

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement Supérieur
et de la Recherche scientifique



Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued
Faculté des Sciences et de la Technologie

Mémoire de Fin d'Études
En vue de l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Génie Électrique

Spécialité : Commande électrique

Thème

**Diagnostic des défauts rotoriques du moteur
asynchrone triphasé par l'utilisation du modèle
multi-enroulements**

Réalisé par :

BENHAMED Abdelghani
BRIK Abdessattar

Encadré par :

Dr. HALEM Noura

Soutenu en Mai 2017

DÉDICACE

JE DÉDIE CE MODESTE TRAVAIL À:

MON TRÈS CHER PÈRE, JE LUI DÉDIE AVEC FIERTÉ
CE MÉMOIRE QUI REFLÈTE LE
FRUIT DE L'ÉDUCATION ET DE L'ATTENTION QU'IL
M'A TANT RÉSERVÉ, JE SUIS TRÈS
RECONNAISSANTE ET J'AURAI TANT AIMÉ
PARTAGER LA JOIE DE MA RÉUSSITE
AVEC LUI.

LA PLUS MERVEILLEUSE DES MAMANS, QUI MA
SUPPORTÉE ET SACRIFIER ET
M'A AIDÉE DANS LES PIRES MOMENTS, CAR TU AS
TOUJOURS CRU EN MOI,
JE SUIS QUE JE SUIS MAINTENANT .

MES FRÈRES.

MES SŒURS.

MES COLLÈGUES AINSI QUE MA BINÔME

MES COPINES AVEC LESQUELLES J'AI PARTAGÉ
MES MOMENTS

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier tout premièrement Dieu le tout puissant pour la volonté, la santé et la patience, qu'il nous a donné durant toutes ces longues années.

*Ainsi, nous tenons également à exprimer nos vifs remerciements à notre encadreur **Dr. HALEM Noura** pour avoir d'abord proposée ce thème, pour suivi continuel tout le long de la réalisation de ce mémoire et qui n'a pas cessée de nous donner ses conseils.*

Nous tenons à remercier vivement toutes personnes qui nous ont aidé à élaborer et réaliser ce mémoire, ainsi à tous ceux qui nous ont aidés de près ou de loin à accomplir ce travail.

BENHAMED Abdelghani

BRİK Abdelsatar



LISTE DES FIGURES

Fig 1.1 : Structure de la machine asynchrone triphasée à cage	4
Fig 1.2 : Types d'excentricité : (a) rotor concentré; (b) excentricité statique; (c) excentricité dynamique	8
Fig 1.3 : Dimension du roulement à bille	13
Fig 2.1 : Structure du rotor	20
Fig 2.2 : Induction magnétique produite par une maille rotorique.....	21
Fig 2.3 : Flux mutuel phase statorique-boucle rotorique	22
Fig 2.4 : Schéma électrique équivalent des mailles rotoriques	25
Fig 2.5 : Schéma équivalent de la cage rotorique pour : a. Etat sain, b. Avec une barre rompue	33
Fig 3.1 : Couple électromagnétique (machine saine).....	37
Fig 3.2 : Vitesse de rotation (machine saine).....	37
Fig 3.3 : Courant d'une phase statorique (machine saine).....	38
Fig 3.4 : Courant rotorique dans la barre 15 (machine saine).....	38
Fig 3.5 : Courant rotorique dans la barre cassée (barre 15).....	40
Fig 3.6 : Courant rotorique dans la barre adjacente (barre 14).....	40
Fig 3.7 : Courant rotorique dans la barre adjacente (barre 16).....	41
Fig 3.8 : Ondulation du couple électromagnétique lors de la rupture d'une seule barre (barre 15).....	41
Fig 3.9 : Ondulation de la vitesse de rotation lors de la rupture d'une seule barre (barre 15).....	42
Fig 3.10 : Courant statorique lors de la rupture d'une seule barre(barre15)	42
Fig 3.11 : Courant rotorique dans la barre 17 lors de la rupture de deux barres adjacentes (barre 15 et barre 16).....	43
Fig 3.12 :Ondulation du couple électromagnétique lors de la rupture de deux barres adjacentes (barre 15 et barre 16)	44
Fig 3.13 : Ondulation de la vitesse de rotation lors de la rupture de deux barres adjacentes (barre 15 et barre16)	44
Fig 3.14 : Courant statorique lors de la rupture de deux barres adjacentes (barre 15 et barre 16).....	45

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1 : Inductances de la machine asynchrone à cage.....	23/24
---	-------

LISTE DES SYMBOLES

B_S : Induction magnétique dans l'entrefer créée par le courant statorique.

B_k : Induction magnétique dans l'entrefer produite par une maille rotoriques k.

i_{bk} : Courant dans la barre k.

i_{rk} : Courant dans la maille k.

i_e : Courant dans l'anneau de court- circuit.

i_{ek} : Courant dans une portion d'anneau.

i_a, i_b, i_c : Courants statoriques.

v_a, v_b, v_c : Tensions statoriques.

i_{ds}, i_{qs} : Composantes biphasées (d , q) du courant statorique.

ϕ_s : Flux magnétique par pole créé par le courant statorique.

ϕ_{rk} : Flux principal créé par une maille rotoriques.

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

ψ_{ds}, ψ_{qs} : Composantes biphasés (d , q) du flux statorique.

F_{mm} : Force magnéto motrice de la phase "a".

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

$[R_{tr}], [L_{tr}]$: Matrices globales des résistances et des inductances après la transformation du Park.

μ_0 : Perméabilité magnétique du vide (de l'air).

θ_r : Position du rotor.

ω_s : Pulsation statorique.

ω_r : Vitesse électrique de rotation.

a : Angle électrique entre deux barres rotoriques.

σ : Force radiale créée par le champ d'entrefer.

f_b : Fréquence caractéristique d'un défaut au niveau d'une bille du roulement.

$f_{b,int}$: Fréquence caractéristique d'un défaut au niveau de la bague intérieure du roulement.

$f_{b,ext}$: Fréquence caractéristique d'un défaut au niveau de la bague extérieure du roulement.

e : Entrefer.

SOMMAIRE

INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
CHAPITRE 1	
ÉTAT DE L'ART DE DIAGNOSTIC DE DEFAUT DANS LES MACHINE ASYNCHRONE	
1.1. INTRODUCTION	4
1.2. CONSTITUTION DU MOTEUR ASYNCHRONE TRIPHASÉ À CAGE	4
1.2.1 Stator	5
1.2.2 Rotor	5
1.3 CAUSES DES DEFAUTES	5
1.4. LES PRINCIPAUX DEFAUTS DANS LA MACHINE ASYNCHRONE	6
1.4.1. Défauts statoriques	6
1.4.2. Défauts rotoriques	6
1.4.2.1. Excentricité	7
1.4.2.2. Rupture de barres et d'anneau de court-circuit	8
1.5. METHODES DE DIAGNOSTIC DES DEFAUTS BASEES SUR L'ANALYSE SPECTRALE DES SIGNAUX	9
1.5.1. Diagnostic par mesure des vibrations mécaniques	9
1.5.2. Diagnostic par mesure du flux magnétique axial de fuite	10
1.5.3. Diagnostic par l'analyse des tensions statoriques induites	10
1.5.4. Diagnostic par mesure du couple électromagnétique	10
1.5.5. Diagnostic par mesure de la puissance instantanée	11
1.5.6. Diagnostic par mesure du courant statorique	11
1.6. SIGNATURES SPECTRALES DES DEFAUTS DANS LE SPECTRE DU COURANT STATORIQUE	11
1.6.1. Défauts statoriques	11
1.6.2. Défauts rotoriques	12
1.6.2.1. Cassure de barres rotoriques	12
1.6.2.2. Excentricité d'entrefer	12
1.6.3. Défauts au niveau des roulements	13

1.7. CONCLUSION	14
CHAPITRE 2	
MODÈLE DE LA MACHINE ASYNCHRONE DÉDIÉ À LA SIMULATION DU DÉFAUT	
2.1. INTRODUCTION	16
2.2. MODELISATION DU MOTEUR ASYNCHRONE	16
2.2.1. Approche Numérique	16
2.2.2. Approche analytique	17
2.3. MODELE MULTI-ENROULEMENTS DE LA MACHINE ASYNCHRONE	17
2.3.1. Calcul des inductances	18
2.3.1.1. Inductances statoriques	18
2.3.1.2 Inductances rotoriques	20
2.3.1.3 Inductance mutuelle stator-rotor	22
2.3.2. Mise en équations	24
2.3.2.1. Equations de tensions au stator	24
2.3.2.2. Equations de tensions au rotor	25
2.3.2.3. Equation globale des tensions	26
2.3.3 Expression du couple électromagnétique	31
2.4. PRIS EN COMPTE DU DEFAUT DANS LE MODELE	33
2.5. CONCLUSION	34
CHAPITRE 3	
SIMULATION DE LA MACHINE ASYNCHRONE	
3.1. INTRODUCTION	36
3.2. SIMULATION DU DEMARRAGE A VIDE ET VARIATION DU COUPLE RESISTANT	36
3.3 SIMULATION DE RUPTURE DE BARRES AU ROTOR	39
3.3.1 Simulation de la rupture de deux barres adjacentes	43
3.4 CONCLUSION	45
CONCLUSION GÉNÉRALE	46
RÉFÉRENCES	48

INTRODUCTION GÉNÉRALE

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Dans tous les secteurs industriels, la sécurité des personnes, du matériel, de l'environnement du travail, la qualité de service et la rentabilité des installations imposent des contraintes sévères de fiabilité et de sûreté de fonctionnement. Cependant, nul système n'est à l'abri d'une défaillance, par conséquent, ceci exige la mise en œuvre de systèmes de prévoyance et de détection de défauts de manière précoce. Aussi depuis quelques années, et grâce à l'apport considérable de l'outil informatique et du matériel numérique, il est devenu possible de créer des systèmes de supervision et de diagnostic. Leur rôle est de signaler la présence des dysfonctionnements dans le processus (soit dans les machines électriques).

Les machines asynchrones triphasées constituent la base de la majorité des équipements industriels, essentiellement au regard de leur robustesse et de leur faible coût. Cependant, bien que robustes, ces machines subissent des perturbations auxquelles elles sont sensibles. Les principaux défauts recensés sont les courts 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). Le premier type de défaut peut être détecté par l'observation des paramètres électriques du stator (inductances et résistances). Pour les défauts rotoriques, le modèle est plus complexe dans le sens que le défaut doit être ramené vers ou signalé par une grandeur mesurable extérieure au rotor lui-même. Ce qui confère une importance capitale à la détection de défauts [10]. A la lumière de ce qui a précédé ce travail abordera sous formes de chapitres les points suivants:

Le premier chapitre recense les différents défauts des machines asynchrones d'une manière plus ou moins brève, on y cite des techniques de détection et de diagnostic des défauts choisies parmi quelques travaux.

Le deuxième chapitre est consacré à la présentation du modèle de la machine asynchrone pour la simulation des ruptures de barres où nous présentons le développement du modèle multi enroulements dans une approche analytique.

Dans le troisième chapitre, nous avons validé le modèle par simulation et nous avons présenté les résultats de la machine saine et avec défauts.

Chapitre 1

CHAPITRE 1

ÉTAT DE L'ART DE DIAGNOSTIC DE DEFAUT DANS LES MACHINES ASYNCHRONES

1.1. INTRODUCTION

La surveillance est un moyen de garantir le bon fonctionnement des systèmes. Le diagnostic est une partie de la surveillance, qui a pour objectif de trouver la cause des dysfonctionnements. De multiples défaillances peuvent apparaître dans la machine asynchrone, elles peuvent être prévisibles ou intempestives, mécaniques, électriques ou magnétiques, et leurs causes sont très variées.

L'étude des défauts des machines asynchrones a un double objectif :

- ❖ Comprendre leur génération de manière à prévoir leur gravité et leur développement.
- ❖ Analyser leur impact sur le comportement de la machine et en déduire les signatures, permettant, à posteriori, de remonter jusqu'à la cause de la défaillance.

1.2. CONSTITUTION DU MOTEUR ASYNCHRONE TRIPHASÉ À CAGE

La machine asynchrone triphasée souvent appelée moteur à induction est un dispositif électromécanique qui comprend un stator et un rotor. Le stator est une partie fixe où se trouvent les enroulements liés à la source. Le rotor est une partie mobile qui est monté sur l'axe de rotation. Comme illustré dans la figure 1.1.

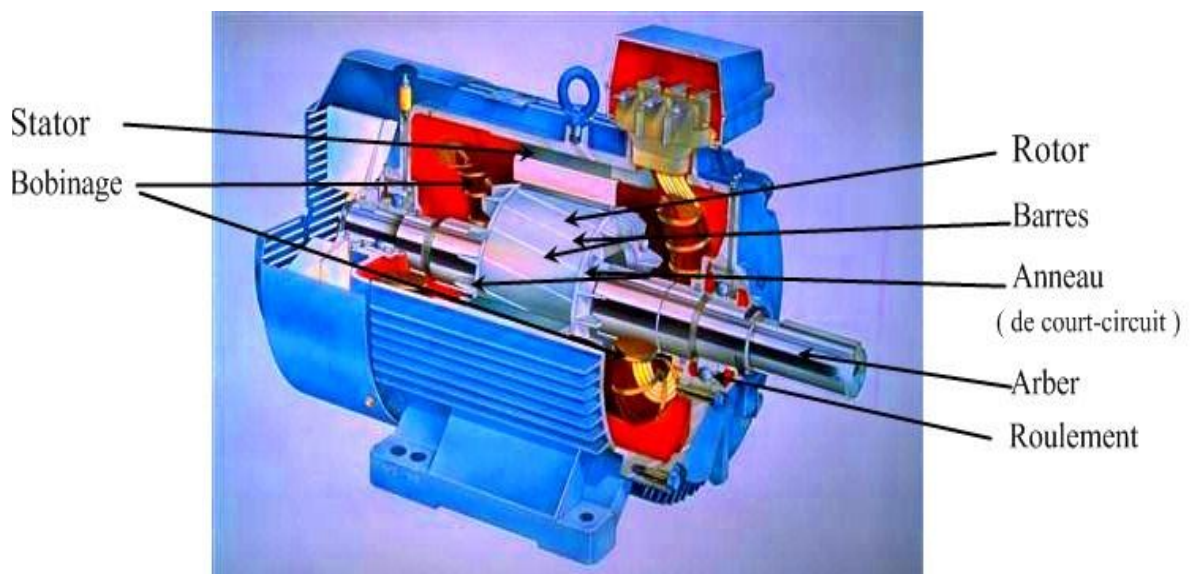


Fig 1.1 : Structure de la machine asynchrone triphasée à cage

1.2.1 Stator

Le circuit magnétique du stator est réalisé par un assemblage de tôles ferromagnétiques fines et découpées, faisant apparaître les différentes encoches statoriques. L'utilisation des tôles minces permet de minimiser les pertes dans le circuit magnétique. De plus, afin de limiter l'effet des courants de Foucault, on isole habituellement les tôles d'une mince couche de vernis ou de silicate de soude. Le bobinage statorique peut se décomposer en deux parties : les conducteurs d'encoches et les têtes de bobines. Les conducteurs d'encoches permettent de créer dans l'entrefer le champ magnétique à l'origine de la conversion électromagnétique. Les têtes de bobines permettent, quant à elles, la fermeture des courants en organisant leur circulation, l'objectif étant d'obtenir une répartition des forces magnétomotrices et du flux la plus sinusoïdale possible dans l'entrefer, pour limiter les oscillations du couple électromagnétique [1], [2].

