

République Algérienne Démocratique et Populaire

**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la
Recherche Scientifique**

CENTRE UNIVERSITAIRE D'EL-OUED

INSTITUT DES SCIENCES ET TECHNOLOGIE

Mémoire de fin d'étude

Présenté pour l'obtention du diplôme de

LICENCE ACADEMIQUE

Domaine : Sciences de la Technique

Filière : génie électrique

Spécialité : control et diagnostic des systèmes électriques

Thème

**Etat de l'Art du Défaut de Cassure
de Barre des Machines Asynchrones**

Soutenu le 27 Juin 2009

Proposé par :

M. BESSOUS Nouredine

Présenté par :

BOUSBIA Abdelsamad
ZEGHIB Abdelmalek

2008-2009

Remerciement

Avant tout on remercie Dieu le tout puissant qui nous a donné le
Courage la patience, l'aide et la volonté de réaliser ce modeste travail.

Nous tenons à remercier vivement l'encadreur Mr : **BESSOUS NOUREDDINE**
qui n'a pas ménagé un grand effort afin de nous permettre de mener à bien le
présent travail et à qui nous exprimons notre gratitude et notre respect.

Nous remercions aux enseignants du département d'électrotechnique.

Nous remercions très vivement **Dr. BEN ATTOUSS** pour son aide.

LISTE DES SYMBOLES

Les indices 's' et 'r' réfèrent respectivement aux grandeurs statoriques et rotoriques.

a, b, c	Trois phases du stator.
B	Induction magnétique.
F_{mm}	Force magnétomotrice du circuit magnétique -ab-.
Ψ_{ab}	Flux créée par " a " dans " b "
H	Champ magnétique.
g	Glissement.
μ_0	Perméabilité du vide.
θ	angle électrique décrivant une position dans l'espace.
N_s	Nombre d'encoches statoriques.
L_{sp}	L'inductance de magnétisation
L_{sf}	L'inductance de fuit
L_{sa}	L'inductance totale (propre) de la phase a
L_{rp}	l'inductance principale d'une maille rotorique
f_{cb}	Fréquence supplémentaire dans le courant d'une phase statorique à cause de cassure de barre.
f_s	Fréquence d'alimentation.
L_s	L'inductance propre d'une phase statorique.
L_r	L'inductance propre d'une phase rotoriques.
M_s	L'inductance mutuelle d'une phase statorique.
M_r	L'inductance mutuelle d'une phase rotoriques .
L_{sr}	Inductance mutuelle entre une phase statorique et une maille rotorique.

PARAMETRES DU MOTEUR UTILISE

L'ANNEXE -A-

Puissance	3KW
Nombre de paire de pôle	2
Nombre d'encoches statoriques	36
Nombre de barres rotoriques	28
Epaisseur de l'entrefer	0.5 mm
Rayon moyen de l'entrefer	50×10^{-3} m
Nombre de spires en série par phase	360
Longueur de la machine	0.12 m
Moment d'inertie	0.052 Kg.m^2
Résistance d'une phase statorique	6Ω
Inductance de fuite d'une phase statorique	0.0129 H
Résistance d'une barre rotorique	$1.93 \times 10^{-4} \Omega$
Inductance de fuite d'une barre rotorique	0.603×10^{-6} H
Résistance d'un segment d'anneau de court-circuit	$1.23 \times 10^{-6} \Omega$
Inductance de fuite d'un segment d'anneau de court-circuit	2×10^{-9} H

L'ANNEXE -B-

Puissance	1.1KW
Nombre de paire de pôle	2
Nombre d'encoches statoriques	24
Nombre de barres rotoriques	22

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE.....	1
Chapitre I : étude du moteur asynchrone et ses défauts.....	2
I.1. Introduction.....	3
I.2. Constitution de la machine asynchrone.....	3
I.2.1. le stator	4
I.2.2. le rotor.....	5
I.2.2.1. le rotor à cage d'ecureil.....	5
I.2.2.2. le rotor bobiné.....	7
I.2.3. les organes mécaniques.....	7
I.3. Description des défauts (causes, effets).....	8
I.3.1. Causes des défaillance.....	8
I.3.2. Les différents défauts.....	9
I.3.2.1. Les cassures de barres et de portions d'anneaux de court-circuit.....	10
I.3.2.2. Les courts-circuits internes.....	10
I.3.2.3. Les décharges partielles.....	11
I.3.2.4. Dissymétrie du rotor (excentricité.....	11
I.3.2.5. Défauts de roulement à billes.....	12
I.3.3. Etudes statistiques	12
I.3.4. L'effet des défauts sur les paramètres de la machine.....	12
I.3.4.1. L'effet de cassures de barres.....	12
I.3.4.2. L'effet de cassures d'une portion d'anneau de court-circuit.....	13
I.3.4.3. L'effet d'un court-circuit dans une phase.....	13
I.4. Les méthodes de détection des défaut.....	15
I.4.1. Analyse du couple électromagnétique.....	15
I.4.2. Analyse des flux.....	15
I.4.3. Analyse des signaux vibratoires.....	15
I.4.4. Détection des défauts par analyse des courants statoriques.....	16
I.5. Conclusion.....	16

Chapitre II : modèle multi – enroulements de la machine asynchrone	17
II.1. Introduction	18
II.2. Introduction à la simulation a partir d'une rappelle de quelques modèles applicables à la machine asynchrone	19
II.2.1. Modèle triphasée / triphasée (abc)	20
II.2.1.1. Mise en équation du modèle de la MAS	20
II.2.1.2. Equation électrique	20
II.2.1.3. Equation magnétique	21
II.2.1.4. Equation mécanique	22
II.2.2. Modèle de PARK	23
II.2.2.1. Choix du référentiel	24
II.2.2.2. Référentielle lié au stator	25
II.2.2.3. Référentielle fixé par rapport au rotor	26
II.2.2.4. Référentielle fixé par rapport au champ tournant	26
II.3. modèle multi-enroulement de la machine asynchrone	27
II.3.1. Mise en équation	28
II.3.1.1. Equation des tensions statoriques	28
II.3.1.2. Equations des tensions rotoriques	30
II.3.1.3. Equation mécanique	32
II.4. Calcul des inductances	33
II.4.1. Inductances statoriques	33
II.4.2. Inductances rotoriques	34
II.4.3. Inductance mutuelle stator – rotor	36
II.5. Résultats de la simulation du moteur asynchrone	37
II.6. Conclusion	40
Chapitre III : Application au défaut de cassure de barre simulation	41
III.1. Introduction	42
III.2. Résultats des Simulations	42
III.3. Conclusion	46
CONCLUSION GENERALE	48

INTRODUCTION GÉNÉRALE

La machine asynchrone occupe maintenant une grande place dans les applications industrielles, elle représente jusqu'à 80% des machines utilisées dans les domaines, on la rencontre dans les endroits les plus divers de l'éolienne à des applications militaires, dans la propulsion électrique des véhicules, de tramway et de train de grande vitesse, voire même de bateaux de croisières.

Cette large utilisation des moteurs à induction est due aux différents avantages qu'il offre, comme sa qualité de robustesse, la quasi-absence d'entretien, l'avantage d'être alimentée directement par le réseau triphasé, son prix d'achat est moins élevée à puissance donnée par rapport à la machine à courant continu et la machine synchrone, aussi grâce au progrès de l'électronique il est utilisé dans les applications nécessitent une vitesse variable, en faisant appel à des commandes de type scalaire ou vectoriel. Ses machines sont sujet à de grandes perturbations dues à plusieurs contraintes de différentes natures (thermique, électrique, mécanique et d'environnement), de ce fait, on assiste à un vieillissement prématuré du moteur asynchrone, il devient donc plus sujet à être défaillant, l'accumulation de ces contraintes provoque des défauts dans les différentes parties du moteur.

La détection des défauts à leur premier stade (maintenance prédictive) est devenue une nécessité majeure afin d'éviter la défaillance totale des machines électriques, il est aussi important de savoir qu'un défaut non traité peut entraîner des dégradations encore plus importantes.

De nombreux travaux ont été consacrés à ce nouveau type de détection qui utilise différentes techniques de diagnostic préventif, la plus part de ces techniques utilisent les grandeurs mécaniques (couple, vitesse, vibrations, bruit, etc.) qui demandent l'introduction de capteurs au niveau de la machine, ce qui exige la conception d'une machine spéciale et coûteuse.

Dans notre étude nous avons opté le défaut de cassure de barre, ce qu'on a fait une synthèse des informations pour ces genres de défauts, pour cela notre travail est basé sur le mémoire de la fin d'études de l'année universitaire 2007/2008 qui a été encadré par notre encadreur [BOU08], et en premier temps nous avons fait une synthèse bibliographique sur la MAS, et les différentes techniques utilisées pour détecter les différents défauts.

Le deuxième chapitre est consacré à la présentation des modèles de la machine asynchrone pour la simulation des ruptures de barres.

Dans le troisième chapitre et afin d'expliquer les effets des cassures de barres sur le couple, la vitesse et le courant statorique, une vérification précise du défaut rotorique sera présentée.

I.1. Introduction.

De multiples défaillances peuvent apparaître dans la machine asynchrone; elles peuvent être prévisibles ou intempestives, mécaniques, électriques ou magnétiques, et leurs causes sont très nombreuses.

Les défauts dans les entraînements électriques se répartissent en deux catégories : les défauts qui se produisent dans la machine électrique (défauts des roulements, inclinaison de l'axe) et ceux qui se produisent dans la chaîne d'entraînement à l'extérieur de la machine électrique (défauts dans la chaîne d'entraînement électrique à vitesse variable). Notre étude est restreinte aux problèmes des défauts de cassure des barres qui apparaissent dans la machine asynchrone [CRI00].

I.2. Constitution de la machine asynchrone.

La machine asynchrone, souvent appelée moteur à induction comprend un stator et un rotor, constitués de tôles d'acier au silicium et comportant des encoches dans lesquelles on place les enroulements. Le stator est fixe ; on y trouve les enroulements reliés à la source. Le rotor est monté sur un axe de rotation. Selon que les enroulements du rotor sont accessibles de l'extérieure ou sont fermés sur eux mêmes en permanence, on définit deux types de rotor : bobiné ou a cage d'écureuil.

Dans ce chapitre, nous allons considérer le cas d'une machine asynchrone a cage d'écureuil.

Toutefois, nous admettrons que sa structure est électriquement équivalente a celle d'un rotor bobine dont les enroulements sont en court-circuit. [BAC 02]

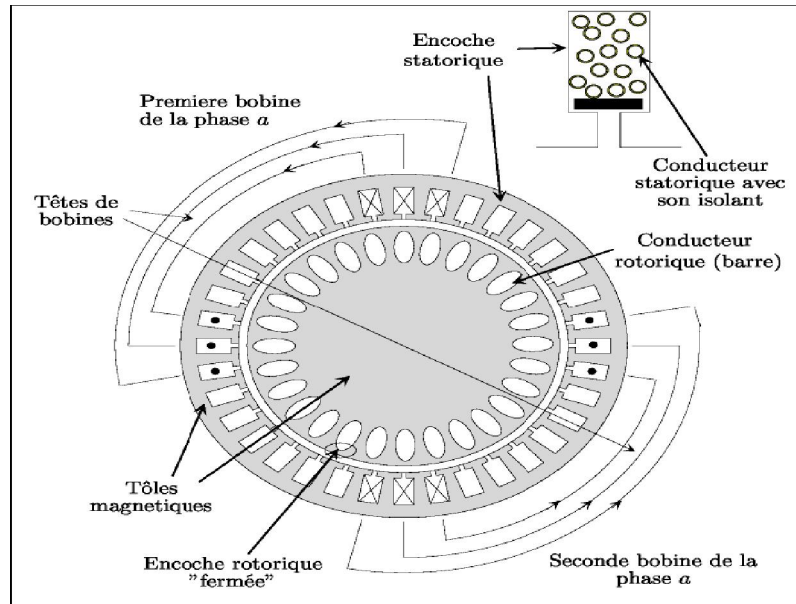


Figure.1. Coupe schématique de la machine asynchrone à cage [SCH99].

I.2.1. Le stator.

