

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



Université Echahid Hamma Lakhder d'El-Oued

Faculté de Technologie



Mémoire de Fin d'Étude
En vue de l'obtention du diplôme de
MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologie

Filière: Electrotechnique

Spécialité: Machines électriques

Mémoire

Diagnostic des défauts rotoriques
des machines asynchrones
(Résultats expérimentaux et de simulation)

Réalisé par:

☆ *LABIOD LAID*

☆ *BOUTADJINE FARES*

Encadré par:

Dr: ALLAL ABDERRAHIM

Soutenu en Juin 2019

Dédicaces

Je dédie ce fruit de travail :

À ma mère et à mon père qui ont tout le credit

À mes frères et toute la famille.

À tous les amis.

À tous mes professeurs

À tous mes collègues et régiment spécial

«machines électriques».

À vous tous un grand merci.

À mon binôme <<FARES>> que je remercie pour

avoir partagé avec moi ces moments pour la

réalisation de ce modeste travail et j'espère en

garder de très bons souvenirs.

Laid

Dédicaces

Je dédie ce fruit de travail :

À ma mère et à mon père qui ont tout le credit

À mes frères et toute la famille.

À tous les amis.

À tous mes professeurs

À tous mes collègues et régiment spécial

«machines électriques».

À vous tous un grand merci.

À mon binôme <<LAÏD>> que je remercie pour

avoir partagé avec moi ces moments pour la

réalisation de ce modeste travail et j'espère en

garder de très bons souvenirs.

Fares

Remerciement

*Notre premier Remerciement va à Allah Soubhanhou
watahala.*

*Nous tenions à remercier vivement notre encadreur,
Monsieur "Allal Abderrahim",
pour sa gentillesse, sa disponibilité et sa contribution
générale à l'élaboration
de ce travail.*

*Nous souhaiterons également remercier nos enseignants
de la faculté de la technologie*

*Enfin, nous adressons nos plus sincères remerciements
à tous nos proches et amis qui nous ont toujours
soutenu et encouragé pour la réalisation de ce mémoire.*

NOTATION ET SYMBOLES

N_s : nombre de spires statoriques par phase.

N_r : nombre de barres rotorique.

n : entier naturel.

$F.m.m$: force manitomotrice.

e : l'épaisseur de l'entrefer [m].

f_s : fréquence d'alimentation [Hz].

l : longueur active du circuit magnétique [m].

L_{sp} : L'inductance principale(magnétisante) de la phase "n" statorique [H].

L_{rp} : L'inductance principale d'une boucle rotorique

L_{rr} : L'inductance totale de la $k^{ème}$ maille rotorique

L_b : inductance d'une barre rotorique [H].

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

P : nombre de paires de pôles

I_s : courant d'une phase statorique

B_{max} : l'induction maximale dans l'entrefer

$\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$: perméabilité magnétique du vide [H.m⁻¹]

Φ_s : le flux magnétique dans l'entrefer. Par pôles

Ψ_{sa} : flux principale de l'enroulement statorique

Φ_{fs} : Le flux de fuite

L_{sc} : inductance cyclique [H].

M_s : L'inductance mutuelle entre phases statoriques

I_{rk} :courant dans la boucle rotorique [A] , $k=1, \dots, N_r$

B_k :induction magnétique dans l'entrefer produit par une maille rotorique ((k))

Φ_{rpk} : flux propre de la maille k.

Φ_{rjpk} : le flux traversant la $j^{\text{ème}}$ maille produit par le courant i_{rk} circulant dans la maille k

M_{rr} : L'inductance mutuelle entre mailles rotoriques non adjacentes

$L_{(k+1)k}$: L'inductance mutuelle entre la $4^{\text{ème}}$ maille et les mailles adjacentes

B_{msr} : L'induction produite par la bobine de la phase « n » dans la $4^{\text{ème}}$ maille rotorique

Φ_{rka} : Le flux traversant la maille k ,

M_{rka} : L'inductance mutuelle entre la phase « a » du stator et la maille rotorique

a : l'angle électrique entre deux mailles rotoriques .

$[V_{abc}]$: vecteur de tensions statoriques.

$[I_{abc}]$: vecteur de courants statoriques.

$[I_{rk}]$: vecteur de courants dans les mailles rotoriques.

$[\Phi_{abc}]$: vecteur de flux statoriques.

$[R_s]$: matrice des résistances statoriques.

$[L_s]$: La matrice d'inductance statorique

$[M_{sr}]$: Les inductances mutuelles entre phases statorique et maille rotorique

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

I_{bk} : courant de barre [A].

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

Φ_{rk} : Le flux totalisé pour un circuit élémentaire k

$[V]$: le vecteur global des tension $((Nr+4) \times 1)$

$[I]$: le vecteur global des courants $((Nr+4) \times 1)$,

$[I]$: La matrice globale des résistances

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

$[L]$: La matrice globale des inductances

$[L_r]$: La matrice des inductances rotoriques

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

C_r : couple de charge.

P_e : La puissance absorbée de la machine asynchrone

P_j : La puissance dissipée en pertes joules.

P_v : La puissance d'énergie électromagnétique.

P_m : La puissance mécanique.

C_e : couple électromagnétique[N. m].

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

s, r : indices stator et rotor respectivement.

V_{abc} : les tensions statorique [V].

ϕ_{abc} : les flux statorique [wb].

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

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

θ_r : position du rotor [rd].

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

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

r : rayant moyen de l'entrefer.

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

R_r : résistance de l'enroulement rotorique [Ω].

R_s : résistance de l'enroulement statorique [Ω].

r_s : résistance d'une phase statorique [Ω].

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

J : moment d'inertie [Kg.m²].

K_0 : coefficient de frottement.

ω_r : vitesse de rotation mécanique.

P: opérateur de Laplace.

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

g : glissement.

f_{cc} : fréquence de court-circuit ;

f_{bc} : fréquence de barre cassé.

f_{exc} = Fréquence d'excentricité

R=nombre d'encoches au rotor,

f_c :caractéristiques fréquences

f_{roul} : la fréquence des défauts de roulement reflétés dans le courant du stator

D_C :Diamètre du palier

D_b :Diamètre de la bille (Ball).

β : angle de contact de la bille avec la cage

f_{rot} : fréquence de rotation mécanique du rotor

n_b = nombre de billes ;

MAS : Machine asynchrone.

FFT : transformation de fourie rapide

LISTE DES FIGURES

Chapitre I		
Figure I.1	Eléments de constitution d'un moteur asynchrone à cage d'écureuil utilisé pour avoir les résultats expérimentaux dans le laboratoire de la faculté Technologie (Université d' El Oued).	3
Figure I.2	La répartition des pannes.	4
Figure I.3	Représentation des différents défauts statoriques possible	5
Figure I.4	Cassure des barres	6
Figure I.5	Les cassures de barres et de portions d'anneaux des cages dans le laboratoire de la faculté Technologie (Université d' El Oued).	7
Figure I.6	Représentation de l'excentricité statique, dynamique et mixte	8
Figure I.7	Dimensions du roulement à bille.	10
Figure I.8	Les différents grandeurs de diagnostic dans une machine	13
Figure I.9	Bobine exploratrice pour la mesure du flux de fuite axial.	16
Figure I.10	Système d'alimentation d'une machine asynchrone par convertisseur avec neutre sorti .	17
Figure I.11	schéma synoptique du principe de la méthode du spectre du courant statorique.	18
Figure I.12	Schéma synoptique du principe de la méthode du spectre du courant statorique utilisé pour avoir les résultats expérimentaux dans le laboratoire de la faculté Technologie (Université d' El Oued).	19
Chapitre II		
Figure II.1	Structure du rotor.	22
Figure II.2	Structure électrique du rotor	23
Figure II.3	Induction magnétique produite par une maille du rotor	25
Figure II.4	Schéma équivalent de la cage rotorique	26

Figure II.5	flux mutuel- phase statorique –boucle rotorique	28
Figure II.6	Schéma équivalent des mailles rotorique.	31
Figure II.7	Transformation de PARK (a, b, c) à (d, q)	35
Figure II.8	Schéma équivalent de la cage rotorique. (a). état sain. (b). avec une barre rompue	41

Chapitre III

Figure III.1	Evolution des grandeurs électriques et électromécaniques pour un moteur à l'état sain	44
Figure III.2	Evolution des grandeurs électromécaniques pour un moteur à l'état sain charge par un couple résistant nominal à l'instant $t = 1$ [s].	45
Figure III.3	Caractéristique mécanique (sain).	46
Figure III.4	Evolution des grandeurs électriques, mécanique et électromécanique pour un moteur avec défaut rotorique	47
Figure III.5	Caractéristique mécanique (défaut rotorique).	48
Figure III.6	Installation expérimentale pour (a) un moteur sain de 3kW; (b) Le moteur de cassures de trois barres et de portions d'anneaux des résultats expérimentaux relative au courant statorique dans le laboratoire de la faculté Technologie (Université d' El Oued).	48
Figure III.7	Courant statorique sain.	49
Figure III.8	Courant statorique, défaut rotorique.	50

Chapitre IV

Figure IV.1	Spectre de simulation du courant statorique (Etat sain).	58
Figure IV.2	Spectre de simulation logarithmique du courant statorique (Etat sain).	58
Figure IV.3	Spectre expérimental du courant statorique (Etat sain).	58
Figure IV.4	Spectre de simulation du courant statorique (défaut rotorique).	59
Figure IV.5	Spectre de simulation logarithmique du courant statorique (défaut rotorique).	59
Figure IV.6	Spectre expérimental du courant statorique (défaut rotorique).	59
Figure	Principe de fonctionnement du diagnostic par l'approche signal dans le	60

IV.7	domaine fréquentiel. Le comportement de l'harmonique du courant $I(f_{\text{defaut}})$ est surveillé afin de détecter la présence du défaut associé[15].	
Figure IV.8	Spectre expérimental du courant statorique avec ses harmoniques (Etat sain) -0-500Hz-0Nm	60
Figure IV.9	Spectre expérimental du courant statorique avec ses harmoniques (Etat sain) -0-750Hz-0Nm	61
Figure IV.10	Spectre expérimental du courant statorique avec ses harmoniques (défaut rotorique) -0-500Hz-0Nm.	61
Figure IV.11	Spectre expérimental du courant statorique avec ses harmoniques (défaut rotorique) 0-1000Hz-0Nm..	62
Figure IV.12	Spectre expérimental du courant statorique avec ses harmoniques (défaut rotorique) 0-1200Hz-0Nm..	62
Figure IV.13	Représentation relative de harmoniques	63

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre II		
Tableau II.1	Tableau récapitulatif de toutes les inductances de la machine asynchrone à cage	29
Chapitre IV		
Tableau IV.1	Expression générale des différentes harmoniques du courant statorique	55

Sommaire

Remerciement

Dédicaces

Notations et symboles

Liste des Figures

Liste des tableaux

Introduction générale.....1

Chapitre I

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

1-Introduction.....	3
2-Constitution de la machine asynchrone à cage.....	3
3-Causes des défauts.....	4
3-1-Défauts statoriques	4
3-2-Défauts rotorique	4
4-Différents défauts dans la machine asynchrone a cage.....	5
4-1- Défauts statoriques.....	5
4-2- Défauts rotorique.....	6
4-2-1-Cassure des barres.....	6
4-2-2- Les cassures de barres et de portions d'anneaux des cages.....	7
4-2-3-Défaut d'excentricité	7
4-2-4-Défaut dû au palier.....	9
5-Conséquences des défauts.....	11
6-Méthodes de diagnostic.....	11
6-1-Méthodes externes.....	12
6-2-Méthodes internes.....	12
6-3-Méthodes inductives.....	13
6-4-Méthodes déductives.....	13

7-Différentes méthodes de diagnostic.....	13
7-1-Techniques mécaniques.....	14
7-1-1-diagnostic par mesure de la température.....	14
7-1-2-Diagnostic par mesure des vibrations.....	14
7-2-Diagnostic chimiques.....	15
7-3-Techniques magnétiques et électriques.....	15
7-3-1-Diagnostic par mesure du flux magnétique axial de	15
7-3-2- Diagnostic par l'analyse des tensions statoriques induites.....	16
7-3-3- Diagnostic par l'analyse du couple électromagnétique.....	16
7-3-4- Diagnostic par l'analyse de la puissance instantanée.....	16
7-3-5- Diagnostic par l'analyse de la tension de neutre.....	17
7-3-6-Diagnostic par l'analyse du courant statorique	18
8-Modèle de la machine asynchrone à cage.....	19
8-1-Approche analytique.....	19
8-2-Approche numérique.....	20
9-conclusion	20

Chapitre II

Modèle multi enroulement de la machine asynchrone

1-Introduction	21
2-modèle multi enroulement d'une machine asynchrone	21
2-1- Hypothèses simplificatrices.....	22
2-2-Calcul des inductances.....	23
2-2-1-Partie Statorique.....	23
2-2-2-Partie Rotorique.....	25
2-2-3-Mutuelle inductances entre roulements stator et rotor.....	27
3-mise en equation.....	29
3-1-Equations statorique.....	30
3-2-Equations rotorique.....	31
3-3-Equation d'état de la machine.....	32
3-4-Transformation de PARK.....	35

3-5-Equation mécanique.....	39
4-Prise en compte du défaut dans le modèle.....	40
5-Conclusion.....	42

Chapitre III

Résultats expérimentaux et de simulation des grandeurs temporelles

1-Introduction.....	43
2-Résultat de simulation de la machine asynchrone.....	43
2-1- Résultats de simulation d'un fonctionnement sain.....	43
2-1-1- cas d'un fonctionnement a vid.....	44
2-1-2- cas d'un fonctionnement charge	45
2-2- Résultats de simulation d'un fonctionnement avec défaut rotorique...	46
4-Résultats expérimentaux de courant statorique.....	48
4-1 Cas d'une machine saine.....	49
4-2-Cas d'une machine avec défaut rotorique	50
5-Interprétation des résultats expérimentaux.....	50
6-Conclusion.....	51

Chapitre IV

Analyse spectrale du courant statorique avec les harmoniques du temps

1-Introduction.....	52
2-Théorie générale sur les harmoniques de la MAS	52
2-1--Etude du courant de stator avec ses harmoniques	54
3-analyse du spectre MCSA.....	56
3-1- Défaut de rupture de barres rotoriques.....	56
4- Résultats de simulation et expérimentaux de l'analyse spectrale.....	58
4-1-1- Spectre du courant statorique (Etat sain).....	58
4-1-2- Spectre du courant statorique (défaut rotorique)	59
4-2- Résultats expérimental de l'analyse spectrale de courant statorique avec les harmoniques du temps.....	60

4-2-1- Cas d'une machine saine.....	60
4-2-1-1-Cas d'une machine saine 0-500Hz-marche à vide 0nm.....	60
4-2-1-2-Cas d'une machine saine 0-750Hz- marche à vide 0nm.....	61
4-2-2-Cas d'une machine avec des défauts rotorique.....	61
4-2-2-1-Cas d'une machine avec des défauts rotorique 0-500Hz- marche à vide 0nm..	61
4-2-2-2-Cas d'une machine avec des défauts rotorique 0-1000Hz- marche à vide 0nm..	62
4-2-2-3-Cas d'une machine avec des défauts rotorique 0-1200Hz- marche à vide 0nm..	62
5-pourcentage des harmoniques des tempes.....	63
6- Interprétations.....	63
7-Conclusion.....	64
Conclusion générale.....	65
Bibliographies	
Résumé	
Annexes	

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 [19].

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 machines électriques, un certain nombre de contraintes de différentes natures (thermique, électrique, mécanique et d'environnement) peuvent affecter 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 [17].

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

Bien que déjà présents dans d'autres domaines, et parmi les différentes techniques de diagnostic, l'analyse spectrale, les réseaux de neurones et la logique floue constituent des nouvelles techniques dans le domaine de diagnostic.

Nous avons voulu savoir quel pourrait être l'apport de ces techniques appliquées à la surveillance d'un système fortement non linéaire, qu'est la machine asynchrone à cage.

Il est évidemment impossible de cerner toutes les possibilités et les combinaisons où peuvent intervenir ces techniques. Nous examinerons plus précisément le problème de détection, ainsi que la localisation de quelques défauts.

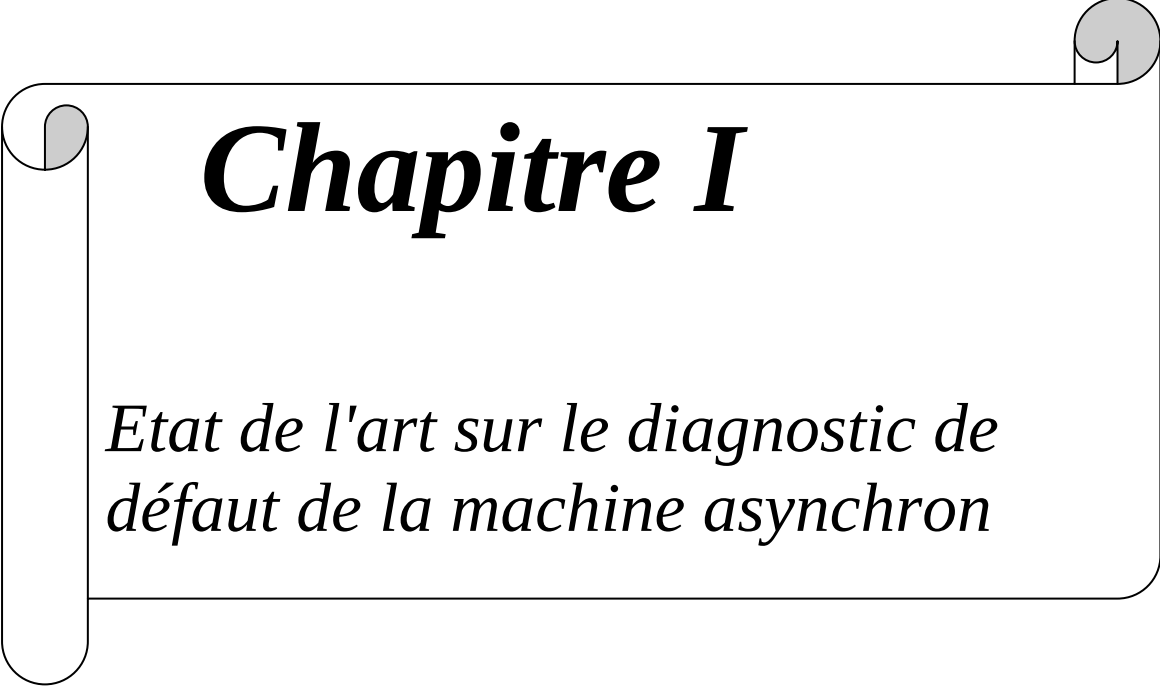
Le présent travail s'inscrit dans le cadre de la surveillance des machines asynchrones triphasées à cage. Nous sommes intéressées, particulièrement aux défauts qui peuvent apparaître au niveau du rotor.

Le mémoire comporte quatre chapitres. Dans le premier chapitre, on présente les causes et les natures des différents défauts et aussi les méthodes de diagnostic et le modèle de la machine asynchrone, dans un moteur à cage d'écureuil.

Le deuxième chapitre consacré à la présentation du modèle de simulation. Nous utilisons un modèle multi-enroulement de la machine asynchrone triphasée à cage pour analyser le comportement de la machine en absence et en présence de défaillances.

Dans le troisième chapitre, nous présenterons les résultats de simulation du moteur asynchrone, dans les différentes conditions de fonctionnement, (avec et sans défaut). Nous montrerons les effets des cassures de barres et de portions d'anneaux sur les différentes grandeurs électriques et électromécaniques de la machine.

Dans le quatrième chapitre, nous présenterons l'analyse spectrale du courant statorique avec ses harmoniques du temps à l'aide de la transformée de Fourier rapide (FFT).

A decorative graphic of a scroll with a light gray background and a black border. The scroll is partially unrolled, with the top and bottom edges showing a darker gray shadow. The text is centered on the scroll.

Chapitre I

*Etat de l'art sur le diagnostic de
défaut de la machine asynchrone*

1-Introduction :

Les moteurs asynchrones à rotor à cage d'écureuil sont largement utilisés dans de nombreux processus industriels et jouent un rôle important dans diverses industries de traitement.... Malgré leur faible coût, du point de vue de la fiabilité et de la robustesse, les moteurs asynchrones sont sujets aux pannes. des environnements difficiles et des conditions de fonctionnement incorrectes ou des défauts de fabrication. Si non identifié à temps [1].

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 dédiés au diagnostic des défauts rotoriques qui sera effectué.

2-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 [2] ,.

