

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



UNIVERSITE DE M'SILA
FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE

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

SPECIALITE:INGENIERIE DES SYSTEMES ELECTROMECHANQUES

THEME

Modèles multi enroulements de la MAS dédiés au diagnostic

Proposé et dirigé par :

-Dr.Khodja Djalal eddine

Présenté par :

SACI FAWZI

Année **Universitaire:2012/2013**

N⁰ d'ordre : 059

Dédicaces

Je dédie ce travail à :

Mes Parents

Mes Frères et Sœurs

Mes oncles

Tous mes amis

A toute la promotion MASTER 2013

Enseignants à l'université de M'sila

A tous ceux qui me sont chers.....ect

Remerciements

Mes remerciements vont tout premièrement, à Dieu le tout puissant qui m'a donné la foi, le courage et la patience de parvenir à finir ce modeste travail.

*J'adresse tout d'abord ma profonde reconnaissance à mon encadreur, **Dr KHODJA Djalal Eddine**, pour l'honneur qu'il m'a fait en acceptant de diriger ce Mémoire, et pour ses conseils et encouragements réguliers, ses qualités scientifiques et humaines ont toujours été une source de motivation et tous ma parole ne peut pas suffisamment pour son soutien, et conseils durant la réalisation de ce travail.*

Je tiens également à remercier mes amis.

Mes essentiels remerciements à tous les enseignants qui ont contribué à ma formation du à l'université, à ceux qui ont marqués ma formation d'électrotechnique.

SACI, FA

Tables de matière

Dédicaces	
Remerciement	
Introduction générale	

Chapitre I

état de l'art du diagnostic de défauts de la MAS

Chapitre I : Etat de L'art du diagnostic de défauts de la MAS.....	1
I.1.Introduction	1
I.2.Le Recensement des défauts de la MAS.....	1
I.2.1.Défauts statorique	2
I. 2.1.1Défauts d'isolant dans un enroulement	3
I. 2.1.2Court-circuit entre spires	3
I. 2.1.3Court-circuit entre phases	3
I. 2.1.4Court-circuit phase/bâti	4
I. 2.1.5.Défaut de circuit magnétique (rupture de tôles).....	4
I.2.2.Défauts rotoriques.....	4
I.2.2.1.Rupture des barres (Cassures partielles ou totales).....	4
I.2.2.2.Rupture d'anneaux	5
I.2.2.3.Excentricité	6
I.2.3.Défauts mécanique.....	7
I.2.3.1.Défauts roulements.....	7
I.2.3.2.Défaillances du flasque	8
I.2.3.3Défaillances de l'arbre	9
I.3.Causes des défauts	9
I.4.Conséquences des défauts.....	9
I.5.Paramètres indicateurs des défauts	10
I.6.Méthodes de diagnostic	10
I.6.1. Les méthodes internes	10
I.6.1.1. La méthode du modèle	11
I.6.1.2.Redondance physique ou matérielle.....	11
I.6.1.3.Redondance analytique	11
I.6.2.Les méthodes externes	11
I.6.2.1. Méthodes basées sur l'intelligence artificielle (I)	12

I.6.2.1.1 Reconnaissances des formes (RDF)	12
I.6.2.1.2 Diagnostic par réseaux de neurones	12
I.6.2.1.3 Diagnostic par systèmes experts	14
I.6.2.1.4 Logique floue	14
I.7.Position du problème à résoudre	14
I.8.conclusion	14

Chapitre II

modèles triphasé de la MAS en vue d'étudier les défauts statorique

Chapitre II: Modèles triphasé de la MAS en vue d'étudier les défauts statorique	15
II.1. Introduction	15
II.2. Modélisation de la machine asynchrone en régime normal (modèle triphasé)	15
II.2.1 Hypothèses simplificatrices	15
II.2.2.Modèle triphasé équivalent d'une machine asynchrone	16
II.2.3.Définition de la matrice de transformation	18
II.2.4.Transformation des équations du modèle triphasé	18
II.2.5.Simulation de la machine asynchrone dans le régime normal.....	21
II.2.6.Résultats de simulation	22
II.2.7.Interprétations des résultats	24
II.3.Modélisation de la machine en régime anormal.....	24
II.3.1.Simulation de la machine asynchrone dans les régimes anormaux de fonctionnement...	26
II.3.2.Interprétations des résultats	28
II.4. Conclusion.....	28

Chapitre III

modèle multi enroulement en vue d'étudier les défauts rotoriques.

Chapitre III: modèle multi enroulement en vue d'étudier les défauts rotoriques.	29
III.1. Introduction.....	29
III.2. Structure du rotor	29
III.3. Modèle d'étude	29
III.3.1.Hypothèses Simplificatrices	30
III.3.2.Calcul des Inductances	30
III.3.2.1.Stator.....	30
III.3.2.2. Rotor	30
III.3.2.3. Stator Rotor	31

III.3.3. Mise en équation	32
III.3.3.1. stator	32
III.3.3.2. rotor	33
III.3.3.3.L'anneau de court-circuit	36
III.4. La transformation de Nr grandeurs équilibrées vers deux grandeurs dq	38
III.4.1. la matrice de résistance du modèle dq équivalent	40
III.4.1.1.Passage du modèle polyphasé au modèle biphasé.....	40
III.4.2. la matrice d'inductance du modèle dq équivalent	43
III.4.2.1.Passage du modèle polyphasé au modèle biphasé.....	44
III.5. Simulation du modèle dq	45
III.5.1. La Simulation en cas sain.....	45
III.5.1.1 Explications des résultats.....	46
III.5.2. La Simulation en cas des défauts rotorique.....	47
III.5.2.1. Modélisation des défauts dans le cas cassure des barres	47
III.5.2.1.1. La cassure d'une barre	47
III.5.2.1.2. La cassure des quatre barre première	49
III.5.2.2.Analyse des résultats	50
III.6. Conclusion	51

Chapitre IV

diagnostic des défauts de la MAS

Chapitre IV: Diagnostic des défauts de la MAS	52
IV.1. Introduction.....	52
IV.2. L'analyse Spectrale Pour Les Défauts Statorique Et Rotorique.....	52
IV.2.1 Transformé de Fourier	52
IV.2.2 Méthodes de traitement des signaux	53
IV.2.2.1 Les méthodes classiques	53
IV.2.2.2 Les méthodes de diagnostic actuellement	53
I.2.2.2.1 Analyse temps-fréquence et temps-échelle	53
I.2.2.2.2 Analyse cepstrale.....	53
I.2.2.2.3 Analyse spectrale à haute résolution	54
I.2.2.2.4 Diagnostic des défauts par estimation paramétrique	54
I.2.2.2.5 Diagnostic des défauts par reconnaissance des formes	54
I.2.2.2.6 Diagnostic des défauts par analyse du vecteur de Park.....	54
I.2.2.2.7 Diagnostic des défauts par le suivi des grandeurs mesurables	54

I. 2.2.2.8 Technique additionnelle	54
IV.2.3 Les résultats de l'analyse spectrale en état sain	55
IV.2.4 L'analyse spectrale dans un état défaut au stator	55
IV.2.4.1 Interprétation des résultats.....	57
IV.2.5. Analyse spectrale en présence des défauts rotoriques	57
IV.2.5.1. Analyse des Résultats.....	59
IV.3. Élaboration d'un système automatique de diagnostic des défaillances à base des réseaux de neurones artificiels.	60
IV.3.1. Introduction.....	60
IV.3.2. Élaboration du module d'interprétation des informations.	60
IV.3.2.1. Choix des variables d'entrées de RNA (les paramètres représentatifs des défauts).	60
IV.3.2.2 Acquisition des données (base d'apprentissage).	61
IV.3.2.3. Construction de la base d'apprentissage.....	61
IV.3.2.4 Construction du bloc de RNA.	61
IV 3.3. Apprentissage de réseau de neurone sélectionné.	63
IV.3.4. Test de RNA sur exemples.....	63
IV.4.Conclusion.	64
Conclusion générale.....	
Références bibliographiques	
Annexes.....	
Rusimé.	

Table des figures

Figure I.1: Proportion des défauts.-----	1
Figure I.2: Répartition des pannes sur les machines de faibles et moyennes puissances. -----	2
Figure I.3: Une barre partiellement cassée. Figure I.4 Une barre complètement cassée.-----	5
Figure I.5: Rupture d'une et deux portions adjacentes d'anneau de court-circuit. -----	5
Figure I.6 : Excentricité statique. Figure I. 7 Excentricité dynamique -----	6
Figure I.8: Vue éclatée des éléments constitutifs Figure I. 9 Dimensions d'un roulement à billes. --	7
Figure II.1: Représentation des enroulements de MAS triphasée dans l'espace électrique.-----	16
Figure II.2: Le schéma bloc de simulation du modèle de la machine asynchrone. -----	22
Figure II.3: Résultats de simulation d'un démarrage directe de la MAS à vide alimentée en tension, suivie d'une application d'une Couple résistant de ($C_r=3.5 \text{ N.m}$) à ($t=1 \text{ sec}$). -----	23
Figure II.4: court-circuit entre les spires -----	24
Figure II.5: Résultats de simulation pour un court-circuit entre 18,75% spires de la phase a -----	26
Figure II.6: Résultats de simulation la machine en présence de défaut (coupure de la phase a).-----	27
Figure III.1 : Structure du rotor.-----	30
Figure III.2: Induction produite par une maille du rotor-----	31
Figure III.3: Position de la maille rotorique k , par rapport la bobine statorique de la phase ($m = 0$)	31
Figure III.4: Représentation d'une maille rotorique -----	34
Figure III.5: projection du modèle multi enroulement sur le modèle dq -----	38
Figure III.6: Vitesse (moteur sain). -----	45
Figure III.7: Couple (moteur sain). -----	45
Figure III.8: Courant statorique (moteur sain). -----	46
Figure III.9: Vitesse au démarrage, en charge puis lors de la rupture de barres.-----	48
Figure III.10 : Le Couple lors de la rupture de barre. -----	48
Figure III.11 : Courant statorique, en charge puis lors de la rupture de barre. -----	49
Figure III.12 : La Vitesse lors de la rupturde quatre barres. -----	49
Figure III.13 : Le Couple lors de la rupture de quatre barres. -----	50
Figure III.14 : Courant statorique lors de la rupture 4 de barres. -----	50
Figure VI-1 : Spectre logarithmique des courants statoriques dans le cas sain.-----	55
Figure VI-2 : Spectre logarithmique des courants statoriques dans le cas court-circuit de 18.75%. ----	56
Figure VI-3 : Spectre logarithmique des courants statoriques dans le cas court-circuit de 37.5% -----	57
Figure IV.4 : Spectre du courant statorique dans le cas d'un moteur sain -----	58
Figure IV.5 : Spectre du courant statorique dans le cas d'un rotor avec une barre cassée-----	58
Figure IV.6 : Spectre du courant statorique dans le cas d'un rotor avec quatre barres cassées -----	59

Figure. IV.7. Structure du réseau à étudier -----	62
Figure. IV 8 Principe de classification des signaux des défaillances-----	63

Nomenclature

f_{cage} :	La fréquence de la cage.
f_v :	Les fréquences caractéristiques des vibrations.
n_b :	Le nombre de bille.
w :	Angle de contact des billes avec les bagues du roulement en radians.
f_b :	Les fréquences des vibrations au niveau d'une bille.
$f_{b.int}$:	Les fréquences des vibrations sur la bague intérieure.
$f_{b.ext}$:	Les fréquences des vibrations sur la bague extérieure.
f_{rot} :	La fréquence de rotation du rotor.
Pd:	La distance entre les centres des billes.
Bd:	Le diamètre d'un élément roulant.
RdF:	La reconnaissance des formes.
a, b, c :	Indice correspondent aux trois phases (a,b,c).
Ce :	Couple électromagnétique [N.m].
C_r :	Couple résistant [N.m].
i_{sa}, i_{sb}, i_{sc} :	Courants statoriques [A].
i_{ra}, i_{rb}, i_{rc} :	Courants rotoriques [A].
R_s :	Résistances propre d'une phase statoriques.
J:	Moment d'inertie. [Kg. m ²]
f :	Coefficient de frottement.
$[L_s]$:	Matrice des inductances statoriques [H].
$[L_r]$:	Matrice des inductances rotoriques [H].
M_{sr} :	Inductances mutuelle entre phase de stator et une phase de rotor [H].
M_s :	Inductance mutuelle entre deux phases statoriques [H].
M_r :	Inductance mutuelle entre deux phases rotoriques [H].
θ :	Position angulaire entre le rotor et le stator
S, r:	Indices d'axes correspondent au stator et rotor.
$\Phi_{sa}, \Phi_{sb}, \Phi_{sc}$:	Les flux statorique [Wb].
$\Phi_{ra}, \Phi_{rb}, \Phi_{rc}$:	Les flux rotorique [wb].
f_{sa}, f_{sb}, f_{sc} :	Les coefficients de court-circuit.
N_s :	Nombre de spires statoriques par phase.
N_{cc} :	Nombres de spires en court-circuit.
L_{sf} :	Inductance de fuite statorique.
L_{rf} :	Inductance de fuite rotorique.

$V_{sa} V_{sb} V_{sc}$:	Tensions d'alimentation des phases statoriques.
$V_{ra} V_{rb} V_{rc}$:	Tensions d'alimentation des phases rotoriques.
Ω :	Vitesse de rotation mécanique.
M_{sr} :	Inductances mutuelle entre une phase de stator et une phase de rotor.
M_{ss} :	Inductance mutuelle entre deux phases statoriques.
R_r :	Résistance propre d'une phase rotorique.
MAS :	Machine Asynchrone.
θ :	Position du rotor.
W :	Vitesse électrique du rotor = $p\Omega$.
α :	Angle électrique entre deux mailles rotoriques.
J :	Moment d'inertie.
L :	Longueur active du rotor.
L_b :	Inductance d'une barre rotorique.
L_e :	Inductance totale de l'anneau de court- circuit.
N_r :	Nombre de barres rotoriques.
N_s :	Nombre de spires statorique par phase.
R_e :	Résistance totale de l'anneau de court- circuit.
R_s :	Résistance statorique.
R_r :	Résistance rotorique.
B_{sm} :	L'induction de la bobine statorique de la phase m.
Φ_{psm} :	Le flux principal statorique de la phase m.
L_{sc} :	L'inductance cyclique statorique.
R :	Rayon de la machine au milieu de l'entrefer.
L_{st} :	Inductance de fuite statorique.
L_{rp} :	Inductance principale d'une maille rotorique.
M_{rr} :	Inductance mutuelle entre deux mailles rotorique.
e :	Entrefer.
I_{rK} :	Le courant de maille K .
I_{bK} :	Le courant de barre K

Introduction générale

Le diagnostic des machines électriques s'est fortement développé dans le monde industriel car la volonté d'obtenir une chaîne de production de plus en plus sûre devient, pour certaines applications, indispensable. Les chaînes de production doivent être dotées de systèmes de protection fiables, car une quelconque défaillance, même la plus anodine, peut mener à un dommage matériel ou corporel inévitable. C'est pour éviter ces problèmes que la recherche, sur le plan mondial, s'emploie depuis plusieurs dizaines d'années à élaborer des méthodes de diagnostic. Celles-ci ont pour premier objectif de prévenir les utilisateurs d'un risque possible pouvant apparaître en un point particulier du système. Le travail proposé s'attarde sur le diagnostic des machines asynchrones triphasées à cage d'écureuil, la croissance de ce type de machine électrique, essentiellement due à sa simplicité de construction, son fiable coût d'achat et de fabrication, sa robustesse mécanique ou encore sa quasi-absence d'entretien, est telle que nous la trouvons maintenant dans tous les domaines industriels et en particulier dans les secteurs de pointe comme l'aéronautique, le nucléaire, la chimie ou encore les transports ferroviaires. À titre d'exemple, aux États-Unis, 70 millions de moteurs asynchrones sont fabriqués chaque année pour une population d'environ 300 millions de personnes. Toute proportion gardée, il est clair que ces moteurs nous conduisent à porter une attention de plus en plus sérieuse quant à leur fonctionnement et leur disponibilité.[1]

En effet, l'apparition d'un défaut conduit le plus souvent à un arrêt irrémédiable de la machine asynchrone entraînant, en conséquence, un coût de réparation non négligeable pour l'entreprise dans les cas des machines de fortes puissances sans oublier la perte de production occasionnée. Dans le domaine nucléaire, par exemple, il est indispensable d'assurer la sécurité des personnes et de matériel car aucun système, qu'il soit simple ou complexe, n'est à l'abri d'un dysfonctionnement. [1]

Depuis longtemps déjà, la rupture des barres dans les moteurs a fait l'objet de nombreux travaux, d'autres recherches ont suivi dans la même voie, ou ont été initiés dans le diagnostic d'autres défauts de la machine, dans ce contexte, le mémoire comporte quatre chapitres organisés comme suit :

- ❖ Le premier chapitre traite l'état de l'art du diagnostic de défauts de la MAS, qui parle des différents défauts qui peuvent apparaître dans les machines asynchrones et leurs causes et leurs effets aussi que les différentes méthodes de diagnostic.
- ❖ Le deuxième chapitre est consacré à la présentation du modèle triphasée de la MAS en vue d'étudier les défauts statorique.
- ❖ Le troisième chapitre est consacré au modèle multi enroulement en vue d'étudier les défauts rotoriques.

- ❖ Dans le quatrième chapitre on va étudier l'analyse des défauts à travers de l'analyse spectrale du courant, on utilisant la transformation de fourier rapide FFT, pour les défauts présents (dans le chapitre II et chapitre III). Ainsi que l'application des réseaux de neurones pour le diagnostic automatique des défauts de la machine asynchrone.

Chapitre I

État de L'art du diagnostic des défauts de la MAS

Chapitre I:Etat de L'art du diagnostic des défauts de la MAS

I.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous effectuons un panorama Statisticien des différents types de défaillances qui peuvent survenir sur les machines asynchrones, une étude de la plupart les causes et les conséquences de ces défauts qui pouvant se produire dans les machines asynchrones et présenter ainsi les paramètres indicateurs des défauts puis les méthodes de diagnostic de ces défauts. Nous présentons ensuite divers outils issus des techniques de traitement du signal pouvant être utilisés pour la détection d'un défaut électrique et/ou mécanique. Pour finir, nous discutons des méthodes de diagnostic actuellement appliquées à la machine asynchrone en précisant leurs avantages et leurs inconvénients puis proposer le problème.

I.2. Le Recensement des défauts de la MAS

La connaissance des éléments de constitution des machines asynchrones permet de comprendre de quelle façon le système est réalisé physiquement. Les machines asynchrones triphasées peuvent se décomposer, du point de vue mécanique, en trois parties distinctes : [8]

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

Une étude statistique, effectuée en 1988 par une compagnie d'assurance allemande de systèmes industriels sur les pannes des machines asynchrones de moyenne puissance (de 50[kW] à 200[kW]) à donner les résultats suivant: [1]

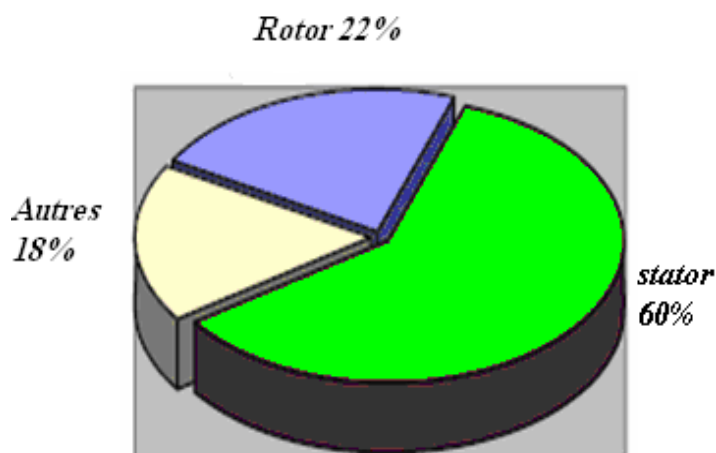


Figure I.1 Proportion des défauts.[1]

Nous constatons que les défauts dans le stator sont plus fréquents dans les machines de moyenne puissance.

La répartition des pannes dans les différentes parties du moteur est présentée sur la figure suivant:

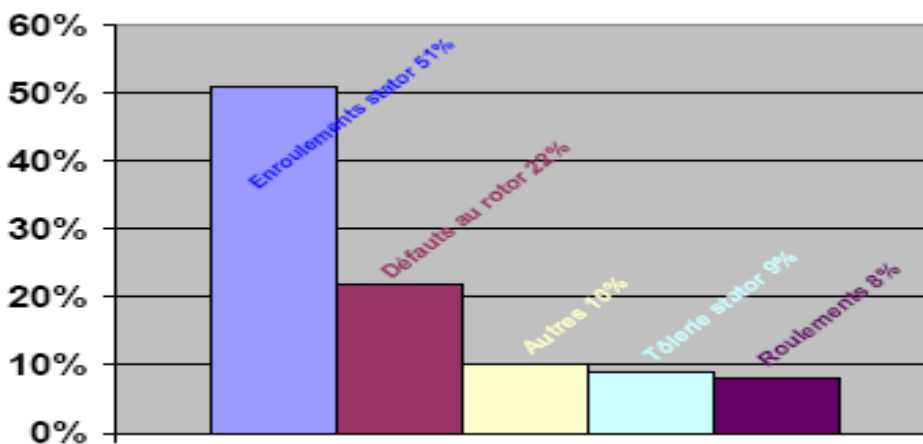


Figure I.2 Répartition des pannes sur les machines de faibles et moyennes puissances[1].

Une autre étude statistique faite sur des machines de grande puissance (de 100 [KW] à 1[MW]) donne des résultats qui sont présentés les valeurs suivant: [2][1]

les différentes parties	Roulement	enroulement de stator	défauts au rotor	couplage mécanique	autres
Le rapport	41%	13%	8%	4%	34%

Presque dans tous les recensements qu'on a fait on a vue des valeurs élevées de pannes dans le stator en générale et dans l'enroulement spécialement, les études précédentes permettent de classer les défauts suivant leur localisation :

I .2.1. Défauts statorique

L'apparition d'un défaut au niveau du stator de la machine asynchrone peut avoir des origines diverses, nous pouvons citer, par exemple, les défauts d'isolement dans un enroulement.

Les différentes causes pour ce type de défaut sont :

- Dégradation de l'isolant à la fabrication.
- Tension de l'enroulement supérieure à la limite du matériau d'isolation.
- Courant élevé dans l'enroulement dû à un court-circuit, une surcharge. Ceci entraîne une élévation de la température dégradant prématurément le matériau d'isolation.
- Vibrations mécaniques.
- Vieillessement naturel des isolants. Tous les matériaux isolants ont une durée de vie limitée. Même dans une utilisation 'normale', l'isolant finit naturellement par se dégrader.

- Fonctionnement dans un environnement sévère. [3]

Les défauts qui sont les plus récurrents, localisés au niveau du stator, peuvent être définis comme suit: défaut d'isolant, court-circuit entre spires, court-circuit entre phases, court-circuit entre phase et bâti, d'alimentation, défaut de circuit magnétique. [1]

I.2.1.1. Défauts d'isolant dans un enroulement

La dégradation des isolants dans les enroulements peut provoquer des courts-circuits, en effet, les différentes pertes (Joule, fer, mécanique,...) engendrent des phénomènes thermiques s'interprétant par une augmentation de la température des différents constituants du moteur, et les matériaux d'isolation ont une limite de température, de tension et mécanique. De ce fait, si l'environnement de travail d'un matériau d'isolation dépasse une de ces limites, ce matériau se dégrade de manière accélérée, puis finit par ne plus assurer sa fonction, dans ce cas, un court-circuit peut apparaître dans l'enroulement concerné. [1][2]

I.2.1.2. Court-circuit entre spires

Un court-circuit entre spires de la même phase est un défaut assez fréquent. Il apparaît à l'intérieur des encoches statorique, ce type de défaut peut être causé par une dégradation des isolants des spires du bobinage statorique, Ce défaut a pour origine un ou plusieurs défauts d'isolant dans l'enroulement concerné. Et lorsque les démarrages répétitifs de machine, Il entraîne une augmentation des courants statoriques dans la phase affectée, ont pour conséquence d'augmenter la température dans le cuivre (bobinage statorique). Cet effet cyclique provoque des dilatations et contractions répétitives de l'isolant. Cela pourrait entraîner des fissures dans l'isolant qui peuvent se propager et provoquer un début de court-circuit interne. [1][4][5]

I.2.1.3. Court-circuit entre phases

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

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

Les courants statoriques sont totalement déséquilibrés et ce déséquilibre est proportionnel au localisation du défaut. Dans le cas des machines asynchrones, la détection de ce type de défaut peut reposer sur le déséquilibre des courants de phases. [1]

I.2.1.4. Court-circuit phase/bâti

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

En présence de ce type de défaillance, la tension de la phase concernée ne change pas, cependant le courant circulant dans cette phase augmente avec la réduction de la résistance et de l'inductance. Cette augmentation du courant se traduit par une augmentation de la température pouvant entraîner des défauts d'isolant dans l'enroulement. De plus, cette défaillance va générer une composante homopolaire entraînant l'apparition d'un couple pulsatoire, une mesure du courant de fuite pourrait permettre de détecter ce type de défaut. [4][2]

I.2.1.5. Défaut de circuit magnétique (rupture de tôles)

Les efforts mécaniques sur les tôles et les conducteurs ont des composantes alternatives qui excitent des vibrations de la structure et ces défauts aboutissent dans la plupart des cas à une dissymétrie au niveau de fonctionnement de la machine, qui à son tour peut accentuer le problème par des phénomènes de surchauffe, de sur tension, d'élévation importante du courant, ect.... [4][2]

I.2.2. Défauts rotoriques

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

- thermique (surcharge,...).
- électromagnétique.
- résiduel (déformation,...).
- dynamique (arbre de transmission,...). [4]

La cage étant composée de barres et d'anneaux de court-circuit d'aluminium ou de cuivre, une rupture partielle ou totale d'un de ces composants peut être considérée comme un défaut électrique rotorique.

I.2.2.1. Rupture des barres (Cassures partielles ou totales)

La rupture ou cassure 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. 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 qui accéléré la détérioration de la machine, ainsi le couple diminue évidemment avec le nombre de barres cassées induisant un effet cumulatif de la défaillance. L'effet d'une cassure de barre augmentation rapidement avec le nombre de barres cassées. [5][1]

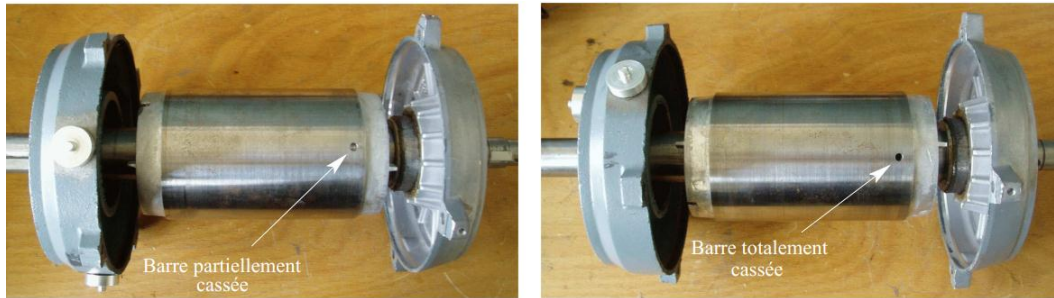


Figure I.3 Une barre partiellement cassée [5]. Figure I.4 Une barre complètement cassée [5].

I .2.2.2. Rupture d'anneaux

La rupture d'une portion de l'anneau de court-circuit dans une machine asynchrone à cage, est un défaut qui apparaît aussi fréquemment que la cassure de barres. Ces ruptures peuvent être dues à des bulles de coulées ou aux dilatations différentielles entre les barres et les anneaux Comme il est difficile de le détecter, ces portions d'anneaux de court-circuit véhiculent des courants plus importants que ceux des barres rotoriques, de ce fait, un mauvais dimensionnement des anneaux une détérioration des conditions de fonctionnement (température humidité,...) ou une surcharge de couple et donc de courants, peuvent entraîner leur cassure La rupture d'une portion d'anneau déséquilibre la répartition des courants dans les barres rotoriques et de ce fait, engendre un effet de modulation d'amplitude sur les courants statoriques similaire à celui provoqué par la cassure de barres.[1]

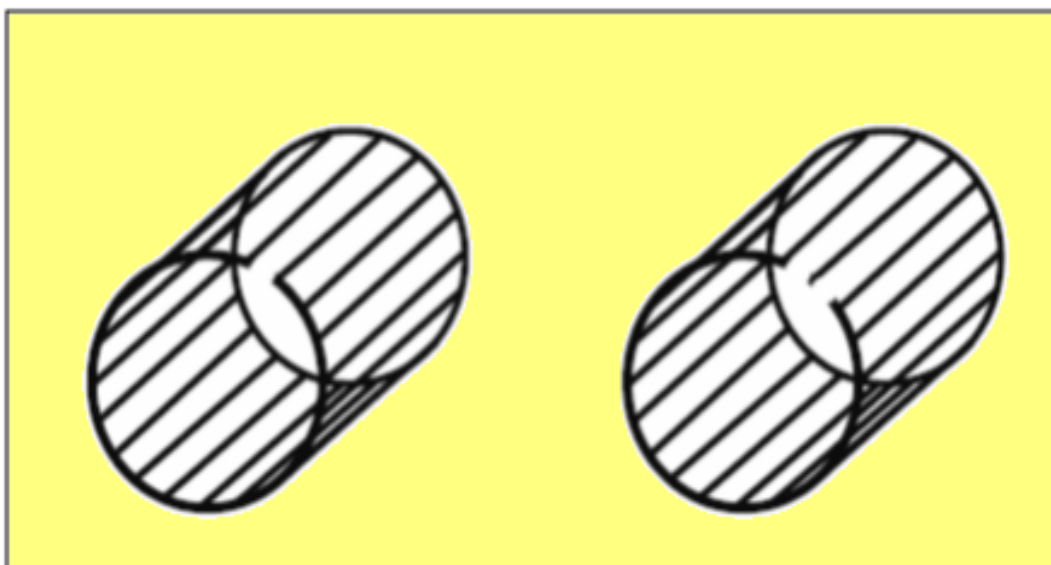


Figure I.5 Rupture d'une et deux portions adjacentes d'anneau de court-circuit [13].

I.2.2.3. Excentricité

L'excentration du rotor est l'un des problèmes les plus courants dans les machines tournantes. L'excentration peut être plane ou à trois dimensions ou inclinée. Dans une excentration plane, l'axe de rotation est parallèle à l'axe du stator. Dans une excentration à trois dimensions, l'axe de rotation n'est pas parallèle à l'axe du stator, et en réalité, une excentration ne se limite pas à un problème plan mais plutôt à trois dimensions. Cependant, la plupart des chercheurs ramènent le problème à un problème plan ; dans ce cas, on peut mettre en œuvre une méthode unique pour la détection d'une excentration qu'elle soit plane ou à trois dimensions. [6]

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 peut correspondre, ce qui engendre une dégradation de son isolation. D'autre part, cette augmentation a pour 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 [1].

