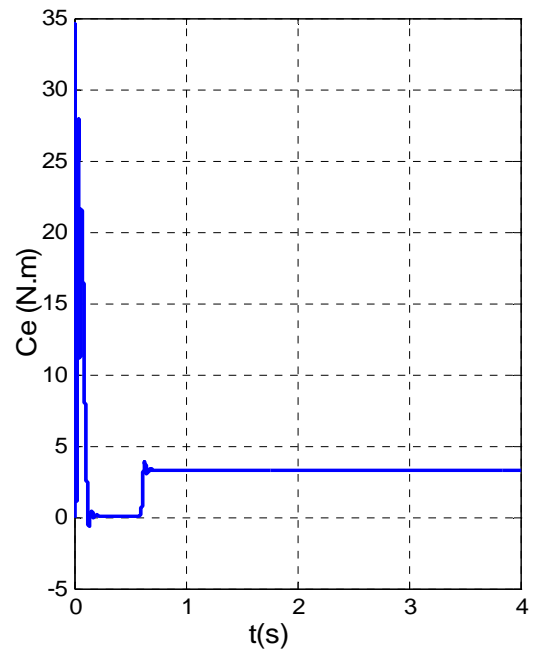
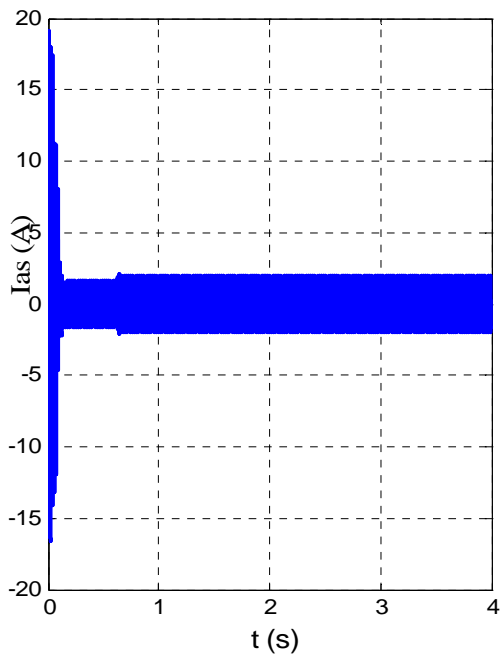


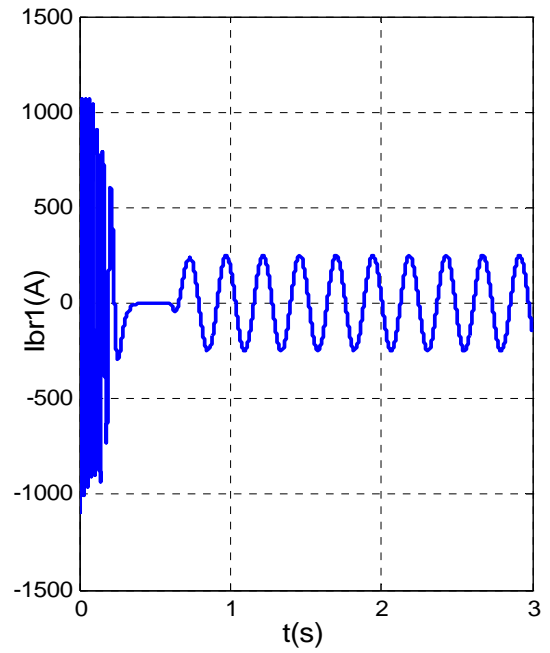
Figure (a) : La vitesse de rotation



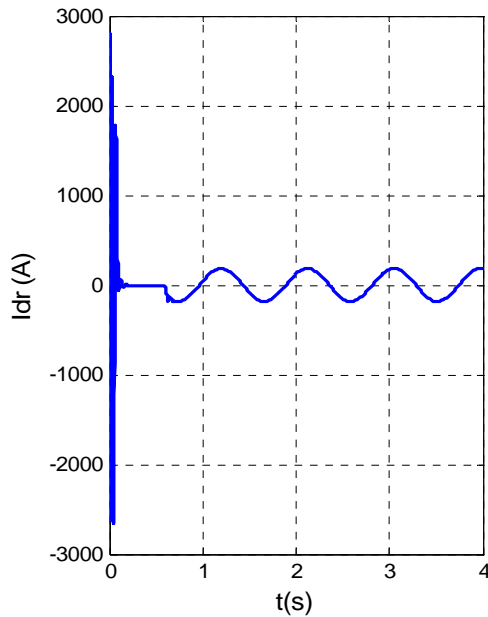
Figure(b) : Le couple électromagnétique



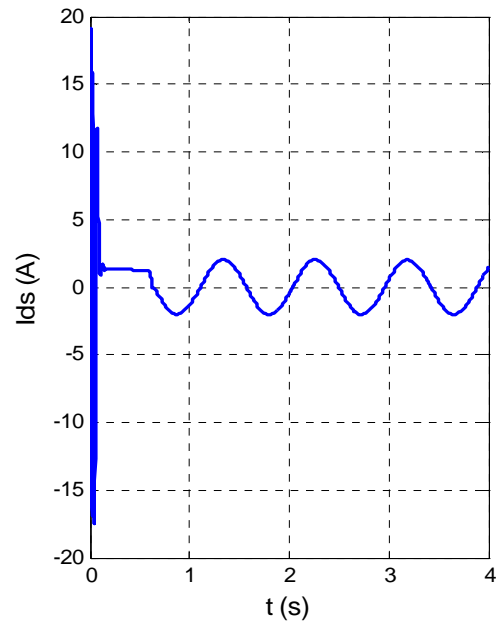
Figure(c) : Courant statorique



Figure(d) : Courant dans la barre 1



Figure(e) : Courant I_{dr}



Figure(f) : Courant I_{ds}

Figure III. 2 : Simulation avec modèle réduit : machine en charge ($C_r=3.5N.m$) Alimentation sans onduleur

➤ Interprétation des résultats

A l'instant $t=0.6s$, nous appliquons un échelon de couple résistant $C_r=3.5 N.m$. Les courants des barres rotoriques sont très importants. Ils peuvent atteindre 1000A en régime transitoire. Les figures (III-2) montrent l'évolution du couple électromagnétique, de la vitesse et du courant statorique. Les formes des graphes montrent qu'en phase de démarrage le moteur subit un allongement du régime transitoire. A titre d'exemple, nous prenons la courbe du couple électromagnétique. Cette dernière comprend au début une série d'oscillations d'amplitude élevées qui s'amortissent au cours de l'accélération du moteur, à la fin du régime de démarrage (0.25s). Figure (III-2-b). Le couple atteint sa valeur maximale, puis s'atténue pour atteindre la valeur du couple résistant.

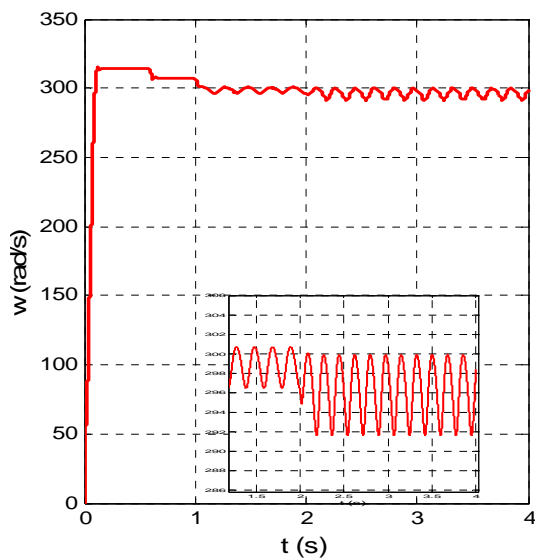
A-2- Cas d'une machine avec défaut rotorique

A-2-a- Cas d'une cassure de deux barres adjacentes

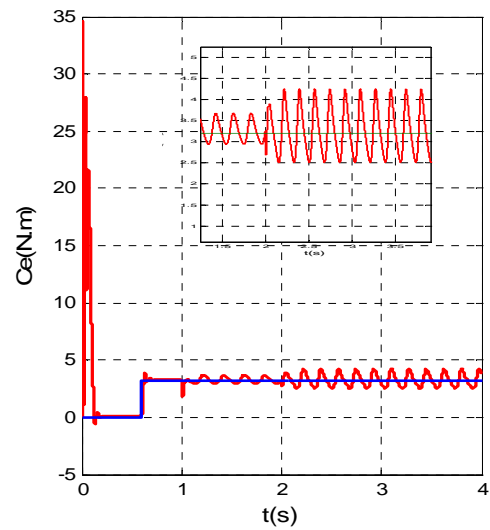
Dans la simulation suivante, on va supposer deux défauts successifs de rupture de barres adjacentes :

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

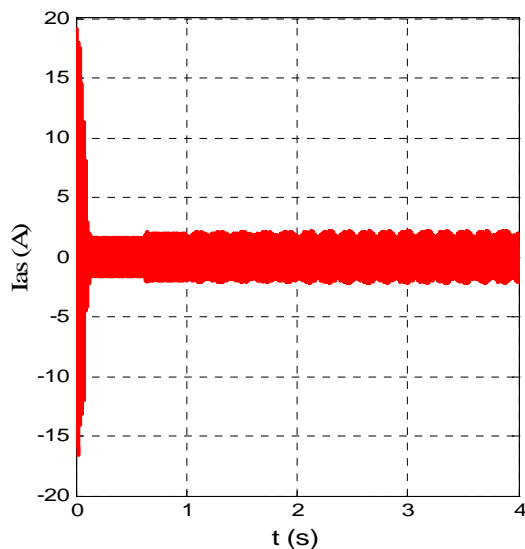
La machine était initialement saine et chargée $Cr=3.5 N.m$