Les différents types de moteurs asynchrones ne se distinguent que par le rotor ; dans tous les cas le stator reste, au moins dans son principe, le même. Il est constitué d'un enroulement bobiné réparti dans les encoches du circuit magnétique statorique. Ce circuit magnétique est constitué d'un empilage de tôles dans lesquelles sont découpées des encoches parallèles à l'axe de la machine, nous représentons sur la figure (I.2) le schéma d'un circuit statorique. [ABD02]

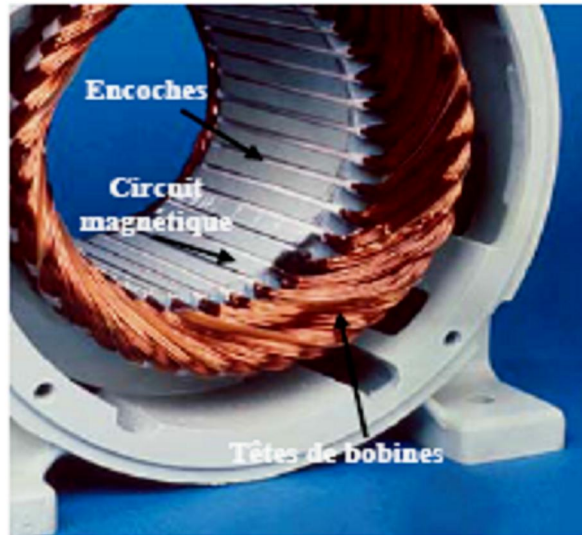


Figure I.2. Vue schématique en perspective du stator (circuit magnétique, conducteurs d'encoches, tête de bobines).

I.2.2. Le rotor.

Le rotor n'est lié électriquement à aucune source d'énergie ce qui simplifie beaucoup sa construction. Il 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 de plus gros moteurs, chaque laminage est constitué de plusieurs sections montées sur un noyau. Les enroulements rotoriques sont toujours en court-circuit, et ces derniers sont trouvés en deux types, rotor à cage et rotor bobiné.

I.2.2.1. Le rotor en cage d'écureuil.

La partie électrique du rotor est constituée des barres conductrices en cuivre placées dans les encoches rotoriques. Elles sont mises en court circuit permanent par deux anneaux de court-circuit.

Un autre procédé de fabrication consiste à mouler le circuit électrique rotorique en coulant de l'aluminium dans les encoches fermées aménagées dans le circuit magnétique. L'intérêt essentiel de ce procédé est la grande robustesse du rotor, une fabrication aisée et un faible coût de réalisation pour des machines sans pratiquement de moins d'entretien. (Figure I.3). [SCH 99]

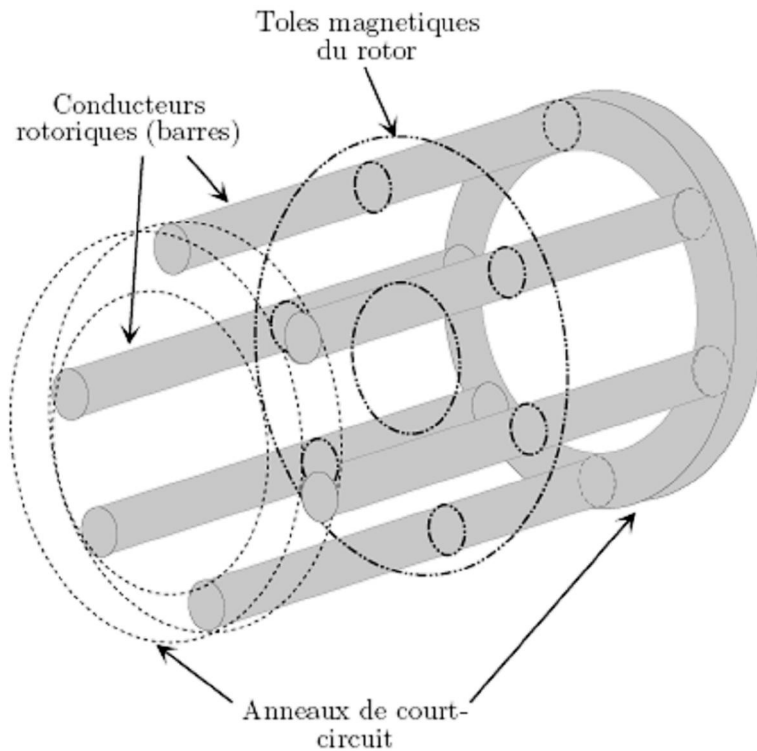


Figure I.3. Vue schématique en perspective du rotor (tôles magnétique, conducteurs d'encoches (barres) et anneaux de court-circuit) [SCH99].

Dans le cas des rotors à cage d'écureuil, les encoches peuvent être semi-ouvertes ou fermées. Les enroulements sont constitués de barres court-circuitées par un anneau terminal placé à chaque extrémité du rotor. Les conducteurs sont généralement réalisés par coulage d'un alliage d'aluminium, ou par des barres massives de cuivre où, à l'occasion, en laiton préformées et frettées dans les tôles du rotor. Il n'y a généralement pas, ou très peu, d'isolation entre les barres rotoriques et les tôles magnétiques. Leur résistance est suffisamment faible pour que les courants ne circulent pas dans les tôles, sauf lorsqu'il y a une rupture de barre [BAC02].

I.2.2.2. Le rotor bobiné.

Le rotor est bobiné de manière à obtenir aussi p pair de pôles. Mais à la différence du rotor à cage, le rotor est mis en court-circuit par l'extérieur à travers de trois bornes liées électriquement par des contacts glissants appelés bagues réalisées en laiton sur lesquelles s'appliquent des balais de graphite.

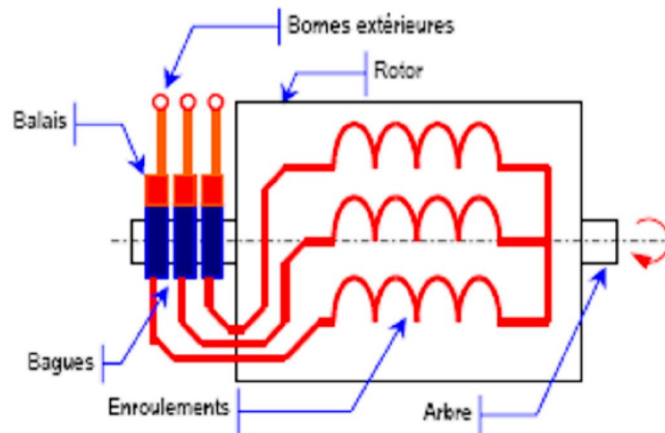


Figure I.4. Constitution du rotor bobiné.

I.2.3. Les organes mécaniques.

La carcasse sert de support, elle joue le rôle d'enveloppe et assure la protection contre l'environnement extérieur.

L'arbre est un organe de transmission. Il comprend une partie centrale qui sert de support au corps du rotor et un bout d'arbre sur lequel est fixé un demi accouplement. Il est généralement constitué en acier moulé ou forgé, son dimensionnement est fonction des efforts de flexion (force centrifuge qui s'exerce sur lui, attraction magnétique radiale, etc.), des efforts radiaux et tangentiels dus aux forces centrifuges, des efforts de torsion (couple électromagnétique transmis en régime permanent, transitoire). Il est supporté par un ou plusieurs paliers. Ces paliers soutiennent le rotor et assurent la libre rotation. Le second palier est libre pour assurer les dilatations thermiques de l'arbre. Une isolation électrique de l'un des paliers assure l'élimination des courants dans l'arbre dû aux dissymétries des réluctances du circuit magnétique. Ils sont généralement à roulements pour les machines de petite et moyenne puissance. [CAS 03]

I.3. Description des défauts (causes, effets)

I.3.1. Causes des défaillances.

Les causes des défauts sont multiples. Elles peuvent être classées en trois groupes [BOU 01]:

- **Les initiateurs de défauts** : surchauffe du moteur, défaut électrique (court-circuit), problèmes mécaniques, rupture de fixations, problème d'isolation, survolage d'alimentation
- **Amplification de défauts** : surcharge fréquente, vibrations mécaniques, environnement humide, alimentation perturbée (instabilité de la tension ou de la fréquence), échauffement permanent, mauvais graissage, vieillissement etc.
- **Les défauts de fabrication** : défauts de fabrication, défektivité des composants, protections inadaptées, mauvais dimensionnement de la machine etc.

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

Pour le stator, ces efforts peuvent être groupés comme suit :

- **Effets thermiques**
 - vieillissement
 - surcharge
 - cycle de démarrage fréquent
 - coupures
- **Effets Mécaniques**
 - mouvement de enroulement
 - excentricité du rotor
- **Effets électriques**
 - diélectrique
 - surtension
 - effet de couronne, effet de peau

Pour le rotor ces effets sont des conséquences des contraintes et des conditions suivantes :

- Couple de fonctionnement.

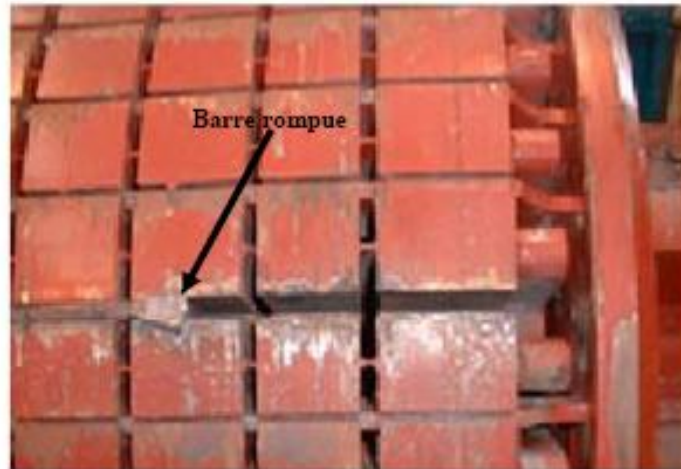
- Force dynamique non équilibrée.
- Vibration de torsion et des couples transitoires.
- Forces résiduelles du bâti, de la soudure, de l'usinage, et des fils (radial, axial, autre).
- Force magnétique provoquée par le flux de fuite d'encoche.
- Force magnétique provoquée par l'excentricité de l'entrefer.
- Force de centrifuge.
- Effort thermique provoqué par l'échauffement de l'anneau du court-circuit.
- Effort thermique provoqué par la différence de la température dans la barre pendant le démarrage (effet de peau).

I.3.2. Les différents défauts.

Des études statistiques nous révèlent que certaines pannes sont plus fréquentes que d'autres, ce qui nous amène à axer notre étude vers les types de défauts les plus courants. Pannes majeures, nous présentons les suivantes :

I.3.2.1. Les cassures de barres et de portions d'anneaux de court-circuit.

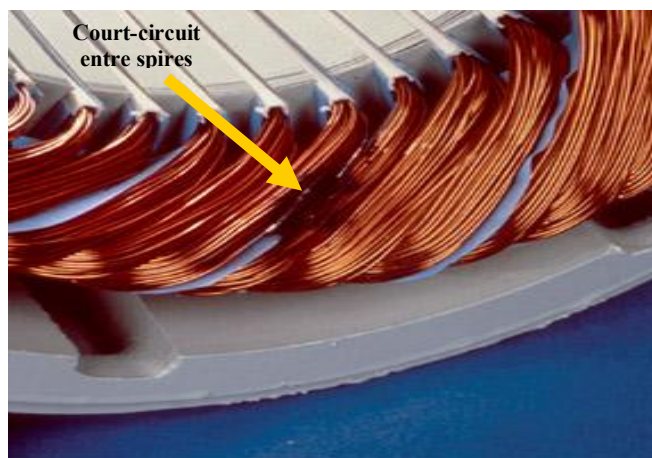
La détection de ces défaillances est rendue difficile par le fait que lors de leur apparition, la machine continue de fonctionner. Ces défauts ont par ailleurs un effet cumulatif. Le courant qui conduit dans une barre cassée, par exemple, se répartit sur les barres adjacentes. Ces barres sont alors traversées par plusieurs courants, ce qui conduit à leurs ruptures, et ainsi de suite jusqu'à la rupture d'un nombre suffisamment important de barres pour provoquer l'arrêt de la machine. Elles provoquent aussi une dissymétrie de répartition de courants au rotor et des à-coups de couples, ceci va générer des vibrations et l'apparition de défauts mécaniques [MLI99].



FigureI.5. Rotor à cage avec rupture d'une barre

I.3.2.2. Les courts-circuits internes.

Un court-circuit entre phases provoquerait un arrêt net de la machine. Cependant, un court-circuit au bobinage près du neutre ou entre spires n'a pas d'effet aussi radical. Il conduit à un déséquilibre de phases, ce qui provoque une répercussion directe sur le couple. Ce type de défauts perturbe également de manière sensible les commandes développées sur la base du modèle de Park [1] (Hypothèse d'un modèle équilibré).



FigureI.6. Court circuit entre spires statoriques.

I.3.2.3. Les décharges partielles.

Ce phénomène naturel dû aux décharges dans les isolants entre conducteurs ou entre conducteurs et la masse s'amplifie avec le vieillissement des isolants. Il est pratiquement imperceptible dans les isolants neufs par les moyens de mesures classiques car son effet n'est pas discernable par rapport aux bruits de mesure. Sa présence précède l'apparition des courts-circuits entre phases ou entre phase et masse lorsque ces décharges partielles ont suffisamment détérioré les isolants [DID 04].

