

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Mémoire de Fin d'Études

Présenté à

L'Université d'Echahid Hamma Lakhdar d'El Oued

Faculté de la Technologie

Département de Génie Electrique

En vue de l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

En réseaux Electrique

Présenté par

NAKES Ayman

BEN AMOR Sabek

TAHRAOUI Abderazek

GHENDIR MABRUOK Ramzi

Thème

**Techniques avancées pour le diagnostic des défauts
rotoriques des machines asynchrones à cage**

Soutenu le Juin/2022. Devant le jury composé de :

Dr. Sarhoud Hichem

Maitre de conférences A

Président

Dr. Allal Abderrahim

Maitre de conférences A

Rapporteur

Dr. Kechida Ridha

Maitre de conférences A

Examineur

Année universitaire: 2021/2022

Remerciements

Nous voudrions exprimer nos profondes reconnaissances et nos sincères remerciements à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à l'avancement de notre travail de recherche.

*Nous tenons à remercier profondément notre directeur de recherche, **Dr. ALLAL ABDERRAHIM**, pour la confiance qu'il a bien voulu nous accorder en acceptant de diriger ce travail et pour nous avoir guidé tout au long du mémoire pour ses conseils, ses critiques et son attitude exemplaire tout au long de la réalisation de ce travail de recherche.*

*Nous tenons à remercier aussi, **Dr. Labiod Chouaib**, **Dr. Khachkhoche Abderrahmane labo 7** pour son aide durant toute la période du travail.*

*Aussi, nous remercions les membres de jury d'avoir accepté d'examiner ce travail et tous les individus de département du génie électrique de l'Université **EChahid Hamma Lakhdar .El Oued**.*

Finalement, nous tenons à remercier tous les membres de nos familles pour leur soutien et leur aide. Nous leur serons reconnaissants toute notre vie.



Dédicaces

*Je dédie ce travail à la mémoire de mes grandes mères et
grand père*

A mes très chers parents.

A mes frères et sœurs,

A tous les membres de ma famille,

A mes très chers amis,

A tous les étudiants de la promotion 2022,

A tous mes amis du génie électrique,

A tous les enseignants du département génie électrique.

Ayman

Sabek

Ramzi

Abderazzak

Résumé:

L'objectif de ce mémoire est le diagnostic de la machine asynchrone triphasée. Le but principal sera l'établissement de modèles mathématiques de la machine capables de prédire son comportement en présence de défauts rotorique (cassure de barres). Le modèle est d'abord, relativement complexe supposant une répartition non sinusoïdale de l'induction dans l'entrefer et en utilisant des résultats expérimentaux. Ce qui déduit des harmoniques même en cas de fonctionnement sain et ses harmoniques vont subir des variations remarquables en cas de fonctionnement avec défaut.

Notre étude va se focaliser à la variation de deux types d'harmoniques : Time Harmoniques de Temps (Time Harmonics TH) et Harmoniques des défauts de barres rotoriques naturels (Harmonics of Rotor Bar Fault) RBFH. Nous allons comparer la sensibilité des techniques avancées de diagnostic en utilisant les indices partiels puis globaux basés sur ses deux harmoniques pour étudier le degré de sensibilité de ses techniques avancées de diagnostic par rapport l'indice étudié.

Mots clés: Machine asynchrone, diagnostic, défaut rotorique , Time Harmoniques, Harmonics of Rotor Bar Fault

Sommaire

Remerciements	
Dédicaces	
Résumé	
Sommaire	
Liste de figures	
Liste des tableaux :	
Liste des symboles et abréviation	
Introduction générale	02

Chapitre I: Etat de l'art sur le diagnostic de défaut de la machine asynchrone

I. 1. Introduction	05
I. 2. Définition:	05
I. 3. Machine asynchrone:	06
I. 4. Constitution de la machine asynchrone à cage	06
I. 5. Principe de fonctionnement	09
I. 6. Causes des défauts	10
I. 7. Différents défauts dans la machine asynchrone à cage	12
I. 8. Conséquences des défauts	18
I. 9. Méthodes de diagnostic	18
I. 10 Différentes méthodes de diagnostic	20
I.11 Modèle de la machine asynchrone à cage	27
I.12 Conclusion :	28

Chapitre II: Modélisation de la machine asynchrone Triphasée à cage

II. 1. Introduction	30
II .2.Equations différentielles associées	32
II. 3. Inductances mutuelles entre enroulements statoriques et rotoriques	47
II .4. Conclusion	51

Chapitre III:Résultats expérimentaux et de simulation

III .1-Introduction	53
III .2-Théorie générale sur les harmoniques de la MAS	53
III .3-Analyse du spectre MCSA	57
III.4-Etude comparative entre la méthode classique MCSA et celle MSCSA	58
III.5-Conclusion	69
Conclusion générale	71
Bibliographies	

Liste de figures

Chapitre I		
Figure I.1	Schéma de principe de la conversion d'énergie	04
Figure I.2	Eléments de constitution d'un moteur asynchrone à cage d'écureuil utilisé pour avoir les résultats expérimentaux dans le laboratoire de la faculté de technologie (Université d' El Oued).	05
Figure I.3	Vue schématisée en perspective du stator	06
Figure I.4	Stator du moteur asynchrone	06
Figure I.5	Rotor à cage	07
Figure I.6	Vue schématisée en perspective du rotor	07
Figure I.7	Principe de fonctionnement d'un moteur asynchrone triphasé à cage	09
Figure I.8	répartition des pannes.	10
Figure I.9	Représentation des différents défauts statoriques possible	11
Figure I.10	Cassure de barres.	12
Figure I.11	Cassures de barres et de portions d'anneaux (laboratoire de la faculté de technologie- université d' El Oued).	13
Figure I.12	Types d'excentricité : (a) rotor concentré; (b) excentricité statique; (c) excentricité dynamique	14
Figure I.13	Dimensions du roulement à bille	16
Figure I.14	Différents grandeurs de diagnostic dans une machine	19
Figure I.15	Bobine exploratrice pour la mesure du flux de fuite axial.	22
Figure I.16	Système d'alimentation d'une machine asynchrone par convertisseur avec neutre sorti .	23
Figure I.17	schéma synoptique du principe de la méthode du spectre du courant statorique.	25
Figure I.18	Schéma synoptique du principe de la méthode du spectre du courant statorique utilisé pour avoir les résultats expérimentaux dans le laboratoire de la faculté de la technologie (Université d' El Oued).	25

Chapitre II		
FigureII.1	Structure du rotor	30
FigureII.2	Structure électrique du rotor .	30
FigureII.3	Schéma électrique équivalent d'une maille rotorique .	32
FigureII.4	Schéma électrique équivalent simplifié d'une maille rotorique	33
FigureII.5	Transformation de PARK (a, b, c) à (d, q)	35
FigureII.6	Induction magnétique produit par une maille rotorique	44
FigureII.7	Position de la maille (k) par rapport à la bobine statorique de la phase "a"	46
FigureII.8	Schéma électrique équivalent simplifié d'une maille rotorique (moteur sain)	47
FigureII.9	Schéma électrique équivalent simplifié d'une maille rotorique (rupture) d'une barre rotorique)	48
Chapitre III		
FigureIII.1	essai, pour l'acquisition des résultats expérimentaux, dans le laboratoire de l'université d'El Oued	
FigureIII.2	Spectre expérimental du courant statorique MCSA avec 4 harmoniques de temps (moteur sain)	
FigureIII.3	Spectre expérimental du courant statorique MCSA avec 4 harmoniques de temps temps (moteur avec défaut rotorique)	
FigureIII.4	Représentation des amplitudes d'harmoniques de temps de la technique MCSA	
FigureIII.5	Spectre expérimental du courant statorique avec ses harmoniques de temps (moteur sain) MSCSA.	
FigureIII.6	Spectre expérimental du courant statorique MSCSA harmoniques de temps (moteur avec défaut rotorique) .	
FigureIII.7	Représentation des amplitudes des harmoniques de temps pour un moteur sain puis avec défaut statorique MSCSA	
FigureIII.8	Indice partiel relatif des technique MCSA et MSCSA par rapport aux	

	harmoniques de temps TH	
FigureIII.9	Spectre de simulation du courant statorique MCSA avec 4 Harmoniques (RBFH) pour un moteur sain	
FigureIII.10	Spectre de simulation du courant statorique MCSA avec 4 Harmoniques (RBFH) (moteur avec défaut rotorique)	
FigureIII.11	Représentation des amplitudes d'harmoniques (RBFH) pour MCSA	
FigureIII.12	Spectre de simulation du MSCSA avec ses harmoniques (RBFH) (moteur sain)	
FigureIII.13	Spectre de simulation du MSCSA avec ses harmoniques (RBFH) (moteur avec défaut rotorique)	
FigureIII.14	Représentation des amplitudes harmoniques (RBFH) pour MSCSA	
FigureIII.15	Indice partiel relatif des techniques MCSA et MSCSA par rapport aux harmoniques des Défauts de barres rotoriques (RBFH)	
Figure III.16	Indice global relatif le plus sensible de technique (TH) et (RBFH)	

Liste des symboles et abréviation

Symboles	Dénomination
f_s	Fréquence d'alimentation de la machine.
p	Nombre de paires de pôles.
r	Rayon de la machine.
L	Longueur de la machine.
e	Epaisseur d'entrefer.
$e(\varphi, \theta_r)$	Variation de l'épaisseur d'entrefer ou fonction d'entrefer.
r_s	Résistance d'une phase statorique.
R_b	Résistance d'une barre rotorique.
R_e	Résistance d'un anneau de court circuit.
L_b	Inductance de fuite d'une barre rotorique.
L_e	Inductance de fuite d'anneau de court circuit.
J	Moment d'inertie.
f_v	Coefficient de frottement visqueux.
T_e	Couple électromagnétique.
T_r	Couple résistant.
B_s	Induction magnétique de l'entrefer créée par le courant statorique.
B_{rd}	Induction magnétique créée dans l'entrefer par le courant du système direct équivalent au rotor.
B_{ri}	Induction magnétique créée dans l'entrefer par le courant du système inverse équivalent au rotor.
B_k	Induction magnétique dans l'entrefer produit par une maille rotorique k.
i_{bk}	Courant dans la barre k.
i_{rk}	Courant dans la maille k.

Liste des symboles et abréviation

ie	Courant dans l'anneau de court circuit.
i _{ek}	Courant dans une portion d'anneau.
isa, isb, isc	Courants statoriques.
vsa, vsb, vsc	Tensions statoriques.
ids , iqs	Composantes biphasées du courant statorique.
isf	Composante fondamentale du courant d'alimentation.
Im	Valeur maximale de la composante fondamentale du courant d'alimentation.
is1	Composant inférieure (1-2s)fs du courant d'alimentation .
Ih1	Valeur maximale de la composant inférieure (1-2s)fs du courant d'alimentation .
is2	Composant supérieure (1+2s)fs du courant d'alimentation.
Ih2	Valeur maximale de la composant supérieure (1+2s)fs du courant d'alimentation.
I_{rm}	Valeur du courant maximale rotorique
$\hat{I}_{THh}$	Valeur du courant maximale (ex : harmoniques de temps h=1,3,5...), en régime sain du moteur.
$\hat{I}'_{THh}$	Valeur du courant maximale (ex : harmoniques de temps h=1,3,5...), en régime de défaillance du moteur.
α	Angle de phase de la composante fondamentale du courant d'alimentation.
β_1	Angle de phase de la composante (1-2s)fs .
β_2	Angle de phase de la composante (1+2s)fs .
ϕ_Bs	Phase du champ tournant statorique.
ϕ_{Brd}	Phase du champ tournant rotorique direct.
ϕ_{Bri}	Phase du champ tournant rotorique inverse.
Φ_s	Flux magnétique par pôle créé par le courant statorique.
Φ_{rk}	Flux principal créé par une maille rotorique.

Liste des symboles et abréviation

Ψ_{saT}	Flux magnétique total créé par isa et traversant l'enroulement de la phase "a".
Ψ_{sd}, Ψ_{sq}	Composantes biphasées du flux statorique.
F_m	Force magnétomotrice.
f_r	Fréquence rotorique
f	Fréquence.
s	Glissement en régime sain du moteur.
s'	Glissement en régime de défaillance du moteur.
ω_s	Pulsation statorique.
P	Permeance de l'entrefer.
F_e	Fréquence d'échantillonnage.
Δf	Résolution fréquentielle.
θ_s	Position des grandeurs statoriques .
μ_0	Perméabilité magnétique du vide (de l'air).
ω_r	Vitesse électrique de rotation.
α_r	Ouverture entre deux barres rotoriques.
M	Indice de modulation.
V_{LL}	Valeur RMS de la tension entre phase .
I_L	Courant de ligne.
ω_f	Pulsation d'oscillation (pulsation de défaut) exprimée en radians.
k	Entier positif = (1,2,3...).
$[v_{sabc}]$	Vecteur tension statorique.
$[i_{sabc}]$	Vecteur courant statoriques.
$[M_{sr}]$	Matrice des inductances mutuelles entre phases statoriques et mailles rotoriques.

Liste des symboles et abréviation

$[\phi_{sabc}]$	Vecteur flux statorique.
M_s	Mutuelles des phases statoriques.
$[R_s]$	Matrice des résistances statoriques.
$[i_{rk}]$	Vecteur courant dans les mailles rotoriques.
$[L_s]$	Matrice des inductances statoriques.
L_{sp}	Inductances propres statoriques.
L_{sf}	Inductances de fuites statoriques.
$[V]$	Vecteur global des tensions.
$[I]$	Vecteur global des courants.
$[R]$	Matrice globale des résistances.
$[R_r]$	Matrice des résistances rotoriques.
$[L]$	Matrice globale des inductances.
$[L_r]$	Matrice des inductances rotoriques.
$[V_{tr}]$	Vecteur global des tensions après transformation du Park.
$[I_{tr}]$	Vecteur global des courants après transformation du Park.
$[R_{tr}]$	Matrice globale des résistances après transformation du Park.
$[L_{tr}]$	Matrice globale des inductances après transformation du Park.
$[P_3(\theta_s)]$	Matrice de transformation de Park.
$[T]$	Matrice globale de Park.
$n_i(\varphi, \theta_r)$	Fonction de distribution i .
$N_j(\varphi, \theta)$	Fonction d'enroulement j .
∂W_{CO}	Co-énergie magnétique.

Liste des symboles et abréviation

θ_r	Position du rotor par rapport au stator.
θ	Ecart angulaire de l'axe de rotor.
φ	Position angulaire tout le long du stator.
N_s	Nombre d'encoches statoriques.
N_t	Nombre de spires en série par phase.
Q	Nombre de dents par pas d'enroulement.
h	Nombre d'harmoniques qu'on va prendre en considération.
R_{cc}	Résistance du boucle de court-circuit.
$[M_{ccs}] = [M_{scc}]$	Inductances mutuelle statorique et de la boucle de court-circuit.
$[M_{ccr}] = [M_{rcc}]$	Inductances mutuelle rotorique et de la boucle de court-circuit.
Wtot	Energie totale.
$\overline{i_{as}}(t)$	Signaux analytiques du courant de la phase statorique « a ».
$\overline{i_{bs}}(t)$	Signaux analytiques du courant de la phase statorique « b ».
$\overline{i_{cs}}(t)$	Signaux analytiques du courant de la phase statorique « c ».
ε^e	F.m.m. statorique.
b^e	Induction magnétique statorique.
e^x	F.é.m. aux bornes de la bobine.
ψ_H^x	Champ magnétique à la distance X.

Introduction générale

Introduction générale

Les objectifs des différentes structures industrielles sont toujours liés à l'augmentation de la qualité, la productivité et la rentabilité, la surveillance spéciale du processus pendant les cycles de fonctionnement devient insuffisants.

Le diagnostic et la détection de défauts mobilisent à ce jour beaucoup de chercheurs dans les différents domaines industriels, spécialement les entraînements électriques qui utilisent de plus en plus les moteurs asynchrones à cause de leur robustesse, leur puissance mécanique et de leur coût. Mais son utilisation limitée dans l'entraînement des systèmes à vitesse constante par rapport aux systèmes à vitesse variable à cause de la difficulté de sa commande [1].

Aujourd'hui, avec la progression de l'électronique de puissance, le moteur asynchrone peut-être asservi bien en couple qu'en vitesse. Ce contrôle lui ouvre de larges domaines d'utilisation (l'aéronautique, le nucléaire, la chimie, les transports ferroviaires, etc).

Malgré le fait que la machine asynchrone à cage soit réputée pour être la plus robuste des machine électriques, un certain nombre de contraintes de différentes natures (thermique, électrique, mécanique et d'environnement) peuvent affectés la durée de vie de celle-ci en faisant apparaître des pannes dans le stator et le rotor. Ces pannes occasionnent des pertes économiques considérables, obligeant les chercheurs de mettre en œuvre des systèmes de surveillance adéquats [2].

Il est donc impératif de mettre en œuvre des systèmes de surveillance adéquats ayant pour but de détecter de façon précoce les défauts.

Dans cette étude , nous allons faire une comparaison des techniques avancées diagnostic d'après leur sensibilité en utilisant la variation de deux types d'harmoniques : Time Harmoniques de Temps (Time Harmonics TH) et Harmoniques des défauts de barres rotoriques naturels (Harmonics of Rotor Bar Fault) RBFH. Nous allons comparer la sensibilité des techniques avancées de diagnostic en utilisant les indices partiels puis globaux basés sur ses deux harmoniques pour étudier le degré de sensibilité de ses techniques avancées de diagnostic par rapport l'indice étudié.

Nous allons voir dans le premier chapitre des généralités sur les machines asynchrones et leurs défauts, dans le deuxième chapitre, nous présentant les modèles mathématiques avec et sans défauts en se basant sur ses deux types d'harmoniques cités au-dessus et dans le troisième chapitre, nous faisons l'étude comparative en s'appuyant sur les

indices partiels et globaux pour étudier la sensibilité de ses techniques en utilisant les résultats de simulation et expérimentaux.

Enfin, nous clôturons notre étude par une conclusion générale qui met en valeur cette étude comparative et les perspectives de cette étude dans des travaux futurs.

chapitre I: Etat de l'art sur le diagnostic de défaut de la machine asynchrone

I. 1. Introduction

Le diagnostic est une composante principale d'un module de supervision. Il consiste déterminer à chaque instant le mode de fonctionnement dans lequel le système se trouve. Il s'appuie sur une connaissance a priori des modes de fonctionnement et sur une connaissance instantanée matérialisée par une nouvelle observation de l'état du système. Il existe plusieurs approches pour réaliser le diagnostic, le choix d'une approche est lié au mode de représentation de la connaissance.

Le but de ce chapitre on va présenter un état de l'art des méthodes de diagnostic appliquées à la machine asynchrone à cage.. Ensuite, un rappel des différents éléments constructifs de la machine asynchrone triphasée. Après avoir cité les différents défauts pouvant survenir dans la machine et leurs causes, on essaye d'abord de parler brièvement sur les techniques de base couramment utilisées dans le domaine du diagnostic des défauts. Enfin on évoque les méthodes de modélisation de la machine dédiée au diagnostic des défauts rotoriques qui sera effectué.

I. 2. Définition

Les moteurs asynchrones triphasés représentent plus de 80 % du parc moteur électrique, ils sont utilisés pour transformer l'énergie électrique en énergie mécanique grâce à des phénomènes électromagnétique.

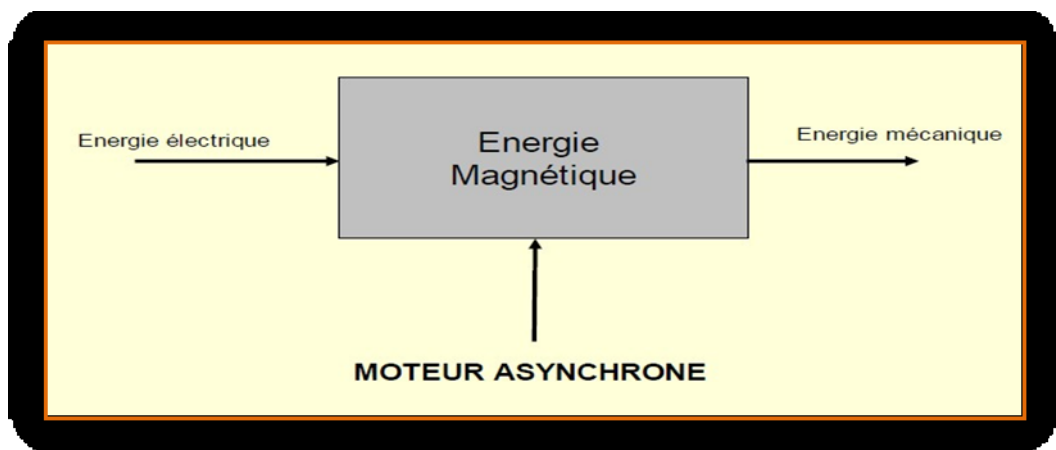


Figure 1. Schéma de principe de la conversion d'énergie.

I. 3. Machine asynchrone

Le moteur asynchrone est la machine la plus utilisée dans le domaine des puissances supérieures à quelques kilowatts car il présente de nombreux avantages tels que sa puissance massique, sa robustesse, sa facilité de mise en œuvre, son faible coût, etc.... L'apparition dans les années 1980 des variateurs permettant de faire varier la fréquence de rotation dans une large gamme a rendement favorisé son développement. En effet, il entre dans la conception de nombreux procédés industriels associant des convertisseurs statiques et des machines électriques (traction électrique, laminoirs, levage, pompage, etc....).

Bien que la machine asynchrone ait la réputation d'être robuste, elle peut présenter comme toute autre machine électrique, des défaillances d'ordre électrique ou mécanique.

Ainsi, en raison des conséquences importantes et coûteuses que peut engendrer l'apparition d'un défaut sur les processus industriels, le diagnostic des défauts fait l'objet d'un engouement prononcé depuis les deux dernières décennies [7], [8].

I. 4. Constitution de la machine asynchrone à cage

La machine asynchrone, souvent appelée moteur à induction comprend un stator et un rotor, constitués de tôles d'acier au silicium et comportant des encoches dans lesquelles on place les enroulements. Le stator est fixe ; on y trouve les enroulements reliés à la source. Le rotor est monté sur un axe de rotation. Selon que les enroulements du rotor sont accessibles de l'extérieure ou sont fermés sur eux-mêmes en permanence, on définit deux types de rotor : bobiné ou à cage d'écureuil. Toutefois, nous admettrons que sa structure est électriquement équivalente à celle d'un rotor bobiné dont les enroulements sont en court-circuit. Dans ce travail, nous nous intéressant à la machine asynchrone à cage d'écureuil [8].

Les éléments de constitution d'une machine asynchrone à cage d'écureuil sont illustrés dans la Figure I.1.

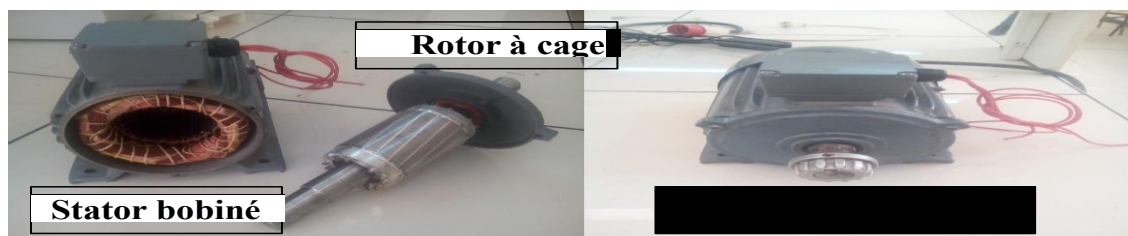


Figure I-2 Eléments de constitution d'un moteur asynchrone à cage d'écureuil utilisé pour avoir les résultats expérimentaux dans le laboratoire de la faculté de technologie (Université d' El Oued).

I.4.1. Stator

Il est constitué d'un enroulement bobiné réparti dans les encoches du circuit magnétique. Ce circuit magnétique est constitué d'un empilage de tôles dans lesquelles sont découpées des encoches parallèles à l'axe de la machine (figure I.3). Le bobinage statorique peut se décomposer en deux parties : les conducteurs d'encoches et les têtes de bobines [8].