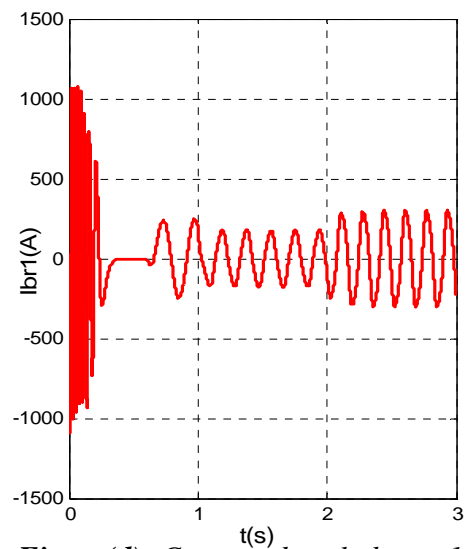
Figure(a): Vitesse de rotation



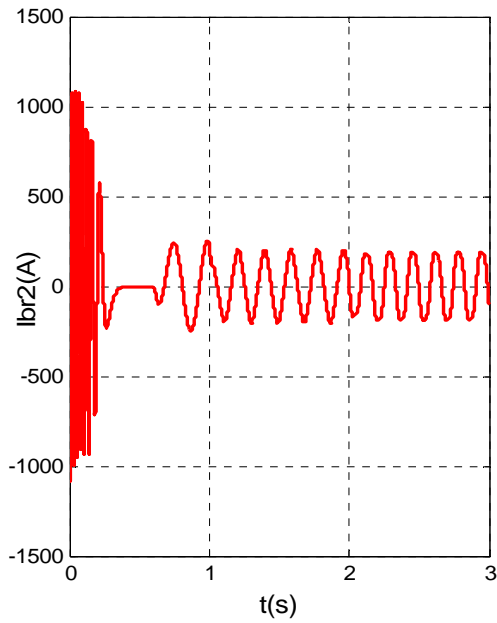
Figure(b) : couple électromagnétique



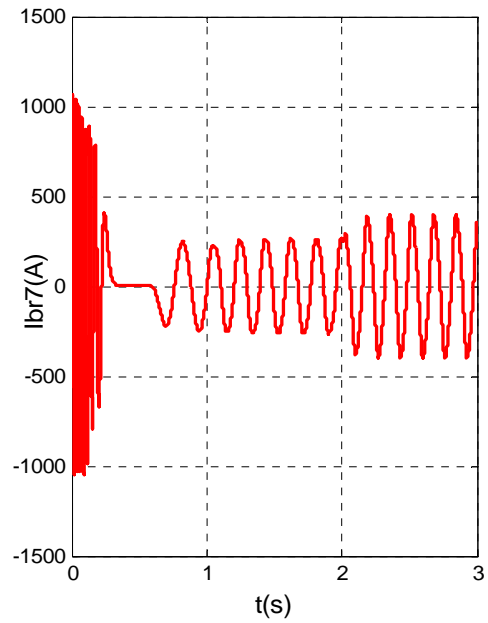
Figure(c) : Courant statorique



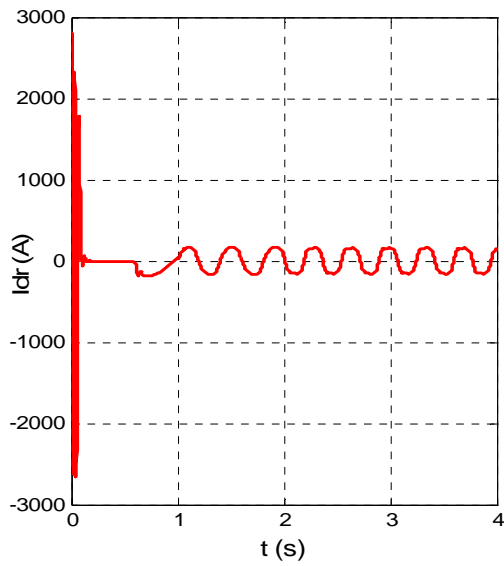
Figure(d): Courant dans la barre 1



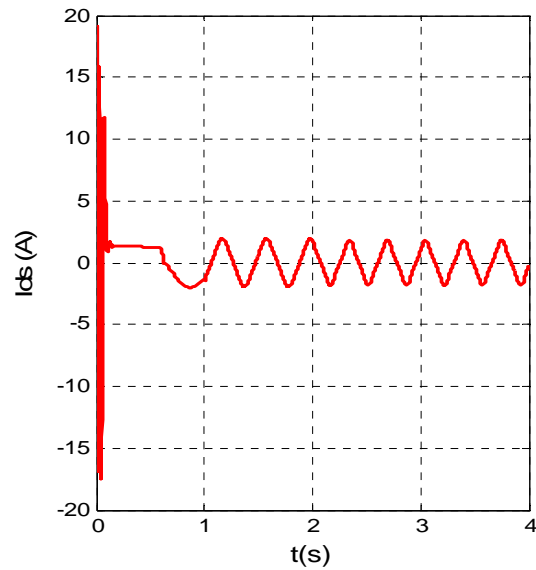
Figure(e): Courant dans la barre 2



Figure(f): Courant dans la barre 7



Figure(g) : Courant I_{dr}



Figure(h) : Courant I_{ds}

Figure III. 3 : Simulation avec le modèle réduit : machine en charge $Cr=3.5 \text{ N.m}$ avec rupture successive des barres '1 puis 2' à partir de $t=1s$

➤ **Interprétation des résultats**

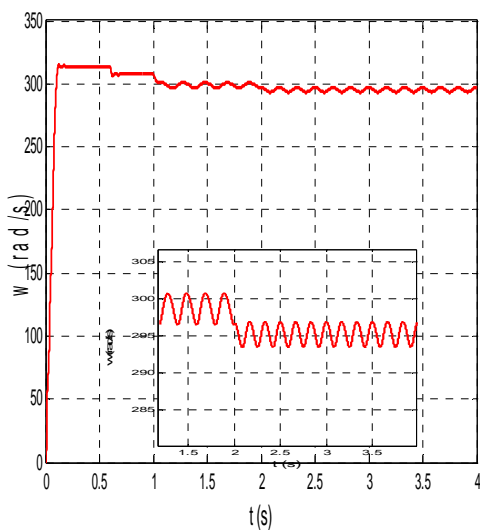
- On remarque dans la figure du couple électromagnétique (b) une augmentation de l'amplitude des ondulations après la rupture de la barre 1, et des ondulations plus grandes que les premières après la rupture de la barre 2.
- La figure (a) représente l'allure de la vitesse de rotation après la rupture 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 (c) 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.

A-2-b- Cas d'une cassure de deux barres espacées

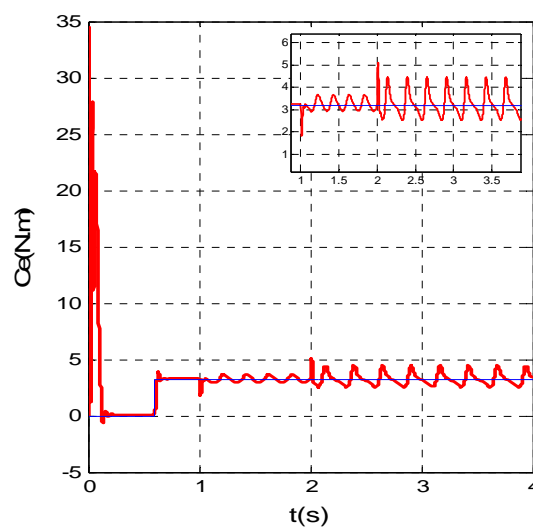
Dans la simulation suivante, on va supposer deux défauts successifs de rupture de barres espacées:

- rupture de la barre 1 à $t=1s$,
- rupture de la barre 7 à $t=2s$.

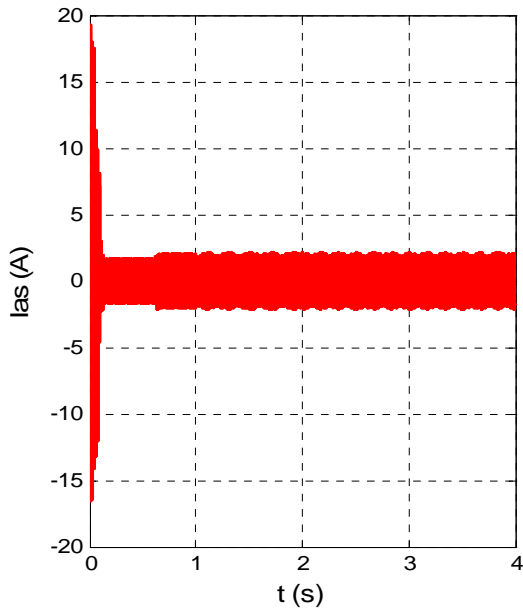
La machine était initialement saine et chargée $C_r=3.5N.m$.



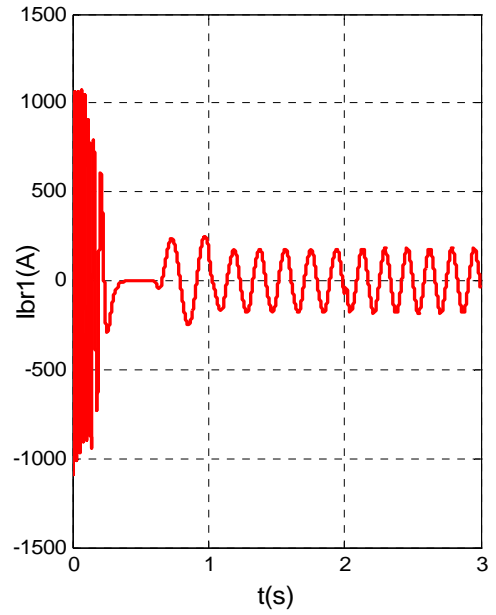
Figure(a):: Vitesse de rotation



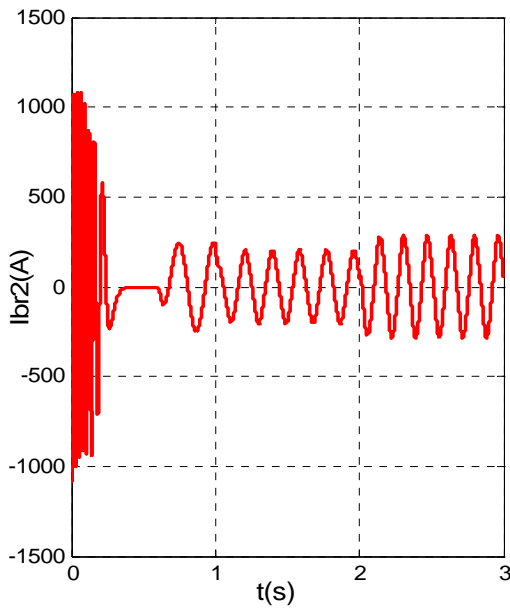
Figure(b): Couple électromagnétique



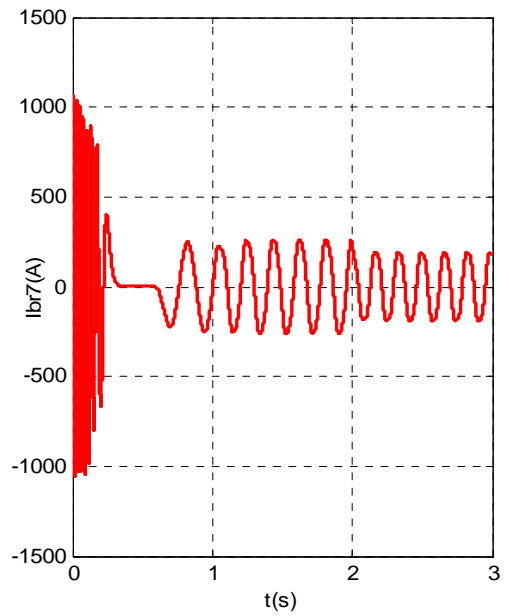
Figure(c): Courant statorique



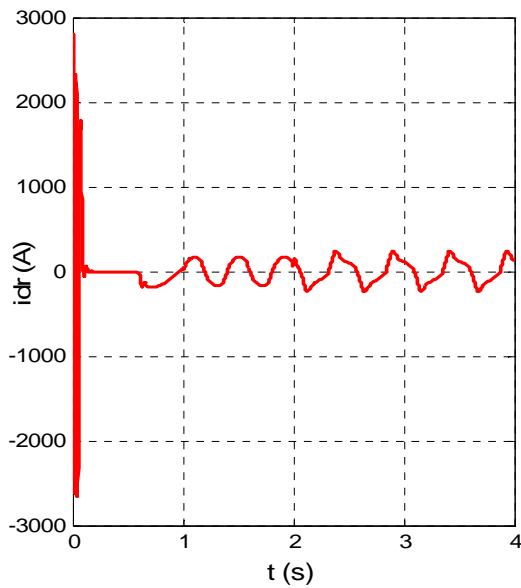
Figure(d) : Courant dans la barre 1



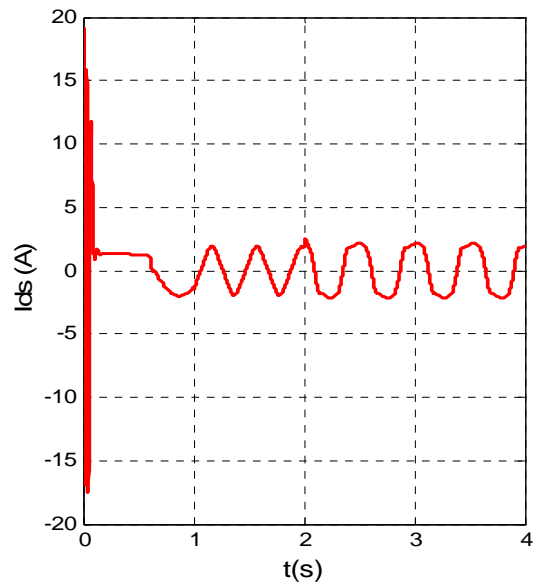
Figure(e): Courant dans la barre2



Figure(f): Courant dans la barre7



Figure(g) : Courant I_{dr}



Figure(h) : Courant I_{ds}

FigureIII.4 : Simulation avec modèle réduit : machine en charge, saine puis défectueuse à partir de $t=1s$