1.2.2 Rotor

Le rotor est constitué comme le stator de tôles empilées et habituellement du même matériau. Dans les petits moteurs, les tôles sont découpées dans une seule pièce et assemblées sur un arbre. Dans les plus gros moteurs, chaque lamination est constituée de plusieurs sections montées sur un moyeu. Dans le rotor à cage d'écureuil, les conducteurs sont des barres obtenues par injection d'un alliage d'aluminium ou préformées en cuivre et introduites dans les tôles du rotor, il n'y a généralement pas ou très peu d'isolation entre les barres rotoriques et les tôles magnétiques, mais leur résistance est suffisamment forte pour que les courants ne circulent pratiquement pas dans les tôles, sauf lorsqu'il y a une rupture de barre [1].

1.3 CAUSES DES DEFAUTES

Réputée pour être robuste, la machine asynchrone n'est jamais à l'abri des défaillances, ces anomalies donnent lieu à un comportement anormal de la machine et peuvent à court ou à long terme provoquer son endommagement. Les défaillances peuvent être d'origines diverses, électriques, mécaniques ou bien encore magnétiques. Leurs causes sont multiples et peuvent être classées en trois groupes [3] :

- **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,
- **Les amplificateurs de défauts** : tel que ; surcharge fréquente, vibrations mécaniques, environnement humide, échauffement permanent, mauvais graissage, vieillissement.

- **Les vices de fabrication et les erreurs humaines** : défauts de fabrication, composants défectueux, protections inadaptées, mauvais dimensionnement de la machine,

Dans ce contexte, plusieurs études statistiques ont été effectuées sur la fiabilité des machines électriques réalisées par différents groupes industriels, où les machines fonctionnant dans différentes applications et dans différentes branches de l'industrie, parmi ces études on peut citer sans être exhaustif : l'étude réalisée par la compagnie "General Electric", publiée dans EPRI (Electric Power Research Institute) [4].

L'environnement semble donc jouer un rôle prépondérant dans le type de défauts et leurs fréquences. Ainsi, il a été établi que le taux de panne pour des moteurs utilisés en extérieur, où l'environnement est humide (aux usines terrestres et en mer par exemple), peut-être 2,5 fois plus grand que le taux d'échec pour des moteurs utilisés à l'intérieur.

1.4. PRINCIPAUX DEFAUTS DANS LA MACHINE ASYNCHRONE

Si l'on élimine les pannes dues à des causes intrinsèques, c'est-à-dire, résultant d'une mauvaise conception, d'une mauvaise fabrication ou d'un mauvais montage du moteur, les défaillances usuelles d'une machine asynchrone sont les suivantes [5] :

1.4.1. Défauts statoriques :

- Court circuit entre phases statoriques ou entre spires d'une même phase.
- Ouverture d'une phase.
- Défaut du circuit magnétique (ruptures de tôles).

1.4.2. Défauts rotoriques :

- Rupture de barres ou d'anneaux de court-circuit.
- Défaut du circuit magnétique (ruptures de tôles).
- Défaut de roulements.
- Excentricité statique et/ou dynamique...

Dans les machines asynchrones à cage, les défaillances qui peuvent atteindre le rotor sont considérées comme plus variées et plus complexes que celles affectant le stator. Ceci est particulièrement vérifié pour les machines de faible et moyenne puissances.

Plusieurs facteurs manifestent l'apparition des défaillances au niveau du rotor de la machine asynchrone, parmi eux on cite [6]:

- Thermique (surcharge, ...).
- Electromagnétique (force en $B^2(t)$...).
- Dynamique (arbre de transmission, ...).

Les défauts qui sont les plus répétitifs, localisés au niveau du rotor sont : l'excentricité statique et dynamique, la rupture de barres rotoriques et la rupture d'une portion d'anneau de court-circuit.

1.4.2.1. Excentricité

Par conception, l'entrefer d'une machine asynchrone est considérablement plus petit que dans d'autres types de machines ayant les mêmes grandeurs et performances, la machine asynchrone sera la plus sensible aux excentricités. En outre, lors du fonctionnement de la machine, deux causes principales aggraveront l'excentricité [7] :

- ❖ La première est inhérente à la chaîne cinématique dans laquelle la machine intervient et qui peut imposer une force radiale sur l'arbre de cette machine, qui va engendrer une usure des roulements et une amplification du décentrement.
- ❖ Le deuxième phénomène risquant d'aggraver l'excentricité est quant à lui inhérent au fonctionnement de la machine, en effet, le décentrement génère un déséquilibre dans la distribution des efforts radiaux entre le stator et le rotor. L'effort radial est maximal à l'endroit où se situe l'épaisseur minimale de l'entrefer et va tendre à diminuer encore plus la valeur de l'entrefer minimum et augmenter par conséquent encore plus le déséquilibre des efforts radiaux. Le point extrême de l'excentricité est le frottement du stator sur le rotor, qui est synonyme de destruction rapide de la machine.

Trois catégories d'excentricité sont généralement distinguées, [7] :

- ❖ **Excentricité statique** : généralement due à un désalignement de l'axe de rotation du rotor par rapport à l'axe du stator. Elle résulte d'un défaut de centrage des flasques et se manifeste même dans des machines fabriquées récemment en raison des méthodes de fabrication et d'assemblage (figure 1.2.b).
- ❖ **Excentricité dynamique** : ce type d'excentricité est causé par une déformation du cylindre rotorique, une déformation du cylindre statorique ou la détérioration des roulements à billes. Elle correspond au décalage du centre de rotation du rotor par rapport

au centre géométrique du stator, avec en plus, une rotation du centre du rotor autour du centre géométrique de ce stator (voir figure 1.2.c).

- ❖ **Excentricité mixte** : en réalité, les excentricités statiques et dynamiques ont tendance à co-exister. Un niveau inhérent d'excentricité statique existe toujours, même dans des machines de fabrication récentes. Cela provoque des efforts réguliers d'attraction magnétiques non compensés dans une seule direction, et avec le temps cela peut conduire à la flexion d'un arbre et la dégradation de roulement ..., tout cela entamant une excentricité dynamique. Sans détection précoce, l'excentricité devient suffisamment grande pour développer des forces radiales déséquilibrées qui peuvent créer un frottement entre le stator et le rotor, ce qui mène à une panne très grave de la machine [7].

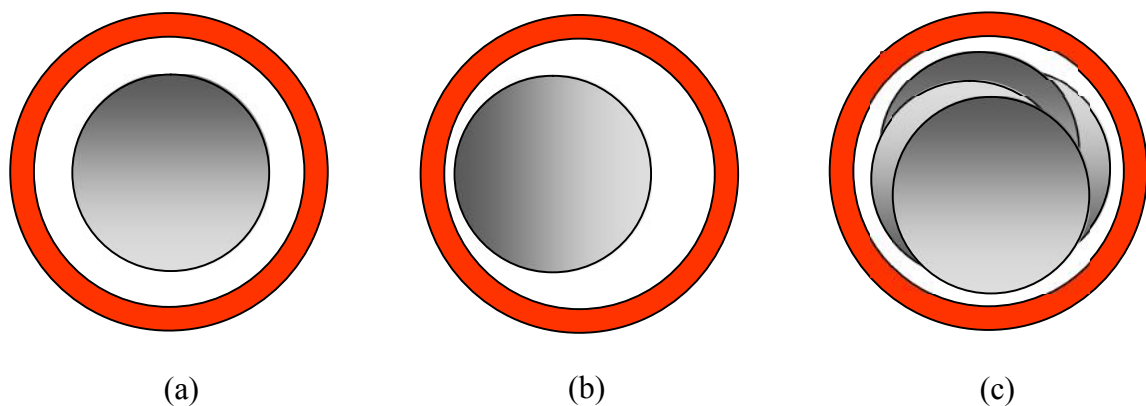


Fig 1. 2 : Types d'excentricité : (a) rotor centré; (b) excentricité statique; (c) excentricité dynamique [7]

Ce défaut modifie les comportements magnétique et mécanique de la machine. En effet, l'augmentation de l'excentricité dans l'entrefer induit une augmentation des forces électromagnétiques qui agissent directement sur l'armature statorique ainsi que l'enroulement correspondant, ce qui engendre une dégradation de son isolation. D'autre part, cette augmentation peut avoir comme conséquence des frottements entre le stator et le rotor en raison des forces d'attraction magnétique qui déséquilibrent le système. Ceci donne naissance à des niveaux de vibration considérables dans les enroulements [6, 7].

1.4.2.2. Rupture de barres et d'anneau de court-circuit

Pour une machine asynchrone à cage d'écureuil, les défauts se résument à la rupture de barres ou à la rupture d'anneaux de court-circuit. 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 de court-circuit. Les ruptures de barres ou de portions d'anneau peuvent être dues, par exemple, à une surcharge mécanique (démarrages fréquents, etc.), à un échauffement local excessif ou encore à un défaut de fabrication (bulles d'air ou mauvaises soudures). 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. Ainsi, le couple diminue sensiblement avec le nombre de barres cassées induisant un effet cumulatif de la défaillance. L'effet d'une cassure de barre croît rapidement avec le nombre de barres cassées [6], [8].

La cassure de portion d'anneau est un défaut qui apparaît aussi fréquemment que la cassure de barres dans une machine asynchrone à cage. Ces cassures sont dues soit à des bulles de coulées ou aux dilatations différentielles entre les barres et les anneaux, d'autant que les portions d'anneaux de court-circuit véhiculent des courants plus importants que ceux des barres rotoriques. Il convient de mentionner, qu'un mauvais dimensionnement des anneaux, conduit à une détérioration des conditions de fonctionnement ou une surcharge de couple et, donc, à des courants pouvant entraîner leur cassure [8].

La cassure 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 [9].

1.5. METHODES DE DIAGNOSTIC DES DEFAUTS BASEES SUR L'ANALYSE SPECTRALE DES SIGNAUX

Pour effectuer le diagnostic d'une installation industrielle, les opérateurs de maintenance analysent un certain nombre de signaux issus de la machine. En effet, l'évolution temporelle et le contenu spectral de ces signaux, peuvent être exploités pour détecter et localiser les anomalies qui affectent le bon fonctionnement de la machine. D'après la littérature, les principales techniques du diagnostic utilisées pour obtenir des informations sur l'état de santé de la machine sont les suivantes :

1.5.1. Diagnostic par mesure des vibrations mécaniques

Le diagnostic des défauts en utilisant les vibrations mécaniques est la méthode la plus utilisée dans la pratique. Les forces radiales, créées par le champ d'entrefer, provoquent des vibrations

dans la machine asynchrone. Ces forces sont proportionnelles au carré de l'induction magnétique [5].

$$\sigma(\theta, t) = \frac{B_s^2(\theta, t)}{2\mu_0} \quad (1.1)$$

La distribution de l'induction magnétique dans l'entrefer, est le produit de la F.m.m (Fm) et de la perméance (P).

$$B = Fm.P \quad (1.2)$$

La force magnétomotrice contient les effets des asymétries du stator ou du rotor, en plus la perméance dépend de la variation de l'entrefer (à cause des ouvertures des encoches statoriques et rotoriques, l'excentricité). De ce fait, l'analyse spectrale des signaux de vibrations mécaniques, permet la détection aussi bien les défauts électriques que mécaniques. Les spectres des signaux de vibrations, issus du moteur avec défaut, sont comparés avec ceux enregistrés lorsque le moteur est en bon état. Les vibrations de la machine peuvent être captés par des accéléromètres.

1.5.2. Diagnostic par mesure du flux magnétique axial de fuite

Dans une machine idéale et sans défaut, les courants et les tensions statoriques sont équilibrés, ce qui annule le flux de fuite axial. La présence d'un défaut quelconque, provoque un déséquilibre électrique et magnétique au niveau du stator ce qui donne naissance à des flux de fuite axial de valeurs dépendent au degré de sévérité du défaut. Si on place une bobine autour de l'arbre de la machine, elle sera le siège d'une force électromotrice induite. L'analyse spectrale de la tension induite dans cette bobine peut être exploitée pour détecter les différents défauts [5].

1.5.3. Diagnostic par l'analyse des tensions statoriques induites

Cette technique, est basée sur l'exploitation du contenu fréquentielle de la tension induite, par le flux rotorique, dans les enroulements statoriques pendant la déconnexion du moteur de réseau. La rupture d'une barre va affecter directement la tension induite dans les enroulements statoriques. En utilisant cette approche, les effets du non – idéalité de la source (déséquilibres et présence des harmoniques) ainsi que la non – linéarité des caractéristiques magnétiques de la machine peuvent être évités.

1.5.4. Diagnostic par mesure du couple électromagnétique

Cette technique, permet de détecter aussi bien les défauts rotoriques que les défauts de court-circuit entre spires dans les bobines statoriques. Le couple électromagnétique développé dans les

machines électriques, provient de l'interaction entre le champ statorique et celui rotorique. Par conséquent, tous défauts, soit au niveau du stator ou au rotor, affectent directement le couple électromagnétique. L'analyse spectrale du signal du couple (mesuré ou estimé), donne des informations sur l'état de la santé du moteur [5], [10].

1.5.5. Diagnostic par mesure de la puissance instantanée

La puissance instantanée est la somme des produit des courants est des tensions dans les trois phases statoriques. Donc, le niveau des informations, apportées par cette grandeur, est plus grand que celui apportées par le courant d'une seule phase. Ceci présente l'avantage de cette méthode par apport aux autres [5].

1.5.6. Diagnostic par mesure du courant statorique

Parmi tout les signaux utilisables, le courant statorique s'est avéré être l'un des plus intéressants, car, il est très facile d'accès et il nous permet de détecter aussi bien des défauts électromagnétiques que des défauts purement mécaniques. Cette technique est dénommée dans la littérature "Motor Current Signature Analysis" (MCSA) [5], [7]. Les défauts de la machine asynchrone se traduisent dans le spectre du courant statorique soit par :

- ❖ L'apparition des raies spectrales dont les fréquences sont directement liées à la fréquence de rotation de la machine, aux fréquences des champs tournants et aux paramètres physiques de la machine (nombre d'encoche rotorique et nombre de paires de pôles).
- ❖ La modification de l'amplitude des raies spectrales, déjà présentes dans le spectre du courant.

La surveillance via le courant statorique nécessite une bonne connaissance des défauts et leurs signatures.

1.6. SIGNATURES SPECTRALES DES DEFAUTS DANS LE SPECTRE DU COURANT STATORIQUE

1.6.1. Défauts statoriques

Les défauts statoriques les plus courants sont la mise en court circuit d'une ou plusieurs spires de son bobinage, la fréquence caractéristique de ce défaut est [5] :

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

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

g : glissement

p : nombre de paire de pôles

1.6.2. Défauts rotoriques

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

1.6.2.1. Cassure de barres rotoriques

Une asymétrie rotorique générée par la présence de barres rotoriques cassées produit des raies spectrales autour de la fréquence fondamentale f_s [5], [10] telles que :

$$f_{brc} = f_s (1 \pm 2kg) \quad (1.4)$$

Avec : $k=1, 3, 5, \dots$

g : glissement.

L'amplitude de ces composantes spectrales est proportionnelle à la sévérité du défaut.