Les conducteurs d'encoches permettent de créer dans l'entrefer le champ magnétique à l'origine de la conversion électromagnétique. Les têtes de bobines permettent, quant à elles, la fermeture des courants en organisant la circulation judicieuse des courants d'un conducteur d'encoche à l'autre. L'objectif est d'obtenir à la surface de l'entrefer une distribution de courant la plus sinusoïdale possible, afin de limiter les ondulations du couple électromagnétique

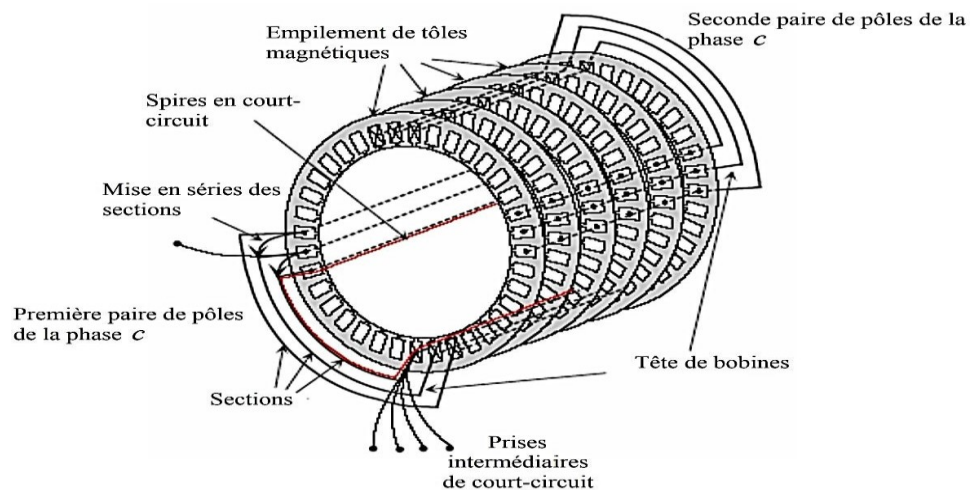


Figure I-3. Vue schématique en perspective du stator [9].



Figure I-4 Stator du moteur asynchrone [9].

I.4.2. Rotor à cage

Dans le rotor à cage, les anneaux de court-circuit permettent la circulation des courants d'un conducteur d'encoche (barres rotoriques) à l'autre. Ces barres conductrices sont régulièrement réparties, et constituent le circuit du rotor (figure I.5) et (figure I.6). Cette cage est insérée à l'intérieur d'un circuit magnétique constitué de disques en tôles empilés sur l'arbre de la machine analogue à celui du moteur à rotor bobiné.

Dans le cas de rotors à cage d'écureuil, les conducteurs sont réalisés par coulage d'un alliage d'aluminium, ou par des barres massives de cuivre préformées et frettées dans les tôles du rotor [8]. Il n'y a généralement pas, ou très peu, d'isolation entre les barres rotoriques et les tôles magnétiques, mais leur résistance est suffisamment faible pour que les courants de fuite dans les tôles soient négligeables, sauf lorsqu'il y a une rupture de barre [11]. Le moteur à cage d'écureuil est beaucoup plus simple à construire que le moteur à rotor bobiné et, de ce fait, son prix de revient est inférieur. De plus, il dispose d'une plus grande robustesse. Il constitue la plus grande partie du parc de moteurs asynchrones actuellement en service.

Son inconvénient majeur est qu'il a, au démarrage, de mauvaises performances (courant élevé et faible couple). C'est pour remédier à cette situation qu'ont été développés deux autres types de cages (rotor à double cage et rotor à encoches profondes).



Figure I-5..Rotor à cage .

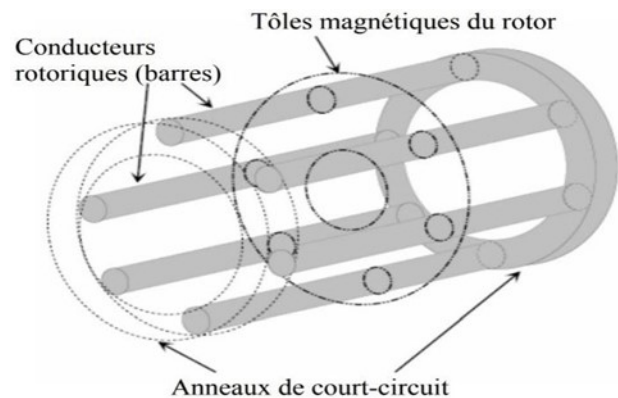


Figure I-6 . Vue schématique en perspective du rotor.

I.4.3. Organes mécaniques

La carcasse sert de support, elle joue le rôle d'enveloppe et assure la protection contre l'environnement extérieur. L'arbre est un organe de transmission. Il comprend une partie centrale qui sert de support au corps du rotor et un bout d'arbre sur lequel est fixé un demi-accouplement. Il est généralement constitué en acier moulé ou forgé. Son dimensionnement

est fonction des efforts de flexion (force centrifuge qui s'exerce sur lui, attraction magnétique radiale, etc...), des efforts radiaux et tangentiels dus aux forces centrifuges, des efforts détorsion (couple électromagnétique transmis en régime permanent, transitoire). Il est support pour un ou plusieurs paliers. Ces paliers soutiennent le rotor et assurent la libre rotation. Le second palier est libre pour assurer les dilatations thermiques de l'arbre. Une isolation électrique de l'un des paliers assure l'élimination des courants dans l'arbre dû aux dissymétries des réluctances du circuit magnétique. Ils sont généralement à roulements pour les machines de petite et moyenne puissance.

Afin d'assurer la variation de vitesse des moteurs électriques mais aussi la conversion de l'énergie, de nombreuses machines se voient associer un convertisseur. Ainsi, de nos jours, on trouve dans un grand nombre de procédés industriels, des associations entre des convertisseurs statiques et des machines électriques (pompage, levage,...). Cela permet de fournir aux moteurs des tensions et des courants de fréquence variable servant à commander la machine en couple ou en vitesse [8].

I. 5. Principe de fonctionnement

Le fonctionnement du moteur asynchrone est basé sur l'interaction électromagnétique du champ tournant, crée par le courant triphasé fourni par un réseau triphasé équilibré de pulsation ω sur enroulements statorique, et des courants induits dans l'enroulement rotorique lorsque les conducteurs de ce dernier sont coupés par le champ magnétique tournant (loi de LENZ).

Cette interaction électromagnétique des deux parties de la machine n'est possible que lorsque la vitesse du champ tournant diffère de celle du rotor [13].

Dans la MAS, l'onde du champ tournant se déplace dans l'entrefer de la machine avec une vitesse de rotation nommée vitesse de synchronisme Ω_s . Elle est liée à la fréquence d'alimentation f_s par l'expression suivante :

$$\Omega_s = \frac{\Omega_s}{p} = 60 * \frac{f_s}{p} \quad (I-1)$$

Ou f_s : fréquence des tensions triphasées du réseau d'alimentation [HZ].

p : Le nombre de paires de pôles.

Un rotor en court-circuit, balayé par ce champ tournant, sera traversé par des courants induits (courant de Foucault), ce qui soumet ce dernier à des forces électromagnétiques de Laplace.

L'ensemble de ces forces crée un couple moteur qui mettra le rotor en rotation (voir figure I.4), le rotor tourne dans le même sens que le champ tournant, sa vitesse de rotation est légèrement inférieure à celle du champ tournant ($\Omega < \Omega_s$) [18], [54].

En effet, Il existe donc toujours une différence de vitesse entre le stator et le rotor .cette différence s'appelle le glissement (g) qui est une caractéristique particulière de la MAS. Il est défini comme étant l'écart de vitesse entre la vitesse de synchronisme (Ω_s) et la vitesse de rotation du rotor(Ω).Le glissement(g) est alors donné par:
$$g = \frac{\Omega_s - \Omega}{\Omega_s}$$

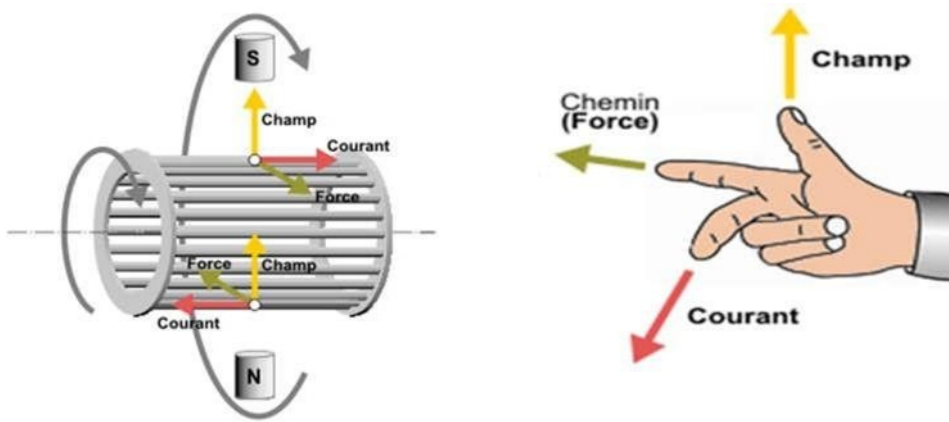


Figure I-7. Principe de fonctionnement d'un moteur asynchrone triphasé à cage .

I. 6. Causes des défauts

Les causes des défauts au stator et au rotor sont multiples [9], les plus fréquentes d'entre eux sont énumérées ci-dessous

I.6.1. Défauts statoriques

- court-circuit entre spires : surtension, température excessive, vibration, humidité ;
- court-circuit entre phases : haute température, alimentation déséquilibrée, défaut d'installation;
- défaut d'isolation : démarrage fréquent, décharge partielle, condition, température et humidité extrême ;

- défaut entre le stator et carcasse : cycle thermique, abrasion de l'isolant, encrassement des spires par la carcasse, présence des points anguleux dans les encoches, choc ;
- déplacement des conducteurs : démarrage fréquent, vibration de tête de bobines ;
- défaillance des connecteurs : vibration excessive ;
- vibration de la carcasse : mauvaise installation, déséquilibre magnétique, déséquilibre d'alimentation, surcharge, mouvement des enroulements, contact avec le rotor.

I.6.2. Défauts rotoriques

- défaut de roulements : mauvaise installation, déséquilibre magnétique, haute température, perte de lubrifiant, charge déséquilibrée, corrosion ;
- rupture de barres : cycle thermique, régime transitoire à longue durée ; déséquilibre magnétique ;
- rupture d'une portion d'anneau : cycle thermique ;
- excentricité : mauvaise installation, déséquilibre magnétique, défauts des roulements
- désalignement des roulements : défaut de couplage, mauvaise installation, surcharge
- défaut du circuit magnétique : défaut de fabrication, surcharge, cycle thermique ;
- déséquilibre mécanique : mauvais alignement, mouvement des anneaux de court-circuit.

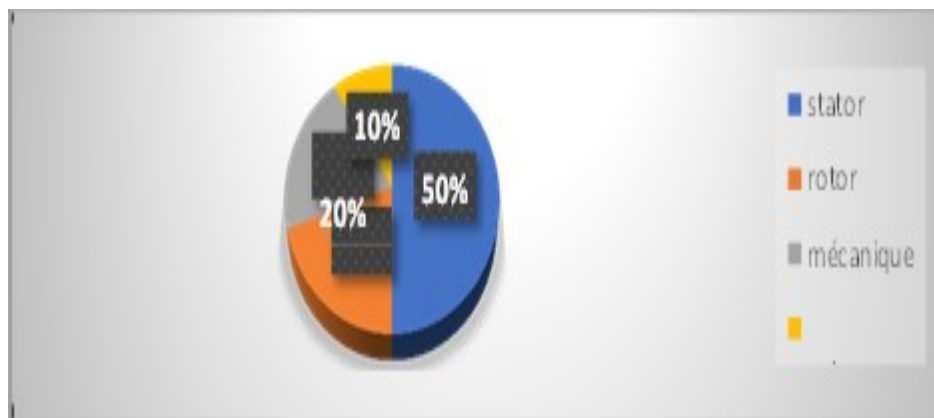


Figure I-8 : répartition des pannes.

I. 7. Différents défauts dans la machine asynchrone à cage

I.7.1. Défauts statorique

L'apparition d'un défaut au niveau des circuits électriques statorique de la machine asynchrone peut avoir des origines diverses. On peut citer à titre d'exemple, les défauts de type court-circuit inter-spires qui apparaissent à l'intérieur des encoches statoriques. Ce type de défauts peut être causé par une dégradation des isolants des spires du bobinage statorique.

On peut citer aussi les courts-circuits qui apparaissent entre une phase et le neutre, entre une phase et la carcasse métallique de la machine ou entre deux phases statoriques. Les courts-circuits entre spires est donc le défaut le plus fréquemment rencontré au stator, la fréquence caractéristique de ce défaut est [20] :

$$f_{cc} = f_s \{n (1 - g) \pm kP\} \quad (I-2)$$

Où

f_{cc} : fréquence de court-circuit ; $n = 1, 2, 3, \dots, n \in \mathbb{N}$;

p = nombre de pair de pôles ; g = glissement ;

$k = 1, 2, 3, \dots, k \in \mathbb{N}$.

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

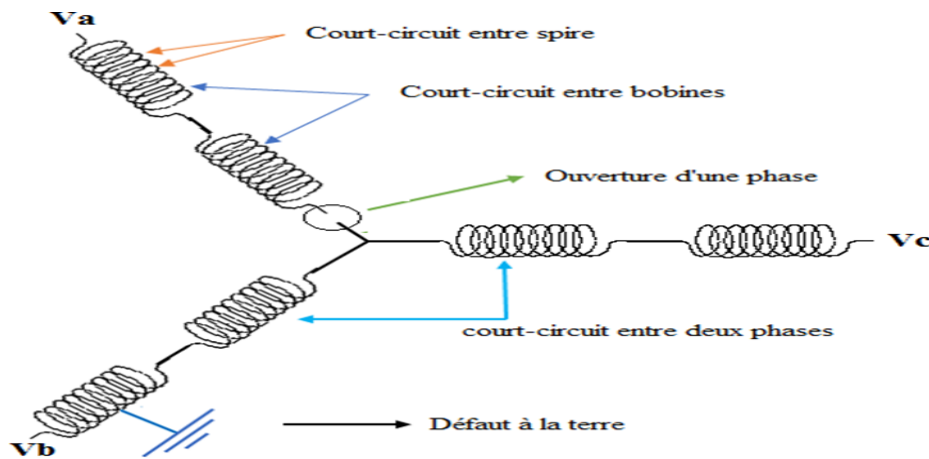


Figure I-9. Représentation des différents défauts statoriques possible.

I.7.2. Défauts rotoriques

L'analyse du spectre du courant statorique en régime permanent fournit des indications sur les défaillances rotoriques telles que les ruptures de barres, d'anneaux de court-circuit ou l'excentricité d'entrefer [33] , [28].

I.7.2.1. Cassure des barres

La cassure ou rupture de barre est un des défauts les plus fréquents au rotor. Elle peut se situer soit au niveau de son encoche soit à l'extrémité qui la relie à l'anneau rotorique. La détérioration des barres réduit la valeur moyenne du couple électromagnétique et augmente l'amplitude des oscillations, qui elles-mêmes provoquent des oscillations de la vitesse de rotation, ce qui engendre des vibrations mécaniques et donc, un fonctionnement anormal de la machine. La grande amplitude de ces oscillations accélère la détérioration de la machine. Ainsi, le couple diminue sensiblement avec le nombre de barres cassées induisant un effet cumulatif de la défaillance. L'effet d'une cassure de barre croît rapidement avec le nombre de barres cassées [14].

Un grand nombre de communications présentant de nombreuses techniques utilisées pour détecter une barre de rotor cassée dans les moteurs à induction en raison de propriétés non invasives. Outils de traitement de signal tels que Fast Fourier Transforme (FFT), Transformée de Fourier en temps court (STFT) et Prony Analyses (PA) ont été introduits pour extraire la faute informations connexes des signaux de courant du stator [21].

la présence d'une barre rotorique cassée provoque une asymétrie rotorique qui a son tour produit des raies spectrales autour de la fréquence fondamentale f_s telles que La relation de la fréquence est donnée sous la forme [15] :

$$f_{bc} = (1 \pm 2kg)f_s \quad (I-3)$$

f_{bc} : fréquence de barre cassé. f_s : Fréquence d'alimentation statorique. $k = 1,2,3,.....$
 g : glissement.

la sévérité du défaut dépend directement de l'amplitude de ces composantes spectrales [15].

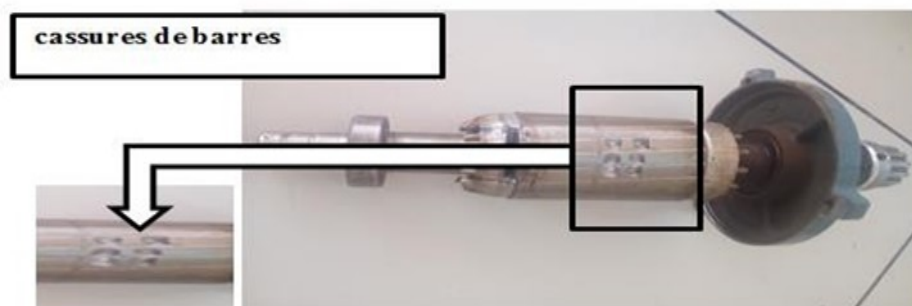


Figure I-10 . Cassure de barres.

I.7.2.2. Cassures de barres et de portions d'anneaux des cages :

La détection de ces défaillances est rendue difficile par le fait que lors de leurs apparitions, la machine continue de fonctionner. Ces défauts ont par ailleurs un effet cumulatif. Le courant que conduisait une barre cassée, par exemple, se répartit sur les barres adjacentes. Ces barres sont alors surchargées, ce qui conduit à leurs ruptures, et ainsi de suite jusqu'à la rupture d'un nombre suffisamment important de barres pour provoquer l'arrêt de la machine. Elles provoquent aussi une dissymétrie de répartition de courants au rotor, ceci va générer des vibrations et l'apparition de défauts mécaniques [32]



Figure I-11 Cassures de barres et de portions d'anneaux (laboratoire de la faculté de technologie-université d' El Oued).

I.7.2.3. Défaut d'excentricité

La géométrie du rotor peut présenter des dissymétries qui sont naturelles celles-ci relèvent de trois catégories qui sont pour l'essentiel.

- 1.Excentricité statique:
- 2.Excentricité dynamique:
- 3.Excentricité mixte

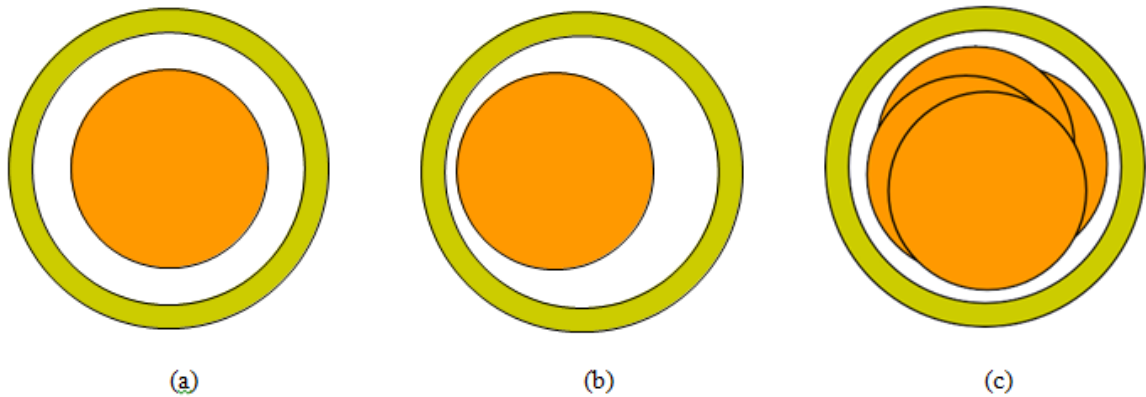


Figure I-12 Types d'excentricité : (a) rotor concentré; (b) excentricité statique; (c) excentricité dynamique.

L'Excentricité statique correspond au cas où le centre de rotation de l'arbre du rotor n'est pas celui du centre géométrique du stator .

L'Excentricité dynamique correspond, elle, à un centre de rotation du rotor différent du centre géométrique du stator mais, de plus, le centre du rotor tourne autour du centre géométrique de ce stator.

L'Excentricité mixte est la somme des deux cas présentés ci-avant.

Les fréquences induites, proches du fondamental, sont données par la relation [13]:

$$f_{exc} = f_s (1 \pm k^{(1-g)}) \quad (HZ) \quad (I-4)$$

où:

f_{exc} = Fréquence d'excentricité

$k = 1, 2, 3, \dots, k \in \mathbb{N}$

g = le glissement ,

p = nombre de paires de pôles,

f = fréquence d'alimentation.

Cette relation a l'avantage de ne pas nécessiter de connaissance précise de la machine asynchrone car elle ne fait pas apparaître de terme lié à sa conception.

Une seconde approche consiste à utiliser une expression liant le défaut de barre casée à celle de l'excentricité et des encoches au rotor. C'est ainsi qu'une équation, sous forme compacte,

fait apparaître les harmoniques de fréquences relatives à ces défauts et qui dépendent pour beaucoup du nombre de paires de pôles.

$$f_{exc} = f_s (n_{ws} \pm (KR \pm n_d) \cdot (1-g)) \quad (I-5)$$

où:

- f_{exc} = Fréquence «d'excentricité »
- $k = 1, 2, 3, \dots, k \in \mathbb{N}$
- g = le glissement,
- p = nombre de paires de pôles,
- R = nombre d'encoches au rotor,
- $n_d \in \mathbb{N}$
- $n_{ws} = 1, 3, 5, \dots, n_{ws} \in \mathbb{N}$
- f = fréquence d'alimentation

Dans le cas l'excentricité statique, $n_d=0$, alors que pour l'excentricité dynamique, n_d peut prendre les valeurs : 1, 2, 3, ... (n_d est connu sous le nom «ordre d'excentricité »). le coefficient n_{ws} représente l'harmonique de temps lié à l'alimentation du moteur asynchrone.

I.7.2.4. Défaut dû au palier :

Les études permettent de classer le défaut de roulement à bille comme suivant [16] :

- Trous dans les gorges de roulement intérieures et extérieures.
- Ondulation de leur surface de roulement.
- Attaque des billes.
- Corrosion due à l'eau.
- Défaut de graissage, problème dû à la température.
- Découlement, effritement de surface, provoqués par une surcharge

La relation entre les vibrations des roulements à billes et le spectre du courant statorique est basée sur le fait que toutes les excentricités interfèrent sur le champ dans l'entrefer de la machine asynchrone, Les fréquences apparaissent dans les spectres du courant statorique vérifié par la formule suivante [16], [17]:

Où :

- $k = 1, 2, 3$
- f_c est l'une des caractéristiques fréquences
- f_s est la fréquence d'alimentation
- f_{roul} la fréquence des défauts de roulement reflétés dans le courant du stator. nous pouvons d'abord considérer la valeur entière de $k = 1$.

$$f_{roul} = I f_s \pm K f_c I \quad (I-6)$$

Où :

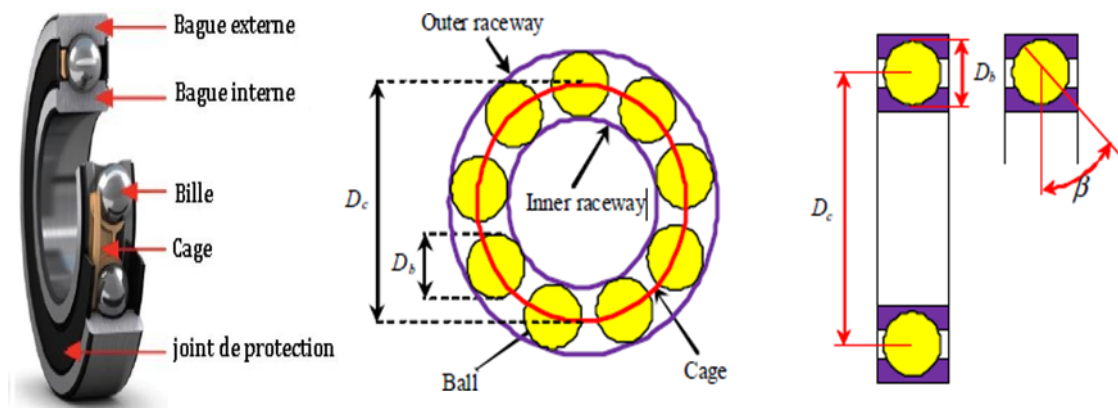


Figure I.12: Dimensions du roulement à bille.