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

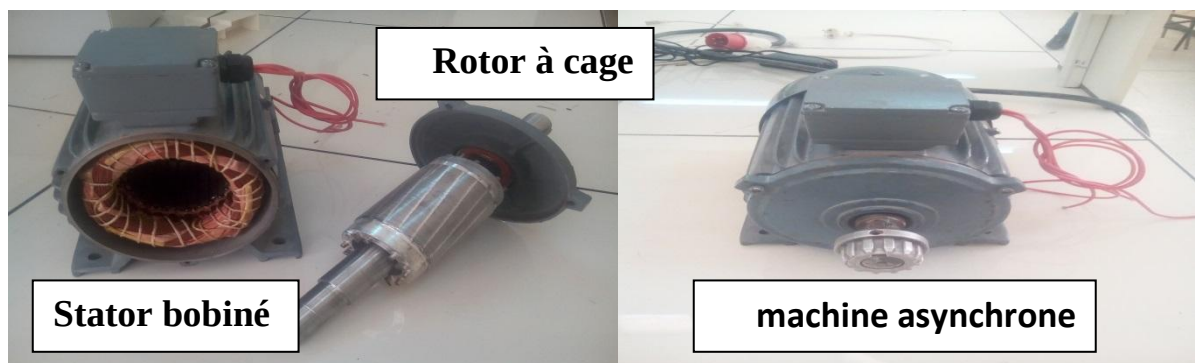


Figure 1.1: Eléments de constitution d'une moteur asynchrone à cage d'écureuil utilisé pour avoir les résultats expérimentaux dans le laboratoire de la faculté de technologie (Université d' El Oued).

3-Causes des défauts :

Les causes des défauts au stator et au rotor sont multiples [3], les plus fréquentes d'entre eux sont énumérées ci-dessous

3-1-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.

3-2-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.

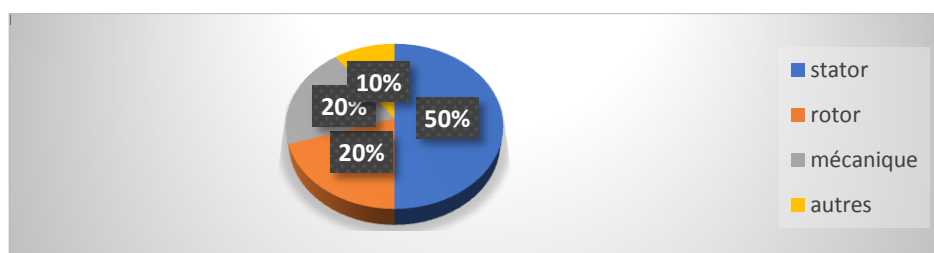


Figure 1.2: La répartition des pannes [17].

4-Différents défauts dans la machine asynchrone à cage :

4-1-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 courts-circuits 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 [4] :

$$f_{cc} = f_s \left\{ \frac{n}{p} (1 - g) \mp k \right\}$$

Où

f_{cc} : fréquence de court-circuit ;

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

p = nombre de paires de pôles ;

g = glissement ;

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

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

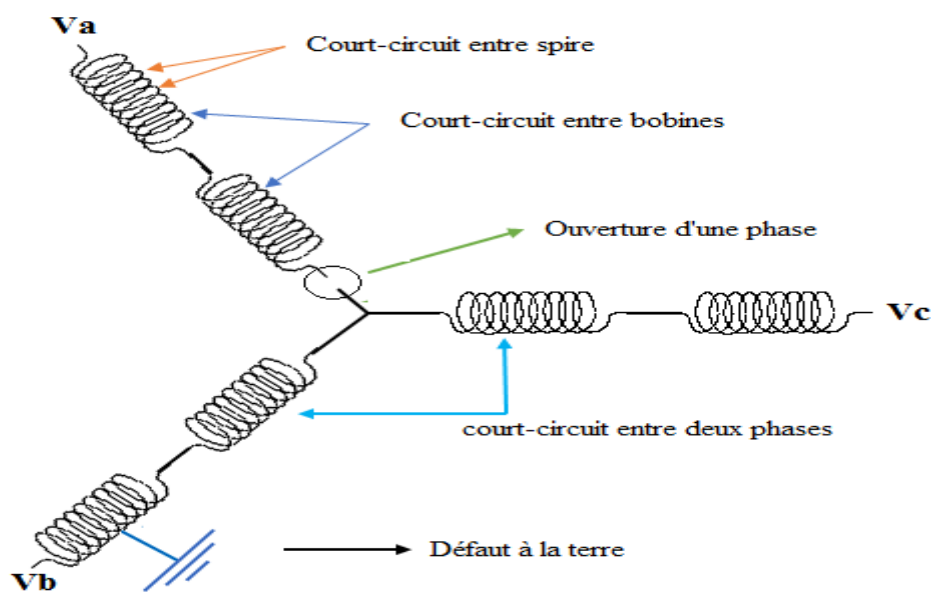


Figure I.3: Représentation des différents défauts statoriques possible

4-2-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 [6] [7].

4-2-1-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 [8].

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 fautive informations connexes des signaux de courant du stator [5].

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 [9] :

$$f_{bc} = (1 \mp 2kg)f_s$$

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[9].

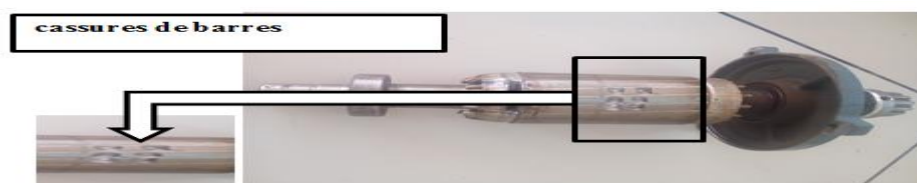


Figure I.4: Cassure de barres.

4-2-2-Les 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 [26]



Figure I.5: Cassures de barres et de portions d'anneaux (laboratoire de la faculté de technologie- université d' El Oued).

4-2-3-Défaut d'excentricité [7]:

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

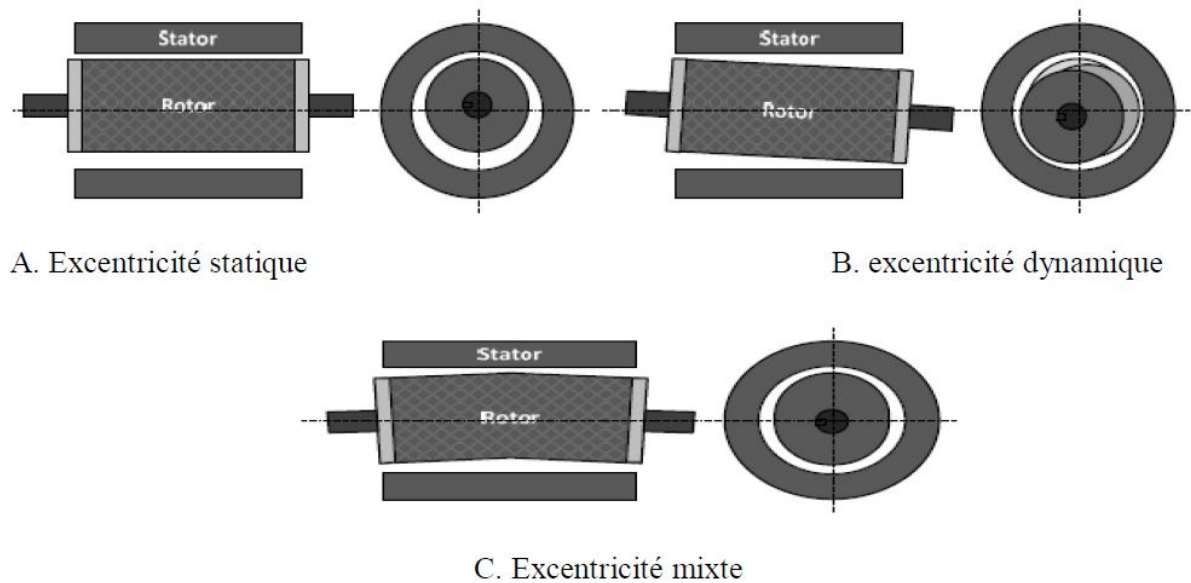


Figure I.6: Représentation de l'excentricité statique, dynamique et mixte [16].

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 :

$$f_{exc} = f_s \left(1 \mp k \cdot \frac{(1-g)}{p} \right) \quad (\text{Hz})$$

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.

$$f_{exc} = f_s \left(n_{ws} \mp (kR \mp n_d) \cdot \left(\frac{1-g}{p} \right) \right) \quad (Hz)$$

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.

4-2-4-Défaut dû au palier :

Les études permettent de classer le défaut de roulement à bille comme suivant [10] :

- 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 [10] [11]:

$$f_{roul} = |f_s \mp k f_c|$$

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 $k = 1$.

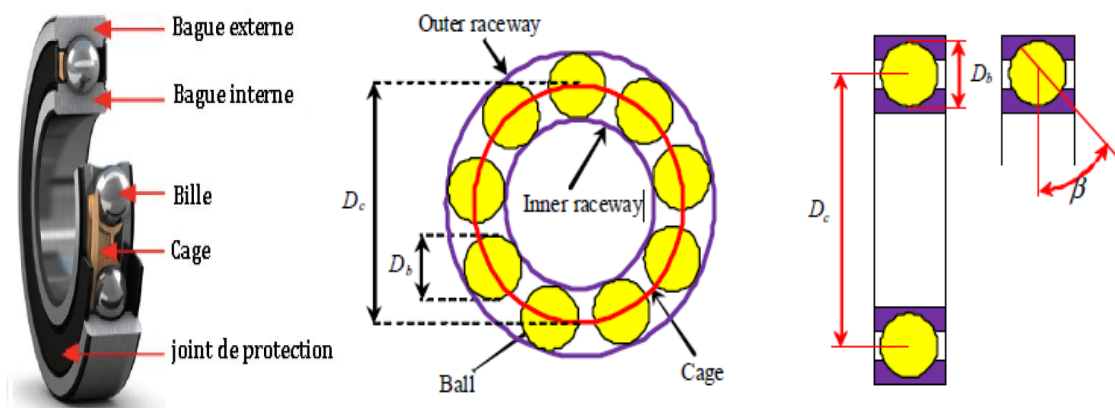


Figure I.7: Dimensions du roulement à bille [11], [16].

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 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.6), f_c prend les expressions suivantes [11] :

• **Défaut sur la bague extérieure :**

$$f_{b.ext} = f_0 = \frac{n_b}{2} f_{rot} \left[1 - \frac{D_b}{D_c} \cos(\beta) \right]$$

• **Défaut sur la bague intérieure :**

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

• **Défaut au niveau d'une bille :**

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

Où :

- D_c :Diamètre du palier
- D_b :Diamètre de la bille (Ball).
- β : angle de contact de la bille avec la cage
- f_{rot} : fréquence de rotation mécanique du rotor
- n_b = nombre de billes ;

5-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.

6-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 [14] :

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

6-1-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 [12] :

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

6-2-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[12].

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.

6-3-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 [13].

6-4-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 [13].

7-Différentes méthodes de diagnostic [17]:

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) (Figure 7.1) .

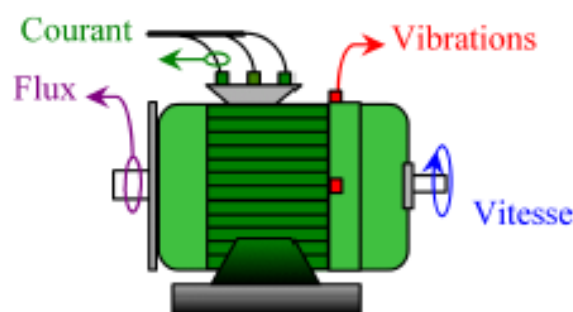


Figure I.8: Différents grandeurs de diagnostic dans une machine[17].

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

7-1-Techniques mécaniques :

Parmi ces techniques, on trouve :

7-1-1-Diagnostic par mesure de la température [10]:

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 résistante 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.

7-1-2-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 [17].

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 [16].

7-2-Diagnostic chimique [17]:

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.

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.

7-3-Techniques magnétiques et électriques :

7-3-1-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 [16].

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[17].

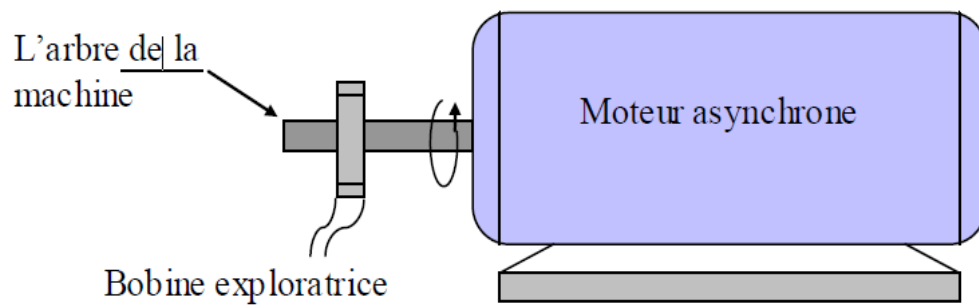


Figure I.9: Bobine exploratrice pour la mesure du flux de fuite axial [17].

7-3-2-Diagnostic par l'analyse des tensions statoriques induites [16].

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.

7-3-3-Diagnostic par l'analyse du couple électromagnétique [16].

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.

7-3-4-Diagnostic par l'analyse de la puissance instantanée [16].

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

7-3-5-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 [16].

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.10). 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 [23].

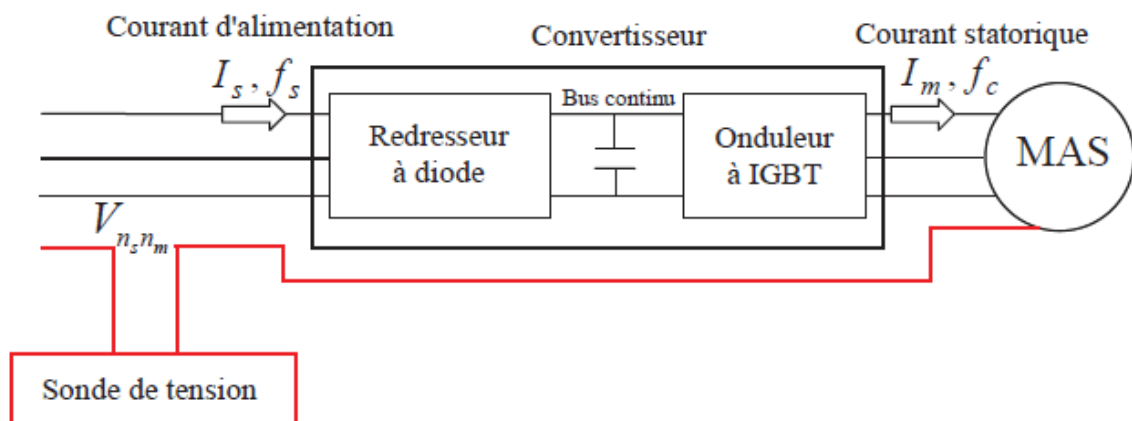


Figure I.10: Système d'alimentation d'une machine asynchrone par convertisseur avec neutre sorti [23].

Les composants harmoniques avec leurs fréquences relatives fh (RBPF= $n_b f_r$ (Rotor Bar Pass Frequency)) sont de nouveau donnés par :

$$f_{sh} = [3h - (3h - 1)s \mp 2ks]f_c$$

Avec :

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

$$k=0,1,2..$$

7-3-6-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[11].

Dans le cas d'une répartition non sinusoïdale de la Fmm en plus du fondamental apparaît des harmoniques de l'encoche rotorique, cas d'un moteur à cage [17].

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 (f_s), 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.11).

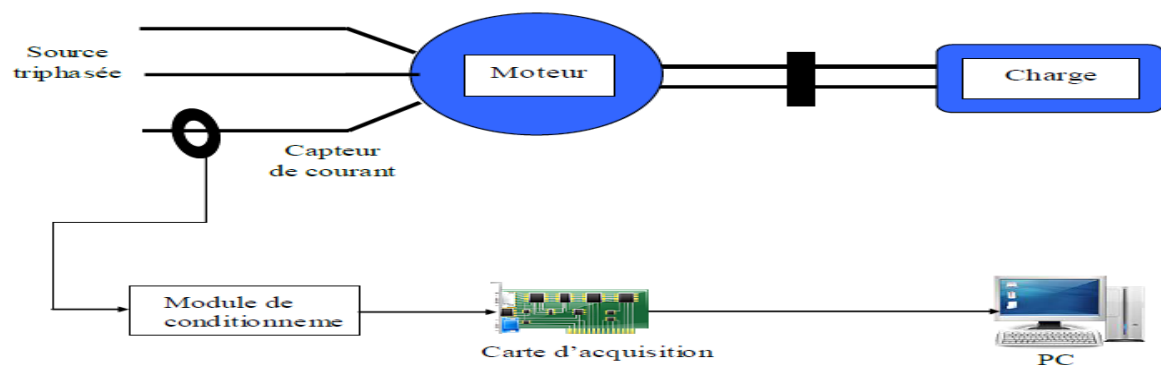


Figure I.11 schéma synoptique du principe de la méthode du spectre du courant statorique [10].

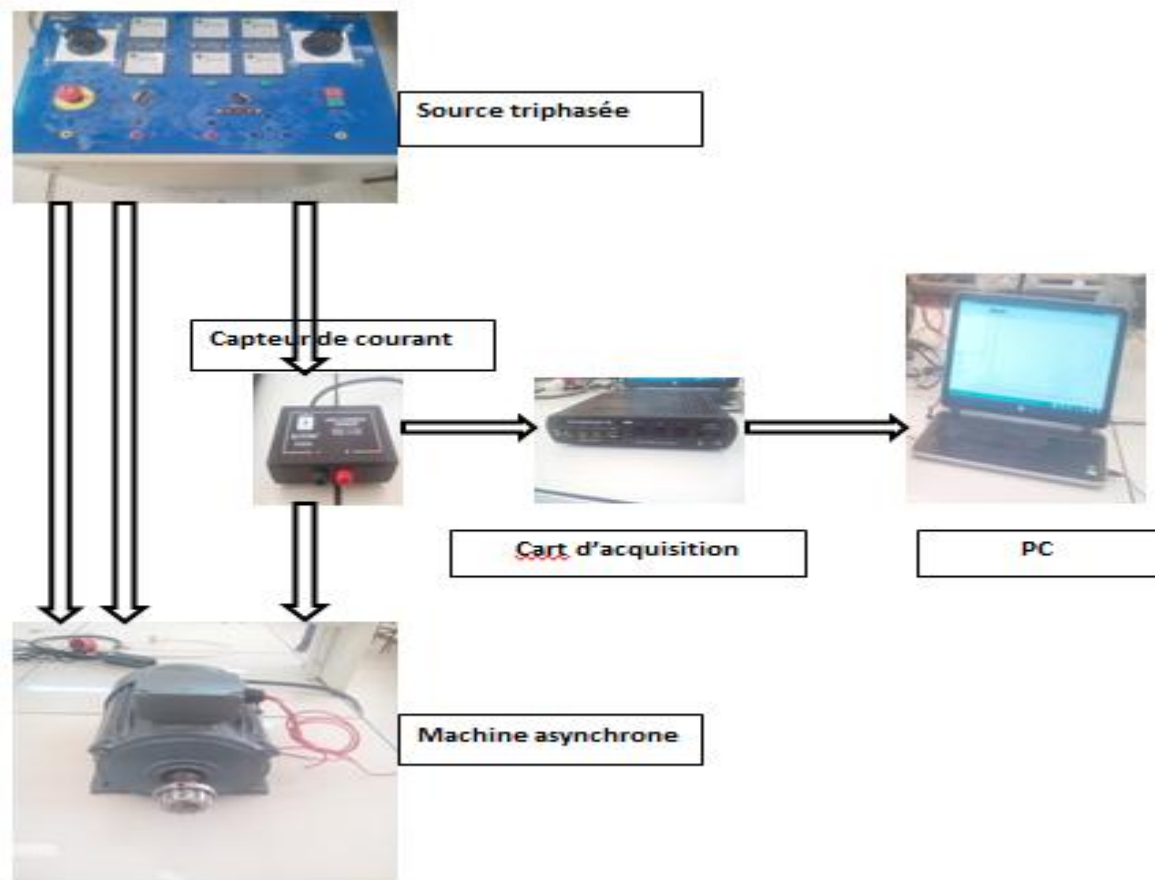


Figure I.12: Schéma synoptique du principe de la méthode du spectre du courant statorique utilisé pour avoir les résultats expérimentaux dans le laboratoire de la faculté de la technologie (Université d' El Oued).

8-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 cite [17] , [12] :

8-1-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 [17] .

8-2-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 [12].

- **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.

9-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 .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

*Modèle multi enroulement de
la machine asynchrone*

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 [18].

Les modèles simples (dq), 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 [9].

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 [20].