La position du rotor par rapport au stator peut présenter des dissymétries qui sont regroupées en trois catégories:

- ❖ Excentricité statique : l'axe du rotor reste fixe et le centre de rotation de l'arbre du rotor n'est pas celui du centre géométrique du stator.
- ❖ excentricité dynamique : Le centre de rotation du rotor diffère du centre géométrique du stator et le centre du rotor tourne autour du centre géométrique de ce stator.
- ❖ excentricité mixte : dans laquelle l'axe du rotor tourne autour d'un axe différent de celui du stator.

Elle est donc la combinaison des excentrations statique et dynamique. Dans la plupart des machines tournantes, on observe cette dernière forme d'excentration. [6][7]



Figure I.6 Excentricité statique.

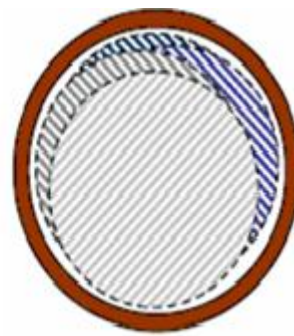


Figure I.7 Excentricité dynamique (plusieurs Positions du rotor au cours de la rotation).

I .2.3. Défauts mécanique

Les défaillances d'ordre mécaniques sont, en général, les plus vues parmi tous les défauts que compte la machine asynchrone. Ces défauts peuvent apparaître au niveau des roulements à billes, des flasques ou encore de l'arbre moteur, On énumérera par la suite certains de ces défauts. [8]

I .2.3.1. Défauts roulements

Les roulements sont constitués de quatre composants essentiels. Un organe externe, un organe interne, des organes roulants et un organe de lubrification, En fonction de l'application envisagée, les organes de roulement peuvent être des billes, des rouleaux ou des aiguilles. Chaque type de roulement possède des caractéristiques spécifiques en termes de charges radiales et axiales supportées, de vitesse limite ou encore de défaut d'alignement admissible. [9]

Nous nous concentrons sur un type de roulements à une rangée de billes que ces derniers constituent d'une bague externe, d'une bague interne et d'une rangée de billes maintenues par une cage, ainsi que de graisse pour la lubrification. [9]

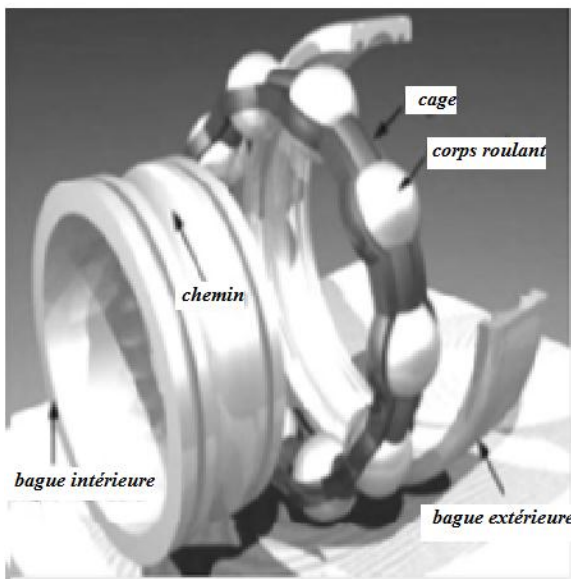


Figure I.8 Vue éclatée des éléments constitutifs
D'un roulement `a une rangée de billes. [9]

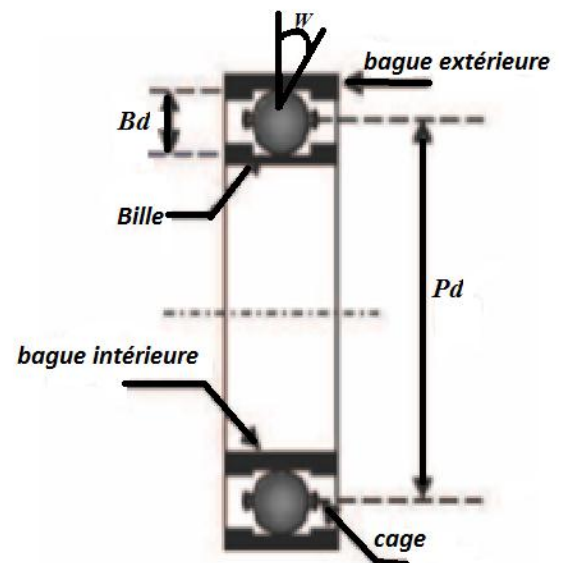


Figure I.9 Dimensions d'un roulement à billes.
[10]

Les défauts de roulements peuvent être causés par un mauvais choix de matériau à l'étape de fabrication. Les problèmes de rotation au sein de la culasse du roulement, causés par un roulement abîmé, écaillé ou fissuré, peuvent créer des perturbations au sein de la machine. Nous savons que des courants électriques circulent au niveau des roulements d'une machine asynchrone ce qui, pour des vitesses importantes peut provoquer la détérioration de ces derniers. [5]

Tout changement de l'uniformité du roulement produit des vibrations qui génèrent dans le courant statorique des raies spectrales de fréquences :

$$f_{roul} = /f_s - kf_v/ \quad (I.1)$$

D'où: $k=1, 2, 3..$, et f_v : est l'une des fréquences caractéristiques des vibrations, les fréquences caractéristiques des vibrations dépendent de l'élément du roulement affecté par un défaut et sont liées aux paramètres du roulement.

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

•Défauts au niveau d'une bille:

$$f_b = \frac{Pd}{Bd} * f_{rot} \left[1 - \left(\frac{Bd}{Pd} c \cos(w) \right)^2 \right] \quad (I.2)$$

•Défauts sur la bague intérieure:

$$f_{b.int} = \frac{n_b}{2} * f_{rot} \left[1 + \left(\frac{Bd}{Pd} c \cos(w) \right) \right] \quad (I.3)$$

•Défauts sur la bague extérieure:

$$f_{b.ext} = \frac{n_b}{2} * f_{rot} \left[1 - \left(\frac{Bd}{Pd} c \cos(w) \right) \right] \quad (I.4)$$

Où: Bd le diamètre d'un élément roulant, Pd la distance entre les centres des billes, diamétralement opposées, n_b est le nombre de bille, w angle de contact des billes avec les bagues du roulement en radians et f_{rot} est la fréquence de rotation du rotor.

$$f_{cage} = \frac{f_{rot}}{2} \left[1 - \left(\frac{Bd}{Pd} c \cos(w) \right) \right] \quad (I.5)$$

f_{cage} La fréquence de la cage. [11][10]

Classiquement, ce défaut est diagnostiqué à partir du spectre d'une mesure acoustique ou vibratoire, En partant du principe que l'entrefer n'est plus constant lors d'une défaillance des roulements, montre que cette information est aussi présente dans le spectre du courant. [4]

I.2.3.2. Défaillances du flasque

Les défauts créés par les flasques de la machine asynchrone sont le plus généralement causés à l'étape de fabrication. En effet, un mauvais positionnement des flasques provoque un désalignement des roulements à billes, ce qui induit une excentricité au niveau de l'arbre de la machine. Il est possible de détecter ce type de défaillance par une analyse vibratoire ou une analyse harmonique des courants absorbés par la machine. [8]

I.2.3.3. Défaillances de l'arbre

L'arbre de la machine peut laisser paraître une fissure due à l'utilisation d'un mauvais matériau lors de sa construction, à court ou long terme, cette fissure peut mener à une fracture nette de l'arbre provoquant ainsi un arrêt irrémédiable de la machine asynchrone, les milieux corrosifs peuvent aussi affaiblir la robustesse de l'arbre de la machine par exemple, l'humidité peut provoquer des microfissures et conduire à une destruction complète de la machine. Une excentricité statique, dynamique ou mixte peut induire des efforts considérables sur l'arbre moteur, guidant ainsi une fatigue supplémentaire, On détecte ce type de défaillance par analyse vibratoire, une analyse par ultrason, une analyse fréquentielle des courants absorbés ou simplement une analyse visuelle de l'arbre de la machine. [5]

I.3. Causes des défauts

Les défaillances peuvent être d'origines diverses : Électriques, mécaniques, thermiques ou bien encore magnétiques. Leurs causes sont multiples et peuvent se classer en trois groupes. [1][12]

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

I.4. Conséquences des défauts

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

- a- Une augmentation des oscillations du couple et de la vitesse avec réduction du couple moyen.
- b- Appel supplémentaire de courant.
- c- Déséquilibre au niveau de la tension et du courant de ligne.
- d- Un échauffement excessif et donc un vieillissement accéléré.
- e- Augmentations des arrêts non programmés, des pertes de production, et par conséquent, du rendement global. [13][14]

I.5. Paramètres indicateurs des défauts

Les paramètres caractéristiques de la MAS peuvent servir de très bons indicateurs de défaut, et pour la détection d'un dysfonctionnement de machine électrique, il est nécessaire de posséder :

- une bonne connaissance du comportement de la machine, de son état et de son fonctionnement.
- une bonne connaissance des défaillances et de leurs conséquences sur le fonctionnement de la machine.

À ce jour, c'est l'analyse des grandeurs mesurables et les signaux de défaut qui est la démarche la plus souvent utilisée pour le diagnostic des défauts sur les machines électriques, les Paramètres indicateurs des défauts les plus fréquemment utilisés sont:

- électrique: analyse des grandeurs électriques aux bornes de la machine (tensions, courants, ...).
- mécanique: analyse de la vitesse, du couple ou même des vibrations (accéléromètres...).
- thermique: analyse de la température de la machine (sonde de température, mesure infra rouge).
- chimique: analyse des huiles et des gaz.
- électromagnétique: analyse des flux dans l'entrefer, des flux axiaux, des flux de fuite ou des champs électriques externes. [14][7]

I.6. Méthodes de diagnostic

Les méthodes de diagnostic sont nombreuses et variées, elles correspondent à la diversité des problèmes rencontrés, si la prise de décision conduit à déclarer le processus défaillant, il convient alors de choisir une méthode de diagnostic. Les méthodes de diagnostic sont divisées en deux grandes familles:[19]

- les méthodes internes.
- les méthodes externes.

I.6.1. Diagnostic Par les méthodes internes

Le diagnostic de défaillances par des méthodes internes requiert un modèle du système à surveiller, et s'il n'y en a pas, en élaborer un qui convienne (fiable et suffisamment précis) ce modèle peut varier selon les objectifs. Il peut être plus ou moins agrégé, représentatif d'un modèle de bon fonctionnement ou de fonctionnement caractéristique d'une ou plusieurs défaillances. Habituellement un modèle est une description formelle (mathématique) du système à surveiller. Mathématiquement on peut avoir plusieurs modèles du même système qui comme en automatique. [15]

I .6.1.1. La méthode du modèle

Cette méthode consiste à comparer les grandeurs déduites d'un modèle représentatif du fonctionnement des différentes entités du processus avec les mesures directement observées sur le processus industriel. La présence d'un écart fournit l'indication qu'en amont du module modélisé une anomalie est en cours d'apparition. [19]

I .6.1.2. Redondance physique ou matérielle

La redondance physique consiste à utiliser plusieurs actionneurs, capteurs, processeurs et logiciels pour mesurer et/ou contrôler une variable particulière, un principe de vote est appliqué sur les valeurs redondantes pour décider si une faute est présente ou non. Cette approche entraîne un coût important en instrumentation mais s'avère extrêmement fiable et simple à implanter. Elle est mise en œuvre essentiellement sur des systèmes à hauts risques tels que les centrales nucléaires ou les avions.

Le diagnostic utilisant la redondance physique se limite la surveillance des éléments redondants (capteur, actionneurs, ...) présents sur une installation. À l'aide de cette unique technique, il ne sera pas possible de détecter des pannes survenant sur des éléments non redondants. [16]

I .6.1.3. Redondance analytique

Depuis les travaux fondateurs de Potter et Suman en 1977, le problème de génération de relations de redondance analytique a fait l'objet de très nombreux travaux. Ces notions ont ensuite été généralisées par Labarrère et Mironovskii, puis par Chow et Willisky, et puis par Lou Willisky et Verghese pour l'emploi de la redondance temporelle, il consiste à exploiter les contraintes liant les différentes variables du système. Ces contraintes peuvent souvent s'exprimer sous la forme de relations analytiques liant les variables connues (relations d'entrée/sortie ou de sortie/sortie). Ces relations sont appelées relations de redondances analytiques. Le principe de la surveillance consiste à vérifier la fermeture algébrique de ces relations en utilisant les mesures prélevées en ligne sur le système. Le concept de redondance analytique repose sur l'utilisation d'un modèle mathématique du système à surveiller. Pour cette raison, les méthodes utilisant la redondance analytique pour la surveillance sont appelées méthodes à base de modèle. Le principe de la surveillance utilisant un modèle peut être séparé en deux étapes : la génération de résidus et la prise de décision. [15][16]

I .6.2. Diagnostic Par les méthodes externes

Ces méthodes supposent qu'aucun modèle n'est disponible pour décrire les relations de cause à effet, la seule connaissance repose sur l'expertise humaine confortée par un solide retour d'expérience. Dans cette catégorie, on retrouve toutes les méthodes basées sur l'intelligence artificielle et/ou les approches probabilistes. [19]

I.6.2.1. Méthodes basées sur l'intelligence artificielle (IA)

En déception des diverses techniques citées précédemment, ces dernières années, la surveillance et la détection de défaut des machines électriques se sont éloignées des techniques traditionnelles pour s'orienter vers des techniques dites d'intelligence artificielle (IA). [3]

L'intelligence artificielle (IA) est une branche de l'informatique qui traite la reproduction par la machine de certains aspects de l'intelligence humaine tels qu'apprendre à partir d'une expérience passée à reconnaître des formes complexes et à effectuer des déductions.

Parmi ces méthodes nous pouvons citer:

I.6.2.1.1. Reconnaissances des formes (RdF)

Utilisées très peu à ce jour. Un vecteur de paramètres, appelé vecteur de forme, est extrait à partir de plusieurs mesures. Les règles de décision adoptées permettent de classer les observations, décrites par le vecteur de forme, par rapport aux différents modes de fonctionnement connus avec et sans défaut.

Pour classer ces observations, il faut obligatoirement être en mesure de fournir les données de chaque mode de fonctionnement. Pour cela, il faut disposer d'une base de données, ce qui permettra ensuite de construire la classe correspondante au défaut créé.

Une autre voie consisterait à calculer les paramètres du vecteur de forme en effectuant des simulations numériques de la machine étudiée. [17]

La reconnaissance des formes "RdF" repose sur le classement des objets ou des formes en les comparant à des formes-types. De manière générale, 2 types de RdF se distinguent :

- La RdF structurelle qui se base sur une représentation des formes à l'aide de grammaires.
- La RdF statistique qui s'appuie sur une représentation numérique des formes. [2]

À un mode de fonctionnement, correspondant à une classe, Pour cela, on procède comme suit:

- ❖ Choisir les paramètres représentant les observations, ce qui permet de définir l'espace de représentation.
- ❖ Réaliser une base d'apprentissage.
- ❖ Définir les différents modes de fonctionnement, ou classes.
- ❖ Construire une règle de décision permettant d'associer une nouvelle forme à un mode de fonctionnement. [3]

I.6.2.1.2. Diagnostic par réseaux de neurones

Un réseau de neurone est un modèle de calcul dont la conception est très schématiquement inspirée du fonctionnement de vrais neurones humains donc Le principe s'inspire des neurones

biologiques, pour identifier des défauts dans un système, le diagnostic réalisé par réseaux de neurones doit disposer d'un nombre suffisant d'exemples de bon fonctionnement et de défauts pour pouvoir les apprendre. Pendant la phase d'apprentissage, les exemples sont présentés au réseau en entrée avec les diagnostics correspondants à la sortie. [4]

- L'intérêt des réseaux de neurones dans le domaine du diagnostic se résume en deux points :

- 1) Le premier point est la faculté du réseau de neurones d'être utilisé en tant que règle de décision dans un processus d'automatisation de l'opération du diagnostic.
- 2) Le second point est la faculté d'apprentissage et de mémorisation d'un grand volume d'information.

A. Les avantages des réseaux de neurones sont :

- ✓ Rapidité: Très utile lorsque le diagnostic doit être conduit en ligne.
- ✓ Robustesse : Un réseau de neurones est robuste surtout vis-à-vis du bruit.
- ✓ la principale raison de leur intérêt en diagnostic industriel est leur faculté d'apprentissage et la mémorisation d'un grand volume d'information. [3]

B. Toutefois, un réseau de neurone présente des inconvénients tels que :

- L'apprentissage peut être long et difficile.
- L'apprentissage est gourmand en temps de calcul. Par ailleurs, il doit être réalisé sur toutes les données à la fois, avec le risque que le réseau oublie les résultats précédents.
- Un réseau de neurones ne fonctionnera pas, forcément, correctement hors de sa plage d'apprentissage
- L'inconvénient majeur est d'arriver à déterminer une méthodologie pour maîtriser les problèmes inhérents. [2]

D'ailleurs, en ce qui concerne le diagnostic des machines électriques, cette méthode a été largement utilisée. Ritchie a proposé un système de reconnaissance et de classification des défauts de la machine asynchrone, Ce système est basé sur les réseaux de neurones à base de fonctions radiales (RBF). Le système développé par cet auteur permet la détection des défauts électriques et mécaniques de la machine asynchrone. Quatre vecteurs caractéristiques ont été extraits à partir des spectres de puissance des signaux vibratoires de la machine. Ces vecteurs sont fournis à l'entrée du réseau de neurones. Le système proposé permet, également, d'estimer la sévérité des défauts détectés.

"Filippetti" a utilisé les réseaux de neurones, notamment, pour la détection et l'estimation du nombre de barres cassées. [2]

I.6.2.1.3. Diagnostic par systèmes experts

De manière générale, un système expert est un outil capable de reproduire les mécanismes cognitifs d'un expert, dans un domaine particulier. Cet outil est capable de répondre à des questions,

en effectuant un raisonnement à partir de faits et de règles connus. Il peut donc servir d'outil d'aide à la décision, l'aide au diagnostic de systèmes industriels utilisant des systèmes experts possède l'intérêt et la propriété essentiels de pouvoir restituer à des non-experts les connaissances acquises par les spécialistes d'un domaine technique précis. « Un système expert est un système informatique destiné à résoudre un problème précis à partir d'une analyse et d'une représentation des connaissances et du raisonnement d'un (ou plusieurs) spécialiste(s) de ce problème». [15]

I .6.2.1.4. Logique floue

La logique floue proposée par L.Zadeh dans les années 1965, a été introduite en 1969 par Goguen et est présentée comme un cadre pour le raisonnement approximatif, C'est la logique qui régit les mécanismes mentaux humains beaucoup plus souvent que la logique formelle, car si l'on a besoin d'interpréter un événement entaché d'incertitude, on procède assez souvent par donner des explications logiques en exploitant toutes les règles disponibles pour approcher le résultat obtenu. En d'autre terme, c'est la logique qui s'efforce d'apporter des solutions à un problème clef de toutes les réalisations pratiques en exploitant le savoir-faire de l'opérateur expert. Avant d'aborder, le raisonnement en logique floue, il est nécessaire de définir ses bases. [18]

I .7. Position du problème à résoudre

A la lumière de l'état de l'art du diagnostic de la machine asynchrone, il a été constaté que les défauts des machines sont très nombreux leurs signatures sont très variantes. En conséquence, pour pouvoir simuler la plupart des défauts, il est nécessaire d'élaborer des modèles mathématiques qui peuvent révéler ces signatures. À cet effet, nous nous intéresserons au développement des modèles de la MAS qui permettent de simuler certains défauts à savoir : les défauts statoriques et les défauts rotoriques. Ces modèles dites multi enroulements seront dédiés au diagnostic pour en sortir certains paramètres indicateurs des défauts.

I .8. Conclusion

Ce chapitre est essentiellement consacré à l'état de l'art de la machine asynchrone, nous avons rappelé les éléments constructifs et panorama de Recensement des défauts de la machine asynchrone à cage d'écurieil et nous avons également décrit la majorité des défauts qui peuvent apparaître ainsi que leurs causes et influences sur le comportement de la machine, puis discutons des paramètres indicateurs de défauts et les méthodes de diagnostic.

Le chapitre suivant sera consacré à la modélisation de la machine en vue d'étudier les défauts statoriques (modèle multi enroulements triphasé).

Chapitre II

Modèle triphasé de la MAS en vue d'étudier

Les Défaits Statorique

Chapitre II: Modèles triphasé de la MAS en vue d'étudier les défauts statorique

II.1. Introduction

Le diagnostic des défaillances par le suivi paramétrique peut reposer sur l'estimation des évolutions de certains paramètres électriques de la machine. Les variations des paramètres sélectionnés doivent être représentatives des défauts considérés.

Le moteur est constitué de deux parties; le circuit électrique et le circuit magnétique, le circuit électrique est constitué de trois bobinages répartis au stator, alimentés en triphasé alternatif en courant ou en tension. Pour notre étude le choix est porté sur une alimentation en tension, généralement utilisée pour les moteurs asynchrones. Le rotor du moteur est constitué de barres court-circuités et disposées en cage d'écurieuil ou d'un bobinage rotorique (dans le cas d'une machine à rotor bobiné). Il est représenté dans le modèle triphasé-triphasé par trois phases court-circuités entre elles et ramenées au stator.

Dans ce chapitre, nous allons présenter une autre méthode de modélisation de la machine asynchrone, elle est basée sur la théorie d'accouplement électromagnétique des circuits électriques, cette méthode prend en considération les défauts statoriques de la machine. Un système d'équations différentielles décrivant la machine asynchrone (système triphasé).

Cette modélisation nécessite une étude précise et rigoureuse des signatures des défauts de la machine asynchrone. [20]

II.2 Modélisation de la machine asynchrone en régime normal (modèle triphasé)

II.2.1. Hypothèses simplificatrices

L'étude de la modélisation de la machine asynchrone sera faite dans le contexte habituel d'hypothèses simplificatrices suivantes. [12] [20]

- L'entrefer constant.
- L'effet des encoches négligé.
- La distribution spatiale sinusoïdale des forces magnétomotrices d'entrefer.
- Le circuit magnétique non saturé et à perméabilité constante.
- Les pertes ferromagnétiques négligeables.
- L'influence de l'effet de peau et de l'échauffement sur les caractéristiques, ne sont pas pris en compte.
- L'additivité des flux.

- La constante des inductances propres
- La structure principale de la machine asynchrone est représentée par la figure II.1, elle est composée de six enroulements dans l'espace électrique, les axes statoriques sont décalés entre eux d'un angle $(2\pi/3)$, ainsi que les axes rotoriques. L'angle θ représente l'angle entre l'axe de la phase rotorique de référence (R_a) et l'axe fixe de la phase statorique de référence (S_a). Les flux sont considérés positifs selon le sens des axes des enroulements de la machine asynchrone.

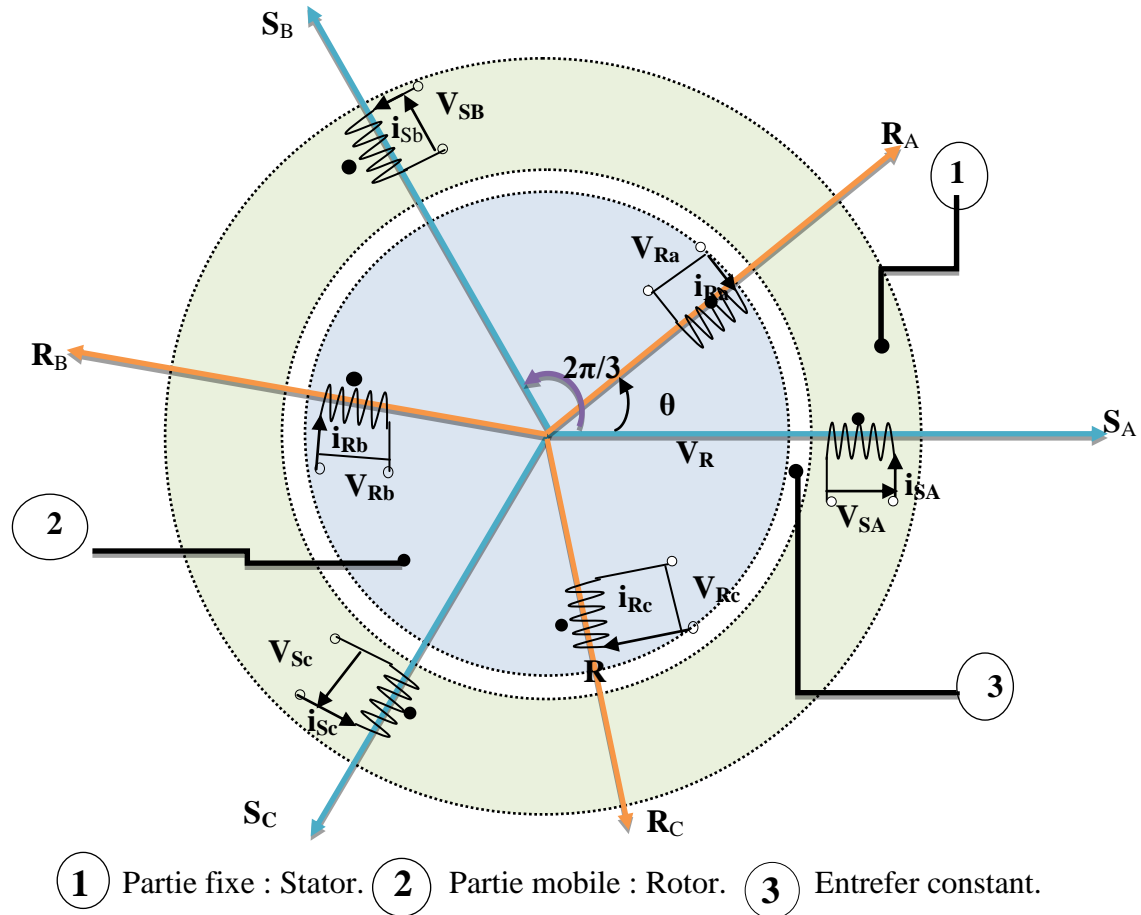


Figure II.1: Représentation des enroulements de la machine asynchrone triphasée dans l'espace électrique.

II.2.2. Modèle triphasé équivalent d'une machine asynchrone

La machine peut être modélisée par les équations suivantes : [20] [22].

La loi de Faraday permet d'écrire :

$$V = RI + \frac{d\Phi}{dt} \tag{II.1}$$

$$[U_s] = [R_s][I_s] + [P\Phi_s] \tag{II.2}$$

Cette notation est l'écriture condensée de :

$$\begin{bmatrix} U_{sa} \\ U_{sb} \\ U_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{sa} \\ \Phi_{sb} \\ \Phi_{sc} \end{bmatrix} \quad (II.3)$$

$$[0] = [R_r][I_r] + [P\Phi_r] \quad (II.4)$$

Cette notation est l'écriture condensée de :

$$\begin{bmatrix} U_{ra} \\ U_{rb} \\ U_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{ra} \\ \Phi_{ab} \\ \Phi_{rc} \end{bmatrix} \quad (II.5)$$

$$[\Phi_s] = ([M_{ss}] + [L_{sf}])[I_s] + [M_{sr}][I_r] \quad (II.6)$$

$$[\Phi_r] = [M_{rs}][I_s] + ([M_{rr}] + [L_{rf}])[I_r] \quad (II.7)$$

Où

-P désigne opérateur différentiel.

Les variables $[U_s] = \begin{bmatrix} U_{sa} \\ U_{sb} \\ U_{sc} \end{bmatrix}$, $[I_s] = \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix}$, $[\Phi_s] = \begin{bmatrix} \Phi_{sa} \\ \Phi_{sb} \\ \Phi_{sc} \end{bmatrix}$ représentent les tensions, les courants, et

les flux au stator respectivement.

Les variables $[I_r] = \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix}$, $[\Phi_r] = \begin{bmatrix} \Phi_{ra} \\ \Phi_{ab} \\ \Phi_{rc} \end{bmatrix}$ représentent les courants, et les flux au rotor respectivement.

Les inductances sont données par les expressions suivantes :

$$[L_{sf}] = \begin{bmatrix} l_{sf} & 0 & 0 \\ 0 & l_{sf} & 0 \\ 0 & 0 & l_{sf} \end{bmatrix} \quad (II.8)$$

$$[M_{ss}] = M_s \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ -1/2 & 1 & -1/2 \\ -1/2 & -1/2 & 1 \end{bmatrix} \quad (II.9)$$

$$[M_{sr}] = [M_{rs}]^t = M \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(\theta) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (II.10)$$

Avec :

La résistance de chaque phase statorique est proportionnelle au nombre de spires utiles. On écrit alors la matrice des résistances statoriques $[R_s]$ est donnée par :

$$[R_s] = R_s \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (II.11)$$

Lorsque le moteur tourne, les coefficients $[M_{sr}]$ et $[M_{rs}]$ ne sont pas constante, ils varient en fonction de l'angle θ position angulaire entre le rotor et le stator.

Ceci rend le modèle triphasé équivalent difficilement utilisable tant en commande qu'en surveillance, dans l'approche qui suit une transformation mathématique est appliqué sur les équations du modèle précédent afin de rendre l'ensemble calculable en ligne.

II.2.3. Définition de la matrice de transformation

Le champ magnétique créé par le courant circulant au rotor à la même pulsation que celui créé par le courant circulant au stator, ainsi, le champ magnétique créé par un courant statorique fictif. La relation entre ce courant fictif et le courant rotorique est donné par une transformation mathématique. En utilisant cette transformation l'ensemble des variables ayant la même pulsation que les variables du stator. Ainsi, tous les paramètres du modèle seront indépendants de la position angulaire θ la transformation est donné par la matrice suivante:

$$[T] = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) + \frac{1}{2} & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) + \frac{1}{2} & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) + \frac{1}{2} \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) + \frac{1}{2} & \cos(\theta) + \frac{1}{2} & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) + \frac{1}{2} \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) + \frac{1}{2} & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) + \frac{1}{2} & \cos(\theta) + \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (II.12)$$

Cette matrice est orthogonale:

$$[T]^{-1} = [T]^T \quad (II.13)$$

Remarque: Cette matrice permet d'obtenir un nouveau modèle triphasé dont les inductances mutuelles sont indépendantes de l'angle téta (coefficient constants).