Une fréquence f_c caractéristique peut être associée à chaque type de faute de roulement. Cette fréquence correspond à la périodicité d'apparition du phénomène physique anormal lié à la l'existence de la faute. Les fréquences caractéristiques sont des fonctions du roulement géométrie et fréquence mécanique du rotor f_r . Pour les trois éléments de roulements considérés comme types de défauts (voir figure I.12), f_c prend les expressions suivantes [17] :

- **Défaut sur la bague extérieure**

$$f_{b.ext} = f_o = \frac{n_o}{2} f_{rot} \left[1 - \frac{d_b}{d_c} \cos(\beta) \right] \quad (I-7)$$

- **Défaut sur la bague intérieure**

$$f_{b.int} = f_i = \frac{n_b}{2} f_{rot} \left[1 + \frac{D_c}{D_c} \cos(\beta) \right] \quad (I-8)$$

- **Défaut au niveau d'une bille**

$$f_{b.int} = f_b = \frac{n_b}{D_c} f_{rot} \left[1 - \frac{D_b}{D_c} \cos(\beta)^2 \right] \quad (I-9)$$

- DC :Diamètre du palier
- Db :Diamètre de la bille (Ball).
- β : angle de contact de la bille avec la cage
- $frot$: fréquence de rotation mécanique du rotor
- nb = nombre de billes ;

I. 8. 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 :

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

I. 9. Méthodes de diagnostic

Les méthodes de diagnostic sont nombreuses mais on peut les classer suivant deux axes

- L'usage des outils mathématiques qui permettent de modéliser les systèmes, les causes et les symptômes de défaillance, pour faciliter les démarches inductives et déductives, qui relèvent du domaine des méthodes de diagnostic interne.
- L'usage des méthodes capables de reproduire sous forme informatique, les modes de raisonnement de l'homme. Ces derniers sont basés sur la discipline de l'intelligence artificielle et sont du domaine des méthodes de diagnostic externe.

On peut classer les méthodes de diagnostic en premier lieu dans les deux grandes familles [20] :

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

I.9.1 Méthodes externes

Les méthodes externes de diagnostic supposent qu'aucun modèle n'est disponible pour décrire les relations de cause à effet. La seule connaissance repose sur l'expertise humaine acquise par apprentissage, ces méthodes se basent sur l'analyse des signaux que fournit la machine lors de son fonctionnement, les signaux utilisables peuvent être [18] :

Flux d'entrefer, puissance instantanée, courant statorique et vibration acoustique.

I.9.2 Méthodes internes

La connaissance du modèle permet de décrire les relations de cause à effet, ces méthodes requièrent une connaissance approfondie du fonctionnement sous la forme de modèle mathématique, ces méthodes utilisent un modèle pour reproduire le comportement du système [18].

On distingue ces méthodes suivant le modèle utilisé.

- **Modèle de simulation** : les modèles analytiques utilisés dans ce mode sont représentés par des équations d'état ou des fonctions de transfert.
- **Observateurs** : un module capable d'engendrer une approximation du vecteur d'état est appelé : estimateur d'état ou observateur d'état. Le modèle est décrit sous une représentation de variables d'état. L'analyse du comportement des estimations des états qui ont un sens physique permet la réalisation du diagnostic.
- **Estimation paramétrique** : c'est la détermination des vecteurs des paramètres qui gouvernent le comportement dynamique du système.
- **Modélisation des signaux** : dans cette méthode, le contenu spectral, l'évolution temporelle des variables mesurées sont exploitées pour détecter et localiser les défauts, l'analyse spectrale est très utilisée pour détecter des défaillances dans les machines électriques.

I.9.3 Méthodes inductives

Elles correspondent à une approche montante ou recherche en avant, il s'agit de trouver le défaut à partir de ses effets sur le système, ces méthodes utilisent un mécanisme de raisonnement en avant qui a pour objectif d'interpréter les symptômes ainsi que leur combinaison afin de trouver le défaut [19].

I.9.4 Méthodes déductives

Le raisonnement en arrière est la principale caractéristique de ces méthodes, la méthode déductive doit trouver quels sont les effets dans le système. Une vérification des effets trouvés par rapport aux effets possibles permet de confirmer l'existence d'un défaut.

Le diagnostic peut utiliser soit un seul type de raisonnement (avant ou arrière) soit une combinaison de raisonnement (avant et arrière) dans ce dernier cas le raisonnement appelé mixte ou avant arrière [19].

I.10 Différentes méthodes de diagnostic

Les moteurs asynchrones sont soumis pendant leur fonctionnement à plusieurs contraintes de différentes natures, l'accumulation de ces contraintes provoque des défauts dans les différentes parties du moteur.

Pour remédier au problème de détection des défauts, il existe une variété de techniques de diagnostic et de détection des défauts. Certaines d'entre elles sont basées sur l'observation et la mesure (mesure de champ magnétique, mesure de bruit) d'autres sont basées sur la surveillance et la comparaison des caractéristiques électromécaniques du moteur en défaut (courant statorique, couple et vitesse) [23]. .

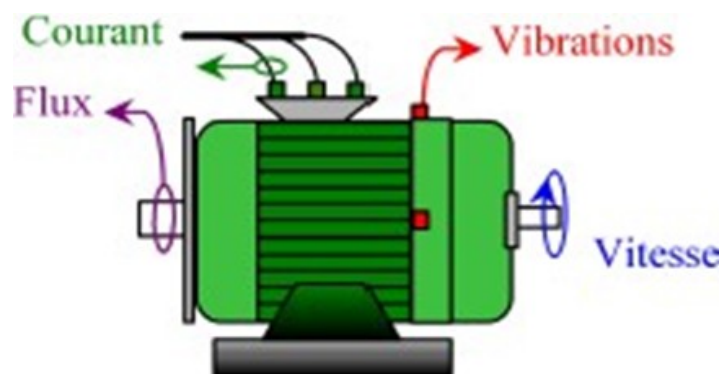


Figure I-13. Différents grandeurs de diagnostic dans une machine [39].

Ces techniques peuvent être classées en trois catégories : les techniques mécaniques, les techniques chimiques et les techniques magnétiques et électriques.

I.10.1 Techniques mécaniques

Parmi ces techniques, on trouve :

I.10.1.1 Diagnostic par mesure de la température

Les températures des supports sont surveillées sur des bases de routine, et fournissent des informations utiles. Un volume de liquide refroidissant, débouché sur des températures, est aussi précieux pour l'indication des problèmes de refroidissement et pour le contrôle lorsqu'il est proposé de faire opérer la machine au-delà de sa puissance.

Les températures des bobines sont aussi impératives pour la détermination de la limite pour laquelle le moteur peut être chargé et pour l'estimation de la durée de vie rémanente de l'isolation des enroulements. Elles sont rarement mesurées à cause des problèmes d'obtention de l'isolation électrique contre les conducteurs de haute tension, bien que les détecteurs de température soient parfois intercalés dans l'isolant renfermé sur le point surchauffé du conducteur, mais cela affaiblit l'intégrité de l'isolant.

Il demeure donc une nécessité pour le capteur de fortes températures avec lequel peut être monté sur les enroulements ou inséré dans l'isolant électriquement isolé par rapport à son instrument de mesure.

I.10.1.2 Diagnostic par mesure des vibrations

Les signaux de vibrations détectés contiennent des informations essentielles sur l'état de la machine. L'analyse spectrale de ces signaux nous renseigne sur les différents défauts qui sont à l'origine de ces vibrations [23].

Les vibrations de la machine peuvent être captées par des accéléromètres placés sur les paliers selon les directions axiale, verticale et radiale. Les spectres des signaux de vibrations, issus du moteur avec défaut, sont comparés avec ceux de références enregistrées lorsque le moteur était en bon état. Cette méthode permet la détection aussi bien des défauts électriques que mécaniques puisque la force magnétomotrice contient les effets des asymétries du stator ou du rotor et la perméance dépend de la variation de l'entrefer (à cause des ouvertures des encoches statoriques, rotoriques et l'excentricité). Cependant, le coût des capteurs de vibration qui est relativement élevé, ainsi que les difficultés rencontrées dans la connexion de ces capteurs (problème d'accessibilité) représentent les limites et les inconvénients de cette méthode [22].

I.10.2 Diagnostic chimique

Plusieurs moteurs sont refroidis par l'air ou à l'aide d'un circuit fermé avec un échangeur de chaleur hydro réfrigéré. La dégradation de l'isolation électrique dans le moteur produit le gaz

d'oxyde de carbone qui apparaît dans le circuit de l'air refroidissant et qui peut être détecté par une technique d'absorption infrarouge [23].

L'air est tiré du moteur à travers le tube vers le détecteur infrarouge par une pompe auxiliaire. Seuls les moteurs en service sont échantillonnés et la forme de l'air de chaque moteur est analysée pendant deux minutes.

L'huile de roulement est aussi analysée régulièrement, et l'intervention est requise si les produits indiquant la dégradation sont présents.

A ce stade, on peut conclure que la plupart des techniques précitées exigent l'emploi des capteurs, qui doivent être placés au niveau de la machine. C'est pour cette raison elles peuvent être utilisées que pour les machines de grande puissance.

Ces techniques sont basées généralement sur l'utilisation des grandeurs mécaniques, afin que les ingénieurs mécaniciens puissent faire leur interprétation. Bien que les machines soient des moteurs asynchrones. La présence des ingénieurs électriciens est nécessaire pour intervenir dans la partie électrique et pour cette raison les techniques de diagnostic sont de plus en plus orientées vers l'emploi des grandeurs électriques vu leur accessibilité et la simplicité du capteur utilisé.

I.10.3 Techniques magnétiques et électriques

I.10.3.1 Diagnostic par mesure du flux magnétique axial de fuite

La présence d'un défaut quelconque, provoque un déséquilibre électrique et magnétique au niveau du stator et du rotor ce qui affecte la répartition des du champ magnétique dans et hors la machine. Plusieurs auteurs se sont penchés à l'exploitation du flux axial. En fait, si on place une bobine autour de l'arbre de la machine, elle sera le siège d'une force électromotrice induite. Le contenu spectral de cette tension induite, peut être exploité pour détecter les différents défauts statoriques ou rotoriques [22].

L'analyse spectrale de la tension induite peut être utilisée pour identifier les différentes asymétries et défauts. Le contenu d'harmoniques des flux de fuites axiaux du stator et du rotor est directement en relation avec les harmoniques contenus respectivement dans les courants du stator et du rotor.

La conséquence directe d'un défaut est l'augmentation du flux de fuite axial. Cette augmentation du flux est la condition nécessaire pour l'utilisation du flux de fuite axial

comme une technique de diagnostic, c'est-à-dire ce dernier doit avoir une valeur importante [23].

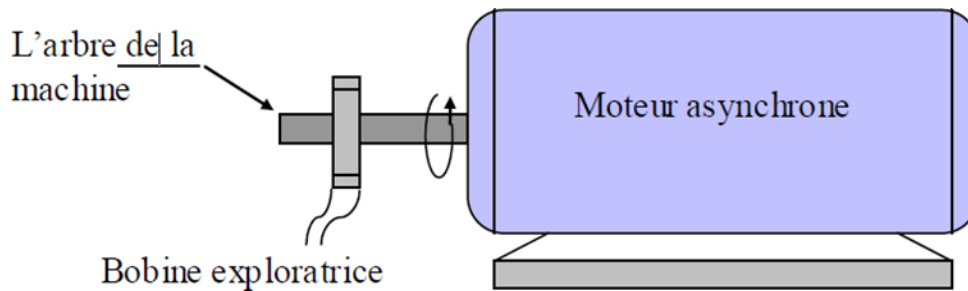


Figure I-14. Bobine exploratrice pour la mesure du flux de fuite axial.

I.10.3.2 Diagnostic par l'analyse des tensions statoriques induites

En 1999 J. Milimonfared a proposé une autre technique pour la détection des défauts rotoriques dans les machines asynchrones. Cette technique, est basée sur l'exploitation du contenu fréquentielle de la tension induite par le flux rotorique dans les enroulements statoriques, pendant la déconnexion du moteur du réseau. La rupture d'une barre va affecter directement la tension induite dans les enroulements statoriques. Cependant, l'application de cette technique est impossible lorsqu'il s'agit d'un moteur appartenant à une chaîne de production [22].

I.10.3.3 Diagnostic par l'analyse du couple électromagnétique

Le couple électromagnétique développé dans les machines électriques, provient de l'interaction entre le champ statorique et celui rotorique. Par conséquent, tout défaut, soit au niveau du stator ou au rotor, affecte directement le couple électromagnétique. L'analyse spectrale de ce signal, donne des informations pertinentes sur l'état du moteur . Cependant, la nécessité d'un équipement assez coûteux pour l'acquisition de cette grandeur représente l'inconvénient major de cette méthode [29].

I.10.3.4 Diagnostic par l'analyse de la puissance instantanée

Il est clair que le niveau d'informations portées par le signal de la puissance est plus grand que celui donné par le courant d'une seule phase, ce qui représente l'avantage de cette méthode par rapport aux autres. Cette méthode est utilisée pour la détection des défauts mécaniques ou encore les défauts électriques tels que les courts-circuits entre spires statorique. Dans cette direction, M. Drif et al. ont démontrés l'efficacité de l'utilisation de la puissance apparente pour la détection d'un défaut d'excentricité [22].

I.10.3.5 Diagnostic par l'analyse de la tension de neutre

Cette méthode a démontré son efficacité quant à la détection des défauts statoriques , ainsi que les défauts rotoriques. Cependant, l'utilisation de cette technique devient un peu compliquée dans le cas où le neutre de la machine est très loin par rapport à celui de la source [22].

Les constructeurs de machines peuvent donner accès au neutre de la machine asynchrone même si celle-ci est alimentée par un onduleur monté directement (Figure I.15). Dans ce cas la tension entre neutres peut être mesurée et analysée. Toutefois, d'après les résultats expérimentaux, et contrairement au courant, les composants harmoniques à considérer en cas de rupture de barres font intervenir seulement la fréquence du convertisseur [29].

I.10.3.5 Diagnostic par l'analyse de la tension de neutre

Cette méthode a démontré son efficacité quant à la détection des défauts statoriques , ainsi que les défauts rotoriques. Cependant, l'utilisation de cette technique devient un peu compliquée dans le cas où le neutre de la machine est très loin par rapport à celui de la source [22].

Les constructeurs de machines peuvent donner accès au neutre de la machine asynchrone même si celle-ci est alimentée par un onduleur monté directement (Figure I.15). Dans ce cas la tension entre neutres peut être mesurée et analysée. Toutefois, d'après les résultats expérimentaux, et contrairement au courant, les composants harmoniques à considérer en cas de rupture de barres font intervenir seulement la fréquence du convertisseur [29].

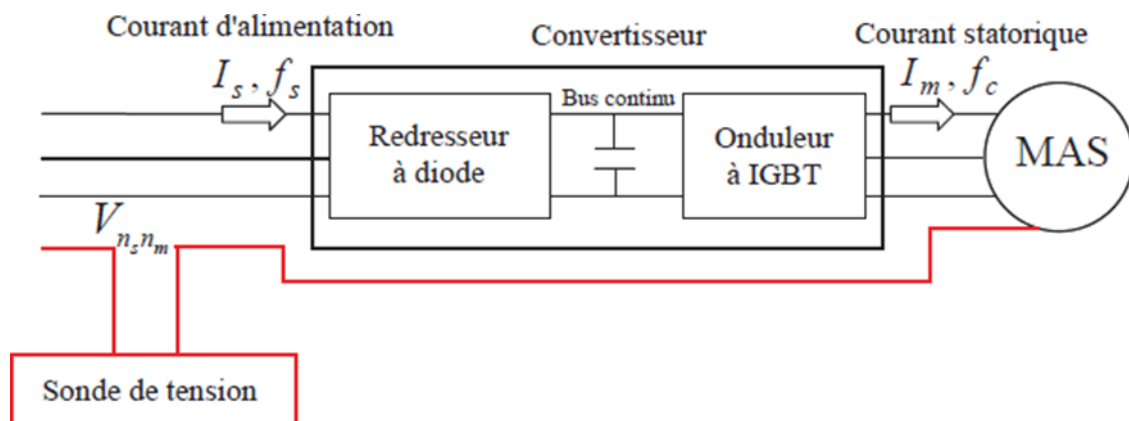


Figure I-15. Système d'alimentation d'une machine asynchrone par convertisseur avec neutre de sorti.

Les composants harmoniques avec leurs fréquences relatives f_h (RBPF= nb f_r (Rotor Bar Pass Frequency)) sont de nouveau données par

$$f_{sh} = [3h - (3h - 1) \pm KS]f_c \quad (I-10)$$

Avec :

$$h = 1, 3, 5, 7$$

$$k = 0, 1, 2, \dots$$

I.10.3.6 Diagnostic par l'analyse du courant statorique

Cette méthode est un outil puissant pour détecter la présence des défauts mécaniques et électriques. Elle présente plusieurs avantages par rapport aux autres méthodes, parce qu'elle ne demande ni l'introduction d'un capteur au niveau de la machine ni l'utilisation d'un équipement coûteux et encombrant mais seulement un capteur de courant (sonde à effet de hall ou transformateur de courant) qui donne une image sur le courant de phase statorique.

C'est cette méthode de diagnostic qui sera utilisée comme outil de diagnostic dans la recherche des différents défauts dans ce travail.

C'est Cette méthode est basée sur la comparaison entre le spectre de courant de stator sain et le spectre de courant de stator défectueux.

Les nouvelles composantes de fréquence apparaissent lorsque le moteur a souffert d'un défaut.

La technique d'analyse spectrale du courant de stator (MCSA) est l'une des méthodes utilisées pour diagnostiquer de manière précise différents défauts dans les moteurs à induction[17].

Dans le cas d'une répartition non sinusoïdale de la Fmm en plus du fondamental apparaît des harmoniques de l'encochage rotorique, cas d'un moteur à cage [23].

Pour montrer le principe de cette méthode, on considère le cas d'une asymétrie rotorique d'un moteur asynchrone, l'existence de ce défaut engendre un courant de défaut dans le rotor .Ce courant produit une Fmm pulsatoire dont la fréquence d'ondulation est

(Fs), cette Fmm produit dans l'enroulement statorique une harmonique à deux composantes, la première ayant la fréquence (1-2s)f et la deuxième ayant la fréquence (1+2s)f (Figure I.16).

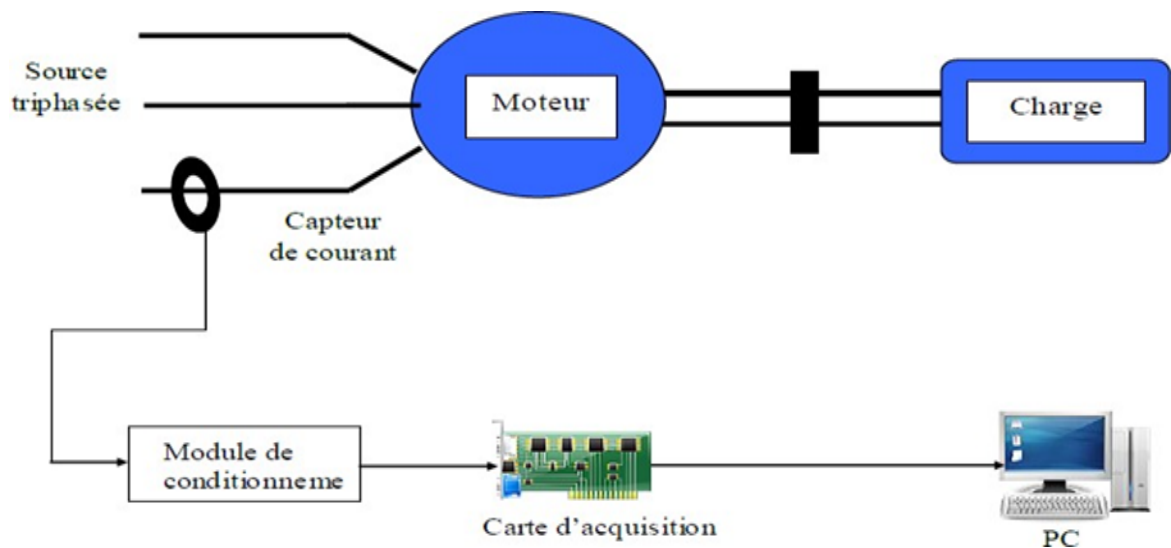


Figure I-16.schéma synoptique du principe de la méthode du spectre du courant statorique.

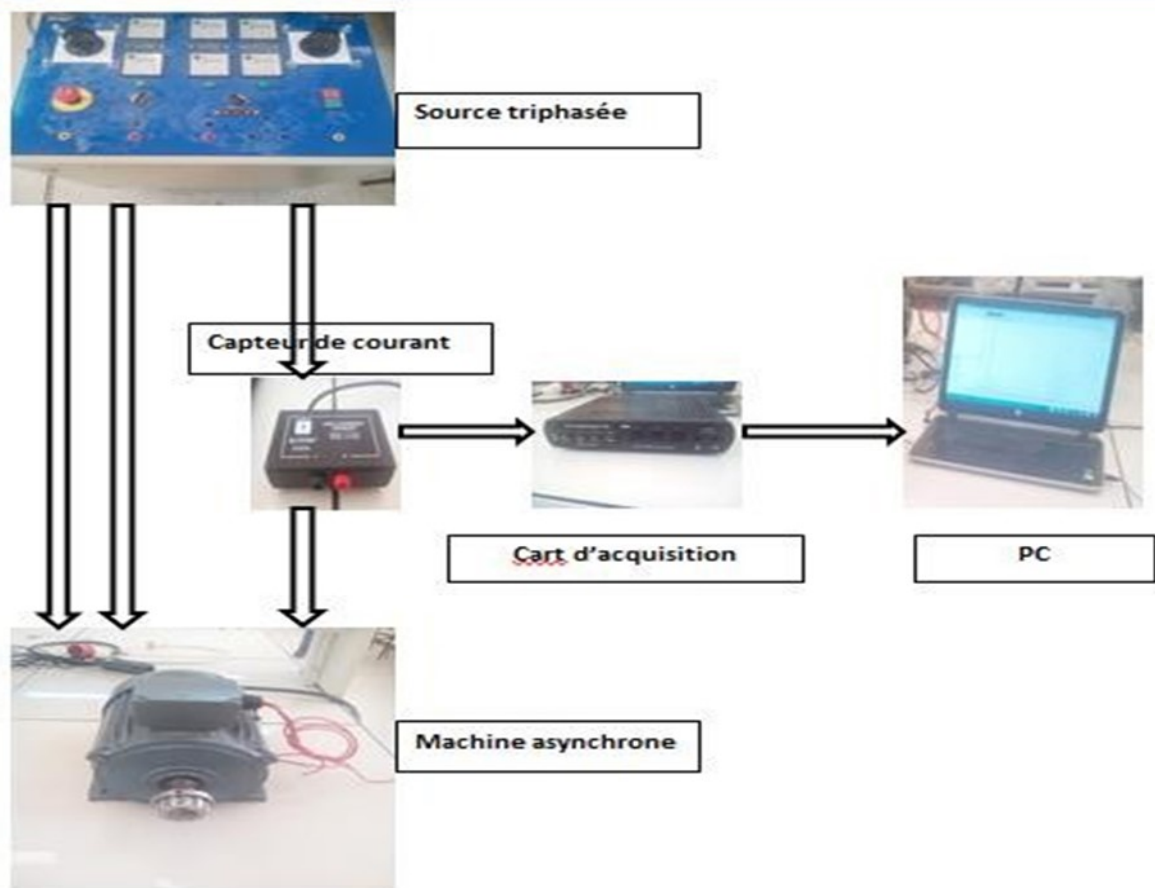


Figure I-17.Schéma synoptique du principe de la méthode du spectre du courant statorique utilisé pour avoir les résultats expérimentaux dans le laboratoire de la faculté de la technologie (Université d' El Oued).

I.11 Modèle de la machine asynchrone à cage

La modélisation et la simulation des machines constituent une étape primordiale en matière de diagnostic. Elles permettent la compréhension du fonctionnement défectueux, la vérification sur prototype virtuel de l'efficacité des algorithmes de détection de défaut et elles apportent également la possibilité de construire des bases de données sur les manifestations électriques et magnétiques de ces défauts. Parmi les approches de modélisations existantes, on peut citer [23] , [18] .