1.6.2.2. Excentricité d'entrefer

Il y a deux types d'excentricité : statique (déformation du corps du stator, positionnement incorrecte du rotor) et dynamique (lorsque le centre du rotor n'est pas le centre de rotation).

Les excentricités d'entrefer peuvent être détectées, en surveillant les raies latérales fondamentales de la fréquence d'alimentation [5], [10] :

$$f_{exc} = f_s \left[1 \pm k \frac{(1-g)}{p} \right] \quad (1.5)$$

Avec : $k = 1, 2, 3, \dots$

g : glissement.

p : nombre de paire de pôles.

La détection des excentricités est aussi possible en surveillant les harmoniques principales d'encoches du courant et certaines de leurs composantes spectrales latérales . Cette méthode nécessite la connaissance du nombre d'encoches rotoriques N_e . Les fréquences des composantes spectrales d'encoches et de celles associées aux excentricités d'entrefer dynamiques sont les suivantes :

$$f_{\text{enc+exc}} = f_s \left[(k N_e \pm n_d) \frac{(1-g)}{p} \pm n_w \right] \quad (1.6)$$

$n_d = 0$, dans le cas d'une excentricité statique et $n_d = 1$, dans le cas d'une excentricité dynamique.

N_e : le nombre d'encoches rotoriques.

$k=1, 2, 3, \dots$ et $n_w=1, 3, 5, 7, \dots$ (l'ordre de l'harmonique de la F.m.m du stator)

La présence d'une excentricité statique, modifie l'amplitude des harmoniques principales d'encoches du courant statorique, tandis que celle d'une excentricité dynamique fait apparaître de nouvelles raies spectrales.

1.6.3. Défauts au niveau des roulements

Puisque les éléments roulants du roulement supportent le rotor, quelque soient les défauts dans les roulements, ils vont produire des mouvements radiales entre le rotor et le stator dans la machine. Par conséquent, des variations d'entrefer génèrent dans le courant statorique des raies spectrales de fréquence [10] :

$$f_{\text{roul}} = | f_s \pm k f_v | \quad (1.7)$$

D'où : $k = 1, 2, \dots$,

f_v est l'une des fréquences caractéristiques des vibrations (f_b , $f_{b. \text{int}}$ ou $f_{b. \text{ext}}$)

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

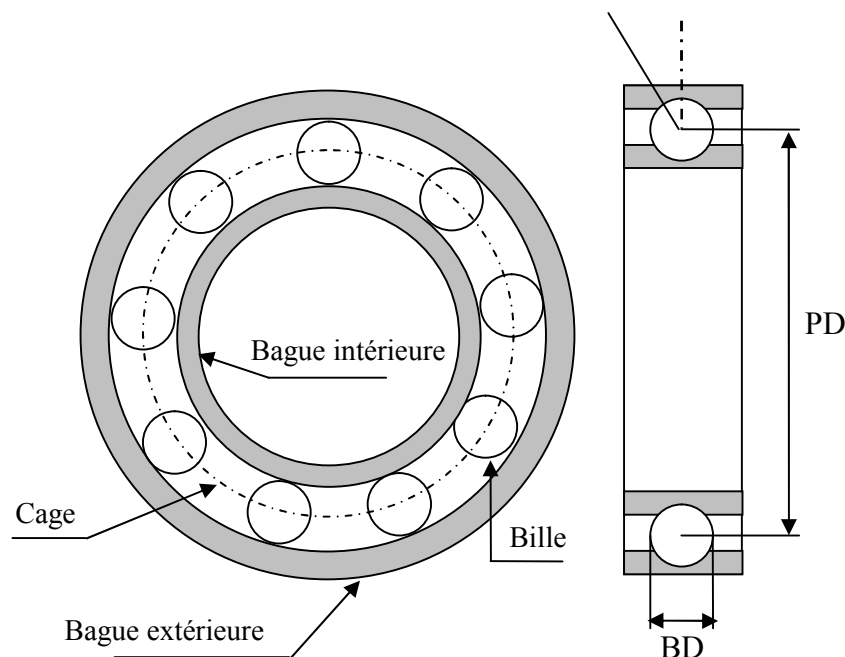


Fig 1. 3 : Dimension du roulement à bille [11]

Les fréquences de vibration qui caractérisent les défauts des roulements à bille sont :

- Défaut au niveau d'une bille [5]:

$$f_b = \frac{PD}{BD} f_{rot} \left[1 - \left(\frac{BD}{PD} \cos \beta \right)^2 \right] \quad (1.8)$$

- Défaut sur la bague intérieure :

$$f_{b.int} = \frac{n_b}{2} f_{rot} \left[1 + \frac{BD}{PD} \cos \beta \right] \quad (1.9)$$

- Défaut sur la bague extérieure :

$$f_{b.ext} = \frac{n_b}{2} f_{rot} \left[1 - \frac{BD}{PD} \cos \beta \right] \quad (1.10)$$

- Défaut sur la cage :

$$f_{b.cag} = \frac{1}{2} f_{rot} \left[1 - \frac{BD}{PD} \cos \beta \right] \quad (1.11)$$

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

Pour des dimensions courantes, c'est-à-dire que le nombre de billes est de 6 à 12, les fréquences de vibrations peuvent être approximés par :

$$f_{b.int} = 0.6 n_b f_{rot} \quad (1.12)$$

$$f_{b.ext} = 0.4 n_b f_{rot} \quad (1.13)$$

1.7. CONCLUSION

Ce chapitre est un prétexte à la présentation des notions très important en diagnostic, tels que les défauts qui peuvent affectés la machine asynchrone, leurs causes et leurs signatures, ainsi que les méthodes du diagnostic. Comme nous avons mentionné précédemment, notre travail est consacré à l'étude et la détection des cassures de barres et d'anneaux de court-circuit dans la cage rotorique d'un moteur asynchrone.

Chapitre 2

CHAPITRE 2

MODÈLE DE LA MACHINE ASYNCHRONE DÉDIÉ À LA SIMULATION DU DÉFAUT

2.1. INTRODUCTION

La modélisation de la machine électrique est une phase primordiale pour le diagnostic de défauts. Elle est d'un apport précieux dans le domaine de l'étude de défauts, car elle permet de restituer une image du fonctionnement de la machine de ce que l'on peut observer expérimentalement et de prévoir son comportement pour des conditions de fonctionnement différentes .

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

2.2. MODELISATION DU MOTEUR ASYNCHRONE

La modélisation et la simulation des machines électriques constituent une étape primordiale en matière de diagnostic. Elles permettent la compréhension du fonctionnement défectueux et la vérification des algorithmes de détection des défauts. Elles nous permettent aussi, de construire des bases de données sur les manifestations électriques et magnétiques de ces défauts. Il est important donc, de synthétiser un modèle adapté au problème à traiter, décrivant le comportement de la machine non pas de la façon moyenne, comme pour la commande, mais d'une façon la plus fine possible.

Plusieurs voies de modélisation existent. Elles sont actuellement utilisées pour examiner des problèmes tels que la commande, la conception ou la surveillance. En ce qui nous concerne, nous nous intéressons aux modèles simulant le comportement électromagnétique de la machine asynchrone en vue de faire le diagnostic. Parmi les approches de modélisation, nous citons deux :

2.2.1. Approche Numérique

On cite deux méthodes :

- ❖ *Méthode des réseaux de perméances* [2] : Elle consiste à découper la machine en plusieurs tubes du flux caractérisés par des perméances. Le mouvement de la machine est pris en compte par l'intermédiaire de perméance d'entrefer variable selon la position du rotor. Cette méthode tient aussi la saturation.
- ❖ *Méthode des éléments finis* [2] [7] : Il s'agit de découper la machine en éléments de tailles suffisamment petite, pour que le matériau magnétique puisse être considéré comme linéaire sur les surfaces correspondantes, et à partir des équations de Maxwell, il est possible d'exprimer le problème à résoudre.

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

2.2.2. Approche analytique

Cette approche est la plus simple et la plus employée. Elle est basée sur la modélisation du moteur sous forme de circuits électriques équivalents. Elle repose sur le concept d'inductance, notion qui caractérise une relation flux – courant linéaire. Cette approche permet d'établir un schéma électrique équivalent de la machine et par conséquent de trouver les équations différentielles caractérisant le fonctionnement de la machine [11].

2.3. MODELE MULTI-ENROULEMENTS DE LA MACHINE ASYNCHRONE

L'objectif est avant tout de posséder un modèle de la machine asynchrone qui met en évidence l'influence des défauts étudiés sur les grandeurs mesurables de la machine, principalement les courants. Afin d'étudier les phénomènes mis en jeu, deux approches sont possibles.

La première s'appuie sur la distribution des champs et des courants en tout points de la machine. Cette méthode nécessite un temps de calcul très important, ainsi qu'une connaissance rigoureuse des paramètres géométriques et des caractéristiques de la machine. La seconde approche retenue ici, consiste à interpréter la machine du point de vue de la

théorie des circuits. Un simple modèle de circuits pourrait être utilisé pour représenter chaque enroulement du stator ou chaque barre du rotor ainsi que le champ magnétique qui les lie. Partant de ce concept et pour pouvoir nous concentrer sur la simulation des ruptures de barres, nous avons modélisé le rotor par des mailles reliées entre elles électriquement et couplées magnétiquement, où une maille est constituée de deux barres et deux portions d'anneaux qui les relient .

Mais il est évident qu'un système électromagnétique nécessite des compétences tant dans l'approche des phénomènes physiques pour leur modélisation que dans le calcul numérique. D'où l'importance du choix des hypothèses d'étude et des objectifs du modèle, car ils conditionnent la complexité du travail à réaliser et l'utilisation d'outils appropriés. Pour cette raison nous avons été amenés à faire quelques hypothèses simplificatrices fortes mais généralement admises :

- Perméabilité relative du fer très grande ;
- Entrefer lisse et constant – effets d'excentricité négligeables – champ radial;
- Distribution sinusoïdale de la force magnétomotrice statorique;
- Pas de saturation – effets pelliculaires nuls – courants de Foucault négligeables hors des barres rotoriques.

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

2.3.1. Calcul des inductances

2.3.1.1. 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'expression de la F.m.m de la phase "a" est donnée par la relation suivante :

$$F_m(\theta) = \frac{2N_s i_a}{p\pi} \cos(\theta) \quad (2.1)$$

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

D'où l'induction créée dans l'entrefer :

$$B_s(\theta) = \frac{2\mu_0 N_s i_a}{e p \pi} \cos(\theta) \quad (2.2)$$

Le flux magnétique dans l'entrefer, par pôles, est obtenu par intégration de l'expression (2.2) autour d'un intervalle polaire le long de la machine :

$$\phi_s = \iint_s B_s dS = \int_0^l dz \int_{-\frac{\pi}{2p}}^{\frac{\pi}{2p}} B_s R d\theta \quad (2.3)$$

On obtient :

$$\phi_s = \frac{4\mu_0 N_s R l}{\pi e p^2} i_a \quad (2.4)$$

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

$$\psi_{sa} = N_s \phi_s = N_s i_a \frac{2\mu_0 N_s R l}{e p^2 \pi} \int_{-\frac{\pi}{2p}}^{\frac{\pi}{2p}} \cos(\theta) d\theta = L_{sp} i_a \quad (2.5)$$

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

$$L_{sp} = L_{ms} = \frac{4\mu_0 N_s^2 R l}{e \pi p^2} \quad (2.6)$$

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

$$L_{as} = L_{sp} + L_{sf} \quad (2.7)$$

Puisque les enroulements statoriques sont symétriques, les inductances des trois phases sont égales $L_{as} = L_{bs} = L_{cs} = L_s$. L'inductance mutuelle entre les phases statoriques est définie par la relation suivante :

$$M_s = -\frac{L_{sp}}{2} \quad (2.8)$$

2.3.1.2 Inductances rotoriques

La figure 2.1 illustre la modélisation du rotor par son schéma électrique équivalent. Le rotor a été décomposé en circuits élémentaires (mailles) constitués de deux barres reliées à chaque extrémité par deux portions d'anneaux. Cette topologie des circuits rotoriques nous permettra d'envisager la rupture de n'importe quelle barre ou de portion d'anneaux [5].

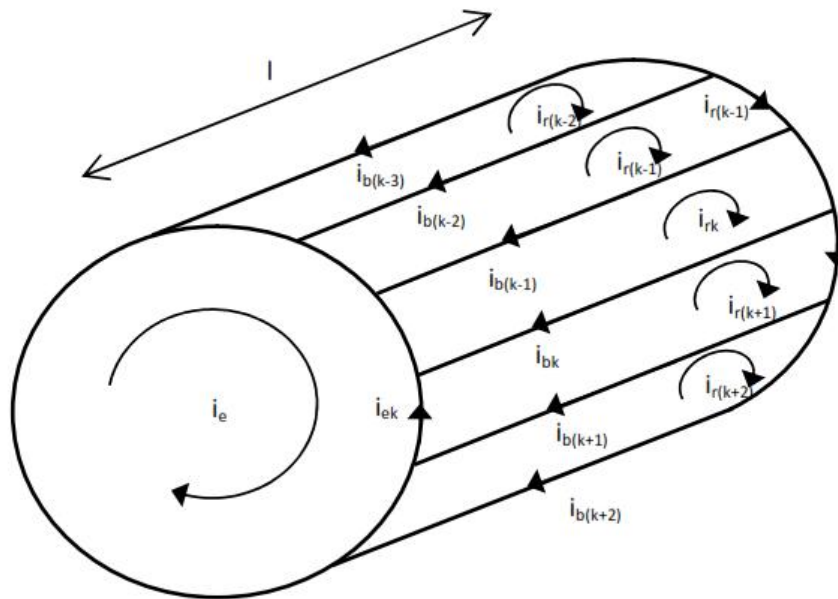


Fig 2.1 : Structure du rotor [02]

Pour notre étude nous travaillons avec les courants de mailles, où i_{rk} le courant de la $k^{\text{ème}}$ boucle rotorique et i_{bk} le courant de la $k^{\text{ème}}$ barre, de sorte que :

$$i_{bk} = i_{rk} - i_{r(k+1)} \quad (2.9)$$

La figure 2.2 représente en fonction de θ , l'allure de l'induction magnétique, supposée radiale, produite par une maille rotorique "K" dans l'entrefer.