II.2.4. Transformation des équations du modèle triphasé

Considérant l'équation (II.6) en introduisant la matrice [T] comme suit:

$$[\Phi_s] = ([M_{ss}] + [L_{sf}])[I_s] + [M_{sr}][I_r] = [M_s][I_s] + [M_{sr}][I_r] = [M_s][I_s] + [M_{sr}][I_r][T]^{-1}[T] \quad (II.14)$$

Ceci conduit à:

$$[\Phi_s] = [M_s][I_s] + [M_{sr}^s][I_r^s] \quad (II.15)$$

Où :

$$[M_{sr}^s] + [M_{sr}][T]^{-1} \quad (II.16)$$

$$[I_r^s] = [I_r][T] \quad (II.17)$$

Avec:

$$[M_{sr}^s] = \begin{bmatrix} M & -M/2 & -M/2 \\ -M/2 & M & -M/2 \\ -M/2 & -M/2 & M \end{bmatrix} \quad (II.18)$$

En multipliant à gauche par [T] l'équation (II.7) on obtient :

$$[\Phi_r^s] = [M_{rs}^s] [I_s] + [M_r^s] [I_r^s] \quad (II.19)$$

Où :

$$\begin{cases} [M_{rs}^s] = [M_{rs}] [T] \\ [M_r^s] = [M_r] [T]^{-1} [T] \\ [\Phi_r^s] = [\Phi_r] [T] \\ [I_r^s] = [I_r] [T] \end{cases} \quad (II.20)$$

On peut montrer que les deux propriétés suivantes satisfaites :

$$[M_{rs}^s] = [M_{rs}^s]^T \quad (II.21)$$

$$[M_r^s] = [M_r] \quad (II.22)$$

Considérant maintenant l'équation (II.4) :

$$[0] = [R_r][I_r] + P[\Phi_r] \Rightarrow [0] = [R_r][I_r][T]^{-1}[T] + P([T]^{-1}[T][\Phi_r])$$

$$[0] = [T]^{-1}[R_r][I_r][T] + P([T]^{-1}[T][\Phi_r]) \quad (II.23)$$

En multipliant à gauche par [T] on obtient

$$[0] = [T][T]^{-1}[R_r][I_r][T] + [T]P([T]^{-1}[T][\Phi_r]) \quad (II.24)$$

$$[0] = [R_r][I_r^s] + [T]P([T]^{-1})[\Phi_r^s] + P[\Phi_r^s] \quad (II.25)$$

Cette équation peut être écrite sous la forme

$$[0] = [R_r][I_r^s] + (1 - S)W_N[K_{rs}^{sp}] P[\Phi_r^s] \quad (II.26)$$

Où:

$$[K_{rs}^{sp}] = \begin{bmatrix} 0 & \frac{\sqrt{3}}{3} & -\frac{\sqrt{3}}{3} \\ -\frac{\sqrt{3}}{3} & 0 & \frac{\sqrt{3}}{3} \\ \frac{\sqrt{3}}{3} & -\frac{\sqrt{3}}{3} & 0 \end{bmatrix} \quad (II.27)$$

Les équations (II.2), (II.26), (II.15), (II.19) représentent un nouveau modèle triphasé dans lequel

Tous les paramètres peuvent être calculés en ligne.

$$\begin{cases} [U_s] = [R_s][I_s] + [P\Phi_s] \\ [0] = [R_r][I_r^s] + (1 - S)W_N[K_{rs}^{sp}]P[\Phi_r^s] \\ [\Phi_s] = [M_s][I_s] + [M_{sr}^s] [I_r^s] \\ [\Phi_r^s] = [M_{rs}^s] [I_s] + [M_r^s] [I_r^s] \end{cases}$$

Puisque $[M_r^s]$ est une matrice de rang plein, elle est inversible, à partir de (II.19) nous obtenons

$$[I_r^s] = [M_r^s]^{-1}([\Phi_r^s] - [M_{rs}^s] [I_s]) \quad (II.28)$$

En substituant cette expression dans l'équation (II.26) on obtient:

$$[0] = [R_r][M_r^s]^{-1}([\Phi_r^s] - [M_{rs}^s] [I_s]) + (1 - S)W_N[K_{rs}^{sp}][\Phi_r^s] + P[\Phi_r^s] \quad (II.29)$$

Ce qui est équivalent

$$[0] = ([R_r][M_r^s]^{-1} + (1 - S)W_N[K_{rs}^{sp}])[\Phi_r^s] - [R_r][M_r^s]^{-1}[M_{rs}^s][I_s] + P[\Phi_r^s] \quad (II.30)$$

En substituant l'expression de l'équation (II.28) dans l'équation (II.15) on obtient

$$[\Phi_s] = [M_s][I_s] + [M_r^s]^{-1}[M_{rs}^s](\Phi_r^s - [M_{rs}^s][I_s]) \quad (II.31)$$

Qui est équivalent à

$$[\Phi_s] = ([M_s] - [M_r^s]^{-1}[M_{sr}^s][M_{sr}^s])[I_s] + [M_r^s]^{-1}[M_{sr}^s][\Phi_r^s] \quad (II.32)$$

En utilisant (II.32) et (II.2) il vient:

$$\begin{aligned} [U_s] &= [R_s][I_s] + [P\Phi_s] \\ [U_s] &= [R_s][I_s] + P([M_s] - [M_r^s]^{-1}[M_{sr}^s][M_{rs}^s])[I_s] + [M_r^s]^{-1}[M_{sr}^s][\Phi_r^s] \\ [U_s] &= [R_s][I_s] + P([M_s] - [M_r^s]^{-1}[M_{sr}^s][M_{rs}^s])[I_s] + P[M_r^s]^{-1}[M_{sr}^s][\Phi_r^s] \end{aligned} \quad (II.33)$$

Ce qui donne

$$[U_s] = [R_s][I_s] + P([M_s] - [M_r^s]^{-1}[M_{sr}^s][M_{rs}^s])[I_s] + [M_r^s]^{-1}[M_{sr}^s]P[\Phi_r^s] \quad (II.34)$$

À partir d'(II.30) on obtient:

$$P[\Phi_r^s] = [R_r][M_r^s]^{-1}[M_{rs}^s][I_s] + [R_r][M_r^s]^{-1}(1 - S)W_N[K_{rs}^{sp}][\Phi_r^s] \quad (II.35)$$

Ce qui donne en utilisant(II.34) et (II.35)

$$\begin{aligned} [U_s] &= [R_s][I_s] + ([M_s] - [M_r^s]^{-1}[M_{sr}^s][M_{rs}^s])P[I_s] + [M_{sr}^s][M_r^s]^{-1}([R_r][M_r^s]^{-1}[M_{rs}^s][I_s]) - \\ &[M_r^s]^{-1}[M_{sr}^s]([R_r][M_r^s]^{-1}(1 - S)W_N[K_{rs}^{sp}][\Phi_r^s]) \end{aligned} \quad (II.36)$$

Ce qui conduit à :

$$\Gamma P[I_s] = ([U_s] - ([R_s] + [M_{sr}^s][M_r^s]^{-1}[R_r][M_r^s]^{-1}[M_{rs}^s])[I_s] + [M_{sr}^s][M_r^s]^{-1}([R_r][M_r^s]^{-1} + (1 - S)W_N[K_{rs}^{sp}])[\Phi_r^s]) \quad (II.37)$$

Avec :

$$\Gamma = [M_s] - [M_{sr}^s][M_r^s]^{-1}[M_{rs}^s] \quad (II.38)$$

Finalement, nous obtenons

$$\begin{aligned} P[I_s] &= \Gamma^{-1}([U_s] - ([R_s] + [M_{sr}^s][M_r^s]^{-1}[R_r][M_r^s]^{-1}[M_{rs}^s])[I_s]) + \Gamma^{-1}[M_{sr}^s][M_r^s]^{-1}([R_r][M_r^s]^{-1} + \\ &(1 - S)W_N[K_{rs}^{sp}])[\Phi_r^s] \end{aligned} \quad (II.39)$$

Les équations (II.35) et (II.39) représentent le modèle triphasé de la machine asynchrone.

II.2.4.1 Équations mécaniques :

L'équation de mouvement est donnée par:

$$J \frac{d}{dt} \Omega + f\Omega = C_e - C_r \quad (II.40)$$

Le couple est donné par l'expression suivante :

$$[C_e] = P \frac{M_{sr}}{L_r} ([I_s] \wedge [\Phi_r])$$

$$C_e = P \frac{M_{sr}}{L_r} [(i_{sb} \Phi_{rc} - i_{sc} \Phi_{rb}) - (i_{sa} \Phi_{rc} - i_{sc} \Phi_{ra}) + (i_{sa} \Phi_{rb} - i_{sb} \Phi_{ra})] \quad (II.41)$$

II.1.6. Simulation de la machine asynchrone dans le régime normal

Une caractéristique importante du modèle est la nature des variables d'état. Dans la plupart des modèles de machines électriques, les variables d'état sont généralement les courants circulant dans les divers enroulements de la machine ou les flux de ces mêmes enroulements. Le choix devrait être dicté par le système d'équations qui requiert le moins de calcul.

Pour une machine asynchrone triphasée alimentée en tension, les tensions statoriques : U_{sa}, U_{sb}, U_{sc} représentent les variables de commande, et nous considérons les courants Statoriques : i_{sa}, i_{sb}, i_{sc} Les flux rotoriques $\Phi_{ra}, \Phi_{rb}, \Phi_{rc}$ et la pulsation mécanique w comme variables d'état, le couple résistant C_r étant comme perturbation.

Considérant le modèle triphasé de la machine asynchrone et la matrice de transformation, on obtient un nouveau modèle triphasé qui peut être utilisé pour le diagnostic ainsi que pour la commande.

Pour ce nouveau modèle, on cherche à obtenir un système d'équation écrit sous forme:

$$\begin{cases} \dot{X} = AX + BU \\ Y = CX \end{cases} \quad (II.42)$$

[A]: Matrice d'évolution.

[B]: Matrice de commande.

[U] : $[u_{sa} u_{sb} u_{sc} \ 0 \ 0 \ 0]^T$: Vecteur de commande.

En choisissant les variables d'état: i_{sabc} et Φ_{rabc} on obtient le vecteur [X]:

$$[X] = [i_{sa} i_{sb} i_{sc} \ \Phi_{ra} \ \Phi_{rb} \ \Phi_{rc}]^T$$

Après arrangement des équations, on obtient le système suivant :[22]

$$\begin{cases} \frac{di_{sa}}{dt} = K_{A1}i_{sa} + K_{A2}i_{sb} + K_{A3}i_{sc} + G_{A1}\Phi_{ra} + G_{A2}\Phi_{rb} + G_{A3}\Phi_{rc} + V_{A1}U_{sa} + V_{A2}U_{sb} + V_{A3}U_{sc} \\ \frac{di_{sb}}{dt} = K_{B1}i_{sa} + K_{B2}i_{sb} + K_{B3}i_{sc} + G_{B1}\Phi_{ra} + G_{B2}\Phi_{rb} + G_{B3}\Phi_{rc} + V_{B1}U_{sa} + V_{B2}U_{sb} + V_{B3}U_{sc} \\ \frac{di_{sc}}{dt} = K_{C1}i_{sa} + K_{C2}i_{sb} + K_{C3}i_{sc} + G_{C1}\Phi_{ra} + G_{C2}\Phi_{rb} + G_{C3}\Phi_{rc} + V_{C1}U_{sa} + V_{C2}U_{sb} + V_{C3}U_{sc} \\ \frac{d\Phi_{ra}}{dt} = f_{A1}i_{sa} - f_{A2}i_{sb} + f_{A3}i_{sc} + H_{A1}\Phi_{ra} + H_{A2}\Phi_{rb} + H_{A3}\Phi_{rc} \\ \frac{d\Phi_{rb}}{dt} = f_{B1}i_{sa} - f_{B2}i_{sb} + f_{B3}i_{sc} + H_{B1}\Phi_{ra} + H_{B2}\Phi_{rb} + H_{B3}\Phi_{rc} \\ \frac{d\Phi_{rc}}{dt} = f_{C1}i_{sa} - f_{C2}i_{sb} + f_{C3}i_{sc} + H_{C1}\Phi_{ra} + H_{C2}\Phi_{rb} + H_{C3}\Phi_{rc} \end{cases}$$

$$(II.43)$$

Par identification :

$$A = \begin{bmatrix} K_{A1} & K_{A2} & K_{A3} & G_{A1} & G_{A2} & G_{A3} \\ K_{B1} & K_{B2} & K_{B3} & G_{B1} & G_{B2} & G_{B3} \\ K_{C1} & K_{C2} & K_{C3} & G_{C1} & G_{C2} & G_{C3} \\ f_{A1} & f_{A2} & f_{A3} & H_{A1} & H_{A2} & H_{A3} \\ f_{B1} & f_{B2} & f_{B3} & H_{B1} & H_{B2} & H_{B3} \\ f_{C1} & f_{C2} & f_{C3} & H_{C1} & H_{C2} & H_{C3} \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} V_{A1} & V_{A2} & V_{A3} & 0 & 0 & 0 \\ V_{B1} & V_{B2} & V_{B3} & 0 & 0 & 0 \\ V_{C1} & V_{C2} & V_{C3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, X = \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \\ \Phi_{ra} \\ \Phi_{rb} \\ \Phi_{rc} \end{bmatrix}, U = \begin{bmatrix} u_{sa} \\ u_{sb} \\ u_{sc} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Les équations dans l'annexe B.

II.2.5. Simulation de la machine asynchrone dans le régime normal

La machine asynchrone est alimenté directement par le réseau triphasé 220/380V, de fréquence : 50Hz, la machine démarre à vide, afin d'appliqué un couple résistant de ($Cr = 3.5 \text{ N.m}$) à ($t= 1\text{sec}$).

Nous illustrons la vitesse de rotation du moteur exprimé en (rad/s), le couple électromagnétique ainsi que le courant statorique et le flux rotorique.

La simulation est représentée par la figure suivant :

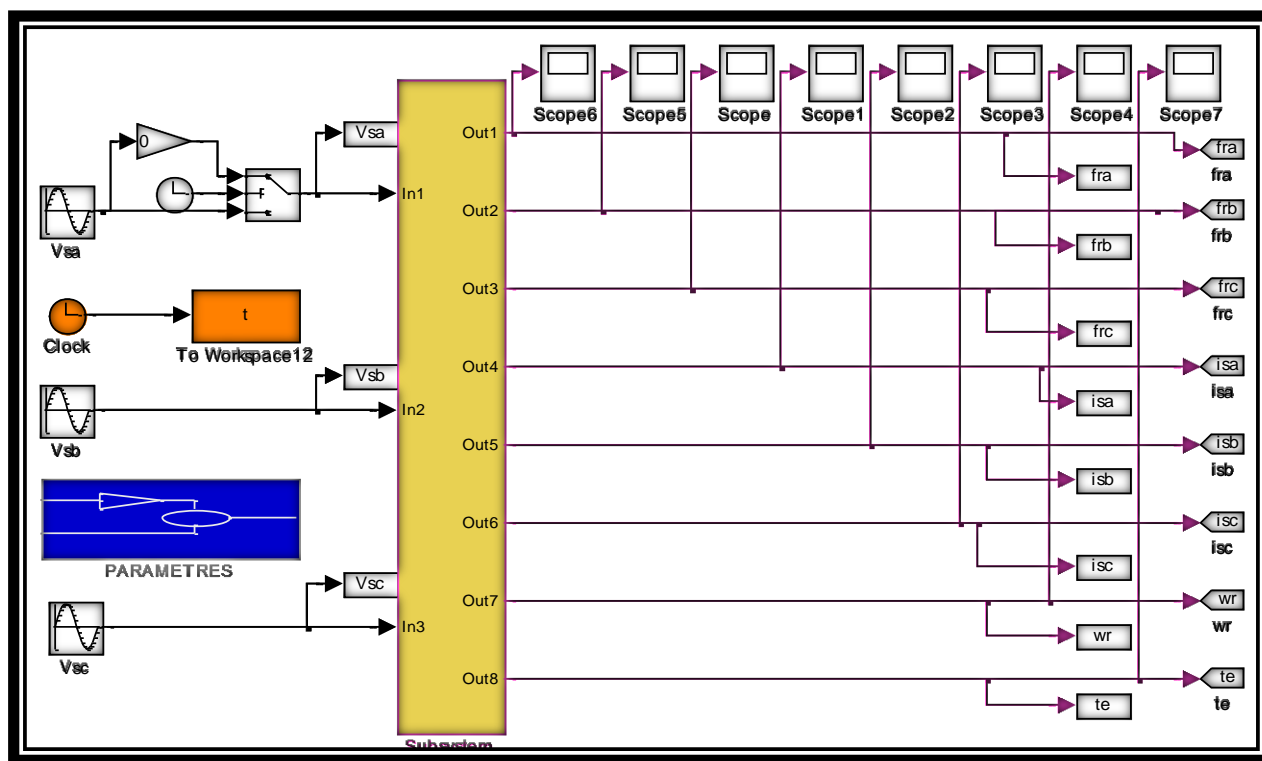


Figure II.2: Le schéma bloc de simulation du modèle de la machine asynchrone.

II.2.6. Résultats de simulation

Dans la figure II.2 qui suit on présente les résultats de la simulation.

A l'instant $t = 1 \text{ s}$ nous avons appliqué un couple résistant $Cr = 3.5 \text{ N.m}$

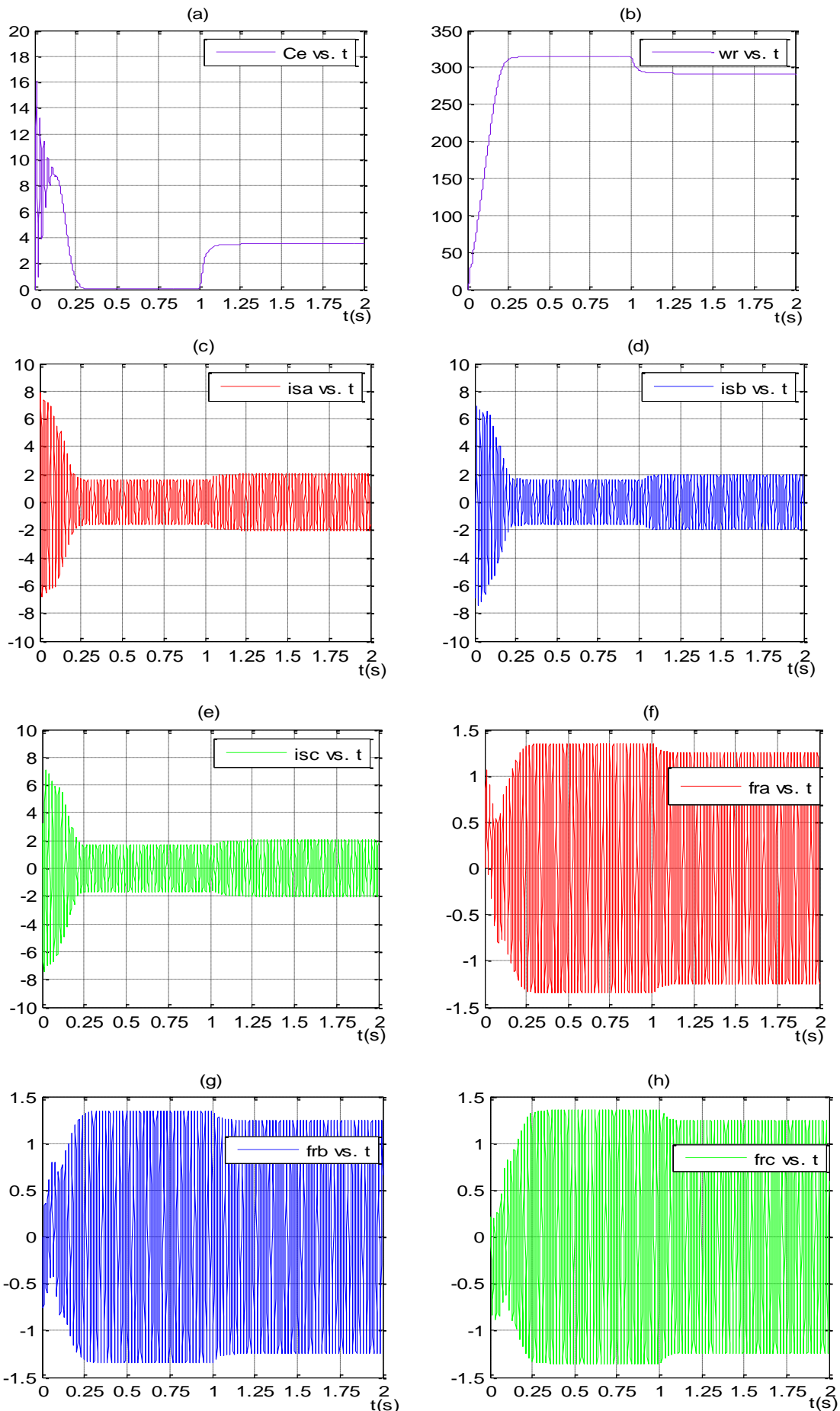


Figure II.3: Résultats de simulation d'un démarrage direct de la MAS à vide alimentée en tension, suivie d'une application d'une Couple résistant de ($C_r=3.5 \text{ N.m}$) à ($t=1 \text{ sec}$).

(a) Le couple électromagnétique C_{em} (N.m).	(b) La vitesse de rotation ω_r (rad/sec).
(c) Réponse du courant statorique i_{sa} (A).	(d) Réponse du courant statorique i_{sb} (A).
(e) Réponse du courant statorique i_{sc} (A).	(f) Réponse du flux rotorique Φ_{ra} (Wb).
(g) Réponse du flux rotorique Φ_{rb} (Wb).	(h) Réponse du flux rotorique Φ_{rc} (Wb).

II.2.7. Interprétations des résultats

Lors de démarrage, un fort appel de courant ou il présente des dépassements excessifs mais il passe rapidement au bout de quelques alternances pour donner lieu à une forme sinusoïdale d'amplitude constante, après l'application de la charge on constate une légère augmentation du courant. Ce dernier est nécessaire à développer un fort couple aux premiers instants de démarrage. Ce couple tend vers zéro, après l'application de la charge, il atteint la valeur de couple résistant. On constate qu'au démarrage, il y a un accroissement presque linéaire de l'allure de la vitesse, celle-ci tend vers un régime établi. L'application de la charge, ($C_r=3.5\text{N.m}$) provoque une diminution de la vitesse de rotation de même pour le flux rotorique.

II.3. Modélisation de la machine en régime anormal

Comme il est introduit dans le chapitre précédent, un des défauts les plus communs dans les machines électriques est le défaut entre spires dans le bobinage du stator. Dans cette partie, nous nous intéressons à la modélisation et l'étude de défauts entre spires de l'enroulement statorique. Un défaut entre spires indique dégradation de l'isolant entre deux spires d'un enroulement d'une même phase du stator. Le défaut d'isolation est modélisé par une résistance connectant deux points de la bobine, sa valeur dépend de la gravité du défaut. Le bobinage du stator de la machine avec défaut entre spires est représenté dans la figure (II.4). [21][22]

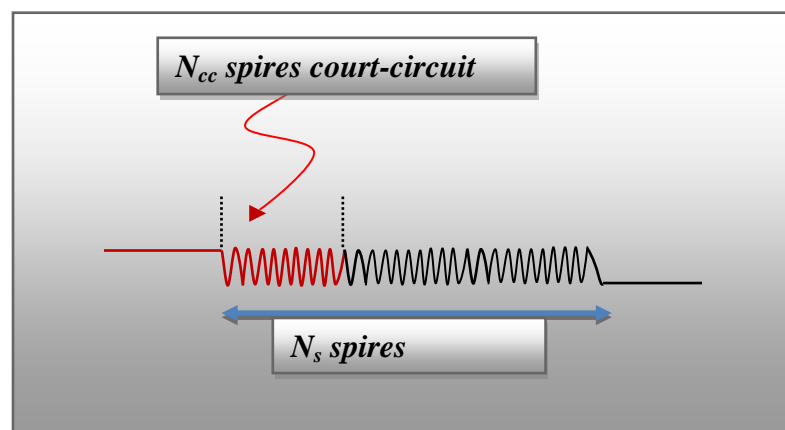


Figure II.4.court-circuit entre les spires [13]

Soit N_s le nombre de spires en régime sain de la machine asynchrone.

Un court-circuit statorique conduira à une diminution dans le nombre de spires de chaque phase statorique.

On définit les coefficients de court –circuit suivants :

$$\text{Coefficient de court –circuit relatif à la 1}^{\text{ère}} \text{ phase statorique: } K_{sa} = N_{cc1}/N_s \quad (\text{II .44})$$

$$\text{Coefficient de court –circuit relatif à la 2}^{\text{ème}} \text{ phase statorique: } K_{sb} = N_{cc2}/N_s \quad (\text{II .45})$$

$$\text{Coefficient de court –circuit relatif à la 3}^{\text{ème}} \text{ phase statorique: } K_{sc} = N_{cc3}/N_s \quad (\text{II .46})$$

Le nombre de spires en court –circuit: N_{cc}

Le nombre de spires utiles pour les trois phases statoriques, est alors donné par :

$$N_1 = N_s - N_{cc1} = (1 - K_{sa})N_s = f_{sa}N_s \quad (\text{II .47})$$

$$N_2 = N_s - N_{cc2} = (1 - K_{sb})N_s = f_{sb}N_s \quad (\text{II .48})$$

$$N_3 = N_s - N_{cc3} = (1 - K_{sc})N_s = f_{sc}N_s \quad (\text{II .49})$$

Les matrices $[R_s], [M_{sr}], [M_{rs}], [M_{ss}]$ et $[L_{sf}]$ dépendent des trois coefficients f_{sa}, f_{sb}, f_{sc}

Les inductances sont données par les expressions suivantes:

$$[L_{sf}] = \begin{bmatrix} f_{sa}^2 L_{sf} & 0 & 0 \\ 0 & f_{sb}^2 L_{sf} & 0 \\ 0 & 0 & f_{sc}^2 L_{sf} \end{bmatrix} \quad (\text{II .50})$$

$$[M_{ss}] = M_s \begin{bmatrix} f_{sa}^2 & -f_{sa}f_{sb}/2 & -f_{sa}f_{sc}/2 \\ -f_{sa}f_{sb}/2 & f_{sb}^2 & -f_{sc}f_{sb}/2 \\ -f_{sa}f_{sc}/2 & -f_{sc}f_{sb}/2 & f_{sc}^2 \end{bmatrix} \quad (\text{II .51})$$

$$[M_{sr}] = M \begin{bmatrix} f_{sa} \cos(\theta) & -f_{sa} \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & f_{sa} \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ f_{sb} \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & f_{sb} \cos(\theta) & f_{sb} \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ f_{sc} \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & f_{sc} \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & f_{sc} \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (\text{II .52})$$

$$\text{Avec: } [M_{sr}] = [M_{rs}]^T \quad (\text{II .53})$$

La matrice des résistances statoriques $[R_s]$ est donnée par:

$$[R_s] = R_s \begin{bmatrix} f_{sa} & 0 & 0 \\ 0 & f_{sb} & 0 \\ 0 & 0 & f_{sc} \end{bmatrix} \quad (\text{II .54})$$

On remplace les matrices $[R_s], [M_{ss}], [L_{sf}], [M_{rs}], [M_{sr}]$, dans le modèle triphasé obtenu, afin de pouvoir simuler les défauts statoriques en modifiant les coefficients f_{sa}, f_{sb}, f_{sc} selon le nombre de spires en court-circuit.

Dans notre simulation on prend les spires en court-circuit sont «30 Spires de 160 » dans la phase a

Donc ; $N_1 = N_s - N_{cc1} = (1 - K_{sa})N_s = (1 - 0.1875)N_s \rightarrow \boxed{f_{sa} = 0.8125, f_{sb} = 1, f_{sc} = 1.}$

II.3.1. Simulation de la machine asynchrone dans les régimes anormaux de fonctionnement

A. Court-circuit entre 18,75% spires de la première phase

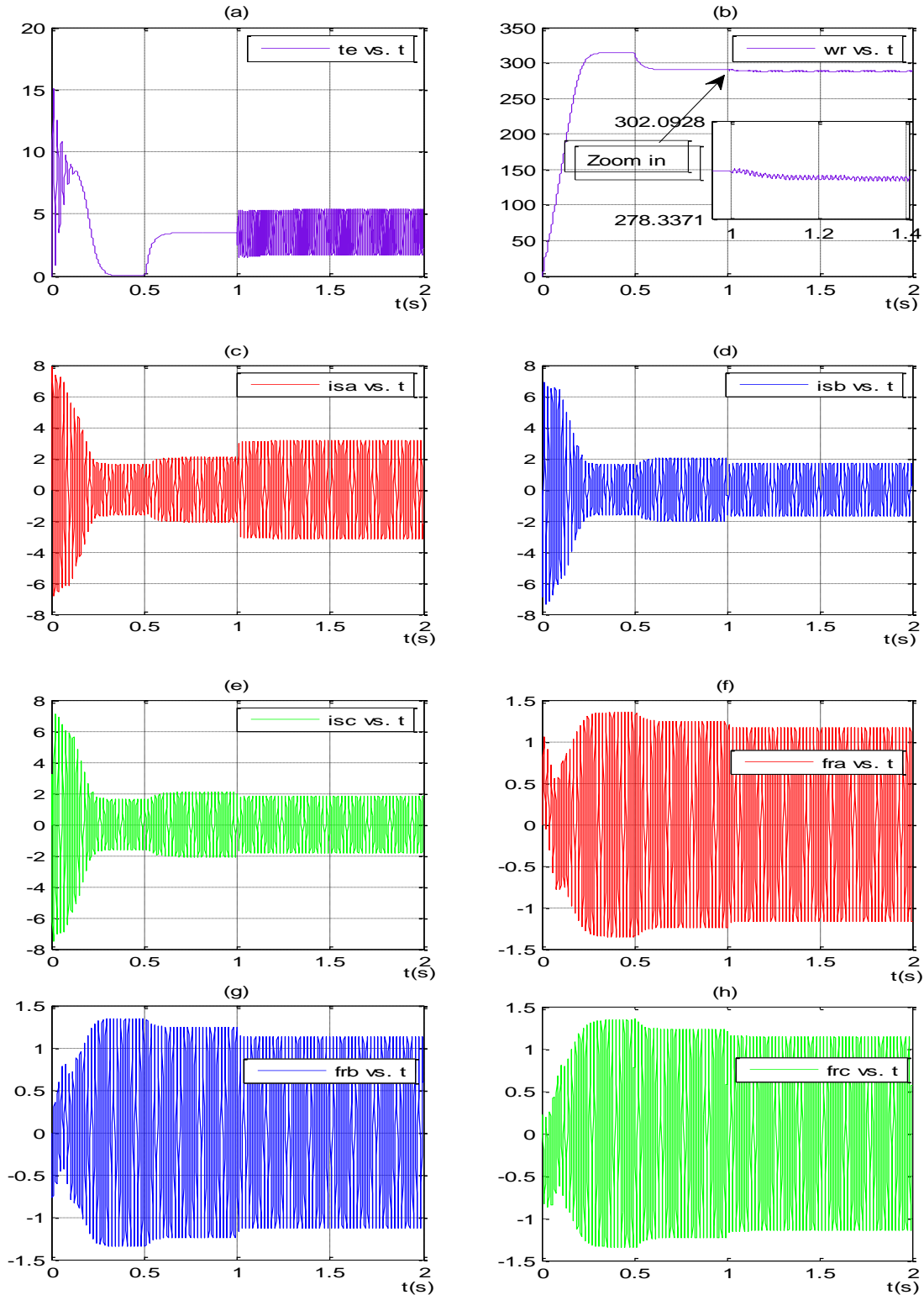


Figure II.5: Résultats de simulation pour un court-circuit 18,75% entre spires de la phase A

B. Coupure d'une phase

La figure (II.6) représente les résultats de simulation, en présence de la coupure de la phase (A) à l'instant $t=2s$ devancé par l'application de la charge ($t=1s$).