2-Modèle multi enroulement d'une machine asynchrone :

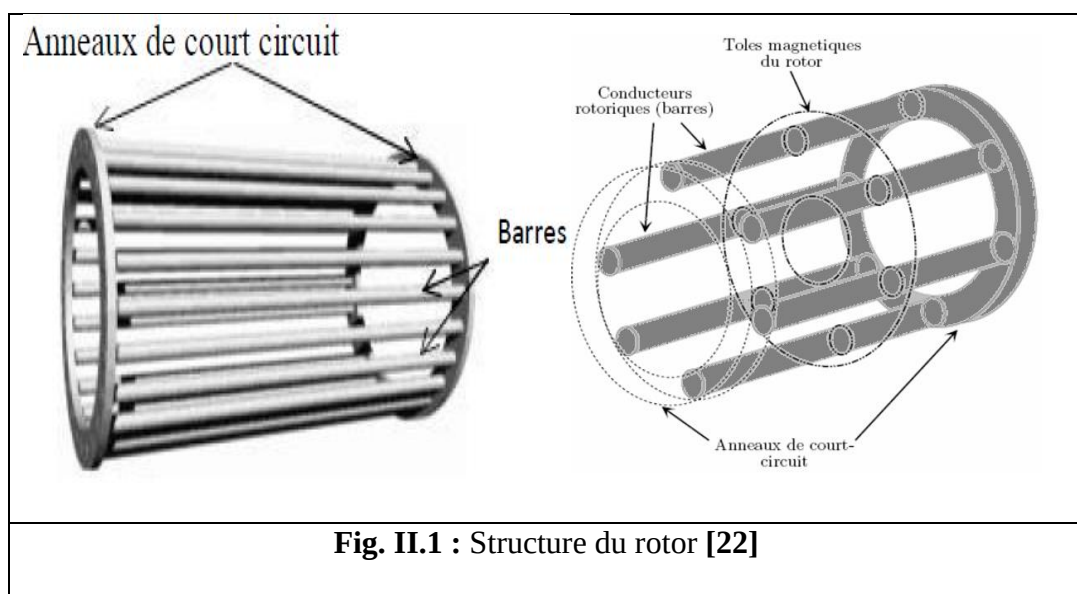
L'objectif est de procéder à un développement d'un modèle de la machine asynchrone qui mette en évidence l'influence des défauts étudiés sur les grandeurs mesurables de la machine, principalement les courants. Deux approches sont possibles, la première s'appuie sur la distribution des champs et des courants en tout point de la machine est permet de simuler son fonctionnement en régime des défauts. La seconde approche retenue ici consiste à interpréter la machine du point de vue de la théorie des circuits pour faciliter la simulation et la mise au point les problèmes de rupture de barres et d'anneaux de court-circuit [12],[13].

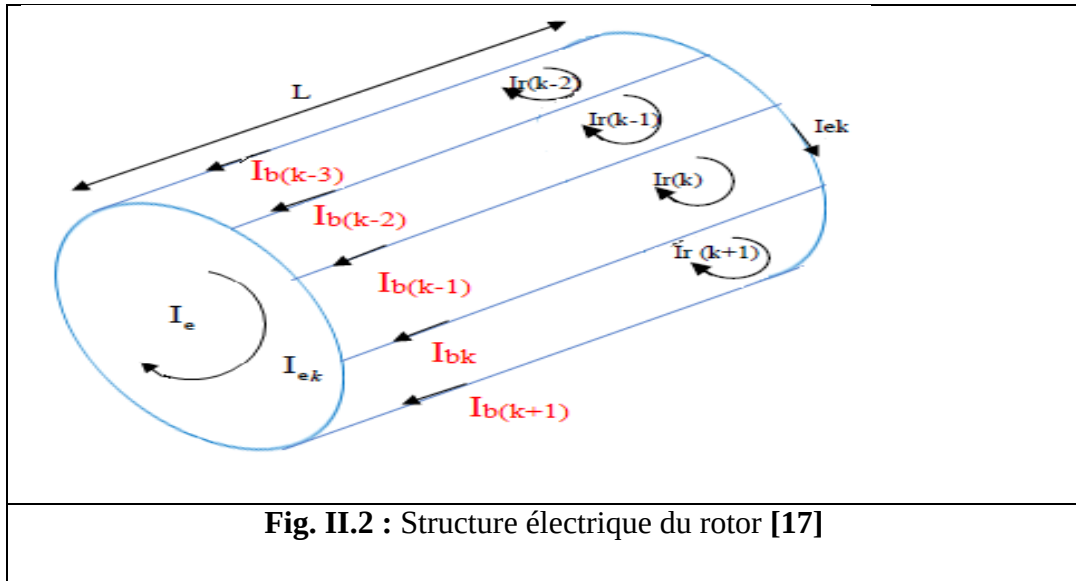
2.1 Hypothèses simplificatrices :

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 (Fig. II.1). Chaque barre rotorique est modélisée par une inductance en série avec une résistance, tout comme chaque segment d'anneau de court-circuit (Fig II.1) [20].

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.





La figure (II.2) illustre la modélisation du rotor par son schéma électrique équivalent, le rotor a été décomposé en circuit élémentaire (mailles) constitué de deux barres et de deux portions d'anneaux les reliant à chaque extrémité. Cette topologie des circuits rotoriques nous permettra d'envisager la rupture de n'importe quelle barre ou de portion d'anneau [13].

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

2-2-Calcul des inductances :

2-2-1-Partie statorique :

En appliquant le théorème d'Ampère sur un contour fermé, la circulation du champ magnétique H créée par une $i^{\text{ème}}$ phase statorique en un point quelconque peut être calculée [14] .

D'après le théorème d'Ampère, on peut écrire :

$$F(\theta) = \oint H \, dl = \frac{N_s I_s}{P} \quad (2-1)$$

- N_s nombre de spires statoriques par phase
- P nombre de paires de pôles
- I_s courant d'une phase statorique

Partant de l'expression (2-2) l'induction maximale dans l'entrefer est égale :

$$B_{\max} = \frac{\mu_0 N_s I_s}{2pe} \quad (2-2)$$

Avec :

- e entrefer [m]
- $\mu_0 = 4\pi 10^{-4}$ perméabilité magnétique du vide [$H.m^{-1}$]

La décomposition de l'induction en série de Fourier fournit le fondamental :

$$B(\theta) = \frac{2\mu_0 N_s I_s}{e p \pi} \cos(P\theta) \quad (2-3)$$

Par conséquent, le flux magnétique dans l'entrefer. Par pôles .est obtenu par intégration de l'expression (2-3).Autour d'un intervalle polaire le long de la machine.

On écrit :

$$\Phi_s = \iint_S B_s ds = \int_{-\frac{\pi}{2P}}^{\frac{\pi}{2P}} B_s R l d\theta$$

On obtient :

$$\Phi_s = \frac{4}{\pi} \mu_0 \frac{N_s^2}{e p^2} R l I_s \quad (2-4)$$

Dou le flux principale de l'enroulement statorique :

$$\Psi_{sa} = N_s \Phi_s = N_s I_s \frac{2\mu_0 N_s R l}{e p \pi} \int_{-\frac{\pi}{2P}}^{\frac{\pi}{2P}} \cos(P\theta) d\theta \quad (2-5)$$

Donc :

$$\Psi_{sa} = L_{sp} I_s$$

L'inductance principale(magnétisante) de la phase "n" statorique d'après (2-5) est donnée donc par [17],[14] :

$$L_{sp} = 4\mu_0 \frac{N_s^2}{e p^2 \pi} R l \quad (2-6)$$

Le flux de fuite est donné par :

$$\Phi_{fs} = L_{fs} I_s \quad (2-7)$$

L'inductance cyclique :

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

Du fait que les enroulements statoriques sont symétriques(décclés d'un angle de $\frac{2\pi}{3}$).

Les inductance mutuelles propres entre les trois phases s'écrivant :

$$\begin{cases} L_{ab} = L_{sp} \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) = -\frac{L_{sp}}{2} \\ L_{ac} = L_{sp} \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) = -\frac{L_{sp}}{2} \\ L_{bc} = L_{sp} \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) = -\frac{L_{sp}}{2} \end{cases}$$

Avec :

$$\left. \begin{array}{l} L_{ab} = L_{ba} \\ L_{ac} = L_{ca} \\ L_{bc} = L_{cb} \end{array} \right\} = M_S = -\frac{L_{sp}}{2}$$

2-2-2-Partie rotorique :

La figure (II.3) représente en fonction de θ , l'allure de l'induction magnétique supposée radiale produite par une maille rotorique dans l'entrefer en remarque que contrairement au stator, elle ne peut se ramener au fondamental de sa décomposition en série de Fourier [14] [17].

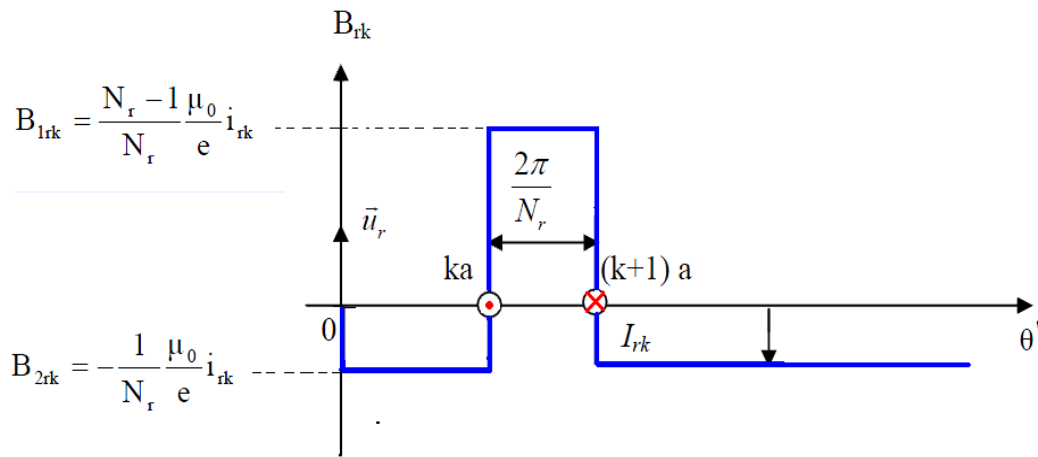


Figure II.3: Induction magnétique produite par une maille du rotor [9].

- N_r nombre de barres rotoriques
- I_{rk} courant dans la boucle [A], $k=1, \dots, N_r$
- B_k induction magnétique dans l'entrefer produit par une maille rotorique ((k))

Le rotor est décomposé en circuits élémentaires (mailles) constitués de deux portions d'anneaux nous permettra de calculer leurs inductances.

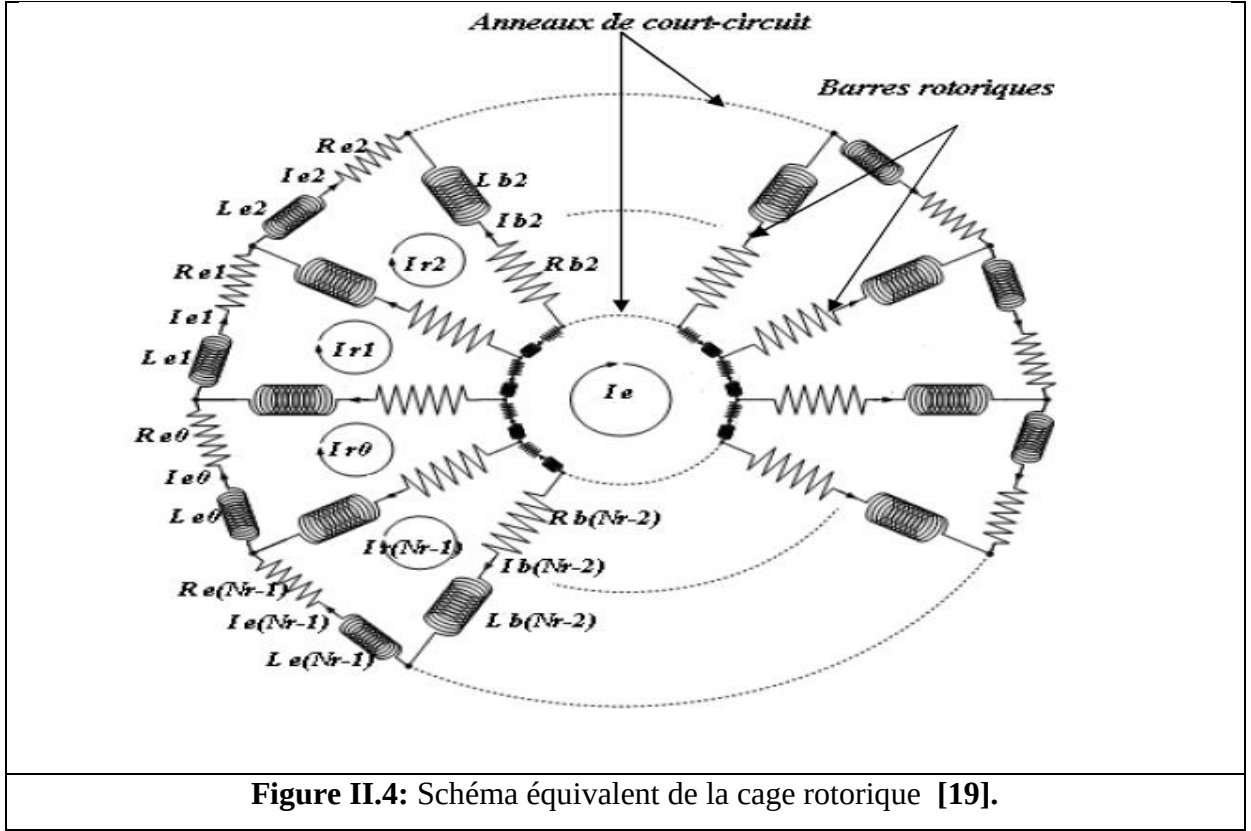


Figure II.4: Schéma équivalent de la cage rotorique [19].

La distribution spatiale du champ dû à la $k^{\text{ème}}$ boucle de courant rotorique, est considérée comme étant rectangulaire, l'inductance principale et l'inductance mutuelle d'une maille rotorique sont données par l'expression du flux propre de la maille k .

On a donc :

$$\Phi_{rp k} = \int_{ka}^{(k+1)a} B_{1rk} R l d\theta$$

$$\Phi_{rp k} = \frac{N_r - 1}{N_r^2} \mu_0 \frac{2\pi R l}{e} I_{rk} \quad (2-9)$$

L'inductance propre d'une boucle rotorique est :

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

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

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

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

$$\Phi_{rjpk} = \int_{j_a}^{(j+1)a} B_{2rk} R l d\theta$$

$$\Phi_{rjpk} = \int_{j_a}^{(j+1)a} \left(-\frac{1}{N_r} \frac{\mu_0}{e} R l I_{rk} \right) d\theta \quad (2-12)$$

D'après l'équation (2-12), on obtient l'inductance mutuelle :

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

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

$$L_{(k+1)k} = -\frac{1}{N_r^2} \frac{\mu_0}{e} 2 \pi l R - L_{b(k+1)} \quad (2-14)$$

$$L_{r(k-1)k} = -\frac{1}{N_r^2} \frac{\mu_0}{e} 2 \pi l R - L_{b(k-1)} \quad (2-15)$$

2-2-3-Mutuelles inductances entre enroulements stator et rotor :

La figure (II.5) indique les bases géométriques de l'expression du flux mutuel entre l'enroulement d'une phase "n" au stator et un circuit élémentaire "k" au rotor.

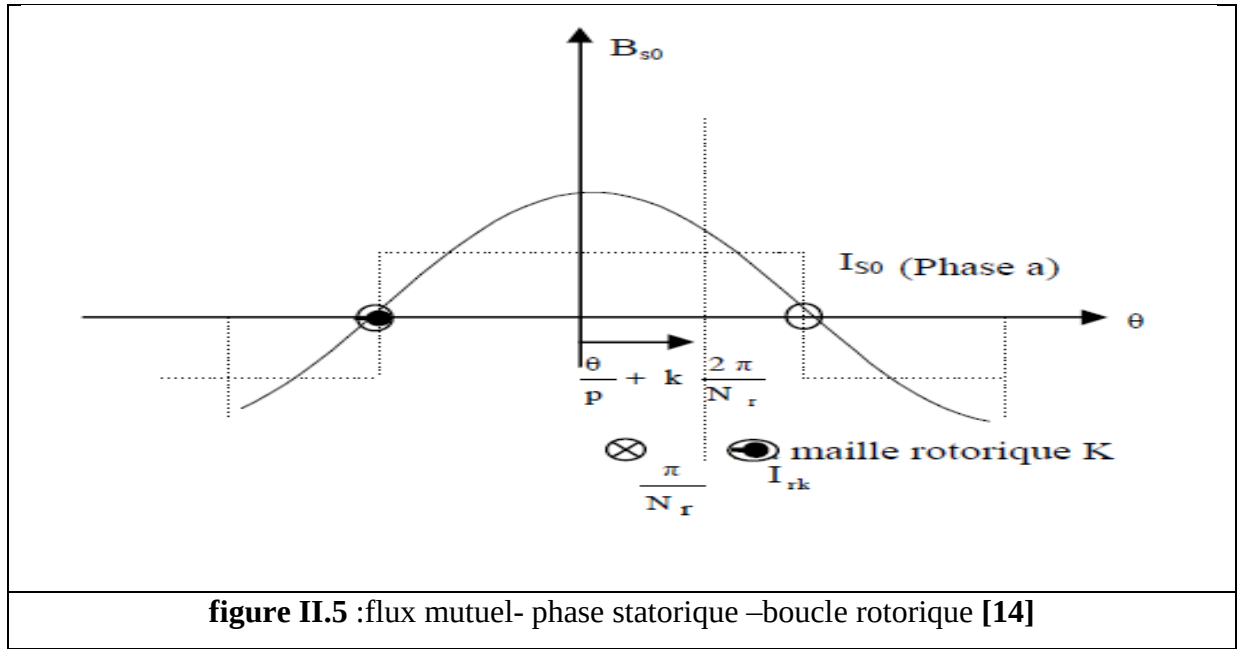
La transformation dans le repère lié au rotor de l'équation (2-3).donne :

L'induction produite par la bobine de la phase « n » dans la $k^{\text{ème}}$ maille rotorique est donnée par :

$$B_{msr} = \frac{2\mu_0 N_s I_s}{e p \pi} \cos(p\theta - n \frac{2\pi}{3}) \quad (2-16)$$

Avec

$$n = (1, 2, 3)$$



Le flux traversant la maille k, est donné par :

$$\Phi_{rka} = \int_{ka}^{(k+1)a} B_{msr} R l d\theta$$

On obtient:

$$\Phi_{rka} = \frac{2\mu_0}{e p \pi} N_s R l I_s \frac{1}{p} \left[\sin \left(p\theta - n \frac{2\pi}{3} \right) \right]_{ka}^{(k+1)a} \quad (2-17)$$

L'inductance mutuelle entre la phase « a » du stator et la maille rotorique est :

$$M_{rka} = -M_{sr} \cos \left(p\theta - n \frac{2\pi}{3} + ka \right) \quad (2-18)$$

Avec $M_{rka} = \frac{4\mu_0 N_s R l}{\pi e p^2} \sin \left(\frac{a}{2} \right)$,

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

De même, les inductance mutuelles entre la $k^{ème}$ maille et les phase "b" et "c". sont exprimées par :

$$\begin{cases} M_{rka} = M_{sr} \cos(p\theta + ka) \\ M_{rkb} = M_{sr} \cos \left(p\theta - \frac{2\pi}{3} + ka \right) \\ M_{rkc} = M_{sr} \cos \left(p\theta + \frac{2\pi}{3} + ka \right) \end{cases}$$

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.	$L_{sp} = L_{ms} = 4\mu_0 \frac{N_s^2}{e p^2 \pi} R l$
L'inductance mutuelle entre phases statoriques	$M_s = -\frac{L_{sp}}{2}$
L'inductance principale d'une maille rotorique	$L_{rp} = \frac{N_r - 1}{N_r^2} \mu_0 \frac{2\pi R l}{e}$
L'inductance mutuelle entre mailles rotoriques non adjacentes	$M_{rr} = -\frac{1}{N_r^2} \frac{\mu_0}{e} 2\pi l R$
L'inductance mutuelle entre une maille rotorique et une phase statorique "a".	$M_{rka} = -M_{sr} \cos\left(p\theta - n\frac{2\pi}{3} + ka\right)$ avec: $M_{rka} = \frac{4\mu_0 N_s R l}{\pi e p^2} \sin\left(\frac{a}{2}\right)$

Tab. II.1 : Tableau récapitulatif de toutes les inductances de la machine asynchrone à cage[9].

3-Mise en équations:

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

En étudiant la topologie du circuit électrique, nous cherchons alors l'ensemble des équations différentielles indépendantes régissant l'évolution des courants, et cela nous conduit à la forme classique [21] :

$$\left\{ \frac{d}{dt} [I] = -[L]^{-1}[R][I] + [L]^{-1}[V] \right. \quad (2-19)$$

3-1-Equations statoriques :

Les équations de la tension et du flux statorique sont :

$$\begin{cases} [V_{abc}] = [R_s][I_{abc}] + \frac{d}{dt} [\Phi_{abc}] \\ [\Phi_{abc}] = [L_s][I_{abc}] + [M_{sr}][I_{rk}] \end{cases} \quad (2-20)$$

avec :

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

$[I_{abc}] = [I_a \ I_b \ I_c]^t$, vecteur de courants statoriques.

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

$[\Phi_{abc}] = [\Phi_a \ \Phi_b \ \Phi_c]^t$, vecteur de flux statoriques.