➤ Interprétation des résultats

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

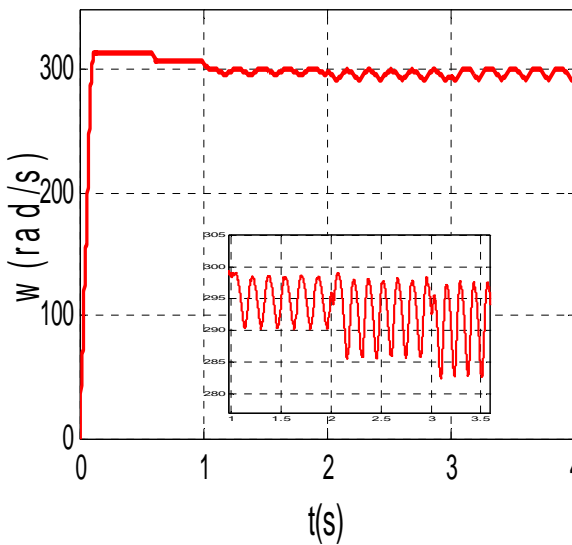
- Des oscillations apparaissent sur le couple électromécanique et la vitesse de rotation ainsi que d'une modulation d'amplitude sur la courbe du courant statorique, ces oscillations augmentent sensiblement avec le nombre de barres cassées et leurs position (espacées ou adjacentes), la valeur moyenne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

A-2-c- Cas d'une cassure de trois barres adjacentes

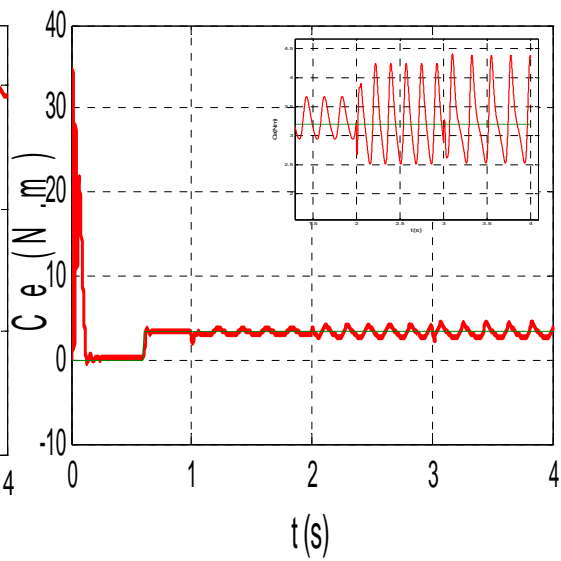
Dans la simulation suivante, on va supposer trois défauts successifs : rupture de barres adjacentes :

- rupture de la barre 1 à $t=1s$,
- rupture de la barre 2 à $t=2s$.
- rupture de la barre 3 à $t=3s$.

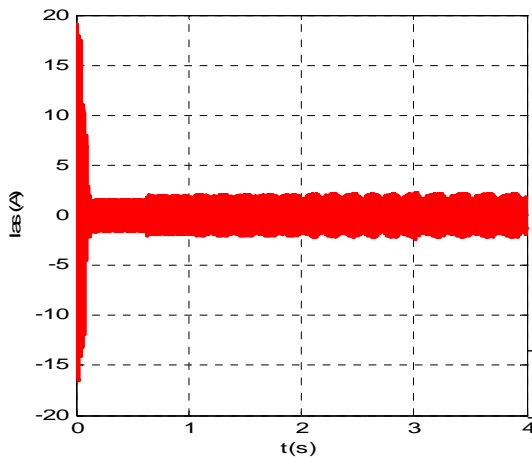
La machine était initialement saine et chargée $C_r=3.5 N.m$



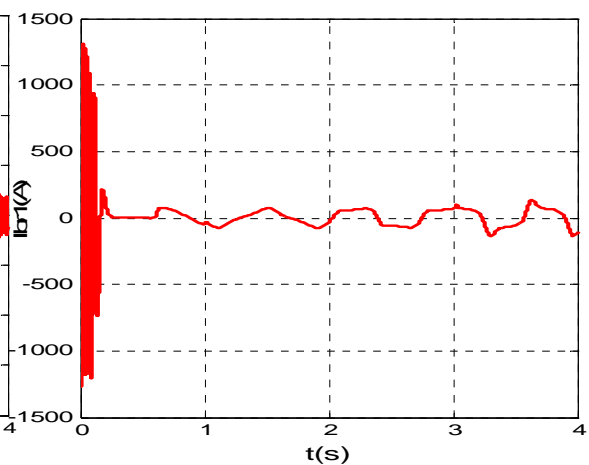
Figure(a): Vitesse de rotation



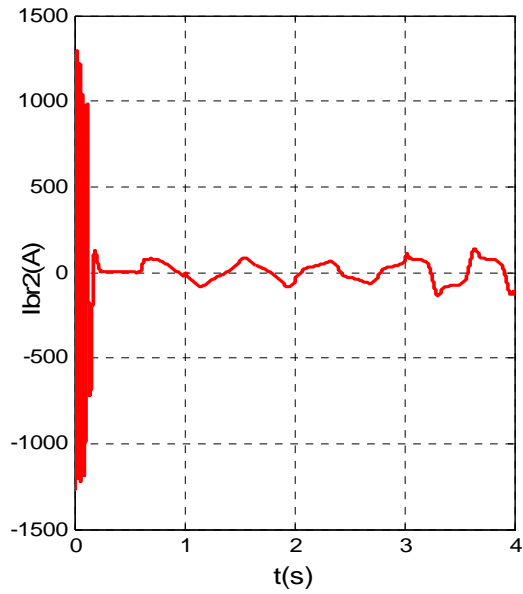
Figure(b): Couple électromagnétique



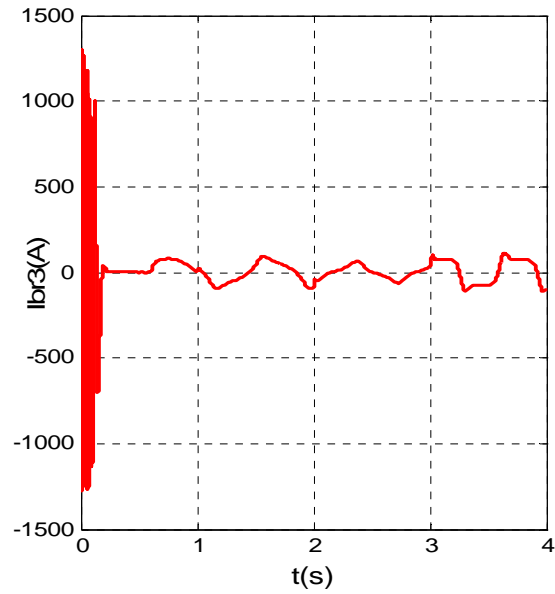
Figure(c): Courant statorique



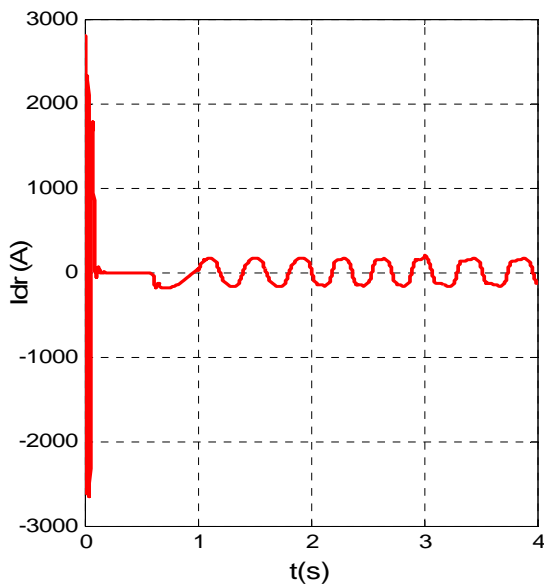
Figure(d): Courant dans la barre 1



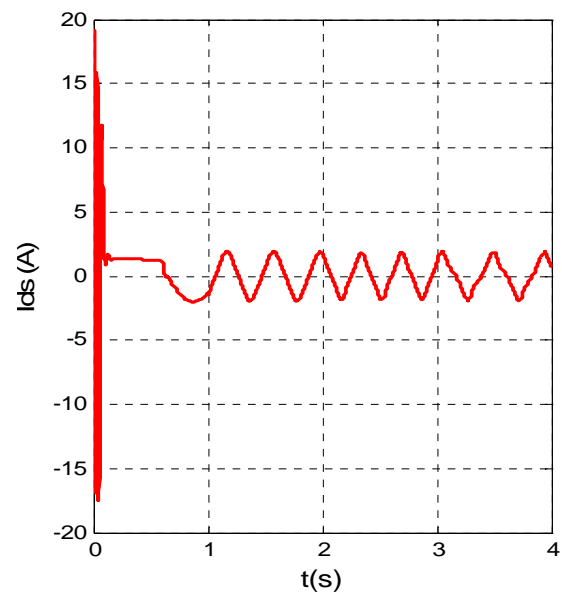
Figure(e): Courant dans la barre2



Figure(f): Courant dans la barre3



Figure(g) : Courant I_{dr}



Figure(h) : Courant I_{ds}

Figure III. 5 : Simulation avec le modèle réduit : machine en charge $Cr=3.5 \text{ N.m}$ avec rupture successive des barres '1, 2 et 3' à partir de $t=1s$

➤ Interprétation des résultats

D'après la figure (III- 5) on constate que :

-On remarque dans la figure du couple électromagnétique (b) 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, et des ondulations plus grandes que les deuxième après la rupture de la barre 3.

- La figure (a) représente l'allure de la vitesse de rotation après la rupture de la barre 1, puis la rupture de la barre 2, puis la rupture de la barre 3. 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. et plus diminuée pour la rupture de la barre 3.

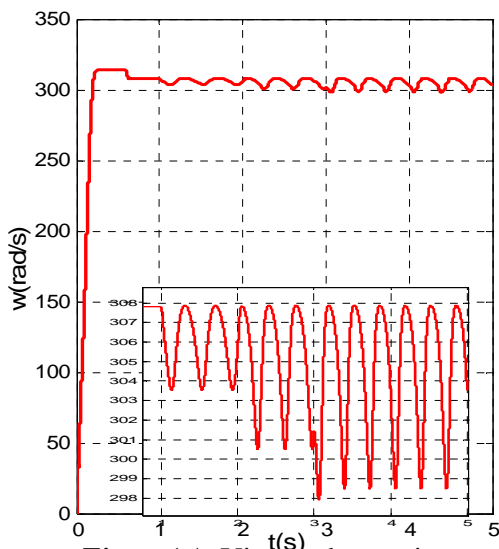
- La figure (c) permet de vérifier la modulation de l'enveloppe du courant statorique après la rupture d'une 1^{er} barre puis les deux barres suivantes (1, 2 et 3). On note également l'augmentation de l'amplitude de l'ondulation quand une deuxième et troisième barre sont cassées.