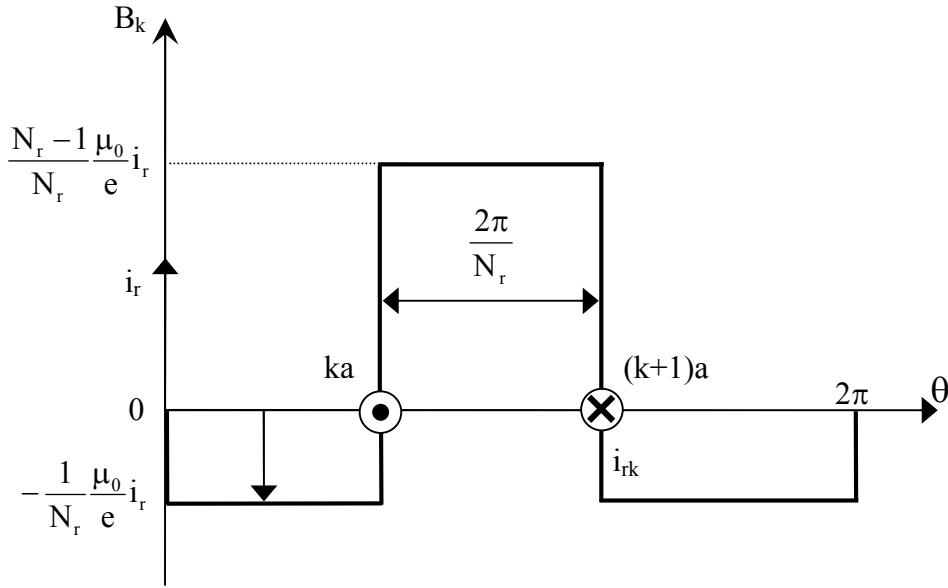


Fig 2.2 : Induction magnétique produite par une maille [11]

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

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

$$\phi_{rk} = \int_0^1 dz \int_{ka}^{(k+1)a} \left(\frac{N_r - 1}{N_r} \frac{\mu_0}{e} R i_{rk} \right) d\theta = \frac{N_r - 1}{N_r^2} \mu_0 \frac{2\pi R l}{e} i_{rk} \quad (2.10)$$

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

$$L_{rp} = \frac{N_r - 1}{N_r^2} \mu_0 \frac{2\pi}{e} R l \quad (2.11)$$

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

$$L_{rr} = L_{rp} + 2L_b + 2L_e \quad (2.12)$$

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

$$\phi_{jrk} = \int_0^1 dz \int_{ja}^{(j+1)a} \left(-\frac{1}{N_r} \frac{\mu_0}{e} R i_{rk} \right) d\theta \quad (2.13)$$

Donc, l'inductance mutuelle entre mailles rotoriques non adjacentes, est exprimée par la relation :

$$M_{rr} = -\frac{1}{N_r^2} \frac{2\pi\mu_0}{e} Rl \quad (2.14)$$

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

$$M_{rk(k-1)} = M_{rk(k+1)} = M_{rr} - L_b \quad (2.15)$$

2.3.1.3 Inductance mutuelle stator-rotor

La figure 2.3 indique les bases géométriques de l'expression du flux mutuel entre l'enroulement d'une phase « n » au stator (représenté par une spire diamétrale) et un circuit élémentaire « k » au rotor [02].

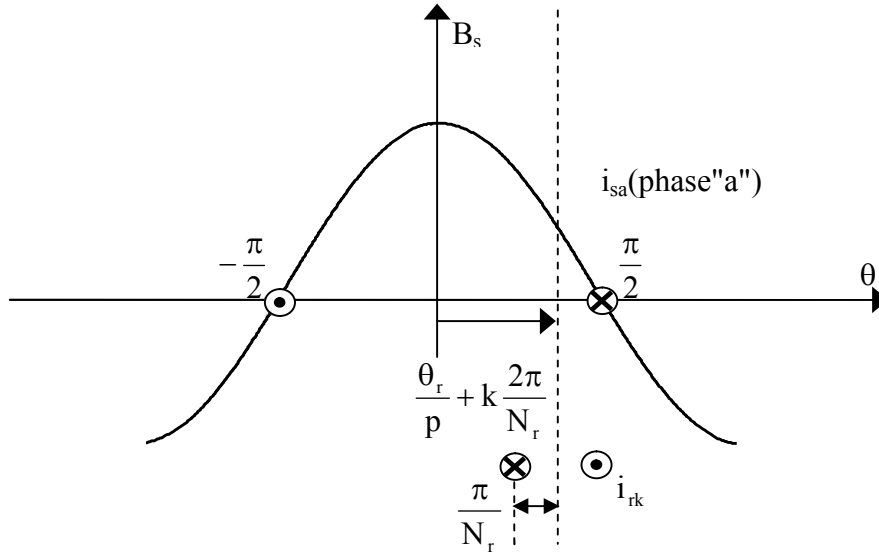


Fig 2.3 : Flux mutuel phase statorique-boucle rotorique [02].

$$B_s = \frac{2}{\pi} \mu_0 \frac{N_s}{e} i_{sn} \cos(p\theta - n \frac{2\pi}{3}) \quad (2.16)$$

Avec : $n = \{0,1,2\}$

D'où le flux traversant la maille k, produit par le courant i_{sn} est donnée par :

$$\phi_{snrk} = - \int_{\frac{\theta_r + k \frac{2\pi}{N_r} - \frac{\pi}{N_r}}{\frac{\theta_r + k \frac{2\pi}{N_r} + \frac{\pi}{N_r}}} B_s(\theta) Rl d\theta \quad (2.17)$$

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

$$\phi_{\text{snrk}} = -\frac{2}{\pi} \frac{\mu_0}{e p} N_s R l_{\text{sn}} \frac{1}{p} \left[\sin \left(p\theta - n \frac{2\pi}{3} \right) \right]_{\frac{\theta_r + k \frac{2\pi}{N_r} - \frac{\pi}{N_r}}{\frac{\theta_r + k \frac{2\pi}{N_r} + \frac{\pi}{N_r}}} \quad (2.18)$$

L'expression de l'inductance mutuelle stator-rotor est tirée donc de celle du flux par l'expression suivante :

$$M_{\text{snrk}} = -L_{\text{sr}} \cos \left(p\theta_r - n \frac{2\pi}{3} + ka \right) \quad (2.19)$$

Avec :

$$L_{\text{sr}} = \frac{4\mu_0 N_s R l}{e p^2 \pi} \sin \left(\frac{a}{2} \right) \quad (2.20)$$

$a = p \frac{2\pi}{N_r}$, est l'angle électrique entre deux mailles rotoriques.

Le tableau suivant, résume les expressions de toutes les inductances de la machine asynchrone

Inductances	Expressions
L'inductance principale d'une phase statorique.	$L_{\text{sp}} = L_{\text{ms}} = \frac{4\mu_0 N_s^2 R l}{e \pi p^2}$
L'inductance mutuelle entre phases statoriques.	$M_s = -\frac{L_{\text{sp}}}{2}$
L'inductance totale d'une phase statorique.	$L_{\text{as}} = L_{\text{bs}} = L_{\text{cs}} = L_s = L_{\text{sp}} + L_{\text{sf}}$
L'inductance principale d'une maille rotorique.	$L_{\text{rp}} = \frac{N_r - 1}{N_r^2} \mu_0 \frac{2\pi}{e} R l$
L'inductance mutuelle entre mailles rotoriques non adjacentes.	$M_{\text{rr}} = -\frac{1}{N_r^2} \frac{2\pi \mu_0}{e} R l$
L'inductance mutuelle entre mailles rotoriques adjacentes.	$M_{\text{rk}(k-1)} = M_{\text{rk}(k+1)} = M_{\text{rr}} - L_b$

<p>L'inductance mutuelle entre une maille rotorique et une phase statorique "a".</p>	$M_{\text{snrk}} = -L_{\text{sr}} \cos(p\theta_r - n \frac{2\pi}{3} + ka)$ <p>Avec : $L_{\text{sr}} = \frac{4\mu_0 N_s R l}{ep^2 \pi} \sin(\frac{a}{2})$</p>
--	---

Tableau 2.1 : Inductances de la machine asynchrone à cage[11].

2.3.2. Mise en équations

Le but est d'effectuer une simulation numérique. Les équations devront donc être aussi simples que possible. Nous allons voir aussi qu'il est possible de prendre en compte des défauts sans que cela ne nécessite de reformuler systématiquement toute la mise en équation de la machine et de son environnement.

En étudiant la topologie du circuit électrique, nous cherchons alors l'ensemble des équations différentielles indépendantes régissant l'évolution des courants, et cela nous conduit à la forme classique :

$$\frac{d}{dt} [I] = -[L]^{-1} [R] [I] + [L]^{-1} [V] \quad (2.21)$$

2.3.2.1. Equations de tensions au stator

$$[V_{\text{abc}}] = [R_s] [i_{\text{abc}}] + \frac{d}{dt} [\phi_{\text{abc}}] \quad (2.22)$$

D'où :

$$[\phi_{\text{abc}}] = [L_s] [i_{\text{abc}}] + [M_{\text{sr}}] [i_{\text{rk}}] \quad (2.23)$$

Avec :

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

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

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

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

$[R_s]$: matrice des résistances statoriques.

$$[R_s] = \begin{bmatrix} r_s & 0 & 0 \\ 0 & r_s & 0 \\ 0 & 0 & r_s \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

$[L_s]$: matrice des inductances statoriques.

$$[L_s] = \begin{bmatrix} L_{as} & M_s & M_s \\ M_s & L_{bs} & M_s \\ M_s & M_s & L_{cs} \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

$[M_{sr}]$: matrice des inductances mutuelles entre phases statoriques et mailles rotoriques.

$$[M_{sr}] = \begin{bmatrix} \cdots & L_{sr} \cos(\theta_r + ka) & \cdots \\ \cdots & L_{sr} \cos(\theta_r + ka - \frac{2\pi}{3}) & \cdots \\ \cdots & L_{sr} \cos(\theta_r + ka - \frac{4\pi}{3}) & \cdots \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

Où : $k=0, 1, 2, \dots, N_r-1$

2.3.2.2. Equations de tensions au rotor

La figure (2.4), représente le schéma équivalent de la cage rotorique.

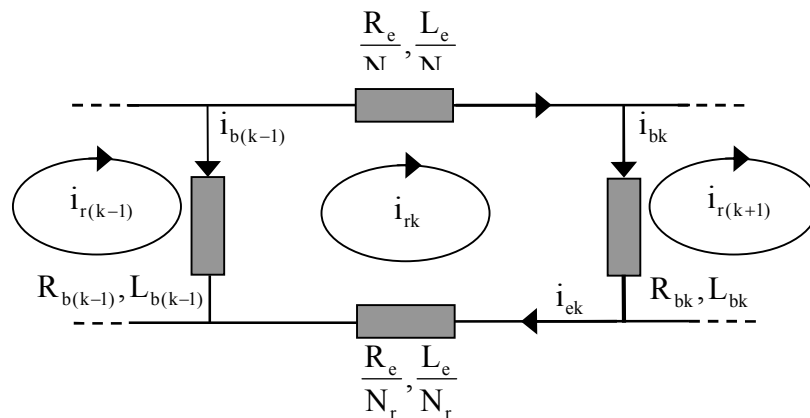


Fig 2.4 : Schéma électrique équivalent des mailles rotoriques

Sachant que :

$$i_{ek} = i_{rk} - i_e \quad (2.27)$$

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

$$R_{bk} i_{r(k-1)} + \left(2 \frac{R_e}{N_r} + R_{b(k-1)} + R_{bk} \right) i_{rk} - R_{bk} i_{r(k+1)} - \frac{R_e}{N_r} i_e + \frac{d}{dt} \phi_{rk} = 0 \quad (2.28)$$

Avec :

$$\begin{aligned} \phi_{rk} = & \left(L_{rp} + 2L_b + 2 \frac{L_e}{N_r} \right) i_{rk} - M_{rr} \sum_{\substack{j=0 \\ j \neq k}}^{N_r-1} i_{rj} - L_b (i_{r(k-1)} + i_{r(k+1)}) - \frac{L_e}{N_r} i_e \\ & - L_{sr} \left[\cos(\theta_r + ka) \quad ; \quad \cos(\theta_r + ka - \frac{2\pi}{3}) \quad ; \quad \cos(\theta_r + ka - \frac{4\pi}{3}) \right] [i_{abc}] \end{aligned} \quad (2.29)$$

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

$$\frac{R_e}{N_r} \sum_{k=0}^{N_r-1} i_{rk} + \frac{L_e}{N_r} \sum_{k=0}^{N_r-1} \frac{d}{dt} i_{rk} - R_e i_e - L_e \frac{d}{dt} i_e = 0 \quad (2.30)$$

2.3.2.3. Equation globale des tensions

L'équation globale des tensions est donnée par :

$$[V] = [R][I] + [L] \frac{d[I]}{dt} + \frac{d[L]}{dt} [I] \quad (2.31)$$

Avec :

$[V] = [v_a \quad v_b \quad v_c \quad ; \quad 0 \quad 0 \dots \dots \quad 0 \quad ; \quad 0]^T$, 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.

$[\mathbf{I}] = [\mathbf{i}_a \quad \mathbf{i}_b \quad \mathbf{i}_c \quad \vdots \quad \mathbf{i}_{r0} \quad \mathbf{i}_{r1} \quad \dots \quad \mathbf{i}_{rk} \quad \dots \quad \mathbf{i}_{r(N_r-1)} \quad \vdots \quad \mathbf{i}_e]^\top$, 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.

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

Avec :

$[\mathbf{R}_r]$: matrice des résistances rotoriques.

$$[\mathbf{R}_r] = \begin{bmatrix} R_{b0} + R_{b(N_r-1)} + 2\frac{R_e}{N_r} & -R_b & 0 & \dots & -R_{b(N_r-1)} & \vdots & -\frac{R_e}{N_r} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & R_{b(k-1)} & R_{bk} + R_{b(k-1)} + 2\frac{R_e}{N_r} & -R_{bk} & 0 & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -R_{b(N_r-1)} & 0 & \dots & -R_{b(N_r-1)} & R_{b(N_r-1)} + R_{b(N_r-2)} + 2\frac{R_e}{N_r} & \vdots & -\frac{R_e}{N_r} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ -\frac{R_e}{N_r} & \dots & \dots & \dots & -\frac{R_e}{N_r} & \vdots & R_e \end{bmatrix} \quad (2.32)$$

$$[\mathbf{L}] = \begin{bmatrix} [\mathbf{L}_s] & \vdots & [\mathbf{M}_{sr}] \\ \dots & \vdots & \dots \\ [\mathbf{M}_{sr}]^\top & \vdots & [\mathbf{L}_r] \end{bmatrix}, \text{ matrice globale des inductances.}$$

Avec :

$[\mathbf{L}_r]$: matrice des inductances rotoriques.

$$[\mathbf{L}_r] = \begin{bmatrix} L_{rp} + 2L_b + 2\frac{L_e}{N_r} & M_{rr} - L_b & M_{rr} & \dots & M_{rr} - L_b & \vdots & -\frac{L_e}{N_r} \\ M_{rr} - L_b & L_{rp} + 2L_b + 2\frac{L_e}{N_r} & M_{rr} - L_b & M_{rr} & \dots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ M_{rr} - L_b & M_{rr} & \dots & M_{rr} - L_b & L_{rp} + 2L_b + 2\frac{L_e}{N_r} & \vdots & -\frac{L_e}{N_r} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ -\frac{L_e}{N_r} & \dots & \dots & \dots & -\frac{L_e}{N_r} & \vdots & L_e \end{bmatrix} \quad (2.33)$$

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

On remarque que la matrice $[M_{sr}]$ dépend du temps, ce qui nécessite l'inversion de la matrice inductance $[L]$, de dimension N_r+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 :

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (2.34)$$

La dérivée de la matrice de Park :

$$\frac{d[P(\theta)]}{dt} = -\sqrt{\frac{2}{3}}\omega \begin{bmatrix} 0 & \sin \theta & \cos \theta \\ 0 & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ 0 & \sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (2.35)$$

La matrice globale de Park de dimension $(N_r+1) \times (N_r+1)$.