I.11 .1 Approche analytique

Les modélisations analytiques reposent sur le concept d'inductance, notion qui caractérise par une relation linéaire entre le flux et le courant. Cette approche globale des phénomènes électromagnétiques permet d'établir un schéma électrique équivalent de la machine, la théorie des circuits permet de trouver les équations différentielles caractérisant le fonctionnement de la machine.

I.11 .2 Approche numérique

On cite deux méthodes :

- La méthode des réseaux de perméance :

Elle consiste à découper la machine en plusieurs tubes du flux caractérisés par des perméance. Le mouvement de la machine est pris en compte par l'intermédiaire de perméance d'entrefer variable selon la position du rotor. Cette tient en compte aussi la saturation[18].

- La méthode des éléments finis :

Il s'agit de découper la machine en éléments de tailles suffisamment petites, pour que le matériau magnétique puisse être considéré comme linéaire sur les surfaces correspondantes, et à partir des équations de MAXWELL, il est possible d'exprimer le problème à résoudre.

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

I.12 Conclusion :

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

chapitre II: Modélisation de la machine asynchrone triphasée à cage

II. 1. Introduction

Le modèle multi enroulement, défini dans le but de mieux se rapprocher de la structure réelle du rotor à cage, suppose que celui-ci regroupe un nombre de mailles formant un enroulement polyphasé, chaque maille est constituée de deux barres adjacentes et les deux portions d'anneau de court-circuit qui les relient. Une telle structure a été utilisée avec profit dans le diagnostic de la machine asynchrone. Plusieurs démarches ont été menées dans cet axe, et ont permis de dévoiler quelques phénomènes découlant d'un défaut, tel que l'apparition des raies de fréquences supérieures ou inférieures à la fréquence statorique dans l'analyse spectrale des courants, couple, vitesse et puissance[21].

Les modèles simples ($d-q$), utilisés dans les méthodes classiques, négligent un certain nombre de phénomènes. Ces modèles sont fréquemment affectés par les transformations et le changement d'axe. Donc, il a fallu s'orienter vers le modèle multi enroulement pour une description adaptée aux défauts [25].

Dans notre étude, nous utiliserons la méthode des circuits électriques magnétiquement couplés pour simuler le fonctionnement de la machine asynchrone. Les facilités apportées par cette approche pour étudier les défauts magnétiques, nous ont semblé être les plus adéquates pour analyser l'influence d'une rupture de barre ou d'anneau de court-circuit sur le fonctionnement de la machine asynchrone à cage. Nous avons privilégié l'approche analytique afin de disposer d'un modèle mathématique ne nécessitant pas d'outils de calculs complexe [25].

II. Le modèle multi enroulement de la MAS

II.1. Hypothèses simplificatrices

La cage rotorique peut se décomposer en $(N_r + 1)$ circuits électriques rotoriques indépendants. En effet, si nous considérons 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 boucle totale à (N_r+1) . Nous associons à chacune de ces boucles un courant, ce qui nous amène à calculer (N_r+1) courants rotoriques (Figure II-1). Chaque barre rotorique est modélisée par une inductance en série avec une résistance, tout comme chaque segment d'anneau de court-circuit (Figure II-2) [19].

Pour notre modélisation, nous avons été amenés à faire quelques hypothèses simplificatrices dont les plus importantes sont :

- La machine est symétrique à entrefer constant.
- La répartition dans l'entrefer de la force magnétomotrice et du flux est sinusoïdale.
- Le circuit magnétique n'est pas saturé et a une perméabilité constante.
- Les pertes fer par hystérésis et courants de Foucault, l'effet de peau et les effets de dentures sont négligés.
- L'effet des encoches est négligé.
- La réduction de spires qui intervient dans une phase à la suite d'un court-circuit est négligeable.

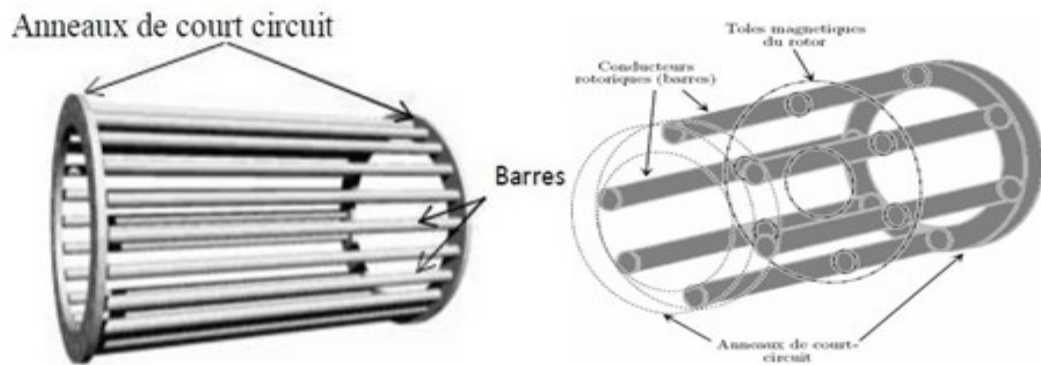


Figure II-1 Structure du rotor

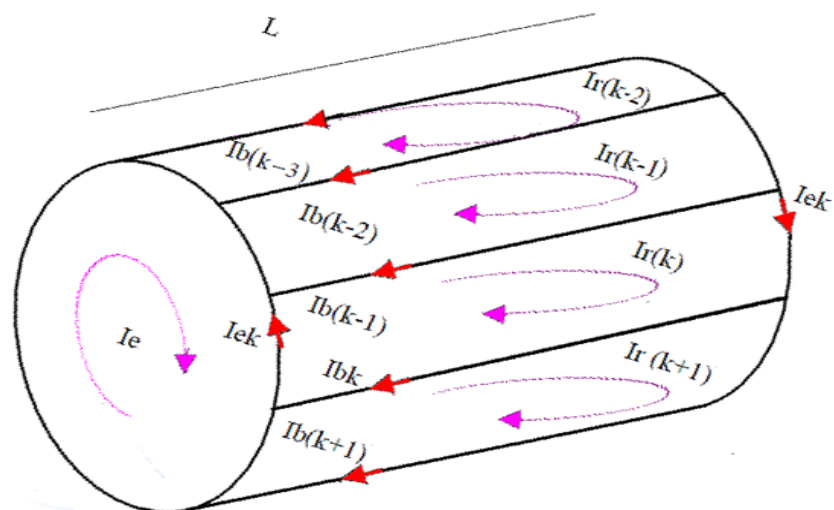


Figure II-2 . Structure électrique du rotor .

Avec ces hypothèses, on calcule les différents paramètres du modèle.

II.2. Equations différentielles associées

Pour faire une simulation numérique réelle de notre machine, il nous faut mettre toutes les équations de notre système global. L'ensemble des équations différentielles indépendantes définissant le modèle de la machine doit être mis en valeur.

Cherchons donc ses équations :

II.2. 1 Equations différentielles du stator

Ces équations différentielles vont nous permettre d'associer le vecteur tension, le vecteur courant ainsi que le vecteur flux pour les trois phases statoriques Sa, Sb et Sc. En appliquant la loi d'Ohm sur les trois phases statoriques, nous obtenons :

$$[v_{sabc}] = [R_s][i_{sabc}] + \frac{d}{dt}[\phi_{sabc}] \quad (\text{II.1})$$

Avec :

$$[v_{sabc}] = [v_{sa} \ v_{sb} \ v_{sc}]^T, \text{ le vecteur de tensions statoriques.}$$

$$[i_{sabc}] = [i_{sa} \ i_{sb} \ i_{sc}]^T, \text{ le vecteur de courants statoriques.}$$

$[R_s]$: matrice des résistances statoriques.

$$[R_s] = \begin{bmatrix} r_s & 0 & 0 \\ 0 & r_s & 0 \\ 0 & 0 & r_s \end{bmatrix} \quad (\text{II.2})$$

Les trois phases statoriques sont non seulement magnétiquement couplées entre elles mais également avec les circuits électriques rotoriques. Par conséquent, les courants de boucles rotoriques notés ici $[i_{rk}]$ interviennent dans les équations des trois flux statoriques comme le montre l'équation ci-dessous :

$$[\phi_{sabc}] = [L_s][i_{sabc}] + [M_{sr}][i_{rk}] \quad (\text{II.3})$$

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

$$[\phi_{sabc}] = [\phi_{sa} \ \phi_{sb} \ \phi_{sc}]^T, \text{ le vecteur de flux statoriques.}$$

$[i_{sabc}] = [i_{sa} \ i_{sb} \ i_{sc}]^T$, le vecteur de courants statoriques.

$[L_s]$: la matrice des inductances statoriques se compose des inductances propres, de magnétisation, de fuites et mutuelles des trois phases statoriques. Elle peut se mettre sous la forme.

$$[L_s] = \begin{bmatrix} L_{as} & M_s & M_s \\ M_s & L_{bs} & M_s \\ M_s & M_s & L_{cs} \end{bmatrix} \quad (II.4)$$

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

$$[M_{sr}] = \begin{bmatrix} \dots & L_{sr} \cos(\theta_r + k a) & \dots \\ \dots & L_{sr} \cos(\theta_r + k a - \frac{2\pi}{3}) & \dots \\ \dots & L_{sr} \cos(\theta_r + k a - \frac{4\pi}{3}) & \dots \end{bmatrix} \quad (II.5)$$

où : $k=0, 1, 2, \dots, N_r-1$

Les équations des trois phases statoriques de la machine étant maintenant décrites, les équations associées aux circuits électriques de la cage rotorique sont maintenant abordées.

II.2.2 Equations différentielles du rotor

La (Figure II-3) représente le schéma équivalent d'une maille de la cage rotorique :

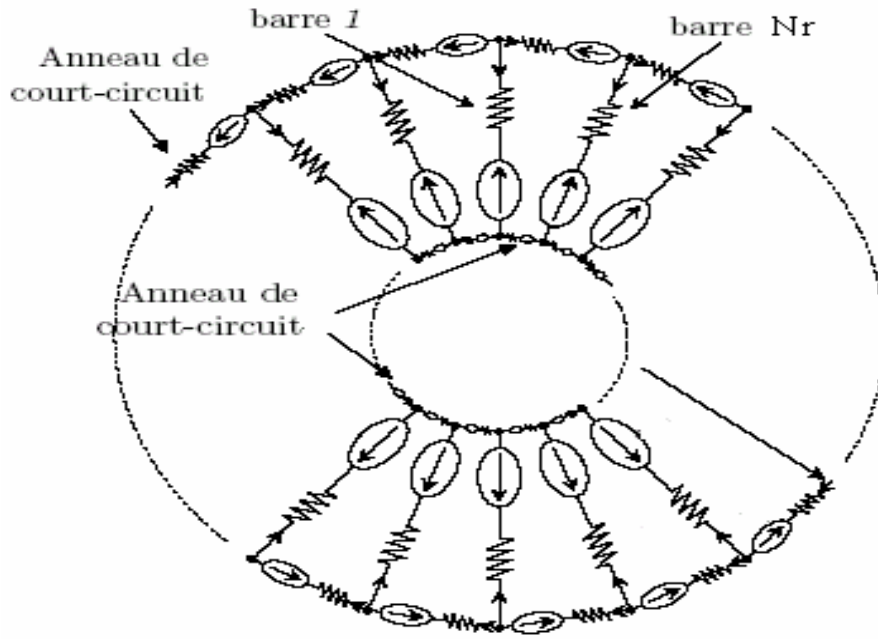


Figure II-3. Schéma électrique équivalent d'une maille rotorique .

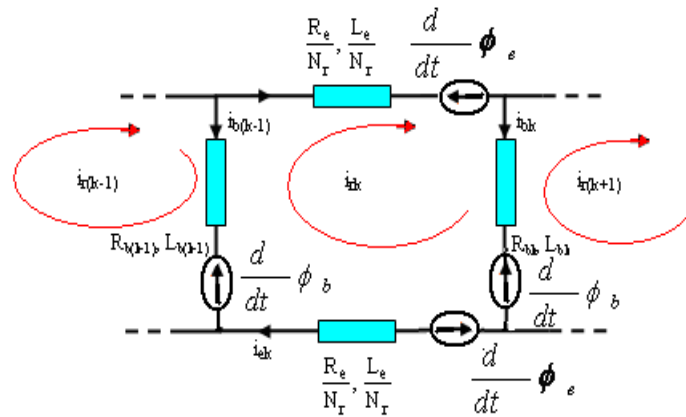


Figure II-4. Schéma électrique équivalent simplifié d'une maille rotorique

Tout comme pour les équations du stator de la machine asynchrone, les équations natives des circuits électriques rotoriques peuvent se mettre sous une forme matricielle. Nous relierons les tensions de chacune des boucles rotoriques avec les courants et les flux grâce aux équations [19], [26].

Sachant que :

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

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

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

$$R_{bk} i_{r(k-1)} + \left(2 \frac{R_e}{N_r} + R_{b(k-1)} + R_{bk} \right) i_{rk} - R_{bk} i_{r(k+1)} - \frac{R_e}{N_r} i_e + \frac{d}{dt} \phi_{rk} = 0 \quad (II.6)$$

avec :

$$\begin{aligned} \phi_{rk} = & \left(L_{rp} + 2L_b + 2 \frac{L_e}{N_r} \right) i_{rk} - M_{rr} \sum_{\substack{j=0 \\ j \neq k}}^{N_r-1} i_{rj} - L_b (i_{r(k-1)} + i_{r(k+1)}) - \frac{L_e}{N_r} i_e \\ & - L_{sr} \left[\cos(\theta_r + ka) : \cos(\theta_r + ka - \frac{2\pi}{3}) : \cos(\theta_r + ka - \frac{4\pi}{3}) \right] [i_{sabc}] \end{aligned} \quad (II.7)$$

Il faut compléter le système d'équations des circuits du rotor par celle de l'anneau de court-circuit [34].

On a alors :

$$\frac{R_e}{N_r} \sum_{k=0}^{N_r-1} i_{rk} + \frac{L_e}{N_r} \sum_{k=0}^{N_r-1} \frac{d}{dt} i_{rk} - R_e i_e - L_e \frac{d}{dt} i_e = 0 \quad (II.8)$$

II.2.3 Equation globale des tensions

L'équation globale des tensions est :

$$[V] = [R] [I] + [L] \frac{d[I]}{dt} + \frac{d[L]}{dt} [I] \quad (II.9)$$

Avec :

$$[V] = [v_{sa} \ v_{sb} \ v_{sc} : 0 \ 0 \ \dots \ 0 : 0]^T, \text{ le vecteur global des tensions } (N_r+4 \times 1),$$

il contient les trois tensions statoriques et les N_r tensions des mailles rotoriques, ainsi que la tension de l'anneau de court-circuit.

$$[I] = [i_{sa} \ i_{sb} \ i_{sc} : i_{r0} \ i_{r1} \ \dots \ i_{rk} \ \dots \ i_{r(N_r-1)} : i_e]^T, \text{ le vecteur global des courants } (N_r+4 \times 1),$$

il contient les trois courants statoriques et les N_r courants des mailles rotoriques, ainsi que le courant de l'anneau de court-circuit [12].

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

Avec :

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

$$[R_r] = \begin{bmatrix} R_{b0} + R_{b(N_r-1)} + 2\frac{R_e}{N_r} & -R_{b0} & 0 & \dots & -R_{b(N_r-1)} & \vdots & -\frac{R_e}{N_r} \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & R_{b(k-1)} & R_{bk} + R_{b(k-1)} + 2\frac{R_e}{N_r} & -R_{bk} & 0 & \vdots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots & \vdots \\ -R_{b(N_r-1)} & 0 & \dots & -R_{b(N_r-2)} & R_{b(N_r-1)} + R_{b(N_r-2)} + 2\frac{R_e}{N_r} & \vdots & -\frac{R_e}{N_r} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -\frac{R_e}{N_r} & \dots & \dots & \dots & -\frac{R_e}{N_r} & \vdots & R_e \end{bmatrix} \quad (II.10)$$

$$[L] = \begin{bmatrix} [L_s] & \vdots & [M_{sr}] \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ [M_{sr}]^T & \vdots & [L_r] \end{bmatrix}, \quad (II.11)$$

la matrice globale des inductances.

Avec :

$[L_r]$: matrice des inductances rotoriques [43].

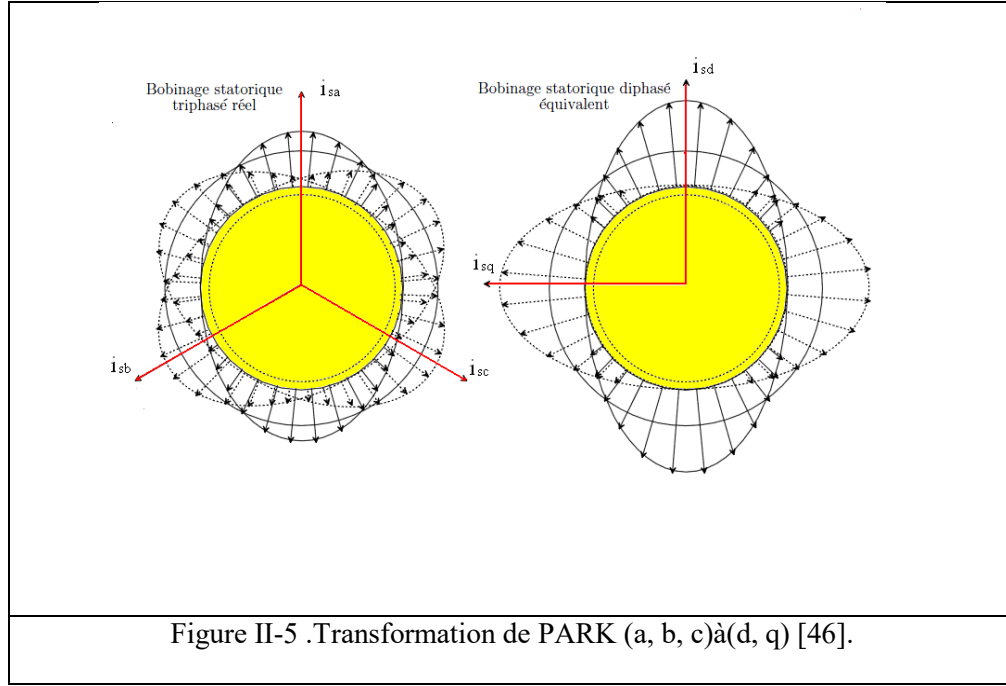
$$[L_r] = \begin{bmatrix} L_{rp} + 2L_b + 2\frac{L_e}{N_r} & M_{rr} - L_b & M_{rr} & \dots & M_{rr} - L_b & \vdots & -\frac{L_e}{N_r} \\ M_{rr} - L_b & L_{rp} + 2L_b + 2\frac{L_e}{N_r} & M_{rr} - L_b & M_{rr} & \dots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots & \vdots \\ M_{rr} - L_b & M_{rr} & \dots & M_{rr} - L_b & L_{rp} + 2L_b + 2\frac{L_e}{N_r} & \vdots & -\frac{L_e}{N_r} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -\frac{L_e}{N_r} & \dots & \dots & \dots & -\frac{L_e}{N_r} & \vdots & L_e \end{bmatrix} \quad (II.12)$$

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

II.2.4 Transformation de PARK

Pour obtenir un système des équations à coefficients constants, il est usuel de faire appel à une transformation de PARK qui permet le passage du repère réel triphasé (a, b, c) au repère d'axe (h, d, q) [12].

Le système des grandeurs triphasées est tel que la somme instantanée des grandeurs est nulle. Ceci permet d'annuler la composante homopolaire par conséquent, le repère (h, d, q) peut être réduit à un repère biphasé (d, q) [52].



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

La matrice de Park modifiée est définie par [15] ,[22] :

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \cos \theta & -\sin \theta \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (\text{II.13})$$

La dérivée de la matrice de Park est :

$$\frac{d[P(\theta)]}{dt} = -\sqrt{\frac{2}{3}} \omega \begin{bmatrix} 0 & \sin \theta & \cos \theta \\ 0 & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ 0 & \sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (\text{II.14})$$

La matrice globale de Park de dimension $(N_r+4) \times (N_r+4)$ est définie par :

$$[T] = \begin{bmatrix} [P(\theta)] & \vdots & [0] \\ \dots\dots\dots & \vdots & \dots\dots\dots \\ [0]^T & \vdots & [1] \end{bmatrix} \quad (\text{II.15})$$

$$[T]^{-1} = \begin{bmatrix} [P(\theta)]^{-1} & \vdots & [0] \\ \dots\dots\dots & \vdots & \dots\dots\dots \\ [0]^T & \vdots & [1] \end{bmatrix} \quad (\text{II.16})$$

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

Sachant que :

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

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

$$\text{Ave} \begin{cases} v_{ds} = \sqrt{\frac{3}{2}} v_m \cos(\omega_s - \omega_r)t \\ v_{qs} = \sqrt{\frac{3}{2}} v_m \sin(\omega_s - \omega_r)t \end{cases} \quad (\text{II.17})$$

L'équation (II.9) devient :

$$[T][V_{tr}] = [R][T][I_{tr}] + [L] \frac{d[T][I_{tr}]}{dt} + \frac{d[L]}{dt} [T][I_{tr}] \quad (\text{II.18})$$

$$\Leftrightarrow [V_{tr}] = \left(\underbrace{[T]^{-1}[R][T]}_A + \underbrace{[T]^{-1}[L] \frac{d[T]}{dt}}_B + \underbrace{[T]^{-1} \frac{d[L]}{dt} [T]}_C \right) [I_{tr}] + \underbrace{[T]^{-1}[L][T]}_D \frac{d[I_{tr}]}{dt} \quad (\text{II.19})$$

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

$$A = [T]^{-1} [R][T] = \begin{bmatrix} [P(\theta)]^{-1} [R_s] [P(\theta)] & \vdots & [0] \\ \dots\dots\dots & \vdots & \dots\dots\dots \\ [0] & \vdots & [R_r] \end{bmatrix} \quad (\text{II.20})$$

$$B = [T]^{-1} [L] \frac{d[T]}{dt} = \begin{bmatrix} [P(\theta)]^{-1} [L_s] \frac{d[P(\theta)]}{dt} & \vdots & [0] \\ \dots\dots\dots & \vdots & \dots\dots\dots \\ [M_{sr}]^T \frac{d[P(\theta)]}{dt} & \vdots & [0] \end{bmatrix} \quad (\text{II.21})$$

$$C = [T]^{-1} \frac{d[L]}{dt} [T] = \begin{bmatrix} [0] & \vdots & [P(\theta)]^{-1} \frac{d[M_{sr}]}{dt} \\ \dots & \vdots & \dots \\ \frac{d[M_{sr}]^T}{dt} [P(\theta)] & \vdots & [0] \end{bmatrix} \quad (II.22)$$

$$D = [T]^{-1} [L] [T] = \begin{bmatrix} [P(\theta)]^{-1} [L_s] [P(\theta)] & \vdots & [P(\theta)]^{-1} [M_{sr}] \\ \dots & \vdots & \dots \\ [M_{sr}]^T [P(\theta)] & \vdots & [L_r] \end{bmatrix} \quad (II.23)$$

La mise en équation du modèle de la machine, conduit à un système complet de dimension N_r+4 [37]:

$$\begin{bmatrix} v_{os} \\ v_{ds} \\ v_{qs} \\ \dots \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ \dots \\ 0 \end{bmatrix} = [L_{tr}] \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{os} \\ i_{ds} \\ i_{qs} \\ \dots \\ i_{r0} \\ \vdots \\ i_{rk} \\ \vdots \\ i_{r(N_r-1)} \\ \dots \\ i_e \end{bmatrix} + [R_{tr}] \begin{bmatrix} i_{os} \\ i_{ds} \\ i_{qs} \\ \dots \\ i_{r0} \\ \vdots \\ i_{rk} \\ \vdots \\ i_{r(N_r-1)} \\ \dots \\ i_e \end{bmatrix} \quad (II.24)$$

$[L_{tr}]$ et $[R_{tr}]$ sont les matrices globales des résistances et des inductances après la transformation de Park [11], [35], [12]:

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

$$\begin{bmatrix}
 L_s + 2M_s & 0 & 0 & \vdots & \sqrt{\frac{3}{2}} & \sqrt{\frac{3}{2}} & \dots & \dots & \sqrt{\frac{3}{2}} & \vdots \\
 0 & L_s - M_s & 0 & \vdots & \sqrt{\frac{3}{2}} & \sqrt{\frac{3}{2}} & \dots & \dots & \sqrt{\frac{3}{2}} & \vdots \\
 0 & 0 & L_s - M_s & \vdots & \sqrt{\frac{3}{2}} & \sqrt{\frac{3}{2}} & \dots & \dots & \sqrt{\frac{3}{2}} & \vdots \\
 \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\
 0 & \sqrt{\frac{3}{2}} L_{sr} & 0 & \vdots & I_\phi & \dots & \dots & \dots & \dots & I_\phi \\
 0 & \sqrt{\frac{3}{2}} L_{sr} \cos(a) & \sqrt{\frac{3}{2}} L_{sr} \sin(a) & \vdots & Nr & \dots & \dots & \dots & \dots & Nr \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\
 0 & \sqrt{\frac{3}{2}} L_{sr} \cos((Nr-1)a) & \sqrt{\frac{3}{2}} L_{sr} \sin((Nr-1)a) & \vdots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\
 \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\
 0 & 0 & 0 & \vdots & I_\phi & \dots & \dots & \dots & I_\phi & \vdots \\
 & & & & Nr & & & & Nr &
 \end{bmatrix} \quad (II.25)$$

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

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

On a:

$$\begin{bmatrix}
 r_s & 0 & 0 & \vdots & 0 & 0 & \dots & \dots & 0 & \vdots & 0 \\
 0 & r_s & 0 & \vdots & 0 & -\omega L_{sr} \sqrt{\frac{3}{2}} \sin(a) & \dots & \dots & -\omega L_{sr} \sqrt{\frac{3}{2}} \sin((Nr-1)a) & \vdots & 0 \\
 0 & 0 & r_s & \vdots & \omega L_{sr} \sqrt{\frac{3}{2}} \cos(a) & \dots & \dots & \dots & \omega L_{sr} \sqrt{\frac{3}{2}} \cos((Nr-1)a) & \vdots & 0 \\
 \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\
 0 & 0 & 0 & \vdots & R_{b0} + R_{b(Nr-1)} + 2 \frac{R_e}{Nr} & -R_{b0} & 0 & \dots & -R_{b(Nr-1)} & \vdots & -\frac{R_e}{Nr} \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & 0 & -R_{b(k-1)} & R_{bk} + R_{b(k-1)} + 2 \frac{R_e}{Nr} & -R_{bk} & 0 & \vdots & \vdots \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\
 0 & 0 & 0 & \vdots & -R_{b(Nr-1)} & 0 & \dots & -R_{b(Nr-2)} & R_{b(Nr-1)} + R_{b(Nr-2)} + 2 \frac{R_e}{Nr} & \vdots & -\frac{R_e}{Nr} \\
 \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\
 0 & 0 & 0 & \vdots & -\frac{R_e}{Nr} & \dots & \dots & \dots & -\frac{R_e}{Nr} & \vdots & R_e
 \end{bmatrix} \quad (II.26)$$

A ces équations, on ajoute les équations électromécaniques afin d'avoir la vitesse électrique de rotation et la position θ_r du rotor [35] [54]:

$$\frac{d}{dt} \omega_m = \frac{1}{J} (C_e - C_r - k_0 \omega_m) \quad (\text{II.27})$$

- J : moment d'inertie total sur l'arbre du moteur.
- C_r : couple de charge.
- C_e : couple électromagnétique produit par la machine.

$$\frac{d}{dt} \theta_r = \omega_r \quad (\text{II.28})$$

II.2.5 Expression du couple électromagnétique [31] [28] [54].