I.3.2.4. Dissymétrie du rotor (excentricité)

Celui-ci provoque la variation de l'entrefer dans le moteur, une répartition non homogène des courants dans le rotor et le déséquilibre des courants statoriques. Le déséquilibre des efforts sur les barres génère un couple global non constant [OND06]. Quand l'excentricité devient grande, les forces radiales résultantes causées par le stator avec la bande de frottement du rotor, ce qui conduit à des dommages du stator et du rotor.

La géométrie du rotor peut présenter des dissymétries d'ordre naturel. Celles-ci relèvent de trois catégories d'excentricité de l'entrefer [DID 04] ; à savoir :

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

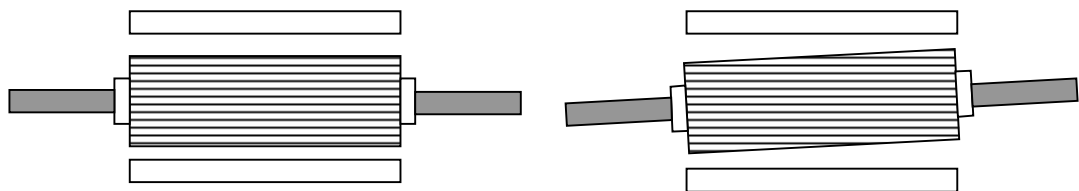


Figure I.7. Excentricité statique et dynamique.

I.3.2.5. Défaits de roulement à billes.

Les défauts de roulement se manifestent comme de défauts d'asymétrie au rotor qui sont usuellement rangés dans la catégorie des défauts relatifs à l'excentricité. Un défaut de roulement se manifeste par la répartition continue du contact défectueux avec la cage de roulement extérieur comme intérieur.

I.3.3. Etudes statistiques.

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

60% défauts dans le stator.

22% défauts dans le rotor.

18% autres défauts.

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

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

Les contraintes mécaniques sont les plus grandes pour ce type de machines ; ce qui explique la domination des défauts de roulements sur les défauts électriques.

I.4. L'effet des défauts sur les paramètres de la machine.

Un défaut au rotor engendre un déséquilibre des courants dans la cage d'écureuil ainsi que dans ses paramètres physiques. L'apparition d'un défaut dans le rotor provoque un déséquilibre dans les phases rotoriques. Alors que pour une machine saine ces trois paramètres restent toujours égaux quelque soit le point de fonctionnement.

I.4.1. L'effet de cassures de barres.

La cassure de barres est un des défauts les plus fréquents au rotor. La détérioration des barres entraîne une augmentation de la résistance rotorique, diminution de la résistance statorique et réduction dans la valeur moyenne du couple électromagnétique et augmentation d'amplitude des oscillations. L'effet de la cassure de barres croît rapidement avec le nombre de

barres cassées. La grande amplitude des oscillations accélère la détérioration de la machine et des composants de la chaîne de traction.

Une asymétrie rotorique générée par la présence de barres rotoriques cassées produit des raies spectrales autour de la fréquence fondamentale f_s [MLI99] telles que :

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

I.4.2. L'effet de cassures d'une portion d'anneau de court-circuit.

La cassure de portion d'anneau de court-circuit est un défaut qui apparaît aussi fréquemment que la cassure de barres. En fait les cassures sont dues soit à des bulles de coulées ou aux dilatations différentielles entre les barres et les anneaux.

Les portions d'anneaux de court-circuit véhiculent des courants très importants par rapport ceux des barres rotoriques. De ce fait, ce la entraîne un mauvais fonctionnement (température, humidité .) une surcharge de couple et donc de courants tous entraîne la cassure des portions d'anneau de court-circuit.

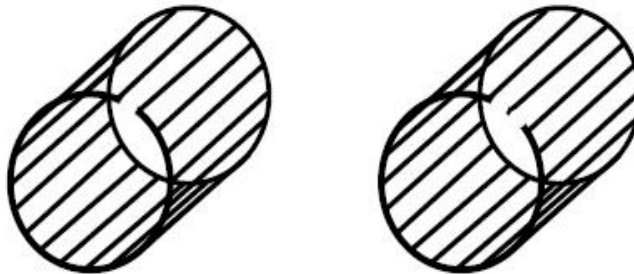


Figure I.8. Rupture d'une et deux portions adjacentes d'anneau de court-circuit.

I.4.3. L'effet d'un court-circuit dans une phase.

Un court-circuit entre spires de la même phase est un défaut assez fréquent. Il peut se manifester soit entre les spires au milieu du bobinage ou bien entre une spire et le neutre.

- **Court-circuit spire-neutre :** Le courant dans la phase concernée a une amplitude supérieure par rapport au courant des autres phases. Toutefois, les courants qui parcourent ces phases sont amplifiés par rapport au cas de la machine saine. Plus important est le nombre de spires en court-circuit, plus forte est l'augmentation des courants.

De plus le facteur de puissance diminue avec l'augmentation de nombre de spires en court-circuit. Ce qui explique la modification des bobinages, qui implique une variation de

l'inductance propre de la phase affectée également par le défaut et affecte les autres par couplage magnétique.

- **Court-circuit au milieu de la phase** : le court-circuit entre spires loin du neutre augmente les courants dans les phases statoriques, dans les barres, et les portions d'anneaux du circuit rotorique.
- **Court-circuit entre phases différentes** : l'apparition d'un court-circuit proche de l'alimentation entre deux phases, induirait une des courants très forts conduisant à la fusion des conducteurs. Cependant, un court-circuit proche du neutre engendre un déséquilibre sans provoquer la fusion des conducteurs. De plus, les courants des barres sont amplifiés lors de l'apparition du défaut.

Le Tableau.(I.1) résume la variation des paramètres du modèle du moteur asynchrone à cage d'écureuil selon les défauts. Dans le cas d'un défaut, il y a une modification de tous les paramètres. Un court-circuit spire-spire se produit dans la phase *a* par exemple, *Rsa* et *Lsa* diminueront tandis que *Rsb* de *Lsb* et *Rsc* *Lcs* augmentera. C'est l'information appropriée pour la localisation de défaut [BES 07].

Tableau (I.1) : variation des paramètres de la machine en fonction du défaut.

Type de défaut	Paramètres du modèle (d-q)				Paramètres du modèle triphasé	
	<i>Rr</i>	<i>Rs</i>	<i>Lr</i>	<i>Ls</i>	<i>Rsa, Rsb, Rcs, Lsa, Lsb, Lsc, Rr, Lr</i>	
Cassure des barres et des portions d'anneau de court-circuit.	↗	↘	↘	↘		
Court-circuit entre spires d'une phase statorique.	↘	↗	↘	↘	<i>Rsa, Lsa</i>	↘
					<i>Rsb, Rsc, Lsb, Lsc</i>	↗

I.4. Les méthodes de détection des défaut. I.4.1. Analyse du couple électromagnétique.

Certains défauts mécaniques peuvent être détectés par la recherche d'harmoniques dans le spectre du couple électromagnétique mesuré, résultant d'une interaction entre le flux et le courant.

Ce couple peut être reconstruit, soit à partir de deux ou des trois courants statoriques, soient en utilisant un modèle physique de la machine.

L'utilisation de ce signal peut s'avérer un bon choix pour la détection des défauts de charge. En effet, les variations du couple de charge vont induire des variations du flux et du courant dans la machine. De même la torsion de l'arbre, entraîne l'apparition d'harmoniques dans le spectre du couple.

I.4.2. Analyse des flux.

Tout déséquilibre quel qu'il soit, magnétique, mécanique, électrique ou bien encore électromagnétique, situé au rotor ou au stator, peut affecter la conversion électromécanique et la répartition de champ dans et hors de la machine. Des études ont donc été menées pour extraire de la mesure des flux d'entrefer, axial ou de fuite des signatures caractéristiques de certains défauts. Pour cela, des bobines exploratrices sont placées à l'extérieur de la machine, parallèlement et perpendiculairement à l'axe du rotor.

I.4.3. Analyse des signaux vibratoires.

L'analyse des défaillances des moteurs électriques par les signaux vibratoires et acoustiques permet une détection de quasiment tous les défauts, notamment ceux mécaniques, pouvant se produire sur le processus. Cette analyse peut être réalisée à partir de capteurs, généralement des accéléromètres, placés sur les paliers dans les directions verticales, axiales et radiales.

I.4.4. Détection des défauts par analyse des courants statoriques.

La mesure des signaux puis leurs traitements dans le domaine fréquentiel ne peuvent servir, que si les composantes fréquentielles définies pour chaque défaut] sont connues. Il y a plusieurs techniques pour effectuer l'analyse des courants. La plus utilisée est de réaliser une analyse fréquentielle (FFT par exemple) directement sur les courants statoriques i_{sa} , i_{sb} ou i_{sc} . Cette méthode, connue sous le nom de MCSA, est largement employée depuis ces dernières années. Mais, bien qu'elle permette d'obtenir de bons résultats, elle présente quelques inconvénients. En effet, prenons un exemple ; la signature fréquentielle spécifique au défaut "barres cassées" est la forte modulation des harmoniques du courant par la fréquence de glissement. Dans cette analyse fréquentielle, il est préférable de faire une étude globale sur les courants car un défaut rotor est visible sur le spectre des trois courants de ligne. Mais faire une FFT sur chaque courant risque d'être pénalisante en temps de calcul. C'est pour cela que nous avons opté pour l'analyse spectrale de la combinaison des trois courants, réalisée à l'aide de la matrice de Fortescue (composantes symétriques) [BES 07].

I.5. Conclusion.

Dans ce chapitre on s'est concentré sur les constitutions de la machine asynchrone et aux quelques techniques de détection des défauts. Au vu de la diversité des défauts inhérent à la machine, les chercheurs de différents pays pour le diagnostic avaient consacré une quantité d'heure significative et d'énergie pour aboutir à la meilleure technique de diagnostic, et pour notre étude, on va mettre la lumière sur la méthode par analyse du courant statorique. Pour cela, le besoin d'un modèle mathématique ça sera obligatoire, ce dernier est le contenu de notre deuxième chapitre.

II.1. Introduction.

L'objectif de cette opération est la simulation comportementale des actionneurs électriques asynchrones dans le domaine temporel en tenant compte des défauts électriques qui modifient le comportement électromagnétique.

A partir des méthodes numériques développées, l'idée de base est de pouvoir simuler des défauts électriques dans une machine asynchrone (avec une variété des pannes au rotor ou au stator) afin d'obtenir des oscillogrammes (variables mesurables en fonction du temps) sur lesquels on peut analyser des signatures spectrales de ces défauts. Au delà de l'analyse temporelle des signaux issus des capteurs, l'analyse spectrale est plus riche d'enseignement, pour la détection et localisation des défauts électriques ou pour la maintenance prédictive.

Donc la modélisation des machines électriques est une étape aussi bien pour le concepteur. Elle permet l'observation et l'analyse des différentes évolutions de ses grandeurs électromécaniques d'une part et d'autre part pour l'élaboration au diagnostic. Un modèle basé sur les équations de circuit est en général suffisant pour faire la synthèse de diagnostic. La simplicité de la formulation algébrique conduit à des temps de simulation courts. En outre, la précision de la modélisation est acceptable.

Dans ce chapitre, nous présenterons la modélisation de la machine asynchrone à induction à cage en modèle *multi-enroulement* adéquat et dédié au traitement et détections des différentes pannes, mais avant sa présentation, nous indiquerons le modèle triphasé/triphasé (en abc) et le modèle de PARK. L'élaboration d'un modèle de la machine asynchrone triphasé nous permettra de simuler la machine à l'aide du logiciel (*MATLAB/SIMULINK*).

II.2. Introduction à la simulation à partir d'une rappelle de quelques modèles applicables à la machine asynchrone.

II.2.1. Modèle triphasée / triphasée (abc).

La machine asynchrone est constituée de trois enroulements logés symétriquement dans les encoches du stator et de la cage conductrice intégrée au rotor. Ce dernier est assimilable à trois enroulements identiques parfaitement symétriques et en court-circuit.

La modélisation de Park est construite à partir des équations électriques de la machine. Les hypothèses généralement admises dans le modèle de la machine asynchrone sont :

- ◇ La parfaite symétrie de la machine.
- ◇ L'absence de saturation et de pertes dans le circuit magnétique (l'hystérésis et les courants de Foucault sont négligeables)
- ◇ La répartition spatiale sinusoïdale des différents champs magnétique le long de l'entrefer. (Son entrefer est constant).
- ◇ L'équivalence du rotor en court-circuit à un enroulement triphasé monté en étoile.
- ◇ L'alimentation est réalisée par un système de tensions triphasées symétriques.
- ◇ Les résistances des enroulements ne varient pas avec la température et on néglige l'effet de peau. En raison de la simplicité de la formulation algébrique.