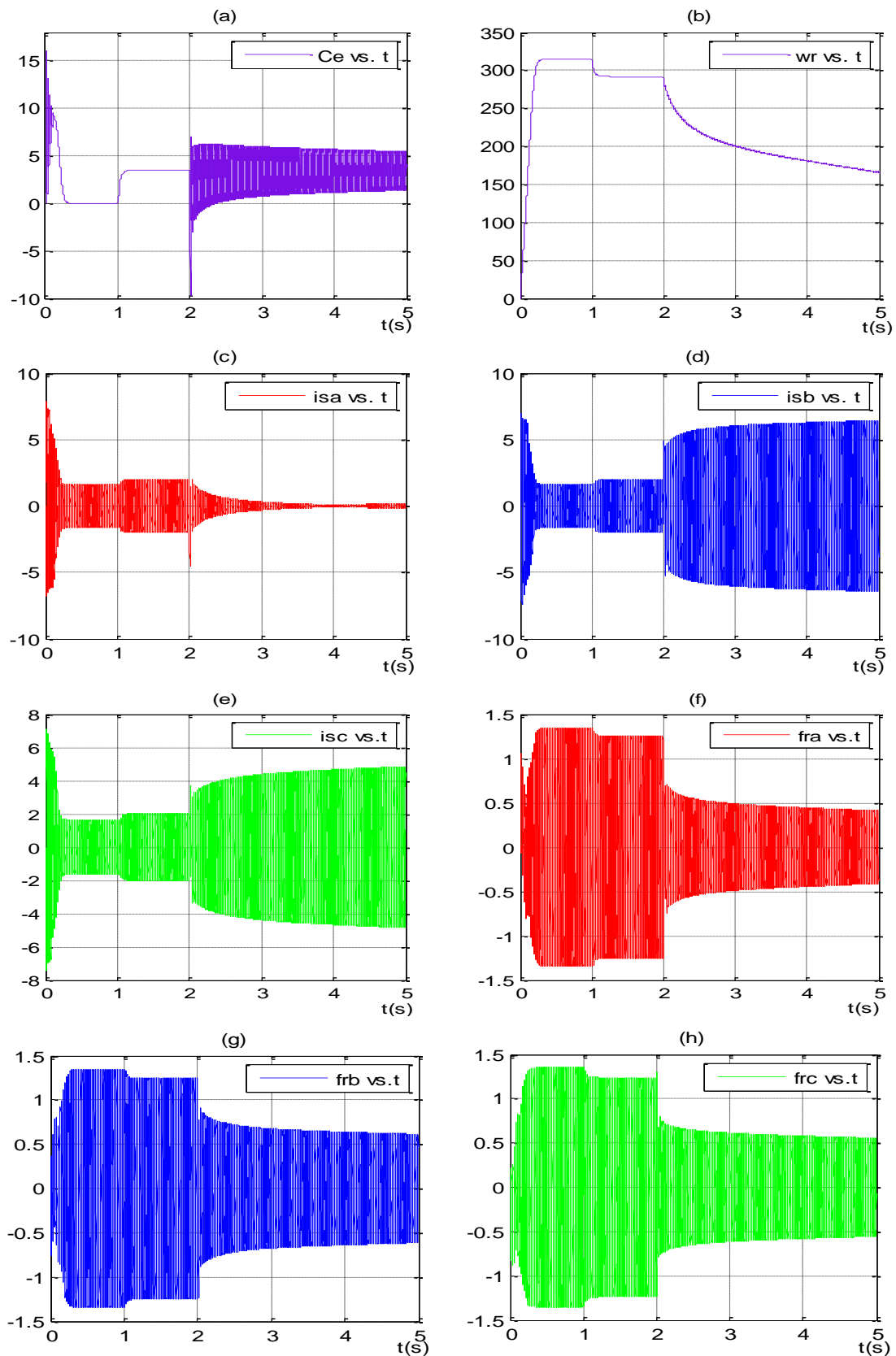


Figure II.6: Résultats de simulation la machine en présence de défaut (coupure de la phase a).

II.3.2. Interprétations des résultats

- **Court-circuit entre spires**

Un couple de 3.5 N.m est appliqué à $t=0,5$ s nous observons une petite réduction de la vitesse jusque (292 rad/s), Ainsi le régime établi, à $t=1$ s nous avons appliqué un défaut de court-circuit entre 18,75% de spires totales (30 Spires). Dans ce cas, on constate oscillation de la vitesse.

Le couple électromagnétique de la machine asynchrone en situation de défauts de court-circuit statoriques balancement en comparaison en régime normal.

On constate une augmentation pour le courant i_{sa} lors de l'application de courts-circuits et la diminution de i_{sb} .

- **Coupage d'une phase (coupage de l'alimentation)**

La vitesse atteint sa valeur de référence plus (300rad/s), lors de l'application d'une charge ($t=1$ s), elle chute puis se stabilise jusqu'à après la coupure d'une phase à l'instant $t=2$ s, on observe la chute continue avec le temps.

Pour le couple électromagnétique, atteint au démarrage une valeur (20N.m), puis compense le couple de charge (3.5N.m) et augmente à l'instant où on applique une coupure de la première phase. On remarque aussi une augmentation de l'amplitude des deux courants i_{sb} , i_{sc} lors de la coupure de la première phase.

II.4. Conclusion

Le modèle triphasé sous sa forme classique de la machine asynchrone a été obtenu. Chose qui permet de représenter le comportement des machines asynchrone que le stator soit équilibré ou pas, et de simuler les défauts statoriques tels que la coupure d'une phase et les court-circuits entre spires de la même phase. Par contre, pour le modèle biphasé même s'il est plus rapide à cause de la simplicité de ses équations on ne peut pas simuler les défauts qui peuvent apparaître dans le stator, dans ce chapitre la simulation de la machine asynchrone a été effectuée, d'une part, en présence des défauts de la tension d'alimentation, affectant le stator (court-circuit entre spires et coupure d'une phase). Le chapitre suivant sera consacré à l'élaboration du modèle multi enroulements pour révéler les défauts rotoriques.

Chapitre III

modèle multi enroulement en vue d'étudier

Les Défauts Rotoriques.

Chapitre III: Modèle Multi Enroulement En Vue d'étudier Les Défauts Rotoriques

III.1. Introduction

La machine asynchrone, malgré ses qualités, peut présenter des défauts structurels parmi lesquels la rupture de barre ou d'anneaux – dans notre travail nous nous intéresserons aux ruptures de barres rotoriques. Pour ce fait, il convient de développer un modèle qui tient compte de la structure du rotor

Les modélisations décrites pour une machine asynchrone à cage. Dans cette perspective, le développement du modèle est basé sur les circuits maillés ce qui facilitera la simulation des Barres Cassées. [11]

III.2. Structure du rotor

La cage d'écureuil de la machine asynchrone se compose de N_r encoches rotoriques qui peuvent être soit ouvertes soit fermées sur l'entrefer. La cage rotorique peut se décomposer en (N_r+1) circuits électriques rotoriques indépendants. En effet, si on considère deux barres rotoriques adjacentes ainsi que les segments d'anneau de court-circuit les reliant, nous obtenons une boucle rotorique fermée qui peut être étudiée sous forme de circuit électrique. Un des anneaux de court-circuit crée par conséquent une boucle supplémentaire ce qui porte le nombre de boucles totales à (N_r+1) . On associe à chacune de ces boucles un courant, ce qui amène à calculer $(N_r + 1)$ courants rotoriques. Chaque barre rotorique est modélisée par une inductance en série avec une résistance, tout comme chaque segment d'anneau de court-circuit. [8]

III.3. Modèle d'étude

Il est fonction du type d'approche utilisée. On en distingue deux, assez complémentaires : une approche dite « locale » car basée sur la signature de grandeurs locales telles que la densité de flux ; il s'agit souvent de méthodes numériques par éléments finis permettant une analyse fine des phénomènes physiques locaux associés aux défauts de cages.

Une approche analytique basée, quant à elle sur la signature de grandeurs externes globales telles que courants, couple électromagnétique ; elle utilise le modèle de Kirchhoff, (réseau électrique équivalent à la machine) ainsi que la transformation « des 2 axes » appliqué aux équations électriques du système multi enroulement étudié. En fin cette approche s'adapte particulièrement bien au problème posé ici et vu sa simplicité nous l'avons adopté comme démarche [23].

III.3.1. Hypothèses Simplificatrices

À partir d'hypothèses classiques qui supposent que [24]:

- ◆ La perméabilité du fer est infinie.
- ◆ L'entrefer est lisse et constant.
- ◆ La f.m.m statorique est à distribution sinusoïdale.

On calcule les différentes inductances et mutuelles qui interviennent dans les équations du circuit.

III.3.2. Calcul des Inductances

III.3.2.1. Stator:

L'induction due à la bobine statorique de la phase m s'écrit [24] :

$$B_{sm}(\theta) = \frac{2}{\pi} \mu_0 \frac{N_s}{ep} I_{sm} \cos\left(p\theta - m \frac{2\pi}{3}\right) \tag{III.1}$$

Par conséquent, le flux principal et l'inductance cyclique sont donnés par [24]:

$$\Phi_{psm} = \frac{4}{\pi} \mu_0 \frac{N_s^2}{ep^2} RL I_{sm} \tag{III.2}$$

$$L_{sc} = \frac{3}{2} L_{sp} + l_{sl} = \frac{6}{\pi} \mu_0 \frac{N_s^2}{ep^2} RL + L_{sl} \tag{III.3}$$

III.3.2.2. Rotor :

Le rotor à cage est représenté par la figure (III.1). La figure (III.2) représente la forme d'onde de l'induction produite par la maille rotorique k [24].

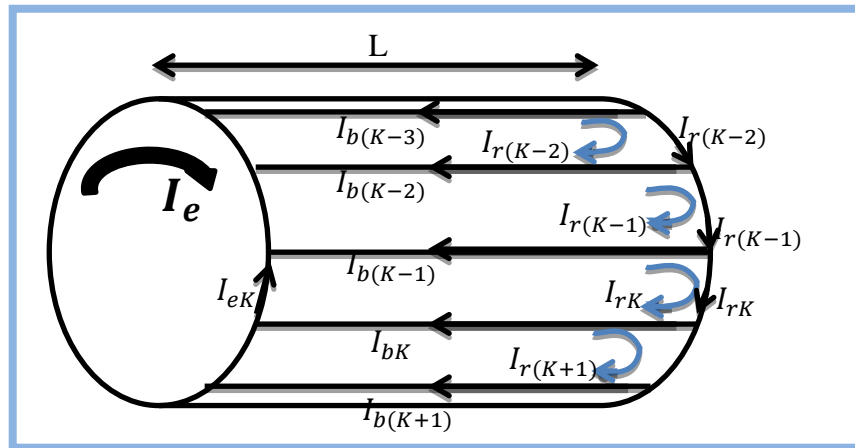


Figure (III.1): Structure du rotor [24].

I_{rK} Représente le courant de maille K et I_{bK} le courant de barre K, avec:

$$I_{bK} = I_{rK} - I_{r(K+1)} \tag{III.4}$$

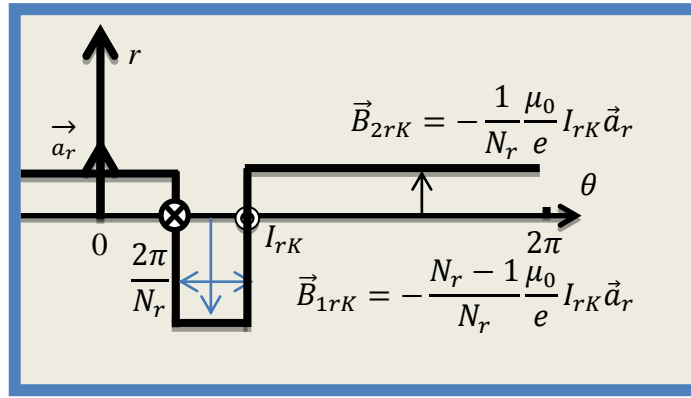


Figure (III.2): Induction produite par une maille du rotor [24]

On voit bien, à travers la figure (III.2) qu'il n'est pas possible de retenir l'hypothèse du premier harmonique qui concerne l'induction produite par une maille du rotor. Partant de cette répartition, on calcule alors l'inductance principale d'une maille rotorique ainsi que la mutuelle entre deux mailles [24]:

$$L_{rrp} = \frac{N_r - 1}{N_r^2} \frac{\mu_0}{e} 2\pi RL \tag{III.5}$$

$$M_{rr} = -\frac{1}{N_r^2} \frac{\mu_0}{e} 2\pi RL \tag{III.6}$$

III.3.2.3. Stator Rotor :

L'induction produite par la bobine statorique de la phase m induit dans la maille K le flux [24]:

$$\Phi_{smrK} = \int_{S_{rK}} \vec{B}_{sm} \cdot \vec{d}S_{rK} = - \int_{\frac{\theta + K\frac{2\pi}{N_r} - \frac{\pi}{N_r}}{\frac{\theta + K\frac{2\pi}{N_r} + \frac{\pi}{N_r}}}^{\frac{\theta + K\frac{2\pi}{N_r} + \frac{\pi}{N_r}}{\frac{\theta + K\frac{2\pi}{N_r} - \frac{\pi}{N_r}}} B_{sm}(\theta') RL d\theta' \tag{III.7}$$

$$\Phi_{smrK} = -\frac{2}{\pi} \frac{\mu_0}{e} N_s I_{sm} RL \frac{1}{p} \left[\sin \left(p\theta' - m \frac{2\pi}{3} \right) \right]_{\frac{\theta + K\frac{2\pi}{N_r} - \frac{\pi}{N_r}}{\frac{\theta + K\frac{2\pi}{N_r} + \frac{\pi}{N_r}}}^{\frac{\theta + K\frac{2\pi}{N_r} + \frac{\pi}{N_r}}{\frac{\theta + K\frac{2\pi}{N_r} - \frac{\pi}{N_r}}} \tag{III.8}$$

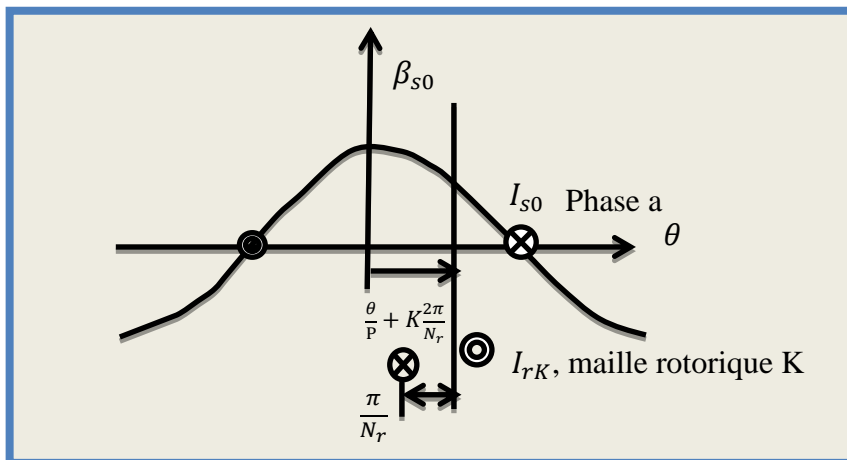


Figure (III.3) : Position de la maille rotorique k , par rapport la bobine statorique de la phase ($m = 0$) [24]

Il en résulte que le mutuel stator rotor entre la phase statorique m et la maille rotorique K :

$$M_{smrK} = -M_{sr} \cos \left(\theta - m \frac{2\pi}{3} + K\alpha \right) \quad (\text{III.9})$$

$$\text{Où; } M_{sr} = \frac{4}{\pi} \frac{\mu_0}{ep^2} N_s R L \sin \frac{\alpha}{2} \quad (\text{III.10})$$

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

III.3.3. Mise en équation

Nous utilisons une transformation de Clarke pour passer des grandeurs triphasées statoriques (a, b, c) aux grandeurs diphasées (α, β). Nous pouvons effectuer la simulation avec deux repères distincts pour le stator et le rotor [24].

Pour alléger le temps de calcul, on élimine l'angle θ de la matrice de couplage en choisissant le repère le plus adéquat et qui est celui du rotor. Dans ce repère, toutes les grandeurs ont une pulsation gW_s en régime permanent. Cette caractéristique peut être utilisée pour l'analyse de rupture de barre rotorique dans la machine par l'observation du courant I_{ds} [24]

III.3.3.1. stator:

On déduit pour l'ensemble des phases statoriques [23];

$$[V_{sabc}] = [R_s][I_{sabc}] + \frac{d}{dt} [\Phi_{sabc}] \quad (\text{III.11})$$

Après transformation et rotation, les équations électriques dans le repère rotorique s'écrivent [24]:

$$V_{ds} = R_s I_{ds} - W \Phi_{qs} + \frac{d\Phi_{ds}}{dt} \quad (\text{III.12})$$

$$V_{qs} = R_s I_{qs} - W \Phi_{ds} + \frac{d\Phi_{qs}}{dt} \quad (\text{III.13})$$

Avec :

$$\Phi_{sdq} = \begin{bmatrix} L_{sc} & 0 \\ 0 & L_{sc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \end{bmatrix} - M_{sr} \begin{bmatrix} \dots & \cos j\alpha & \dots \\ \dots & \sin j\alpha & \dots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{r0} \\ \vdots \\ I_{rj} \\ \vdots \\ I_{r(N_r-1)} \end{bmatrix} \quad (\text{III.14})$$

Donc [23]:

$$\Phi_{ds} = L_{sc} I_{ds} - M_{sr} [\cos 0\alpha I_{r0} + \cos 1\alpha I_{r1} + \dots + \cos j\alpha I_{rj} + \dots + \cos(N_r - 1)\alpha I_{r(N_r-1)}] \quad (\text{III.15})$$

De la même façon pour Φ_{qs} :

$$\Phi_{qs} = L_{sc} I_{qs} - M_{sr} [\sin 0\alpha I_{r0} + \sin 1\alpha I_{r1} + \dots + \sin j\alpha I_{rj} + \dots + \sin(N_r - 1)\alpha I_{r(N_r-1)}] \quad (\text{III.16})$$

Après la dérivation des équations (III.15) et (III.16), on aboutit à :

$$\frac{d\Phi_{ds}}{dt} = L_{sc} \frac{dI_{ds}}{dt} - M_{sr} [\dots \cos j\alpha \dots] \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{r0} \\ \vdots \\ I_{rj} \\ \vdots \\ I_{r(N_r-1)} \end{bmatrix} \quad (\text{III.17})$$

Et :

$$\frac{d\Phi_{qs}}{dt} = L_{sc} \frac{dI_{qs}}{dt} - M_{sr} [\dots \sin j\alpha \dots] \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{r0} \\ \vdots \\ I_{rj} \\ \vdots \\ I_{r(N_r-1)} \end{bmatrix} \quad (\text{III.18})$$

On remplace (III.15), (III.16), (III.17) et (III.18) dans les équations (III.12) et (III.13) nous obtenons:

$$V_{ds} = R_s I_{ds} - W (L_{sc} I_{qs} - M_{sr} [\sin 0\alpha I_{r0} + \sin 1\alpha I_{r1} + \dots + \sin j\alpha I_{rj} + \dots \sin(N_r - 1)\alpha I_{r(N_r-1)}]) \\ + L_{sc} \frac{dI_{ds}}{dt} - M_{sr} \left(\cos 0\alpha \frac{dI_{r0}}{dt} + \cos 1\alpha \frac{dI_{r1}}{dt} + \dots + \cos j\alpha \frac{dI_{rj}}{dt} + \dots \cos(N_r - 1)\alpha \frac{dI_{r(N_r-1)}}{dt} \right) \quad (\text{III.19})$$

Et :

$$V_{qs} = R_s I_{ds} - W (L_{sc} I_{ds} - M_{sr} [\cos 0\alpha I_{r0} + \cos 1\alpha I_{r1} + \dots + \cos j\alpha I_{rj} + \dots \cos(N_r - 1)\alpha I_{r(N_r-1)}]) \\ + L_{sc} \frac{dI_{qs}}{dt} - M_{sr} \left(\sin 0\alpha \frac{dI_{r0}}{dt} + \sin 1\alpha \frac{dI_{r1}}{dt} + \dots + \sin j\alpha \frac{dI_{rj}}{dt} + \dots \sin(N_r - 1)\alpha \frac{dI_{r(N_r-1)}}{dt} \right) \quad (\text{III.20})$$

On écrit les équations (III.19) et (III.20) sous la forme :

$$[L] \frac{d}{dt} [I] = [V] - [R][I] \quad (\text{III.21})$$

Donc :

$$L_{sc} \frac{dI_{ds}}{dt} - M_{sr} \left(\cos 0\alpha \frac{dI_{r0}}{dt} + \cos 1\alpha \frac{dI_{r1}}{dt} + \dots + \cos j\alpha \frac{dI_{rj}}{dt} + \dots + \cos(N_r - 1)\alpha \frac{dI_{r(N_r-1)}}{dt} \right) = V_{ds} - \\ R_s I_{ds} + W L_{sc} I_{qs} - W M_{sr} [\sin 0\alpha I_{r0} + \sin 1\alpha I_{r1} + \dots + \sin j\alpha I_{rj} + \dots + \sin(N_r - 1)\alpha I_{r(N_r-1)}] \quad (\text{III.22})$$

Et :

$$L_{sc} \frac{dI_{qs}}{dt} - M_{sr} \left(\sin 0\alpha \frac{dI_{r0}}{dt} + \sin 1\alpha \frac{dI_{r1}}{dt} + \dots + \sin j\alpha \frac{dI_{rj}}{dt} + \dots + \sin(N_r - 1)\alpha \frac{dI_{r(N_r-1)}}{dt} \right) = V_{qs} - \\ R_s I_{qs} - W L_{sc} I_{ds} + W M_{sr} [\cos 0\alpha I_{r0} + \cos 1\alpha I_{r1} + \dots + \cos j\alpha I_{rj} + \dots + \cos(N_r - 1)\alpha I_{r(N_r-1)}] \quad (\text{III.23})$$

III.3.3.2. rotor :

Le rotor à cage est représenté par la figure(III.4) [24].

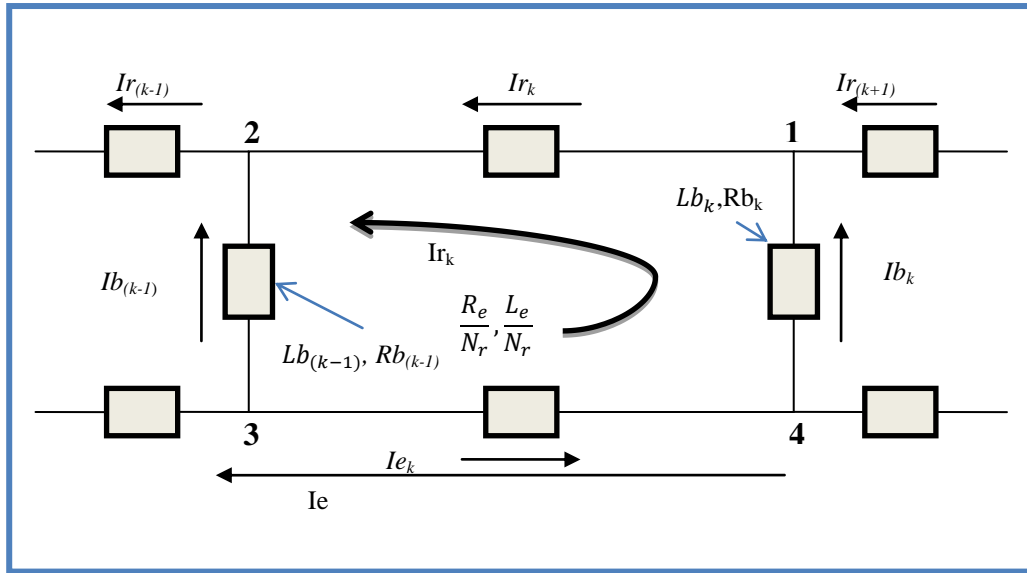


Figure (III.4) : Représentation d'une maille rotorique [23].

I_{rK} Représente le courant de maille K , I_{bK} le courant de barre K , pour le nœud $N^{\circ}1$:

$$I_{bK} = I_{rK} - I_{r(K+1)} \tag{III.24}$$

Pour le nœud $n^{\circ} 2$:

$$I_{b(K-1)} = I_{r(K-1)} - I_{rK} \tag{III.25}$$

L'équation électrique relative à la maille K est [23]:

$$0 = \frac{R_e}{N_r} I_{rK} - R_{b(K-1)} [I_{r(K-1)} - I_{rK}] + \frac{R_e}{N_r} [I_{rK} - I_e] + R_{bK} [I_{rK} - I_{r(K+1)}] + \frac{d\Phi_{rK}}{dt} \tag{III.26}$$

On remplace les formules (III.24) et (III.25) dans l'équation (III.26) ;

Donc l'équation électrique relative à la maille K devienne :

$$0 = \frac{R_e}{N_r} I_{rK} - R_{b(K-1)} I_{b(K-1)} + \frac{R_e}{N_r} [I_{rK} - I_e] + R_{bK} I_{bK} + \frac{d\Phi_{rK}}{dt} \tag{III.27}$$

Le flux induit dans la maille rotorique est donné par :

$$\Phi_{rK} = L_{rp} I_{rK} + M_{rr} \sum_{\substack{j=0 \\ j \neq K}}^{N_r-1} I_{rj} - \frac{3}{2} M_{rr} (I_{ds} \cos K\alpha + I_{qs} \sin K\alpha) + \frac{L_e}{N_r} (I_{rK} - I_{eK}) + L_b (-I_{b(K-1)} + I_{bK}) \tag{III.28}$$

Le terme en L_{rp} représente le flux principal, celui en M_{rr} représente le flux mutuel avec les autres mailles rotoriques, puis viennent les termes de couplage avec le stator. On remarquera le facteur $3/2$ par rapport à l'équation statorique à cause de la transformation de Clark.

Les termes en L_b et L_e représentent les fuites rotoriques [24].

On essaye d'écrire l'équation (III.28) uniquement en fonction des courants de maille [23];

En utilisant les formules (III.24), (III.25) et :

$$I_{rK} - I_e = I_{eK} \quad (III.29)$$

Où : $\rightarrow I_e$:représente le courant de l'anneau de court-circuit

Donc:

$$\begin{aligned} \Phi_{rK} = & L_{rp}I_{rK} + M_{rr} \sum_{\substack{j=0 \\ j \neq K}}^{N_r-1} I_{rj} - \frac{3}{2} M_{sr} (I_{ds} \cos K\alpha + I_{qs} \sin K\alpha) + \frac{L_e}{N_r} I_{rK} + \frac{L_e}{N_r} I_{eK} \\ & + L_b [-I_{r(K-1)} + I_{rK} + I_{rK} - I_{r(K+1)}] \end{aligned} \quad (III.30)$$

$$\begin{aligned} \Phi_{rK} = & L_{rp}I_{rK} + M_{rr} \sum_{\substack{j=0 \\ j \neq K}}^{N_r-1} I_{rj} - \frac{3}{2} M_{sr} (I_{ds} \cos K\alpha + I_{qs} \sin K\alpha) + \frac{L_e}{N_r} I_{rK} + \frac{L_e}{N_r} I_{eK} + \\ & L_b [-I_{r(K-1)} + 2I_{rK} - I_{r(K+1)}] \end{aligned} \quad (III.31)$$

$$\begin{aligned} \Phi_{rK} = & L_{rp}I_{rK} + M_{rr} \sum_{\substack{j=0 \\ j \neq K}}^{N_r-1} I_{rj} - \frac{3}{2} M_{sr} (I_{ds} \cos K\alpha + I_{qs} \sin K\alpha) + \frac{L_e}{N_r} I_{rK} + \frac{L_e}{N_r} I_{eK} \\ & + L_b [-I_{r(K-1)} - I_{r(K+1)}] + 2L_b I_{rK} \end{aligned} \quad (III.32)$$

Finalement, on aboutit à :

$$\begin{aligned} \Phi_{rK} = & \left(L_{rp} + \frac{2L_e}{N_r} + 2L_b \right) I_{rK} + M_{rr} \sum_{\substack{j=0 \\ j \neq K}}^{N_r-1} I_{rj} - L_b [-I_{r(K-1)} - I_{r(K+1)}] \\ & - \frac{3}{2} M_{sr} (I_{ds} \cos K\alpha + I_{qs} \sin K\alpha) - \frac{L_e}{N_r} I_e \end{aligned} \quad (III.33)$$

-On calcule $\frac{d\Phi_{rK}}{dt}$

$$\begin{aligned} \frac{d\Phi_{rK}}{dt} = & \left(L_{rp} + \frac{2L_e}{N_r} + 2L_b \right) \frac{dI_{rK}}{dt} + M_{rr} \sum_{\substack{j=0 \\ j \neq K}}^{N_r-1} \frac{dI_{rj}}{dt} - L_b \left[\frac{dI_{r(K-1)}}{dt} + \frac{dI_{r(K+1)}}{dt} \right] \\ & - \frac{3}{2} M_{sr} \left(\frac{dI_{ds}}{dt} \cos K\alpha + \frac{dI_{qs}}{dt} \sin K\alpha \right) - \frac{L_e}{N_r} \frac{dI_e}{dt} \end{aligned} \quad (III.34)$$

On remplace $\frac{d\Phi_{rK}}{dt}$ dans l'équation (III.27)

$$\begin{aligned} 0 = & \frac{R_e}{N_r} I_{rK} - R_{b(K-1)} [I_{r(K-1)} - I_{rK}] - \frac{R_e}{N_r} I_e + \frac{R_e}{N_r} I_{rK} + R_{bK} (I_{rK} - I_{r(K+1)}) + \left(L_{rp} + \frac{2L_e}{N_r} + 2L_b \right) \frac{dI_{rK}}{dt} + \\ & M_{rr} \sum_{\substack{j=0 \\ j \neq K}}^{N_r-1} \frac{dI_{rj}}{dt} - L_b \left[\frac{dI_{r(K-1)}}{dt} + \frac{dI_{r(K+1)}}{dt} \right] - \frac{3}{2} M_{sr} \left(\frac{dI_{ds}}{dt} \cos K\alpha + \frac{dI_{qs}}{dt} \sin K\alpha \right) - \frac{L_e}{N_r} \frac{dI_e}{dt} \end{aligned} \quad (III.35)$$

On écrit l'équation (III.35) sous la forme : $[L] \frac{d}{dt} [I] = [V] - [R][I]$

L'équation (III.35) devienne :

$$\begin{aligned} & \left(L_{rp} + \frac{2L_e}{N_r} + 2L_b \right) \frac{dI_{rK}}{dt} + M_{rr} \sum_{\substack{j=0 \\ j \neq K}}^{N_r-1} \frac{dI_{rj}}{dt} - L_b \left[\frac{dI_{r(K-1)}}{dt} + \frac{dI_{r(K+1)}}{dt} \right] - \frac{3}{2} M_{sr} \left(\frac{dI_{ds}}{dt} \cos K\alpha + \frac{dI_{qs}}{dt} \sin K\alpha \right) \\ & - \frac{L_e}{N_r} \frac{dI_e}{dt} = - \left[\left(\frac{2R_e}{N_r} + R_{bK} + R_{b(K-1)} \right) I_{rK} - R_{b(K-1)} I_{r(K-1)} - R_{bK} I_{r(K+1)} - \frac{R_e}{N_r} I_e \right] \end{aligned} \quad (III.36)$$

Si on considère que notre modèle à 16 barres (Nr = 16) on a :

Pour k = 0 :

$$\begin{aligned} & \left(L_{rp} + \frac{2L_e}{N_r} + 2L_b \right) \frac{dI_{r0}}{dt} + M_{rr} \sum_{j=1}^{15} \frac{dI_{rj}}{dt} - L_b \left[\frac{dI_{r(N_r-1)}}{dt} + \frac{dI_{r1}}{dt} \right] - \frac{3}{2} M_{sr} \left(\frac{dI_{ds}}{dt} \cos 0\alpha + \frac{dI_{qs}}{dt} \sin 0\alpha \right) \\ & - \frac{L_e}{N_r} \frac{dI_e}{dt} = - \left[\left(\frac{2R_e}{N_r} + R_{b0} + R_{b(N_r-1)} \right) I_{r0} - R_{b(N_r-1)} I_{r(N_r-1)} - R_{b0} I_{r1} - \frac{R_e}{N_r} I_e \right] \end{aligned} \quad (III.37)$$

Pour k=1:

$$\begin{aligned} & \left(L_{rp} + \frac{2L_e}{N_r} + 2L_b \right) \frac{dI_{r1}}{dt} + M_{rr} \sum_{\substack{j=0 \\ j \neq K}}^{15} \frac{dI_{rj}}{dt} - L_b \left[\frac{dI_{r0}}{dt} + \frac{dI_{r2}}{dt} \right] - \frac{3}{2} M_{sr} \left(\frac{dI_{ds}}{dt} \cos 1\alpha + \frac{dI_{qs}}{dt} \sin 1\alpha \right) \\ & - \frac{L_e}{N_r} \frac{dI_e}{dt} = - \left[\left(\frac{2R_e}{N_r} + R_{b1} + R_{b0} \right) I_{r1} - R_{b0} I_{r0} - R_{b1} I_{r2} - \frac{R_e}{N_r} I_e \right] \end{aligned} \quad (III.38)$$

Et de la même façon pour les autres barres.