A-2-d- Cas d'une cassure de trois barres espacées

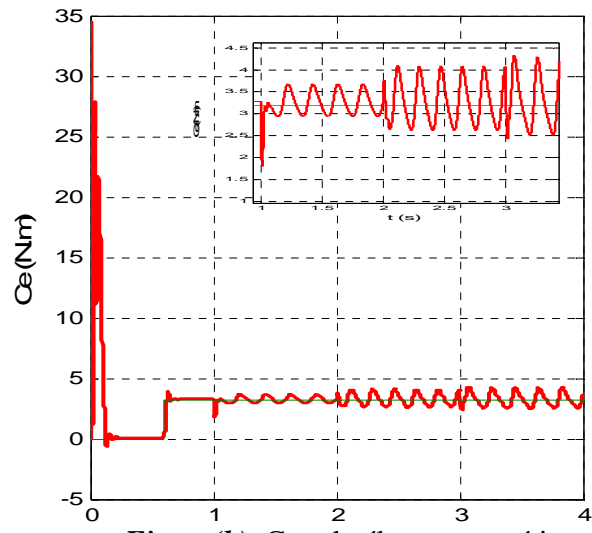
Dans la simulation suivante, on va supposer trois défauts successifs de rupture de barres espacées:

- rupture de la barre 1 à t=1s,
- rupture de la barre 8 à t=2s.
- rupture de la barre 11 à t=3s

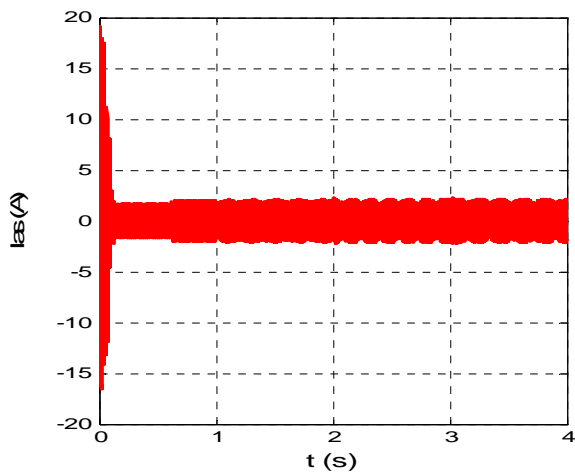
La machine était initialement saine et chargée $C_r=3.5N.m$.



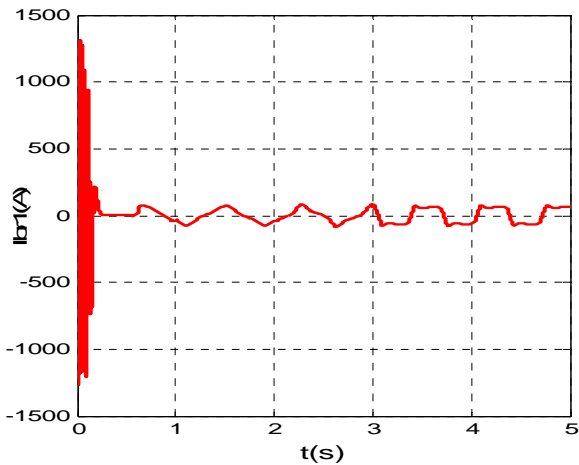
Figure(a): Vitesse de rotation



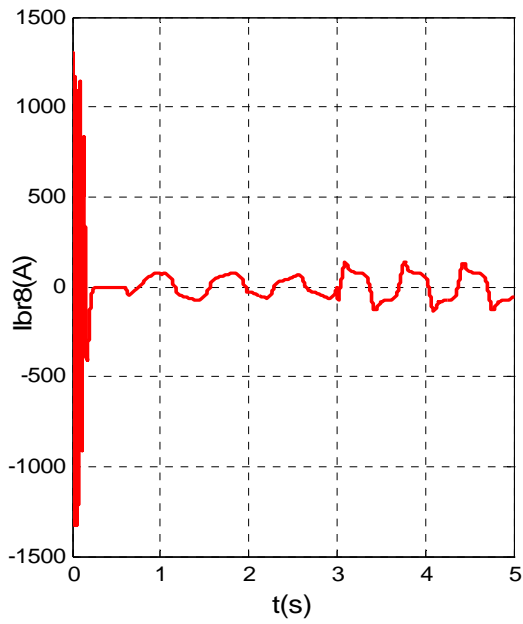
Figure(b): Couple électromagnétique



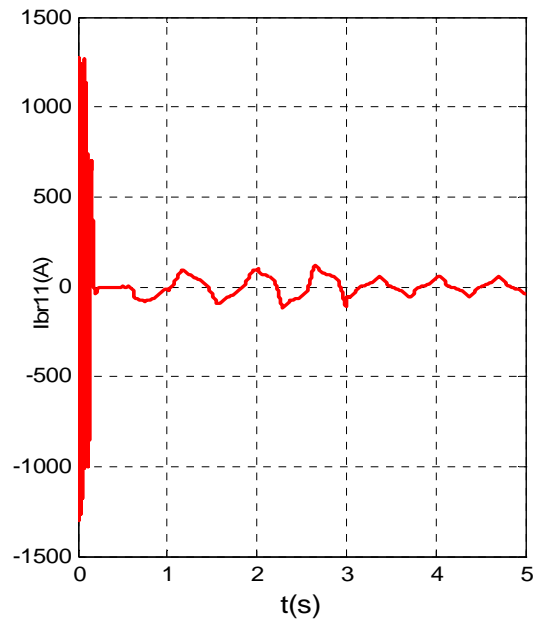
Figure(c): Courant statorique



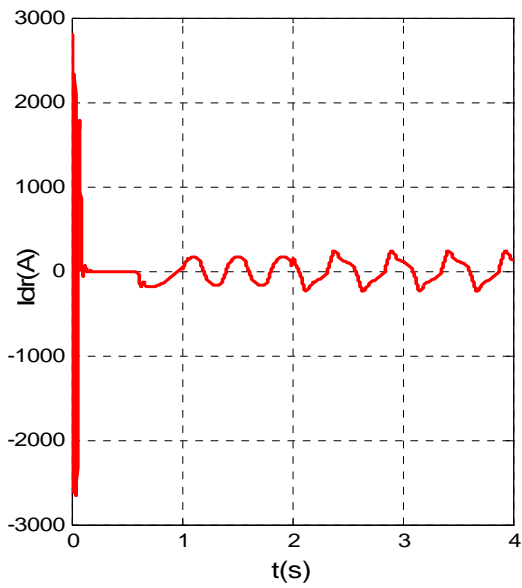
Figure(d): Courant dans la barre 1



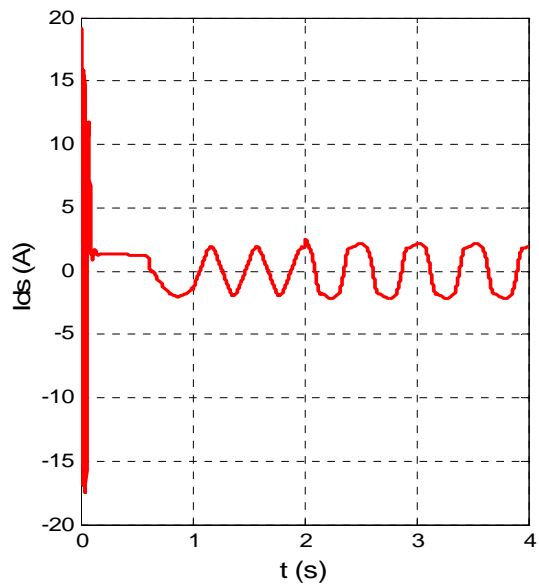
Figure(e): Courant dans la barre8



Figure(f): Courant dans la barre11



Figure(g) : Courant I_{dr}



Figure(h) : Courant I_{ds}

➤ Interprétation des résultats

D'après la figure (III- 6) on constate que :

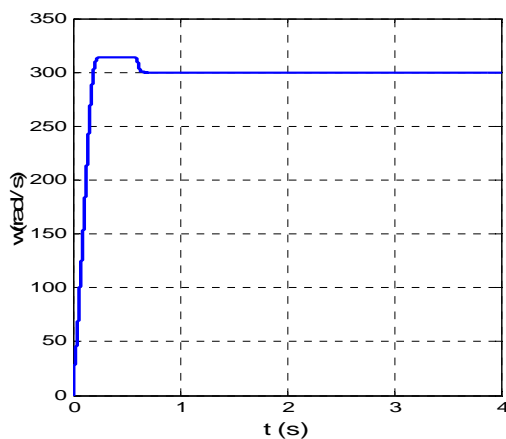
- Des oscillations apparaissent sur le couple électromécanique et la vitesse de rotation ainsi que d'une modulation d'amplitude sur la courbe du courant statorique, ces oscillations augmentent sensiblement avec le nombre de barres cassées et leurs position (espacées ou adjacentes), la valeur moyenne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

B- Cas d'une machine avec onduleur de tension

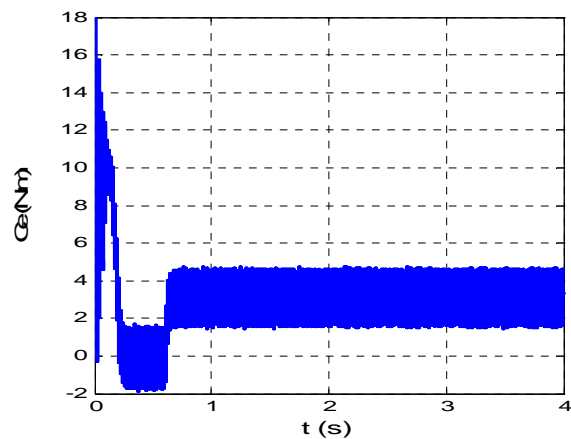
B-1 machine sain

Pour observer le comportement du modèle simulé, un couple résistant $C_r = 3.5 \text{ Nm}$ est appliqué à la machine à l'instant $t=0.6\text{s}$. Ce couple représente le couple nominal de la machine réelle étudiée. La simulation du modèle du moteur asynchrone avec un rotor sain donne, pour la vitesse, la courbe de la figure (III-7-a). Le couple électromagnétique est présenté à la figure (III-7-b). Les courants statoriques sur la figure (III-7-c) et le courant dans la barre rotorique sur la figure (III-7-d).

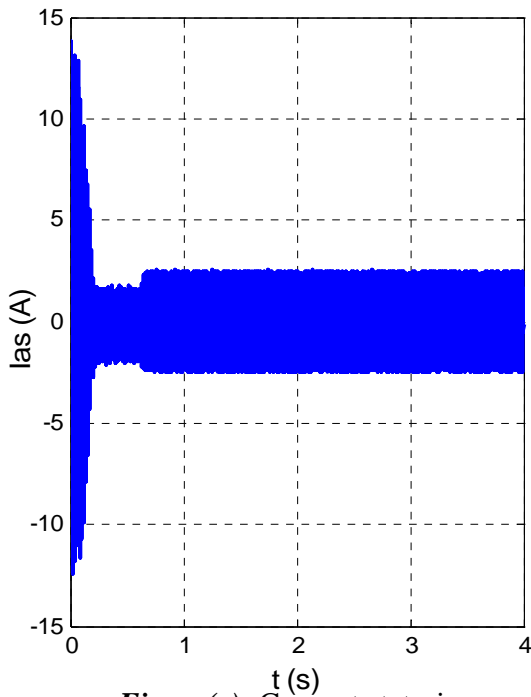
Toutes ces courbes correspondent bien à un fonctionnement normal d'un moteur asynchrone³