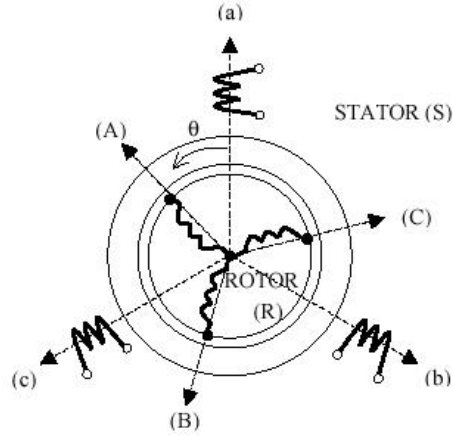
Ce type d'approches est bien, adapté à l'élaboration d'algorithmes de commande.

Ainsi parmi les conséquences importantes de ces hypothèses on peut citer :

- L'additivité de flux;
- La constance des inductances propres;
- La constance des résistances statoriques et rotoriques;
- La loi de variation sinusoïdale des inductances mutuelle entre les enroulements statoriques et rotoriques en fonction de l'angle de leurs axes magnétiques.

II.2.1.1. Mise en équation du modèle de la MAS .

La représentation schématique de la machine asynchrone dans l'espace électrique est donnée sur la figure (II-1),



FigureII.1. Machine asynchrone modélisée - définition des repérés stator et rotor.

Dans le cadre des hypothèse simplificatrices et pour une machine équilibrée les équations de la machine s'écrivent comme suit :

II.2.1.2. Equation électrique.

Les équations de tensions des trois phases statoriques et des trois phases rotoriques sont :

$$\begin{cases} V_{sa} = R_s I_{sa} + \frac{d}{dt} \Phi_{sa} \\ V_{sb} = R_s I_{sb} + \frac{d}{dt} \Phi_{sb} \\ V_{sc} = R_s I_{sc} + \frac{d}{dt} \Phi_{sc} \end{cases} \quad (II.1)$$

$$\begin{cases} V_{ra} = 0 = R_r I_{ra} + \frac{d}{dt} \Phi_{ra} \\ V_{rb} = 0 = R_r I_{rb} + \frac{d}{dt} \Phi_{rb} \\ V_{rc} = 0 = R_r I_{rc} + \frac{d}{dt} \Phi_{rc} \end{cases} \quad (\text{II.2})$$

En désignant par :

- V_{sa}, V_{sb}, V_{sc} : les tensions appliquées aux trois phases statoriques;
- I_{sa}, I_{sb}, I_{sc} : les courants qui traversent celles-ci;
- $\Phi_{sa}, \Phi_{sb}, \Phi_{sc}$: les flux totaux à travers ces enroulements;
- R_s : leur résistance.

Les équations (II.1) et (II.2) peuvent s'écrire sous forme matricielle :

❖ Pour le stator :

$$[V_s] = [R_s][I_s] + \frac{d}{dt} [\Phi_s] \quad (\text{II.3})$$

❖ Pour le rotor :

$$[V_r] = 0 = [R_r][I_r] + \frac{d}{dt} [\Phi_r] \quad (\text{II.4})$$

II.2.1.3. Equation magnétique.

Les relations entre flux et courants s'écrivent comme suit :

$$\begin{aligned} \Phi_{as} &= L_s I_{as} + M_s I_{bs} + M_s I_{cs} + M_{sr} I_{ra} + M_{sr} I_{rb} + M_{sr} I_{rc} \\ \Phi_{bs} &= M_s I_{as} + L_s I_{bs} + M_s I_{cs} + M_{sr} I_{ra} + M_{sr} I_{rb} + M_{sr} I_{rc} \\ \Phi_{cs} &= M_s I_{as} + M_s I_{bs} + L_s I_{cs} + M_{sr} I_{ra} + M_{sr} I_{rb} + M_{sr} I_{rc} \end{aligned} \quad (\text{II.5})$$

$$\begin{aligned} \Phi_{ra} &= L_r I_{ra} + M_r I_{rb} + M_r I_{rc} + M_{rs} I_{as} + M_{rs} I_{bs} + M_{rs} I_{cs} \\ \Phi_{rb} &= M_r I_{ra} + L_r I_{rb} + M_r I_{rc} + M_{rs} I_{as} + M_{rs} I_{bs} + M_{rs} I_{cs} \\ \Phi_{rc} &= M_r I_{ra} + M_r I_{rb} + L_r I_{rc} + M_{rs} I_{as} + M_{rs} I_{bs} + M_{rs} I_{cs} \end{aligned} \quad (\text{II.6})$$

Sous forme matricielle on a :

$$[\Phi_s] = [L_{SS}] [I_s] + [L_{sr}] [I_r] \quad (\text{II.7})$$

$$[\Phi_r] = [L_{rr}] [I_r] + [L_{rs}] [I_s] \quad (\text{II.8})$$

avec :

$$[L_{SS}] = \begin{bmatrix} L_s & M_s & M_s \\ M_s & L_s & M_s \\ M_s & M_s & L_s \end{bmatrix}, \quad [L_{rr}] = \begin{bmatrix} L_r & M_r & M_r \\ M_r & L_r & M_r \\ M_r & M_r & L_r \end{bmatrix}$$

$$[L_{sr}] = M_{sr} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) \end{bmatrix}, \quad [L_{rs}] = [L_{sr}]^T$$

telle que :

- L_s : L'inductance propre d'une phase statorique;
- L_r : L'inductance propre d'une phase rotorique;
- M_s : L'inductance mutuelle entre phases statoriques;
- M_r : L'inductance mutuelle entre phases rotoriques;

En désignant par L_{sr} la mutuelle inductance entre phases statoriques et rotoriques et par M_{sr} sa valeur maximale.

II.2.1.4. Equation mécanique.

Le couple électromagnétique est donné par la dérivée partielle de la coénergie par rapport à l'angle mécanique entre le rotor et le stator. Pour simuler la machine, en plus des équations électriques il faut ajouter l'équation du mouvement du système.

Après développement on aura :

$$C_{em} = \frac{1}{2} [i_s]^t \frac{\partial}{\partial \theta} [M_{sr}] [i_r] \quad (\text{II.9})$$

$$\begin{aligned}
C_{em} = & \left[i_{sa} \sin \omega t + i_{sb} \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right) + i_{sc} \sin \left(\omega t + \frac{2\pi}{3} \right) \right] \cdot i_{ra} + \\
& + \left[i_{sa} \sin \left(\omega t + \frac{2\pi}{3} \right) + i_{sb} \sin \omega t + i_{sc} \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right) \right] \cdot i_{rb} + \\
& + \left[i_{sa} \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right) + i_{sb} \sin \left(\omega t + \frac{2\pi}{3} \right) + i_{sc} \sin \omega t \right] \cdot i_{rc}
\end{aligned} \tag{II.10}$$

Il sera accompagné des équations mécaniques suivantes :

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J} (C_{em} - C_r) \tag{II.11}$$

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega_r \tag{II.12}$$

Où ω_r est la vitesse rotorique.

II.2.2. Modèle de PARK.

Les équations précédentes permettent la modélisation de la machine dans le plan "a b c". Elles peuvent être implantées dans un ordinateur. Par contre, vu la complexité (36 termes pour l'énergie magnétique) de ces équations non linéaires et multi-variables, il est très difficile d'en tirer des stratégies de commande. Pour cela on utilise la transformation de Park qui permettra de rendre simple à les étudier.

Le modèle de PARK donc est basé sur la transformation des enroulements de phase a, b, c de la machine originelle en des enroulements disposés selon deux axes appelés d et q et équivalents du point de vue électrique et magnétique.

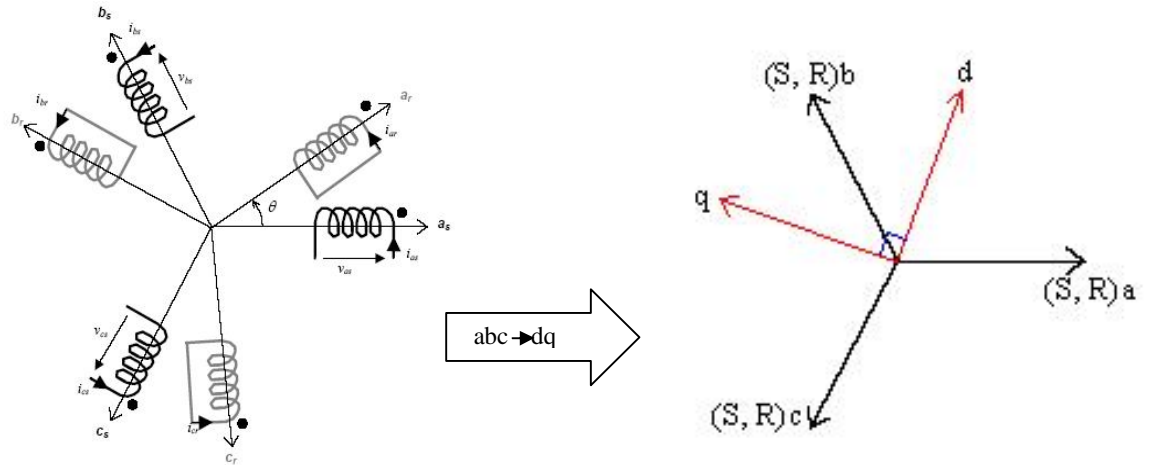


Figure II.2. Transformation des repères abc en dq (modèle de PARK).

La matrice $P(\theta)$ (de PARK) est donnée sous la forme suivante :

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \cos \theta & -\sin \theta \\ \frac{1}{\sqrt{2}} \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \\ \frac{1}{\sqrt{2}} \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \end{pmatrix} \quad (\text{II.13})$$

L'angle θ dans la matrice $[P(\)]$ prend la valeur (s) pour les grandeurs statoriques et la valeur (s - r) pour les grandeurs rotoriques.

II.2.2.1. Choix du référentiel .

Pour étudier la théorie des processus transitoires des machines on utilise trois systèmes de coordonnées qui sont des cas particuliers du système d'axes (d, q),

$$\begin{bmatrix} Vsd \\ Vsq \end{bmatrix} = P(\theta) \begin{bmatrix} Vsa \\ Vsb \\ Vsc \end{bmatrix} \quad (\text{II.14}),$$

$$\begin{bmatrix} Isd \\ Isq \end{bmatrix} = P(\theta) \begin{bmatrix} Isa \\ Isb \\ Isc \end{bmatrix} \quad (\text{II.15})$$

La machine asynchrone à cage d'écuriel peut être modélisée dans un repère diphasé "d, q" par le système d'équations (II.16) :

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s I_{sd} + \frac{d}{dt} \Phi_{sd} - \omega_s \Phi_{sq} \\ V_{sq} = R_s I_{sq} + \frac{d}{dt} \Phi_{sq} + \omega_s \Phi_{sd} \\ 0 = R_r I_{rd} + \frac{d}{dt} \Phi_{rd} - (\omega_s - \omega) \Phi_{rq} \\ 0 = R_r I_{rq} + \frac{d}{dt} \Phi_{rq} + (\omega_s - \omega) \Phi_{rd} \end{cases} \quad (II.16)$$

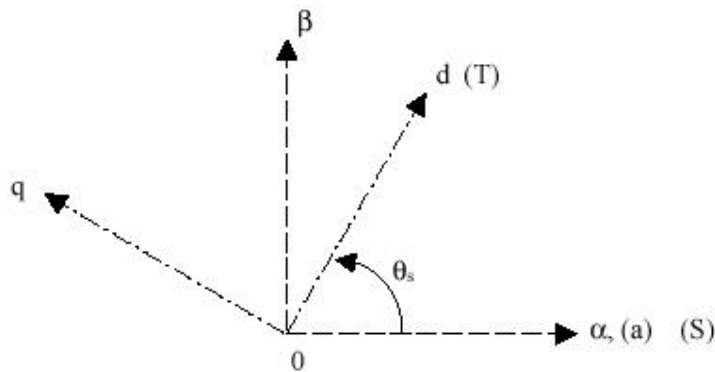


Figure II.3. Position du système d'axe (d,q).

II.2.2.2. Référentielle lié au stator.

$$\theta_s = 0 \quad ; \quad \theta_r = -\theta \quad \Rightarrow \quad \frac{d\theta_s}{dt} = 0 \quad ; \quad \frac{d\theta_r}{dt} = -\omega$$

Le système d'axes (α, β) : système immobile par rapport au stator, ce système possède des tensions et des courants réels, et on peut être utilisé pour étudier les régimes de démarrage et de freinage des machines à courant alternatif, avec le branchement de résistances supplémentaires au niveau du circuit du stator, Il se traduit par les conditions :

$$\theta_s = 0 \Leftrightarrow \begin{cases} d \Leftrightarrow \alpha \\ q \Leftrightarrow \beta \end{cases}$$

Ce référentielle sera choisie en vue d'étudier les variations des grandeurs.