$[R_s]$: matrice des résistances statoriques.

$$[R_s] = \begin{bmatrix} r_s & 0 & 0 \\ 0 & r_s & 0 \\ 0 & 0 & r_s \end{bmatrix}$$

$[L_s]$: La matrice d'inductance statorique s'écrit :

$$[L_s] = \begin{bmatrix} L_{sp} + L_{sf} & M_s & M_s \\ M_s & L_{sp} + L_{sf} & M_s \\ M_s & M_s & L_{sp} + L_{sf} \end{bmatrix}$$

Les inductances mutuelles entre phases statorique et maille rotorique s'écrit :

$$[M_{sr}] = \begin{bmatrix} \dots & \dots & \dots & -M_{sr} \cos(\theta_r + ka) & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & -M_{sr} \cos\left(\theta_r + ka - \frac{2\pi}{3}\right) & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & -M_{sr} \cos\left(\theta_r + ka - \frac{4\pi}{3}\right) & \dots & \dots & \dots \end{bmatrix}$$

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

3-2-Equations rotorique :

La figure (II.6) présente une boucle k du rotor, et montre les conventions choisies pour les courants.

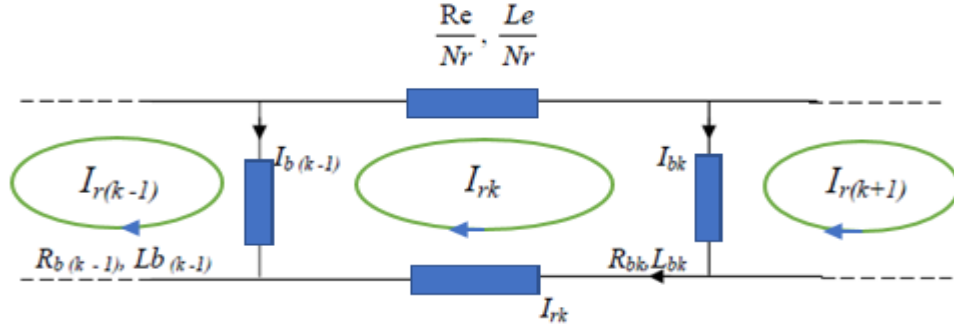


Figure II.6: Schéma équivalent des mailles rotorique [17].

Sachant que :

$$\begin{cases} I_{ek} = I_{rk} - I_e \\ I_{bk} = I_{rk} - I_{r(k-1)} \end{cases}$$

L'équation électrique relative à la maille k est donnée par :

$$\frac{R_e}{N_r} I_{rk} - R_{b(k-1)} \cdot I_{b(k-1)} + \frac{R_e}{N_r} I_{ek} + R_{bk} I_{bk} + \frac{d}{dt} \Phi_{rk} \quad (2-21)$$

Le flux totalisé Φ_{rk} pour un circuit élémentaire k est la somme des termes suivantes :

♦ le flux principal :

$$\Phi_{rk} = L_{rp} \cdot I_{rk}$$

♦ le flux mutuel avec les autres circuits du rotor :

$$\Phi_{rk} = M_{rr} \sum_{\substack{j=0 \\ j \neq 0}}^{N_r-1} I_{rj}$$

♦ Le flux mutuel avec le stator est :

$$\Phi_{rk} = M_{sr} \left[\cos(\theta_r + ka) : \cos\left(\theta_r + ka - \frac{2\pi}{3}\right) : \cos\left(\theta_r + ka - \frac{4\pi}{3}\right) \right] [I_{abc}]$$

L'équation (2-22) devient donc :

$$\begin{aligned}
0 &= \left(2 \frac{R_e}{N_r} + R_{b(k-1)} + R_{bk}\right) I_{rk} - R_{b(k-1)} I_{r(k-1)} - R_{bk} I_{r(k-1)} - \frac{R_e}{N_r} I_e + \frac{d\Phi_{rk}}{dt} \\
\Phi_{rk} &= \left(L_{rp} + \frac{L_e}{N_r} + 2L_b\right) I_{rk} - M_{rr} \sum_{\substack{j=0 \\ j \neq 0}}^{N_r-1} I_{rj} - L_b (I_{r(k-1)} + I_{r(k+1)}) - \frac{L_e}{N_r} \\
&\quad - M_{sr} \left[\cos(\theta_r + ka) : \cos\left(\theta_r + ka - \frac{2\pi}{3}\right) : \cos\left(\theta_r + ka - \frac{4\pi}{3}\right) \right] [I_{abc}]
\end{aligned} \tag{2-22}$$

D'où :

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

L'équation relative à l'anneau de court-circuit est :

$$\frac{L_e}{N_r} \sum_{k=0}^{N_r-1} \frac{dI_{rk}}{dt} - L_e \frac{dI_e}{dt} - \left(R_e I_e - \frac{R_e}{N_r} \sum_{k=0}^{N_r-1} I_{rk} \right) = 0$$

de même façon, on utilise les équations de $I_{e(k)}$ et $I_{b(k)}$ et on trouve :

$$\frac{R_e}{N_r} \sum_{k=0}^{N_r} I_{r(k)} + \frac{L_e}{N_r} \sum_{k=1}^{N_r} \frac{d}{dt} I_{r(k)} - L_e \frac{d}{dt} I_e - R_e I_e = 0 \tag{2-23}$$

3-3-Equation d'état de la machine :

Le système est mis sous la forme suivant :

$$[V] = [R][I] + [L] \frac{d}{dt} [I] + \frac{d[L]}{dt} [I] \tag{2-24}$$

Avec :

$[V] = [V_a V_b V_c : 0 \ 0 \ \dots \ 0 : 0]^t$: le vecteur global des tension $((N_r+4) \times 1)$, il contient les trois tensions statorique et les N_r tensions des mailles rotoriques, ainsi que la tension de l'anneau de court-circuit.

$[I] = [I_a I_b I_c : I_{r0} \ I_{r1} \ \dots \ I_{rk} \ \dots \ I_{r(N_r-1)} : I_e]^t$: le vecteur global des courants $((N_r+4) \times 1)$, il contient les courants statorique et les N_r courants des mailles rotoriques, ainsi que le courant de l'anneau de court-circuit.

La matrice globale des résistances est :

$$[I] = \begin{bmatrix} [R_s]_{3 \times 3} & \vdots & [0]_{3 \times (N_r+1)} \\ \dots & \dots & \dots \\ [0]_{(N_r+1) \times 3} & \vdots & [R_s]_{(N_r+1) \times (N_r+1)} \end{bmatrix}$$

La matrice des résistances rotoriques.

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

La matrice globale des inductances est donnée par :

$$[L] = \begin{bmatrix} [L_s]_{3 \times 3} & \vdots & [M_{sr}]_{3 \times (N_r+1)} \\ \dots & \dots & \dots \\ [M_{sr}]_{(N_r+1) \times 3} & \vdots & [L_r]_{(N_r+1) \times (N_r+1)} \end{bmatrix}$$

La matrice des inductances rotoriques :

$$[L_r] = \begin{bmatrix} L_{rp} + 2L_b + 2\frac{L_e}{N_r} & M_{rr} - L_b & \dots & 0 & M_{rr} & \dots & M_{rr} - L_b & \dots & -\frac{L_e}{N_r} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ M_{rr} - L_b & \dots & M_{rr} - L_b & L_{rp} + 2L_b + 2\frac{L_e}{N_r} & M_{rr} - L_b & M_{rr} & 0 & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ M_{rr} - L_b & \dots & M_{rr} & \dots & \dots & M_{rr} - L_b & L_{rp} + 2L_b + 2\frac{L_e}{N_r} & \dots & -\frac{L_e}{N_r} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ -\frac{L_e}{N_r} & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & -\frac{L_e}{N_r} & \dots & L_e \end{bmatrix}$$

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

$$\begin{bmatrix}
 Ls + 2Ms & 0 & 0 & \vdots & 0 & 0 & \dots & \dots & 0 & \vdots & 0 \\
 0 & Ls - Ms & 0 & \vdots & \sqrt{\frac{3}{2}}L_{sr} & \sqrt{\frac{3}{2}}L_{sr} \cos(a) & \dots & \dots & \sqrt{\frac{3}{2}}L_{sr} \cos((Nr-1)a) & \vdots & 0 \\
 0 & 0 & Ls - Ms & \vdots & 0 & \sqrt{\frac{3}{2}}L_{sr} \sin(a) & \dots & \dots & \sqrt{\frac{3}{2}}L_{sr} \sin((Nr-1)a) & \vdots & 0 \\
 \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\
 0 & \sqrt{\frac{3}{2}}L_{sr} & 0 & \vdots & Lrp + 2Lb + 2\frac{Le}{Nr} & Mrr - Lb & Mrr & \dots & Mrr - Lb & \vdots & -\frac{Le}{Nr} \\
 0 & \sqrt{\frac{3}{2}}L_{sr} \cos(a) & \sqrt{\frac{3}{2}}L_{sr} \sin(a) & \vdots & Mrr - Lb & Lrp + 2Lb + 2\frac{Le}{Nr} & Mrr - Lb & Mrr & \dots & \vdots & \vdots \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots & \vdots \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots & \vdots \\
 0 & \sqrt{\frac{3}{2}}L_{sr} \cos((Nr-1)a) & \sqrt{\frac{3}{2}}L_{sr} \sin((Nr-1)a) & \vdots & Mrr - Lb & \dots & Mrr & Mrr - Lb & Lrp + 2Lb + 2\frac{Le}{Nr} & \vdots & -\frac{Le}{Nr} \\
 \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\
 0 & 0 & 0 & \vdots & -\frac{Le}{Nr} & \dots & \dots & \dots & -\frac{Le}{Nr} & \vdots & Le
 \end{bmatrix}$$

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

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

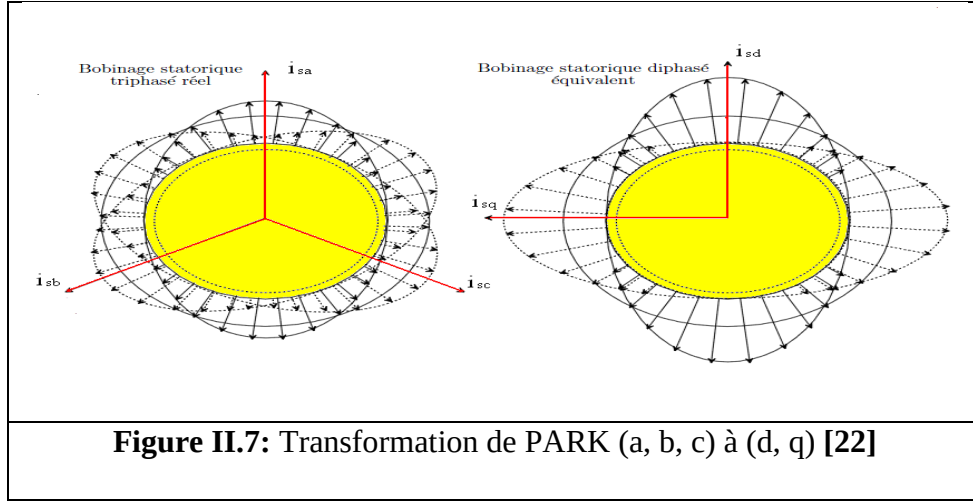
La dérivée de la matrice globale des inductances est :

$$\frac{d[M]}{dt} = \begin{bmatrix} [0] & \frac{d[M_{sr}]}{dt} \\ \frac{d[M_{sr}]^t}{dt} & [0] \end{bmatrix}$$

3-4 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).

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) [13]



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

La matrice de Park modifiée est définie par [13] ,[9] :

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \cos \theta & -\sin \theta \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

La dérivée de la matrice de Park est :

$$\frac{d[P(\theta)]}{dt} = -\sqrt{\frac{2}{3}} \omega \begin{bmatrix} 0 & \sin \theta & \cos \theta \\ 0 & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ 0 & \sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

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

$$[T] = \begin{bmatrix} [P(\theta)] & \vdots & [0] \\ \dots & \vdots & \dots \\ [0]^T & \vdots & [1] \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

$$[T]^{-1} = \begin{bmatrix} [P(\theta)]^{-1} & \vdots & [0] \\ \dots & \vdots & \dots \\ [0]^T & \vdots & [1] \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

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

Sachant que :

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

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

$$\text{Avec : } \begin{cases} v_{ds} = \sqrt{\frac{3}{2}} v_m \cos(\omega_s - \omega_r) t \\ v_{qs} = \sqrt{\frac{3}{2}} v_m \sin(\omega_s - \omega_r) t \end{cases} \quad (2.29)$$

L'équation (2-24) devient :

$$[T][V_{tr}] = [R][T][I_{tr}] + [L] \frac{d[T][I_{tr}]}{dt} + \frac{d[L]}{dt} [T][I_{tr}] \quad (2.30)$$

$$\Leftrightarrow [V_{tr}] = \left(\underbrace{[T]^{-1}[R][T]}_A + \underbrace{[T]^{-1}[L] \frac{d[T]}{dt}}_B + \underbrace{[T]^{-1} \frac{d[L]}{dt} [T]}_C \right) [I_{tr}] + \underbrace{[T]^{-1}[L][T]}_D \frac{d[I_{tr}]}{dt} \quad (2.31)$$

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

$$A = [T]^{-1} [R] [T] = \begin{bmatrix} [P(\theta)]^{-1} [R_s] [P(\theta)] & \vdots & [0] \\ \dots\dots\dots & \vdots & \dots\dots \\ [0] & \vdots & [R_r] \end{bmatrix} \quad (2.32)$$

$$B = [T]^{-1} [L] \frac{d[T]}{dt} = \begin{bmatrix} [P(\theta)]^{-1} [L_s] \frac{d[P(\theta)]}{dt} & \vdots & [0] \\ \dots\dots\dots & \vdots & \dots\dots \\ [M_{sr}]^T \frac{d[P(\theta)]}{dt} & \vdots & [0] \end{bmatrix} \quad (2.33)$$

$$C = [T]^{-1} \frac{d[L]}{dt} [T] = \begin{bmatrix} [0] & \vdots & [P(\theta)]^{-1} \frac{d[M_{sr}]}{dt} \\ \dots\dots\dots & \vdots & \dots\dots\dots \\ \frac{d[M_{sr}]^T}{dt} [P(\theta)] & \vdots & [0] \end{bmatrix} \quad (2.34)$$

$$D = [T]^{-1} [L] [T] = \begin{bmatrix} [P(\theta)]^{-1} [L_s] [P(\theta)] & \vdots & [P(\theta)]^{-1} [M_{sr}] \\ \dots\dots\dots & \vdots & \dots\dots\dots \\ [M_{sr}]^T [P(\theta)] & \vdots & [L_r] \end{bmatrix} \quad (2.35)$$

La mise en équation du modèle de la machine, conduit à un système complet de dimension N_r+4 **[13]** :

$$\begin{bmatrix} v_{os} \\ v_{ds} \\ v_{qs} \\ \dots \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ \dots \\ 0 \end{bmatrix} = [L_{tr}] \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{os} \\ i_{ds} \\ i_{qs} \\ \dots \\ i_{r0} \\ \vdots \\ i_{rk} \\ \vdots \\ i_{r(N_r-1)} \\ \dots \\ i_e \end{bmatrix} + [R_{tr}] \begin{bmatrix} i_{os} \\ i_{ds} \\ i_{qs} \\ \dots \\ i_{r0} \\ \vdots \\ i_{rk} \\ \vdots \\ i_{r(N_r-1)} \\ \dots \\ i_e \end{bmatrix} \quad (2.36)$$

$[L_{tr}]$ et $[R_{tr}]$ sont les matrices globales des résistances et des inductances après la transformation de Park [9],[13].

La matrice $[L_{tr}]$ est donnée par : (2.37)

$$\begin{bmatrix}
 L_s + 2M_s & 0 & 0 & \vdots & 0 & 0 & \dots & \dots & 0 & \vdots & 0 \\
 0 & L_s - M_s & 0 & \vdots & \sqrt{\frac{3}{2}}L_{sr} & \sqrt{\frac{3}{2}}L_{sr}\cos(a) & \dots & \dots & \sqrt{\frac{3}{2}}L_{sr}\cos((Nr-1)a) & \vdots & 0 \\
 0 & 0 & L_s - M_s & \vdots & 0 & \sqrt{\frac{3}{2}}L_{sr}\sin(a) & \dots & \dots & \sqrt{\frac{3}{2}}L_{sr}\sin((Nr-1)a) & \vdots & 0 \\
 \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\
 0 & \sqrt{\frac{3}{2}}L_{sr} & 0 & \vdots & Lrp + 2Lb + 2\frac{Le}{Nr} & Mrr - Lb & Mrr & \dots & Mrr - Lb & \vdots & -\frac{Le}{Nr} \\
 0 & \sqrt{\frac{3}{2}}L_{sr}\cos(a) & \sqrt{\frac{3}{2}}L_{sr}\sin(a) & \vdots & Mrr - Lb & Lrp + 2Lb + 2\frac{Le}{Nr} & Mrr - Lb & Mrr & \dots & \vdots & \vdots \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots & \vdots \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots & \vdots \\
 0 & \sqrt{\frac{3}{2}}L_{sr}\cos((Nr-1)a) & \sqrt{\frac{3}{2}}L_{sr}\sin((Nr-1)a) & \vdots & Mrr - Lb & \dots & Mrr & Mrr - Lb & Lrp + 2Lb + 2\frac{Le}{Nr} & \vdots & -\frac{Le}{Nr} \\
 \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\
 0 & 0 & 0 & \vdots & -\frac{Le}{Nr} & \dots & \dots & \dots & -\frac{Le}{Nr} & \vdots & Le
 \end{bmatrix}$$

La matrice $[R_{tr}]$ est donnée par : (2.38)

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

A ces équations, on ajoute les équations électromécaniques afin d'avoir la vitesse électrique de rotation et la position θ_r du rotor [9]:

$$\frac{d}{dt} \omega_m = \frac{1}{J} (C_e - C_r - k_0 \omega_m) \quad (2.39)$$

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

$$\frac{d}{dt} \theta_r = \omega_r \quad (2.40)$$

3-5-Equation mécanique:

La puissance absorbée de la machine asynchrone s'écrit :

$$P_e = V_a I_a + V_b I_b + V_c I_c = V_{ds} I_{ds} + V_{qs} I_{qs} + V_{os} I_{os}$$

On pesante :

$$[X_{dqo}] = \begin{bmatrix} X_d \\ X_q \\ X_0 \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad [X_{dqo}] = \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix}$$

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

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

Dans ces conditions la puissance instantanée a pour expression :

$$P_e = [X_{abc}]^t [I_{abc}] = [V_{dqo}]^t [I_{dqo}] \quad (2-41)$$

$$[V_{dqo}] = [R_s][I_{dqo}] + \frac{d}{dt} [\Phi_{dqo}] + [P] \frac{d[P]^{-1}}{dt} [\Phi_{dqo}] \quad (2-42)$$

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{d}{dt} \Phi_{ds} - \omega_{er} \Phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + \frac{d}{dt} \Phi_{qs} + \omega_{er} \Phi_{ds} \\ V_{os} = R_s I_{os} + \frac{d}{dt} \Phi_{os} \end{cases}$$

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

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

♦ $P_j = R_s (I_{ds}^2 + I_{qs}^2)$: La puissance dissipée en pertes joules.

♦ $P_v = I_{ds} \left(\frac{d\Phi_{ds}}{dt} \right) + I_{qs} \left(\frac{d\Phi_{qs}}{dt} \right)$: La puissance représentant les échanges d'énergie électromagnétique.

♦ $P_m = \omega_{er} (\Phi_{ds} I_{qs} - \Phi_{qs} I_{ds})$: La puissance mécanique.

Or, la puissance mécanique égale à $(C_e \cdot \Omega)$ ou $C_e \cdot \frac{\omega}{p}$, on tire l'expression scalaire du couple :

$$C_e = p |\Phi_{ds} I_{qs} - \Phi_{qs} I_{ds}| \quad (2-43)$$

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

$$C_e = \frac{3}{2} p \cdot M_{sr} \left(I_{ds} \sum_{k=0}^{N_r-1} I_{r(k)} \sin(k \cdot a) - I_{qs} \sum_{k=0}^{N_r-1} I_{r(k)} \cos(k \cdot a) \right) \quad (2-44)$$

4-Prise en compte du défaut 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 (II.4) doit être reconsidéré pour permettre la prise en compte du défaut rotorique dans le modèle de la machine.