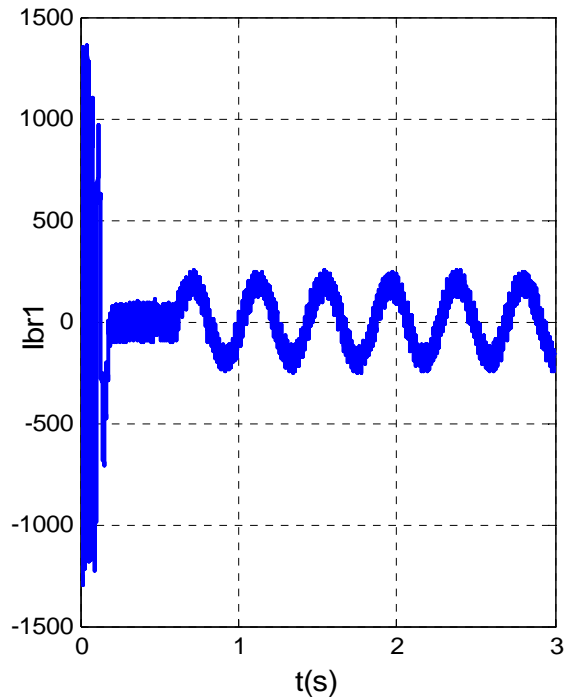
Figure(a): Vitesse de rotation



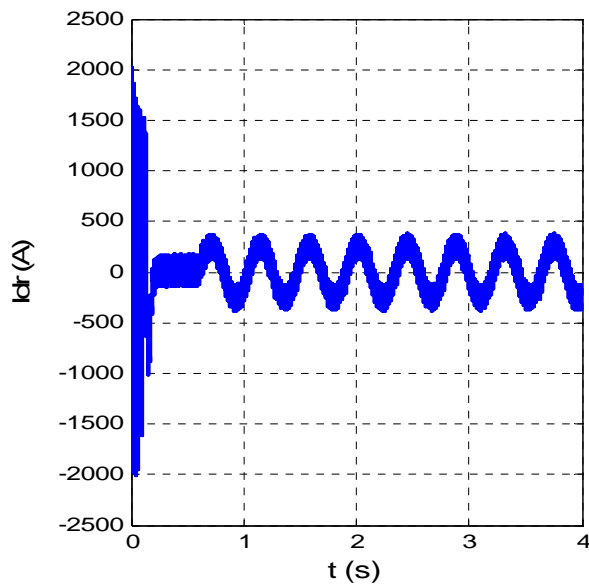
Figure(b): Couple électromagnétique



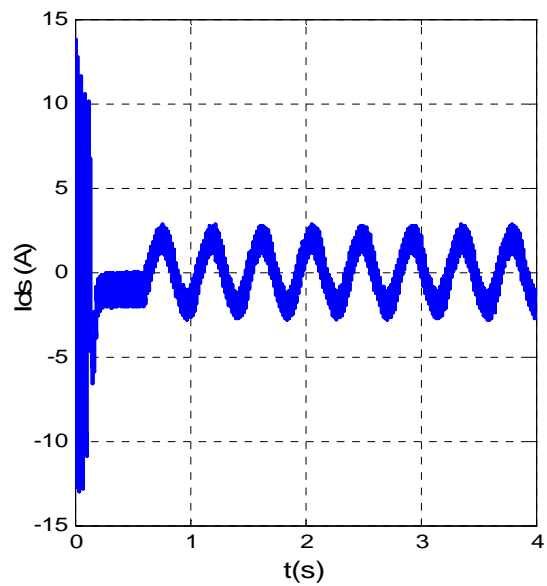
Figure(c): Courant statorique



Figure(d): Courant dans la barre 1



Figure(e) : Courant I_{dr}



Figure(f) : Courant I_{ds}

Figure III. 7 : Simulation avec modèle réduit : machine en charge ($C_r=3.5N.m$) avec onduleur

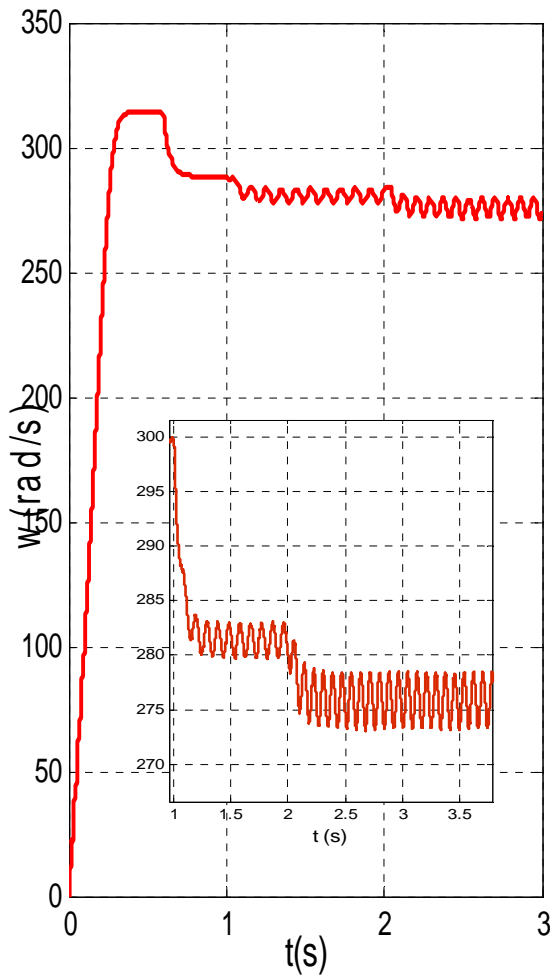
B-2- Cas d'une machine avec défaut rotorique

B-2-a- Cas d'une cassure de deux barres adjacentes

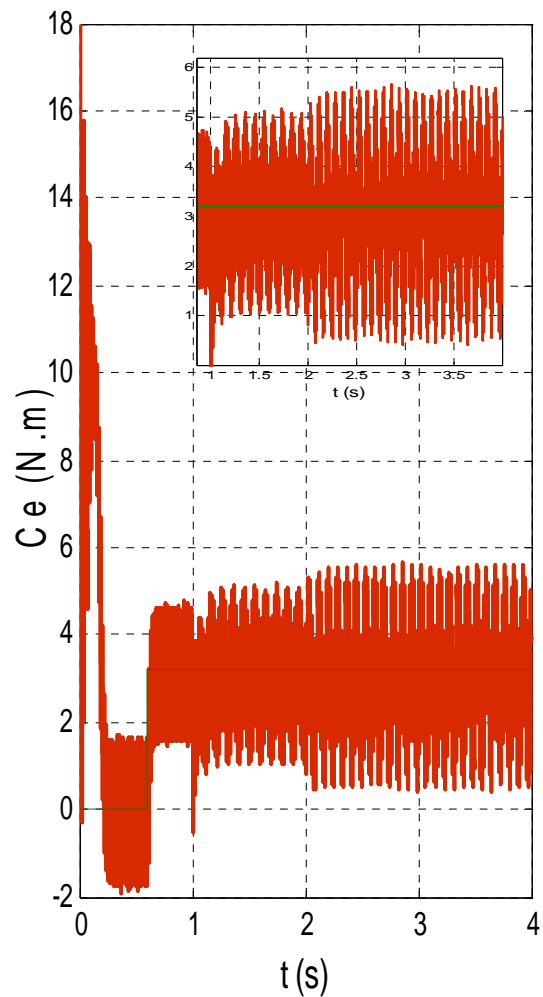
Dans la simulation suivante, on va supposer deux défauts successifs : rupture de barres adjacentes :

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

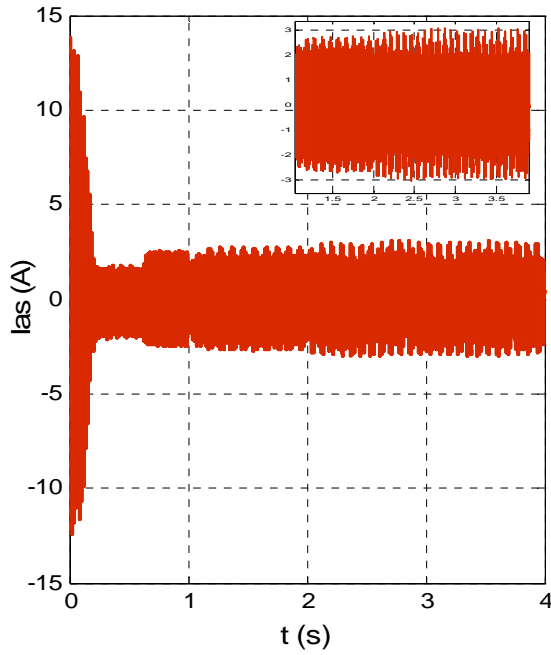
La machine était initialement saine et chargée $C_r=3.5 N.m$