II.2.2.3. Référentielle fixé par rapport au rotor.

$$\theta_r = 0 \quad ; \quad \theta_s = \theta \quad \Rightarrow \quad \frac{d\theta_r}{dt} = 0 \quad ; \quad \frac{d\theta_s}{dt} = \omega$$

Le système d'axes (x , y) : système immobiles par rapport au rotor, ce système peut être utilisé pour étudier les processus transitoires dans les machines synchrones et asynchrones aussi avec une connexion non symétrique des circuits rotoriques, il se traduit par les conditions :

$$\theta_s = \theta \Leftrightarrow \begin{cases} d \Leftrightarrow X \\ q \Leftrightarrow Y \end{cases}$$

II.2.2.4. Référentielle fixé par rapport au champ tournant.

$$\frac{d\theta_r}{dt} = g\omega \quad \text{et} \quad \frac{d\theta_s}{dt} = \omega$$

Le système d'axes (u, v) : Ce système tourne avec la vitesse du champ électromagnétique créée par les enroulements du stator, ce système d'axes est exploité spécialement dans la commande des machines alternatives. Il se traduit par les conditions :

$$\theta = \theta_s - \theta_r \Leftrightarrow \begin{cases} d \Leftrightarrow U \\ q \Leftrightarrow V \end{cases}$$

sachant que : $\omega_g = \omega_s - \omega$.

Ce référentiel est souvent utilisé dans l'étude de l'alimentation des moteurs asynchrones à fréquence variable.

L'expression du couple électromagnétique tiré à partir de la coénergie est donnée pour tous les repères ci-dessus par l'équation suivante :

$$C_{em} = p \cdot M \left(i_{rd} \cdot i_{sq} - i_{rq} \cdot i_{sd} \right) \quad (\text{II.17})$$

II.3. modèle multi-enroulement de la machine asynchrone.

Afin de représenter les barres du rotor, plusieurs méthodes peuvent être considérées par exemple :

- Méthode des éléments finis;
- Méthode des réseaux de perméance;
- Méthode des circuits électriques magnétiquement couplés.

Dans notre travail, nous utilisons la méthode des circuits électriques magnétiquement couplés pour simuler le fonctionnement de la machine asynchrone. Plusieurs travaux mettant en œuvre cette approche sont décrits dans la littérature [SCH99] et notamment [TOL96]. Le rotor est considéré comme un ensemble de mailles inter connectées entre elles, chacune formée par deux barres adjacentes et les portions d'anneaux qui les relient (figures II.4).

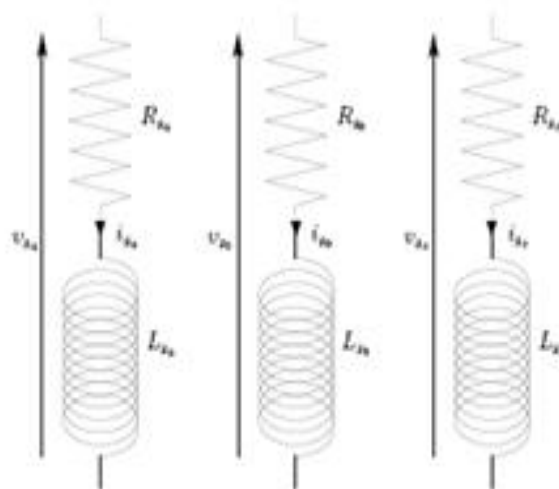
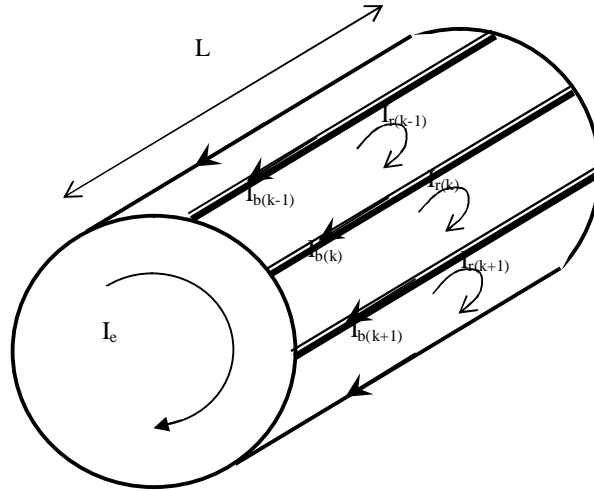


Figure II.4. Circuit équivalent du rotor



FigureII.5. Structure du rotor.

II.3.1. mise en équation.

II.3.1.1. Equation des tensions statoriques.

Les équations des tensions pour les trois enroulements du stator peuvent être écrites sous la forme suivante :

$$[V_s] = [R_s][I_s] + \frac{d[\Phi_s]}{dt} \tag{II.18}$$

où le flux statorique est donné par

$$[\Phi_s] = [L_s][I_s] + [L_{sr}][I_r] \tag{II.19}$$

Les vecteurs des tensions statoriques, des courants des phases statoriques et des courants des barres rotoriques sont respectivement données par les équations suivantes :

$$[V_s] = [V_{sa} \quad V_{sb} \quad V_{sc}]^T$$

$$[I_s] = [I_{sa} \quad I_{sb} \quad I_{sc}]^T \tag{II.20}$$

$$[I_r] = [I_{r1} \quad I_{r2} \quad I_{r3} \quad I_{r4} \dots I_{re}]^T$$

avec:

I_{ij} : les courant qui circulent dans la j^{eme} barres

I_{re} : les courant qui circulent dans l'anneau de court-circuit

$[R_s]$ est un matrice diagonale de 3×3 élément exprimée sous la forme suivante

$$[R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \quad (\text{II.21})$$

$[L_s]$ la matrice d'inductance statorique de 3×3 éléments exprimée sous la forme suivante :

$$[L_s] = \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} \\ L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.22})$$

où L_{ii} , L_{ij} représentent l'inductance propre de la i^{eme} phase et l'inductance mutuelle entre la i^{eme} et j^{eme} phase (i+j)

$[L_{sr}]$: est une matrice de $3 \times (n_b + 1)$ élément qui constituent les inductance mutuelles entre les phases statoriques. Elle est donnée par :

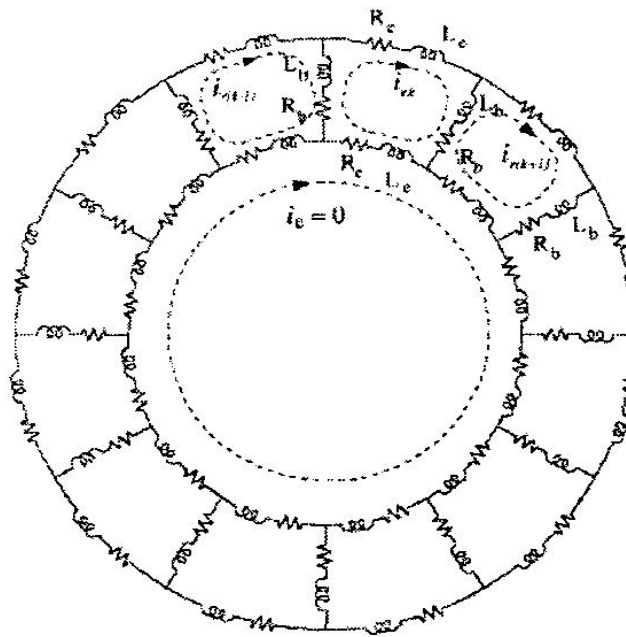
$$[L_{sr}] = \begin{bmatrix} M_{ar1} & M_{ar2} & M_{ar3} \dots \dots \dots M_{ar(n_b-1)} & M_{ar_a} & 0 \\ M_{br1} & M_{br2} & M_{br3} \dots \dots \dots M_{br(n_b-1)} & M_{br_b} & 0 \\ M_{cr1} & M_{cr2} & M_{cr3} \dots \dots \dots M_{cr(n_b-1)} & M_{cr_c} & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{II.23})$$

où M_{ri} représente l'inductance mutuelle entre la phase "a" et la "i^{ème}" maille rotorique. De même pour les phases "b" et "c".

Les inductances mutuelle entre le stator et l'anneau du court-circuit sont négligées, ce ci représenté par un zéro dans la dernière colonne de la matrice.

II.3.1.2. Equations des tensions rotoriques.

La représentation d'une machine asynchrone à rotor à cage d'écurueil est identique à celle d'un rotor bobiné. Nous supposons que le rotor à cage peut être remplacé par un ensemble de mailles couplées magnétiquement (figure II.6).



FigureII.6. Circuit équivalent du rotor à cage d'écurueil.

Nous relient les tension de chacune des boucles (mailles) rotoriques avec les courants et les flux grâce à l'équation :

$$[V_r] = [R_r][I_r] + \frac{d[\Phi_r]}{dt} \tag{II.24}$$

Le vecteur $[V]$ donné dans l'équation précédente, se décompose de la façon suivante :

$$[V_s] = [V_{r1} \quad V_{r2} \quad V_{r3} \dots V_{rn} \quad V_e]^T \tag{II.25}$$

Pour le cas d'un rotor à cage, la tension de l'anneau du court-circuit $V_e=0$, et la tension des mailles rotoriques $V_{rk}=0$; avec $k=1,2, \dots, n_b$.

$[R_r]$: est une matrice symétrique de dimensions $(n + 1) \times (n + 1)$

$$[R_r] = \begin{bmatrix} 2(R_r + R_e) & -R_b & 0 \dots \dots \dots 0 & -R_b & -R_e \\ -R_b & 2(R_r + R_e) & -R_b \dots \dots \dots 0 & 0 & -R_e \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 \dots \dots \dots 2(R_r + R_e) & -R_b & -R_e \\ -R_b & 0 & 0 \dots \dots \dots -R_b & 2(R_r + R_e) & -R_e \\ -R_e & -R_e & -R_e \dots \dots \dots -R_e & -R_e & n_b R_e \end{bmatrix} \tag{II.26}$$

R_b : la résistance d'une barre rotorique

R_e : la résistance d'un segment de l'anneau du court-circuit .

Le flux rotorique Φ_r est donné par :

$$[\Phi_r] = [L_r][I_r] + [M_{sr}][I_s] \tag{II.27}$$

$[L_r]$ la matrice des inductances rotoriques donné par la relation

$$[L_r] = \begin{bmatrix} L_{mr} + 2(L_b + L_e) & -L_{r1r2} - L_b & L_{r1r3} \dots \dots \dots L_{r1rn-1} & -L_{r1rn} - L_b & -L_e \\ L_{r2r1} - L_b & L_{mr} + 2(L_b + L_e) & L_{r2r1} - L_b \dots \dots \dots L_{r2rn-1} & L_{r2rn-1} & -L_e \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ L_{(rn-1)r1} & L_{(rn-1)r2} & L_{(rn-1)r3} \dots \dots \dots L_{mr} + 2(L_b + L_e) & L_{(rn-1)rn} & -L_e \\ L_{rnr1} - L_b & L_{rnr2} & L_{rnr3} \dots \dots \dots L_{rn(rn-1)} & L_{mr} + 2(L_b + L_e) & -L_e \\ -L_e & -L_e & -L_e \dots \dots \dots -L_e & -L_e & n_b L_e \end{bmatrix} \tag{II.28}$$

Avec L_{mr} , L_b , L_e sont l'inductance de magnétisation de chaque maille rotorique, l'inductance de fuite d'une barre rotorique et l'inductance de fuite d'un segment de l'anneau de court-circuit respectivement. L_{rrij} est l'inductance mutuelle entre la $i^{\text{ème}}$ et le $j^{\text{ème}}$ maille rotorique.

$[L_{sr}]$ Comporte $3 \times (n_b + 1)$ éléments qui constituent les inductances mutuelles entre les phases statoriques et les mailles rotoriques, et est donnée par :

$$[L_{sr}] = \begin{bmatrix} L_{a1}^{sr} & L_{a2}^{sr} & \dots & L_{an}^{sr} & L_{ae}^{sr} \\ L_{b1}^{sr} & L_{b2}^{sr} & \dots & L_{bn}^{sr} & L_{be}^{sr} \\ L_{c1}^{sr} & L_{c2}^{sr} & \dots & L_{cn}^{sr} & L_{ce}^{sr} \end{bmatrix}, \text{ et } [L_{rs}] = [L_{sr}]^t$$

L_{aj}^{sr} représente l'inductance mutuelle entre la phase "a" et la $j^{\text{ème}}$ maille.. De même pour les phases "b" et "c". L'inductance mutuelle entre chaque phase statorique et l'anneau de court-circuit est négligée du fait qu'ils peuvent être assimilés à des bobines à axes perpendiculaires.