$$[T] = \begin{bmatrix} [P(\theta)] & \vdots & [0] \\ \dots\dots\dots & \vdots & \dots\dots\dots \\ [0]^T & \vdots & [1] \end{bmatrix} \quad (2.36)$$

$$[T]^{-1} = \begin{bmatrix} [P(\theta)]^{-1} & \vdots & [0] \\ \dots\dots\dots & \vdots & \dots\dots\dots \\ [0]^T & \vdots & [1] \end{bmatrix} \quad (2.37)$$

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

Sachant que :

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

$$[I] = [T][I_{tr}], \text{ avec : } [I_{tr}] = [i_{ds} \quad i_{qs} \quad \vdots \quad i_{r0} \quad i_{r1} \quad i_{r2} \quad \dots \quad i_{rk} \quad \dots \quad i_{r(N_r-1)} \quad \vdots \quad i_e]^T$$

$$\text{Avec : } \begin{cases} v_{ds} = \sqrt{\frac{2}{3}} v_m \cos(\omega_s - \omega_r)t \\ v_{qs} = \sqrt{\frac{2}{3}} v_m \sin(\omega_s - \omega_r)t \end{cases} \quad (2.38)$$

L'équation (2.31) devient :

$$[T][V_{tr}] = [R][T][I_{tr}] + [L] \frac{d[T][I_{tr}]}{dt} + \frac{d[L]}{dt} [T][I_{tr}] \quad (2.39)$$

$$\Leftrightarrow [V_{tr}] = \left(\underbrace{[T]^{-1}[R][T]}_A + \underbrace{[T]^{-1}[L] \frac{d[T]}{dt}}_B + \underbrace{[T]^{-1} \frac{d[L]}{dt} [T]}_C \right) [I_{tr}] + \underbrace{[T]^{-1}[L][T]}_D \frac{d[I_{tr}]}{dt} \quad (2.40)$$

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

$$A = [T]^{-1}[R][T] = \begin{bmatrix} [P(\theta)]^{-1}[R_s][P(\theta)] & \vdots & [0] \\ \dots & \vdots & \dots \\ [0] & \vdots & [R_r] \end{bmatrix} \quad (2.41)$$

$$B = [T]^{-1}[L] \frac{d[T]}{dt} = \begin{bmatrix} [P(\theta)]^{-1}[L_s] \frac{d[P(\theta)]}{dt} & \vdots & [0] \\ \dots & \vdots & \dots \\ [M_{sr}]^T \frac{d[P(\theta)]}{dt} & \vdots & [0] \end{bmatrix} \quad (2.42)$$

$$C = [T]^{-1} \frac{d[L]}{dt} [T] = \begin{bmatrix} [0] & \vdots & [P(\theta)]^{-1} \frac{d[M_{sr}]}{dt} \\ \dots & \vdots & \dots \\ \frac{d[M_{sr}]^T}{dt} [P(\theta)] & \vdots & [0] \end{bmatrix} \quad (2.43)$$

$$D = [T]^{-1} [L] [T] = \begin{bmatrix} [P(\theta)]^{-1} [L_s] [P(\theta)] & \vdots & [P(\theta)]^{-1} [M_{sr}] \\ \dots & \vdots & \dots \\ [M_{sr}]^T [P(\theta)] & \vdots & [L_r] \end{bmatrix} \quad (2.44)$$

La mise en équation du modèle de la machine, conduit à un système complet de dimension $N_r + 3$

$$\begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \\ \dots \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ \dots \\ 0 \end{bmatrix} = [L_{tr}] \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ \dots \\ i_{r0} \\ \vdots \\ i_{rk} \\ \vdots \\ i_{r(N_r-1)} \\ \dots \\ i_e \end{bmatrix} + [R_{tr}] \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ \dots \\ i_{r0} \\ \vdots \\ i_{rk} \\ \vdots \\ i_{r(N_r-1)} \\ \dots \\ i_e \end{bmatrix} \quad (2.45)$$

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

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

$$\begin{bmatrix} L_s - M_s & 0 & \vdots & \sqrt{\frac{3}{2}} L_{sr} & \sqrt{\frac{3}{2}} L_{sr} \cos(a) & \dots & \dots & \sqrt{\frac{3}{2}} L_{sr} \cos((N_r - 1)a) & \vdots & 0 \\ 0 & L_s - M_s & \vdots & 0 & \sqrt{\frac{3}{2}} L_{sr} \sin(a) & \dots & \dots & \sqrt{\frac{3}{2}} L_{sr} \sin((N_r - 1)a) & \vdots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \sqrt{\frac{3}{2}} L_{sr} & 0 & \vdots & L_{rp} + 2L_b + 2\frac{L_e}{N_r} & M_{rr} - L_b & 0 & \dots & M_{rr} - L_b & \vdots & -\frac{L_e}{N_r} \\ \sqrt{\frac{3}{2}} L_{sr} \cos(a) & \sqrt{\frac{3}{2}} L_{sr} \sin(a) & \vdots & M_{rr} - L_b & L_{rp} + 2L_b + 2\frac{L_e}{N_r} & M_{rr} - L_b & M_{rr} & \dots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \sqrt{\frac{3}{2}} L_{sr} \cos((N_r - 1)a) & \sqrt{\frac{3}{2}} L_{sr} \sin((N_r - 1)a) & \vdots & M_{rr} - L_b & M_{rr} & \dots & M_{rr} - L_b & L_{rp} + 2L_b + 2\frac{L_e}{N_r} & \vdots & \vdots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & -\frac{L_e}{N_r} \\ 0 & 0 & \vdots & -\frac{L_e}{N_r} & \dots & \dots & \dots & -\frac{L_e}{N_r} & \vdots & L_e \end{bmatrix} \quad (2.46)$$

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

$$\begin{bmatrix}
 r_s & \omega_r(M_s - L_s) & \vdots & 0 & -\omega_r L_{sr} \sqrt{\frac{3}{2}} \sin(a) & \cdots & \cdots & -\omega_r L_{sr} \sqrt{\frac{3}{2}} \sin((N_r - 1)a) & \vdots & 0 \\
 \omega_r(L_s - M_s) & r_s & \vdots & \omega_r L_{sr} \sqrt{\frac{3}{2}} & \omega_r L_{sr} \sqrt{\frac{3}{2}} \cos(a) & \cdots & \cdots & \omega_r L_{sr} \sqrt{\frac{3}{2}} \cos((N_r - 1)a) & \vdots & 0 \\
 \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\
 0 & 0 & \vdots & R_{b0} + R_{b(N_r - 1)} + 2\frac{R_e}{N_r} & -R_{b0} & 0 & \cdots & -R_{b(N_r - 1)} & \vdots & -\frac{R_e}{N_r} \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots & \vdots \\
 \vdots & \vdots & \vdots & 0 & -R_{b(k-1)} & R_{bk} + R_{b(k-1)} + 2\frac{R_e}{N_r} & -R_{bk} & 0 & \vdots & \vdots \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots & \vdots \\
 0 & 0 & \vdots & -R_{b(N_r - 1)} & 0 & \cdots & -R_{b(N_r - 2)} & R_{b(N_r - 1)} + R_{b(N_r - 2)} + 2\frac{R_e}{N_r} & \vdots & -\frac{R_e}{N_r} \\
 \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\
 0 & 0 & \vdots & -\frac{R_e}{N_r} & \cdots & \cdots & \cdots & -\frac{R_e}{N_r} & \vdots & R_e
 \end{bmatrix}
 \tag{2.47}$$

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

$$\frac{d}{dt} \omega_m = \frac{1}{J} (C_e - C_r - k_0 \omega_m) \tag{2.48}$$

$$\frac{d}{dt} \theta_r = \omega_r \tag{2.49}$$

2.3.3 Expression du couple électromagnétique

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

On a :

$$\begin{bmatrix} \psi_{odqs} \\ \phi_{kr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [P(\theta)]^{-1} & [0] \\ [0] & [1] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [L_s] & [M_{sr}] \\ [M_{sr}]^T & [L_r] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [P(\theta)]^{-1} & [0] \\ [0] & [1] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{odqs} \\ i_{kr} \end{bmatrix} \tag{2.50}$$

$$\Leftrightarrow \begin{bmatrix} \psi_{dqs} \\ \psi_{kr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [P(\theta)]^{-1} [L_s] [P(\theta)] & [P(\theta)]^{-1} [M_{sr}] \\ [M_{sr}]^T [P(\theta)] & [L_r] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{dqs} \\ i_{kr} \end{bmatrix} \tag{2.51}$$

On aura :

$$\psi_{dqs} = [P(\theta)]^{-1} [L_s] [P(\theta)] i_{dqs} + [P(\theta)] [M_{sr}] i_{kr} \tag{2.52}$$

Après le calcul on obtient :

$$\begin{cases} \psi_{ds} = (L_s - M_s)i_{ds} + \sqrt{\frac{3}{2}}L_{sr} \sum_{k=0}^{N_r-1} i_{rk} \cos(ka) \\ \psi_{qs} = (L_s - M_s)i_{qs} + \sqrt{\frac{3}{2}}L_{sr} \sum_{k=0}^{N_r-1} i_{rk} \sin(ka) \end{cases} \quad (2.53)$$

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

$$\begin{aligned} P_s(t) &= [V_{abc}]^T [i_{abc}] \\ &= ([P(\theta)][V_{dqqs}])^T [P(\theta)][i_{dqqs}] \\ &= [V_{dqqs}]^T [i_{dqqs}] \end{aligned} \quad (2.54)$$

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

$$\begin{cases} v_{ds} = r_s i_{ds} + \frac{d\psi_{ds}}{dt} - \omega_r \psi_{qs} \\ v_{qs} = r_s i_{qs} + \frac{d\psi_{qs}}{dt} + \omega_r \psi_{ds} \end{cases} \quad (2.55)$$

En remplaçant les tensions v_{ds} et v_{qs} dans l'expression (2.54), on obtient :

$$P_{sa}(t) = r_s (i_{ds}^2 + i_{qs}^2) + \left(i_{ds} \frac{d\psi_{ds}}{dt} + i_{qs} \frac{d\psi_{qs}}{dt} \right) + \omega_r (\psi_{ds} i_{qs} - \psi_{qs} i_{ds}) \quad (2.56)$$

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

$$C_e = P(\psi_{ds} i_{qs} - \psi_{qs} i_{ds}) \quad (2.57)$$

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

$$C_e = \sqrt{\frac{3}{2}} PL_{sr} \left\{ i_{qs} \sum_{k=0}^{N_r-1} i_{rk} \cos(ka) - i_{ds} \sum_{k=0}^{N_r-1} i_{rk} \sin(ka) \right\} \quad (2.58)$$

2.4. INFLUENCE DU DÉFAUT SUR LES SCHEMAS ELECTRIQUES

Il est assez difficile de décrire exactement la succession des phénomènes physiques entrant en jeu lors d'une rupture d'une barre. Notre étude ne tient pas compte sur les phases transitoires (mattage, dilation, point chaud) qui interviennent progressivement jusqu'à la création franche de défaut, mais uniquement sur les ruptures établies qui seront modélisées par une résistance forte de l'élément concerné. Les fissures apparaissent dans les barres ou anneaux, tout comme les problèmes de soudure entre barres et anneaux, ont pour effet d'augmenter la résistance équivalente des éléments défectueux. Par contre, ce type de défaut ne modifie ni les valeurs des inductances propres et mutuelles de ces éléments, ni les connexions avec les autres circuits. Donc avec le modèle multi enroulement, la modélisation d'un tel défaut consiste à modifier uniquement la résistance R_b sans que cela nécessite une nouvelle mise en équation [10].

Les matrices des inductances et des résistances sont modifiées de tel façon que : si la barre k est rompue, le courant i_{bk} dans cette barre s'annule. Dans ce cas, le courant dans la maille $(k-1)$ devient égal au courant dans la maille (k) , c'est-à-dire, $(i_{r(k-1)} = i_{rk})$ (figure 2.5).

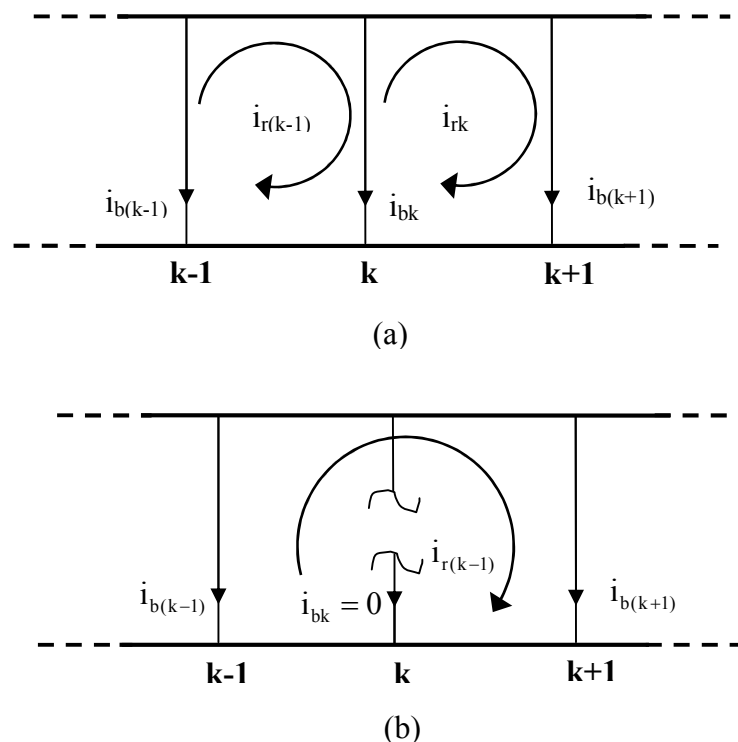


Fig 2. 5 : Schéma équivalent de la cage rotorique pour :
a. Etat sain, **b.** Avec une barre rompue [5]

2.5. CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons présenté le développement mathématique d'un modèle multi-enroulement qui tient compte de la structure du rotor. Le choix d'un tel modèle nous est imposé par l'objectif de pouvoir simuler une rupture de barre ou d'une portion d'anneau de court-circuit au rotor. Pour cela, nous avons cherché à représenter toutes les barres du rotor. Ce modèle est pratique en ce sens que l'introduction du défaut se réduit à une simple augmentation de la résistance de la barre dont on veut simuler la rupture. Ce modèle nous a conduits à un système de rang très élevé. Le passage à un modèle diphasé équivalent en utilisant la transformation de Park nous a permis la réduction de l'ordre du système.

Chapitre 3

CHAPITRE 3

SIMULATION DE LA MACHINE ASYNCHRONE

3.1. INTRODUCTION

Après avoir défini le modèle de la machine asynchrone, nous avons implémenté le système au sein du logiciel MATLAB. La résolution des équations différentielles obtenues est réalisée par la méthode de Runge Kutta d'ordre 4.

Dans ce chapitre, on va montrer les courbes du courant statorique, du courant dans les barres rotoriques, le couple et la vitesse pendant les différentes conditions de fonctionnement, à l'état sain et avec défaut.

3.2. SIMULATION DU DEMARRAGE A VIDE ET VARIATION DU COUPLE RESISTANT

Les paramètres du moteur, utilisé pour la simulation, sont présentés dans l'annexe . Les figures 3.1 , 3.2 , 3.3 et 3.4 , montrent respectivement l'évolution du couple électromagnétique et la vitesse de rotation ainsi que le courant statorique et le courant rotorique dans la barre 15, lors d'un démarrage à vide sous une tension nominale avec une alimentation sinusoïdale équilibrée. A l'instant $t=0.8$ sec, nous provenons à un échelon de couple résistant nominal de 2 Nm. Le couple électromagnétique vient équilibrer le couple résistant (fig 3.1), la vitesse diminue à la vitesse nominale (fig 3.2) et le courant augmente à la valeur nominale (figure 3.3).