III.3.3.3. L'anneau de court-circuit:

$$L_e \frac{dI_e}{dt} - \frac{L_e}{N_r} \sum_{K=0}^{N_r-1} \frac{dI_{rK}}{dt} = - \left(I_e R_e - \frac{R_e}{N_r} \sum_{K=0}^{N_r-1} I_{rK} \right) \quad (III.39)$$

Le système complet $[L] \frac{d}{dt} [I] = [V] - [R][I]$ devient [24]:

$$\begin{bmatrix} L_{sc} & 0 & \dots & \dots & \dots & -M_{sr} \cos j\alpha & \dots & \dots & 0 \\ 0 & L_{sc} & \dots & \dots & \dots & -M_{sr} \sin j\alpha & \dots & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -\frac{3}{2} M_{sr} \cos K\alpha & -\frac{3}{2} M_{sr} \sin K\alpha & L_{rp} + \frac{2L_e}{N_r} + 2L_b & M_{rr} - L_b & M_{rr} & \dots & M_{rr} & M_{rr} - L_b & \vdots \\ \vdots & \vdots & M_{rr} - L_b & L_{rp} + \frac{2L_e}{N_r} + 2L_b & M_{rr} - L_b & M_{rr} & \dots & M_{rr} & \vdots \\ \vdots & \vdots & M_{rr} - L_b & M_{rr} & \dots & M_{rr} & M_{rr} - L_b & L_{rp} + \frac{2L_e}{N_r} + 2L_b & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & -\frac{L_e}{N_r} & \dots & \dots & \dots & \dots & -\frac{L_e}{N_r} & L_e \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \\ I_{r0} \\ \vdots \\ I_{rj} \\ \vdots \\ I_{r(N_r-1)} \\ I_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix}
 R_s & -WL_{sc} & \dots & \dots & M_{sr}W\sin\alpha & \dots & \dots & 0 \\
 -WL_{sc} & R_s & \dots & \dots & -M_{sr}W\cos\alpha & \dots & \dots & 0 \\
 \hline
 0 & 0 & 2\frac{R_e}{N_r} + Rb_0 + Rb_{(N_r-1)} & -Rb_0 & 0 & 0 & -Rb_{(N_r-1)} & -\frac{R_e}{N_r} \\
 0 & 0 & 0 & -Rb_{(K-1)} & 2\frac{R_e}{N_r} + Rb_{(K)} + Rb_{(K-1)} & -Rb_{(K)} & 0 & \vdots \\
 0 & 0 & -Rb_{(N_r-1)} & 0 & 0 & -Rb_{(N_r-2)} & -Rb_{(N_r-2)}2\frac{R_e}{N_r} + Rb_{(N_r-2)} + Rb_{(N_r-1)} & \vdots \\
 0 & 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & -\frac{R_e}{N_r} & -\frac{R_e}{N_r} \\
 \hline
 0 & 0 & -\frac{R_e}{N_r} & \dots & \dots & \dots & -\frac{R_e}{N_r} & R_e
 \end{bmatrix}
 \begin{bmatrix}
 I_{ds} \\
 I_{qs} \\
 -I_{r0} \\
 \vdots \\
 I_{rj} \\
 \vdots \\
 I_{r(N_r-1)} \\
 -I_e
 \end{bmatrix}
 \tag{III.40}$$

Le couple électromagnétique est obtenu par dérivation de co-énergie [23]:

$$C_e = \frac{3}{2}P [I_{sdq}]^t \frac{\delta}{\delta\theta} \begin{bmatrix} \dots & -M_{sr} \cos(\theta + K\alpha) & \dots \\ \dots & -M_{sr} \cos(\theta + K\alpha) & \dots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vdots \\ I_{rK} \\ \vdots \end{bmatrix}
 \tag{III.41}$$

$$C_e = \frac{3}{2}PM_{sr} \{ I_{ds} \sum_{K=0}^{N_r-1} I_{rK} \sin K\alpha - I_{ds} \sum_{K=0}^{N_r-1} I_{rK} \cos K\alpha \}
 \tag{III.42}$$

On y ajoute les équations mécaniques(III.43) afin d'avoir la vitesse $\Omega = \frac{W}{P}$, Et $\frac{d\theta}{dt} = W$

$$\frac{d\Omega}{dt} = \frac{1}{J} P \left(C_e - C_r - \frac{f}{P} W \right)$$

Le système ci-dessus est très compliqué pour le programmer et l'exécution d'une simulation d'un tel modèle est très lente, c'est pour cela qu'on a optés pour un autre modèle, modèle dq.

Pour ce faire, nous avons appliqué une transformation généralisée (N_r) qui permet de passer des N_r grandeurs équilibrées vers deux grandeurs dq. La simulation de ce modèle est très rapide.

III.4. La transformation de N_r grandeurs équilibrées vers deux grandeurs dq

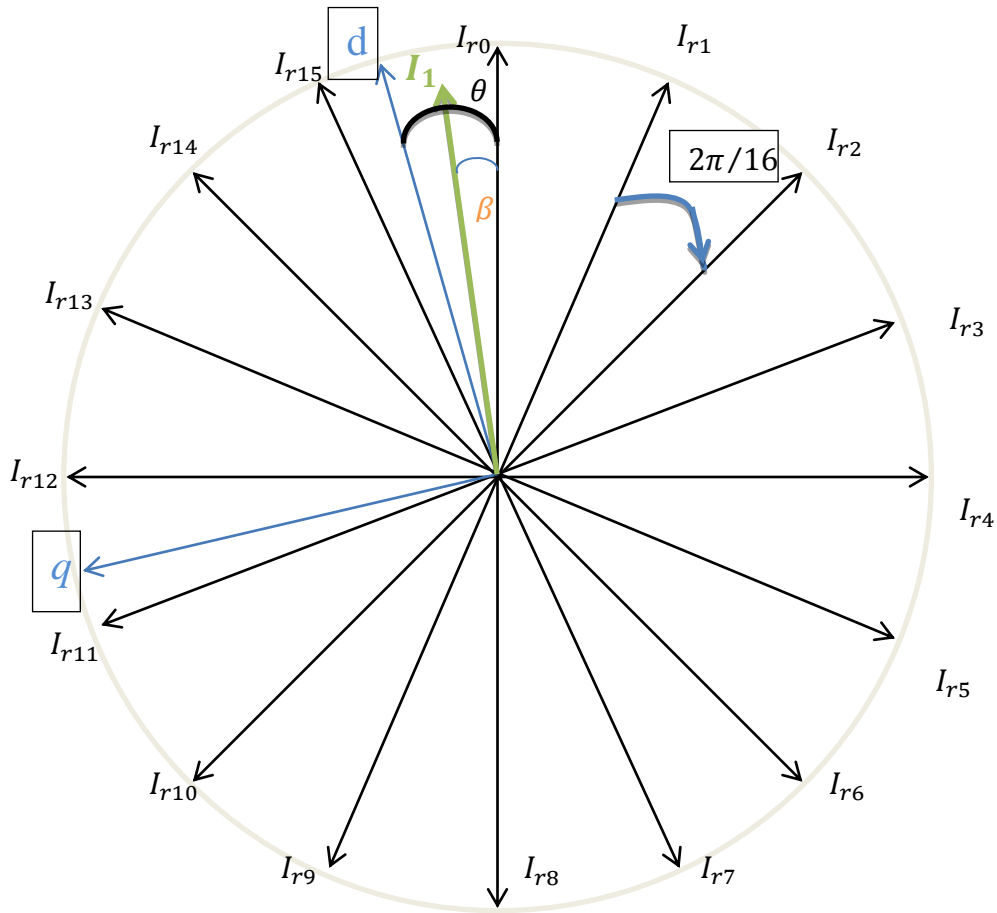


Figure (III.5) : projection du modèle multi enroulement sur le modèle dq [23]

La projection de courant I sur les axes I_{rK} donne [23]:

$$\begin{cases} I_{r0} = I1 \cos \beta \\ I_{r1} = I1 \cos(\beta + \frac{2\pi}{16}) \\ I_{r2} = I1 \cos(\beta + \frac{4\pi}{16}) \\ \vdots \\ \vdots \\ I_{r15} = I1 \cos(\beta + \frac{30\pi}{16}) \end{cases} \tag{III.44}$$

Et la projection de $I1$ sur les axes d et q donne :

$$\begin{cases} Id = I1 \cos(\theta - \beta) \\ Iq = -I1 \sin(\theta - \beta) \end{cases} \tag{III.45}$$

On a :

$$\cos(\theta - \beta) = \frac{2}{16} \left[\cos \theta \cos \beta + \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{16}\right) \cos\left(\beta + \frac{2\pi}{16}\right) + \dots + \cos\left(\theta + \frac{30\pi}{16}\right) \cos\left(\beta + \frac{30\pi}{16}\right) \right] \tag{III.46}$$

Et:

$$\sin(\theta - \beta) = \frac{2}{16} \left[\sin \theta \cos \beta + \sin \left(\theta + \frac{2\pi}{16} \right) \cos \left(\beta + \frac{2\pi}{16} \right) + \dots + \sin \left(\theta + \frac{30\pi}{16} \right) \cos \left(\beta + \frac{30\pi}{16} \right) \right] \quad (III.47)$$

À partir de l'équation (III.44) on trouve :

$$I1 = \frac{I_{r0}}{\cos \beta}; I1 = \frac{I_{r1}}{\cos(\beta + \frac{2\pi}{16})}; I1 = \frac{I_{r2}}{\cos(\beta + \frac{4\pi}{16})}; \dots \dots; I1 = \frac{I_{r15}}{\cos(\beta + \frac{30\pi}{16})}$$

On remplace les équations (III.46) et (III.47) dans l'équation (III.45) on trouve :

$$I_d = \frac{2}{16} \left[I_{r0} \cos \theta + I_{r1} \cos \left(\theta + \frac{2\pi}{16} \right) + I_{r2} \cos \left(\theta + \frac{4\pi}{16} \right) + \dots + I_{r15} \cos \left(\theta + \frac{30\pi}{16} \right) \right] \quad (III.48)$$

$$I_q = -\frac{2}{16} \left[I_{r0} \sin \theta + I_{r1} \sin \left(\theta + \frac{2\pi}{16} \right) + I_{r2} \sin \left(\theta + \frac{4\pi}{16} \right) + \dots + I_{r15} \sin \left(\theta + \frac{30\pi}{16} \right) \right] \quad (III.49)$$

Et sous forme matricielle on trouve :

$$\begin{bmatrix} Id \\ Iq \end{bmatrix} = \frac{2}{16} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta + \frac{2\pi}{16}) & \cos(\theta + \frac{4\pi}{16}) & \dots & \dots & \cos(\theta + \frac{30\pi}{16}) \\ -\sin \theta & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{16}) & -\sin(\theta + \frac{4\pi}{16}) & \dots & \dots & -\sin(\theta + \frac{30\pi}{16}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{r0} \\ I_{r1} \\ I_{r2} \\ \vdots \\ I_{r15} \end{bmatrix} \quad (III.50)$$

$$\begin{bmatrix} Id \\ Iq \end{bmatrix} = [A] \begin{bmatrix} I_{r0} \\ I_{r1} \\ I_{r2} \\ \vdots \\ I_{r15} \end{bmatrix}$$

En posant $\theta = 0$, Matrice $[A]$ devient :

$$[A] = \frac{2}{16} \begin{bmatrix} \cos 0 & \cos(\frac{2\pi}{16}) & \cos(\frac{4\pi}{16}) & \dots & \dots & \cos(\frac{30\pi}{16}) \\ -\sin 0 & -\sin(\frac{2\pi}{16}) & -\sin(\frac{4\pi}{16}) & \dots & \dots & -\sin(\frac{30\pi}{16}) \end{bmatrix} \quad (III.51)$$

$$\text{Et : } [A]^{-1} = \begin{bmatrix} \cos 0 & -\sin 0 \\ \cos(\frac{2\pi}{16}) & -\sin(\frac{2\pi}{16}) \\ \cos(\frac{4\pi}{16}) & -\sin(\frac{4\pi}{16}) \\ \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots \\ \cos(\frac{30\pi}{16}) & -\sin(\frac{30\pi}{16}) \end{bmatrix} \quad (III.52)$$

III.4.1. La matrice de résistance du modèle *dq* équivalent

$$[R]_{eq} = {}^a A [R] {}^a A^{-1} \quad [25] \tag{III.53}$$

$$\left[\begin{array}{cc|cccccccc|c}
 R_s & -WL_{sc} & & & & & & & & & 0 \\
 -WL_{sc} & R_s & & & & & & & & & 0 \\
 \hline
 0 & 0 & 2\frac{R_e}{N_r} + Rb_0 + Rb_{(N_r-1)} & -Rb_0 & & 0 & & & & & \frac{R_e}{N_r} \\
 0 & 0 & & & & & & & & & \vdots \\
 0 & 0 & 0 & -Rb_{(K-1)} & 2\frac{R_e}{N_r} + Rb_{(K)} + Rb_{(K-1)} & & -Rb_{(K)} & & & & \vdots \\
 0 & 0 & & & & & & & & & \vdots \\
 0 & 0 & -Rb_{(N_r-1)} & 0 & & 0 & -Rb_{(N_r-2)} & -Rb_{(N_r-2)} & 2\frac{R_e}{N_r} + Rb_{(N_r-2)} + Rb_{(N_r-1)} & & \frac{R_e}{N_r} \\
 \hline
 0 & 0 & & -\frac{R_e}{N_r} & & & & & & & -\frac{R_e}{N_r} \\
 & & & & & & & & & & \frac{R_e}{N_r} \\
 & & & & & & & & & & \frac{R_e}{N_r}
 \end{array} \right]$$

$$= \begin{bmatrix} R1 & R2 & R3 \\ R4 & R5 & R6 \\ R7 & R8 & R9 \end{bmatrix} \tag{III.54}$$

III.4.1.1. Passage du modèle polyphasé au modèle biphasé:

Afin de simplifier le calcul de la matrice ci-dessus, on la subdivise en neuf résistances équivalentes, cette subdivision nous permet de mieux comprendre, le passage du modèle de *Nr* grandeurs vers deux grandeurs *dq*.

1) pour [R1]

$$[R1]_{eq} = [R1]$$

$$[R1]_{eq} = \begin{bmatrix} R_s & -WL_{sc} \\ WL_{sc} & R_s \end{bmatrix} \tag{III.55}$$

2) pour [R2]

$$[R2]_{eq} = [R2][A]^{-1} \tag{III.56}$$

$$[R2]_{eq} = \begin{bmatrix} \dots & M_{sr} W \sin j\alpha & \dots \\ \dots & -M_{sr} W \cos j\alpha & \dots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos 0 & -\sin 0 \\ \cos\left(\frac{2\pi}{16}\right) & -\sin\left(\frac{2\pi}{16}\right) \\ \cos\left(\frac{4\pi}{16}\right) & -\sin\left(\frac{4\pi}{16}\right) \\ \vdots & \vdots \\ \cos\left(\frac{30\pi}{16}\right) & -\sin\left(\frac{30\pi}{16}\right) \end{bmatrix} \tag{III.57}$$

$$[R2]_{eq} = \begin{bmatrix} \sum_{j=0}^{j=15} (-M_{sr} W \sin j\alpha) (\cos j\alpha) & \sum_{j=0}^{j=15} -M_{sr} W \sin^2 j\alpha \\ \sum_{j=0}^{j=15} -M_{sr} W \cos^2 j\alpha & \sum_{j=0}^{j=15} (-M_{sr} W \cos j\alpha) (\sin j\alpha) \end{bmatrix} \tag{III.58}$$

Avec :

$$\sum_{j=0}^{j=15} (\sin j\alpha) (\cos j\alpha) = 0 \tag{III.59}$$

$$\sum_{j=0}^{j=15} \sin^2 j\alpha = \frac{N_r}{2} \tag{III.60}$$

$$\sum_{j=0}^{j=15} \cos^2 j\alpha = \frac{N_r}{2} \tag{III.61}$$

$$\sum_{j=0}^{j=15} (\cos j\alpha)(\sin j\alpha) = 0 \quad (III.62)$$

On remplace les formules (III.59), (III.60), (III.61) et (III.62) dans la matrice (III.58) on aboutit à:

$$[R2]_{eq} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{N_r}{2} WM_{sr} \\ -\frac{N_r}{2} WM_{sr} & 0 \end{bmatrix} \quad (III.63)$$

3) pour [R3]:

$$[R3]_{eq} = [R3] \Rightarrow [R3]_{eq} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (III.64)$$

4) pour [R4] :

$$[R4]_{eq} = [R4][A] \quad (III.65)$$

$$[R4]_{eq} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \frac{2}{16} \begin{bmatrix} \cos 0 & \cos(\frac{2\pi}{16}) & \cos(\frac{4\pi}{16}) & \dots & \dots & \cos(\frac{30\pi}{16}) \\ -\sin 0 & -\sin(\frac{2\pi}{16}) & -\sin(\frac{4\pi}{16}) & \dots & \dots & -\sin(\frac{30\pi}{16}) \end{bmatrix} \quad (III.66)$$

$$[R4]_{eq} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (III.67)$$

5) pour [R5] :

$$[R5]_{eq} = [A][R5][A]^{-1} \quad (III.68)$$

On multiplie les trois matrices suivantes:

$$[R5]_{eq} = \frac{2}{16} \begin{bmatrix} \cos 0 & \cos(\frac{2\pi}{16}) & \cos(\frac{4\pi}{16}) & \dots & \dots & \cos(\frac{30\pi}{16}) \\ -\sin 0 & -\sin(\frac{2\pi}{16}) & -\sin(\frac{4\pi}{16}) & \dots & \dots & -\sin(\frac{30\pi}{16}) \end{bmatrix}^* \begin{bmatrix} 2\frac{R_e}{N_r} + Rb_0 + Rb_{(N_r-1)} & -Rb_0 & 0 & 0 & -Rb_{(N_r-1)} \\ 0 & -Rb_{(K-1)} & 2\frac{R_e}{N_r} + Rb_{(K)} + Rb_{(K-1)} & -Rb_{(K)} & 0 \\ -Rb_{(N_r-1)} & 0 & 0 & -Rb_{(N_r-2)} & 2\frac{R_e}{N_r} + Rb_{(N_r-2)} + Rb_{(N_r-1)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos 0 & -\sin 0 \\ \cos(\frac{2\pi}{16}) & -\sin(\frac{2\pi}{16}) \\ \cos(\frac{4\pi}{16}) & -\sin(\frac{4\pi}{16}) \\ \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots \\ \cos(\frac{30\pi}{16}) & -\sin(\frac{30\pi}{16}) \end{bmatrix} \quad (III.69)$$

Donc on trouve :

$$[R5]_{eq} = \begin{bmatrix} A1 & A2 \\ A3 & A4 \end{bmatrix} \quad (III.70)$$

On calcule les différentes sous matrices: A1, A2, A3, A4;

$$\mathbf{A1} = \frac{2}{16} \left[\left(2 \frac{R_e}{N_r} + R_{b0} + R_{b15} \right) \cos^2 0\alpha + \left(2 \frac{R_e}{N_r} + R_{b1} + R_{b0} \right) \cos^2 1\alpha + \dots + \left(2 \frac{R_e}{N_r} + R_{b14} + R_{b15} \right) \cos^2 15\alpha \right] - \frac{4}{16} \left[(R_{b0} \cos 0\alpha \cos 1\alpha) + (R_{b1} \cos 1\alpha \cos 2\alpha) + \dots + (R_{b15} \cos 15\alpha \cos 0\alpha) \right] \quad (\text{III.71})$$

$$\mathbf{A2} = - \frac{2}{16} \left[\left(2 \frac{R_e}{N_r} + R_{b0} + R_{b15} \right) \cos 0\alpha \sin 0\alpha - \left(2 \frac{R_e}{N_r} + R_{b1} + R_{b0} \right) \cos 1\alpha \sin 1\alpha - \dots - \left(2 \frac{R_e}{N_r} + R_{b14} + R_{b15} \right) \cos 15\alpha \sin 15\alpha \right] + \frac{2}{16} \left[(R_{b0} \sin 0\alpha \cos 1\alpha) + (R_{b1} \sin 1\alpha \cos 2\alpha) + \dots + (R_{b15} \sin 15\alpha \cos 0\alpha) \right] + \frac{2}{16} \left[(R_{b0} \cos 0\alpha \sin 1\alpha) + (R_{b1} \cos 1\alpha \sin 2\alpha) + \dots + (R_{b15} \cos 15\alpha \sin 0\alpha) \right] \quad (\text{III.72})$$

$$\mathbf{A3} = - \frac{2}{16} \left[\left(2 \frac{R_e}{N_r} + R_{b0} + R_{b15} \right) \cos 0\alpha \sin 0\alpha - \left(2 \frac{R_e}{N_r} + R_{b1} + R_{b0} \right) \cos 1\alpha \sin 1\alpha - \dots - \left(2 \frac{R_e}{N_r} + R_{b14} + R_{b15} \right) \cos 15\alpha \sin 15\alpha \right] + \frac{2}{16} \left[(R_{b0} \sin 0\alpha \cos 1\alpha) + (R_{b1} \sin 1\alpha \cos 2\alpha) + \dots + (R_{b15} \sin 15\alpha \cos 0\alpha) \right] + \frac{2}{16} \left[(R_{b0} \cos 0\alpha \sin 1\alpha) + (R_{b1} \cos 1\alpha \sin 2\alpha) + \dots + (R_{b15} \cos 15\alpha \sin 0\alpha) \right] \quad (\text{III.73})$$

$$\mathbf{A4} = \frac{2}{16} \left[\left(2 \frac{R_e}{N_r} + R_{b0} + R_{b15} \right) \cos^2 0\alpha + \left(2 \frac{R_e}{N_r} + R_{b1} + R_{b0} \right) \cos^2 1\alpha + \dots + \left(2 \frac{R_e}{N_r} + R_{b14} + R_{b15} \right) \cos^2 15\alpha \right] - \frac{4}{16} \left[(R_{b0} \cos 0\alpha \cos 1\alpha) + (R_{b1} \cos 1\alpha \cos 2\alpha) + \dots + (R_{b15} \cos 15\alpha \cos 0\alpha) \right] \quad (\text{III.74})$$

Si on considère que toutes les barres sont saines $R_{b0} = R_{b1} = \dots R_{b15}$ les sous matrices

$A1, A2, A3$ et $A4$, Deviennent : $A1=A4=2\frac{R_e}{N_r} + 2R_b(1 - \cos\alpha)=R_r$

Et : $A2=A3=0$

6) pour $[R6]$:

$$[R6]_{eq} = [A][R6] \quad (\text{III.75})$$

$$[R6]_{eq} = \frac{2}{N_r} \begin{bmatrix} \dots & \cos j\alpha & \dots \\ \dots & -\sin j\alpha & \dots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -Le \\ N_r \\ \vdots \\ \vdots \\ -Le \\ N_r \end{bmatrix} \quad (\text{III.76})$$

$$[R6]_{eq} = \frac{2}{N_r} \begin{bmatrix} -Le \sum_{j=0}^{N_r} \cos j\alpha \\ Le \sum_{j=0}^{N_r} \sin j\alpha \end{bmatrix} \quad (\text{III.77})$$

Avec :

$$\sum_{j=0}^{15} \cos j\alpha = 0 \quad (\text{III.78})$$

$$\sum_{j=0}^{15} \sin j\alpha = 0 \quad (\text{III.79})$$

On remplace les formules (III.78) et (III.79) Dans la formule (III.77) on aboutit à :

$$[R6]_{eq} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (III.80)$$

7) pour [R7] :

$$[R7]_{eq} = [R7]$$

$$[R7]_{eq} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (III.81)$$

8) pour [R8]:

$$[R8]_{eq} = [R8][A]^{-1} \quad (III.82)$$

$$[R8]_{eq} = \begin{bmatrix} \frac{-Re}{N_r} & \dots & \frac{-Re}{N_r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vdots & \vdots \\ \cos j\alpha & -\sin j\alpha \\ \vdots & \vdots \end{bmatrix} \quad (III.83)$$

$$[R8]_{eq} = \begin{bmatrix} \frac{-Re}{N_r} \sum_{j=0}^{N_r-1} \cos j\alpha & \frac{Re}{N_r} \sum_{j=0}^{N_r-1} \sin j\alpha \end{bmatrix} \quad (III.84)$$

On remplace la formule (III 78) et (III.79) Dans la formule (III.84) on aboutit à :

$$[R8]_{eq} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (III.85)$$

9) pour [R9]:

$$[R9]_{eq} = [R9] \quad (III.86)$$

Finalement :

La nouvelle matrice de résistance du modèle dq équivalent, en considérant que toutes les barres sont saines est:

$$[R_{eq}] = \begin{bmatrix} R_s & -WL_s & 0 & -\frac{N_r}{2} W M_{sr} & 0 \\ WL_s & R_s & -\frac{N_r}{2} W M_{sr} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_r & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_e \end{bmatrix} \quad (III.87)$$

Avec : $R_r = 2 \frac{R_e}{N_r} + 2 R_b (1 - \cos \alpha)$

III.4.2. la matrice d'inductance du modèle dq équivalent

$$[L_{eq}]_{eq} = {}^a A [L] {}^a A^{-1} \quad (III.88)$$

$$\begin{bmatrix} L_{sc} & 0 & \dots & \dots & \dots & -M_{sr} \cos j\alpha & \dots & \dots & 0 \\ 0 & L_{sc} & \dots & \dots & \dots & -M_{sr} \sin j\alpha & \dots & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -\frac{3}{2} M_{sr} \sin K\alpha & -\frac{3}{2} M_{sr} \sin K\alpha & L_{rp} + \frac{2L_e}{N_r} + 2L_b & M_{rr} - L_b & M_{rr} & \dots & M_{rr} & M_{rr} - L_b & -\frac{L_e}{N_r} \\ \vdots & \vdots & M_{rr} - L_b & L_{rp} + \frac{2L_e}{N_r} + 2L_b & M_{rr} - L_b & M_{rr} & \dots & M_{rr} & \vdots \\ \vdots & \vdots & M_{rr} - L_b & M_{rr} & \dots & M_{rr} & M_{rr} - L_b & L_{rp} + \frac{2L_e}{N_r} + 2L_b & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & -\frac{L_e}{N_r} \\ 0 & 0 & -\frac{L_e}{N_r} & \dots & \dots & \dots & \dots & -\frac{L_e}{N_r} & L_e \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} L1 & L2 & L3 \\ L4 & L5 & L6 \\ L7 & L8 & L9 \end{bmatrix} \quad (III.89)$$

III.4.2.1. Passage du modèle polyphasé au modèle biphasé:

De la même manière que pour [R] il résulte [23]:

$$[L1]_{eq} = \begin{bmatrix} L_{sc} & 0 \\ 0 & L_{sc} \end{bmatrix} \quad (III.90)$$

$$[L2]_{eq} = \begin{bmatrix} -\frac{Nr}{2} Msr & 0 \\ 0 & \frac{Nr}{2} Msr \end{bmatrix} \quad (III.91)$$

$$[L3]_{eq} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (III.92)$$

$$[L4]_{eq} = \begin{bmatrix} -\frac{3}{2} Msr & 0 \\ 0 & \frac{3}{2} Msr \end{bmatrix} \quad (III.93)$$

$$[L5]_{eq} = \begin{bmatrix} L_{rc} & 0 \\ 0 & L_{rc} \end{bmatrix} \quad (III.94)$$

$$[L6]_{eq} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (III.95)$$

$$[L7]_{eq} = [0 \ 0] \quad (III.96)$$

$$[L8]_{eq} = [0 \ 0] \quad (III.97)$$

$$[L9]_{eq} = [L_e] \quad (III.98)$$

Finalement, la nouvelle matrice d'inductance du modèle dq équivalent, en considérant que toutes les barres sont saines est [23]:

$$\left[\begin{array}{cc|cc|c} L_{sc} & 0 & -Nr/2 Msr & 0 & 0 \\ 0 & L_{sc} & 0 & Nr/2 Msr & 0 \\ \hline -3/2 Msr & 0 & L_{rc} & 0 & 0 \\ 0 & 3/2 Msr & 0 & L_{rc} & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 0 & L_e \end{array} \right] \quad (III.99)$$

Avec: $L_{rc} = L_{rp} - Mrr + 2 \frac{L_e}{N_r} + 2Lb(1 - \cos\theta)$

Donc le système complet en considérant que toutes les barres sont saines est :

$$\left[\begin{array}{cc|cc|c} L_{sc} & 0 & -\frac{Nr}{2} Msr & 0 & 0 \\ 0 & L_{sc} & 0 & \frac{Nr}{2} Msr & 0 \\ \hline -\frac{3}{2} Msr & 0 & L_{rc} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{3}{2} Msr & 0 & L_{rc} & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 0 & L_e \end{array} \right] \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} Ids \\ Iqs \\ Idr \\ Iqr \\ Ie \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} Vds \\ Vqs \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Rs & -WLs & 0 \\ WLs & Rs & -\frac{Nr}{2}WMr \\ 0 & 0 & Rr \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Ids \\ Iqs \\ Idr \\ Iqr \\ Ie \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} -\frac{Nr}{2}WMr & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Rr & 0 \\ 0 & 0 & Rr & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & Re \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Ids \\ Iqs \\ Idr \\ Iqr \\ Ie \end{bmatrix} \quad (III.100)$$

III.5. Simulation du modèle dq

III.5.1. La Simulation en cas sain

Nous simulons le modèle ci-dessus ;

Les figures qui suivent présentent les résultats obtenus par simulation du modèle dq.