II.3.1.3. Equation mécanique.

Les équations mécaniques qui régissent le fonctionnement de la machine asynchrone peuvent se mettre sous la forme :

$$J \frac{d\omega_r}{dt} = C_{em} - C_r - f\omega_r \tag{II.29}$$

et $\frac{d\theta_r}{dt} = \omega_r$

Où θ_r l'angle de déplacement du rotor. J représente le moment d'inertie de la machine étudiée, ω_r sa vitesse rotorique, C_{em} son couple électromagnétique, f son frottement visqueux et C_r son couple de charge.

Le couple électromagnétique est déduit de la co-énergie magnétique W_{co} à l'aide de l'équation suivante :

$$C_{em} = \left[\frac{\partial W_{co}}{\partial \theta_r} \right]_{(I_s, I_r \text{ constants})} \tag{II.30}$$

La co-énergie est l'énergie emmagasinée dans le circuit magnétique, par conséquent dans le cas du moteur à cage, elle peut être exprimée par la relation ci-dessous

$$W_{co} = \frac{1}{2} \left[I_s' L_{ss} I_s + I_s' L_{sr} I_r + I_r' L_{rs} I_s + I_r' L_{rr} I_r \right] \quad (\text{II.31})$$

Le couple électromagnétique est donné par la relation :

$$C_{em} = \frac{1}{2} \left[I_s' \frac{\partial L_{ss}}{\partial \theta_r} I_s + I_s' \frac{\partial L_{sr}}{\partial \theta_r} I_r + I_r' \frac{\partial L_{rs}}{\partial \theta_r} I_s + I_r' \frac{\partial L_{rr}}{\partial \theta_r} I_r \right] \quad (\text{II.32})$$

II.4. Calcul des inductances.

II.4.1. 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 [RIT 94] :

$$F_m(\theta) = \frac{2N_s i_a}{p\pi} \cos(\theta) \quad (\text{II.33})$$

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

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

$$B_s(\theta) = \frac{2\mu_0 N_s i_a}{ep\pi} \cos(\theta) \quad (\text{II.34})$$

Le flux magnétique dans l'entrefer, par pôles, est obtenu par intégration de l'expression (II.34) autour d'un intervalle polaire le long de la machine :

$$\phi_s = \iint_S B_s dS = \int_0^1 dz \int_{-\frac{\pi}{2p}}^{\frac{\pi}{2p}} B_s R d\theta \quad (\text{II.35})$$

On obtient :

$$\phi_s = \frac{4\mu_0 N_s R l}{\pi e p^2} i_a \quad (\text{II.36})$$

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

$$\Psi_{sa} = N_s \phi_s = N_s i_a \frac{2\mu_0 N_s R l}{e p^2 \pi} \int_{-\frac{\pi}{2p}}^{\frac{\pi}{2p}} \cos(\theta) d\theta = L_{sp} i_a \quad (\text{II.37})$$

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

$$L_{sp} = L_{ms} = \frac{4\mu_0 N_s^2 R l}{e \pi p^2} \quad (\text{II.38})$$

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

$$L_{as} = L_{sp} + L_{sf} \quad (\text{II.39})$$

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

L'inductance mutuelle entre les phases statoriques est :

$$M_s = -\frac{L_{sp}}{2} \frac{N_r - 1}{N_r} \frac{\mu_0}{e} i_{rk} \quad (\text{II.40})$$

II.4.2. Inductances rotoriques.

La figure II.8 représente en fonction de θ' , l'allure de l'induction magnétique, supposé radiale, produite par une maille rotorique "k" dans l'entrefer.

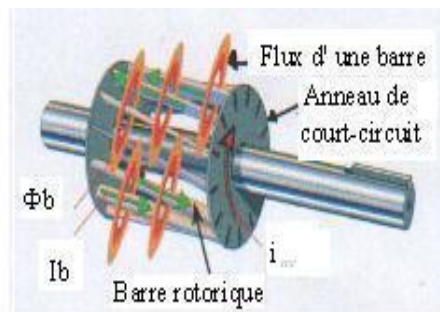


Figure II.7. Induction magnétique produite par une barre rotorique.

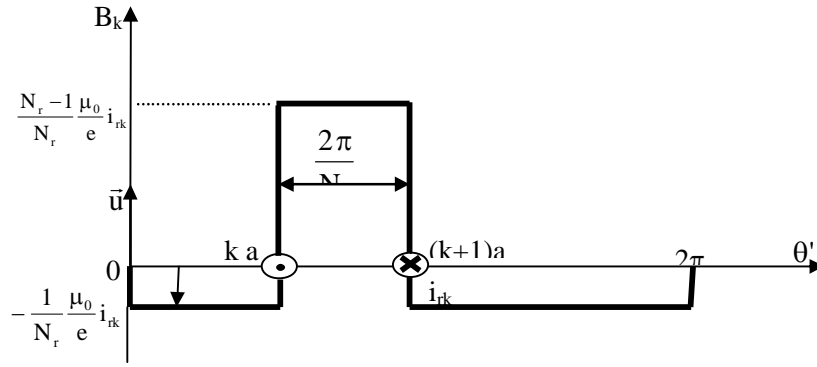


Figure II.8. Induction magnétique produite par une maille rotorique.

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

$$\phi_{rk} = \int_0^l dz \int_{ka}^{(k+1)a} \left(\frac{N_r - 1}{N_r} \frac{\mu_0}{e} R i_{rk} \right) d\theta' = \frac{N_r - 1}{N_r^2} \mu_0 \frac{2\pi R l}{e} i_{rk} \quad (\text{II.41})$$

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

$$L_{rp} = \frac{N_r - 1}{N_r^2} \mu_0 \frac{2\pi}{e} R l \quad (\text{II.42})$$

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

$$L_{rr} = L_{rp} + 2L_b + 2L_e \quad (\text{II.43})$$

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

$$\phi_{rjrk} = \int_0^l dz \int_{ja}^{(j+1)a} \left(-\frac{1}{N_r} \frac{\mu_0}{e} R i_{rk} \right) d\theta' \quad (\text{II.44})$$

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

$$M_{rr} = -\frac{1}{N_r^2} \frac{2\pi\mu_0}{e} R l \quad (\text{II.45})$$

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

$$M_{r_{k(k-1)}} = M_{r_{k(k+1)}} = M_{rr} - L_b \quad (\text{II.46})$$

II.4.3. Inductance mutuelle stator – rotor.

La transformation dans le repère lié au rotor de l'équation (II.34), donne :

$$B_s(\theta') = \frac{2\mu_0 N_s i_a}{e p \pi} \cos[(\theta' + \omega_r t)] \quad (\text{II.47})$$

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

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

$$\phi_{rka} = \int_0^1 dz \int_{ka}^{(k+1)a} B_s(\theta') R d\theta' \quad (\text{II.48})$$

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

$$\phi_{rka} = L_{sr} i_a \cos[\omega_r t + k a] \quad (\text{II.49})$$

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

$$L_{rka} = M_{sr} \cos(\omega_r t + k a) \quad (\text{II.50})$$

$$\text{Avec : } M_{sr} = \frac{4\mu_0 N_s R l}{e p^2 \pi} \sin\left(\frac{a}{2}\right) \quad (\text{II.51})$$

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

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

$$L_{rkb} = M_{sr} \cos\left(\omega_r t + k a - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (\text{II.52})$$

$$L_{rkc} = M_{sr} \cos\left(\omega_r t + k a - \frac{4\pi}{3}\right) \quad (\text{II.53})$$

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

TableauII.1 Inductances de la machine asynchrone à cage.

INDUCTANCES	EXPRESSIONS
L'inductance principale d'une phase statorique.	$L_{sp} = L_{ms} = \frac{4\mu_0 N_s^2 R l}{e \pi p^2}$
L'inductance mutuelle entre phases statoriques.	$M_s = -\frac{L_{sp}}{2}$
L'inductance totale d'une phase statorique.	$L_{as} = L_{bs} = L_{cs} = L_s = L_{sp} + L_{sf}$
L'inductance principale d'une maille rotorique.	$L_{rp} = \frac{N_r - 1}{N_r^2} \mu_0 \frac{2\pi}{e} R l$
L'inductance mutuelle entre mailles rotoriques non adjacentes.	$M_{rr} = -\frac{\mu_0}{N_r^2} \frac{2\pi}{e} R l$
L'inductance mutuelle entre mailles rotoriques adjacentes.	$M_{r_{k(k-1)}} = M_{r_{k(k+1)}} = M_{rr} - L_b$
L'inductance mutuelle entre une maille rotorique et une phase statorique "a".	$L_{rksa} = M_{sr} \cos(p\omega_r t + k a)$ avec : $M_{sr} = \frac{4\mu_0 N_s R l}{e p^2 \pi} \sin\left(\frac{a}{2}\right)$

II.5. Résultats de la simulation du moteur asynchrone.

Sous ce titre nous présentons la simulation du modèle, avec la distribution de la F.M.M est considérée sinusoïdale.

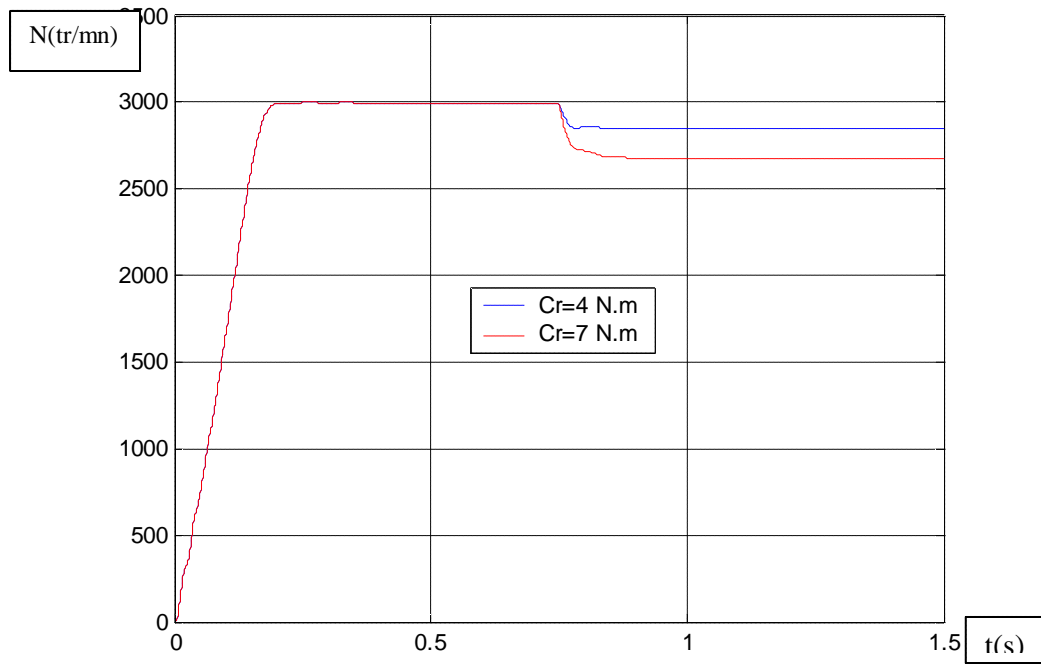
La simulation a été fait pour une machine à cage (nous avons pris les résultats de simulation du projet de fin d'étude de l'année universitaire 2007/2008, encadré par M. N.Bessous).

Nous avons présenté la simulation dans le de fonctionnement d'un moteur sain, avec une représentation de l'analyse spectrale ayants recours à la procédure de la transformée de Fourier rapide sous langage MATLAB.

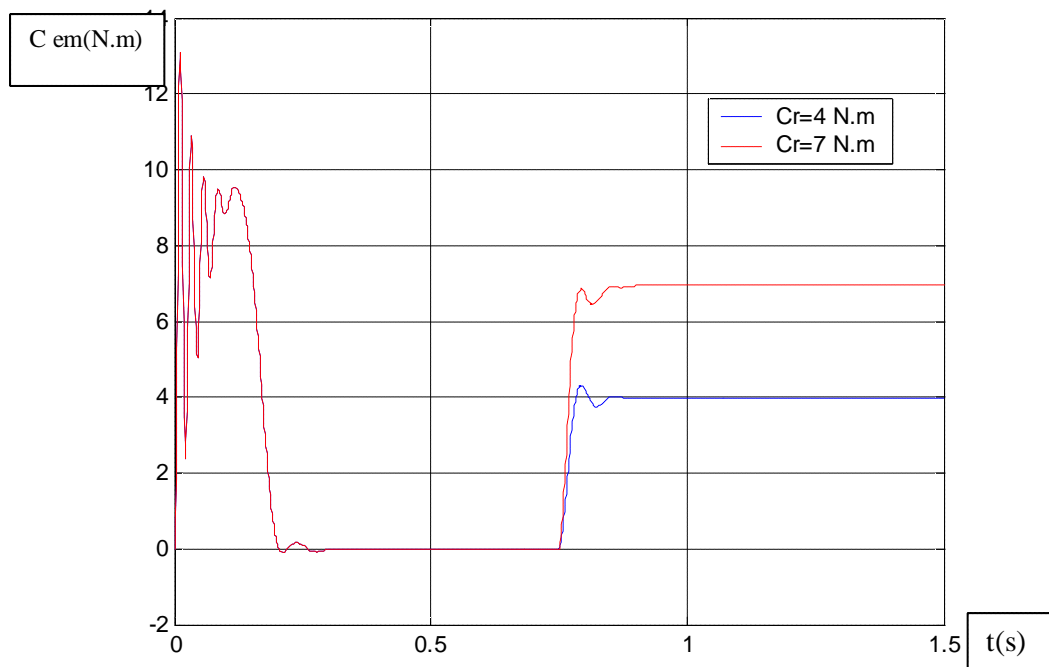
Les figures II.9, II.10 et II.11 présentent les grandeurs électromécaniques du moteur dans le cas d'un fonctionnement sans défaut.