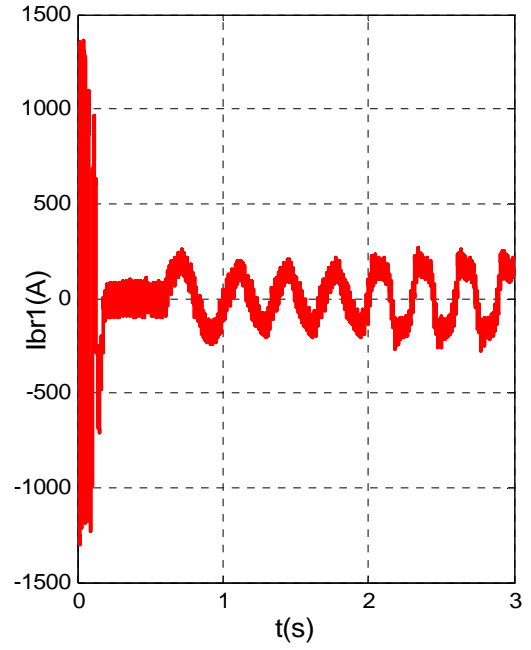
Figure(a): Vitesse de rotation



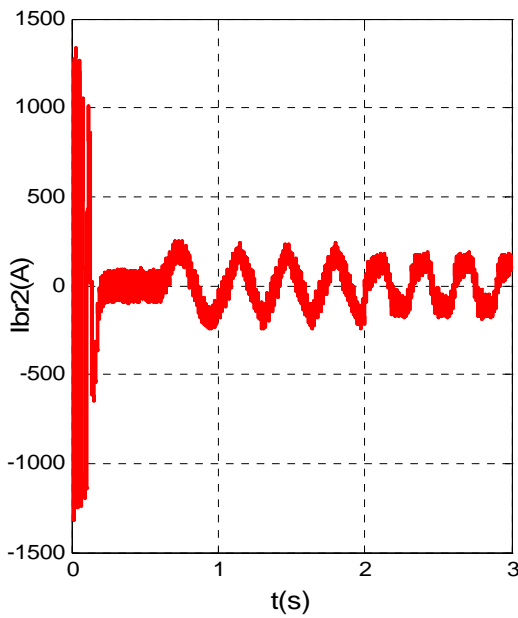
Figure(b): Couple électromagnétique



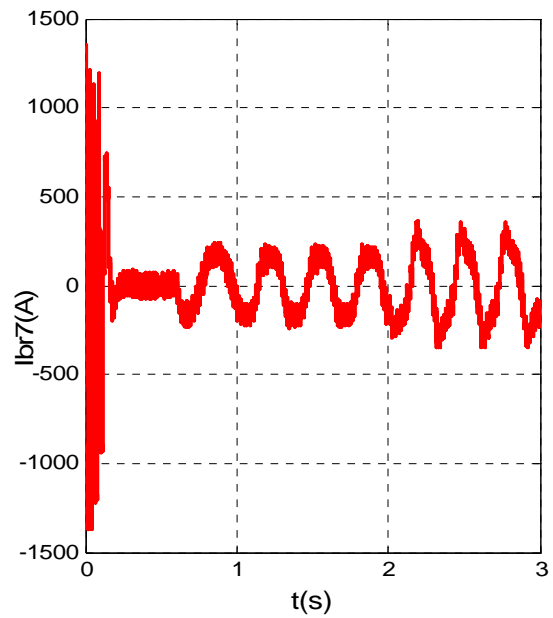
Figure(c): Courant statorique



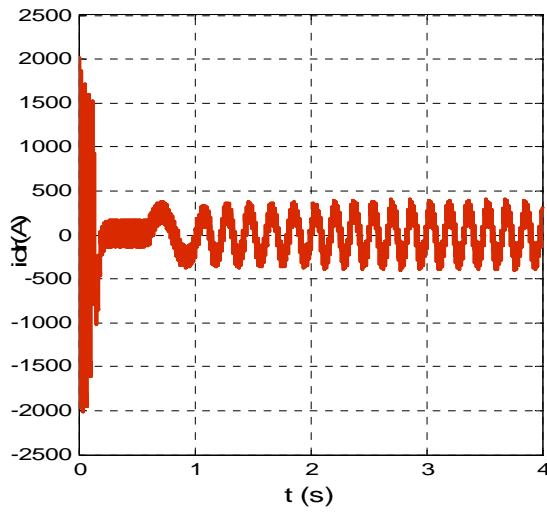
Figure(d): Courant dans la barre 1



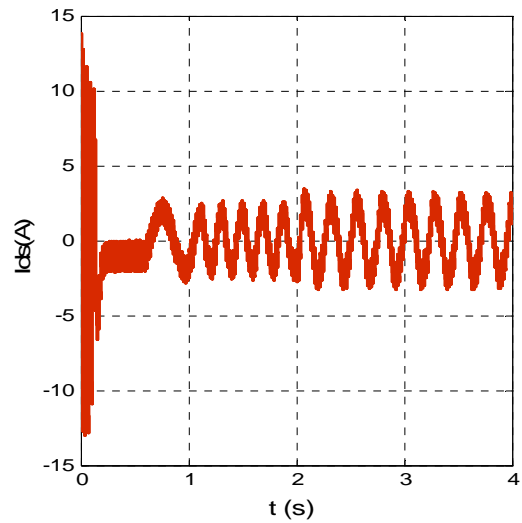
Figure(e): Courant dans la barre 2



Figure(f): Courant dans la barre 7



Figure(g) : Courant I_{dr}



Figure(h) : Courant I_{ds}

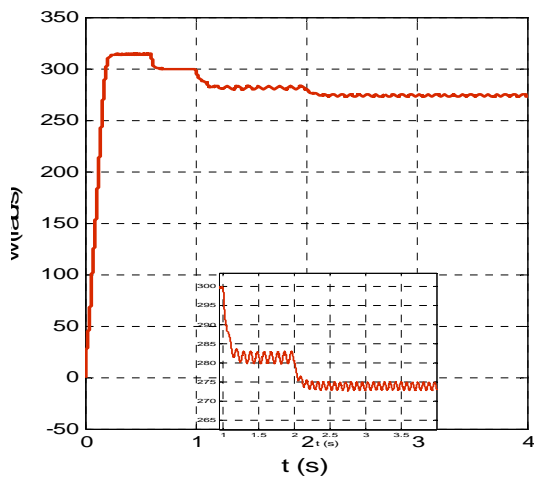
Figure III. 8 : Simulation avec le modèle réduit : machine en charge $Cr=3.5 \text{ N.m}$ avec rupture successive des barres '1 puis 2' à partir de $t=1\text{s}$ (avec onduleur)

B-2-b- Cas d'une cassure de deux barres espacées

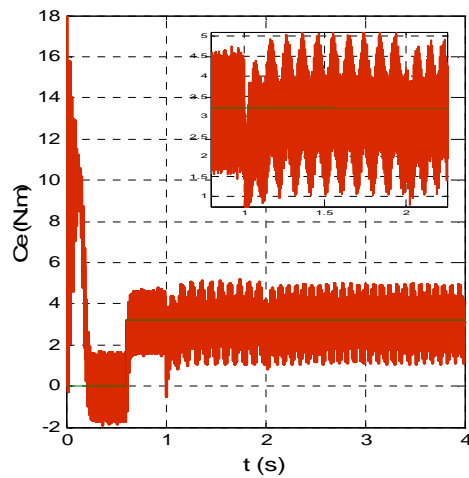
Dans la simulation suivante, on va supposer deux défauts successifs de rupture de barres espacées:

- rupture de la barre 1 à $t=1\text{s}$,
- rupture de la barre 7 à $t=2\text{s}$.

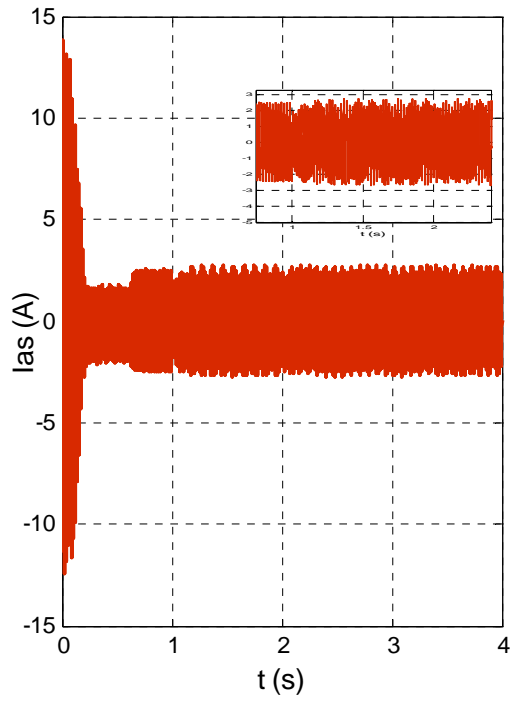
La machine était initialement saine et chargée $Cr=3.5\text{N.m}$.



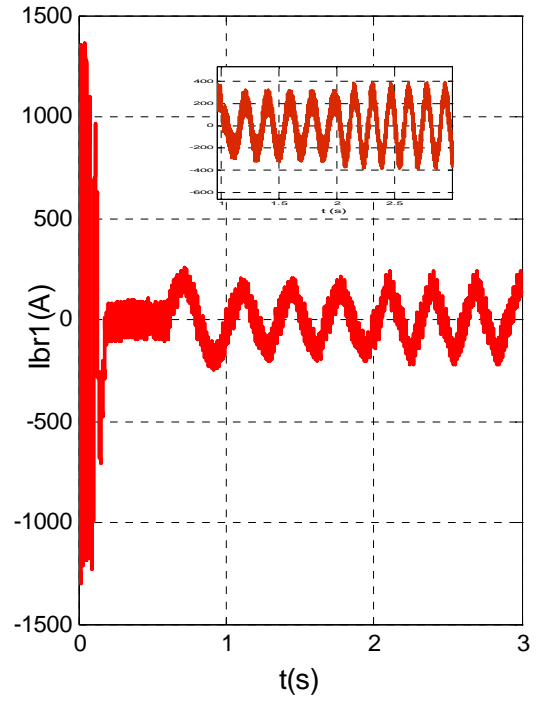
Figure(a): Vitesse de



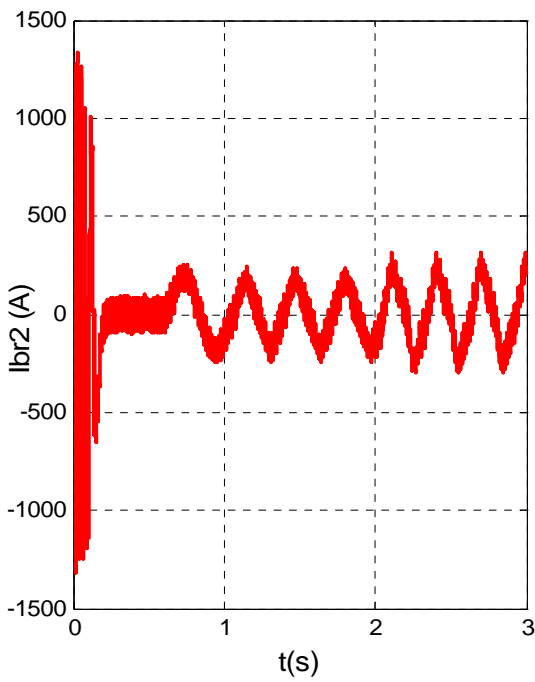
Figure(b): Couple électromagnétique



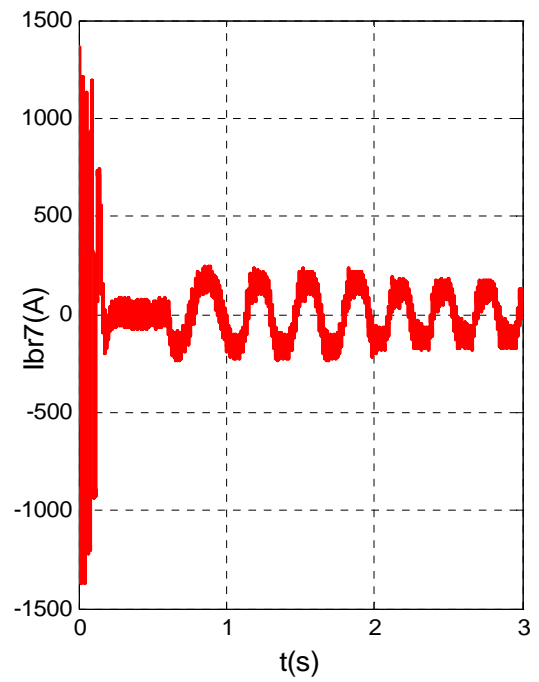
Figure(c): Courant statorique



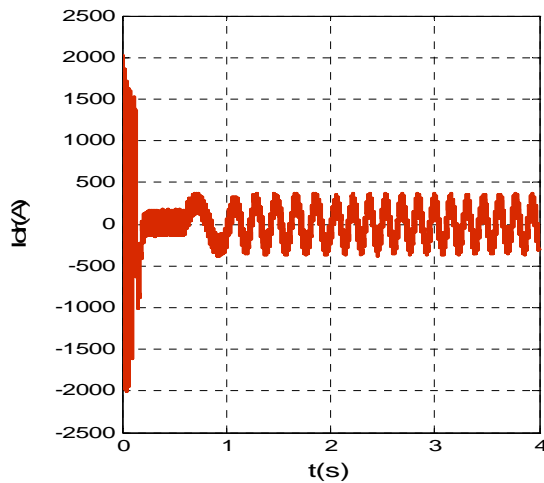
Figure(d): Courant dans la barre 1



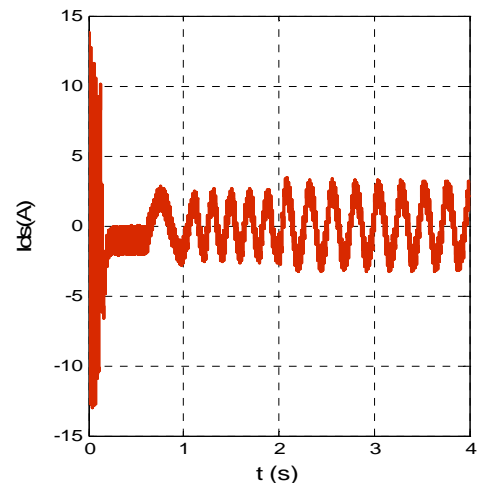
Figure(e): Courant dans la barre 2



Figure(f): Courant dans la barre 7



Figure(g) : Courant I_{dr}



Figure(h) : Courant I_{ds}

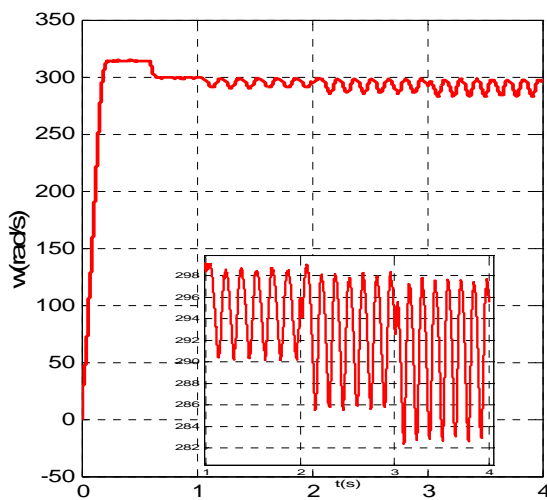
FigureIII.9 : Simulation avec modèle réduit : machine en charge, saine puis défectueuse à partir de $t=1s$ (avec ondulateur)

B-2-c- Cas d'une cassure de trois barres adjacentes

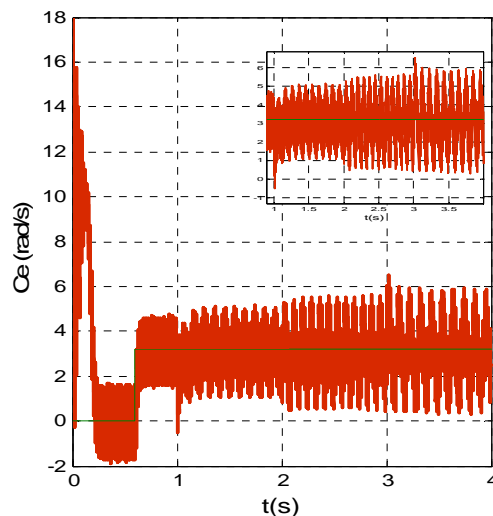
Dans la simulation suivante, on va supposer trois défauts successifs : rupture de barres adjacentes :

- rupture de la barre 1 à $t=1s$,
- rupture de la barre 2 à $t=2s$.
- rupture de la barre 3 à $t=3s$.