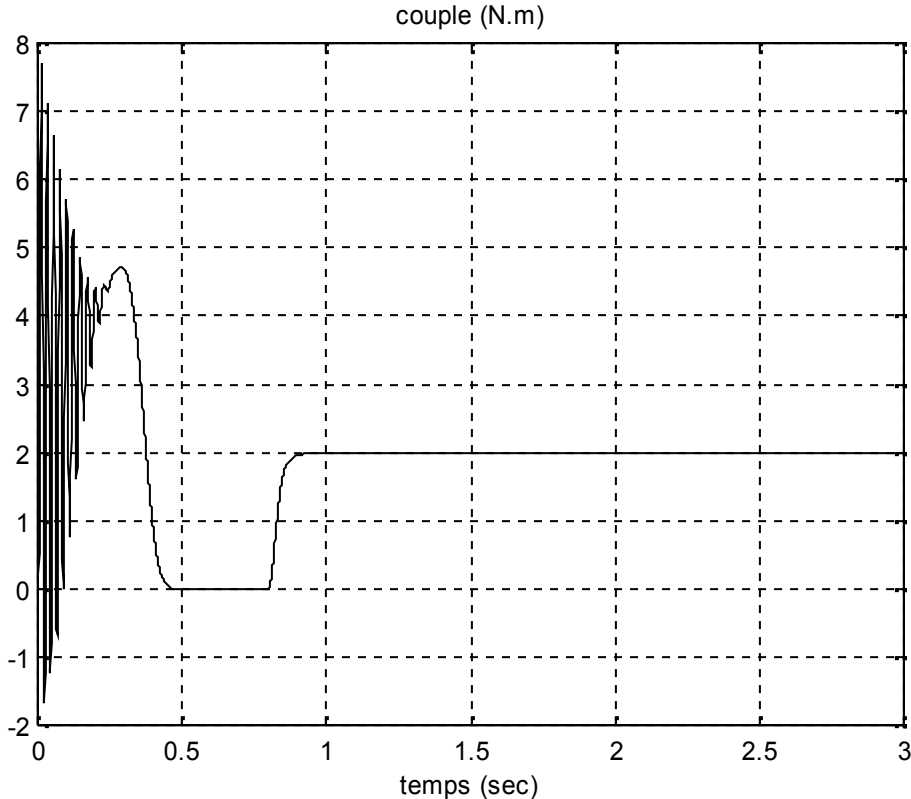


Fig 3.1 : Couple électromagnétique (machine saine).

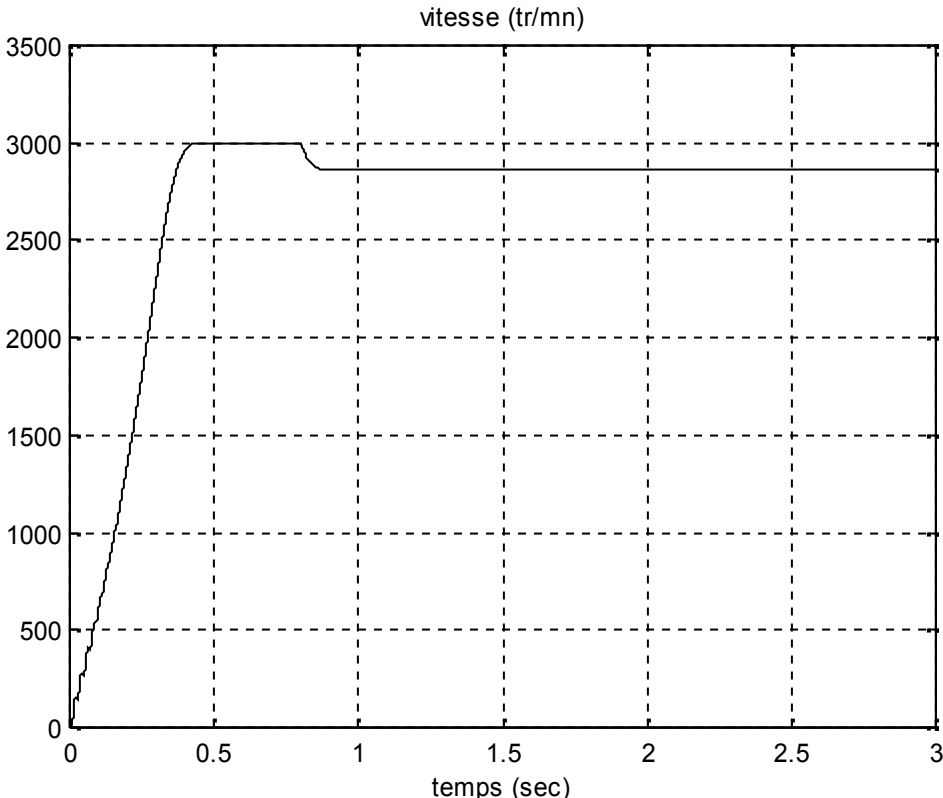


Fig 3.2 : Vitesse de rotation (machine saine).

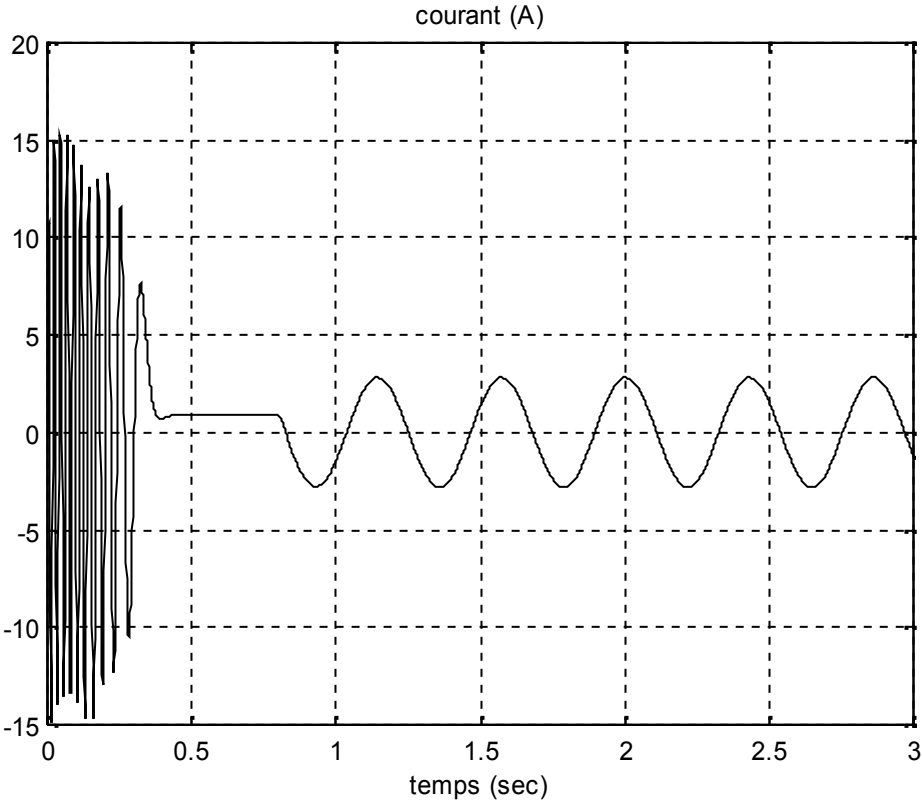


Fig 3.3 : Courant d'une phase statorique (machine saine).

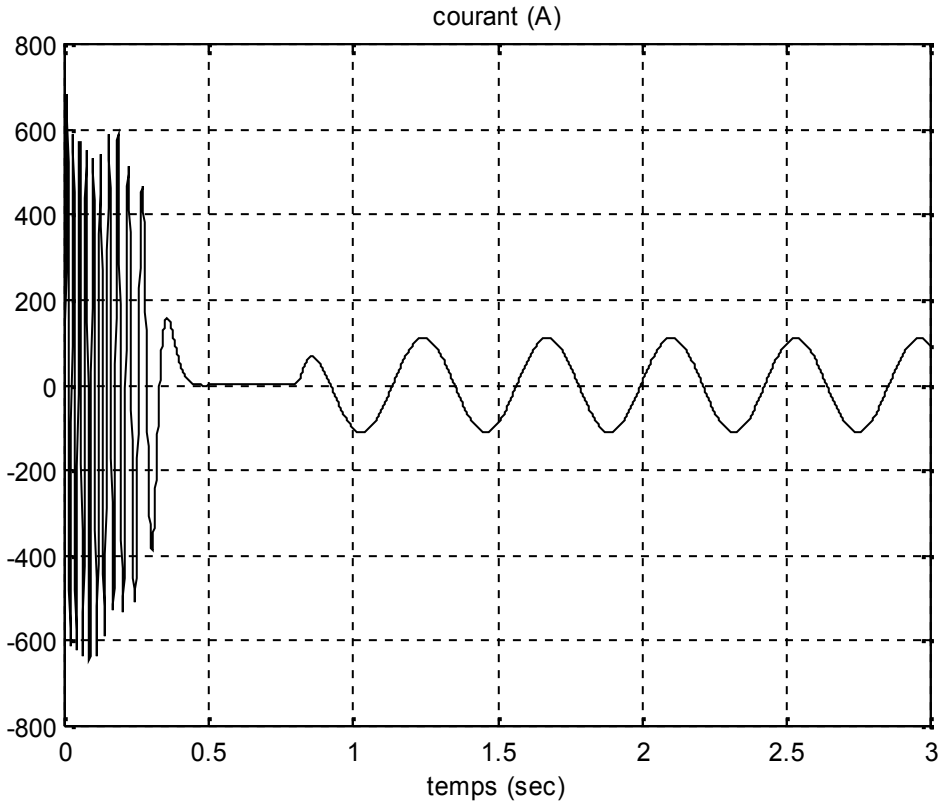


Fig 3.4 : Courant rotorique dans la barre 15 (machine saine).

3.3 SIMULATION DE RUPTURE DE BARRES AU ROTOR

Le courant dans la barre cassée n'est jamais nul. Les barres ne sont pas isolées du circuit magnétique du rotor. D'après une étude [12], il existe toujours un courant qui passe par les tôles du rotor. En ce qui nous concerne, une augmentation de l'ordre de 11 fois la résistance initiale de la barre nous a permis d'aboutir à des résultats en lien avec ceux obtenus expérimentalement.

A $t=1.5$ sec, nous simulons la rupture de la 15^{ème} barre en accroissant sa résistance de 11 fois. Le courant dans cette barre diminue fortement (fig 3.5), entraînant une surintensité importante dans les barres adjacentes (fig 3.6) et (fig 3.7). Le courant parcourait dans la barre cassée se répartit alors dans les barres voisines. Ceci se traduira donc par des pertes par effet Joule plus importantes sur certaines barres du rotor, les contraintes thermiques dans ces barres pourraient alors accélérer leur vieillissement jusqu'à la rupture.

Le rotor avec une barre cassée crée en plus du champ rotorique direct qui tourne à $g\omega_s$ par rapport au rotor, un champ rotorique inverse qui lui tourne à $-g\omega_s$ dans le repère rotorique. L'interaction de ces champs avec celui issu du bobinage statorique donne naissance à un couple électromagnétique qui est la somme d'une composante directe constante et d'une composante inverse sinusoïdale de pulsation $2g\omega_s$ (fig 3.8) [2].

Cette dernière sera la cause d'oscillations de la vitesse qui peut contribuer à une fatigue supplémentaire de l'arbre (fig 3.9).

La figure (3.10) permet de vérifier la modulation de l'enveloppe du courant statorique après la rupture de la barre. La pulsation de cette modulation est de même $2g\omega_s$.

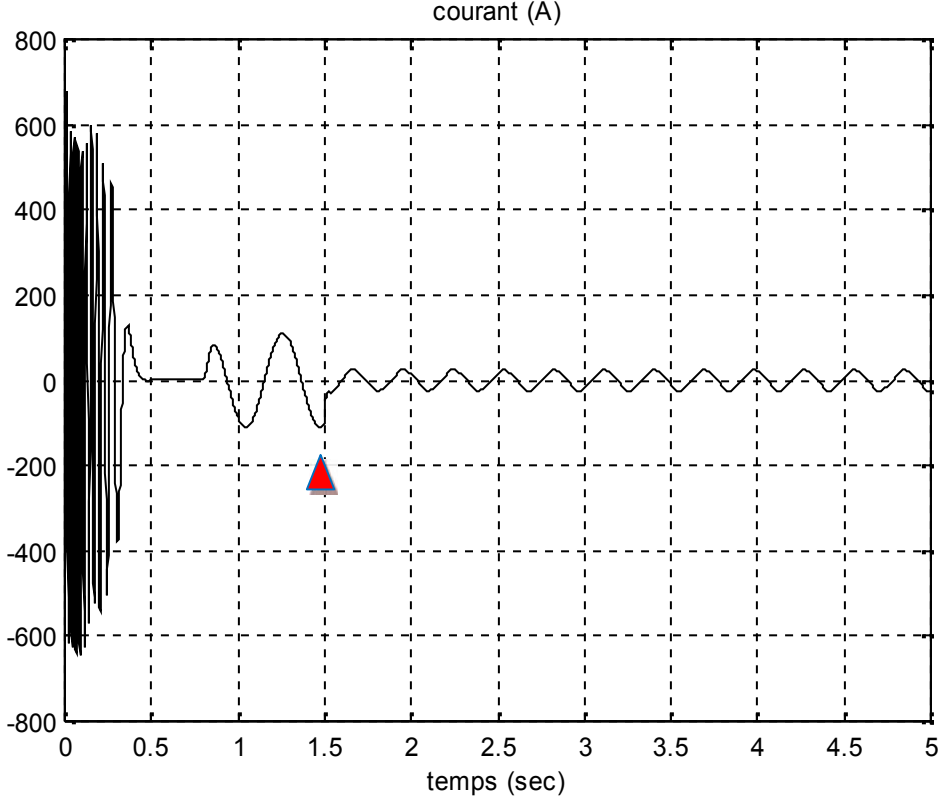


Fig 3.5 : Courant rotorique dans la barre cassée (barre 15).