II

$$\begin{bmatrix} \psi_{odqs} \\ \phi_{kr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [P(\theta)]^{-1} & [0] \\ [0] & [1] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [L_s] & [M_{sr}] \\ [M_{sr}]^T & [L_r] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [P(\theta)]^{-1} & [0] \\ [0] & [1] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{odqs} \\ i_{kr} \end{bmatrix} \quad (\text{II.29})$$

$$\Leftrightarrow \begin{bmatrix} \psi_{odqs} \\ \psi_{kr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [P(\theta)]^{-1} [L_s] & [P(\theta)]^{-1} [M_{sr}] \\ [M_{sr}]^T [P(\theta)] & [L_r] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{odqs} \\ i_{kr} \end{bmatrix} \quad (\text{II.30})$$

On aura :

$$\begin{bmatrix} \psi_{odqs} \end{bmatrix} = [P(\theta)]^{-1} [L_s] [P(\theta)] i_{odqs} + [P(\theta)]^{-1} [M_{sr}] i_{kr} \quad (\text{II.31})$$

Après le calcul on obtient :

$$\begin{cases} \psi_{ds} = (L_s - M_s) i_{ds} + \sqrt{\frac{3}{2}} L_{sr} \sum_{k=0}^{Nr-1} i_{rk} \cos(k a) \\ \psi_{qs} = (L_s - M_s) i_{qs} + \sqrt{\frac{3}{2}} L_{sr} \sum_{k=0}^{Nr-1} i_{rk} \sin(k a) \end{cases} \quad (\text{II.32})$$

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

$$\begin{aligned}
P_{sa}(t) &= [v_{sabc}]^T [i_{sabc}] \\
&= ([P(\theta)] [v_{dqs}])^T [P(\theta)] [i_{dqs}] \\
&= [v_{dqs}]^T [i_{dqs}]
\end{aligned} \tag{II.33}$$

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

$$\begin{cases} v_{ds} = r_s i_{ds} + \frac{d\Psi_{ds}}{dt} - \omega_r \Psi_{qs} \\ v_{qs} = r_s i_{qs} + \frac{d\Psi_{qs}}{dt} + \omega_r \Psi_{ds} \end{cases} \tag{II.34}$$

En remplaçant les tensions v_{ds} et v_{qs} dans l'expression (II.32), on obtient :

$$P_{sa}(t) = r_s (i_{ds}^2 + i_{qs}^2) + \left(i_{ds} \frac{d\Psi_{ds}}{dt} + i_{qs} \frac{d\Psi_{qs}}{dt} \right) + \omega_r (\Psi_{ds} i_{qs} - \Psi_{qs} i_{ds}) \tag{II.35}$$

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

$$Ce = P(\Psi_{ds} i_{qs} - \Psi_{qs} i_{ds}) \tag{II.36}$$

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

$$Ce = \sqrt{\frac{3}{2}} P L_{sr} \left\{ i_{qs} \sum_{k=0}^{Nr-1} i_{rk} \cos(k a) - i_{ds} \sum_{k=0}^{Nr-1} i_{rk} \sin(k a) \right\} \tag{II.37}$$

II.2.6 Système d'équation global

Nous pouvons regrouper ces équations dans une représentation matricielle unique pour aboutir à [42] :

$$\begin{bmatrix} \dot{I} \\ \dot{\Omega}_r \\ \dot{\theta}_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [L] & 0 & 0 \\ 0 & J_r & 0 \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} [V] \\ -Cr \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} [L] & 0 & 0 \\ 0 & J_r & 0 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \left([R] + \Omega_r \frac{d[L]}{d\theta_r} \right) & 0 & 0 \\ -\frac{1}{2}[I]^T \frac{d[L]}{d\theta_r} & f_v & 0 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I \\ \Omega_r \\ \theta_r \end{bmatrix} \quad (\text{II.38})$$

Nous avons la forme condensée :

$$[U] = [B'] [X] + [A'] \begin{bmatrix} \dot{X} \end{bmatrix}, \quad (\text{II.39-a})$$

où le vecteur $\begin{bmatrix} \dot{X} \end{bmatrix}$ peut être écrit comme suit :

$$\begin{bmatrix} \dot{X} \end{bmatrix} = [A']^{-1} \cdot [U] - [A']^{-1} \cdot [B'] [X], \quad (\text{II.39-b})$$

Nous pouvons la mettre sur la forme suivante :

$$\begin{bmatrix} \dot{X} \end{bmatrix} = [A']^{-1} \cdot [U] - [B'] [X]$$

$$\begin{bmatrix} \dot{X} \end{bmatrix} = [A']^{-1} [Y]$$

AVEC

$$[Y] = [U] - [B'] [X]$$

Nous faisons, ainsi, apparaître le vecteur d'état $[X]$ et le vecteur $[U]$ contenant les grandeurs externes à la machine tel que :

$$[X] = \begin{bmatrix} I \\ \Omega_r \\ \theta_r \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} \dot{X} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{I} \\ \dot{\Omega}_r \\ \dot{\theta}_r \end{bmatrix}, \quad [U] = \begin{bmatrix} [V] \\ -Cr \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (\text{II.40})$$

Avec la définition des matrices B et A donnée par:

$$[B'] = \begin{bmatrix} [L] & 0 & 0 \\ 0 & J_T & 0 \end{bmatrix}, \quad [A'] = \begin{bmatrix} \left([R] + \Omega r \frac{d[L]}{d\theta_r} \right) & 0 & 0 \\ -\frac{1}{2}[I]^T \frac{d[L]}{d\theta_r} & f_v & 0 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix}, \quad (\text{II.41})$$

Les termes dus à la rotation de la machine sont donnés par :

$$G_{mt} = \Omega r \frac{d[L]}{d\theta_r}, \quad (\text{II.42})$$

On se retrouve ainsi face à un système d'équations différentielles régissant le fonctionnement de la machine. Pour parvenir à la solution, une méthode numérique doit être mise en oeuvre, la méthode explicite de Runge Kutta s'avère la plus utilisée dans ces cas. Bien avant ça, nous devons définir les matrices A' et B' de manière à traduire l'état interne de la machine, à savoir, état sain ou état de défaut [49].

II.2.7 Calcul des inductances

II.2.7.1 Inductances statoriques

En premier temps, on suppose que les enroulements statoriques sont idéalement distribués autour du périphérique de l'entrefer de sorte que l'induction résultante puisse être supposée sinusoïdale. Dans ce cas, l'expression de la F.m.m de la première phase statorique "a" sera [29] [21] [51] [26]:

$$F_m(\theta) = \frac{2 N_s i_{sa}}{p \pi} \cos(\theta) \quad (\text{II.43})$$

N_s est le nombre total des tours de chaque phase, « p » le nombre de paires de pôles, θ un angle décrivant une position particulière dans l'espace ; cet angle est mesuré par rapport à une référence fixe par rapport au stator, et le courant traversant la phase "a". La densité du flux radial créée dans l'entrefer tiendra l'expression:

$$B_s(\theta) = \frac{2 \mu_0 N_s i_{sa}}{e p \pi} \cos(\theta) \quad (\text{II.44})$$

Où μ_0 désigne la perméabilité magnétique de l'air, et e l'épaisseur de l'entrefer de la machine symétrique. Le flux magnétique dans l'entrefer, par pôles, est obtenu par intégration de l'expression (II.41) autour d'un intervalle polaire le long de la machine :

$$\phi_s = \iint_S B_s dS = \int_0^l dz \int_{-\frac{\pi}{2p}}^{\frac{\pi}{2p}} B_s R d\theta \quad (\text{II.45})$$

Etant donné que l'entrefer de la machine est supposé uniforme, et qu'on néglige toute asymétrie axiale, l'expression (II.42) se réduit à :

$$\phi_s = \frac{4\mu_0 N_s R l}{\pi e p^2} i_{sa} \quad (\text{II.46})$$

Où R désigne le rayon moyen de l'entrefer de la machine symétrique, et l la longueur effective de la machine.

Le flux magnétique total traversant l'enroulement de la phase "a" dû au courant i_{sa} :

$$\Psi_{saT} = N_s \phi_s = N_s i_{sa} \frac{2\mu_0 N_s R l}{e p^2 \pi} \int_{-\frac{\pi}{2p}}^{\frac{\pi}{2p}} \cos(\theta) d\theta = L_{sp} i_{sa} \quad (\text{II.47})$$

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

$$L_{sp} = L_{ms} = \frac{4\mu_0 N_s^2 R l}{e \pi p^2} \quad (\text{II.48})$$

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

$$L_{as} = L_{sp} + L_{sf} \quad (\text{II.49})$$

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

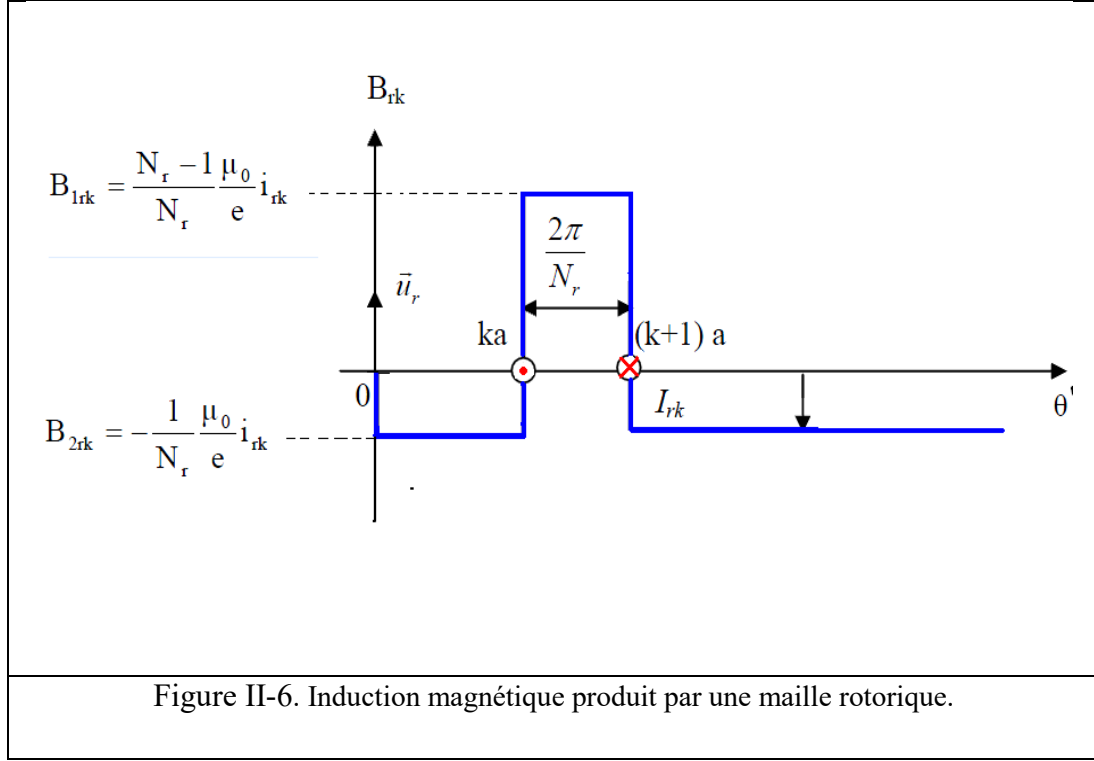
Les enroulements statoriques étant identiques et symétriques et du fait qu'ils sont décalés de $2\pi/3$, les inductances mutuelles entre enroulements statoriques auront pour valeurs :

$$M_s = -\frac{L_{sp}}{2} \quad (\text{II.50})$$

II.2.7.2 Inductances rotoriques

En définissant les flux rotoriques qui entrent en jeu, et en faisant référence à la représentation équivalente du rotor, il sera possible de donner l'expression des différentes inductances. La (Figure II-6) représente, en fonction de l'ouverture angulaire θ' dans un référentiel lié au rotor, l'allure de l'induction magnétique dans l'entrefer, supposée radiale,

produite par une maille rotorique "k" dans l'entrefer. Cela en admettant que les barres rotoriques sont identiques, régulièrement décalées et séparées l'une de l'autre par un angle $N_r / 2\pi a = (\text{rad})$ [23],[51], [26].



Chaque maille rotorique, considérée comme une bobine à une seule spire, parcourue par un courant i_{rk} , est le siège d'un flux principal exprimé par [23]:

$$\phi_{rk} = \int_0^l dz \int_{ka}^{(k+1)a} \left(\frac{N_r - 1}{N_r} \frac{\mu_0}{e} R i_{rk} \right) d\theta' = \frac{N_r - 1}{N_r^2} \mu_0 \frac{2\pi R l}{e} i_{rk} \quad (\text{II.51})$$

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

$$L_{rp} = \frac{N_r - 1}{N_r^2} \mu_0 \frac{2\pi}{e} R l \quad (\text{II.52a})$$

L'inductance totale de la kème maille rotorique est égale à la somme de son inductance principale, des inductances de fuite des deux barres et des inductances de fuite des deux portions d'anneaux de court-circuit fermant la maille k. Donc l'expression est donnée par :

$$L_{rr} = L_{rp} + 2L_b + 2L_e \quad (\text{II.52b})$$

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

$$\phi_{rjrk} = \int_0^l dz \int_{ja}^{(j+1)a} \left(-\frac{1}{N_r} \frac{\mu_0}{e} R i_{rk} \right) d\theta' \quad (II.53)$$

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

$$M_{rr} = -\frac{1}{N_r^2} \frac{2\pi\mu_0}{e} R l \quad (II.54)$$

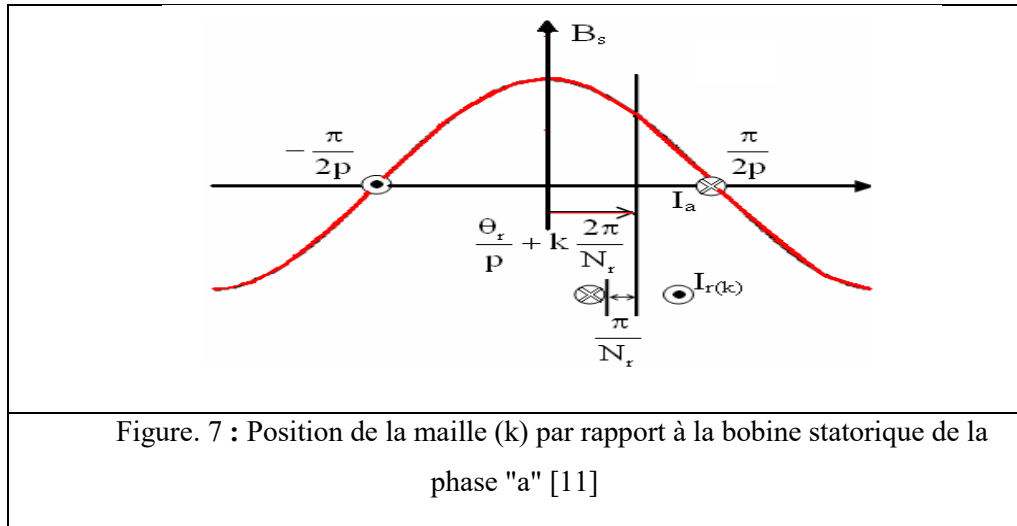
L'inductance mutuelle entre la kème maille et les mailles adjacentes est donnée par :

$$M_{r_{k(k-1)}} = M_{r_{k(k+1)}} = M_{rr} - L_b \quad (II.55)$$

II.3. Inductances mutuelles entre enroulements statoriques et rotoriques

Sachant que : $\theta = \theta' + \omega_r t$

Le champ magnétique dans l'entrefer dû au courant i_{sa} s'écrit en fonction de θ' lié au rotor de l'équation (II.42), donne [11] , [22], [26]:



$$B_s(\theta') = \frac{2\mu_0 N_s i_{sa}}{ep\pi} \cos[(\theta' + \omega_r t)] \quad (II.56)$$

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

$$\phi_{rk sa} = \int_0^l dz \int_{ka}^{(k+1)a} B_s(\theta') R d\theta' \quad (II.57)$$

L'intégrale de l'équation ci-dessus conduit à [42] [51] [26] :

$$\phi_{rk sa} = L_{sr} i_{sa} \cos[\omega_r t + k a] \quad (II.58)$$

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

$$M_{rk sa} = L_{sr} \cos(\omega_r t + k a) \quad (II.59)$$

$$\text{Avec : } L_{sr} = \frac{4\mu_0 N_s R l}{ep^2 \pi} \sin\left(\frac{a}{2}\right) \quad (II.60)$$

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

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

$$M_{rk sb} = L_{sr} \cos\left(\omega_r t + k a - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (II.61)$$

$$M_{rksc} = L_{sr} \cos\left(\omega_r t + k a - \frac{4\pi}{3}\right) \quad (\text{II.62})$$

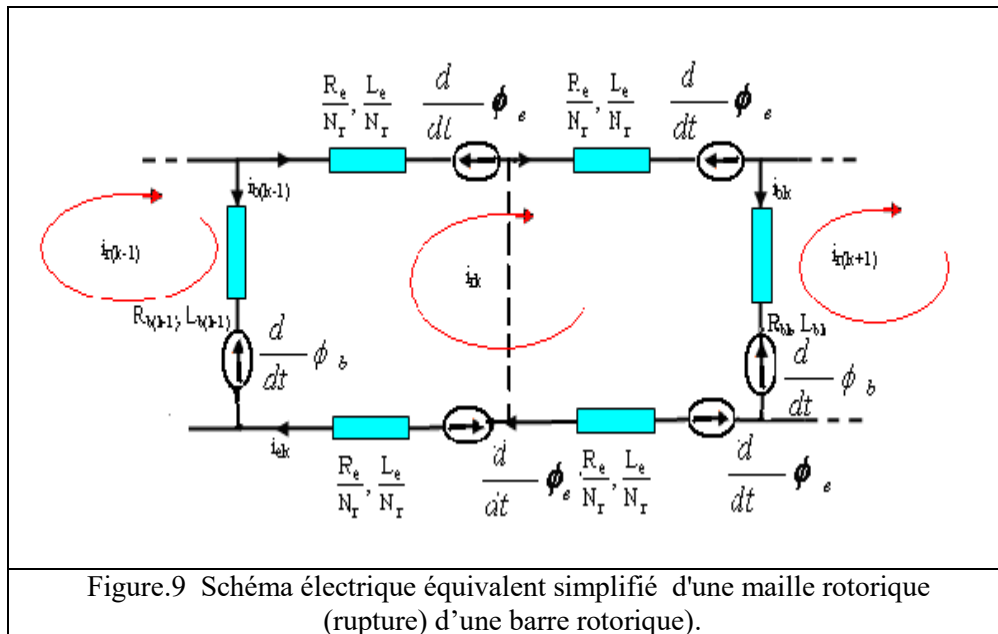
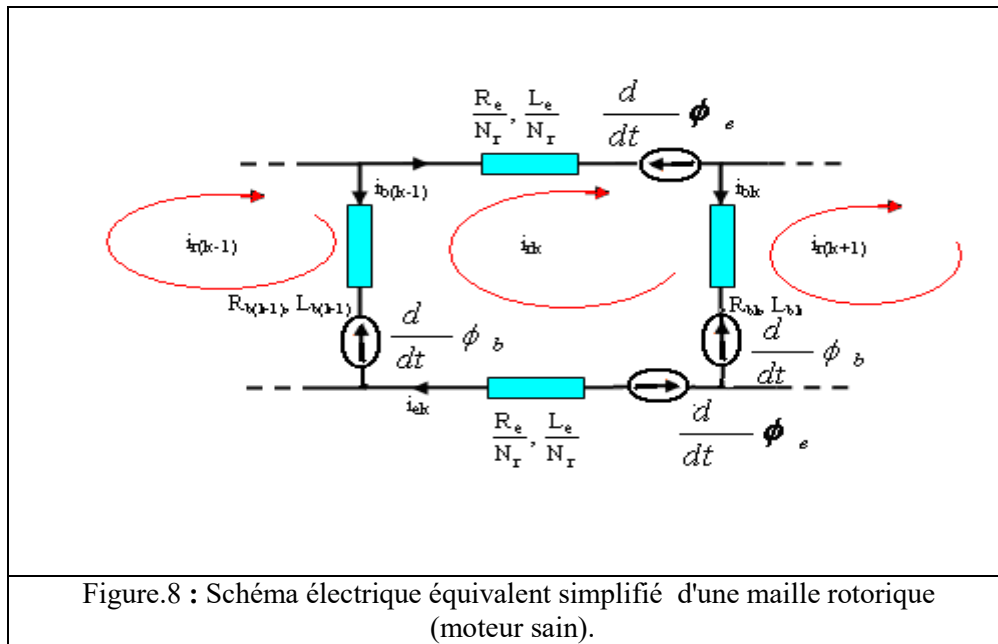
Le tableau suivant, résume les expressions de toutes les inductances de la machine asynchrone à cage.