La figure (II.8) représente un schéma de deux mailles adjacentes en état sain et à la présence de la rupture d'une barre

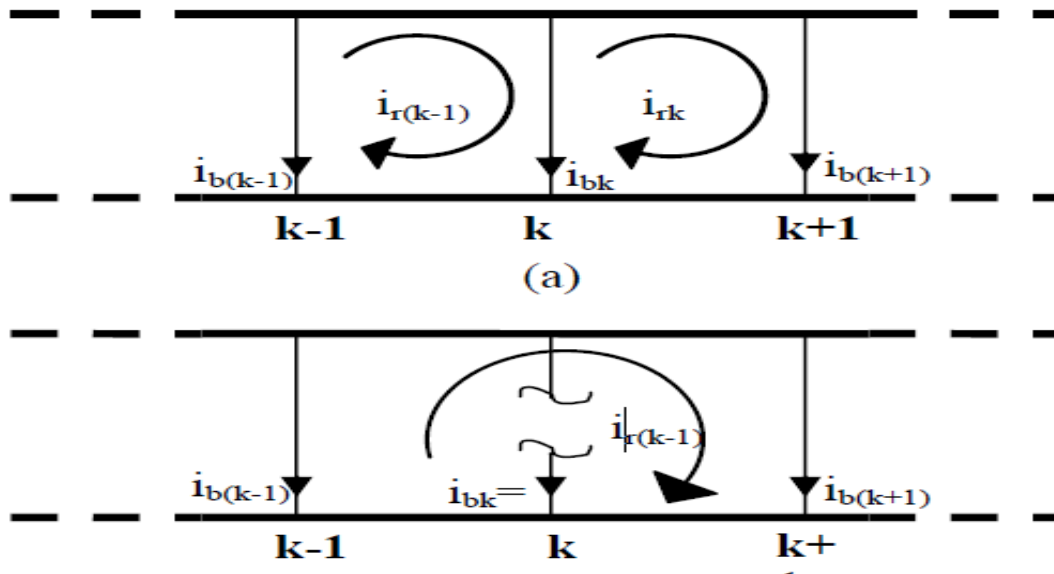


Figure II.8: Schéma équivalent de la cage rotorique.

(a). état sain. (b). avec une barre rompue [33].

La simulation de ce type de défaillance peut être 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'anneau 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.

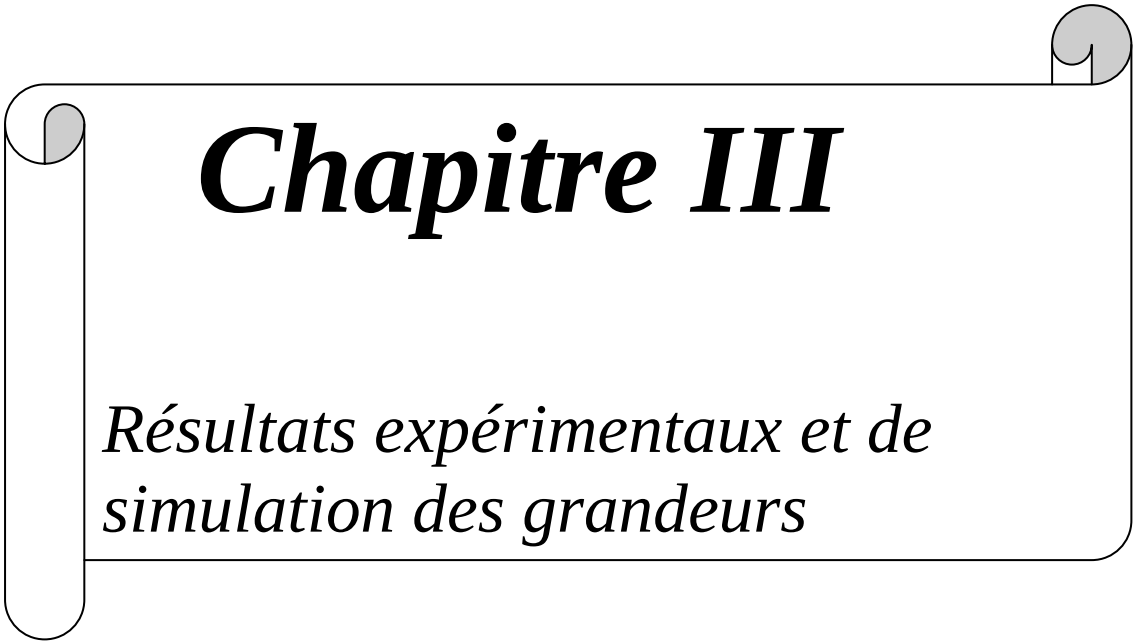
Par conséquent, le programme de simulation s'adaptera à cette nouvelle contrainte et nous donnera l'évolution temporelle des différents signaux pour un fonctionnement de la machine avec ce type de défaut.

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].

5-Conclusions

Nous avons utilisé un modèle multi-enroulement qui tient compte de la structure 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 des barres et les portions d'anneaux du rotor.

Dans le chapitre suivant, des résultats de simulation de ce modèle pour différents essais (sain et défaillant) seront étudiés.

A decorative graphic of a scroll with a black outline and grey shading on the rolled-up ends. The title and subtitle are centered within the scroll's body.

Chapitre III

*Résultats expérimentaux et de
simulation des grandeurs*

1-Introduction :

Dans ce chapitre, on considère la simulation du modèle multi enroulements, permettant de représenter les différentes courbes du courant statorique, du courant dans les barres rotorique, le couple et la vitesse de rotation ainsi que les courants des barres cassées. La modulation est effectuée dans différentes conditions de fonctionnement : la machine à l'état sain et avec défaut. Ensuite, on présente l'analyse détaillée des différents défauts rotoriques. Cette analyse a pour objectif d'analyser les phénomènes observés sur les performances du moteur .

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

2-Résultats de simulation de la machine asynchrone

2-1-Résultats de simulation d'un fonctionnement sain

Nous pouvons étudier l'évolution des grandeurs temporelles tels que les courants, le couple et la vitesse rotorique lorsque la cage rotorique ne présente aucune défaillance.

La FigIII.1 montre, l'évolution des courants de la machine, la vitesse de rotation et le couple électromagnétique, lors d'un démarrage à vide sous une tension nominale avec une alimentation sinusoïdale équilibrée.

La FigIII.2 montre, l'évolution des courants de la machine, la vitesse de rotation et le couple électromagnétique, lors d'un démarrage à vide sous une tension nominale avec une alimentation sinusoïdale équilibrée.

A l'instant $t = 1 \text{ s}$, nous procédons à un échelon de couple résistant nominal .

La figure (FigIII.2.a) représente l'allure du courant de trois phase statorique , décrivant une partie du régime permanent après l'application du couple.

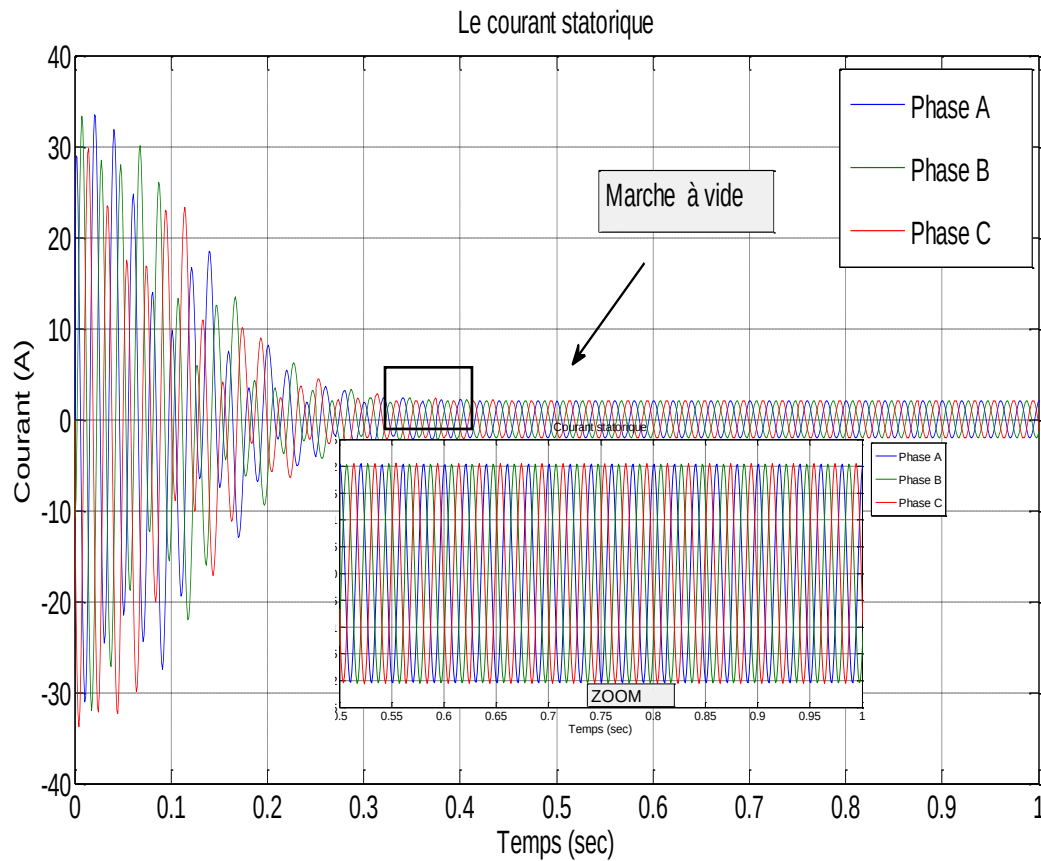
Les figures (FigIII b) et (FigIII.c) représentent l'allure de la vitesse de rotation et le couple électromagnétique respectivement.

Les figures (FigIII d) et (FigIII.e) représentent l'allure de courant dans la barre 1,2 et un zoom $[0.4-1.8] \text{ s}$ et courant dans un portion d'anneaux et un zoom $[0.5-1.5] \text{ s}$, décrivant une partie du régime permanent après l'application du couple.

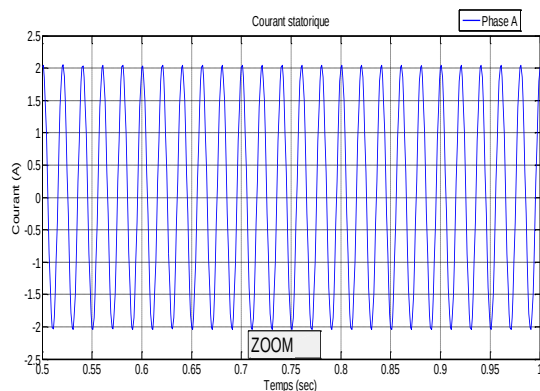
On voit que la vitesse diminue et atteint sa valeur nominale et le couple électromagnétique vient équilibrer le couple résistant.

Les figures FigureIII.3: représentent la caractéristique mécanique (sain).

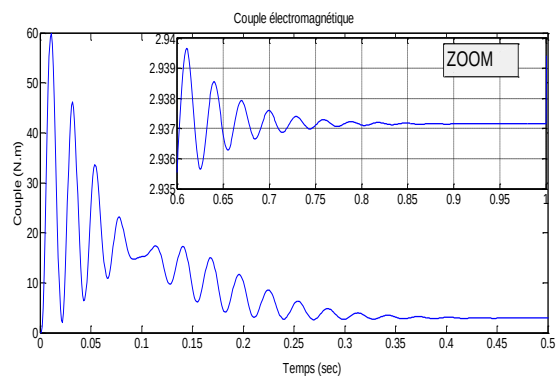
2-1-1-cas d'un fonctionnement à vide



a. Courant de trois phase statorique



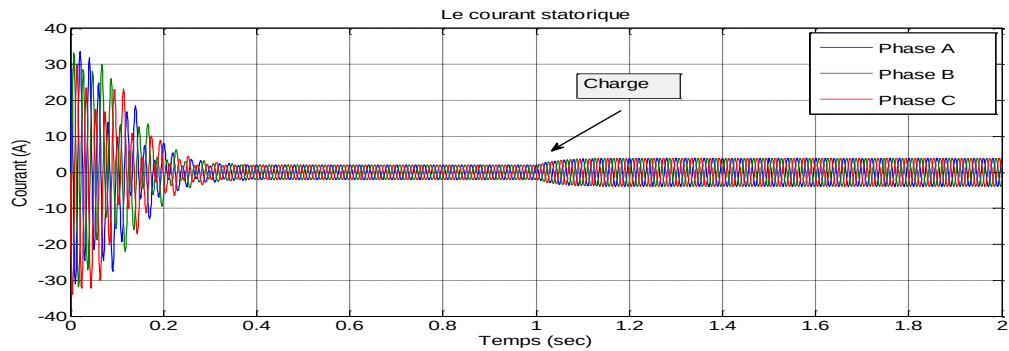
b. Courant de phase statorique



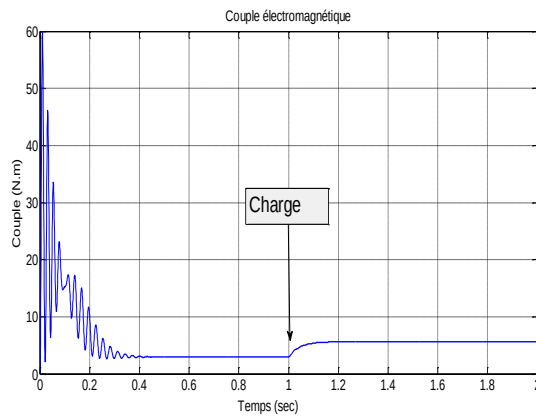
c. Couple électromagnétique

FigIII.1 Evolution des grandeurs électriques et électromécaniques pour un moteur à l'état sain

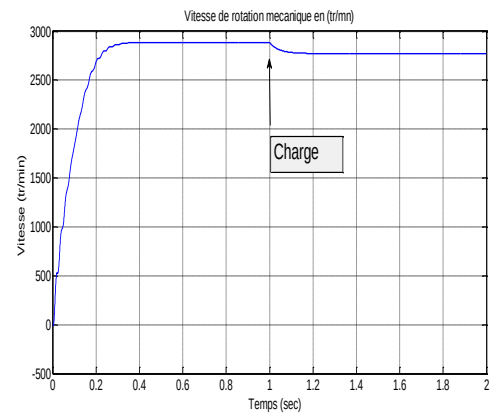
2-1-2-cas d'un fonctionnement charge :



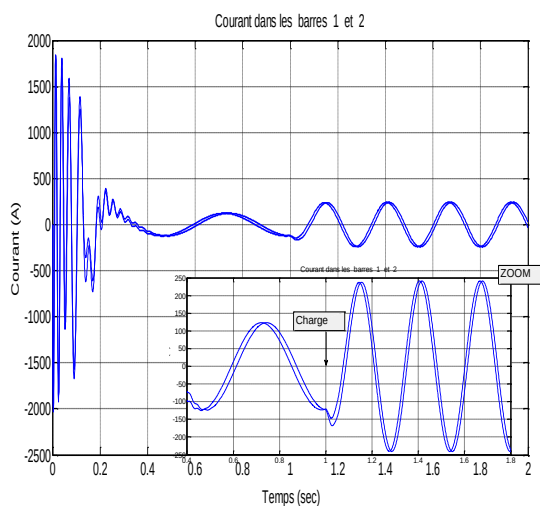
a. Courant de trois phase statorique



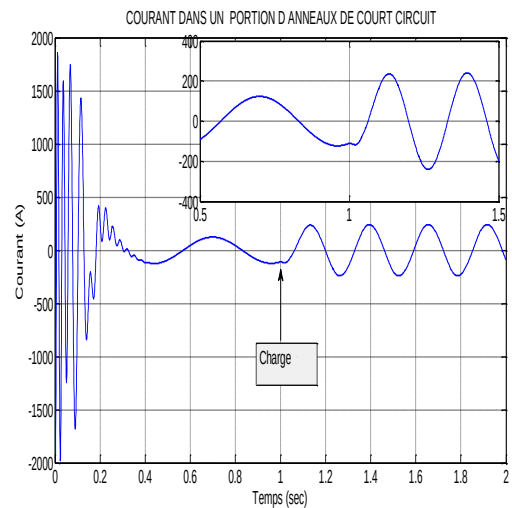
b. Couple électromagnétique



c. Vitesse de rotation

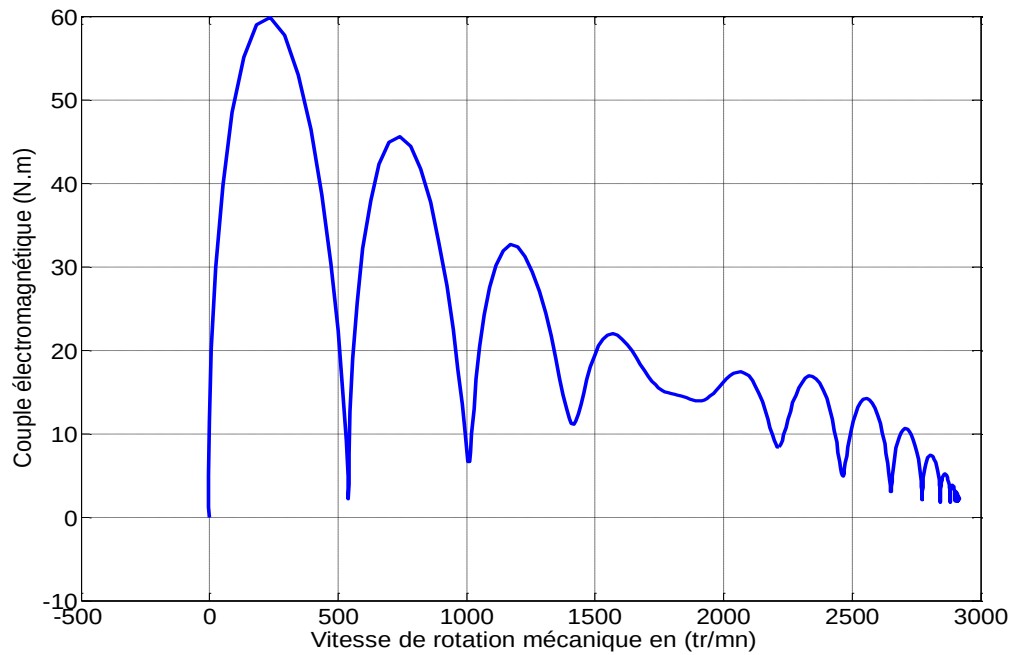


d. Courant dans la barre **1 et 2**



e. Courant dans un portion d'anneaux
de court-circuit

FigIII.2 - Evolution des grandeurs électromécaniques pour un moteur à l'état sain charge par un couple résistant nominal à l'instant $t = 1$ s.



FigureIII.3: Caractéristique mécanique (sain).

2-2-Résultats de simulation d'un fonctionnement avec défaut rotorique :

La cassure de barre et portion d'anneaux des défauts les plus fréquents au rotor.

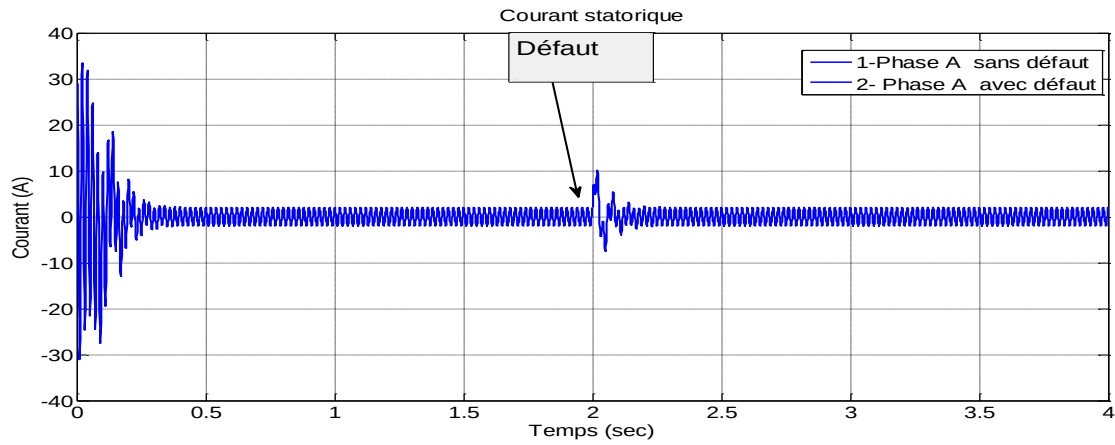
La méthode qu'on a adoptée pour la simulation des défauts rotoriques consiste à remplacer la valeur initiale de la résistance des barres cassées par une valeur finie.

A l'instant $t = 2$ s, nous simulons la rupture de la première barre en augmentant sa résistance de 30 fois (cette valeur a été choisie de sorte que le courant qui traverse la barre défailante soit le plus proche possible de zéro).

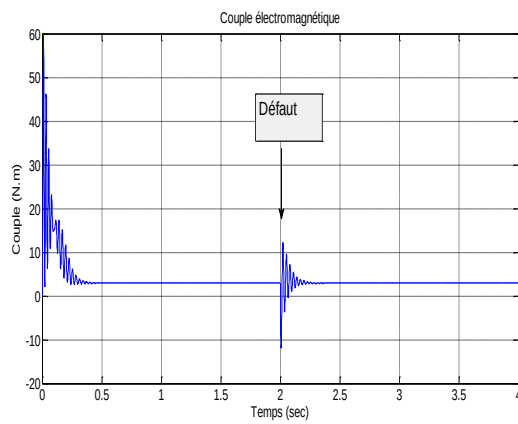
Le courant dans cette barre diminue fortement (FigIII.4 .d), entraînant une surintensité importante dans les barres adjacentes .

Une ondulation de l'amplitude du courant de phase statorique et une augmentation de l'amplitude des oscillations du couple et de la vitesse de rotation apparaît avec la cassure de la barre rotorique et portion d'anneaux(FigIII.4 a) et (FigIII.4.b et c).