Dans cette partie on va présenter et étudier l'évolution des différentes grandeurs électrique et électromécanique de la machine asynchrone, alimenté directement par le réseau triphasé.

Les figures (III.6), (III.7), et (III.8) montrent l'évolution de la vitesse, du couple, et du courant statorique, le démarrage de cette machine s'effectue à vide.

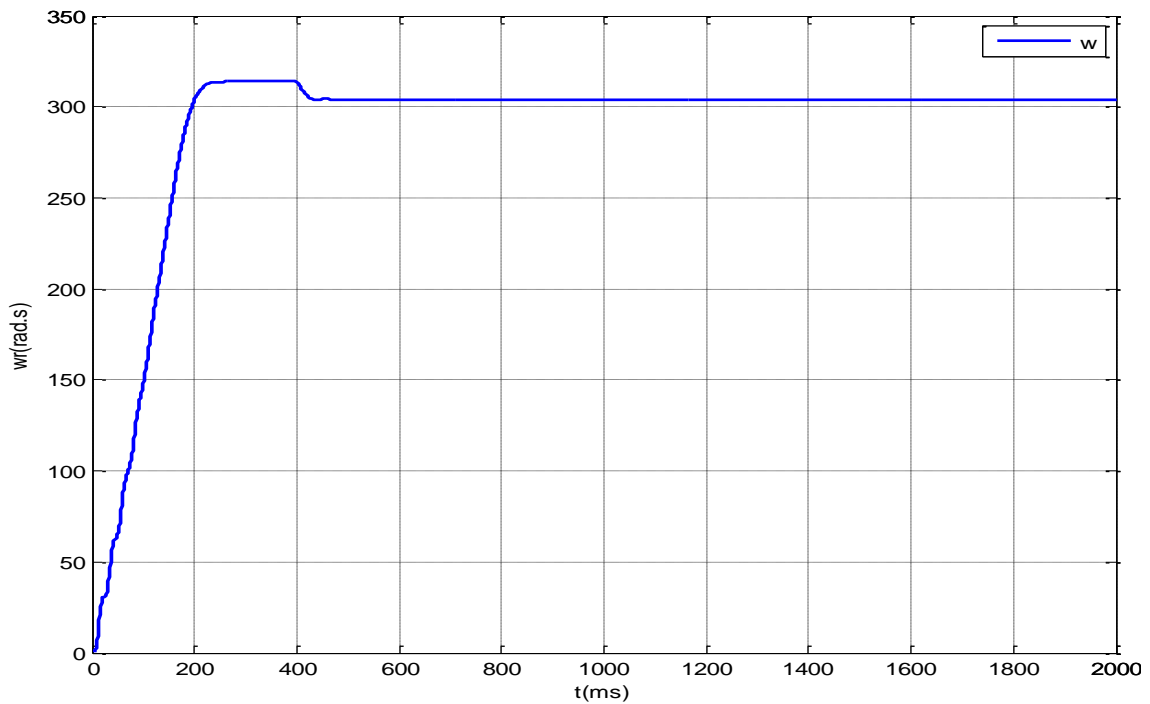


Figure (III.6): Vitesse (moteur sain).

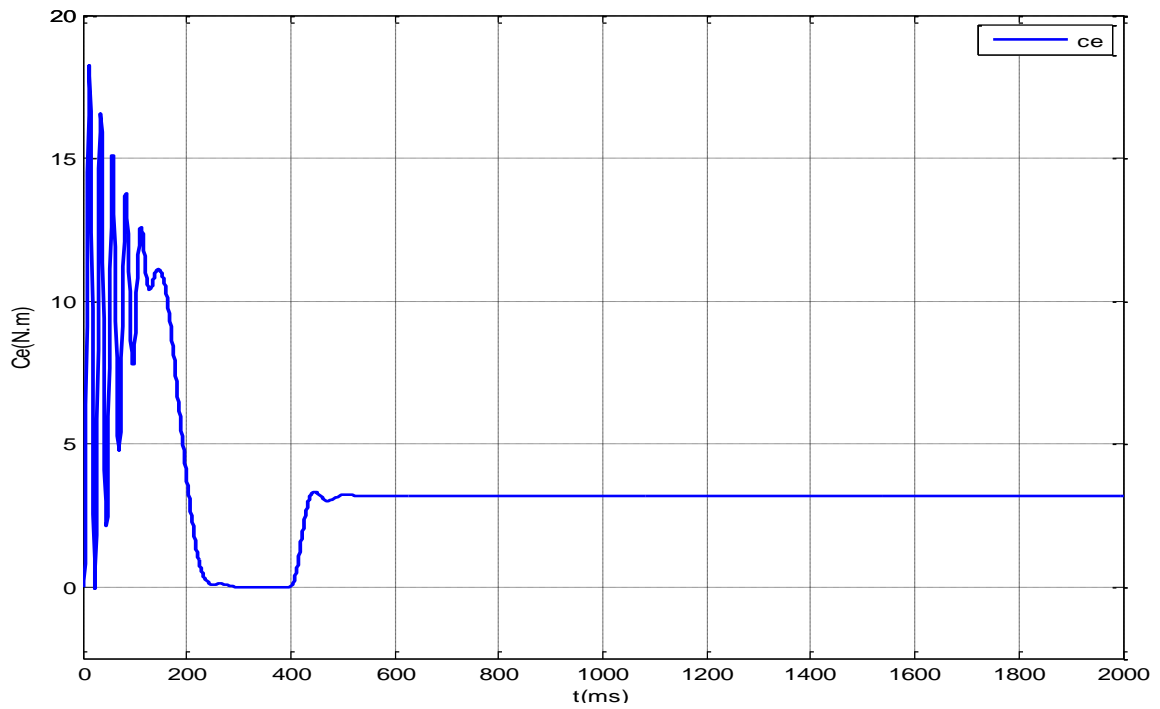


Figure (III.7): Couple (moteur sain).

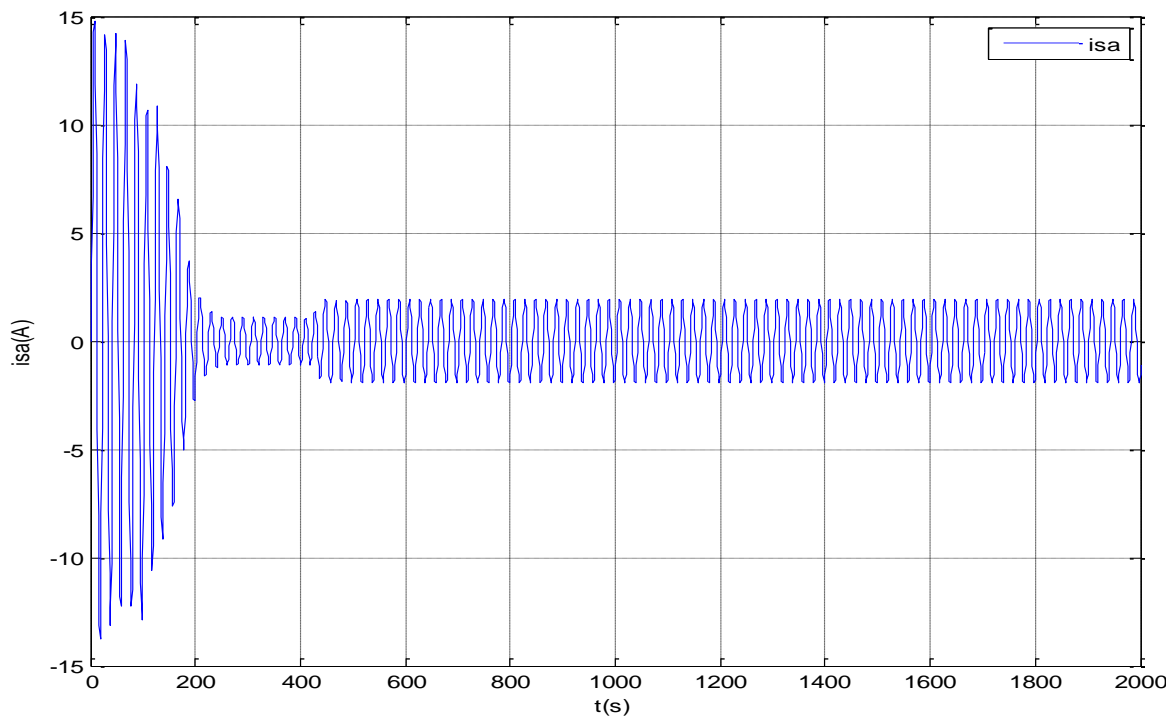


Figure (III.8): Courant statorique (moteur sain).

III.5.1.1 Explications des résultats:

La figure (III.6) montre l'évolution de la vitesse de rotation; aux premiers instants du démarrage, la vitesse augmente de 0 à 314 rad/s dans un intervalle de temps 0,25s, accédant ainsi le régime permanent, par la suite, à l'instant $t=0.4s$, on applique un couple résistant de 3.2N.m qui a tendance à freiner l'arbre moteur d'où la diminution de la vitesse.

La figure(III.7)montre l'évolution du couple électromagnétique, le régime transitoire qui dure 0.2s,se manifeste par un régime transitoire amorti autour de 10 Nm, et pouvant atteindre une valeur maximale de 18.5, à partir de 0.15s, le couple chute rapidement pour atteindre une valeur nulle, a l'instant t=0.4, nous appliquons un couple résistant de 3.2 Nm et évidemment le couple réagit d'une manière inverse de sorte à combattre le couple résistant.

La figure(III.8) montre l'évolution de courant statorique de la phase (a) en fonction du temps, lors de démarrage à vide sous une tension nominale avec une alimentation sinusoïdale équilibrée.

Étant donné que le rotor est initialement à l'arrêt, un régime transitoire se adresse par des amplitudes de courant qui accèdent des valeurs maximales allant jusqu'à 15A et qui dure à 0,2s par la suite un régime permanant s'établit et se traduit par la chute des courants avec des oscillations sinusoïdale autour de valeur nulle, l'instant t=0.4s nous imposons un couple résistant nominal de 3.2 N.m, on remarque l'augmentation de l'amplitude des courants statorique.

III.5.2. La Simulation en cas des défauts rotoriques

La méthode qu'on a adoptée pour la simulation des défauts rotoriques consiste à remplacer la valeur initiale de la résistance des barres cassées par une valeur finie. Cette méthode est appelée méthode des résistances finies.

En effet, dans on estime qu'une augmentation de la résistance de la barre de 11 fois permet d'obtenir à des résultats en concordance avec ceux obtenus expérimentalement.

Par conséquent nous avons considéré des augmentations de 11 fois supérieures à la valeur de la résistance en cas sain de la barre.

La méthode d'intégration est celle de Runge Kutta d'ordre 4 [23].

III.5.2.1.Modélisation des défauts dans le cas cassure des barres:

Le modèle présenté ci-dessous, permet de simuler la rupture de barre au rotor

$$\begin{bmatrix} L_{sc} & 0 & -\frac{Nr}{2}M_{sr} & 0 & 0 \\ 0 & L_{sc} & 0 & \frac{Nr}{2}M_{sr} & 0 \\ -\frac{3}{2}M_{sr} & 0 & L_{rc} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{3}{2}M_{sr} & 0 & L_{rc} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & L_e \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} Ids \\ Iqs \\ Idr \\ Iqr \\ Ie \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Vds \\ Vqs \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Rs & -WLs & 0 \\ WLs & Rs & -\frac{Nr}{2}WM_{sr} \\ 0 & 0 & A1 \\ 0 & 0 & A3 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Ids \\ Iqs \\ Idr \\ Iqr \\ Ie \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{Nr}{2}WM_{sr} & 0 \\ 0 & 0 \\ A2 & A4 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Ids \\ Iqs \\ Idr \\ Iqr \\ Ie \end{bmatrix} \quad (III.101)$$

◆ III.5.2.1.1.La cassure d'une barre

Pour illustrer la cassure totale de barre dans le modèle de la machine, nous augmentons la valeur de la barre cassée de 11 fois.

Nous simulons la rupture de la quatrième barre (k= 3) donc Rb cassé = 11*Rb sain

Les valeurs des A1, A2, A3 et A4 deviennent :

$$A1 = 5.928 \cdot 10^{-5}$$

$$A2 = 5.4562 \cdot 10^{-6}$$

$$A3 = 5.4562 \cdot 10^{-6}$$

$$A4 = 5.928 \cdot 10^{-5}$$

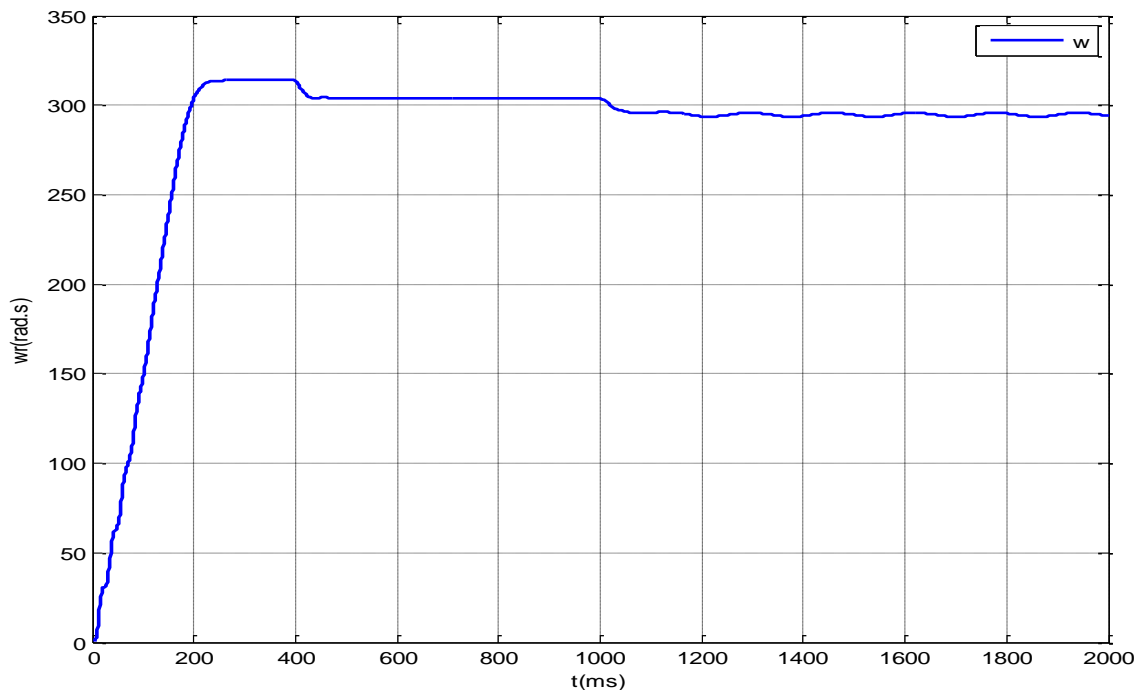


Figure (III.9): Vitesse au démarrage, en charge puis lors de la rupture de barres.

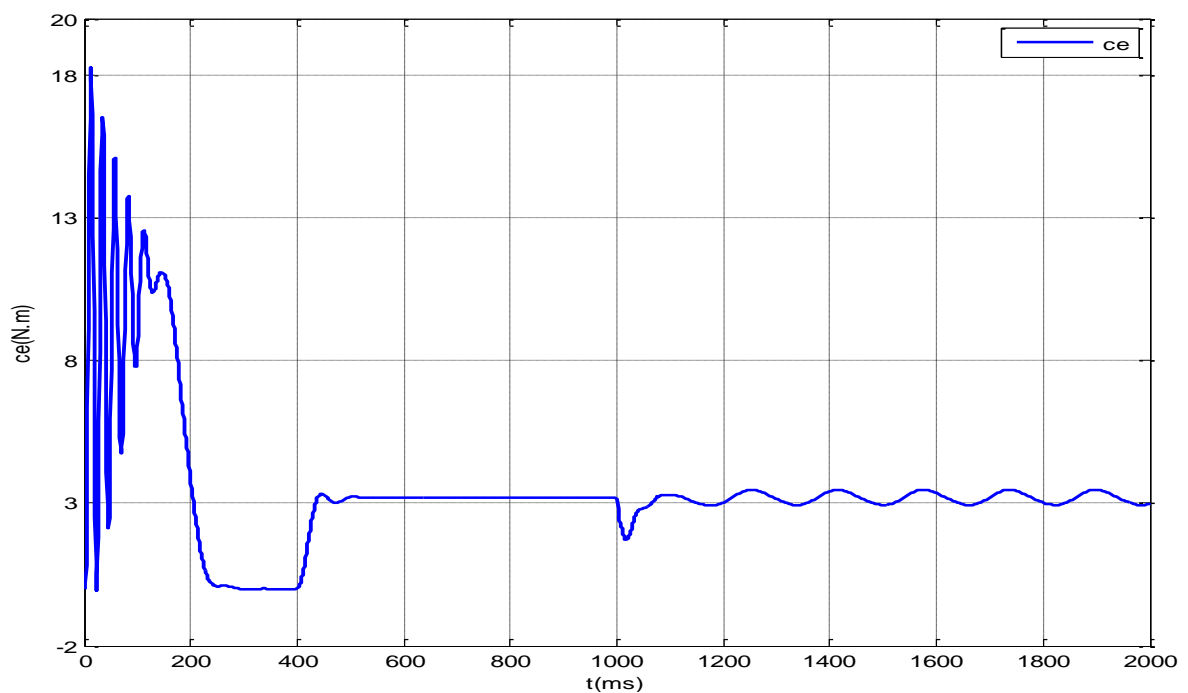


Figure (III.10): Le Couple lors de la rupture de barre.

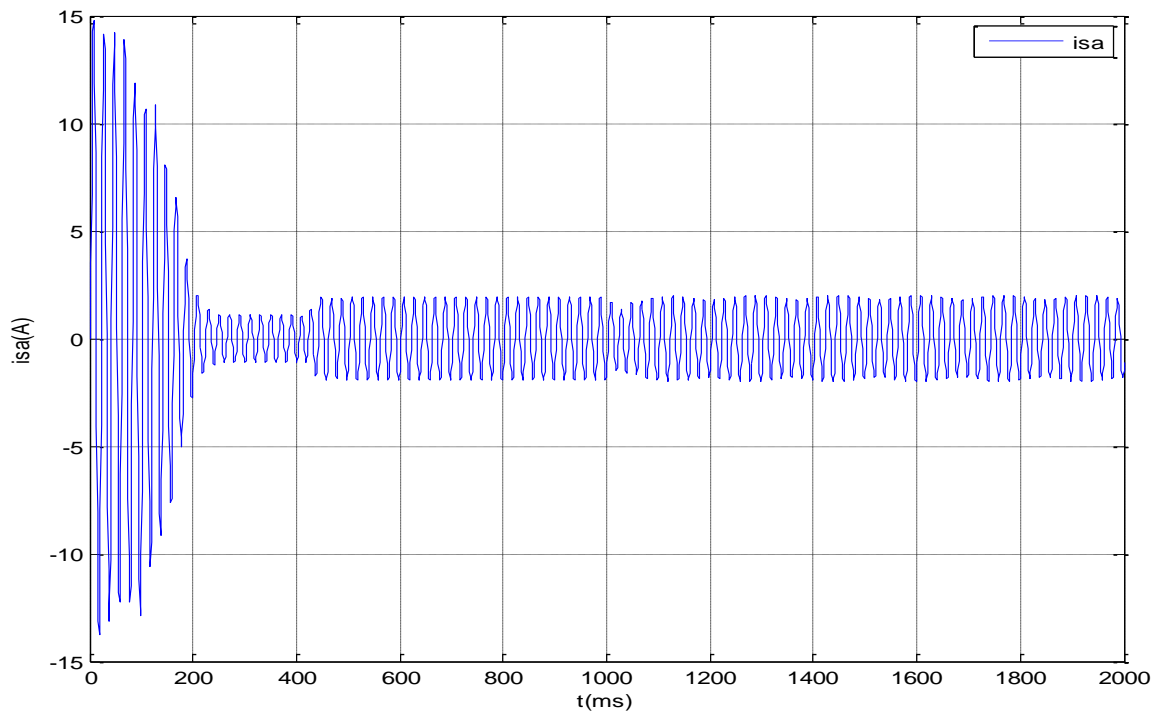


Figure (III.11): Courant statorique, lors de la rupture de barre.

♦ **III.5.2.1. 2. La cassure d'une quatre barre première**

Nous simulons la rupture de les quatre barres première donc $R_b \text{ cassé} = 11 * R_b \text{ sain}$

Les valeurs des A_1, A_2, A_3 et A_4 deviennent :

$$A_1 = 8.8905 * 10^{-5}$$

$$A_2 = 3.7275 * 10^{-5}$$

$$A_3 = 3.7275 * 10^{-5}$$

$$A_4 = 8.8905 * 10^{-5}$$

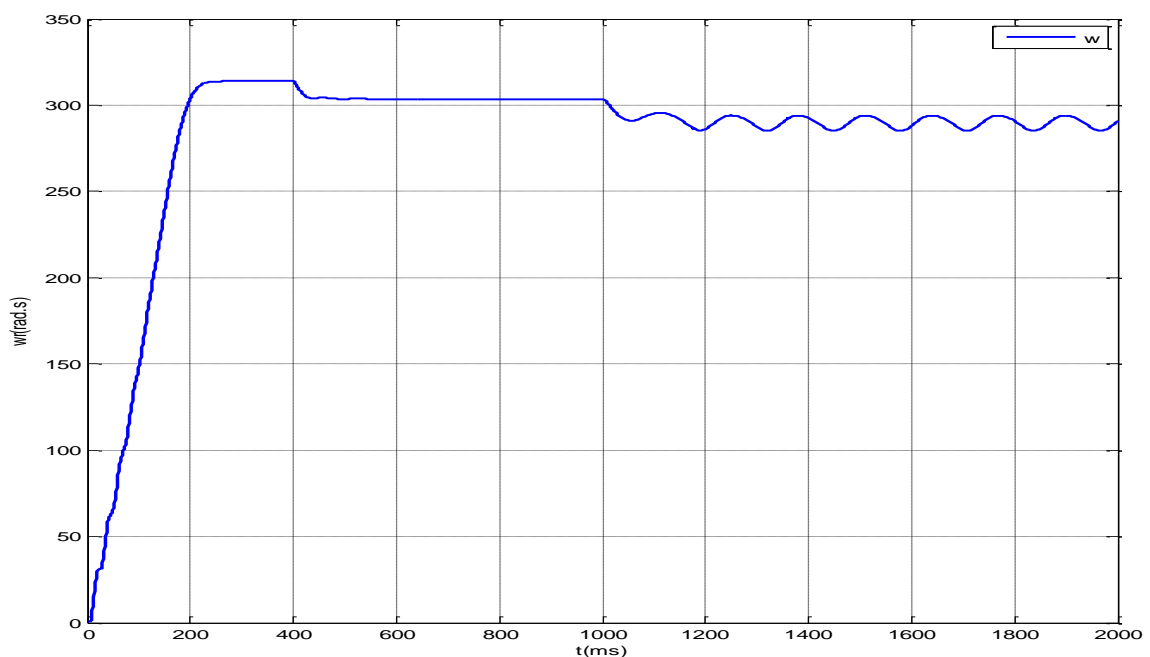


Figure (III.12): La Vitesse lors de la rupture de quatre barres.

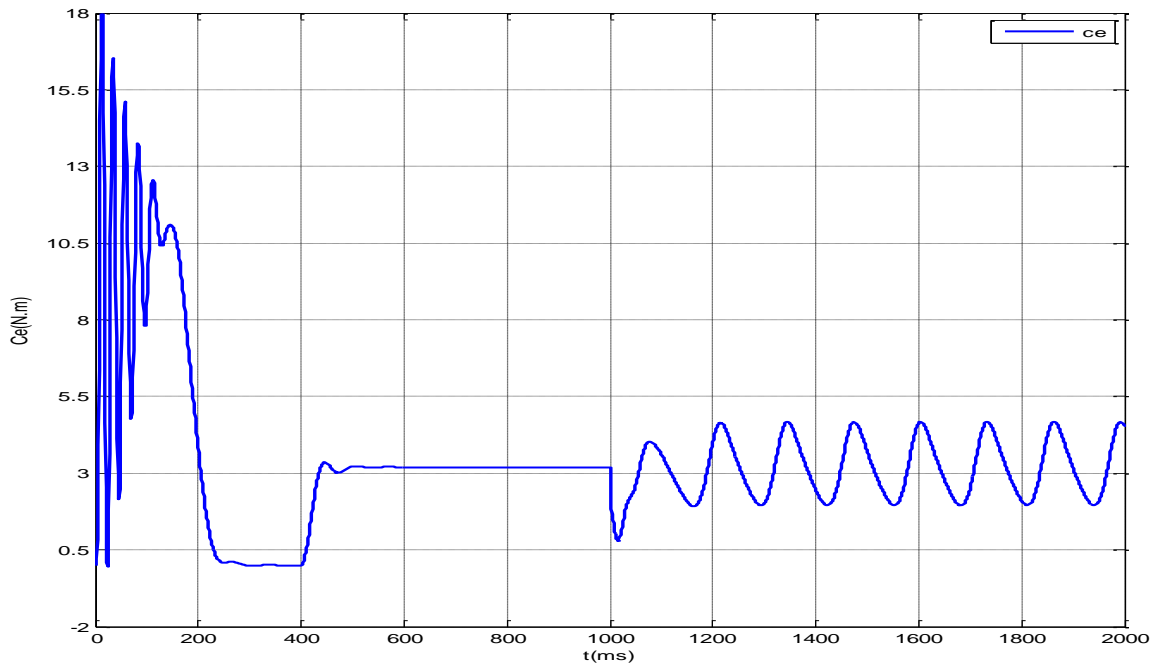
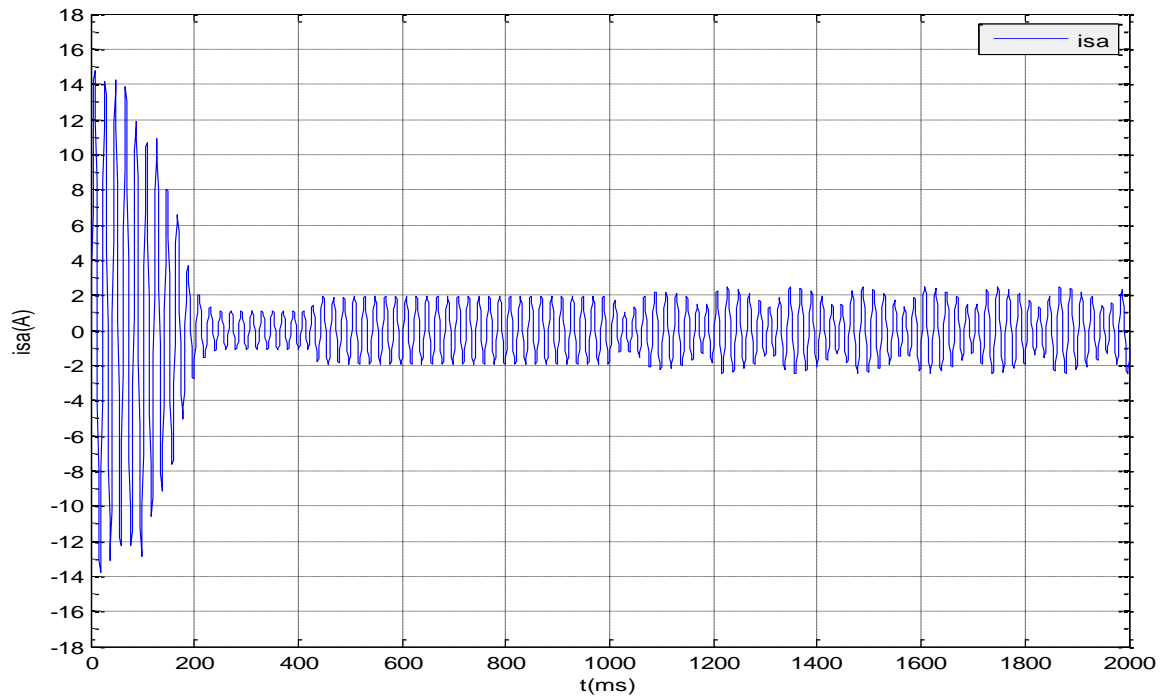


Figure (III.13): Le Couple lors de la rupture de quatre barres.



Figure(III.14): Courant statorique lors de la rupture 4 de barres.

III.5.2.2. Analyse des résultats:

- Les figures (III.9), (III.10), (III.11) montrent l'évolution de la vitesse, courant statorique, et le couple électromagnétique lors des essais de cassure d'une barre, et le même pour les quatre barres(III.12), (III.13), (III.14).
- Le démarrage s'effectue à vide.
- À partir de l'instant $t=0.4$ s nous procédons à un échelon de couple résistant nominal de 3.2 N.m.