INDUCTANCES	EXPRESSIONS	
L'inductance principale d'une phase statorique.	$L_{sp} = L_{ms} = \frac{4\mu_0 N_s^2 R l}{e \pi p^2}$	
L'inductance mutuelle entre phases statoriques	$M_s = -\frac{L_{sp}}{2}$	
L'inductance totale d'une phase statorique	$L_{as} = L_{bs} = L_{cs} = L_s = L_{sp} + L_{sf}$	
L'inductance principale d'une maille rotorique	$L_{rp} = \frac{N_r - 1}{N_r^2} \mu_0 \frac{2\pi}{e} R l$	
L'inductance mutuelle entre mailles rotoriques non adjacentes	$M_{rr} = -\frac{\mu_0}{N_r^2} \frac{2\pi}{e} R l$	
L'inductance mutuelle entre mailles rotoriques adjacentes	$M_{r_{k(k-1)}} = M_{r_{k(k+1)}} = M_{rr} - L_b$	
L'inductance mutuelle entre une maille rotorique et une phase statorique "a".	$M_{rk sa} = L_{sr} \cos(p \omega_r t + k a)$ avec $L_{sr} = \frac{4\mu_0 N_s R l}{e p^2 \pi} \sin\left(\frac{a}{2}\right)$	:
Tab : Tableau récapitulatif de toutes les inductances de la machine asynchrone à cage [28]		

II.3.1 Prise en compte des défauts rotoriques dans le modèle

Le type de défaut que nous étudions est la rupture d'une ou plusieurs barres rotoriques ou de portions d'anneaux de court-circuit. Le circuit électrique rotorique donné à la (figure. 8) doit être reconsidéré pour permettre la prise en compte du défaut rotorique dans le modèle de la machine.

La (figure. 9) représente un schéma de deux mailles adjacentes en état sain et à la présence de la rupture d'une barre.



La simulation de ce type de défaillance peut être faite en utilisant deux méthodes différentes, le but étant d'annuler le courant qui traverse la barre incriminée.

La première méthode de modélisation consiste à reconstituer totalement le circuit électrique rotorique. Dans ce type d'approche, la barre rotorique défaillante est enlevée du circuit électrique, ce qui oblige à recalculer les matrices des résistances $[R_r]$ et des inductances $[L_r]$ de la machine asynchrone.

En effet, la suppression d'une barre de la cage nous donne des matrices $[R_r]$ et $[L_r]$ de rang inférieur à celle développée pour la machine saine.

La seconde approche envisageable consiste à augmenter artificiellement la valeur de la résistance de la barre ou de la portion d'anneaux incriminée d'un facteur suffisant pour que le courant qui la traverse soit le plus proche possible de zéro en régime permanent.

En comparaison avec la première méthode, la structure du circuit électrique rotorique n'est pas modifiée car nous considérons, dans ce type de modélisation, qu'une rupture de barre n'altère pas les inductances propres et mutuelles de la cage rotorique.

Par conséquent, le programme de simulation s'adaptera à cette nouvelle contrainte et nous donnera l'évolution temporelle des différents signaux pour un fonctionnement de la machine avec ce type de défaut.

De plus, la simulation d'une barre partiellement cassée (barre fissurée de moitié par exemple) ne peut pas être envisagée, si nous utilisons la première méthode de modélisation alors qu'elle est tout à fait faisable avec la seconde [19].

II .4 . Conclusion

Nous avons bien illustré, dans ce chapitre, le modèle multi enroulement qui tient compte de la structure complète du rotor. Le choix d'un tel modèle est imposé par l'objectif de pouvoir simuler une rupture de barre ou de portion d'anneaux de court-circuit au rotor. Pour cela, nous avons représenté toutes les équations de divers types de barres et de portions d'anneaux du rotor. Avec tous les changements qui s'ajoutent aux paramètres du moteur dans le cas d'un défaut naturel pour imiter le fonctionnement sain pour que notre modèle reflète le plus possible notre ME étudié.

Dans le chapitre suivant, nous attendrons impatiemment les résultats de simulation et le déficit de ce modèle envers différents essais (sain et défaillant) qui seront étudiés puis analysés.

Chapitre III.

Résultats

expérimentaux et

de simulation

III.1.Introduction

Comme il a été mentionné dans le premier chapitre , les défauts rotoriques sont causés par (cassure des barres, défaut d'excentricité,...).

Dans le présent chapitre, nous allons donner les résultats de la simulation effectuée, sur le modèle mathématique présenté dans le chapitre précédent correspondants au fonctionnement de la machine avec défaut.

La cassure ou rupture de barre est un des défauts les plus fréquents au rotor. Le couple diminue sensiblement avec le nombre de barres cassées induisant un effet cumulatif de la défaillance. L'effet d'une cassure de barre croît rapidement avec le nombre de barres cassées.

Nous allons faire des études comparatives entre les différentes méthodes de diagnostic afin de connaître les approches qui jouissent d'une la meilleure sensibilité face aux défauts rencontrés, pour différents régimes de fonctionnement sain et défectueux.

III.2.Théorie générale sur les harmoniques de la MAS

Le champ d'entrefer d'un moteur à induction alimenté par un courant sinusoïdal est riche des différents harmoniques. L'analyse montre que ces harmoniques du flux d'entrefer qui sont dus aux interactions de la perméance d'entrefer et les harmoniques de la force magnétomotrice f.m.m. Il a été démontré que les harmoniques d'encoches rotoriques « *Rotor Rlots Harmonics* » (RSH) sont générés dans la ligne de courant de stator pour une machine saine à des fréquences données par :

$$f_{sh1,2}(k) = \left| \left(h \pm \frac{kN_r}{p} (1 - s) \right) f_s \right| \Bigg|_{k=1.2.3...} \quad (III.1)$$

Nous remarquons que les expressions mathématiques (III.2) du flux direct et (III.3) du flux indirect montrent clairement que, en plus à la composante fondamentale, il existe aussi une série d'harmoniques appelée harmoniques d'encoches rotoriques d'ordre « h » et à des fréquences $f_{sh}(p, N_r, k)$

$$\psi_{sd} = L_{sc} I_{sd} + \sum_{h \in G} \frac{1}{2} \sqrt{\frac{3}{2}} N_r M_{srh} I_{rm} \cos(2\pi f_{sh} t \pm h\varphi_h - \gamma) \quad (III.2)$$

$$\psi_{sq} = L_{sc} I_{sq} - \sum_{h \in G} \frac{1}{2} \sqrt{\frac{3}{2}} N_r M_{srh} I_{rm} \sin(2\pi f_{sh} t \pm h\varphi_h - \gamma) \quad (III.3)$$

I_{rm} : valeur du courant maximale rotorique

Notons aussi que la dérivée de l'expression mathématique du flux direct du stator (III.2) montre qu'il sera nul sauf en cas où « h » appartient à l'ensemble « G ». Pour cela seuls les RSH de l'ordre « h », qui appartiennent à l'ensemble « G », peut être détectés tel que [36]:

$$G = \left\{ \left(h = 1 \cup h = \left(\frac{\lambda N_r}{p} \pm 1 \right)_{\lambda=1,2,3,\dots} \right) \cap h = (6v \pm 1)_{v=1,2,3,\dots} \right\} \quad (\text{III.4})$$

Mais dans le cas réel, il est très difficile de trouver une source d'alimentation parfaitement équilibrée, voire impossible, un bobinage bien centré ainsi qu'une géométrie idéalement symétrique. Un déséquilibre dans les tensions entraînera la création des courants de séquence négative (champ inverse) dans les enroulements statoriques qui donnent naissance à d'autres fréquences d'harmoniques dans les enroulements statoriques. Ce qui nous donne, enfin de compte, des harmoniques non seulement multiple de 3 mais impaire telles que : $f_s, 3f_s, 5f_s, 9f_s, \dots$

nous obtenons des harmoniques que ce soit pour le fonctionnement sain ou défectueux

tel que [15]:

$$h = (2v + 1) \cdot |_{v=0,1,2,3,\dots} \quad (\text{III.5})$$

En général, nous avons deux séries d'harmoniques :

1-une série d'harmoniques de temps « *Time harmonics* » (TH) créée par le non asymétrie de la f.m.m avec ($k=0$) de fréquences caractéristiques:

$$f_{TH}(h) = hf_s \text{ ou } TH = hf_s \quad (\text{III.6})$$

2- Une série d'harmoniques d'encoche rotoriques « *harmonics of rotor slots* » (RSH) de fréquences caractéristiques :

$$f_{RSH}(h, k, s) = \left| \left(h \pm \frac{k N_r}{p} (1 - s) \right) f_s \right| \text{ ou } S^\pm = |(hf_s \pm k N_r f_r)| \quad (\text{III.7})$$

Avec $h=1,3,5,\dots$

Ainsi, nous pouvons généraliser, notre étude, à la manière faite précédemment, sur le déséquilibre naturel de fabrication du rotor qui fait apparaître une série d'harmoniques

« *Harmonics of Rotor Bar Fault* » (RBFH) qui ressemblent à celles de cassure de barres rotoriques théorique.

De plus, il y a aussi le défaut naturel, d'excentricité statique et celui dynamique, qui produit l'excentricité mixte. Ceci entraîne aussi une série d'harmoniques d'excentricité mixte « *Eccentricity Fault Harmonics* » (EFH):

3- Une série d'harmoniques de défaut de barres « *Harmonics of Rotor Bar Fault* » (RBFH) de fréquences caractéristiques :

$$f_{RBFH}(h, k, s) = |(h \pm 2ks)f_s| \text{ or } R^\pm = |(h \pm 2ks)f_s| \quad (\text{III.8})$$

4- Une série d'harmoniques d'excentricité mixte « *Eccentricity Fault Harmonics* » (EFH) de fréquences caractéristiques :

$$f_{EFH}(h, k, s) = \left| \left(h \pm \frac{kN_r}{p} (1-s) \right) f_s \right| \text{ or } E^\pm = |(hf_s \pm kf_r)| \quad (\text{III.9})$$

Avec : $f_r = \left(\frac{N_r}{p} (1-s) f_s \right)$: est. la fréquence rotorique. (voir Tab. III.1).

III.2.1. Etude du courant de stator avec ses harmoniques

Nous allons focaliser notre étude autour des courants de phases, puisque le présent travail se base essentiellement sur l'analyse du spectre d'harmoniques existants. Ainsi, nous allons remplacer les harmoniques mentionnés ci-dessus (III.6) -(III.9) dans les expressions données par les courants instantanés circulant dans les trois phases "a", "b" et "c", de notre moteur asynchrone. Ces équations sont données par (III.10):

Avec

$\hat{I}_{THh}, \hat{I}_{S^\pm k}, \hat{I}_{R^\pm k}$ et $\hat{I}_{E^\pm k}$ sont, respectivement, le courant maximal de phase d'alimentation pour les TH , RSH, RBFH et EFH (ampères)(voir Tab. III.1), et finalement , t : est le temps réel (secondes). avec $m=1,3,5,7,9,\dots$ et $n=1,2,3,4,\dots$

$$\left\{ \begin{array}{l} i_{sa}(t)_{sain} = \sum_{h=1}^m [\hat{I}_{THh} \cos(2\pi THt) + \sum_{k=1}^n [\hat{I}_{S^\pm h} \cos(2\pi S^\pm t) + \hat{I}_{R^\pm k} \cos(2\pi R^\pm t) \\ \quad + \hat{I}_{E^\pm k} \cos(2\pi E^\pm t)]] \\ i_{sb}(t)_{sain} = \sum_{h=1}^m \left[\hat{I}_{THh} \cos\left(2\pi THt - \frac{2\pi}{3}\right) + \sum_{k=1}^n \left[\hat{I}_{S^\pm h} \cos\left(2\pi S^\pm t - \frac{2\pi}{3}\right) \right. \right. \\ \quad \left. \left. + \hat{I}_{R^\pm k} \cos\left(2\pi R^\pm t - \frac{2\pi}{3}\right) + \hat{I}_{E^\pm k} \cos\left(2\pi E^\pm t - \frac{2\pi}{3}\right) \right] \right] \\ i_{sc}(t)_{sain} = \sum_{h=1}^m \left[\hat{I}_{THh} \cos\left(2\pi THt - \frac{4\pi}{3}\right) + \sum_{k=1}^n \left[\hat{I}_{S^\pm h} \cos\left(2\pi S^\pm t - \frac{4\pi}{3}\right) \right. \right. \\ \quad \left. \left. + \hat{I}_{R^\pm k} \cos\left(2\pi R^\pm t - \frac{4\pi}{3}\right) + \hat{I}_{E^\pm k} \cos\left(2\pi E^\pm t - \frac{4\pi}{3}\right) \right] \right] \end{array} \right. \quad (\text{III.10})$$

Types d'harmoniques	Leurs fréquences caractéristiques	Leurs causes
Harmoniques de temps (TH):	$TH = hf_s$	Imposés par la source d'alimentation ou l'asymétrie du bobinage
Harmoniques des encoches rotoriques (RSH)	$S^\pm = (hf_s \pm N_r f_r) $	Causés par la structure du rotor (distribution discrète des barres de rotor dans les encoches rotoriques)
Harmoniques des défauts de barres rotoriques (RBFH)	$R^\pm = (h \pm 2ks)f_s $	Dus à l'assymétrie du rotor de la cage rotorique
Harmoniques des défauts d'excentricité (EFH)	$E^\pm = (hf_s \pm kf_r) $	Dus à l'excentricité mixte naturelle du rotor

Tableau .III.1: Expression générale des différentes harmoniques du courant statorique

Transformation de Park est utilisée pour passer du système triphasé (a-b-c) au système biphasé (dq).L' expression de transformation est présentée par .

$$i_{sd} = \left(\frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}}\right) i_{sa}(t) - \left(\frac{1}{\sqrt{6}}\right) i_{sb}(t) - \left(\frac{1}{\sqrt{6}}\right) i_{sc}(t) \quad (\text{III.11})$$

$$i_{sq} = \left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right) i_{sb}(t) - \left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right) i_{sc}(t) \quad (\text{III.12})$$

Dans le cas idéal, où il y a seulement l'harmonique fondamental, les courants de vecteurs de Park $i_{sq}(t)$ et $i_{sd}(t)$ dans les Eqs (III.11) et (III.12) peuvent être simplifiées comme suit .

$$i_{sd}(t)_{sain} = \frac{\sqrt{6}}{2} \hat{I}_{TH1} \sin(2\pi f_s t) \quad (\text{III.13})$$

$$i_{sq}(t)_{sain} = \frac{\sqrt{6}}{2} \hat{I}_{TH1} \cos(2\pi f_s t) \quad (\text{III.14})$$

Mais dans le cas réel de fonctionnement, où il existe naturellement le déséquilibre des tensions de la source d'alimentation ou l'asymétrie du bobinage, l'asymétrie du rotor de la cage rotorique et l'excentricité mixte naturelle du rotor, et après le remplacement dans l'Eq (III.13) et (III.14), nous trouvons les expressions

suivantes:

$$\begin{aligned}
 i_{sd}(t)_{sain} &= \frac{\sqrt{6}}{2} \left[\sum_{h=1}^m [\hat{I}_{THh} \sin(2\pi THt) + \sum_{k=1}^n [\hat{I}_{S^{\pm}h} \sin(2\pi S^{\pm}t) + \hat{I}_{R^{\pm}k} \sin(2\pi R^{\pm}t) \right. \\
 &\quad \left. + \hat{I}_{E^{\pm}k} \sin(2\pi E^{\pm}t)] \right] \\
 i_{sq}(t)_{sain} &= \frac{\sqrt{6}}{2} \left[\sum_{h=1}^m [\hat{I}_{THh} \cos(2\pi THt) + \sum_{k=1}^n [\hat{I}_{S^{\pm}h} \cos(2\pi S^{\pm}t) + \hat{I}_{R^{\pm}k} \cos(2\pi R^{\pm}t) \right. \\
 &\quad \left. + \hat{I}_{E^{\pm}k} \cos(2\pi E^{\pm}t)] \right]
 \end{aligned} \tag{III.15}$$

Maintenant, on va faire la visualisation expérimentale de cette théorie

III.3 Analyse du spectre MCSA et du spectre MSCSA:

III.3.1 Défaut de rupture de barres rotoriques:

MCSA : Motor Current Spectral Analysis

$$\mathbf{MCSA} = i_{sa}(t)$$

MSCSA : Motor Squar Current Spectral Analysis

$$\mathbf{MSCSA} = i_{sa}(t)^2$$

S'il y aurait un défaut rotorique, nous pouvons constater en visualisant le spectre du courant [41][43].

a)- La plupart des TH s'amplifient, au contraire, il y a d'autres leurs amplitudes diminuent tels que : $5f_s, 13f_s, 15f_s$.

b)- La plupart des RSH a une diminution remarquable à l'exemple de : $|3f_s - N_r f_r|, |15f_s - N_r f_r|, |11f_s - N_r f_r|$ et $|17f_s - N_r f_r|$.

c)- La majorité écrasantes des RBFH, qui représente les signatures théoriques des barres cassées du rotor, est également augmentée à l'exception de quelques RBFH qui se trouvent autour des TH : $5f_s, 13f_s, 15f_s$

$$\text{Tel que } (3 \pm 4s)f_s, (5 - 4s)f_s, (5 - 2s)f_s, (13 - 2s)f_s, (15 - 2s)f_s$$

Cependant l'augmentation considérable des autres comme $(1 \pm 2s)f_s$ offrent une bonne signature pour la détection des cassures de barres.

d)- La majorité des EFH, qui représentent les signatures théoriques de l'excentricité entrefer, sont augmentées avec des valeurs remarquables [43]. Alors, on déduit que les EBFH et EFH sont sensibles au défaut rotorique pour cette méthode. Dans cette étude, nous allons ignorer l'augmentation très faible du glissement durant le défaut ($s \approx s$). Par conséquent, nous obtenons l'expression suivante du courant de stator en cas de défaut statorique ou rotorique:

$$i_{sa}(t)_{d \text{ éaut}} = \sum_{h=1}^m \left[\hat{I}'_{THh} \cos(2\pi THt) + \sum_{k=1}^n [\hat{I}'_{S^{\pm}h} \cos(2\pi S^{\pm}t) + \hat{I}'_{R^{\pm}k} \cos(2\pi R^{\pm}t) + \hat{I}'_{E^{\pm}k} \cos(2\pi E^{\pm}t)] \right] \quad (\text{III.16})$$

Avec

$$\hat{I}'_{THh} \neq \hat{I}_{THh}, \hat{I}'_{S^{\pm}h} \neq \hat{I}_{S^{\pm}h}, \hat{I}'_{R^{\pm}k} \neq \hat{I}_{R^{\pm}k} \text{ and } \hat{I}'_{E^{\pm}k} \neq \hat{I}_{E^{\pm}k} \quad (\text{III.17})$$

(s' :est le glissement en cas de défaut)

Types d'harmoniques	Fréquences caractéristiques MCSA	Fréquences caractéristiques MSCSA
Harmoniques de temps (TH):	$TH = hf_s$	$TH = (h - 1)f_s$
Harmoniques des encoches rotoriques (RSH)	$S^{\pm} = (hf_s \pm N_r f_r) $	$S^{\pm} = ((h - 1)f_s \pm N_r f_r) $
Harmoniques des défauts de barres rotoriques (RBFH)	$R^{\pm} = (h \pm 2ks)f_s $	$R^{\pm} = ((h - 1) \pm 2ks)f_s $
Harmoniques des défauts d'excentricité (EFH)	$E^{\pm} = (hf_s \pm kf_r) $	$E^{\pm} = ((h - 1)f_s \pm kf_r) $

Tableau .III.1: Expression générale des différentes harmoniques du MCSA et du MSCSA

III.4.Etude comparative entre la méthode classique MCSA et celle avancée MSCSA

III.4.1.Première méthode en utilisant l'indice (de Diagnostic) partiel relatif

Cette méthode est utilisée par [51] puisqu'il peut donner une excellente comparaison entre les différentes approches étudiées. Cette méthode nous donne un résultat global de toutes les différences d'amplitudes entre l'état sain et l'état défaillant.

Notre calcul analytique s'étendra à la fréquence 500 Hz ou 550 Hz, en tenant compte des harmoniques dont les amplitudes sont plus importantes.

Dans notre étude , on va utiliser deux harmoniques TH Time Harmonics (harmonique de temps) et RBFH Harmonics of Rotor Bar Fault (Harmoniques des défauts de barres rotoriques)

$$IPR_{AP.H} = \frac{\left(\frac{\sum_{i=1}^{NAP.H} [Amplitude (AP.H)_i]}{NAP.H} \right)_{\text{moteur avec défaut}}}{\left(\frac{\sum_{i=1}^{NAP.H} [Amplitude (AP.H)_i]}{NAP.H} \right)_{\text{moteur sain}}} \quad (III.17)$$

III.4.1.1. Harmoniques de temps (TH)

III.4.1.1.1.Méthode MCSA

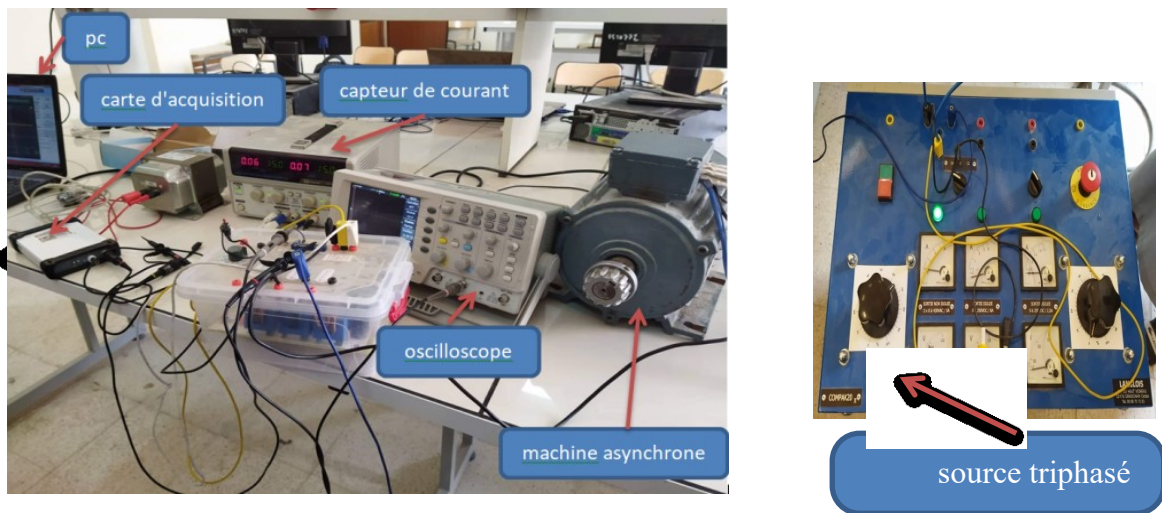


Figure III. 1 Banc d'essai, pour l'acquisition des résultats expérimentaux, dans le laboratoire de l'université d'El Oued

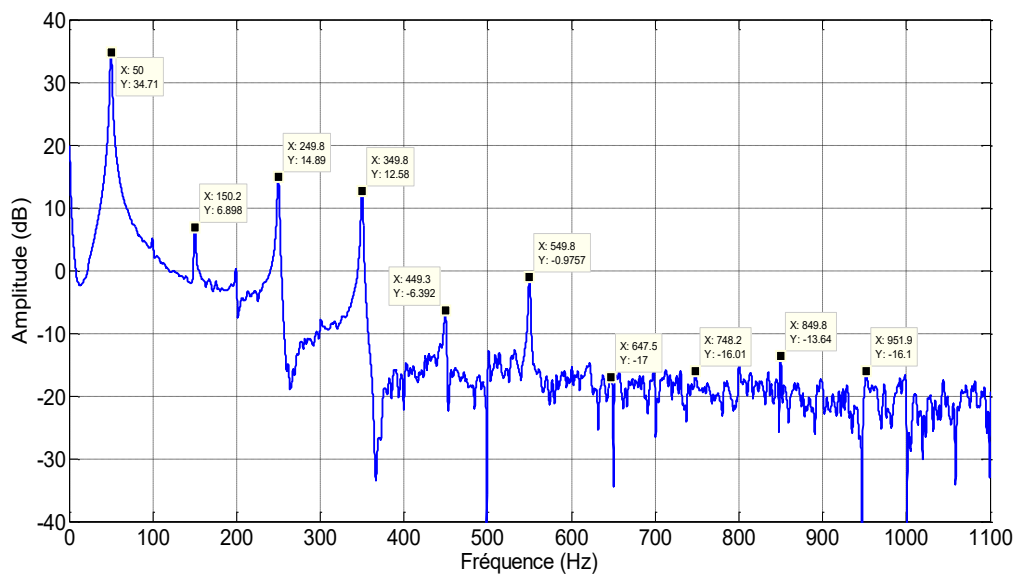


Figure III. 2 Spectre expérimental du courant statorique MCSA avec 4 harmoniques de temps