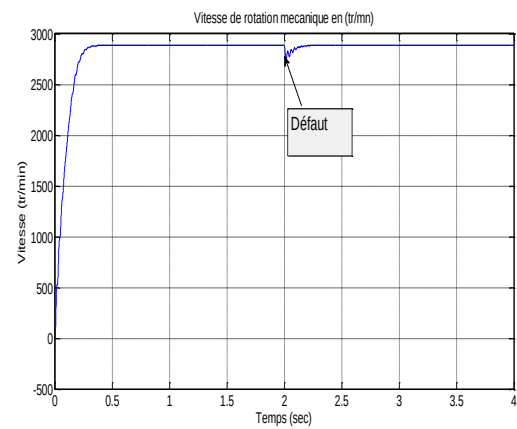
On remarque une augmentation des ondulations couple électromagnétique après la portion d'anneaux de court-circuit et cassure de barre, par conséquent la valeur moyenne de la vitesse est diminué La FigureIII.5.



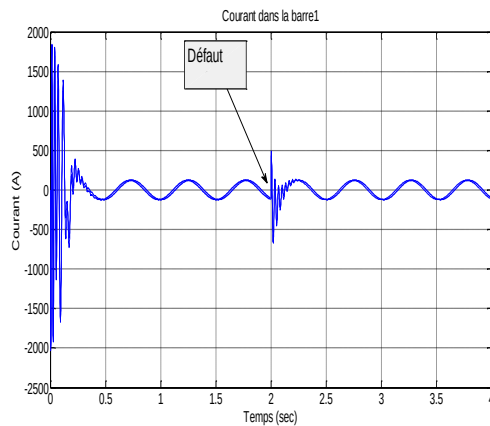
a. Courant de phase statorique



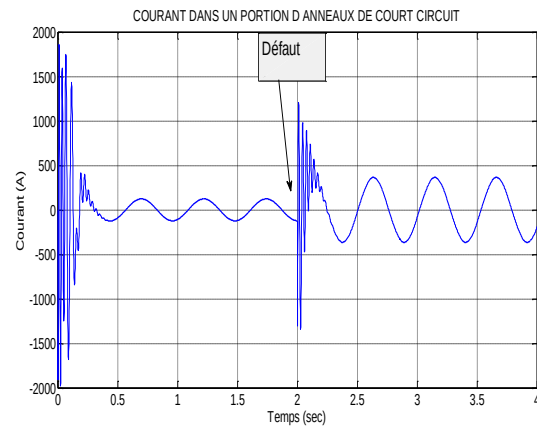
b. Couple électromagnétique



c. Vitesse de rotation



d. Courant de la barre 1



e. Courant dans un portion d'anneaux de court-circuit

FigIII.4 - Evolution des grandeurs électriques, mécanique et électromécanique pour un moteur avec défaut rotorique

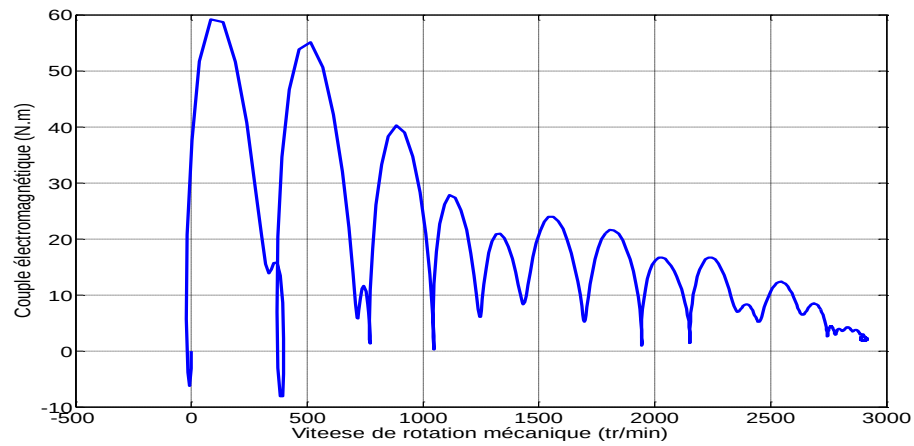


Figure III.5: Caractéristique mécanique (défaut rotorique).

4-Résultats expérimentaux du courant statorique :

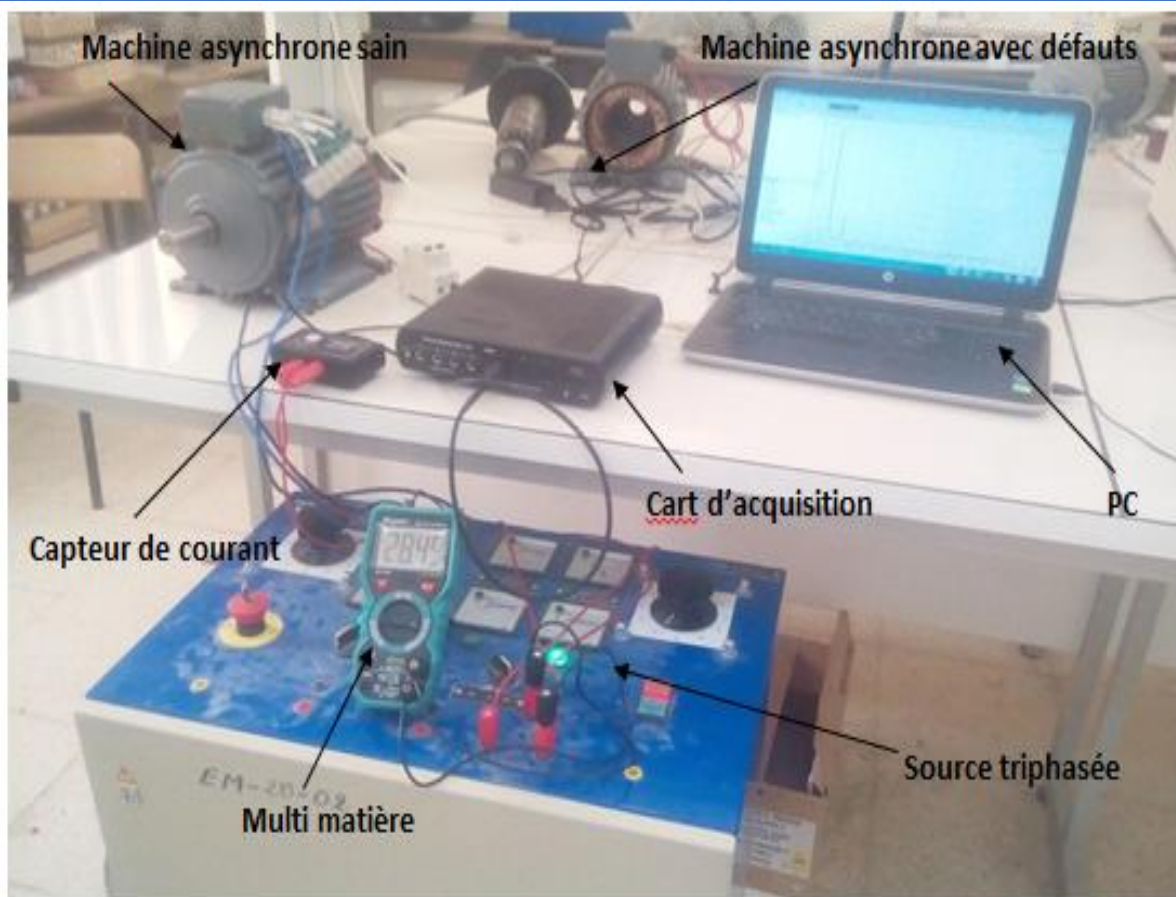
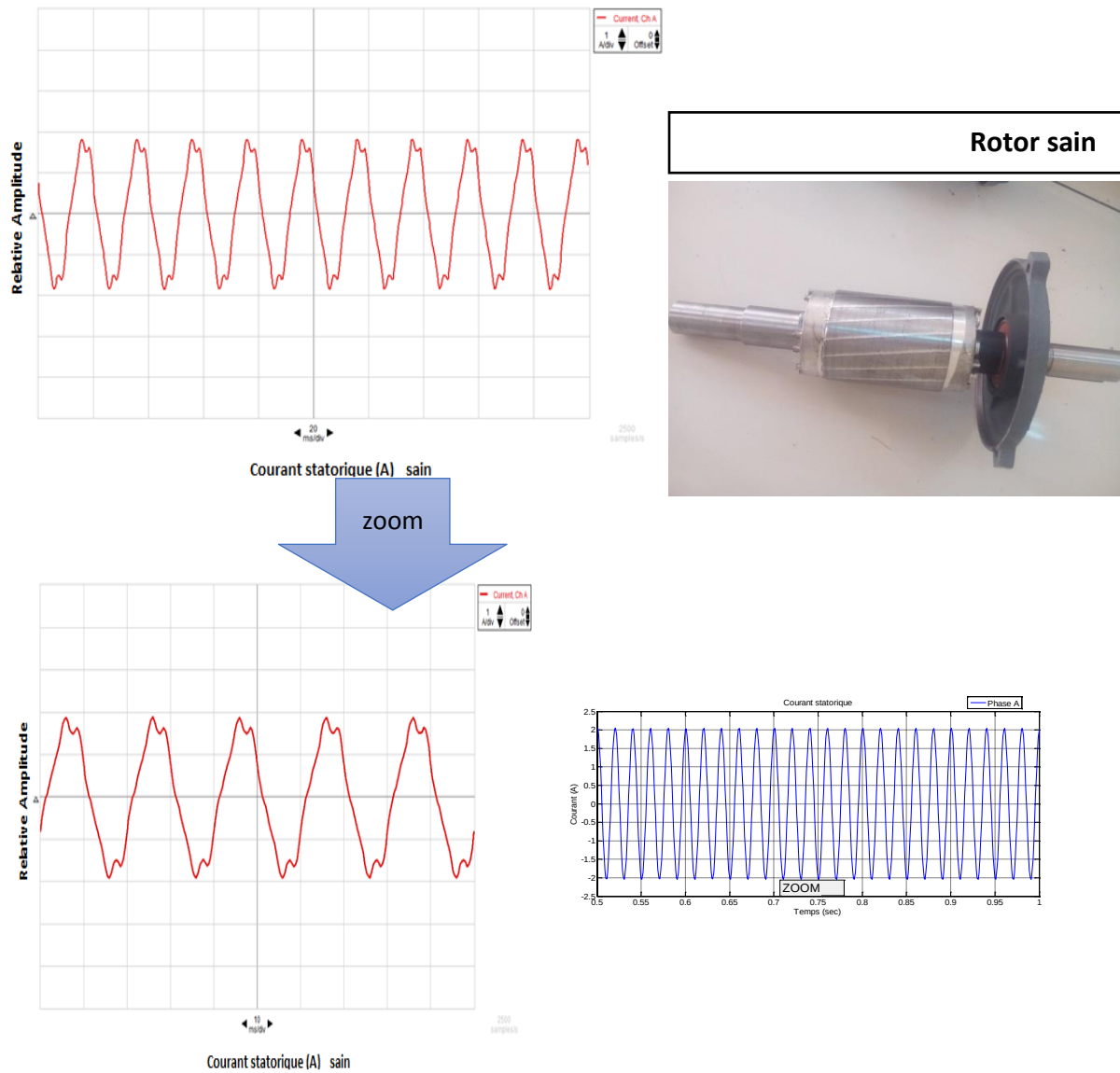


Figure III.6 Installation expérimentale (a) moteur sain de 3kW; (b) moteur avec cassure de barres et de portions d'anneaux (c) résultats expérimentaux relative au courant statorique (laboratoire de la faculté technologie -Université d' El Oued).

4-1 Cas d'une machine saine :

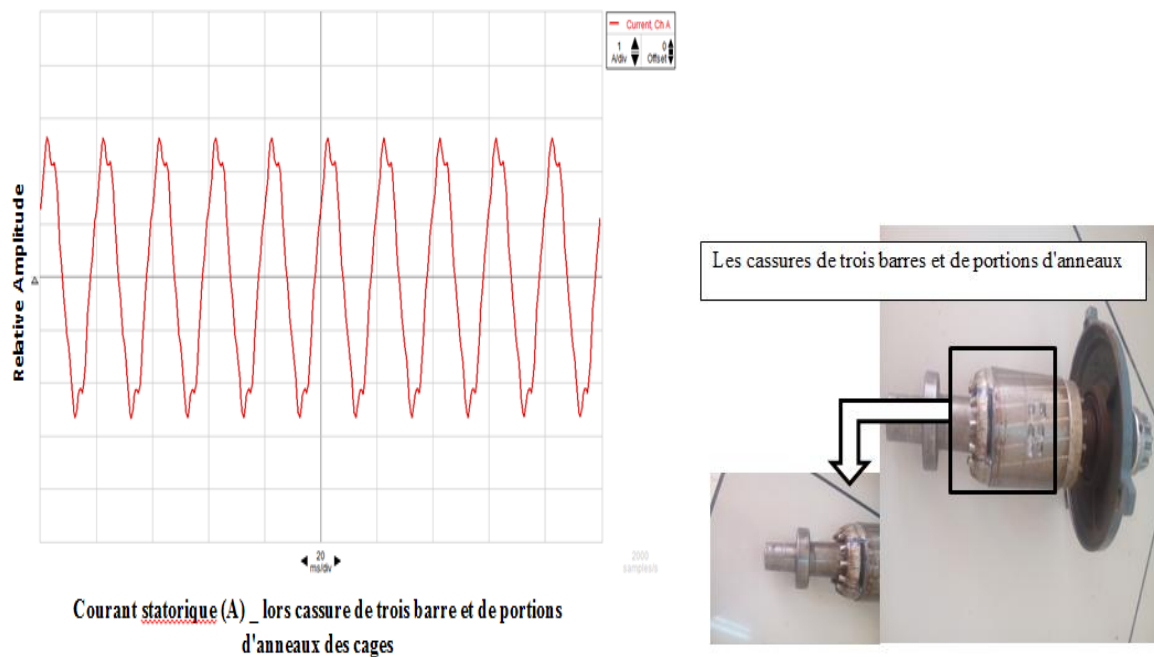


a. Expérimental du courant statorique

b. simulation du courant statorique

Figure III.7: Courant statorique sain.

4-2-Cas d'une machine avec défaut rotorique:



FigureIII.8: Courant statorique, défaut rotorique.

5-Interprétation des résultats expérimentaux:

- ❖ Nous notons la compatibilité des résultats de simulations avec les résultats expérimentaux où l'amplitude de courant est égal à 2A ,comme elle est illustrée par la figure(FigureIII.7.a et b) dans le cas d'une machine saine
- ❖ Selon la FigureIII.8,on constate un défaut de cassure de portions d'anneaux, il y a modulation et après la déformation du courant, ce qui conduit à l'oscillation du couple électromécanique.

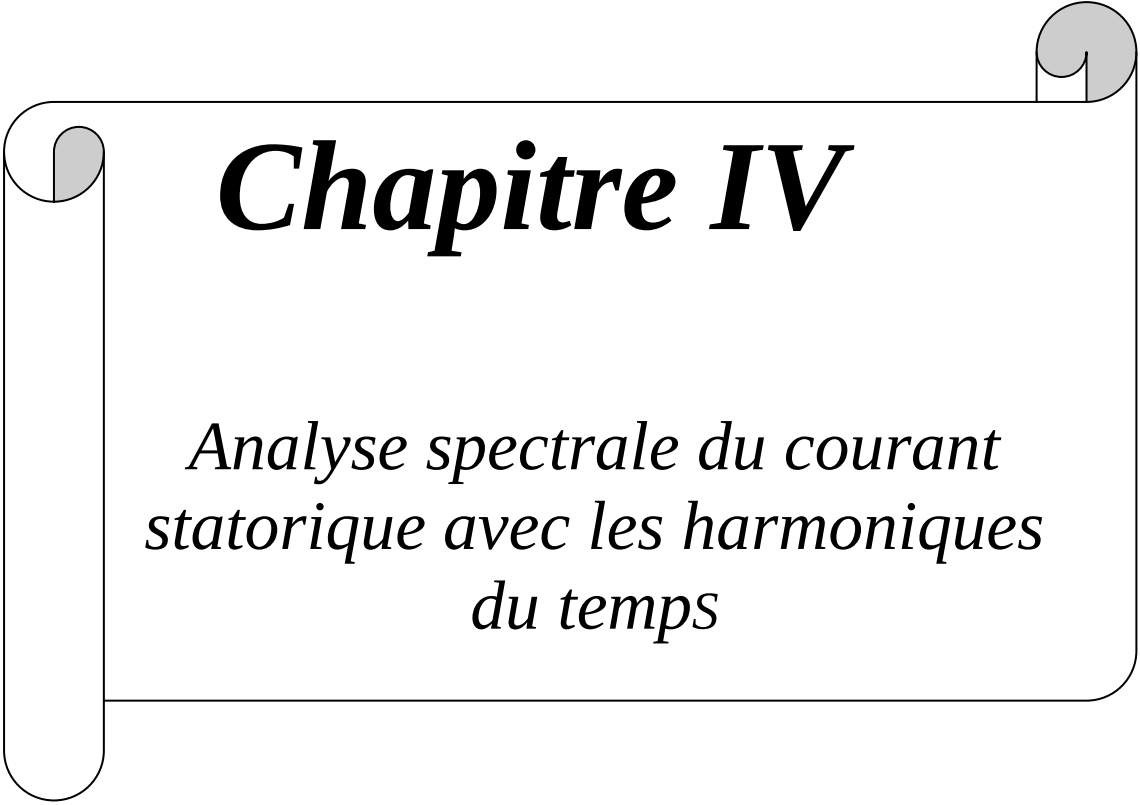
6-Conclusion :

Dans ce chapitre, on a présenté les résultats de simulation d'un moteur asynchrone triphasé à cage, pour différents régimes de fonctionnement sain et défaillants.

On a trouvé que la rupture d'une barre provoque des oscillations dans le couple et dans la vitesse, ainsi qu'une modulation de l'enveloppe du courant statorique, l'amplitude de ces oscillations augmente avec le nombre et l'emplacement des barres casées et leurs influences sur l'enveloppe du courant statorique .

On a remarqué que la durée du régime transitoire augmente avec le défaut de barres, et on a constaté aussi que les effets de cassures de barres peuvent être inobservables lorsque la machine fonctionne à vide ou en faible charge.

On peut voir que les allures des courants statoriques, la vitesse et le couple électromagnétique ne fournissent pas d'informations fines sur l'état du moteur. Par conséquent, il est plus judicieux de traiter le signal afin d'en ressortir des données plus représentatives. Ceci fait l'objet du chapitre suivant.

A decorative graphic of a scroll with a light gray background and a black outline. The scroll is partially unrolled, with the top edge showing a gray circular element. The text is centered on the unrolled portion of the scroll.

Chapitre IV

*Analyse spectrale du courant
statorique avec les harmoniques
du temps*

1-Introduction

Le diagnostic se base essentiellement sur l'analyse spectrale des différents signaux tels que : les courants statoriques, le couple, les vibrations, les flux de fuites, la vitesse, la puissance, etc. qui sont les approches les plus utilisées pour détecter les défauts mécaniques ou électriques dans les **MI**. Le rôle de la technique de l'analyse spectrale est de découvrir la signature spécifique de chaque type de défaut. En diagnostic, il est indispensable de comprendre comment les signatures des différents défauts se manifestent-elles ? : qui peut être une apparition de nouvelles composantes spectrales (signature propre de défaut) ou seulement une modification des amplitudes des composantes spectrales déjà existantes. C'est pourquoi, il faut avoir une bonne connaissance sur les différents harmoniques qui apparaissent dans le spectre en régime normal ou en état de défaillance. La simulation ne donne pas des réponses réelles et précises, par conséquent nous sommes obligés de visualiser les spectres expérimentaux pour avoir des explications à toutes les questions en attentes de réponses claires et sans ambiguïtés. Aussi, 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.

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 [27] :

$$f_{sh1,2}(k) = \left| \left(h \pm \frac{kN_r}{p} (1-s) \right) f_s \right|_{k=1,2,3,\dots} \quad (IV.1)$$

Nous remarquons que l'expression mathématiques (IV.2) du flux direct et (IV.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 $f_{sh}(p, N_r, k)$.

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

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

I_{rm} : la valeur du courant maximale rotorique

Notons aussi que la dérivée de l'expression mathématique du flux direct du stator (IV.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 [28] :

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

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 , $3f_s$, $5f_s$, $9f_s$, ... nous obtenons des harmoniques que ce soit pour le fonctionnement sain ou défectueux tel que [27] :

$$h = (2\nu + 1)_{\nu=0,1,2,3,..} \quad (IV.5)$$

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 [29], [30] :

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

2- Une série d'harmoniques d'encoches rotoriques « *harmonics of rotor slots* » (**RSH**) de fréquences caractéristiques [27] :

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

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**) [29], [30]

3- Une série d'harmoniques de défaut de barres « *Harmonics of Rotor Bar Fault* » (**RBFH**) de fréquences caractéristiques [30] :

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

4- Une série d'harmoniques d'excentricité mixte « *Eccentricity Fault Harmonics* » (**EFH**) de fréquences caractéristiques [27] :

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

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

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 (IV.6) -(IV.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 (IV.10) [29], [31] :

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.IV.1), et finalement, t : est le temps réel (secondes). avec $m = 1, 3, 5, 7, 9, \dots$ et $n = 1, 2, 3, 4, \dots$

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

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 .IV.1 Expression générale des différentes harmoniques du courant statorique [27]

La transformation de Park est utilisée pour passer du système triphasé (a-b-c) au système biphasé (d-q). L'expression de transformation est présentée par [27] .