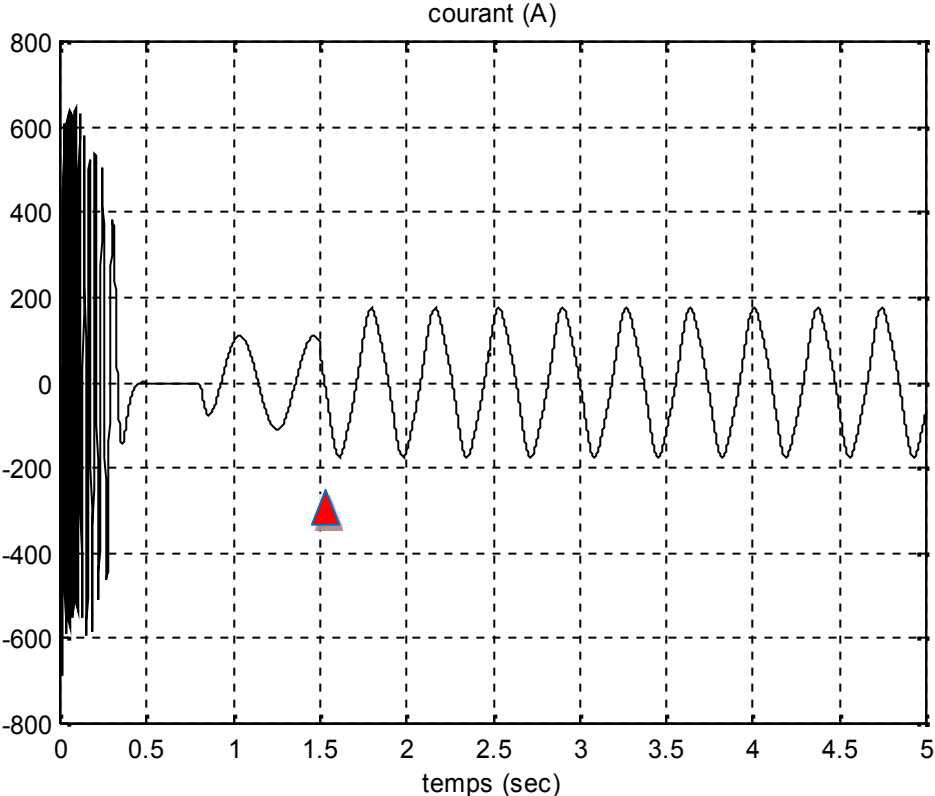


Fig 3.6 : Courant rotorique dans la barre adjacente (barre 14).

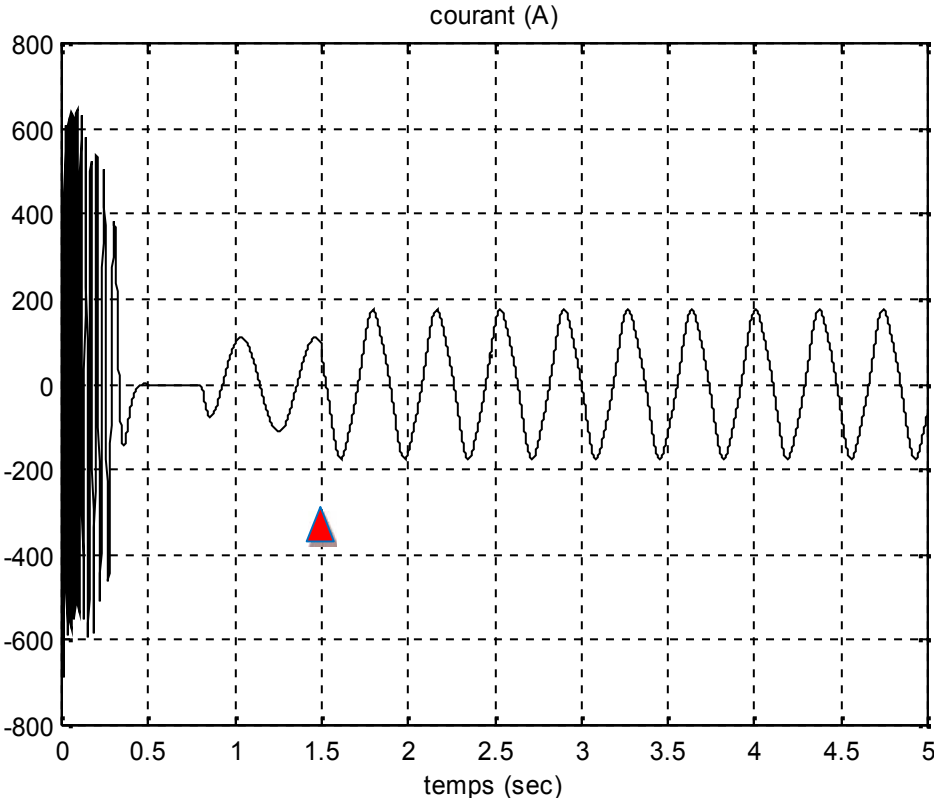


Fig 3.7 : Courant rotorique dans la barre adjacente (barre 16).

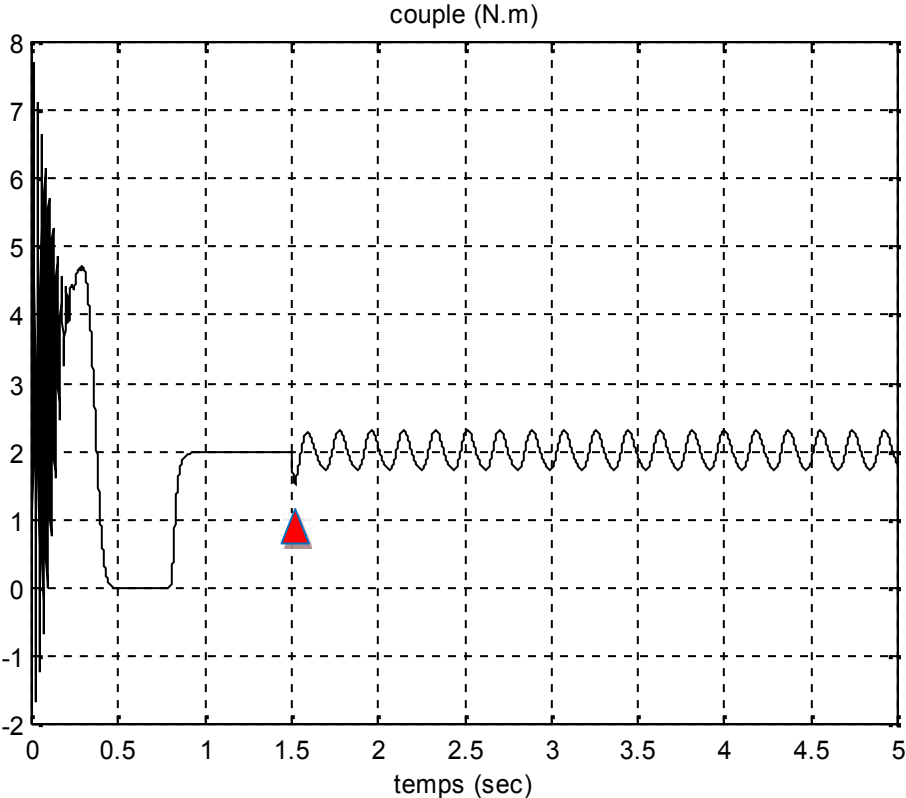


Fig 3.8 : Ondulation du couple électromagnétique lors de la rupture d'une seule barre (barre 15).

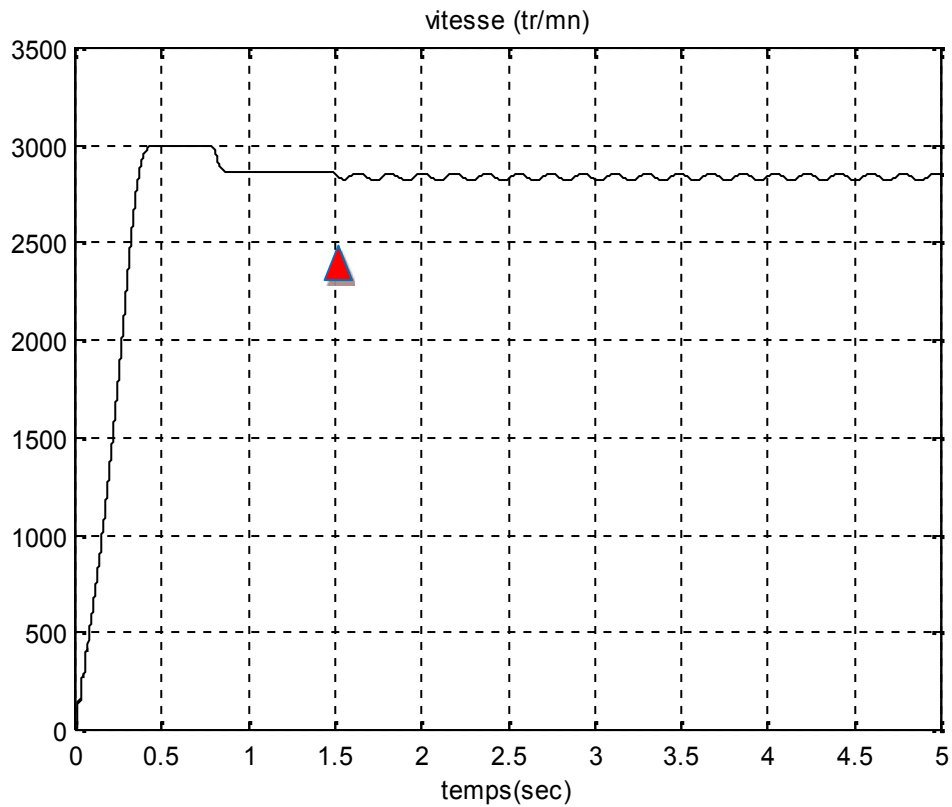


Fig 3.9 : Ondulation de la vitesse de rotation lors de la rupture d'une seule barre (barre 15).

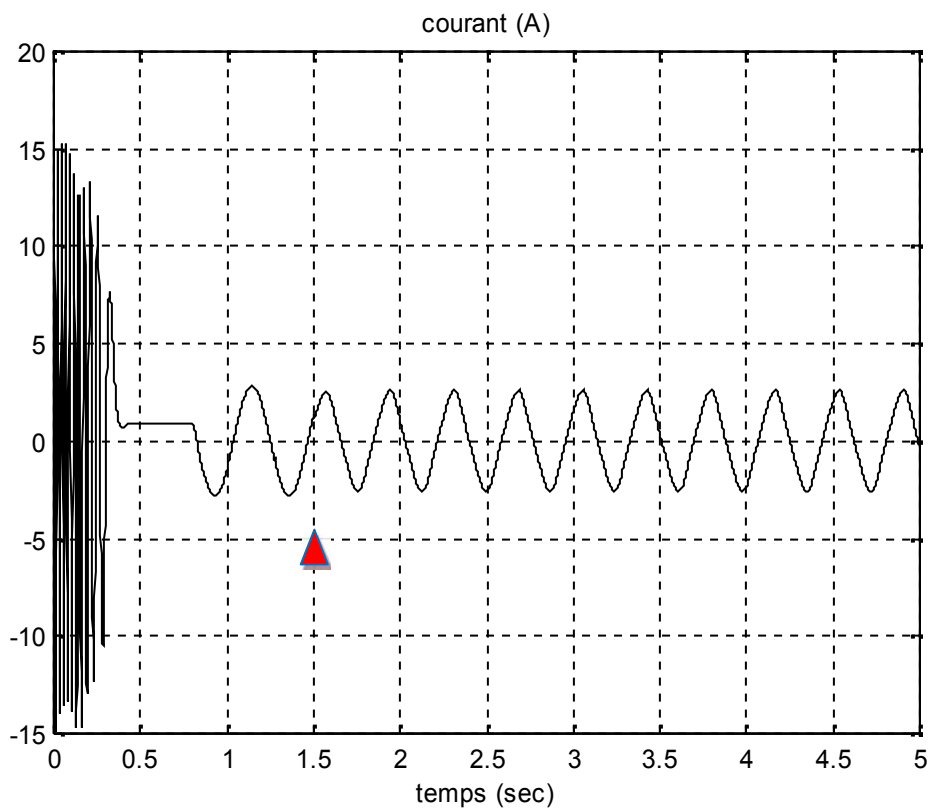


Fig 3.10 : Courant statorique lors de la rupture d'une seule barre (barre 15).

3.3.1 Simulation de la rupture de deux barres adjacentes

A l'instant $t=1.5$ sec, nous simulons la rupture de la 15^{ème} et la 16^{ème} barre, pour mettre en évidence l'effet de nombre de barres rompues.

L'amplitude des courants dans les barres voisines (la barre 14 et la barre 17) devient plus importante qu'avec une seule barre cassée (fig 3.11). Ceci se traduit sur le couple et la vitesse par une augmentation de l'amplitude des ondulations (fig 3.12 et 3.13).

La figure (3.14), permette de vérifier la modulation de l'enveloppe du courant statorique après la rupture de deux barres adjacentes. On note également l'augmentation de l'amplitude de modulation quand deux barres adjacentes sont cassées.

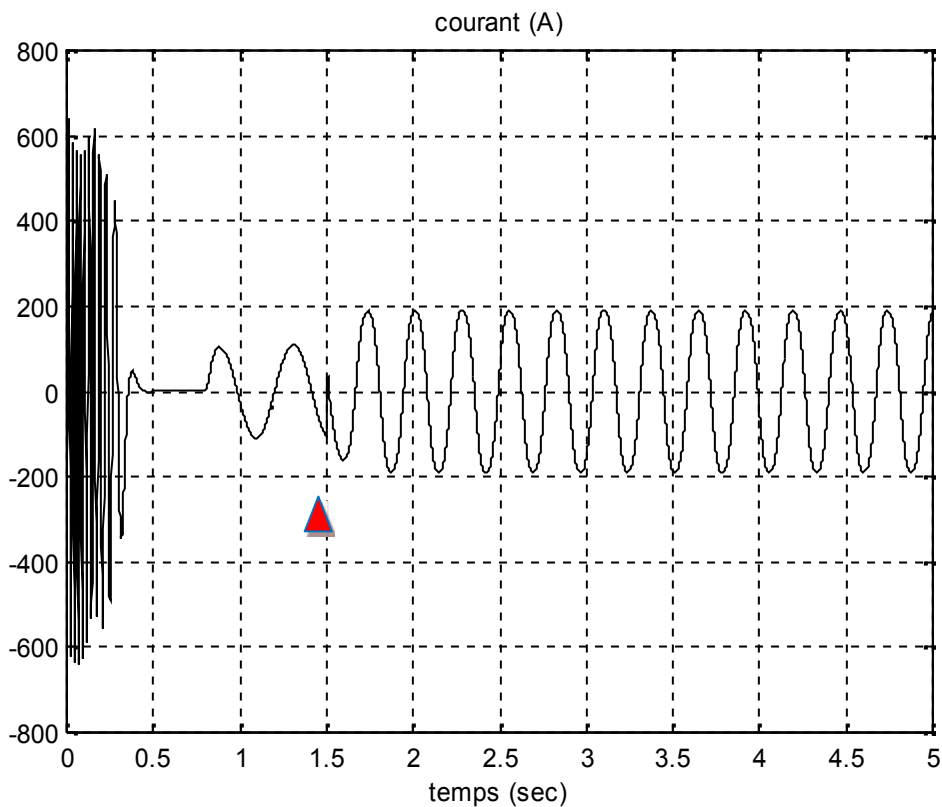


Fig 3.11 : Courant rotorique dans la barre 17 lors de la rupture de deux barres adjacentes (barre 15 et barre 16).