(moteur sain)

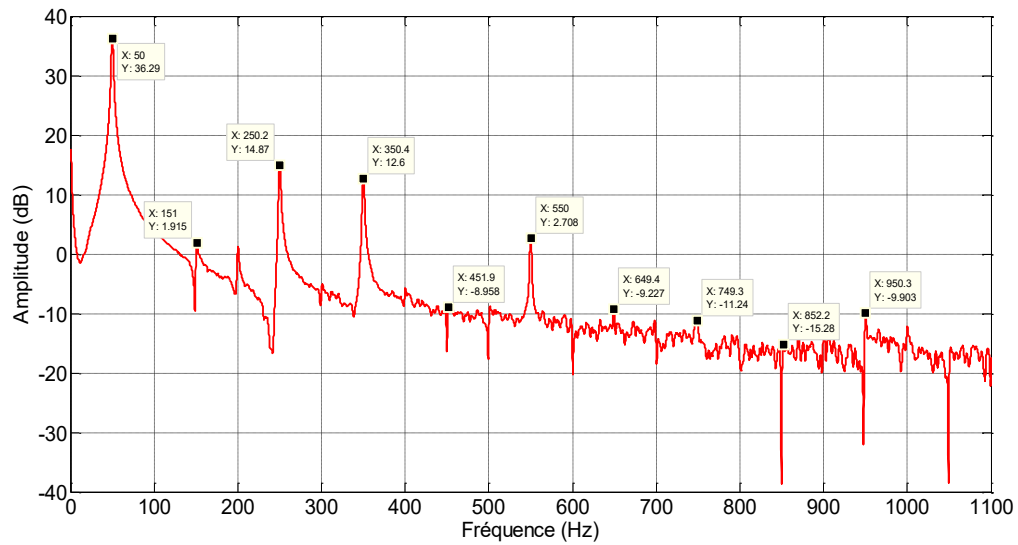


Figure III. 3 Spectre expérimental du courant statorique MCSA avec 4 harmoniques de temps temps (moteur avec défaut rotorique)

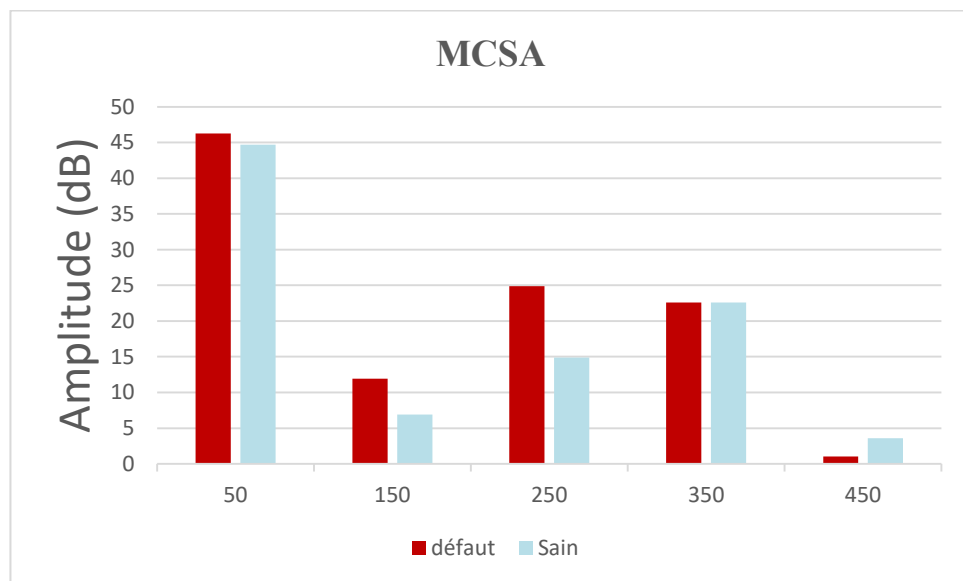


Figure III. 4 Représentation des amplitudes d'harmoniques de temps de la technique MCSA

III.4.1.1.1 Interprétation des résultats

La Figure III.2 , nous fait observer les cinq harmoniques, où il représente 5 harmoniques contrastées en amplitudes différentes entre 50 Hz à 450 Hz dans le cas d'une machine saine.

La Figure III.3 , nous fait observer les cinq harmoniques, où il représente 5 harmoniques contrastées en amplitudes différentes entre 50Hz à 450 Hz dans le cas d'une machine avec barres cassées

La Figure. III. 4 nous montrent la variation de l'amplitude des harmoniques de temps pour le cas d'un moteur sain et avec moteur avec barres cassées en utilisant la technique classique MCSA

On observe une variation de l'amplitude des harmoniques en fonction du rang de cet harmonique Peut être :

- Une augmentation comme les rangs 7 et 9 pour la fréquence 350 Hz et 450
- Une baisse pour les rangs 1, 3 et 5 pour les fréquences 150 Hz, 250 Hz et 350 Hz

III.4.1.1.2.Méthode MSCSA

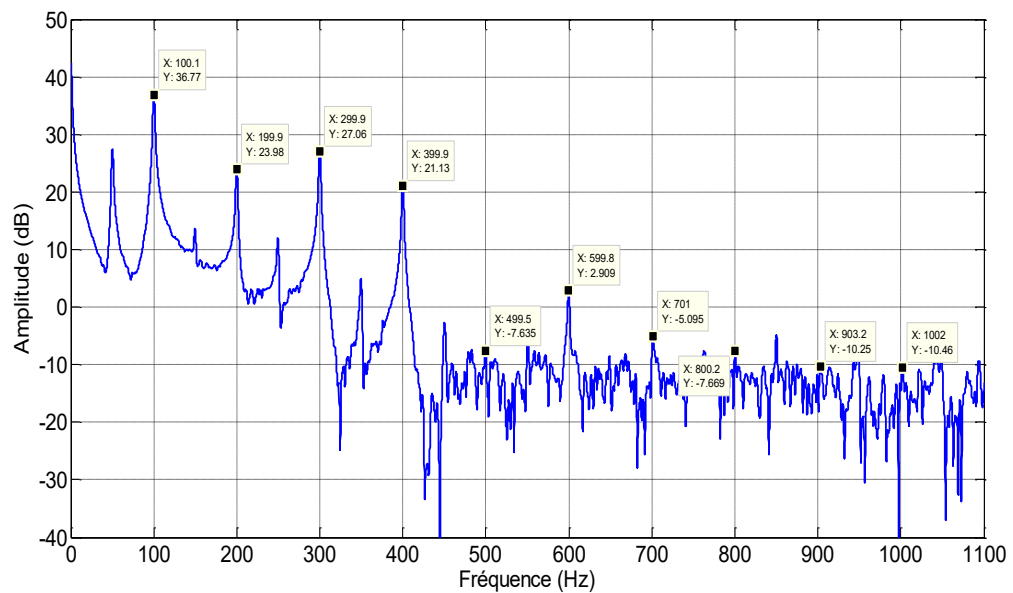


Figure III. 5 Spectre expérimental du courant statorique avec ses harmoniques de temps (moteur sain) MSCSA.

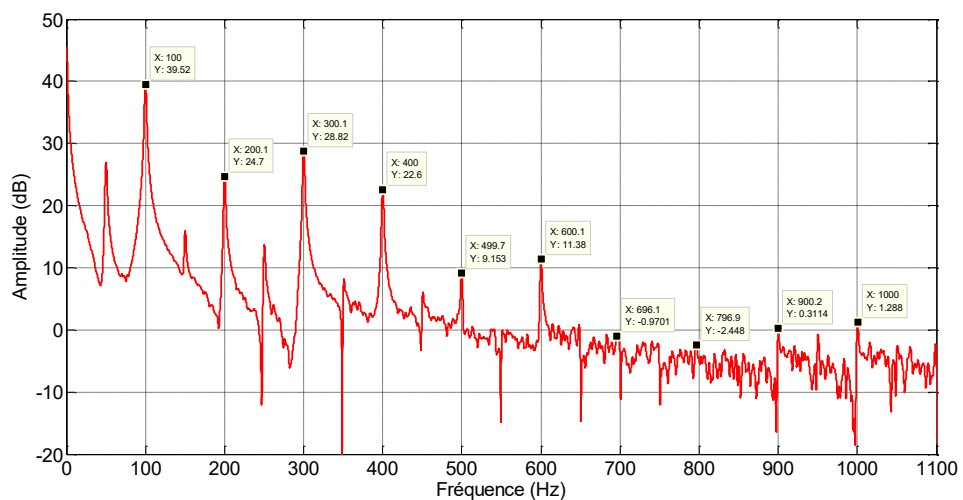


Figure III. 6 Spectre expérimental du courant statorique MSCSA harmoniques de temps (moteur avec défaut rotorique) .

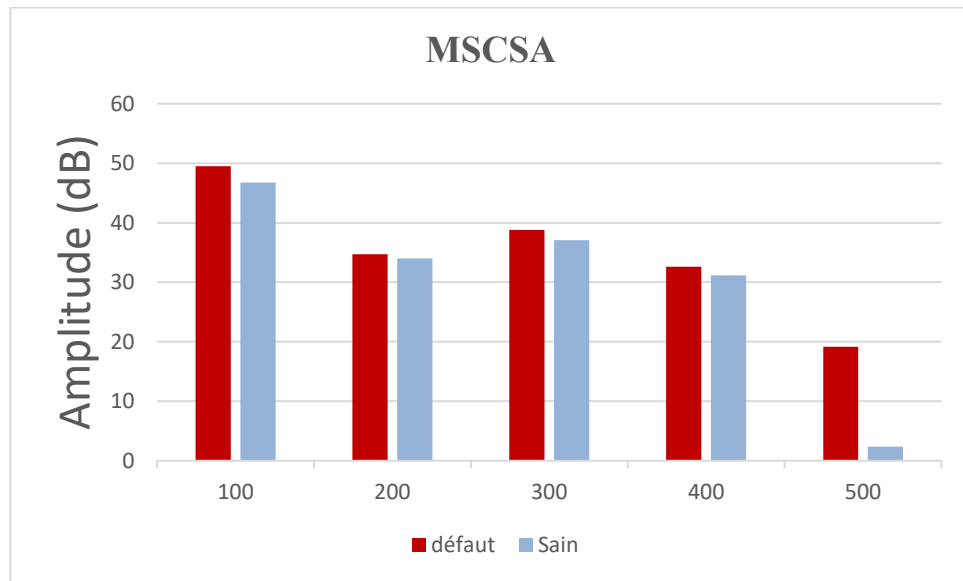


Figure III. 7 Représentation des amplitudes des harmoniques de temps pour un moteur sain puis avec défaut statorique MSCSA

III.4.1.1.2.1 Interprétation des résultats

La Figure III.5 , nous fait observer les cinq harmoniques, où il représente 5 harmoniques contrastées en amplitudes différentes entre 100 Hz à 500 Hz dans le cas d'une machine saine.

La Figure III.6, nous fait observer les cinq harmoniques, où il représente 5 harmoniques contrastées en amplitudes différentes entre 100Hz à 500 Hz dans le cas d'une machine avec 3 barres cassées

La Figure. III.7,nous montrent la variation de l'amplitude des harmoniques de temps pour le cas d'un moteur sain et avec moteur avec 3 barres cassées en utilisant la technique avancée MSCSA

On observe une variation de l'amplitude des harmoniques en fonction du rang de cet harmonique peut être :

- Une augmentation comme les rangs 2, 4, 6 et 8 pour les fréquences 100 Hz, 200 Hz ,300 Hz et 400 Hz

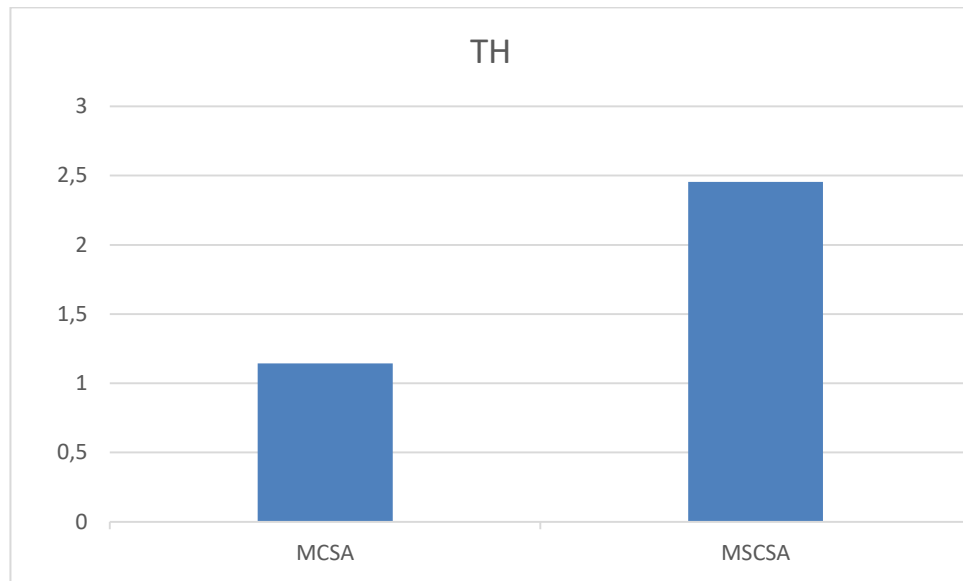


Figure III. 8 Indice partiel relatif des technique MCSA et MSCSA par rapport aux harmoniques de temps TH

III.4.1.1.2.2 Interprétation des résultats

La Figure III. 8 nous montrent la différence relative entre les amplitudes des harmoniques de temps des techniques MCSA et MSCSA où l'on note une différence positive donnée par Indice partiel relatif des technique MCSA et MSCSA par rapport aux harmoniques de temps TH .

Cette différence, nous montre clairement que le MSCSA est plus sensible que MCSA par rapport aux harmoniques de temps TH donnée par l'Indice partiel relatif.

III.4.1.2 Harmoniques des défauts de barres rotoriques (RBFH)

III.4.1.2.1 Méthode MCSA

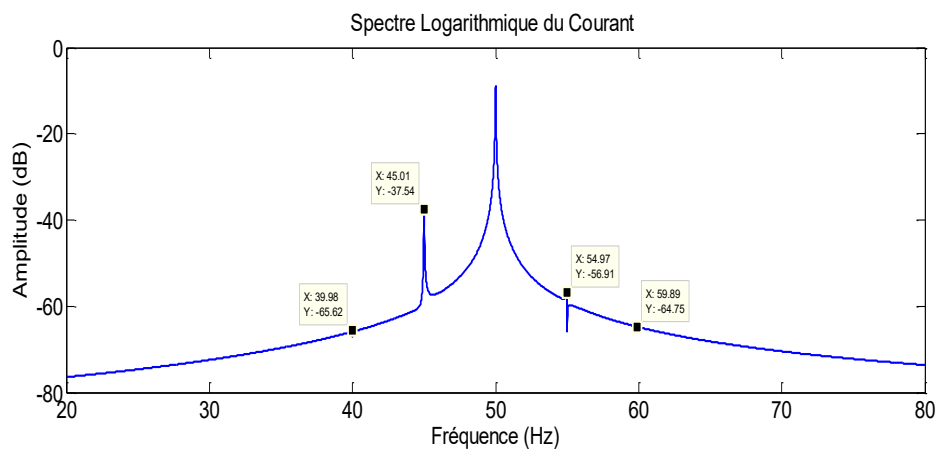


Figure III. 9 Spectre de simulation du courant statorique MCSA avec 4 Harmoniques (RBFH) pour un moteur sain

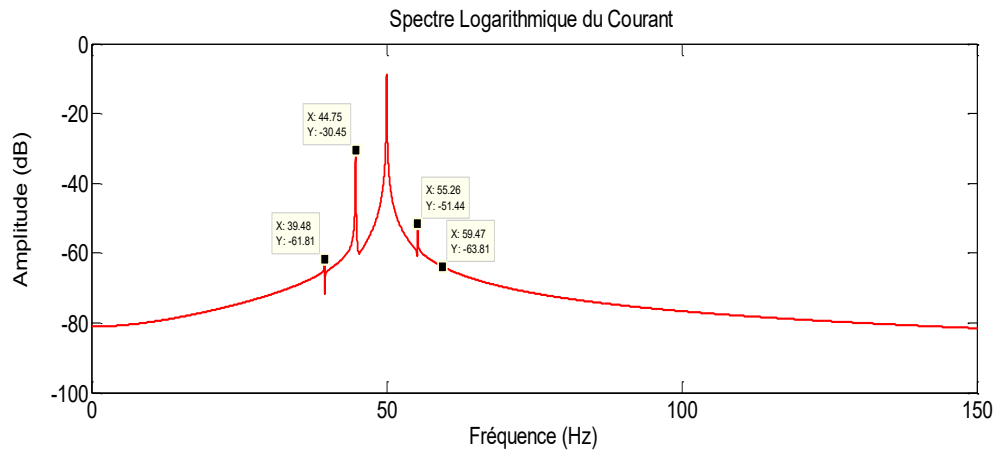


Figure III. 10 Spectre de simulation du courant statorique MCSA avec 4 Harmoniques (RBFH) (moteur avec défaut rotorique)

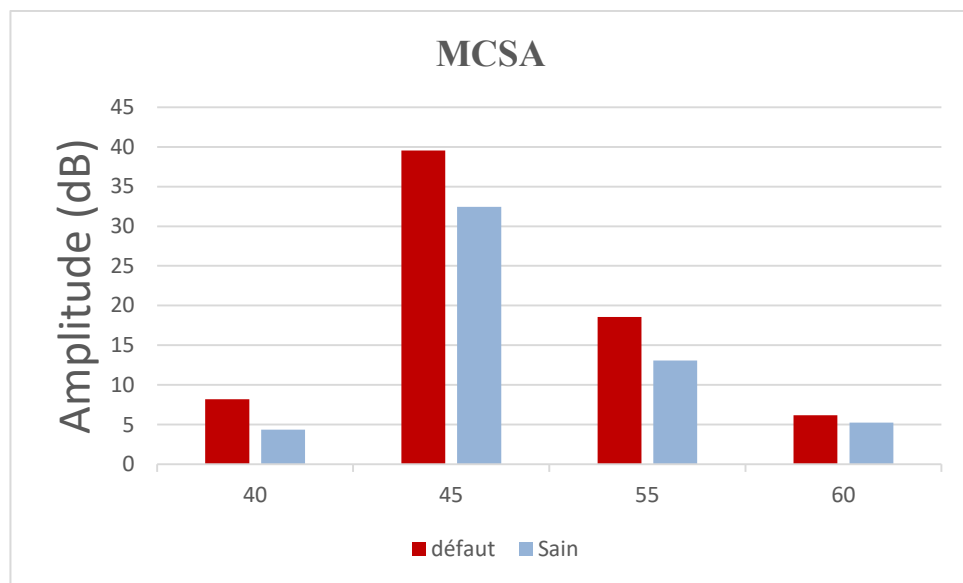


Figure III. 11 Représentation des amplitudes d'harmoniques (RBFH) pour MCSA

III.4 .1.2.2 Interprétation des résultats

La Figure III. 9 montrent que les harmoniques étudiés est entre les fréquences (40Hz à 60 Hz) dans le cas d'une machine saine en utilisant la technique classique MCSA.

La Figure III. 10 montrent que les harmoniques étudiés est entre les fréquences (40Hz à 60 Hz) dans le cas d'un défaut rotorique en utilisant la technique classique MCSA.

La Figure. III. 11 nous montrent la variation de l'amplitude des (RBFH) pour le cas d'un moteur sain et avec moteur avec cassure de 3 barres en utilisant la technique classique MCSA.

On observe une variation de l'amplitude des harmoniques.

On observe une variation des amplitudes des raies en fonction de la valeur du nombre $k=1,2,3,\dots$... $R^{\pm}=(h\pm 2k)f_s$ | appartenant à l'harmonique du rang 1 peut être :

Une augmentation pour les raies donc $k=1, 2, 3$ et 4

III.4 .1.3 Méthode MSCSA

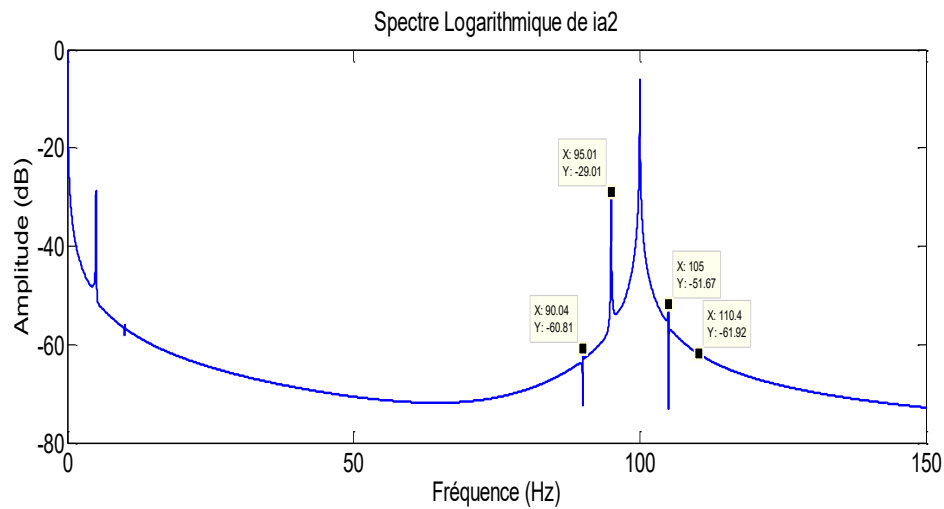


Figure III. 12 Spectre de simulation du MSCSA avec ses harmoniques (RBFH) (moteur sain)

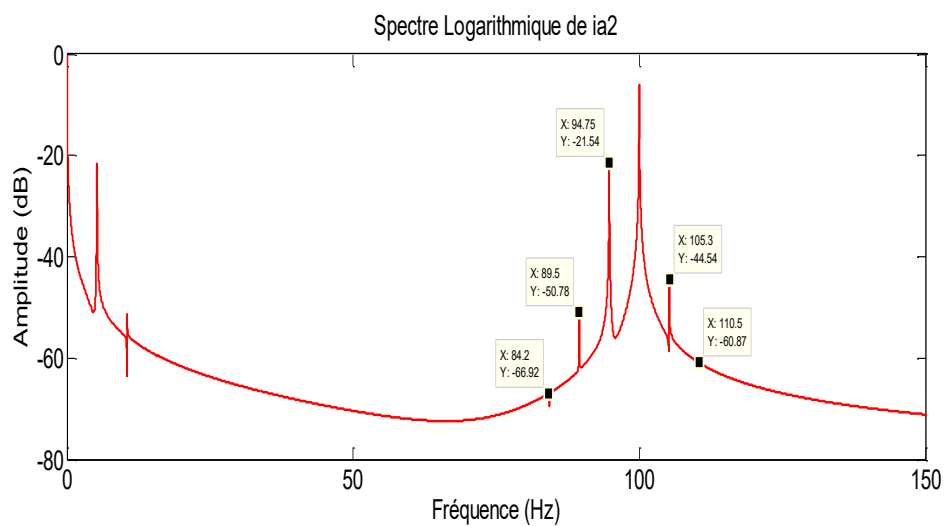


Figure III. 13 Spectre de simulation du MSCSA avec ses harmoniques (RBFH) (moteur avec défaut rotorique)

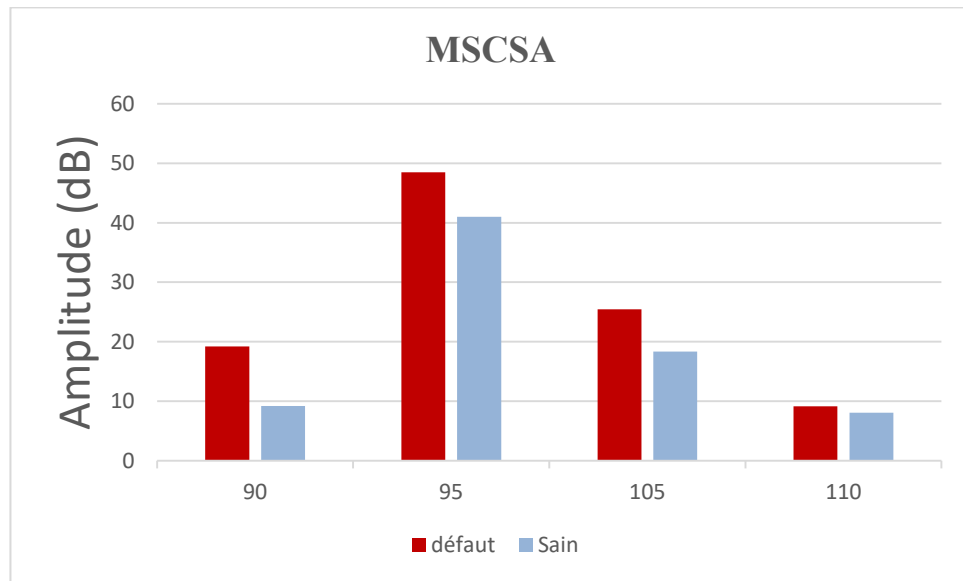


Figure III. 14 Représentation des amplitudes harmoniques (RBFH) pour MSCSA

III.4 .1.3.1 Interprétation des résultats

La Figure III.12 montrent que les harmoniques (RBFH) étudiés se situent entre les fréquences (90Hz à 110Hz) dans le cas d'une machine saine par la technique MSCSA avancée.