La figures II.9 et II.10 illustre les variations de la vitesse et du couple en fonction du temps respectivement à vide, et on introduit une charge de 4 N.m et 7 N.m dans l'instant t=0.75s.

La figure II.11 présente le courant statorique dans le régime transitoire et permanent avec différentes charges que vérifie la demande supplémentaire du courant à partir de l'instant t=0.75s, ainsi que son spectre. Nous constatons que le spectre ne contient que l'harmonique fondamentale.



FigureII.9. La Vitesse de rotation.



FigureII.10. Le couple électromagnétique.

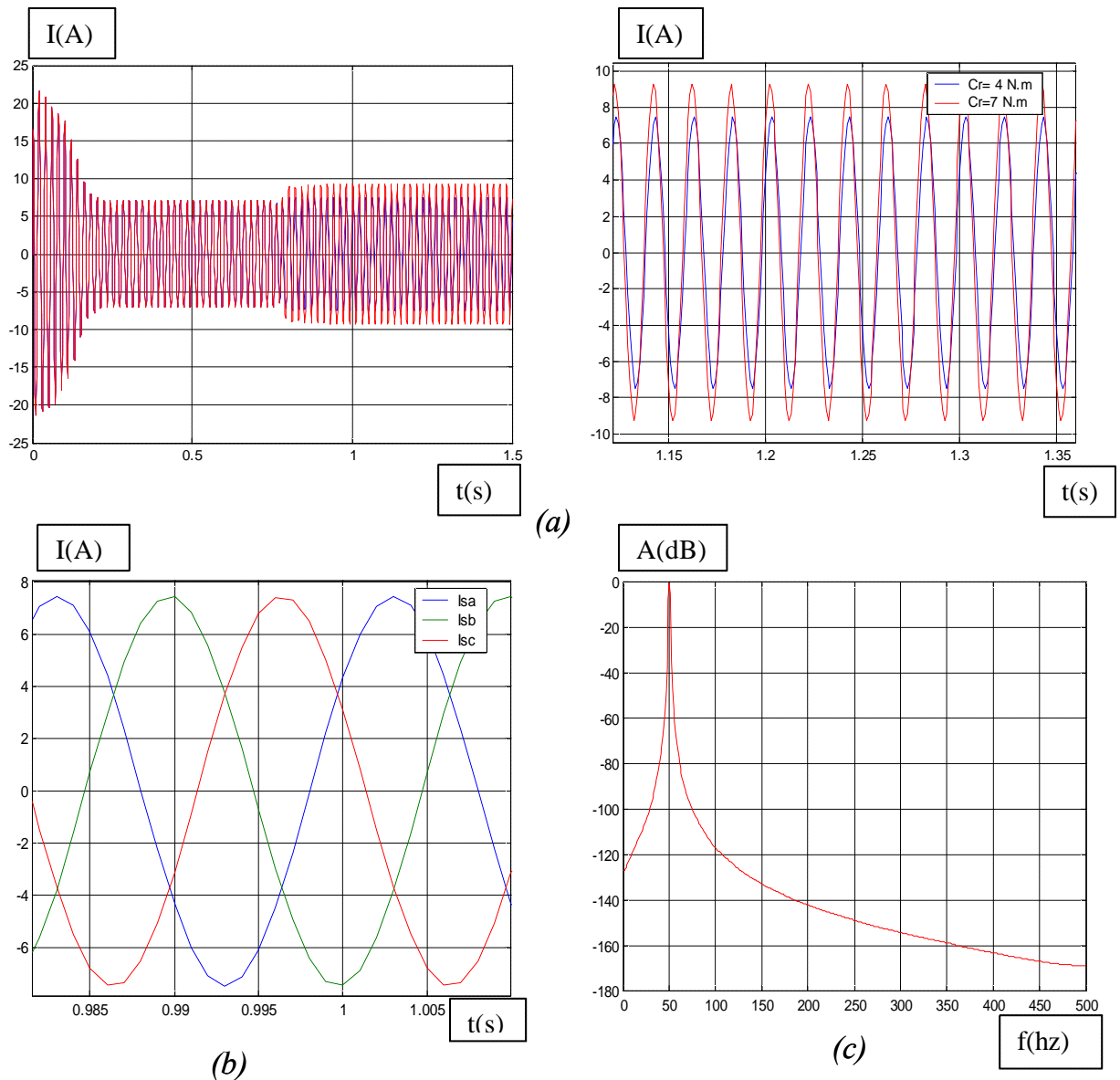


Figure II.11. (a) : Le courant de la phase 'a' statorique et son zoom, (b) : Le zoom de trois courants statoriques en régime permanent, (c) : Le spectre du courant de la phase 'a' statorique.

II.6. Conclusion.

Le modèle multi-enroulements en vue du diagnostic représentait un premier pas dans l'application de notre méthodologie à l'étude comportementale de la machine asynchrone. A partir de cette approche, l'idée de base est de pouvoir simuler des défauts de la cage rotorique (rupture totale ou partielle de barres ou d'anneaux) afin d'obtenir des oscillogrammes sur lesquels on peut analyser les signatures spectrales de ces défauts. L'analyse spectrale est plus riche d'enseignement, pour la détection et localisation des défauts électriques ou pour la maintenance prédictive.

III.1. Introduction.

L'étude menée dans le chapitre précédent a permis d'analyser et de comprendre les phénomènes qui apparaissent au niveau des grandeurs temporelles de la machine asynchrone telles que le courant statorique, le couple électromagnétique et la vitesse lorsque la machine fonctionne avec un rotor sain ou un rotor défaillant (rupture d'une barre de la cage d'écuriel). Ce chapitre va traiter une discussion complète des résultats de l'année précédente [BOU 07/08], tout en appliquant la méthode de diagnostic par analyse de courant statorique pour traiter le défaut de cassure de barre.

III.2. Les résultats des simulations.

A l'instant $t=0.5s$, nous avons la simulation de la MAS avec une rupture de la première barre qu'ils ont augmenté la résistance 100 fois. Le courant dans cette barre diminue fortement, entraînant une redistribution des courants dans toutes les barres rotoriques ainsi qu'une surintensité importante dans les barres adjacentes.

A l'instant $t=1s$ nous avons la simulation de la machine avec trois barres cassées pour mettre en évidence l'effet de nombre de barres rompues. L'amplitude des courants dans les barres adjacentes devient plus importante qu'avec une seule barre cassée. Les cassures des barres se traduit aussi par l'apparition des oscillations (déformation) dans le couple et la vitesse ce qui en accord avec ce qu'on a prévu par l'étude analytique. L'amplitude de ces oscillations est augmentée avec le nombre de barres rompues. Donc, elle dépend de la sévérité du défaut.

La simulation du modèle de la machine avec un rotor défectueux nous a donné pour la vitesse la courbe représentée en Figure (III.1), pour le couple électromagnétique en Figure (III.2).

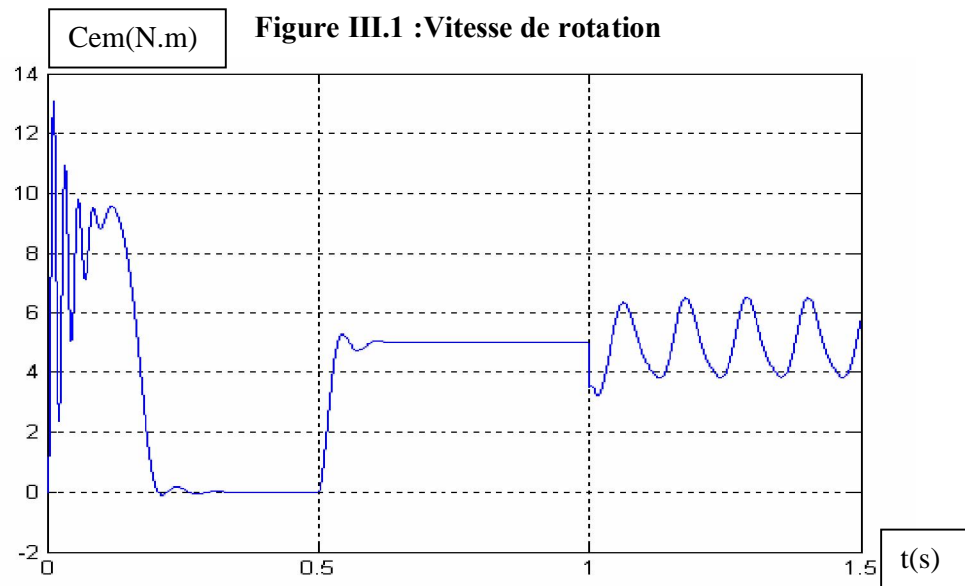
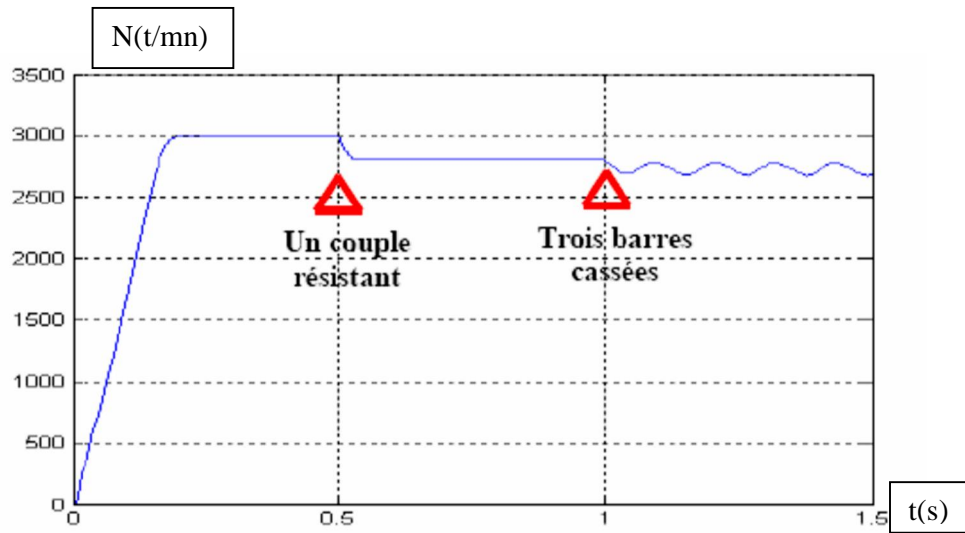


Figure III.1 :Vitesse de rotation

Figure III.2 :Le couple électromagnétique.