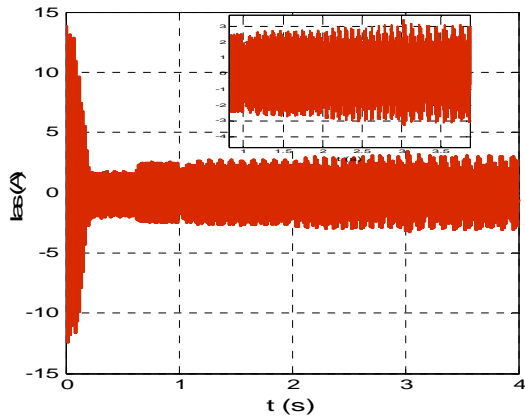
La machine était initialement saine et chargée $Cr=3.5 N$.



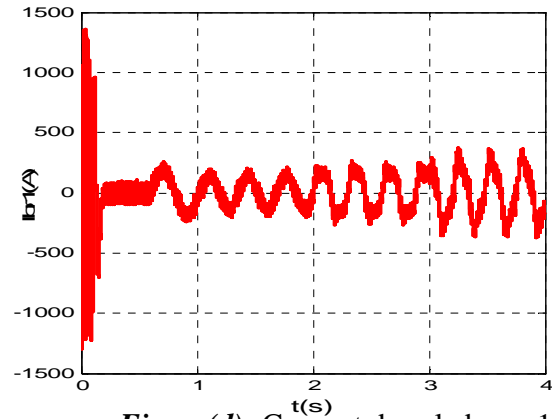
Figure(a): Vitesse de rotation



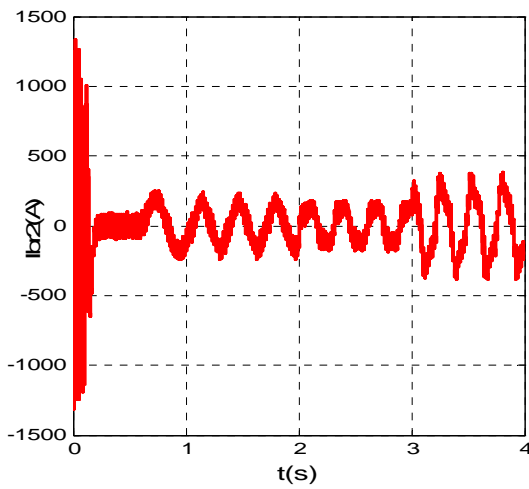
Figure(e): Couple électromagnétique



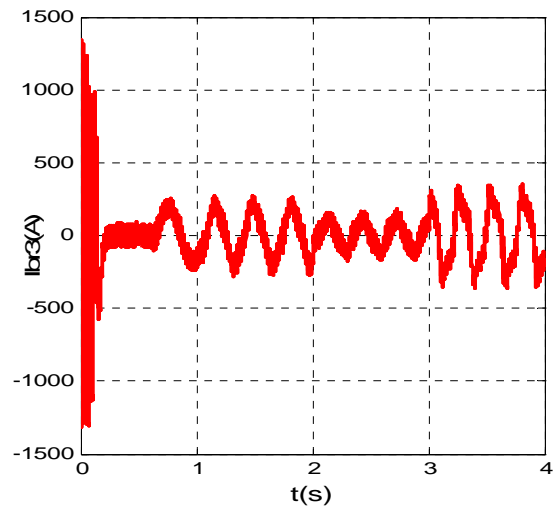
Figure(c): Courant statorique



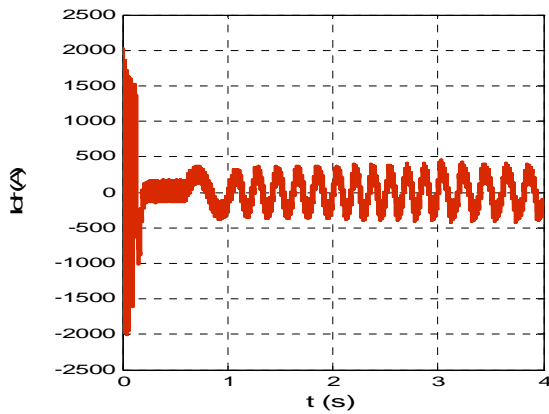
Figure(d): Courant dans la barre 1



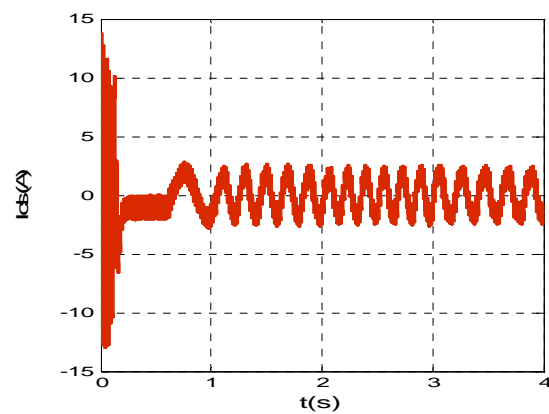
Figure(e): Courant dans la barre 2



Figure(f): Courant dans la barre 3



Figure(g) : Courant I_{dr}



Figure(h) : Courant I_{ds}

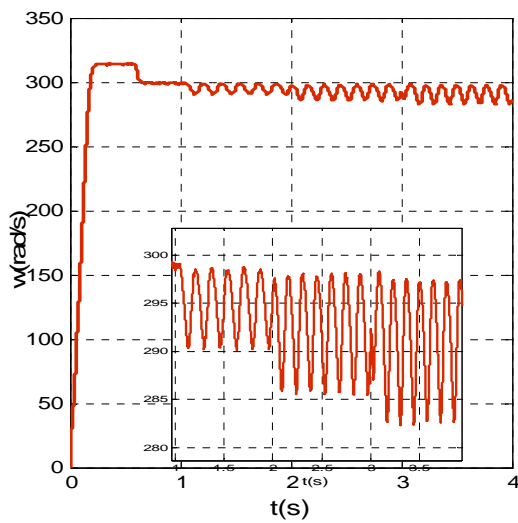
Figure III. 10 : Simulation avec le modèle réduit : machine en charge $C_r=3.5$ N.m avec rupture successive des barres '1, 2 et 3' à partir de $t=1$ s (avec onduleur)

B-2-d- Cas d'une cassure de trois barres espacées

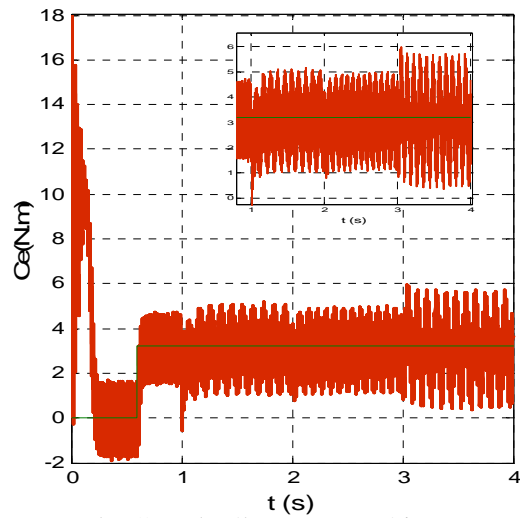
Dans la simulation suivante, on va supposer trois défauts successifs de rupture de barres espacées:

- rupture de la barre 1 à $t=1s$,
- rupture de la barre 8 à $t=2s$.
- rupture de la barre 11 à $t=3s$

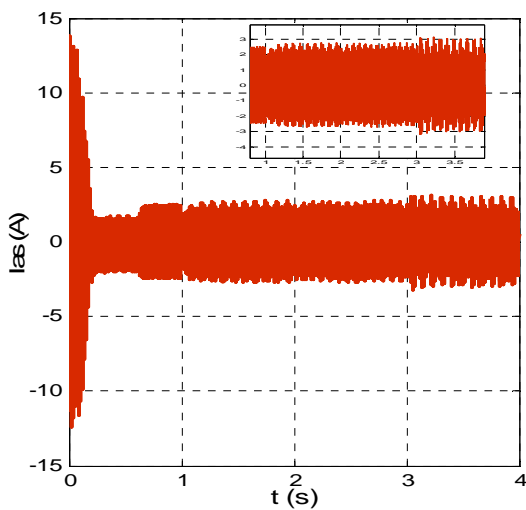
La machine était initialement saine et chargée $C_r=3.5N.m$.