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

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

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 (IV.11) et (IV.12) peuvent être simplifiées comme suit [32]

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

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

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 (IV.13) et (IV.14), nous trouvons les expressions suivantes [27] , [31] :

$$i_{sd}(t)_{\text{sain}} = \frac{\sqrt{6}}{2} \left[\sum_{h=1}^m \left[\hat{I}_{THh} \sin(2\pi TH t) + \sum_{k=1}^n \left[\hat{I}_{S^{\pm}h} \sin(2\pi S^{\pm} t) + \hat{I}_{R^{\pm}k} \sin(2\pi R^{\pm} t) + \hat{I}_{E^{\pm}k} \sin(2\pi E^{\pm} t) \right] \right] \right] \quad (\text{IV.15})$$

$$i_{sq}(t)_{\text{sain}} = \frac{\sqrt{6}}{2} \left[\sum_{h=1}^m \left[\hat{I}_{THh} \cos(2\pi TH t) + \sum_{k=1}^n \left[\hat{I}_{S^{\pm}h} \cos(2\pi S^{\pm} t) + \hat{I}_{R^{\pm}k} \cos(2\pi R^{\pm} t) + \hat{I}_{E^{\pm}k} \cos(2\pi E^{\pm} t) \right] \right] \right] \quad (\text{IV.16})$$

Maintenant, on va faire la visualisation expérimentale de cette théorie.

3-Analyse du spectre MCSA :

3-1- Défaut de rupture de barres rotoriques :

S'il y aurait un défaut rotorique, nous pouvons constater en visualisant le spectre du courant [27] , [31]

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 : $|13f_s - N_r f_r|$, $|15f_s - N_r f_r|$, $|11f_s - N_r f_r|$ 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 : $5f_s$, $13f_s$, $15f_s$ tels 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 [29] , [30] .

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:

$$i_{sa}(t)_{\text{défaut}} = \sum_{h=1}^m \left[\hat{I}'_{THh} \cos(2\pi TH t) + \sum_{k=1}^n \left[\hat{I}'_{S^{\pm}h} \cos(2\pi S^{\pm} t) + \hat{I}'_{R^{\pm}k} \cos(2\pi R^{\pm} t) + \hat{I}'_{E^{\pm}k} \cos(2\pi E^{\pm} t) \right] \right] \quad (\text{IV.17})$$

Avec

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

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

4-Résultats simulation et expérimental de l'analyse spectrale du courant statorique :

Nous présenterons dans ce chapitre, l'analyse spectrale du courant statorique avec un court Fréquence et Hautes fréquences avec ses harmoniques du temps en utilisant la transformé de Fourier rapide (FFT)

4-1-Résultats de simulation et expérimentaux de l'analyse spectrale:

4-1-1-Spectre du courant statorique (Etat sain) :

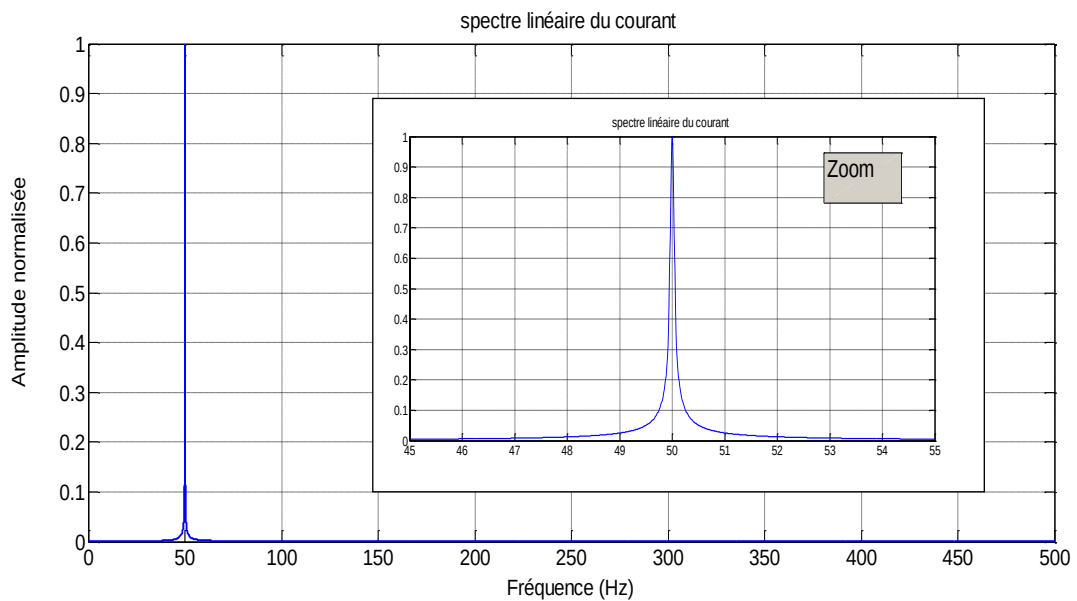


Figure IV.1: Spectre de simulation du courant statorique (Etat sain).

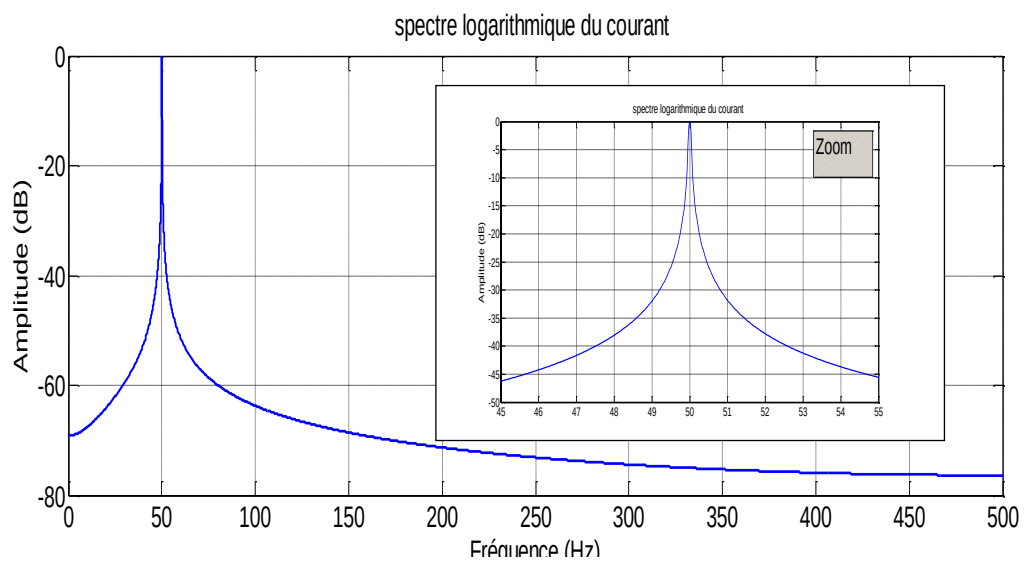


Figure IV .2: Spectre de simulation logarithmique du courant statorique (Etat sain).

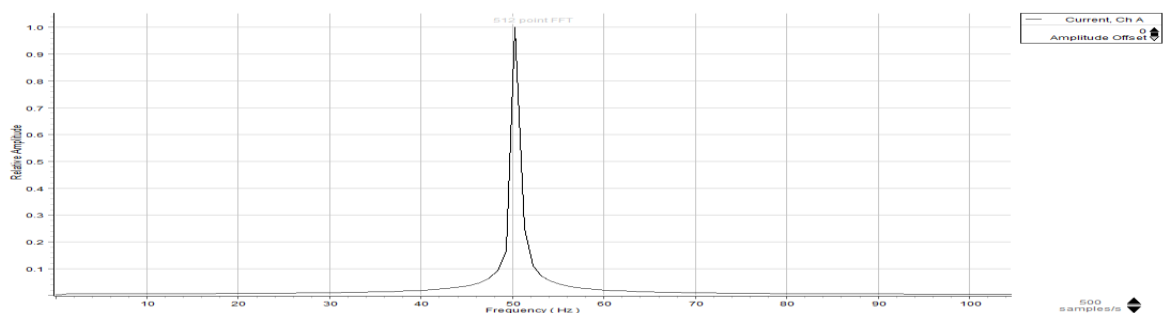


Figure IV.3: Spectre expérimental du courant statorique (Etat sain).

4-1-2-Spectre du courant statorique (défaut rotorique) :

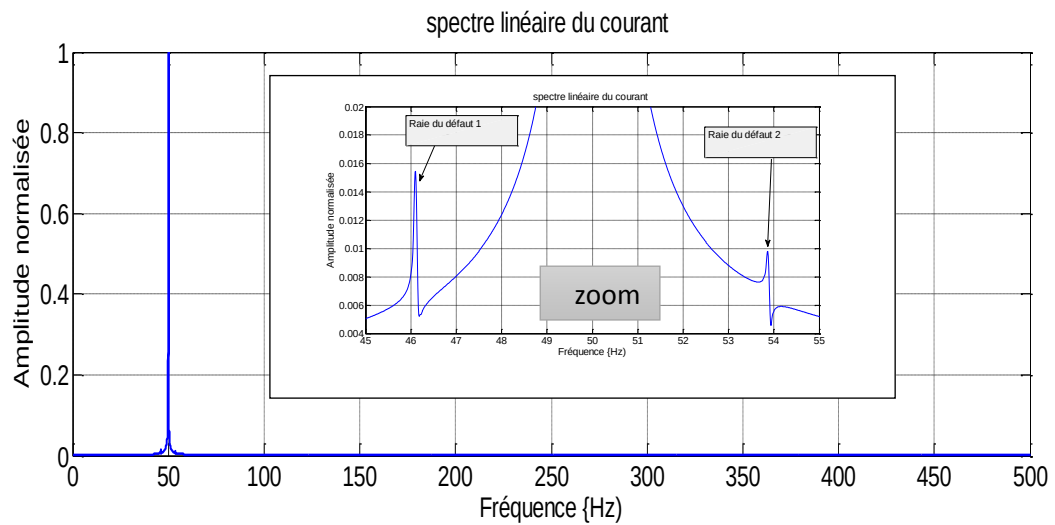


Figure IV.4: Spectre de simulation du courant statorique (défaut rotorique).

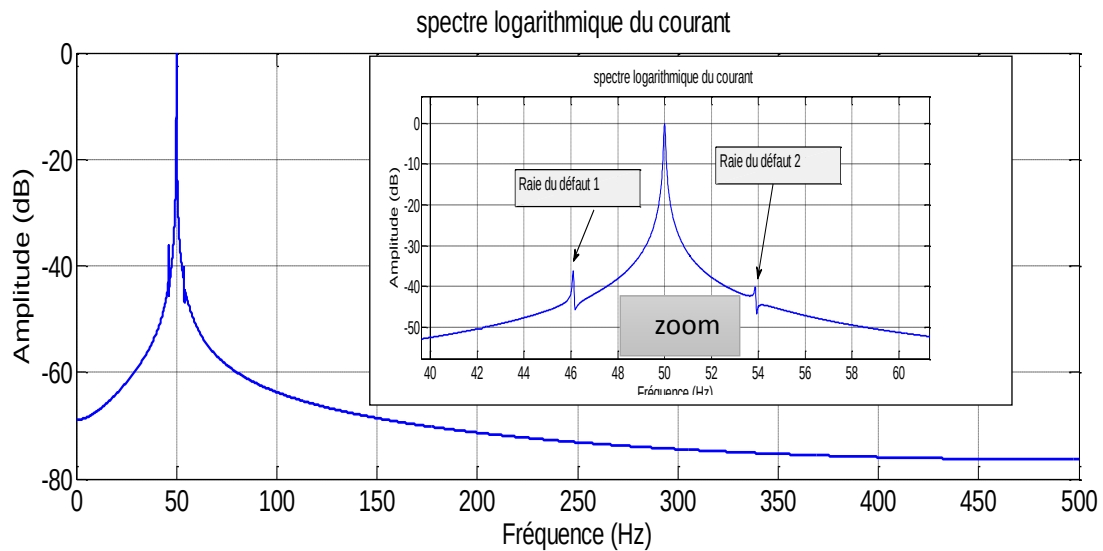


Figure IV.5: Spectre de simulation logarithmique du courant statorique (défaut rotorique).

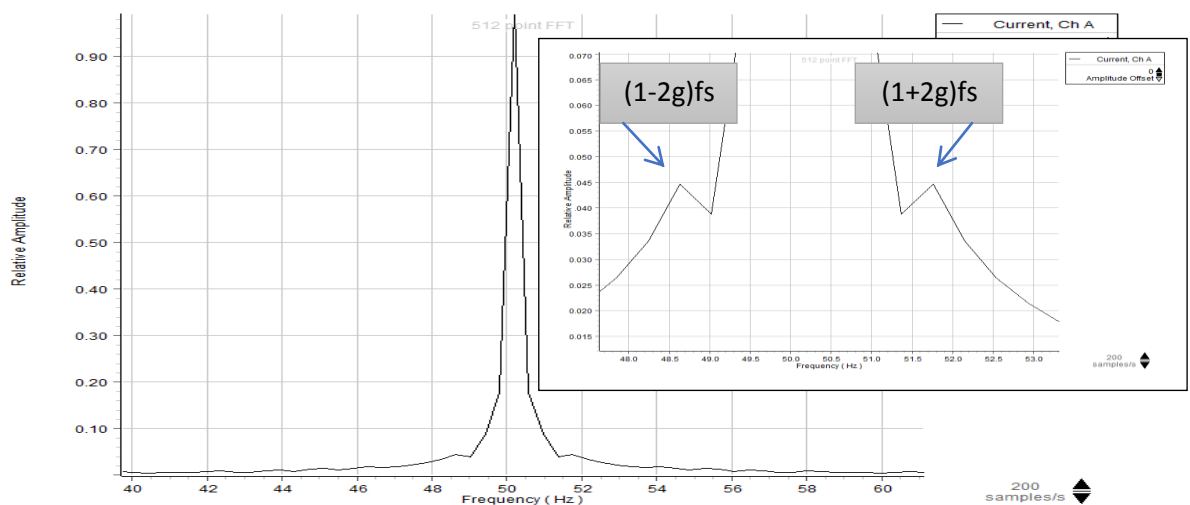


Figure IV.6: Spectre expérimental du courant statorique (défaut rotorique).

4-2-Résultats expérimental de l'analyse spectrale de courant statorique avec les harmoniques du temps:

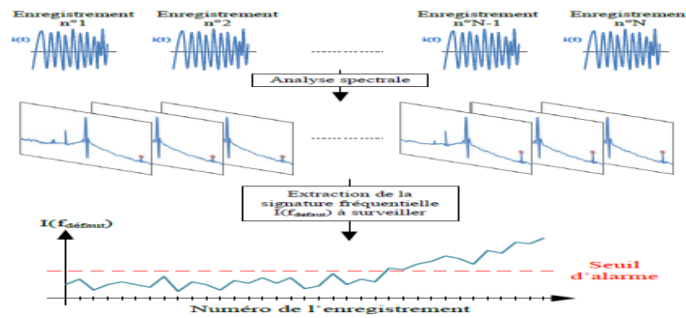


Figure IV.7: Principe de fonctionnement du diagnostic par l'approche signal dans le domaine fréquentiel. Le comportement de l'harmonique de temps I_{th} est surveillé afin de détecter la présence du défaut associé[15].

4-2-1-Cas d'une machine saine :

4-2-1-1-Cas d'une machine saine 0-500Hz- marche à vide 0Nm:

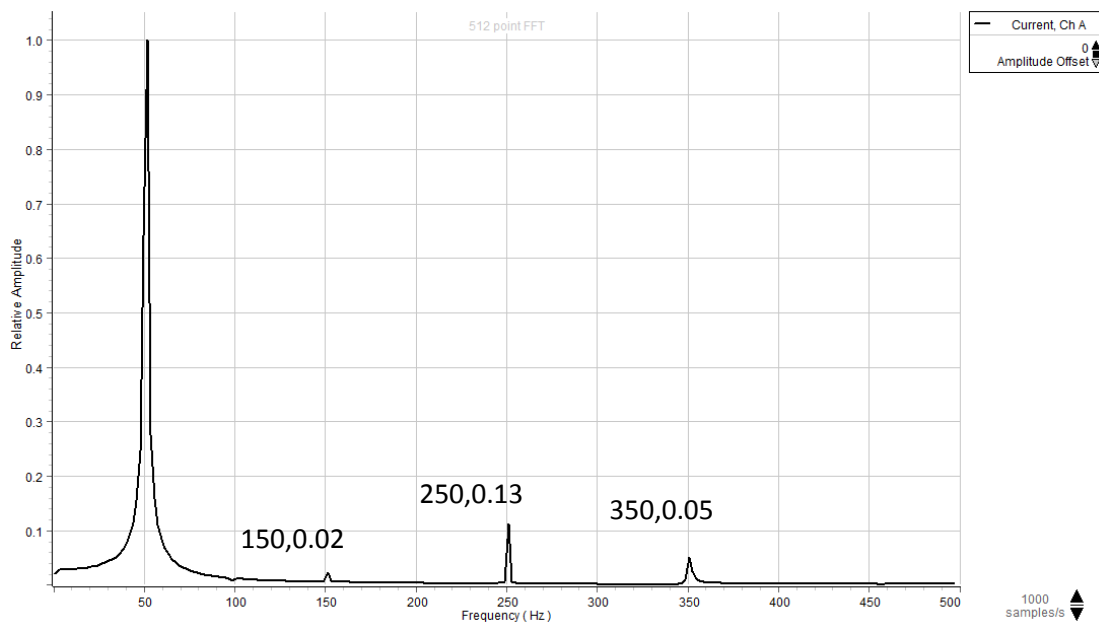


Figure IV.8: Spectre expérimental du courant statorique avec les harmoniques de temps (Etat sain) -0-500Hz-marche à vide 0Nm

4-2-1-2-Cas d'une machine saine 0-750Hz- marche à vide 0Nm :

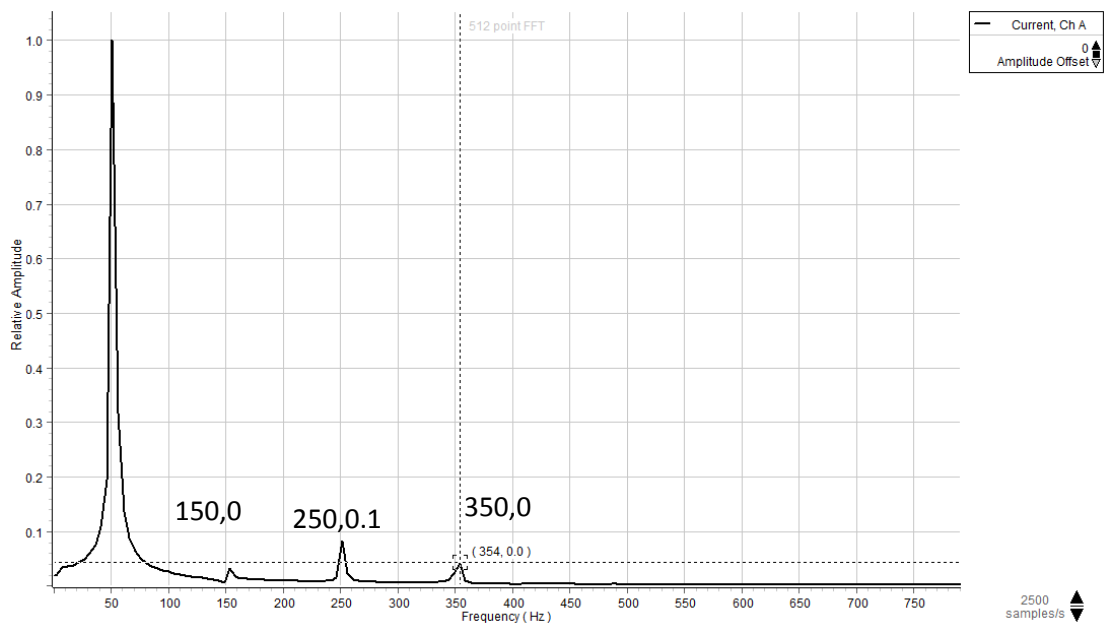


Figure IV.9: Spectre expérimental du courant statorique avec les harmoniques de temps
(Etat sain) -0-750Hz- marche à vide 0Nm

4-2-2-Cas d'une machine avec des défauts rotoriques :

4-2-2-1-Cas d'une machine avec des défauts rotoriques 0-500Hz- marche à vide 0Nm:

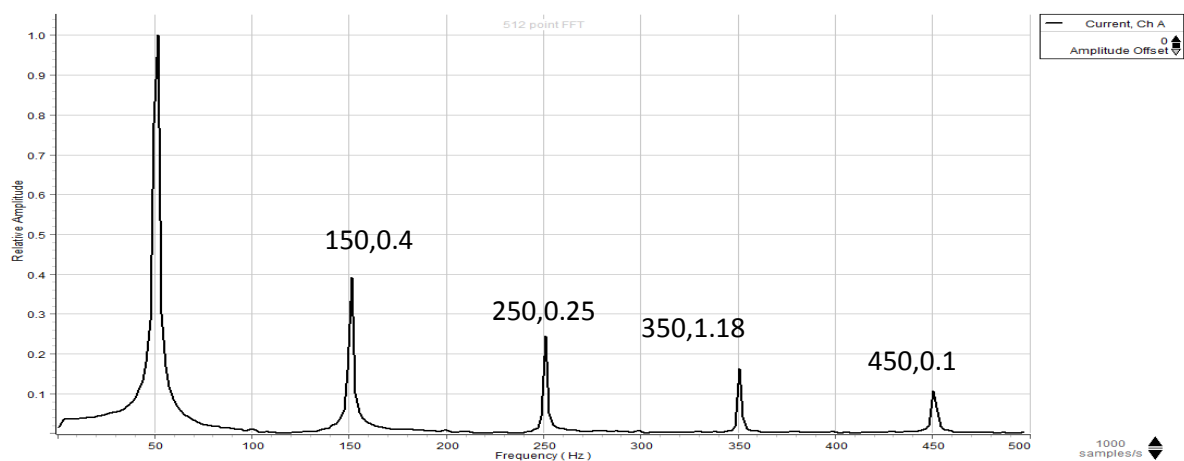


Figure IV.10: Spectre expérimental du courant statorique avec ses harmoniques de temps
(défaut rotorique) -0-500Hz marche à vide 0Nm.