- La vitesse chute à 303.678 rad/sec figure (III.6), et le couple électromagnétique vient équilibrer le couple résistant.
- A $t = 1s$, nous provoquons le premier défaut avec la rupture de la quatrième barre ($K= 3$), nous constatons:
 1. Lors des défauts rotoriques, il réduit la valeur moyenne du couple électromagnétique et fait apparaître les oscillations sur le couple et la vitesse de rotation.
 2. Ce pendant une ondulation de l'amplitude des courants apparaît avec la cassure de la barre est proportionnelle au nombre de barres cassées.
 3. Il est remarqué que l'augmentation du nombre de barres cassées provoque l'augmentation de l'amplitude des oscillations de la vitesse (w) et de couple électromécanique (C_e) et le courant, ce qui a pour effet la détérioration des enroulements de la machine.
 4. Lors des défauts rotoriques, les courants dans les barres cassées chutent pratiquement à zéro, les courants dans les barres voisines deviennent déséquilibrés, les courants qui conduisaient les barres cassées se répartit alors dans les barres voisines.

III.6. Conclusion

Dans ce chapitre on a traité la machine asynchrone en terme de circuit, et on a considéré que le rotor est constitué de plusieurs éléments, chaque élément de la cage est décrit par un circuit électrique équivalent de N_r grandeurs.

Puis, on a fait la transformation de N_r grandeurs vers deux grandeurs, pour faciliter l'étude, ce modèle permet d'étudier les différents défauts rotoriques, donc ce modèle s'adapte bien au problème posé.

La simulation de la machine asynchrone a été effectuée, d'une part, état sain d'autre part, des défauts rotoriques (cassure des barres). À cet effet, nous avons constaté que les paramètres de la machine (courant, vitesse et couple) changent (oscillations) en valeurs considérable et différent, suivant le nombre cassée.

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, cette méthode, connue sous le nom de MCSA (Motor Current Signature Analysis), est largement employée depuis ces dernières années, le chapitre suivant est consacré à cette technique. [4]

Chapitre IV

Diagnostic des Défauts de La MAS

Chapitre IV: Diagnostic Des Défauts De La MAS

IV.1. Introduction

Comme nous avons montré dans le premier chapitre, les méthodes de détection des défauts sont nombreuses et varient selon le besoin, dans la suite deux méthodes plus utilisées dans l'industrie.

L'analyse du signal est l'une des méthodes les plus importantes utilisées pour la surveillance et le diagnostic de défaut, dont le but est de trouver une simple et efficace transformée des signaux originaux. Par conséquent, l'information importante contenue dans les signaux peut être extraite.

Beaucoup de méthodes d'analyse du signal ont été utilisées pour le diagnostic de défaut, parmi ces méthodes on trouve la FFT (Fast Fourier Transform), une des méthodes les plus extensivement utilisées et les mieux établies. Malheureusement, les méthodes basées sur FFT ne sont pas appropriées à l'analyse des signaux non-stationnaires et ne peuvent pas indiquer l'information inhérente dans ces signaux. [8]

L'utilité du Réseaux de Neurones Artificiels (R.N.A) réside dans le fait que la résolution de certains problèmes qui par des méthodes classiques est très longue et très dure, peut être facilitée et améliorée. Les problèmes peuvent être de toutes sortes, de l'analyse de signaux à la prise de décision.

Les RNA, nés il y a environs une soixantaine d'années, ont évolués jusqu'à aujourd'hui. Leurs évolutions n'ont pas toujours été d'actualité car les premiers RNA ne peuvent pas exécuter certaines fonctions [3].

IV.2 L'analyse Spectrale Pour Les Défauts Statorique Et Rotorique

IV.2.1 Transformé de Fourier

La transformée de Fourier est surtout utilisée pour l'analyse des systèmes en régimes permanents. Cependant, il est possible de la mettre en œuvre pour l'étude de fonctionnements dynamiques (lents), par la méthode du spectrogramme. [4]

Cette analyse est la prise en compte à la fois des informations sur l'amplitude et la phase. Le spectrogramme est le calcul répétitif de la transformée de Fourier sur une fenêtre temporelle glissant sur le signal, son calcul sera donc soumis aux paramètres suivants: [4]

- longueur de la fenêtre.
- type de fenêtre de pondération.
- longueur totale du signal analysé.
- pas de glissement de la fenêtre ou pas temporel.

IV.2.2 Méthodes de traitement des signaux

IV.2.2.1 Les méthodes classiques

Les méthodes classiques de traitement des signaux, fondées sur la transformée de Fourier discrète.

Quelques méthodes permettant de diminuer la variance pour obtenir une meilleure estimation de la densité spectrale de puissance du signal observé, on peut citer : [5]

- Transformée de Fourier rapide : La transformée de Fourier rapide, notée TFR, est un algorithme de calcul rapide de la TFD élaborée en 1965 par J. W. Cooley et J. W. Tuckey, cette transformée de Fourier rapide est très utilisée lorsqu'il est indispensable d'obtenir une analyse fréquentielle "en ligne" dans certains processus au travers d'une fenêtre glissante d'observation.
- Transformée de Fourier discrète : généralement notée TFD
- Estimateurs spectraux à variance réduite.
- Analyse spectrale en ligne
- Périodogramme.

IV.2.2.2 Les méthodes de diagnostic actuellement

Les différentes méthodes de diagnostic actuellement utilisées pour détecter la présence d'une Anomalie au sein d'une machine asynchrone, on découvrant : [5]

IV.2.2.2.1 Analyse temps-fréquence et temps-échelle

La non-stationnarité des signaux est une propriété très courante mais difficile à maîtriser.

C'est pour cette raison que des techniques de traitements temps-fréquence et temps-échelle ont vu le jour on peut trouver:

- ◆ Analyse temps-fréquence.
- ◆ Analyse temps-échelle.

Le courant du moteur asynchrone peut être assimilé à un signal non-stationnaire dans certaines applications (variation aléatoire du couple de charge modifiant la valeur efficace du courant absorbé).

IV.2.2.2.2 Analyse cepstrale

Le mot "cepstre" a été initialement proposé par Bogert en 1963, le cepstre est une anagramme du mot spectre. La raison de ce choix est que nous obtenons le cepstre en effectuant une analyse spectrale supplémentaire sur le spectre fréquentiel du signal observé.

IV.2.2.2.3 Analyse spectrale à haute résolution

Les méthodes, dites à haute résolution (HR) fréquentielle, restent en pratique largement sous employées par rapport aux méthodes plus classiques qui reposent, comme nous l'avons vu précédemment, sur le calcul de la transformée de Fourier.

IV.2.2.2.4 Diagnostic des défauts par estimation paramétrique

Cette méthode de diagnostic utilise les paramètres structuraux d'un modèle de connaissance et extrait par la suite les paramètres du système à partir des lois de connaissance pour détecter et localiser les défaillances. Le point essentiel dans l'efficacité de cette méthode est le choix du modèle de connaissance. [5]

IV.2.2.2.5 Diagnostic des défauts par reconnaissance des formes

Les méthodes de diagnostic qui utilisent la reconnaissance des formes sont peu nombreuses à ce jour. Un vecteur de paramètres, appelé vecteur de forme, est extrait à partir de plusieurs mesures.

IV.2.2.2.6 Diagnostic des défauts par analyse du vecteur de Park

Une représentation en deux dimensions peut être utilisée pour décrire le phénomène des moteurs asynchrones triphasés. Une des plus connues et des plus appropriées repose sur le calcul des courants dits de Park. [5]

IV.2.2.2.7 Diagnostic des défauts par le suivi des grandeurs mesurables

À ce jour, c'est l'analyse fréquentielle des grandeurs mesurables qui est le plus souvent utilisée pour le diagnostic de défaut rotorique, les grandeurs accessibles et mesurables peuvent être :

- les courants absorbés – le flux de dispersion – la tension d'alimentation – la tension de neutre (neutre alimentation - neutre machine) – le couple électromagnétique – la vitesse rotorique
- les vibrations.

La plupart des défauts connus peuvent être découverts avec ce type d'approche, cependant, l'équipement nécessaire pour l'acquisition des signaux reste encore coûteux.[5]

IV.2.2.2.8 Technique additionnelle

Récemment, une technique intéressante a été proposée par J. Milimonfared pour la détection des barres cassées dans les moteurs asynchrones cette technique est basée sur un test d'ouverture de phase lorsque la machine asynchrone fonctionne à vide.

IV 2.3. Les résultats de l'analyse spectrale en état sain

Les figures (IV.1) l'allure du spectre fréquentiel des courants statorique d'une machine dans l'état sain, on ne distingue aucune raie latérale autour fondamentale jusque 500 HZ et l'amplitude fondamentale des trois courants sont égale et les signales sont presque similaire.

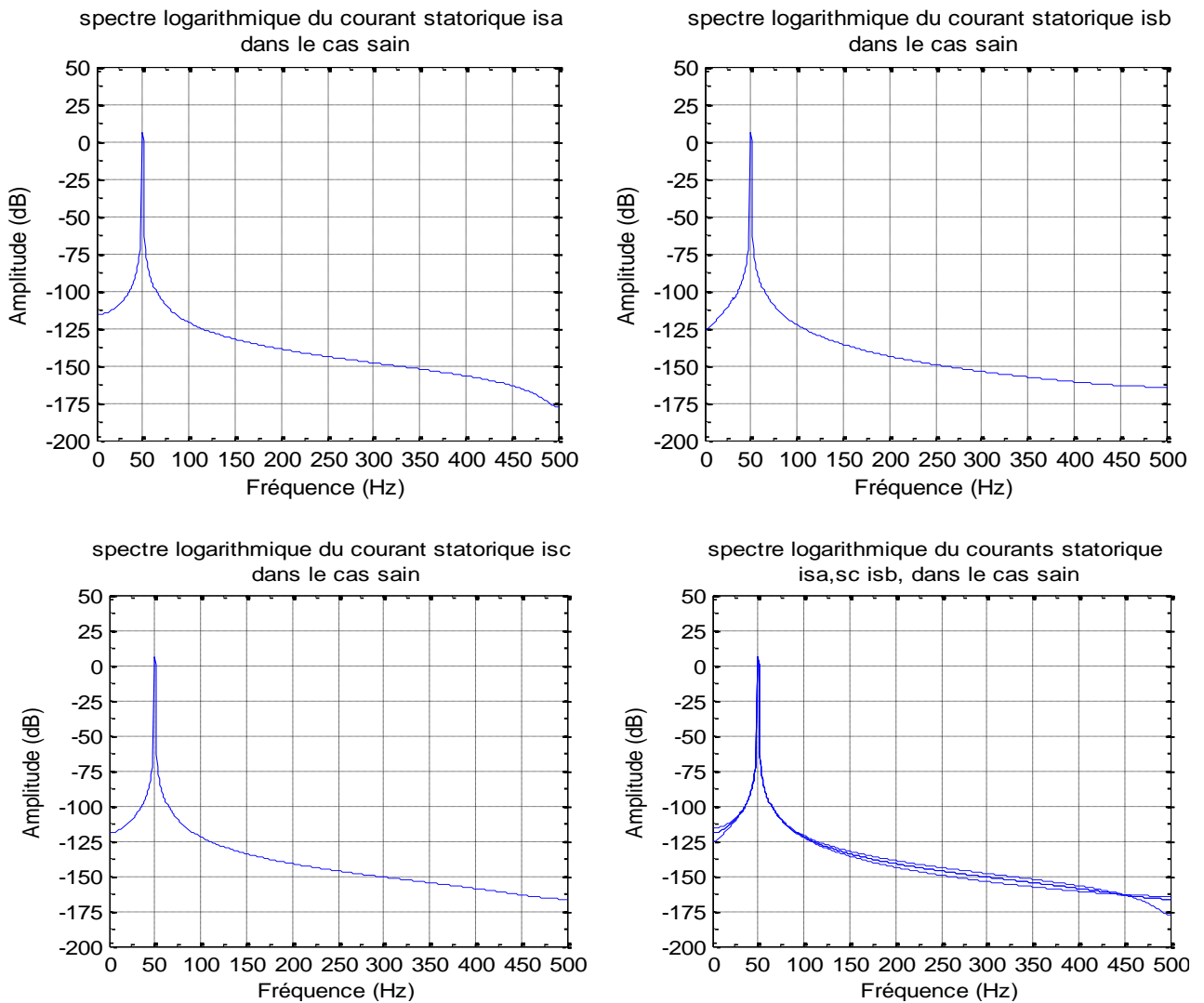


Figure (VI-1) : Spectre logarithmique des courants statoriques dans le cas sain.

IV 2.4. L'analyse spectrale dans un état défaut au stator statorique

Le stator est soumis à des contraintes électriques et mécaniques. Il présente essentiellement comme défaut (Chapitre I), la mise en court-circuit d'une ou plusieurs spires de son bobinage, le déséquilibre ou l'ouverture d'une des phases d'alimentation. [4]

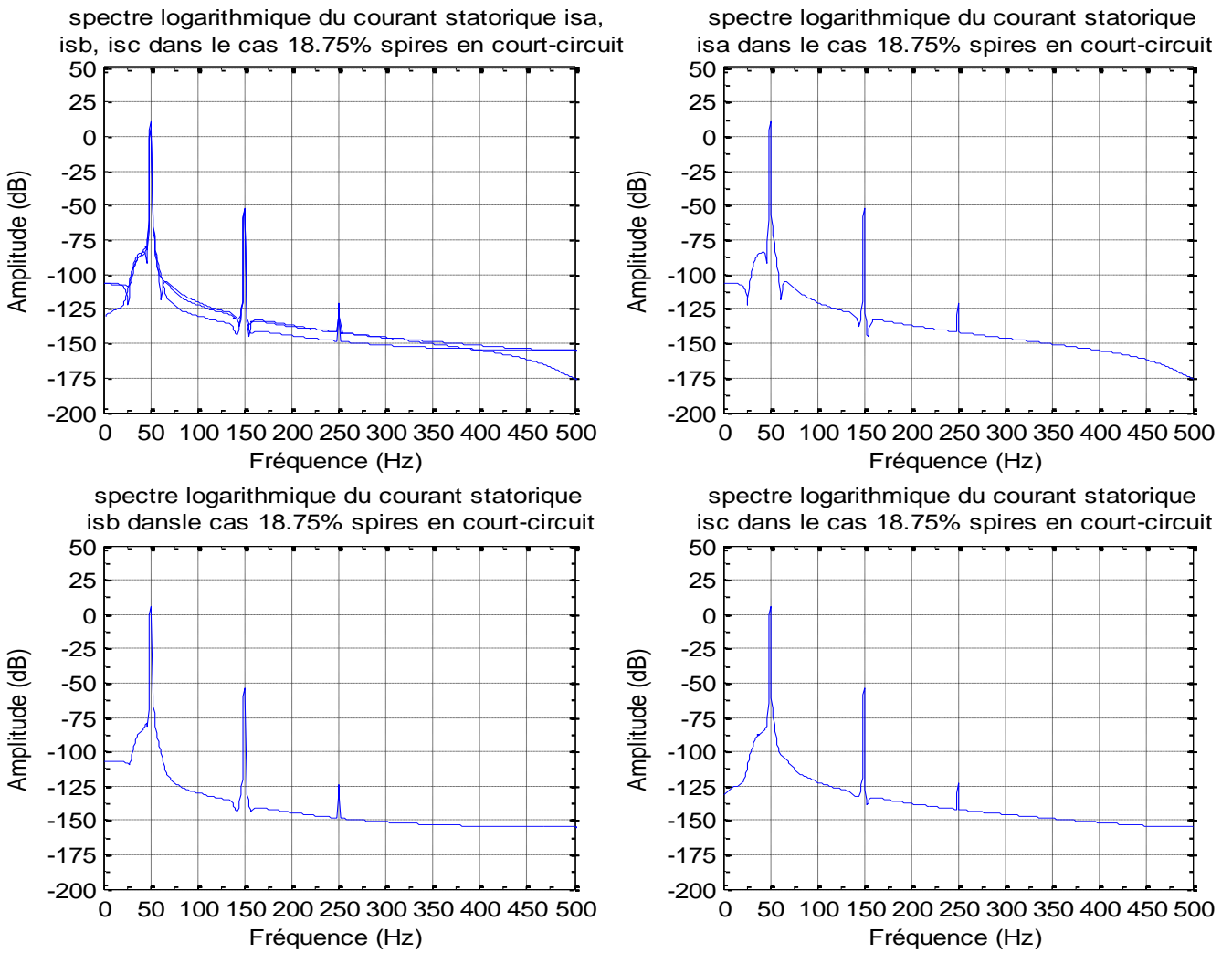
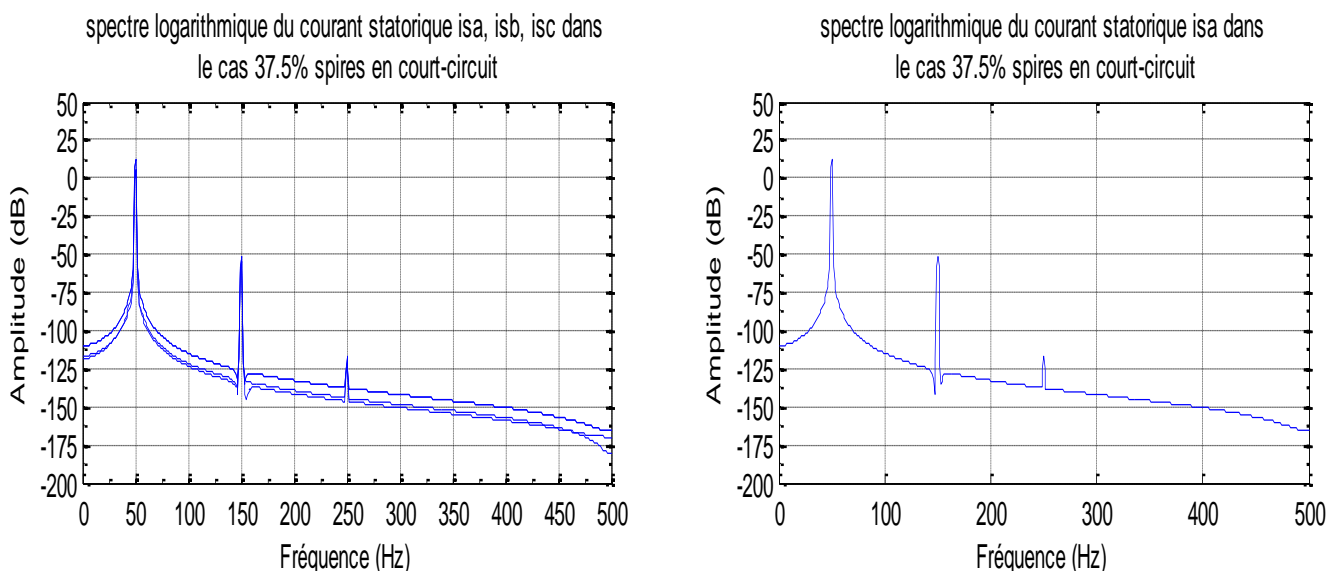
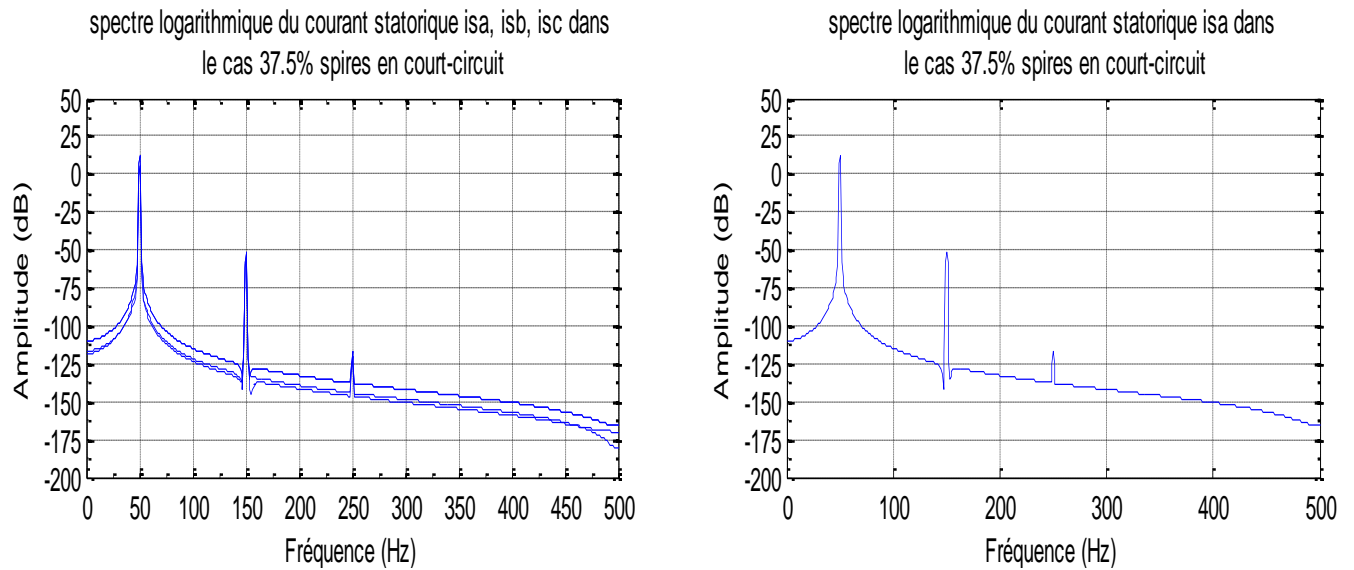


Figure (VI-2) : Spectre logarithmique des courants statoriques dans le cas court-circuit de 18.75%.





Figure(VI-3): Spectre logarithmique des courants statoriques dans le cas court-circuit de 37.5%.

IV 2.4.1 Interprétation des résultats

Les figures (IV.2)(IV.3), l'allure du spectre fréquentiel des courants statorique d'une machine dans l'état défectueuse,(IV.2) indique les spectres des courant statorique en cas court-circuit de 18,75% au spires de la phase (A),(défaut de chapitre II), on remarque des raies latérales de différentes amplitudes à différentes fréquences (150 Hz et 250 Hz c-à-d les harmoniques 3 et 5).

Les figures (IV.3) présente les spectres des courant statorique en cas court-circuit 37.5 %, on trouve le même résultat pour le défaut précédent mais la seule différence est dans la valeur de l'amplitude des harmoniques d'ordre trois et cinq.

IV 2.5. Analyse spectrale en présence des défauts rotoriques

La rupture de barre, d'une machine asynchrone est une des défauts le plus couramment étudié en laboratoire en raison à sa simplicité de réalisation mais non nécessairement le plus probable.

Ce défaut induit des modifications dans les courants du stator et entraîne donc l'apparition d'harmoniques caractéristiques dans le spectre de ce signal est difficile d'analyser directement le courant statorique. Ce dernier ne présente, en effet, qu'une petite modulation. [25]

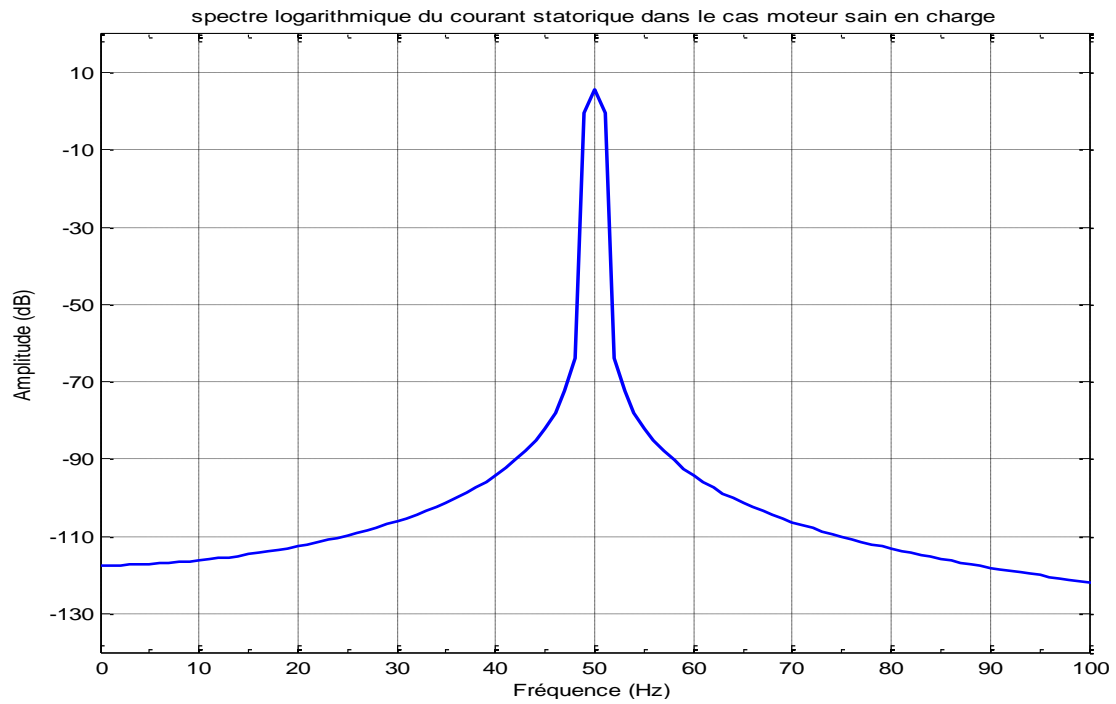
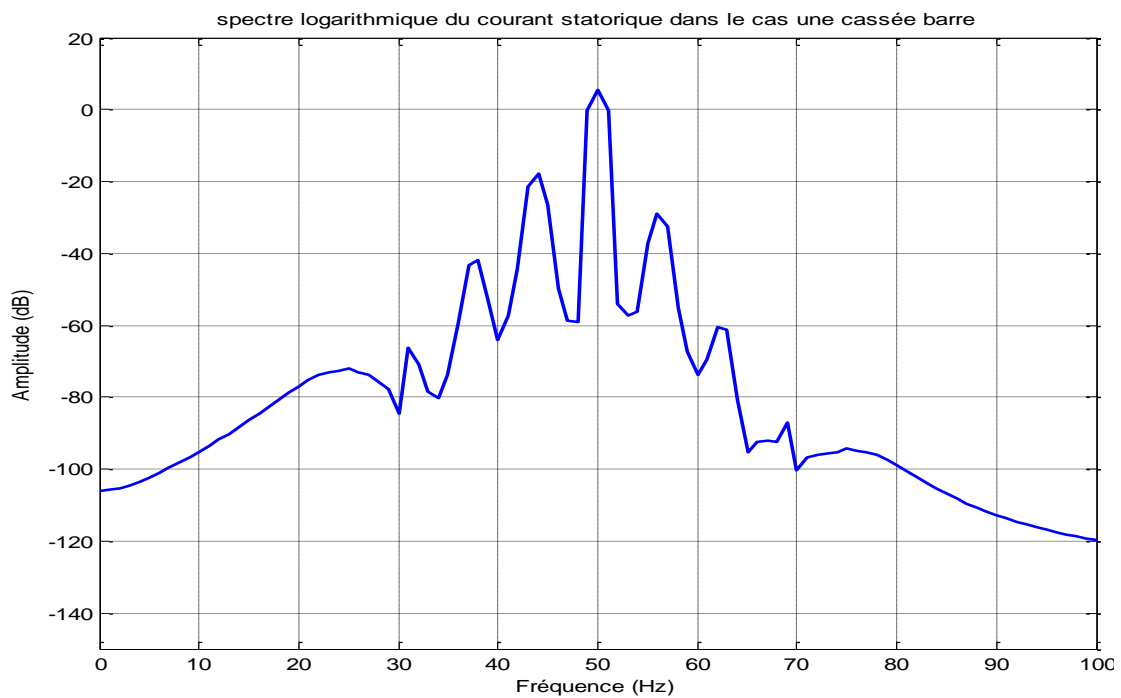
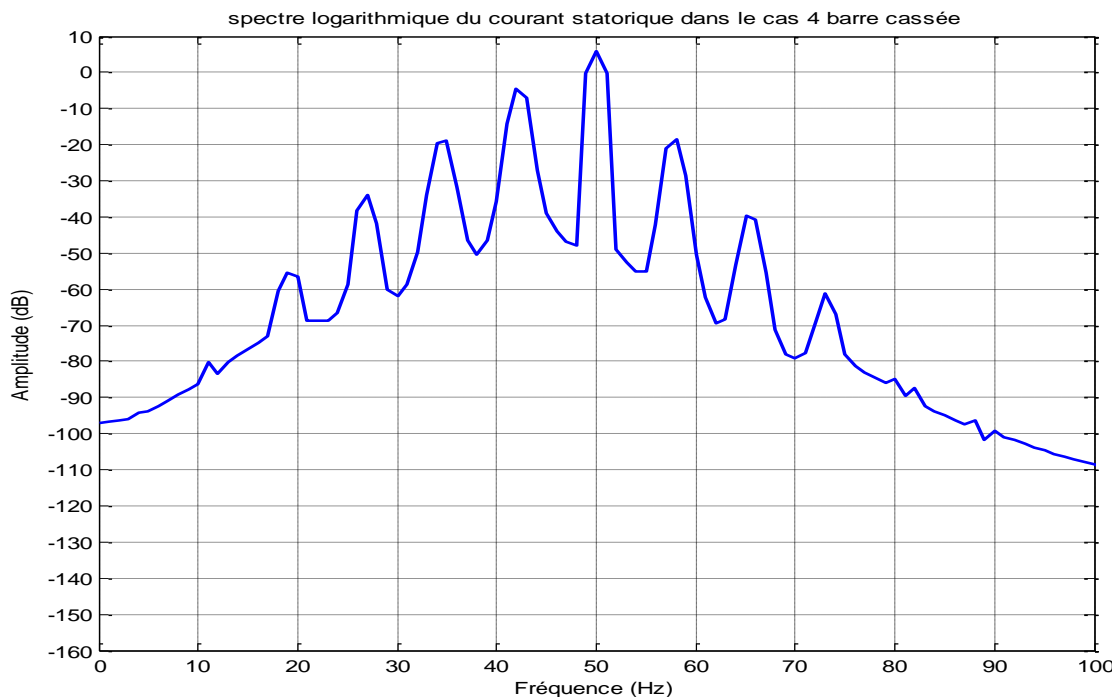


Figure (IV.4) : Spectre du courant statorique dans le cas d'un moteur sain



Figure(IV.5) : Spectre du courant statorique dans le cas d'un rotor avec une barre cassée



Figure(IV.6):Spectre du courant statorique dans le cas d'un rotor avec quatre barres cassées

IV.2.5.1.Analyse des Résultats

L'analyse par FFT permet de mettre en évidence les raies présentes dans le spectre du signal statorique.

-Sur les figures (IV.4) à (IV.6) sont présentés les résultats de simulation relatifs à l'analyse par FFT du courant ' I_{sa} ' en régime permanent à charge nominale pour un glissement de 3.5%

-Lors de la simulation du moteur sain, en charge, nous n'observons aucune raie latérale figure (IV.4).