La figure III.3.(a) présente le courant statorique et son spectre dans le cas d'un fonctionnement avec défaut de cassure de barre. Le spectre du courant (figure III.3.a) présente en plus de fondamentale deux harmoniques de part et d'autre du fondamental à des fréquences

$$f_{cb} = (1 \pm 2kg).f_s \tag{III-1}$$

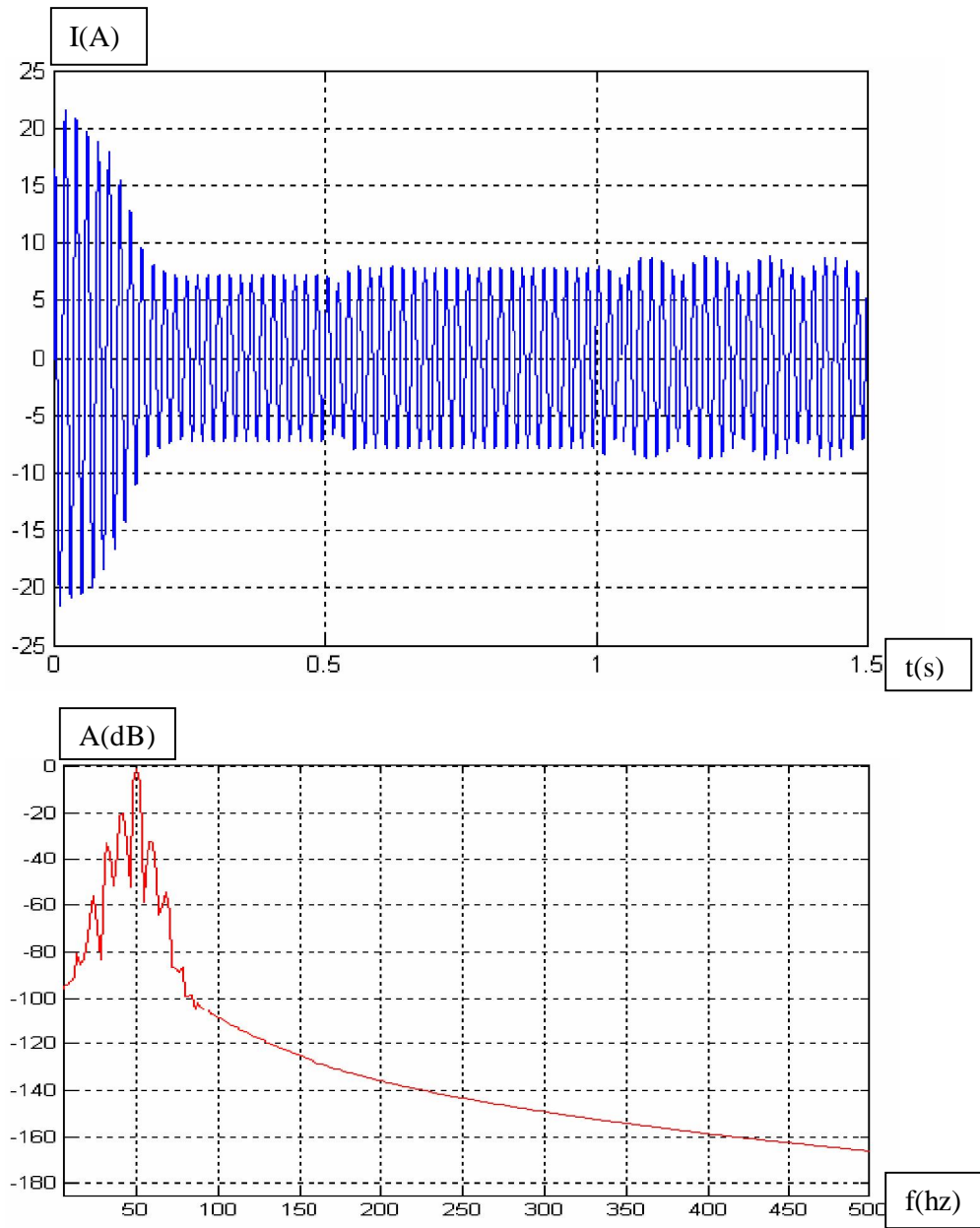


figure III.3.(a):Le courant de la phase ' a ' statorique, et son spectre.

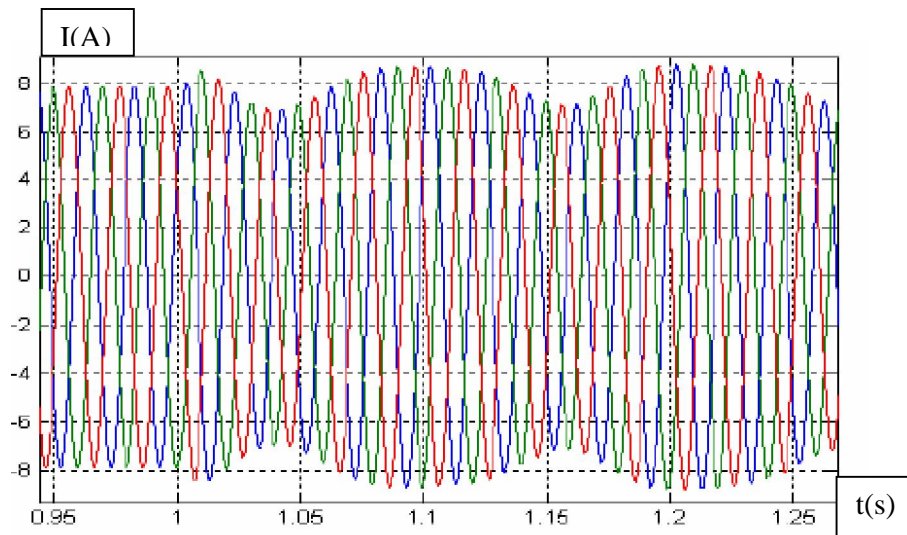


figure III.3.(b):Le zoom des courants de trois phases statoriques (avant et après le défaut).

Dans notre cas de simulation, la machine fonctionne avec un glissement $g=0.0883$. Par conséquent, les harmoniques caractéristiques basés sur la formule (III-1) du défaut se manifestent à des fréquences :

Pour $k=1$:

$$f_{cb1} = 58.83 \text{ HZ} \quad \text{et} \quad f_{cb2} = 41.17 \text{ HZ}$$

Pour $k=2$:

$$f_{cb1} = 67.66 \text{ HZ} \quad \text{et} \quad f_{cb2} = 32.34 \text{ HZ}$$

La figure III.4 illustre le zoom du spectre, pour nous constater les fréquences obtenues.

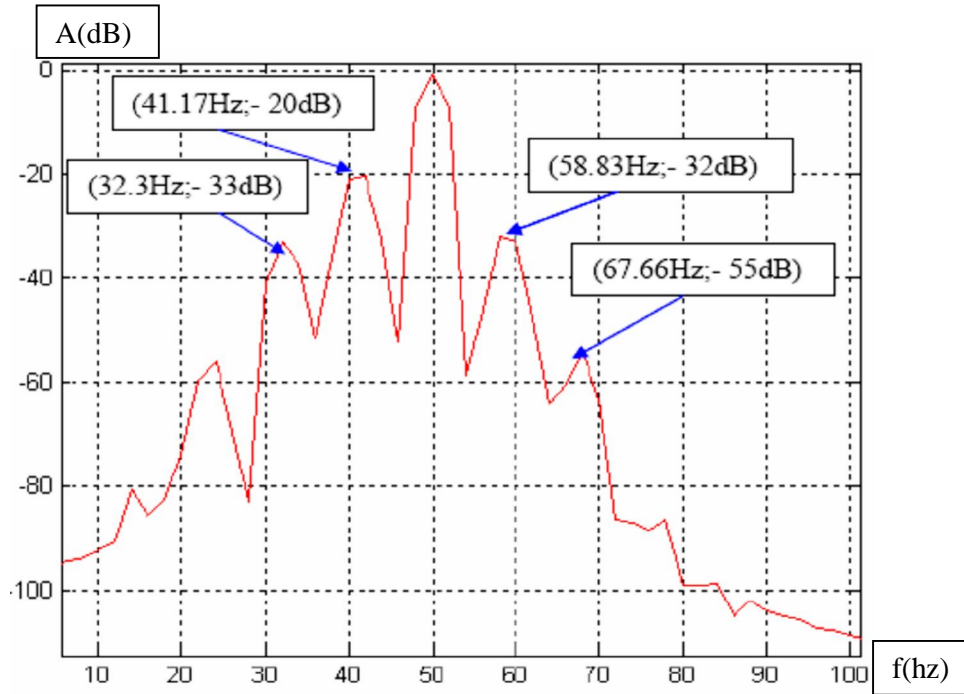


Figure III.4 : Le zoom du spectre du courant de la phase ' a ' statorique.

III.3. Conclusion.

Dans ce chapitre et afin d'illustrer l'effet du défaut rotorique (cassure de barres) sur les grandeurs électriques et mécaniques du moteur asynchrone triphasé à cage, nous avons fait une étude analytique du défaut rotorique; et pour confirmer les résultats obtenus, nous avons effectué une vérification pour les différentes conditions de fonctionnement (démarrage à vide et en charge, variation du couple résistant et rupture de barres). Nous avons trouvé que la rupture d'une barre provoque des oscillations dans le couple et dans la vitesse, ainsi qu'une modulation de l'enveloppe du courant statorique. L'amplitude de ces oscillations dépend de la sévérité du défaut, en plus de ça une formule précise a été vérifiée pour ce type des défauts.

CONCLUSION GÉNÉRALE

L'intérêt des industriels pour la maintenance prédictive des systèmes d'entraînement, justifie l'accent mis par la recherche sur le diagnostic des machines tournantes et en particulier la machine à induction. Actuellement, l'utilisation des techniques présentées dans ce mémoire concerne le diagnostic des cassures de barres de la cage rotorique de la machine asynchrone triphasée.

Dans le premier chapitre, nous avons rappelé la construction de la machine afin de mettre en exergue les différents défauts rotoriques. Puis, nous avons présenté, sans exhaustivité, les différentes techniques dans le domaine du diagnostic.

Une partie de notre étude était consacrée à l'élaboration du modèle mathématique orienté vers le diagnostic le défaut de cassure de barre :

Dans le premier, on a présenté les hypothèses simplificatrices classiquement faites pour la modélisation et la simulation des machines électriques, en insistant sur les contraintes propres aux objectifs de la simulation pour le diagnostic. C'est pour pouvoir prendre en compte les défauts de la cage rotorique que le modèle multi enroulements a été développé. Pour cela deux étapes ont été nécessaires. Primo à modéliser le stator dans le repère de Park et secundo à modéliser le rotor par un circuit équivalent (succession de mailles).

Le modèle de simulation avec les paramètres trouvés auparavant, nous a permis de discerner entre les différents comportements de la machine dans les deux cas de fonctionnement (moteur sain et ensuite avec défauts de barres).

Par ailleurs afin de valider notre étude, l'approche des vérifications des résultats de simulation pour la défaillance de cassure de barre ont été faites.

BIBLIOGRAPHIQUES

- [ABE02]: M.A. Abed, "Contribution à L'étude et au Diagnostic de la Machine Asynchrone", Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy-I, mars 2002.
- [BAC02] : Smail BACHIR , "contribution au diagnostic des machines asynchrones par estimation paramétrique», Thèse Présentée à l'université Pour l'obtention du grade de Docteur de l'université de poitiers 2002.
- [BES07] : Bessous Noureddine, "contribution au diagnostic des machines asynchrones " Mémoire de Magister , Université Mentouri de Constantine
- [BOU01] : Boumegoura. T, " Recherche de signature électromagnétique des défauts dans une machine asynchrone et synthèse d'observateurs en vue de diagnostic ". Thèse Doctorat, Ecole centrale de Lyon, Mars 2001.
- [BOU08] :Bouameur .Ali ,Zoubeidi .Mohamed, Zobiri .Youcef "Diagnostic de la Machine Asynchrone application au défaut de cassure de barre" centre université d'el-oued .2008
- [CAS03]:R. Casimir, "Diagnostic des défauts des machines asynchrones par reconnaissance des Formes", Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Lyon, 2003.
- [CRI00]: C. Christophe, " méthodes d'aide à la décision pour la détection et la localisation de défauts dans les entraînements électrique ", Thèse de doctorat, le 27 septembre 2000
- [DID04]: G. Didier, " Modélisation et Diagnostic de la Machine Asynchrone en Présence de Défaillances " Thèse de doctorat, Université de Henri Poincaré, Nancy-I, Octobre2004.
- [MLI99]: J.Milimonfared , "A Novel Approach for Broken-Rotor-Bar Detection in Cage Induction Motors", IEEE Transactions on Industry Applications,october ,1996.
- [OND06]: O. Ondel, "Diagnostique par Reconnaissance des Formes: Application a un Ensemble Convertisseur-Machine ", Thèse de Doctorat, L'Ecole Centrale de Lyon, October 2006.
- [SCH99]: E. Schaeffer, "Diagnostic des machines asynchrones : modèles et outils paramétriques dédiés à la simulation et à la détection des défauts", Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Nantes, 1999.
- [TOL96] : Hamid A. Toliyat, Mohammed S. Arefeen, et Alenxender G. Parlos. "A Method for Dynamic Simulation of Air-Gap Eccentricity in Induction Machines". IEEE Transactions on Industry Applications, July-August 1996.

Résumé

Devant l'utilisation croissante de la machine asynchrone dans divers domaines, la nécessité de mener les études en vue de la protection, la maintenance et de la détection des défauts de cette dernière, s'impose.

Notre étude porte sur la présentation de certaines recherches effectuées dans cette optique. Nous exposons également un modèle (technique) pour effectuer l'analyse des courant. Il est clair pour notre part que les résultats obtenus contribueront efficacement à l'étude du diagnostic de la machine. Nous avons également, mis l'accent sur le défaut de la cassure de barre du rotor, et sur le calcul des fréquences de ce défaut. A partir de la simulation numérique,