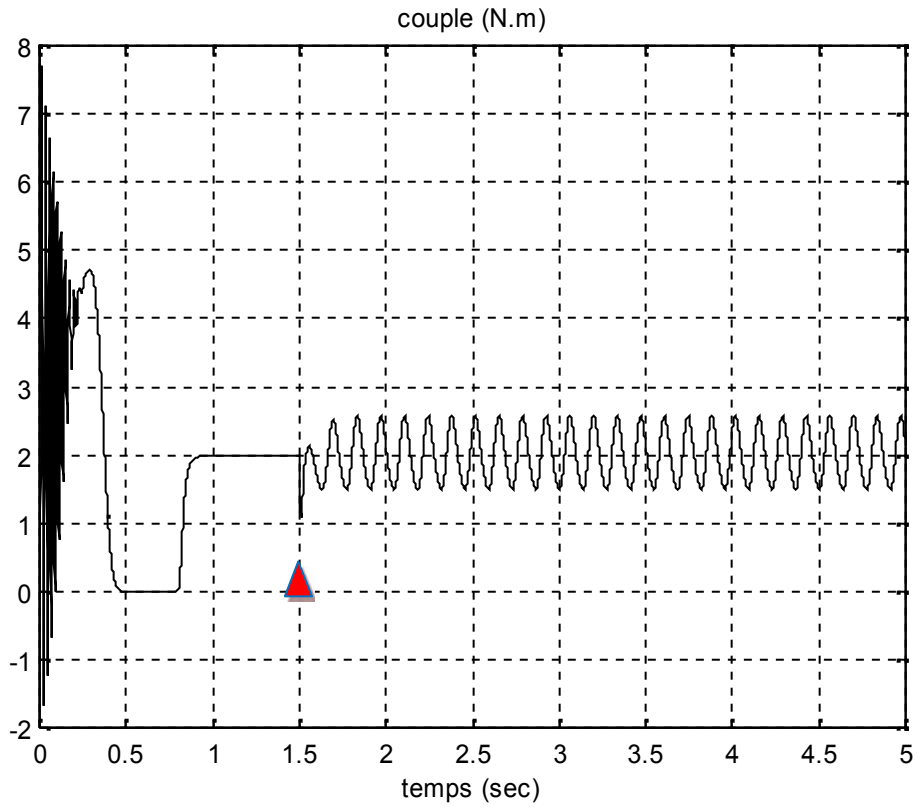


Fig 3.12 : Ondulation du couple électromagnétique lors de la rupture de deux barres adjacentes (barre 15 et barre 16).

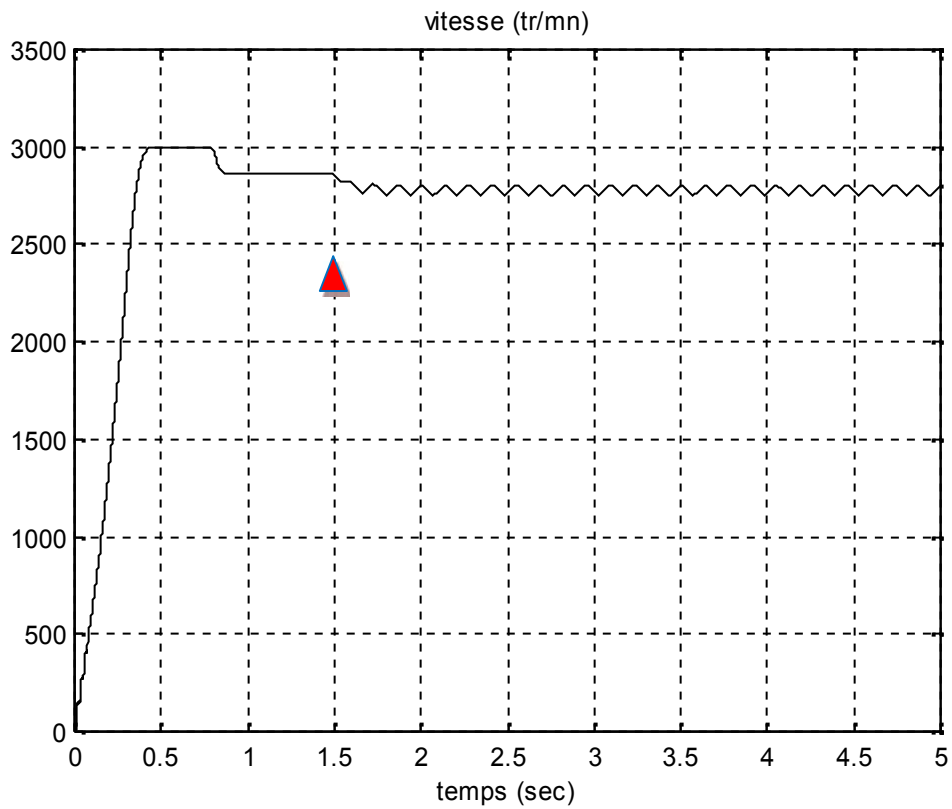


Fig 3.13 : Ondulation de la vitesse de rotation lors de la rupture de deux barres adjacentes (barre 15 et barre 16).

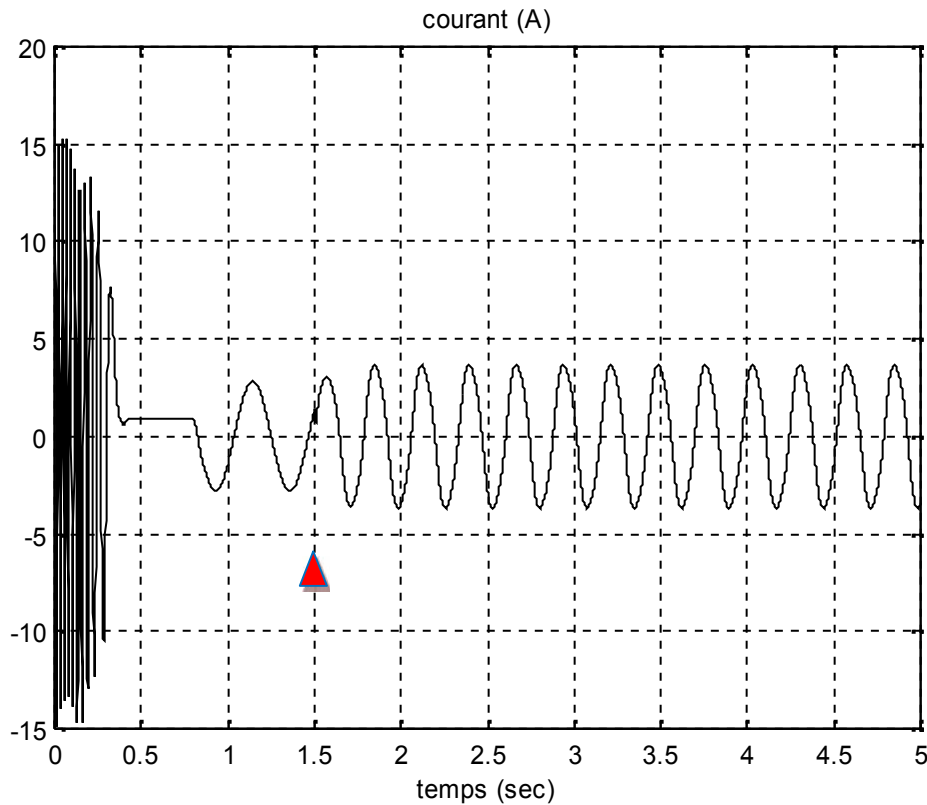


Fig 3.14 : Courant statorique lors de la rupture de deux barres adjacentes (barre 15 et barre 16).

3.4 CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons présenté une simulation d'un moteur asynchrone triphasé à cage, pendant les différentes conditions de fonctionnement (démarrage à vide et en charge et rupture de barres).

Nous avons trouvé que la cassure d'une barre provoque des oscillations dans le couple et dans la vitesse, ainsi qu'une modulation de l'enveloppe du courant statorique. L'amplitude de ces oscillations augmente avec le nombre de barres cassées.

CONCLUSION GÉNÉRALE

CONCLUSION GÉNÉRALE

La détection précoce des défauts dans les machines asynchrones est devenu un enjeu économique important justifié par l'intérêt grandissant des industriels pour la maintenance des entraînements électriques, qui garantit une fréquence d'utilisation soutenue. Dans ce cadre, le travail présenté dans cette thèse traite de la modélisation de la machine asynchrone en vue de diagnostic.

Le premier chapitre a permis d'exposer les fréquents défauts, ainsi que les différentes techniques de diagnostic utilisées. Ensuite, les signatures de quelques défauts ont été présentées.

Le second chapitre qui constitue l'essentiel du travail réalisé, où nous avons proposé une méthodologie de synthèse d'un modèle de la machine asynchrone à cage d'écureuil. Cette modélisation s'appuie sur une description de la topologie constitutive et géométrique de la machine asynchrone à cage d'écureuil. Sous la forme de circuits électriques maillés magnétiquement couplés, ce modèle permet la simulation des barres cassées.

Enfin, le troisième chapitre exploite la flexibilité du modèle développé pour rendre compte des défaillances due aux cassures de barres. Celui ci présente les résultats de simulation de la machine à l'état sain et avec défauts. Ils mettent en évidence l'effet de défaut sur les différentes grandeurs d'états de la machine.

RÉFÉRENCES

RÉFÉRENCES

- [01] S. Bachir, "*Contribution au Diagnostic de la Machine Asynchrone par Estimation Paramétrique*", Thèse de Doctorat, Université de Poitier, France, 2003.
- [02] A. Abed, "*Contribution à l'Étude et au Diagnostic de la Machine Asynchrone*", Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy-1, France, Mars 2002.
- [03] P. O'Donnell, "*Report of Large Reliability Survey of Industrial and Commercial Installations*", IEEE Transaction on Industry Applications, Vol. IA-21, Part 1, N°4, PP. 853-864, 1985.
- [04] EPRI "*Improved Motors for Utility Applications*", Final report Publication EL-2678, Vol. 1, EPRI, 1763-1, 1982.
- [05] M. Sahraoui "*Contribution à l'Étude du Diagnostic de la Machine Asynchrone*", thèse de Magistère, Université Mohamed Khider Biska 2003.
- [06] B. Vaseghi, "*Contribution à l'Étude des Machines Électriques en Présence de Défaut Entre-Spires Modélisation-Réduction du Courant de Défaut*", Thèse de Doctorat, Université de Nancy, France, 2009.
- [07] N. Halem, "*Modélisation des Machines Asynchrones Triphasées à Cage en Vue du Diagnostic par la Méthode des Éléments Finis*", Thèse de Doctorat, Université de Biskra, Algérie, 2015.
- [08] A. Ceban, "*Méthode Globale de Diagnostic des Machines Électriques*", Thèse de Doctorat, Université d'Artois, Laboratoire Systèmes Électrotechniques et Environnement, France, 2012.
- [09] H. A. Toliyat, T. A. Lipo, "*Transient Analysis of Cage Induction Machines under Stator, Rotor Bar and End Ring Faults*", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 10, N°2, PP. 241-247, 1995.
- [10] N. Halem, "*Étude et Simulation du Modèle Multi-Enroulements de la Machine Asynchrone*", Mémoire d'Ingénieur, Université de Biskra, Algérie, Juin 2007.
- [11] M. Sahraoui, "*Étude Comparative des Méthodes de Diagnostic des Machines Asynchrones*", Thèse de Doctorat, Université de Biskra, Algérie, 2010.

- [12] I. Kerzenbaum, C.F. Landy, "*The existence of large inter-bar currents in three phase squirrel cage motors with rotor-bar and/or end ring faults*", IEEE Trans. On Power Apparatus and System, Vol 103, n°7, pp 1854-1862, July 1984.

Paramètres du moteur utilisés

P	puissance nominale	450w
V	tension nominale de ligne	127v
f_s	fréquence d'alimentation	50Hz
p	nombre de paire de pôles	1
D	diamètre moyen	75mm
l	longueur	60mm
e	épaisseur d'entrefer	0.38m
N_r	nombre de barre	27
N_s	nombre de spires par phase	193
r_s	résistance d'une phase statorique	4.1 Ω
L_{sf}	résistance de fuite statorique	17.5mH
R_b	résistance d'une barre rotoriques	74 $\mu\Omega$
R_e	résistance d'un anneau de court-circuit	74 $\mu\Omega$
L_b	inductance de fuite d'une barre rotoriques	0.33 μH
L_e	inductance de fuite d'anneau de court-circuit	0.33 μH
J	moment d'inertie	4.5 $10^{-3} \text{N s}^2/\text{m}$
K_0	coefficient de frottement	5 10^{-6}N/ms

RESUME

Les entraînements électriques vitesse variable utilisent de plus en plus les moteurs asynchrones, grâce à leurs robustesses, puissance massique et faible cout. La maintenance et le diagnostic de défauts de ces entraînements sont de nos jours un enjeu économique, donc il est important de détecter de manière précoce les défauts qui peuvent apparaître dans ces machines en développant des méthodes de surveillance du fonctionnement ou de maintenance préventif afin d'éviter les arrest intensifs de l'nstallation.

Après avoir décrit les différents éléments de constitution d'une machine asynchrone et les principaux défauts pouvant survenir sur ceux-ci, nous proposons un modèle multi enroulement. Ce modèle permet d'étudier l'influence d'un défaut de barre sur le comportement général du moteur asynchrone .

Ce travail est consacré à l'étude expérimentale et à la simulation des cassures de barres dans la cage rotorique de la machine asynchrone .

La simulation des barres cassées dans la machine asynchrone a le but de vérifier l'effet de cassure de barres rotoriques sur le comportement électrique de la machine asynchrone.

Mots clés : Machine asynchrone à cage d'écureuil, diagnostic, défauts , cassure de barres rotoriques.

ملخص

نظرا لما تتميز به المحركات اللاتزامنية من خصائص و المتمثلة في المتانة الاستطاعة الكلية و كذا تكلفتها ، فإنها أصبحت الأكثر استعمالا في الميادين الكهربائية و بنالي فان صيانتها و تشخيص الأعطاب فيها أصبحا يلعبان دور اقتصادي هاما فمن المهم القيام بالكشف المسبق للأعطاب التي يمكن أن تطرأ عليها و هذا قصد تطوير طرق تسمح بمراقبة التشغيل و القيام بأعمال الصيانة للوقاية و لتجنب الأعطال المتكررة.

إن العمل الذي قمنا به هو تشخيص الأعطاب في الآلة اللاتزامنية ذات قفص السنجاب ، التي اعتمدنا من خلاله على نموذج متعدد اللفات الذي يسمح بدراسة تأثير العطب بصورة دقيقة.

تضمن هذا العمل دراسة نظرية و محاكاة تكسر القضبان في القفص الدوار ، إن محاكاة تكسر القضبان في المحرك اللاتزامني تهدف أساسا إلى التحقق من تأثير تكسر القضبان على السلوك الكهربائي للآلة خاصة في بقية القضبان للجزء الدوار.

الكلمات المفتاحية : الآلة اللاتزامنية ذات قفص سنجابي ، تشخيص الأعطال ، تحطم قضبان الدوار.

ABSTRACT

The electric drives with variable speed use the asynchronous motor more and more, because of their robustness, of their specific power, and their low costs. The maintenance and the diagnosis of defect of these drives are nowadays an economic stake. It is significant to detect in an early way the defects which can appear in these machines by developing methods of monitoring of preventive operation or maintenance in order to avoid the stops intensive of the installation.

The first parties devoted to the development of a model which is based on the magnetically coupled electric circuits, This type of modeling makes it possible to study the influence of a bar defect on the general behavior of the asynchronous motor .

This work is devoted to experimental study and simulation of broken rotor bars in the rotor three-phase asynchronous machine (Induction machine).

The simulation of broken bars in the asynchronous machine aims to verify the rotor bars breaking effect on the electrical behavior of the asynchronous machine (Induction machine).

Key words : Squirrel cage induction machine, diagnosis, faults, verify the rotor bars.