-Lorsqu'une barre est rompue, on remarque l'apparition des raies latérales à 46.5 Hz et 53.5Hz au voisinage du fondamental $f_s = 50\text{Hz}$, figure (IV.5).

Par ailleurs, avec l'augmentation du nombre de barres cassées, on obtient des valeurs de plus en plus importantes de l'amplitude des raies latérale (voir figure, IV.6).

Donc une analyse spectrale du courant statorique fait apparaître les composantes latérales par rapport au fondamentale correspondantes à la fréquence de $[(1 \mp 2Kg)f_s]$.

Ce résultat copieusement important constitue une signature du défaut rotorique.

IV.3. Élaboration d'un système automatique de diagnostic des défaillances à base des réseaux de neurones artificiels.

IV.3.1. Introduction

Pour ce faire, cette partie est consacré à l'élaboration du système automatique du diagnostic des défaillances de la machine asynchrone; en construisant le bloc de RNA (la partie principale du sous-système d'interprétation de l'information) et le système d'aide à la décision (qui testera les sorties du bloc précédent). Le système d'interprétation de l'information va délivrer un protocole de maintenance sur lequel on trouvera le type et les causes du défaut, le lieu de son apparition (localisation) et les traitements possibles pour l'éliminer (ou l'isoler), etc.[10]

Automatiser la détection des défaillances des systèmes électromécaniques permet de s'affranchir des faiblesses des opérateurs humains sujets, entre autres, à la fatigue, à l'oubli et à la pression d'un environnement parfois hostile.

C'est typiquement un problème de reconnaissance des formes qui se divise en deux grandes phases :

1. Premièrement une phase de traitement de signal durant laquelle il faut prétraiter le signal reçu, puis en extraire les informations nécessaires afin d'obtenir un signal directement représentatif du comportement du système électromécanique pour tous les cas étudiés.
2. Deuxièmement, une phase de classification des données obtenues dans la phase précédente en vue d'identifier le type et la cause de la défaillance (détection).

IV.3.2. Élaboration du module d'interprétation des informations

En réalité avant l'adaptation du bloc de RNA dans le sous-système d'exploitation des informations, il doit les étapes suivantes: [20]

- Calcul des valeurs efficaces des variables indicatrices.
- choix des variables d'entrées.
- Acquisition des données (base d'apprentissage).
- Construction du bloc RNA.
- Apprentissage des RNA sélectionnés.
- Test de réseau sélectionné sur de nouveaux exemples.

IV.3.2.1. Choix des variables d'entrées de RNA (les paramètres représentatifs des défauts)

Pour le RNA, nous utilisons les valeurs efficaces des variables (Ia, Ib, Ic, Va, Vb, Vc et w), ce qui signifie que le nombre d'entrées de ce réseau est égal à 7entrées.

IV.3.2.2 Acquisition des données (base d'apprentissage)

Avant la construction du système du bloc RNA pour la détection des défaillances des systèmes électromécaniques pour l'identification des signaux acquis à partir du SACI (sous-système d'acquisition, de conversion et de traitement de l'information). On doit tout d'abord approcher à la phase d'acquisition des données (base d'apprentissage) à partir de laquelle le RNA pourra apprendre. Celle-ci peut toujours se mettre sous forme de fichier ou de tableau (matrice). Ce dernier est constitué de classes de signatures (vecteurs), dont chacune représente un type de fonctionnement. En outre, chaque signature (vecteur) est représentée par des valeurs efficaces. [10]

Pour construire un modèle non paramétrique (RNA) décrivant le comportement du système électromécanique (fonctionnements normaux et anormaux) on doit construire une base de données aussi riche que possible, qui contient beaucoup d'informations sur les défauts et les régimes de fonctionnement et sous différentes formes (l'information sur un défaut doit être extraite d'une façon redondante).

IV.3.2.3. Construction de la base d'apprentissage

La base d'apprentissage du RNA est mise sous forme de fichier ou de tableau (matrice). Ce dernier est représenté par des classes de vecteurs, ou chaque classe représente un type de fonctionnement.

Pour le RNA, les étapes, que ont été considérées avec des valeurs efficaces. Dans ce cas chaque vecteur est constitué des 7 paramètres cités ci-dessus (I_a , I_b , I_c , V_a , V_b , V_c et w). Ces derniers représentent la couche d'entrée du RNA.

IV.3.2.4 Construction du bloc de RNA

Pour l'implémentation du bloc RNA dans le système automatique de diagnostic, il faut passer par, les étapes de construction et de validation des réseaux de neurones sont réparties en trois phases:

A. Choix des entrées de réseau :

Pour ce réseau: ses entrées sont les valeurs efficaces (I_a , I_b , I_c , V_a , V_b , V_c et w), ce qui signifie que le nombre d'entrées de ce réseau est égal à 7 entrées.

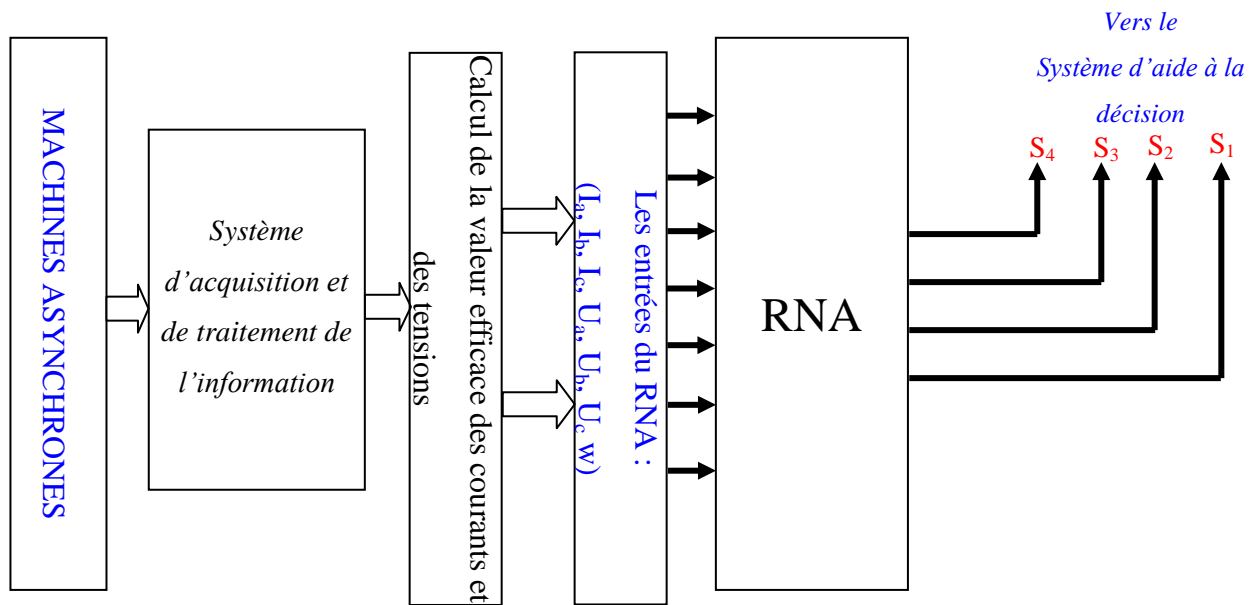


Figure (IV.7): Structure du réseau à étudier

B. Choix des sorties de réseau

Nous avons décidé d'associer chaque défaut à un code, c'est-à-dire chaque défaut est représenté par les quatre neurones de sortie. Chaque défaut est représenté sous différentes formes (vecteurs). Ces vecteurs représentent une classe; d'une façon plus claire nous avons associé à chaque classe un code (voir figure suivant).

Tableau IV.1 Classification des types des défauts.

Catégorie	Type de défaut	Symbole	Code			
			S4	S3	S2	S1
1	État sain	ES	0	0	0	0
2	court-circuit entre les spires	CC	0	0	0	1
3	coupure de phase	CP	1	0	0	0

Lors de la détection d'un défaut, le réseau doit indiquer un nombre binaire quelconque (par exemple 0001) à sa sortie, qui correspond à ce type de défaut (défaut de court-circuit). C'est-à-dire chaque sortie du réseau présente un seul chiffre soit 1 ou 0, les défauts sont représentés sur le tableau ci-dessus; avec leurs symboles et leurs codes associés.

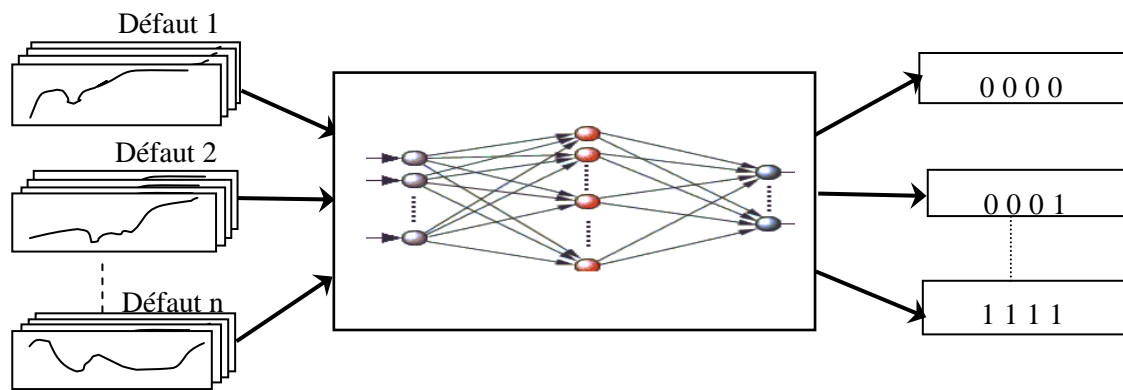


Figure (IV.8): Principe de classification des signaux des défaillances

C. Choix de l'architecture générale de réseau étudié

Pour le choix de l'architecture générale de réseau de neurones étudiés; on prend les valeurs efficaces normalisées.

IV 3.3. Apprentissage de réseau de neurone sélectionné

Le réseau utilisé est monocouche, C'est historiquement le premier RNA, le perceptron de Rosenblatt est un réseau simple, comportant une couche d'entrée qui correspond à la rétine, une couche de sortie qui correspond à la décision, et un couche cachée, Ce couche cachée constitue les variables de représentation interne des problèmes.[3]

IV.3.4. Test de RNA sur exemples

On peut décrire cette étape pour le réseau de la manière suivante: on a effectué un apprentissage automatique à l'aide du logiciel MATLAB jusqu'à l'obtention de l'erreur quadratique la plus petite. Pour le réseau on a obtenu l'erreur quadratique moyenne la plus petite après 1600 itérations. À la fin de cette étape on fixe le nombre des neurones de chaque couche. (Voir le tableau IV.2).

Tableau.IV.2 Essai d'apprentissage de RNA

Nombres de Neurones	Couche D'entrée	Couches Cachées	Couche de Sortie	Erreur quadratique Moyenne
RNA	7	4	4	2.98 e-09

Une fois que le réseau de neurones est construit et que leur apprentissage a atteint des performances satisfaisantes.

En ce qui concerne le test de réseau sur les exemples qui ont été appris dans la phase d'apprentissage, leurs résultats sont présentés dans les tableaux ci-dessous.

Tableau.IV.3 Résultats de test du RNA.

SORTIE DU RNA	TYPE DE DEFAUTS		
	Sain	Défaut1	Défaut2
S ₁	6.5622e ⁻⁵	0.6667	0
S ₂	4.6853e ⁻³	8.056e ⁻⁷	0
S ₃	3.816e ⁻⁵	8.1066e ⁻⁸	8.1066e ⁻⁸
S ₄	4.1828e ⁻⁵	3.9664e ⁻⁷	0.6667

À partir des résultats obtenus dans la phase du test, on constate que les sorties de réseau évoluent conformément aux sorties désirées préétablies auparavant.

À partir de la présentation des sorties de RNA, on peut interpréter que les sorties changent leurs valeurs à l'instant de l'application du défaut.

Dans cet instant les sorties : S1, S2, S3, S4, indiquent respectivement dans les trois cas:

- 1) Les valeurs presque:0, 0, 0, 0, donc le défaut équivalent est un état sain.
- 2) Les valeurs tend vers : 1, 0, 0, 0, donc le défaut1 équivalent un court-circuit entre les spires.
- 3) Les valeurs proche de:0, 0, 0, 1, le défaut 2 est coupure d'une phase.

IV.4. Conclusion

Grâce à l'analyse spectrale du courant statorique, nous pourrions observer les raies présentes autour du fondamental dont les fréquences correspondent à la relation mathématique $(1 \pm 2.k.g)fs$. Par rapport au défaut rotorique.

Et de plus les amplitudes des raies dans ces bandes latérales de la fondamentale augmentent avec le nombre des barres défaillants et la position de ces barres.

L'acquisition du courant statorique s'effectue à une fréquence d'échantillonnage de 1kHz sur une durée de 1 secondes permet de détecté des défauts statorique par l'utilisation de l'analyse spectrale qui apparaît des harmonique d'ordre trois et cinq.

À partir de l'étude précédente, nous pouvons dire que le réseau de neurone est une solution rapide et simple pour détecter les défauts et aussi la surveillance des systèmes pour la prise de décision, donc le réseau de neurone est le future de diagnostic, il nécessite des recherches pour améliorer les performances et les capacités des systèmes de diagnostic.

Conclusion générale

La croissante utilisation de la machine asynchrone à cage d'écureuil, essentiellement due à sa simplicité de construction, son faible coût d'achat et de fabrication, sa robustesse mécanique ou encore sa quasi-absence d'entretien, est telle que nous la trouvons maintenant dans tous les domaines industriels et en particulier dans les secteurs de pointe comme l'aéronautique, le nucléaire, la chimie ou encore les transports ferroviaires. Il est évident que ces moteurs conduisent à porter une attention de plus en plus sérieuse quant à leur fonctionnement et leur disponibilité.

À cet effet, ce travail a été consacré à l'élaboration des modèles multi enroulements de la MAS pour révéler ses défauts, dans l'objectif de ressortir des variables indicatrices des défauts pour pouvoir bien diagnostiquer la Machine.

D'après l'étude effectuée, il a été constaté que :

Grâce à l'analyse spectrale du courant statorique, nous pourrions observer les raies présentes autour du fondamental dont les fréquences correspondent à la relation mathématique $(1 \pm 2.k.g)f_s$. Par rapport au défaut rotorique.

Et de plus les amplitudes des raies dans ces bandes latérales de la fondamentale augmentent avec le nombre des barres défailants et la position de ces barres.

L'acquisition du courant statorique s'effectue à une fréquence d'échantillonnage de 1kHz sur une durée de 1 seconde permet de détecter des défauts statorique par l'utilisation de l'analyse spectrale qui apparaît des harmonique d'ordre trois et cinq.

À partir de l'étude précédente, nous pouvons dire que le réseau de neurone est une solution rapide et simple pour détecter les défauts et aussi la surveillance des systèmes pour la prise de décision, donc le réseau de neurone est le future de diagnostic, il nécessite des recherches pour améliorer les performances et les capacités des systèmes de diagnostic.

Annexe A1

- ◆ Paramètres et caractéristiques de la MAS utilisée en simulation

$$P = 1,5 \text{ KW}$$

$$R_s = 7.58 \Omega$$

$$R_r = 6.3 \Omega$$

$$L_s = 0.018 \text{ H}$$

$$L_r = 0.022 \text{ H}$$

$$M_{rr} = 0.0265 \text{ H}$$

$$M_{ss} = 0.009 \text{ H}$$

$$J = 0.0054 \text{ Kg.m}^2$$

$$f = 0$$

$$p = 1$$

Annexe A2

- ◆ Les paramètres de la machine utilisée:

$$P=1,5 \text{ KW}$$

$$R_s = 7,828 \Omega$$

$$J = 0,006093 \text{ Kg m}^2$$

$$f = 0 \text{ Kg Nm s/rd}$$

$$N_s = 160$$

$$N_r = 16$$

$$R_{b \text{ sain}} = 0.00015 \Omega$$

$$L_{sl} = 0.018 \text{ H}$$

$$L_b = 10^{-7} \text{ H}$$

$$L_e = 10^{-7} \text{ H}$$

$$R_e = 72 * 10^{-6} \Omega$$

$$M_{sr} = 464 * 10^{-6} \text{ H}$$

$$L_{rc} = 46 * 10^{-7}$$

Annexe B

$$\begin{aligned} \blacksquare \frac{di_{sa}}{dt} = & d_1 f_{sb}^2 f_{sc}^2 \mathbf{U}_{sa} + d_2 f_{sa} f_{sb} f_{sc}^2 \mathbf{U}_{sb} + d_2 f_{sa} f_{sc} f_{sb}^2 \mathbf{U}_{sc} - \left(\frac{3}{2}(d_1 + d_2) T f_{sa}^2 f_{sb}^2 f_{sc}^2 + \right. \\ & R_s d_1 f_{sa} f_{sb}^2 f_{sc}^2) \mathbf{i}_{sa} - \left(\frac{3}{2} \left(\frac{d_1 + 3d_2}{2}\right) T f_{sa} f_{sb}^3 f_{sc}^2 + R_s d_2 f_{sa} f_{sb}^2 f_{sc}^2\right) \mathbf{i}_{sb} - \\ & \left(\frac{3}{2} \left(\frac{d_1 + 3d_2}{2}\right) T f_{sa} f_{sb}^2 f_{sc}^3 + R_s d_2 f_{sa} f_{sb}^2 f_{sc}^2\right) \mathbf{i}_{sc} + K f_{sa} f_{sb}^2 f_{sc}^2 (G \Phi_{ra} + \left(\frac{\sqrt{3}}{2} W r - \frac{G}{2}\right) \Phi_{rb} - \\ & \left(\frac{\sqrt{3}}{2} W r + \frac{G}{2}\right) \Phi_{rc}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \blacksquare \frac{di_{sb}}{dt} = & d_2 f_{sa} f_{sb} f_{sc}^2 \mathbf{U}_{sa} + d_1 f_{sa}^2 f_{sc}^2 \mathbf{U}_{sb} + d_2 f_{sa}^2 f_{sb} f_{sc} \mathbf{U}_{sc} - \left(\frac{3}{2} \left(\frac{d_1 + 3d_2}{2}\right) T f_{sb} f_{sa}^3 f_{sc}^2 + \right. \\ & R_s d_2 f_{sb} f_{sa}^2 f_{sc}^2) \mathbf{i}_{sa} - \left(\frac{3}{2}(d_1 + d_2) T f_{sa}^2 f_{sb}^2 f_{sc}^2 + R_s d_1 f_{sb} f_{sa}^2 f_{sc}^2\right) \mathbf{i}_{sb} - \\ & \left(\frac{3}{2} \left(\frac{d_1 + 3d_2}{2}\right) T f_{sb} f_{sa}^2 f_{sc}^3 + R_s d_2 f_{sb} f_{sa}^2 f_{sc}^2\right) \mathbf{i}_{sc} + K f_{sb} f_{sa}^2 f_{sc}^2 \left(\left(\frac{\sqrt{3}}{2} W r + \frac{G}{2}\right) \Phi_{ra} + G \Phi_{rb} + \right. \\ & \left.\left(\frac{\sqrt{3}}{2} W r - \frac{G}{2}\right) \Phi_{rc}\right) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \blacksquare \frac{di_{sc}}{dt} = & d_2 f_{sa} f_{sc} f_{sb}^2 \mathbf{U}_{sa} + d_2 f_{sa}^2 f_{sb} f_{sc} \mathbf{U}_{sb} + d_1 f_{sa}^2 f_{sb}^2 \mathbf{U}_{sc} - \left(\frac{3}{2} \left(\frac{d_1 + 3d_2}{2}\right) T f_{sc} f_{sa}^3 f_{sb}^2 + \right. \\ & R_s d_2 f_{sc} f_{sa}^2 f_{sb}^2) \mathbf{i}_{sa} - \left(\frac{3}{2} \left(\frac{d_1 + 3d_2}{2}\right) T f_{sc} f_{sa}^2 f_{sb}^3 + R_s d_2 f_{sc} f_{sa}^2 f_{sb}^2\right) \mathbf{i}_{sb} - \left(\frac{3}{2}(d_1 + \right. \\ & \left. d_2) T f_{sa}^2 f_{sb}^2 f_{sc}^2 + R_s d_1 f_{sc} f_{sa}^2 f_{sb}^2\right) \mathbf{i}_{sc} + K f_{sc} f_{sa}^2 f_{sb}^2 \left(\left(\frac{\sqrt{3}}{2} W r - \frac{G}{2}\right) \Phi_{ra} - \left(\frac{\sqrt{3}}{2} W r + \right. \right. \\ & \left. \left.\frac{G}{2}\right) \Phi_{rb} + G \Phi_{rc}\right) \end{aligned}$$

$$\bullet \frac{d\Phi_{ra}}{dt} = \partial \left(f_{sa} \mathbf{i}_{sa} - \frac{f_{sb}}{2} \mathbf{i}_{sb} - \frac{f_{sc}}{2} \mathbf{i}_{sc} \right) - \frac{R_r A}{C} \Phi_{ra} - \left(\frac{R_r B}{C} + \frac{\sqrt{3}}{3} W r \right) \Phi_{rb} - \left(\frac{R_r B}{C} - \frac{\sqrt{3}}{3} W r \right) \Phi_{rc}$$

$$\bullet \frac{d\Phi_{rb}}{dt} = \partial \left(\frac{f_{sa}}{2} \mathbf{i}_{sa} - f_{sb} \mathbf{i}_{sb} - \frac{f_{sc}}{2} \mathbf{i}_{sc} \right) - \left(\frac{R_r B}{C} - \frac{\sqrt{3}}{3} W r \right) \Phi_{ra} - \frac{R_r A}{C} \Phi_{rb} - \left(\frac{R_r B}{C} + \frac{\sqrt{3}}{3} W r \right) \Phi_{rc}$$

$$\bullet \frac{d\Phi_{rc}}{dt} = \partial \left(-\frac{f_{sa}}{2} \mathbf{i}_{sa} - \frac{f_{sb}}{2} \mathbf{i}_{sb} + f_{sc} \mathbf{i}_{sc} \right) - \left(\frac{R_r B}{C} + \frac{\sqrt{3}}{3} W r \right) \Phi_{ra} - \left(\frac{R_r B}{C} - \frac{\sqrt{3}}{3} W r \right) \Phi_{rb} - \frac{R_r A}{C} \Phi_{rc}$$

- $A = (L_{rf} + M_r)^2 - \frac{M_r^2}{4}$
- $B = \frac{L_{rf} M_r}{2} + \frac{3M_r^2}{4}$
- $\partial = \frac{M_{sr} R_r (A - B)}{C}$
- $T = \frac{M_{sr}^2 R_r (A - B)^2}{C^2}$
- $Z = M_s - \frac{3M_{sr}^2 (A - B)}{2C}$
- $\lambda = Z + L_{sf}$
- $H = \lambda^2 - \frac{Z\lambda}{2} - \frac{Z^2}{2}$
- $|\Gamma| = f_{sa}^2 f_{sb}^2 f_{sc}^2 \left(\lambda^3 - \frac{3Z^2 \lambda}{4} - \frac{Z^4}{4} \right)$

- $d_1 = (z + L_{sf})^2 - \frac{z^2}{4}$
- $d_2 = \frac{z(z+L_{sf})}{2} + \frac{z^2}{4}$
- $K = \frac{M_{sr}H(A-B)}{c|\Gamma|}$
- $G = \frac{R_r(A-B)}{c}$

Références bibliographiques

- [1] VASEGHI Babak, «contribution à l'étude des machines électriques en présence de défaut entre spires». Thèse de doctorat, L'institut National polytechnique Lorraine 3 Décembre 2009.
- [2] MEDOUED Ammar, «surveillance et Diagnostic des défauts des machines électriques: Applications aux moteurs asynchrones». Thèse de doctorat, Université du Skikda, 2012
- [3] KHATIR Abdelfatah, «Etude comparative des modèles des machines asynchrones utilisés en diagnostic des défauts». Memoire de Magister, L'Université FERHAT ABBAS – SETIF, 2009.
- [4] Olivier ONDEL, «Diagnostic Par Reconnaissance Des Formes : Application à Un Ensemble Convertisseur– Machine Asynchrone». Thèse de doctorat, L'école Centrale de Lyon, October 2006.
- [5] Gaëtan DIDIER, «Modélisation et Diagnostic De La Machine Asynchrone En Présence De Défaillances». Thèse de doctorat, L'Université Henri Poincaré, Nancy 29 octobre 2004.
- [6] Rijaniaina Njakaso ANDRIAMALALA, «Modélisation Du Défaut D'excentration Dans Une Machine Asynchrone. Application Au Diagnostic Et à La Commande De Deux Machine Spécifiques». Thèse de doctorat, L'Université Henri Poincaré, Nancy1, Juillet 2009.
- [7] Roland CASIMIR, «Diagnostic Des Défauts Des machines Asynchrones Par Reconnaissance Des Formes». Thèse de doctorat, L'école Centrale de Lyon, 18 décembre 2003.
- [8] BOUZIDA Ahcene, «Diagnostic De Défauts De La Machine Asynchrone à Cage Par LA Technique Des Ondelettes». Mémoire de Magister, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, Janvier 2008.
- [9] Baptiste trajin, «Analyse et traitement de grandeurs électriques pour la détection et le diagnostic de défauts mécaniques dans les entraînements asynchrones -Application à la surveillance des roulements à billes». Thèse de doctorat, L'Université de Toulouse, December 2009.
- [10] Mohamed El Kamel OUMAAMAR, «Surveillance Et Diagnostic Des Défauts Rotoriques et Mécaniques de La machine asynchrone Avec Alimentation Equilibrée Ou Déséquilibrée». Thèse de doctorat, L'Université de Lorraine, Mars 2012.
- [11] Radouane BOUSSEKSOU, « Modélisation analytique des machines Asynchrone application au diagnostic». Mémoire de Magister, L'université de Constantine.2007.
- [12] Tarek, Boumegoura, «Recherche de signature électromagnétique des défauts dans une machine asynchrone, et synthèse d'observateurs en vue du diagnostic», thèse de doctorat, l'école doctorale électronique, électrotechnique, automatique de Lyon, Mars 2001.
- [13] Nouredine BESSOUS, «Contribution Au Diagnostic Des Machines Asynchrones», Mémoire de Magister, L'Université de Constantine.
- [14] BOUCHAREB Ilhem, «Modélisation et Simulation de Défauts D'une Machine Synchrone à Réductance Variable». Memoire de Magister, L' Université de Constantine. 2009.

- [15] Saliou DIOUF, «Contribution Au Diagnostic Industriel De Défauts De Roulement Et De Balourd Par Techniques Neuronales Application à La Machine Asynchrone à Cage ». Thèse de doctorat, L'Université Paris Val de Marne-Creteil, Juillet 2007.
- [16] NAIT SLIMANI Boukhalfa, «Synthèse d'observateurs non linéaires : Application au diagnostic de défauts» Mémoire de Magister, Université Mouloud Mammeri de Tizi-ouzou.
- [17] Rafik MERAD, «Outils de Diagnostic Appliqués à la Machine Asynchrone Triphasée à Cage D'écureuil», Mémoire de Magister, L'Université de Constantine, Janvier 2008.
- [18] Malika NEZAR, «Diagnostic des Associations Convertisseurs Statiques. Machine Asynchrone En Utilisant Les Techniques De L'intelligence Artificielle». Thèse de doctorat, L'Université de Batna, 2006.
- [19] Gilles ZWINGELSTEIN. « Diagnostic des défaillances, théorie et pratique pour les systèmes industriels » (livre), Ed. HERMES, 1995.
- [20] X chang, V Cocquemot, C Christophe, «Modélisation de la machine asynchrone en présence de pannes stator», pp . 459-464, conférence Internationale Francophone d'Automatique, juillet 2002 Nantes, France.
- [21] Djalal Eddine Khodja and Aissa Kheldoun, «Three-phases Model of the Induction Machine Taking Account the Stator Faults», pp. 157-160, World Academy of Science, Engineering and Technology 52 2009.
- [22] Madani Nadir, «Diagnostic de défaillances de l'ensemble convertisseur-moteur et commande par les techniques de l'intelligence artificielle», Mémoire de Master, L'Université de M'SILA, 2012.
- [23] Siouani smail et Ben khelil mohamed, «Identification des défauts de la machine asynchrone à cage d'écureuil dans sa partie rotorique», Mémoire de d'ingénieur d'état en Genie Électrotechnique, L'Université de M'SILA, 2004/2005.
- [24] Bagli Lotfi, «Contribution à la commande de la machine asynchrone, utilisation de la logique floue, des réseaux de neurones et des algorithmes génétiques», Thèse de doctorat université Henri Poincaré, Nancy, jan 1999.
- [25] Gaouaoui Mohammed, «diagnostic par reconnaissance des formes : Application à la machine asynchrone», Mémoire de Magister Université de Tizi-ouzou février 2012.
- [26] Gaëtan Didier et Hubert Razik, «Sur La Détection D'un Défaut Au Rotor Des Moteurs Asynchrones», Revue 3EI- Numéro 27 de décembre 2001.

**MEMOIRE DE FIN D'ETUDES EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME
DE MASTER EN GENIE ELECTRIQUE
SPECIALITE :
INGENIERIE DES SYSTEMES ELCTROMECHANQUES**

Proposé et dirigé par : -Dr. KHODJA Djalal Eddine

Présenté par : - Saci Fawzi

**Thème :
Modèles multi enroulements de la MAS
dédiés au diagnostic**

Résumé :

Dans cette étude, nous abordons le diagnostic des défauts statoriques et rotoriques dans les machines asynchrones à cage d'écureuil. Après avoir décrit les différents éléments de constitution d'une machine asynchrone et les principaux défauts pouvant survenir sur ceux-ci, en premier, nous proposons un modèle triphasée de la machine asynchrone qui permet de simuler les défauts statoriques de court-circuit ou coupure d'une phase.

Ensuite, nous présentons un modèle basée sur la méthode des circuits électriques couplés. Ce modèle permet d'étudier l'influence d'un défaut de barre sur le comportement général du moteur asynchrone et après avoir étudié les phénomènes créés par le défaut rotorique sur les différentes grandeurs temporelles de la machine, nous intéressons plus particulièrement au développement de nouvelles méthodes de diagnostic.

Nous présentons aussi une méthode permettant la détection d'un défaut rotorique. La méthode s'appuie sur l'évaluation d'indices de spectre de courant statorique calculée à partir d'une transformée de Fourier en cas de défaut statorique ou rotorique, les résultats obtenus avec cette approche permettent de détecter la présence d'un défaut et la localise son origine.

Enfin, un système automatique du diagnostic des défaillances de la machine asynchrone a été élaboré; en construisant le bloc de Réseau de neurones artificiel. Ce système va délivrer un protocole de maintenance sur lequel on trouvera le type et les causes du défaut, etc.

Mots Clés :

Machine Asynchrone à cage d'écureuil, Diagnostic de défaut, Modélisation, Rupture de barre, Transformée de Fourier, Réseau de neurones artificiel.