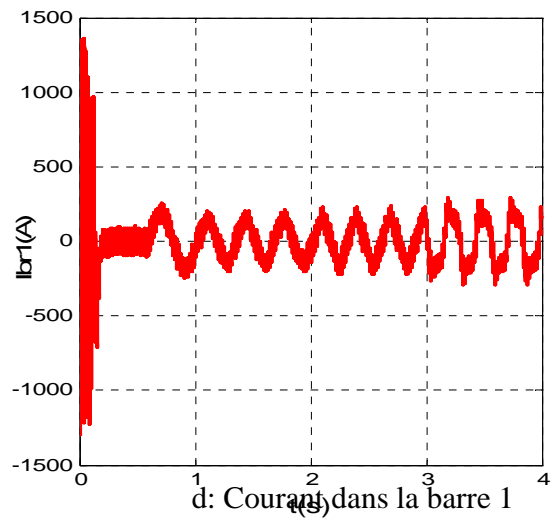
a: Vitesse de rotation



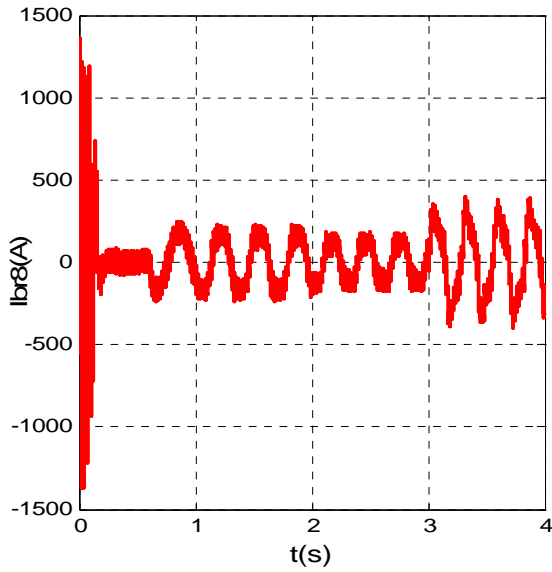
b: Couple électromagnétique



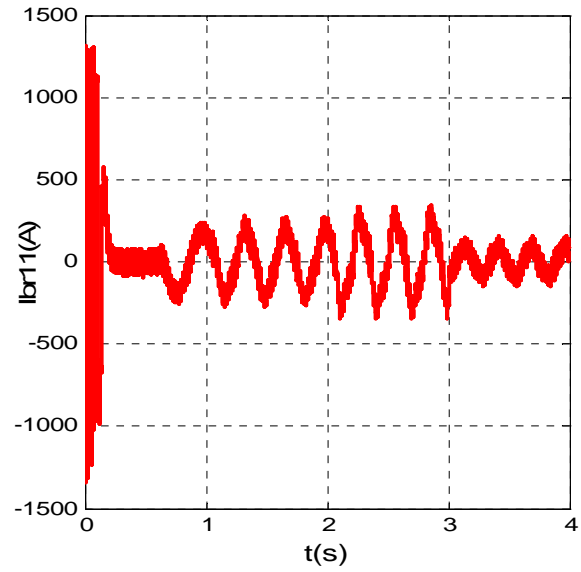
c: Courant statorique



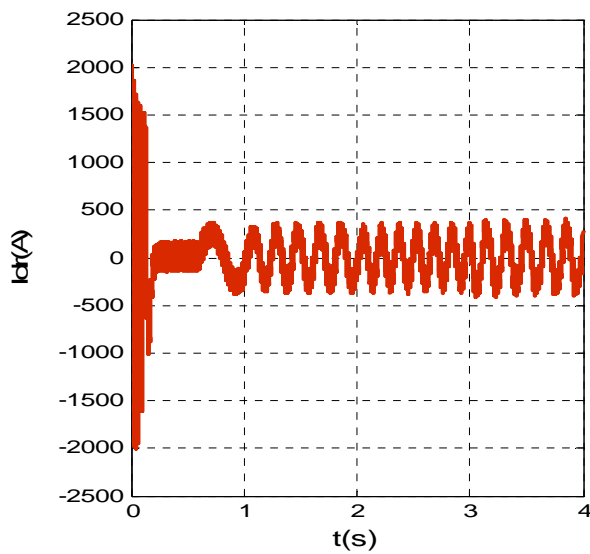
d: Courant dans la barre 1



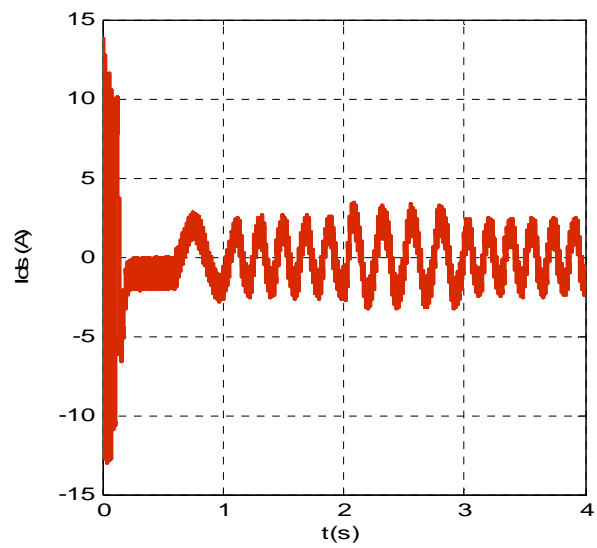
Courant dans la barre 8



Courant dans la barre 11



1 Figure



Figure(f) : Courant I_{ds}

Figure III. 11 : Simulation avec le modèle réduit : machine en charge $Cr=3.5 \text{ N.m}$ avec rupture successive des barres '1, 8 et 11' à partir de $t=1s$ (avec onduleur)

B-3 Interprétation des résultats

A. Les défauts de rupture de barres se traduisent :

a- dans les courbes du courant statorique : par l'apparition d'une modulation d'amplitude,

b- dans les courbes du courant rotorique : par la déformation des oscillations initialement sinusoïdales.

B. Pour simuler la rupture de la 1^{ère} barre, on augmente sa résistance de 30 fois. Il s'ensuit une augmentation de la valeur efficace du courant dans les barres voisines de la barre cassée. Le phénomène est d'autant plus remarquable que les barres cassées sont espacées et que leur nombre est relativement grand.

C. Au moment de l'apparition du défaut, les grandeurs électriques sont caractérisées, par rapport au régime normal, par des variations brusques.

Donc les résultats sont les même que machine sans onduteur, mais les signaux très riche en harmonique .

III.3 Conclusion

Nous avons fait état d'une méthode permettant la surveillance d'une machine asynchrone triphasée lorsqu'un défaut rotorique apparaît.

Cette étude de défaut rotorique s'effectue aisément sur une machine à cage d'écureuil lorsque la cage présente une rupture partielle ou totale d'une barre. Cet diagnostic de barre cassée permet donc d'intervenir sur le moteur est défaillante avant qu'un dysfonctionnement total de l'axe d'entraînement soit engendré.

Au cours de ce chapitre nous avons simulé la machine asynchrone en premier lieu, avec des défauts au rotor puis, Ces défauts ont des effets similaires et engendrent ce qui suit :

- ✚ la diminution de la vitesse moyenne.
- ✚ des oscillations sur le couple et la vitesse .
- ✚ l'apparition des harmoniques dans les courants statoriques.

On remarque aussi que le temps du régime transitoire augmente avec la sévérité du défaut de barres .

CONCLUSION GENERALE

Dans ce travail, nous avons montré la possibilité de diagnostic les défauts rotoriques à partir de l'analyse des signaux issus de la machine (le couple, la vitesse, le Courant statorique...) il s'est avéré que le diagnostic des défauts est plus simple et plus efficace sur le courant statorique que sur les autres signaux

Au début de ce travail, nous avons rappelé les différents défauts qui peuvent affectés le bon fonctionnement de la machine asynchrone multi-enroulement à cage, ainsi que leurs causes. Les méthodes du diagnostic et les approches utilisées pour la modélisation sont aussi représentés.

Le modèle que nous avons formulé nous a conduit à un système d'équation de rang très élevé ($Nr+4$ équations), donc il nous semble intéressant de reformuler un autre modèle déphasé équivalent, en utilisant la transformation généralisée de Park, ce qui nous permettra la réduction du l'ordre du système et par conséquent l'économie notable sur le temps de simulation.

Ensuite, nous avons construit un programme de simulation à l'aide du MATLAB 7.7 Ceci, nous a permis de visualiser le courant statorique, le couple, la vitesse et les courants dans les barres rotoriques, en considérant les différentes conditions de fonctionnement de la machine (sans et avec défaut).

En perspective, nous proposons l'équilibre de tension d'alimentations puis charge est constante Pour le diagnostic des ruptures de barres.

Le diagnostic il permet contrôler l'état de notre machine pour éviter les inconvénients des défauts.

Paramètre du moteur utilisé

P puissance nominale	1.1Kw
V tension nominale de ligne	220 v
f_s fréquence d'alimentation	50Hz
p nombre de paire de pôle	1
R diamètre moyen	35.75mm
l la longueur	65mm
e épaisseur d'entrefer	0.25mm
N_r nombre de barres	16
N_s nombre de spire par phase	160
R_s résistance d'une phase statorique	7.58 Ω
R_r résistance d'une barre rotorique	150 $\mu\Omega$
R_e résistance d'une portion d'anneau	150 $\mu\Omega$
L_e inductance de fuite d'anneau de court-circuit	0.1 μ H
L_b inductance de fuite d'une barre rotorique	0.1 μ H
L_{fs} inductance de fuite statorique	26.5mH
f coefficient de frottement	0,00025
J moment d'inertie	5.4 10 ⁻³ Kgm ²

Le modèle (II-53) de la machine multi-enroulements permet de déterminer les matrices inductances et résistances.

La matrice inductances est :

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

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

La matrice A est donnée par :

$$[A] = ([A_1] + \omega_r \cdot [A_2]) \cdot [B]$$

Avec :

$$[A_1] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_{rdd} & R_{rdq} & 0 \\ 0 & 0 & R_{rqd} & R_{rqq} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_e \end{bmatrix}$$

et :

$$[A_2] = \begin{bmatrix} 0 & -L_{sc} & 0 & -\frac{N_r}{2} M_{sr} & 0 \\ L_{sc} & 0 & -\frac{N_r}{2} M_{sr} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_e \end{bmatrix}$$

- [GD 04] : **Gaetan DIDIER**, " Modélisation et diagnostique de la machine asynchrone en présence de défaillances ", thèse de doctorat, Université Henri Poincaré Nancy-I, 2004.
- [BE 05] : **S. Belhamdi**. "*Prise en compte d'un défaut rotorique dans la commande d'un moteur asynchrone*". Thèse de Magistère, Université Mohamed khidre Biskra , 2005.
- [SH 03] : **M. Sahraoui**. "*Contribution aux diagnostic des machines asynchrones triphasées à cage*". Mémoire de Magistère, Université Mohamed Khider, Biskra, 2003.
- [ON 93] : **olivier ondel** "*Diagnostic par reconnaissance des forme :application a un ensemble convertiseur- MAS* ",thèse de doctorat ,l'école doctorale de LYON ,2006 .
- [CO 08] : "*Implémentation de réseaux de neurones artificiels (RNA) sur 'FPGA' pour le diagnostic des défaillances de la machine asynchrone*", Mémoire d'ingénieur ,Encadré par Dr.KHODJA Djalal Eddine ,Université M'sila,2008.
- [MO 99] : **Mohammed Riyad Zemmouri**, "*Contribution à la surveillance des systèmes de production à l'aide des réseaux de neurones dynamiques* ", Thèse de Doctorat, Université de franche compté, 1999.
- [Dh.00] : **D.Hadiouche, H.Razik, A.Rezzoug**, " *Modelling of a double-star induction motor With an arbitrary shift angle between its three phase windings* ", EPEPEMC 2000, Kosice.
- [BD 92] : **B.Dubuisson**, "*détection et diagnostic des pannes sur processus* ", Technique de l'ingénieur .R7597, 1992.
- [KH 05] : **YAHIA Khaled**" *Estimation en ligne de l'état et des paramètres du moteur asynchrone triphasé*". Thèse de magister, université de Biskra, 2005
- [RO 03] : **Rouabah. Z**, "*Modélisation et commande véctorielle d'une machine à induction avec prise en compte et minimisation des pertes (amélioration des performance energitique)*". Thèse de magister, université de Batna , 2003.
- [CM 07] : "*Simulation Des Machines Asynchrones à Cage Modèle Multi-enroulements Dédiée Au Diagnostic Des Défauts*", Mémoire d'ingénieur, Encadré par S.Belhamdi.,Université M'sila, 2007.
- [MA 06] : **Malek BOUHARKAT** . "*Etude de l'évolution des courants rotoriques d'une machine asynchrone a cage en régime dynamique* " ,Thèse de doctorat, université de Batna, 2006.

- [LO 99] :**Lotfi BAGHLI** . *"Contribution à la commande de la machine asynchrone, utilisation de la logique floue, des réseaux de neurones et des algorithmes génétiques"*, Thèse de doctorat ,Université Henri Poincaré, Nancy-I,1999 .
- [CO 07] : *"Détection des défauts par les réseaux de neurones artificiels de la MAS contrôlée par la technique du flux orienté "*, Mémoire d'ingénieur ,Encadré par Dr. KHODJA Djalal Eddine ,Université M'sila,2007.
- [TR 08]: **B. Trajin** *"Détection automatique et diagnostic des défauts de roulements dans une machine asynchrone par analyse spectrale des courants statoriques"*, article, Université deToulouse,2008.