La Figure III.13 montrent que les harmoniques (RBFH) étudiés se situent entre les fréquences (90Hz à 110Hz) dans le cas d'un moteur avec défaut rotorique par la technique MSCSA avancée.

La Figure. III. 14 nous montrent une augmentation de toutes les amplitudes des harmoniques (RBFH) pour le moteur avec cassure de 3 barres par rapport d'un moteur sain et avec moteur avec cassure de 3 barres en utilisant la technique avancée MSCSA.

On observe une variation des amplitudes des harmoniques (RBFH) en fonction de la valeur du nombre $k=1,2,3,\dots$... $R^{\pm} = ((h-1) \pm 2ks) \lfloor \frac{2f}{f_s} \rfloor$ appartenant à l'harmonique du rang $h=3$ peut être :

Une augmentation totale pour des amplitudes des harmoniques (RBFH) donc $k=1,2,3$ et 4

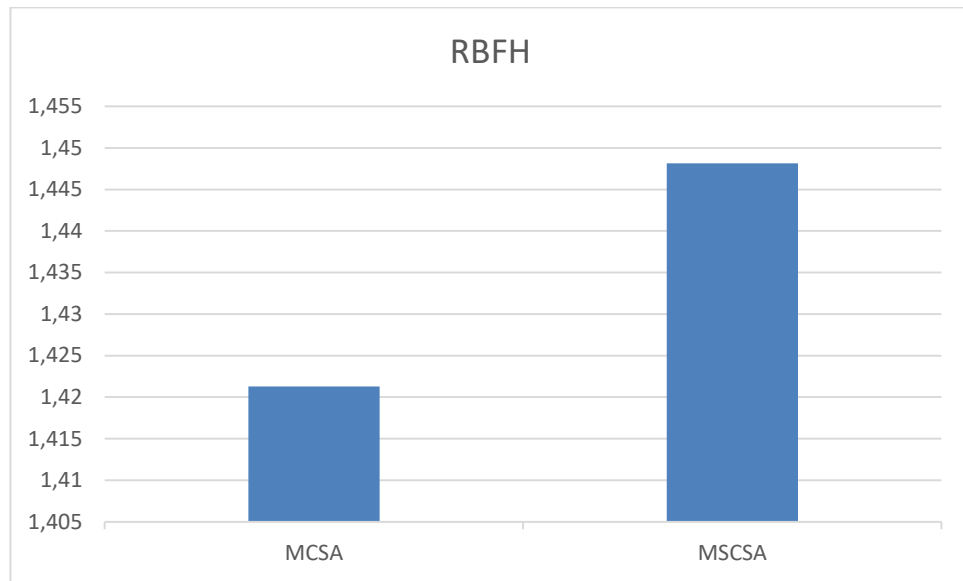


Figure III. 15 Indice partiel relatif des techniques MCSA et MSCSA par rapport aux harmoniques des Défaits de barres rotoriques (RBFH)

La Figure III.15 nous montrent la différence relative entre les amplitudes des harmoniques des défauts de barres rotoriques (RBFH) des techniques MCSA et MSCSA où

l'on note une différence positive donnée par Indice partiel relatif des technique MCSA et MSCSA par rapport aux harmoniques des défauts de barres rotoriques (RBFH) Cette différence, nous montre clairement que le MSCSA est plus sensible que MCSA par rapport aux harmoniques des défauts de barres rotoriques (RBFH) donnée par l' Indice partiel relatif

III.4.2. Deuxième méthode en utilisant l'indice (de Diagnostic) global relatif

Enfin, on retrouve les « index relatifs globaux » (GRI) qui vont nous donner une sensibilité globale pour chaque approche.

$$IGR_{AP} = \frac{IPR_{AP.TH} + IPR_{AP.RBFH}}{2} \quad (III.18)$$

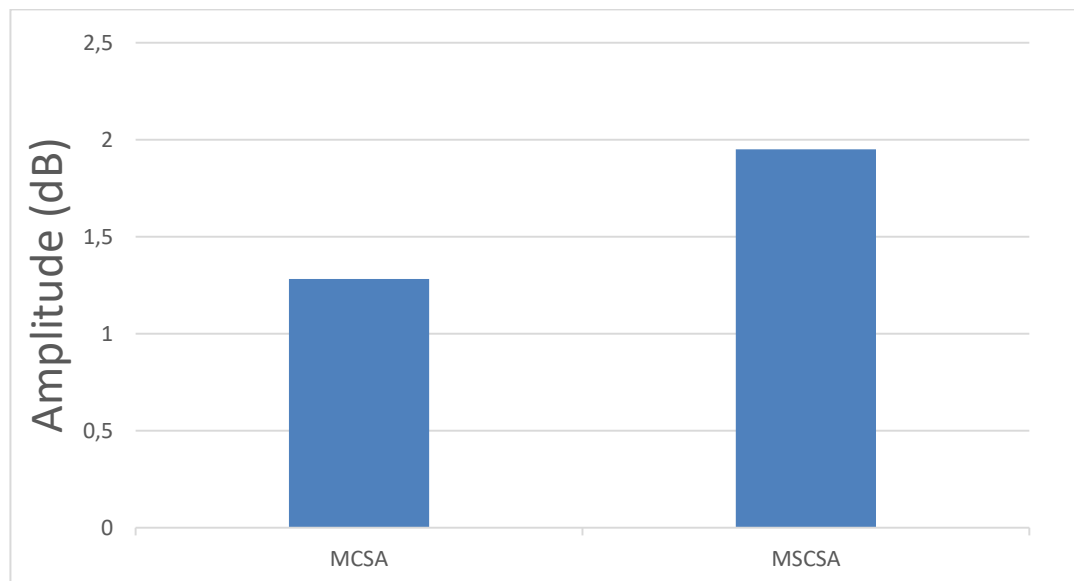


Figure III16:Indice global relatif le plus sensible de technique (TH) et (RBFH)

D'après la Figure III.16 nous remarquons que l'Indice global relatif de la technique MSCSA est plus sensible que la technique MCSA.

Cette étude nous pouvons l'utiliser pour faire un système de diagnostic automatique plus fiable en se basant sur les points fort de chaque technique de diagnostic.

III.5 Conclusion:

Dans ce chapitre, on a présenté les résultats expérimentaux et de simulation de la détection des défauts dans les moteurs asynchrones triphasés à cage. , pour différents régimes de fonctionnement sain et défectueux.

On a trouvé que la rupture d'une barre provoque une modulation de l'enveloppe du courant statorique .Les relevés spectraux sont toujours riches en harmoniques indiquant la multitude de phénomènes ou éventuellement, de problèmes définissant l'état de la machine.

Les résultats ont prouvé ce que nous avons vu dans l'étude analytique, la richesse du spectre du courant statorique en harmoniques à la présence de défaut et même à l'état sain puisque les machines ,dans le cas réel ,ne sont pas symétriques et tout à fait équilibrées et leur fabrication n'est pas parfaite .

Pour découvrir la sensibilité des techniques avancées ,nous avons fait une étude comparative entre MCSA et MSCSA en se basant sur les indices relatifs partiels pour *Time harmonics* TH et *Harmonics of Rotor Bar Fault* RBFH afin de trouver la technique la plus sensible puis nous avons appliqué l' indice relatif global qui nous donne la sensibilité moyenne des deux harmoniques.

D'après les résultats expérimentaux pour l'étude de l'indice relatifs partiels *Time harmonics* , et les résultats de simulation qui nous a donné l'indice relatifs partiels *Harmonics of Rotor Bar Fault* RBFH , nous a montré clairement que la technique MSCSA est plus sensible avec tous les indices étudiés , Ce qui nous montre clairement qu'il peut être un bon indicateur de diagnostic pour nous révéler l'état de fonctionnement de notre machine.

Cette étude est très bénéfique pour l'étude de diagnostic et nous donne une excellente analyse pour améliorer d'autres travaux de diagnostic dans cet axe de recherche . Ces résultats de simulation ou expérimentaux mettent en valeur notre étude et qui offre un ajout important dans ce domaine de diagnostic.

Conclusion générale

Conclusion générale:

À cause de leur utilisation fréquente dans diverses applications, les machines asynchrones nécessitent une détection rapide et précoce de leurs défaillances. Le travail présenté s'inscrit dans le cadre du diagnostic des défauts rotoriques dans les moteurs asynchrones triphasés à cage d'écureuil.

Au début de ce travail, nous avons rappelé les différents défauts qui peuvent affectés le bon fonctionnement de la machine asynchrone triphasée à cage, ainsi que ses origines. Puis, nous avons présenté un état de l'art des différentes techniques de surveillance des machines asynchrones.

Nous avons ensuite présenté, dans le deuxième chapitre un modèle multi-enroulements permettant la simulation d'une machine asynchrone triphasée à cage d'écureuil. Les conséquences d'une rupture de barre de la cage d'écureuil s'obtiennent très simplement, il suffit seulement d'augmenter la résistance de la barre incriminée et faire la rupture physique pour les résultats expérimentaux.

Dans le troisième chapitre, nous avons obtenu les résultats expérimentaux pour la méthode se basant sur les harmoniques de temps TH et avec des résultats de simulation avec pour la méthode se basant sur les harmoniques de défaut de barres RBFH pour fonctionnement à l'état sain et avec défaut rotorique.

Pour découvrir la sensibilité des techniques avancées ,nous avons fait une étude comparative entre MCSA et MSCSA en se basant sur :

- *Cinq harmoniques (Time harmonics)* TH pour calculer leurs indices relatifs partiels en utilisant des résultats expérimentaux .
- *Quatre (Harmonics of Rotor Bar Fault)* RBFH pour calculer leurs indices relatifs partiels en utilisant des résultats de simulation.
- L'indice relatif global qui donne la moyenne des deux indices relatifs partiels d'après les deux types d'harmoniques..

D'après les résultats , nous a montré clairement que la technique MSCSA est plus sensible avec tous les indices étudiés : indices relatif partiel des TH ou indices relatif partiel , des RBFH et indices relatif global .Ce qui nous montre clairement que la technique **MSCSA** peut être un bon indicateur de diagnostic pour nous révéler l'état de fonctionnement de notre machine.

Notre future perspective est d'étudier le diagnostic avec les méthodes d'intelligence artificiel tels que : réseaux de neurones, algorithme génétique,...pour aider l'opérateur à prendre des décisions rapide et correcte pour éviter des dégâts corporels ou économiques de l'entreprise.

Bibliographie

- [1] A. Allal, B. Chetate, High sensitivity detection of the stator short-circuit faults in induction motor using Hilbert Park's vector product. *Journal of Fundamental and, Applied Sciences*, 11(2) (2019) 994-1022.
- [2] A. Allal, B. Chetate, A new and best approach for early detection of rotor and stator faults in induction motors coupled to variable loads. *Front. Energy*, 10 (2) (2016)176–191.
- [3] A. Allal, A. Khechekhouche, Z. Driss, Induction machines diagnosis by the time's harmonics, *International journal of energetica* 5 (2) (2020), 32-36.
- [4] A. Allal and A. khachkhouché .Diagnosis of induction motor faults using the motor current normalized residual harmonic analysis method.*International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 14(2022),108219, <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2022.108219>
- [5] A. Allal, A. Khechekhouche, Z. Driss, Comparative study of advanced techniques for the diagnosis of induction motors,*Heritage and Sustainable Development* 3(1)(2021) ,16-22.
- [6] M. Naji Al Sayari .Dynamic Analysis of Cage Rotor Induction Motor Using Harmonic Field Analysis and Coupling Inductances Method, *A thesis submitted to the University of Manchester for the degree of Doctor of Philosophy in the, Faculty, of, Engineering.*
- [7] I. Ahmed, N. Ertugrul and W.L. Soong “A study on the detection of fault frequencies for Condition monitoring of induction machines” *School of Electrical and Electronic Engineering University of Adelaide, Australia.*
- [8] M.Alfredo,A.Thomas “Complex vector model of the squirrel cage induction machine Including instantaneous rotor bar currents”*Department of Electrical and computer Engineering University of Wisconsin-Madison (USA).*
- [9] Andrzej M. Trzynadlowski, Ewen Ritchie,"Comparative of Diagnostic Media for Induction Motors: *A Case of Rotor Cage IEEE Transactions Electronics*, 47(5)2000, 1092-1099.
- [10] T. Aroui ,Y. Koubaa ,A. Toumi “Application of feedforward neural network for induction machine rotor faults diagnostics using stator current”*Research Unity of Industrial Process Control (UCPI), National Engineering School of Sfax (ENIS), Sfax-Tunisia (2007).*
- [11] L. Baghli, “ Contribution à la commande de la machine asynchrone utilisation de logique floue, des réseaux de neurones et des algorithmes génétiques ” *Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy-I, (1999).*
- [12] BELHAMDI Saad “ Prise en Compte D’un Défaut Rotorique Dans la Commande d’un Moteur Asynchrone ”*Thèse de Magister, Université Mohamed Khider Biskra, Soutenue (2005).*

-
- [13] M. H. Benbouzid, "A Review of Induction Motors Signature Analysis as a Medium For Faults Detection", *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 10 (2000), 984-993.
- [14] E.L.Bonaldi,L.E.Borges da Silva,G.Lambert-Torres " Using rough sets techniques as a fault diagnosis classifier for induction motors *Electronic Engineering Department University Itajouba Brasil*.
- [15] T. Boumegora " Recherche des signatures électromagnétiques des défauts dans une machine asynchrone et synthèse d'observateurs en vue du diagnostic ". *Thèse de doctorat, Ecole centrale de Lyon, (2001)*.
- [16] Bouharket. Melek , " Etude de l'évolution des courants rotoriques d'une machine asynchrone à cage en regime dynamique ", *Thèse de Doctorat (2006),Université de Batna (Algerie)*.
- [17] Bui. Viet. Phuong "Diagnostic des machines électriques par l'analyse du champ magnetique de fuite application à l'identification de défauts rotoriques d'un alternateur à vide", *Thèse de Doctorat (2007), Institut national polytechnique de Grenoble (France)*.
- [18] R. Casimir " Diagnostic des défauts des machines asynchrones reconnaissance des formes ". *Thèse de doctorat, Ecole centrale de Lyon,(2003)*.
- [19] G. Didier " Modélisation et diagnostic de la machine asynchrone en présence de défaillances ".*Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy I, (2004)*.
- [20] Dulce F. Pires, V. Fernão. Pires, J.F. Martins , A.J. Pires " Rotor cage fault diagnosis in three-phase induction motors based on a current and virtual flux approach" *Energy Conversion and Management*50 (2009) ,1026–1032.
- [21] F. Filippetti, G. Franceschini, C. Tassoni, P. Vas, "Broken bar detection in induction machines: Comparaison between current spectrum approach and parametre estimation approach",*IEEE Industry Application Conference'94*, 95-102, Denver USA,10 (1994).
- [22] H.Hamidi ,A.R. Nasiri , F. Taringoo " Detection and isolation of mixed eccentricity in three phase induction motor viawavelet packet decomposition" *Islamic Azad University of Boroujerd*.
- [23] M. Kamel eddine Hemssas " Développement d'un nouveau modèle de la machine asynchrone pour la commande et la surveillance " *Thèse de doctorat d'état, Université Farhat abbas Sétif, (2006), Algeria*.
- [24] H. Henao " Détection des défauts de coulage dans les rotors à cage d'écureuil à l'arrêt " *J3eA, Journal sur l'enseignement des sciences et technologies de l'information et des systèmes*, 6 (2005), *Université de Picardie Jules Verne– IUP GEII France*.
- [25] Jafar Zarei , Javad Poshtan "An advanced Park's vectors approach for bearing fault detection" *Department of Electrical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tribology International*42 (2009) ,213– 219.
-

-
- [26] Jonathan. Sprooten “Finite element and electrical circuit modelling of faulty induction machines—study of internal effects and fault detection techniques-A” *thesis submitted to the Université Libre de Bruxelles(ULB)* 2007.
 - [27] A. F. Khatir, K. E. Hemsas “Diagnostic Des Machines Asynchrones :Utilisation Du Modèle Multi enroulements” *4th International Conference on Computer Integrated Manufacturing CIP’*(2007)
 - [28] Khatir.Abdelfatah “Etude comparative des modèles des MAS utilisés en diagnostic des pannes” *mémoire de Magistère , Université Ferhat Abbas-Sétif UFAS (Algérie)*,2008.
 - [29] Ghoggal. Adel : “ Diagnostic de la machine asynchrone triphasée : dédié à la détection des défauts ”*Mémoire de Magister, Université de Batna, Soutenue* (2005)
 - [30] Gojko M. Joksimovic, “The detection of inter-turn short circuits in the stator windings of operating motors” *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, 10 (2000),1078-1084.
 - [31] A.Maghraoui, A.Deboucha, “Diagnostic des défauts dans les moteurs asynchrones triphasés à cage”. *Université de Biskra (Algerie)* 2006.
 - [32] Mario El Tabach “ Détection des défauts mécaniques par analyse des signaux électriques d’alimentation ” *Université de Technologie Compiègne* 10(07)2002.
 - [33] Marcio Massakiti Kubo, Ernesto Ruppert Filho “Three-phase induction motor dynamic mathematical model considering air-gap irregularities”*International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives Vienna, Austria*, 7-9 (09)2005.
 - [34] Arezki Menacer Mohamed-Saïd Naït-Saïd A/Hamid Benakcha Saïd Drid “Stator current analysis of incipient fault into asynchronous motor rotor bars using fourier fast transform” *Journal of Electrical Engineering*, 5-6, (2004), 122-130.
 - [35] Mohamed Boucherma , Mohamed Yazid Kaikaa Abdelmalek Khezzar “Park model of squirrel cage induction machine including space harmonics effects” *Journal of Electrical Engineering*, (2006) ,193–199.
 - [36] Mohammed Zeki Khedher , “ Knowledge based diagnosis of faults in induction motors ”*Jordan University, Knowledge Based Industries & Nanotechnology Conference Doha – Qatar* 11 – 12 (02) 2008.
 - [37] Raphaël Romary, Delphine Thailly , Jean-François Brudny, Amine Yazidi,Humberto Henao, Gérard-André Capolino, Pierre Suau, “ Diagnostic de machines électriques par analyse du champ magnétique de dispersion ” *Deux laboratoires ont pris part à ces travaux: le LSEE de l’Université d’Artois et le CREA de l’Université Picardie Jules Verne*.12(2006),49-62.
 - [38] Randy Supangat, Nesimi Ertugrul, Wen L. Soong, Douglas A. Gray, Colin Hansen and Jason Grieger “Broken rotor bar fault detection in induction motors using starting current analysis” *School of Electrical and Electronic Engineering, University of Adelaide, Australia*.
 - [39] H. Razik “le contenu spectral du courant absorbe par la machine asynchrone en cas de défaillance ”. 48-52, 29(06) 2002.
 - [40] H. Razik, G. Didier “ notes de cours sur le diagnostic de la machine asynchrone ”.*Université Henri Poincaré, Nancy-I*, 7(1) 2003.
 - [41] E. Schaeffer “ Diagnostic des machines asynchrones : modèles et outils paramétriques dédiés à la simulation et à la détection de défaut ”. *Thèse de doctorat, Université De Nantes* (1999).
-

-
- [42] Sahraoui.Mohamed “Contribution aux diagnostics des machines asynchrones triphasées à cage ”*Université Mohamed Khider Biskra*, 10(2003).
 - [43] M. Sahraoui , A. Ghoggal, S.E. Zouzou, M.E. Benbouzid “Dynamic eccentricity in squirrel cage induction motors – Simulation and analytical study of its spectral signatures on stator currents” *Laboratoire de Génie Electrique de Biskra (LGEB), University of Biskra, BP 145 Biskra, Algeria*.**Journal homepage: www.elsevier.com/locate/simpat**.
 - [44] Samir Hamdani, Omar Touhami, Rachid Ibtouen, “A Generalized Two Axes Model of a Squirrel-Cage Induction Motor for Rotor Fault Diagnosis”*Serbian Journal of Electrical* (05)2008, 155-170.
 - [45] Ali S. Al-Shahrani “Influence of adjustable speed drive on induction motor fault detection using stator current monitoring” *Thesis, Oregon State University*,(2006).
 - [46] S. Bachir “ Contribution au diagnostic de la machine asynchrone par estimation paramétrique ”. *Thèse de doctorat, Université de Poitiers*, (2002).
 - [47] Subhasis Nandi , Hamid A. Toliyat “Condition monitoring and fault diagnosis of electric machinery- A Review” *Advanced Electric Machines & Power Electronics Laboratory Department of Electrical Engineering, Texas A&M University (USA)* 1999, 1-8.
 - [48] SZABÓ Loránd , DOBAI Jenő Barna , BIRÓ Károly Ágoston “Rotor faults detection in squirrel-cage induction motors by current signature analysis”2004 *IEEE-TTTC - International Conference on Automation Quality and Testing, Robotics* (05) 13 – 15, 2004, *Cluj-Napoca,Romania* ,1-6.
 - [49] G. Didier, E. Ternisien†, O. Caspary, and H. Razik “Fault detection of broken rotor bars in induction motor using a global fault index ” *Groupe de Recherche en Electrotechnique et Electronique de Nancy, Université Henri Poincaré*-(2004).
 - [50] Thanis SribovornmongkolIn “Evaluation of motor online diagnosis by FEM simulations” *Master’s Thesis Electrical Machines and Power Electronics School of Electrical Engineering Royal Institute of Technology Stockholm*,(2006)
 - [51] Hamid A.Toliyat,Thomas A.Lipo, J.Coleman White “ Analysis of a concentrated winding machine for adjustable speed drive applications part 1(motor analysis)” *IEEE Transactions on Energy conversion* ,(12)1991,679-683
 - [52] Dr. Hamid A. Toliyat “Condition monitoring and fault diagnosis of electric machinery” *Advanced Electric Machines & Power Electronics Laboratory Department of Electrical Engineering, Texas a & M University (USA)* (2002).
 - [53] Voitto. Kokko, “Condition monitoring of squirrel-cage motors by axial magnetic flux measurements” *Department of Electrical Engineering, Optoelectronics and Measurement Techniques Laboratory, University of* (08)2003.
 - [54] Zebri.Fouad,Mehamelle.Houcine “ Detection et localisation des défauts de la machine asynchrone à double stator application de la technique l’intelligence artificielle”*Université de Biskra (Algerie)*.
-

Nous soussignons les étudiants de ce mémoire

NAKES Ayman

BEN AMOR Sabek

TAHRAOUI Abderazek

GHENDIR MABRUOK Ramzi

que tous les résultats sont obtenus avec l'aide de l'encadreur : **Allal Abderrahim**

Pour cela, notre encadreur peut utiliser ses résultats dans n'importe quel domaine