4-2-2-2-Cas d'une machine avec des défauts rotorique 0-1000Hz- marche à vide 0Nm :

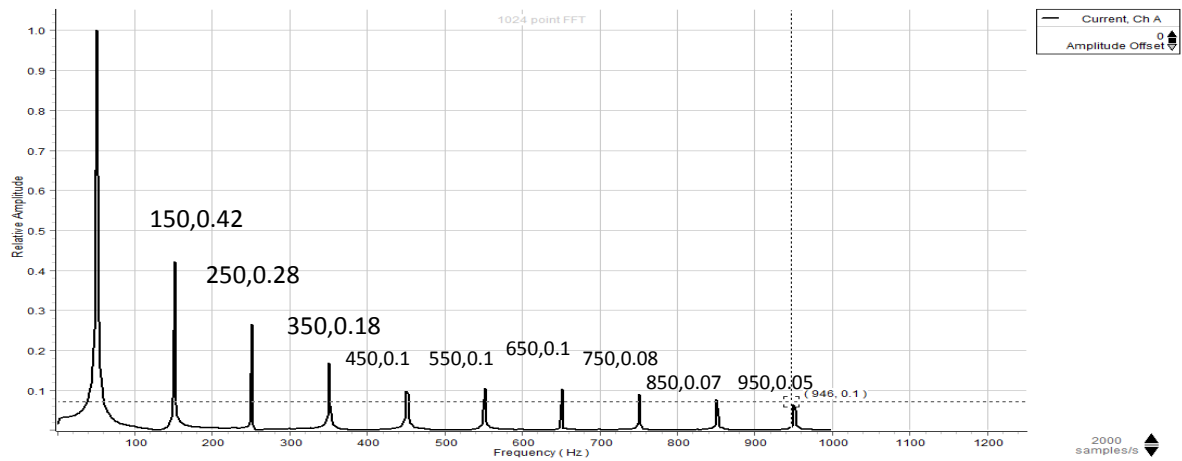


Figure IV.11: Spectre expérimental du courant statorique avec ses harmoniques de temps (défaut rotorique) 0-1000Hz marche à vide 0Nm

4-2-2-3-Cas d'une machine avec des défauts rotorique 0-1200Hz- marche à vide 0Nm :

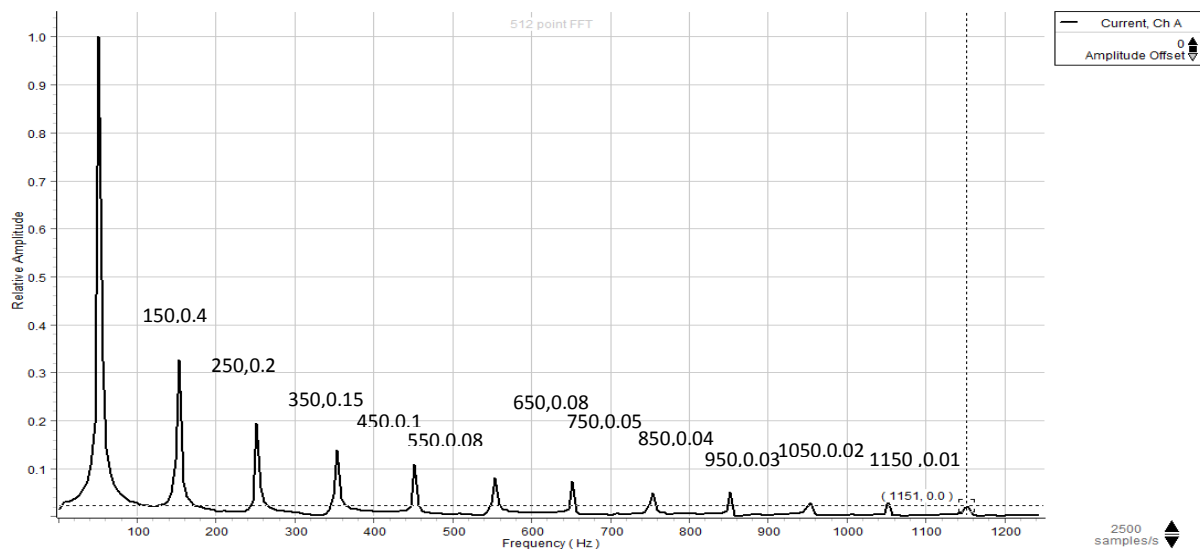


Figure IV.12: Spectre expérimental du courant statorique avec les harmoniques de temps (défaut rotorique) 0-1200Hz- marche à vide 0Nm

5-Pourcentage des harmoniques de temps :

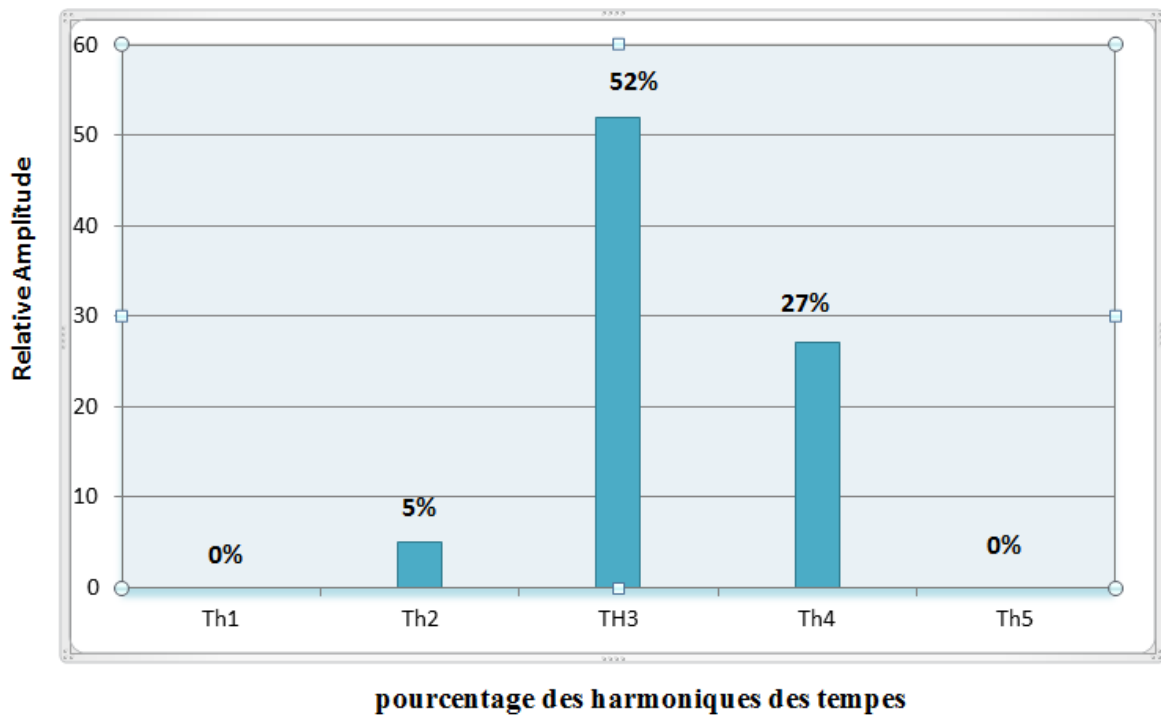


Figure IV.13: Représentation relative des harmoniques de temps

6- Interprétations :

Comparaison entre les spectres de simulation et expérimentaux du courant statorique ; on remarque :

- ❖ Les **Figures (IV.1,2,3)**, représentent le courant statorique à l'état sain. C'est évident qu'on n'observe aucune raie latérale. Il est important de noter qu'en réalité, il y a toujours un certain degré d'asymétrie naturelle (de construction) dans le rotor, ce qui engendre l'apparition des raies, mais avec des amplitudes faibles.
- ❖ Les **Figures (IV.4,5,6)**, montrent les raies lorsqu'il y a un défaut rotorique de fréquence $(1-2g)f_s$ et $(1+2g)f_s$
- ❖ les **Figures (IV.8,9)** nous font observer la décomposition des harmoniques Th1 avec une amplitude égale à 1, Th2 avec une amplitude égale à 0.02, Th3 avec une amplitude égale à 0.13 et Th4 avec une amplitude égale à 0.05 dans le cas d'une machine saine.
- ❖ les **Figure (IV.10,11,12)** nous mène à observer d'un plus grand nombre d'harmoniques de temps avec un grande amplitude Th1 avec une amplitude égale à 1,

Th2 avec une amplitude égale à 0.4, Th3 avec une amplitude égale à 0.25 et Th4 avec une amplitude égale à 1.18 dans le cas d'une machine avec des défauts rotorique.

- ❖ La **Figure IV.13** représente un pourcentage des harmoniques de temps où leur pourcentage par rapport aux harmoniques sains Th2 égale 5%, Th3 égale 52%, Th4 égale 27% et Th5 égale 0%.

On note : On remarque que les Th3 ce sont les meilleurs harmoniques pour détecter les défauts du rotor.

9-Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons étudié en utilisant un modèle de diagnostic, l'analyse spectrale du courant statorique avec les harmoniques de temps .

Pour l'analyse spectrale ,on utilise la transformer de Fourier rapide (FFT), cette approche nous a permis d'identifier les signatures fréquentielles causées par la rupture d'une ou plusieurs barres et portions d'anneaux de la cage rotorique de la machine asynchrone.

Il s'est avéré que la surveillance de l'amplitude des composantes de fréquence $(1 \pm 2k)fs$, présente dans le spectre fréquentiel du courant statorique permet de détecter la présence d'un défaut au niveau de la cage rotorique de la machine asynchrone, comme il est prouvé dans les travaux précédente .

D'après les résultats de la simulation nous avons trouvé que les harmoniques de temps, augmentent avec le nombre de barres et de portions d'anneaux cassées, et dépendent aussi de leurs mutuelles positions.

Les résultats obtenus par ces méthodes on été jugés satisfaisants comparativement à ce qui a été trouvé jusqu'a nos jours par validation.

De ce travail, nous concluons que les harmoniques th3 Il est plus sensibles de détecter les défauts du rotor

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 (ou d'une portion d'anneaux) de la cage d'écureuil s'obtiennent très simplement, il suffit seulement d'augmenter la résistance de la barre incriminée (ou la résistance de la portion d'anneaux considérée).

Dans le troisième chapitre, nous avons construit un programme de simulation à l'aide du logiciel MATLAB 2011a. Ceci, nous a permis de visualiser les différentes grandeurs de la machine (courant statorique, couple électromagnétique, vitesse de rotation et le courant dans les barres rotoriques) pour fonctionnement à l'état sain et avec défaut, et différents changements sur les régimes permanents et transitoires de la machines et sur sa caractéristique mécanique.

Dans le quatrième chapitre nous avons traité quelques techniques utiliser récemment dans le diagnostic, commencent par la transformée de Fourier rapide (FFT) (Faste Fourier Transforme) est exploitée pour l'étude et l'analyse spectrale du courant statorique et par conséquent de déterminer les composantes $(1\pm 2k)$ fs caractérisant les défauts rotoriques.

Et nous avons montré l'influence du nombre de barres et de portions cassées, leur mutuelle position ainsi que la variation du glissement sur ces composantes. Nous avons trouvé que l'amplitude de ces raies augmente avec le nombre de barres cassées. Ceci, donne une indication sur la sévérité du défaut, comme nous avons trouvé aussi, que le défaut dû aux cassures des portions d'anneaux est plus sévère que celui dû aux cassures de barres rotoriques.

A la fin de ce travail, on a fait l'état d'une méthode permettant la surveillance d'une machine asynchrone triphasée lorsqu'un défaut apparaît. Pour cette surveillance, nous avons développé un modèle de la machine qui permet d'étudier les phénomènes répercutés sur les performances de la machine

D'après les résultats de la simulation nous avons trouvé que les harmoniques de temps, augmentent avec le nombre de barres et de portions d'anneaux cassées, et dépendent aussi de leurs mutuelles positions.

Les résultats obtenus par ces méthodes ont été jugés satisfaisants comparativement à ce qui a été trouvé jusqu'à nos jours par validation.

De ce travail, nous concluons que les harmoniques th3 Il est plus sensibles de détecter les défauts du rotor

Notre perspective est d'étudiée le diagnostic avec les méthodes d'intelligence artificiel telles que : réseaux de neurones, algorithme génétique,....

Bibliographie

- [1] C.C. CESAR DA COSTA , M.K. Masamori Kashiwagi and M. H .Mauro Hugo Mathias, "Rotor failure detection of induction motors by wavelet transform and Fourier transform in non-stationary condition", Contents lists available at ScienceDirect Case Studies in Mechanical Systems and Signal Processing 1 (2015) pp15–26
- [2] ABLA BOUGUERNE, « Diagnostic automatique des défauts des moteurs asynchrones»Thèse de Magister En Electrotechnique , Université MENTOURI-CONSTANTINE 2009
- [3] ABDELKEBIR ADEL, «Diagnostic d'un moteur à Induction en utilisant la transformée en ondelettes»Thèse de MASTER , UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA 20 /05/ 2017
- [4] HAKIMA CHERIF " détection des défaut statorique et rotorique dans une machine asynchrones en utilisant l'analyse par FFT et ondelettes" Thèse de Magister Univ Mohammed khider Biskra 30/09/2014.
- [5] B. BESSAM , A.Menacer , M.Boumehraz and H.Cherif "Detection of broken rotor bar faults in induction motor at low load using neural network "Contents lists available at ScienceDirect ISA Transactions 2016.
- [6] BESSAM BESMA «Analyse et détection des défauts dans la machine asynchrone à base des techniques intelligentes » Thèse de Doctorat LMD en :Automatique Univ Mohammed khider Biskra 02/06/2016.
- [7] HUBERT RAZIK « Le Contenu Spectral Du Courant Absorbé Par La Machine Asynchrone En Cas de Défaillance, un Etat de l'art »Faculté des Sciences , Nancy, CEDEX , juin 2002.
- [8] OLIVIER ONDEL «Diagnostic par reconnaissance des formes : application a un ensemble convertisseur – machine asynchrone» Thèse de doctorat. L'école centrale de Lyon 2006.

[9] ALLAL ABDERRAHIM «Grandeurs non invasives pour le diagnostic des machines asynchrones » Thèse de Magister en Electrotechnique Univ FERHAT ABBAS –SETIF 05/05/2010.

[10] Mr HARIR MILOUD «Etude des Défaits dans La Machine Asynchrone à Cage d'Ecureuil par l'Emploi de la Fonction d'Enroulement Modifiée » Thèse de Magister en Electrotechnique option : Commande Electrique Université des Sciences et de la Technologie d'Oran
Mohamed BOUDIAF 2008/2009.

[11] BESSOUS NOUREDDINE «Experimental Exploitation for the Diagnosis to the Induction Machine under a Bearing Fault – using MCSA» IEEE 2015.

[12] MAGHRAOUI ABDELWAHAB, DEBOUCHA ABDELHAKIM "Diagnostic des défauts dans les moteurs asynchrones triphasés à cage" memoire de fin d'études en vue de l'obtention du diplome d'ingenieur d'état en genie electrotechnique UNIV MOHAMED BOUDIAF DE M'SILA 2005 / 2006.

[13] 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.

[14] BELHAMDI SAAD «Diagnostic Des Défaits De La Machine Asynchrone Contrôlée Par Différentes Techniques De Commande», Thèse présentée en vue de l'obtention Du diplôme de Doctorat en sciences, Université Mohamed Khider – Biskra, Soutenue publiquement le 08/05/2014.

[15] M. ETIENNE FOURNIER «protocole de diagnostic des entrainements asynchrones par références: application a la détection des déséquilibres mécaniques et des défauts de courroie», these doctorat de l'université de Toulouse jeudi 26 novembre 2015.

[16] BENNEDJAI SOUMAYA «Contribution à l'amélioration de la sûreté d'exploitation des moteurs à induction», Thèse Présentée en vue de l'obtention du diplôme de : Doctorat universite badji mokhtar annaba, Année : 2015/2016

[17] KHATRAOUI ABDERREZAK, ZAID MANSOUR «Diagnostic Des Machines Asynchrones Triphasées», Thèse de MASTER ACADEMIQUE , UNIVERSITE Echahid Hamma Lakhdar D'El-oued soutenu en Mai 2017.

[18] GHOGGAL ADEL « diagnostic de la machine Asynchrone triphase :dédié à la détection des défauts »Thèse de Magister , Université de Batna , Soutenue 2005.

[19] KHATIR ABDEL FATAH «Etude comparative des modèles des machines asynchrones utilisés en diagnostic des défauts»Thèse de Magister , Université ferhat abbas –setif UFAS(Algérie) , Soutenue 11 / 04 / 2009.

[20] G.DIDIER «Modélisation et diagnostic de la machine asynchrone en présence de défaillances » Thèse de doctorat. Université Henri Poincaré ,Nancy I,2004.

[21] BENHAMED ABDELGHANI,BRIK ABDESSATTAR «Diagnostic des défauts rotoriques du moteur asynchrone triphasé par l'utilisation du modèle multi-enroulements», Mémoire de Fin d'Études En vue de l'obtention du diplôme de MASTER ACADEMIQUE, Université Echahid Hamma Lakhdar D'El-oued ,soutenu en Mai 2017.

[22] 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.

[23] MOHAMED EL KAMEL OUMAAMAR «surveillance et diagnostic des défauts rotoriques et mécaniques de la machine asynchrone avec alimentation équilibrée ou déséquilibrée» Thèse de doctorat,Université de Lorraine, Soutenue publiquement le 19 Mars 2012 devant la commission d'examen.

[24] TIDJANI ABD EL JAOUAD, AL AMOUDI BADREDDINE «Identification paramétrique d'un moteur asynchrone à cage d'écureuil par la technique «optimisation d'essaim de particules»» Mémoire Master Académique université kasdi merbah ouargla Soutenu publiquement Le :02/06/2016.

[25] BERREHAIL BELKACEM «IDENTIFICATION DES PARAMETRES D'UN MOTEUR ASYNCHRONE A CAGE» Mémoire de Fin d'Etudes En vue de l'obtention du diplôme: MASTER , Université Mohamed Khider Biskra, Soutenu le : 02 Juin 2013.

[26] TAREK BOUMEGOURA «recherche de signature electromagnetique des defauts dans une machine asynchrone et synthese d'observateurs en vue du diagnostic» these presentee devant l'ecole centrale de lyon pour obtenir le grade de docteur , preparee au sein de l'ecole doctorale electronique, electrotechnique, automatique de lyon soutenue le 26 mars 2001 devant la commission d'examen.

[27] A.ALLAL, B.CHETATE «high sensitivity detection of the stator short-circuit faults in induction motor using hilbert park's vector product» research article, journal of fundamental and applied sciences issn 1112-9867 , department of electrical engineering, echahid hamma lakhdar university of el-oued, algeria and research laboratory on the electrification of industrial enterprises, university of m'hamed bougara of boumerdes, algeria, received: 31 december 2018 / accepted: 29 april 2019 / published online: 01 may 2019. available online at <http://www.jfas.info>

[28] M. BOUCHERMA, M. Y. KAIKAA ,A. KHEZZAR , Park model of squirrel cage induction machine including space harmonics effect, Journal of Electrical Engineering , Vo l 57 (No.4), 2006, p 193-199 .

[29] M. SAHRAOUI , A. GHOGGAL, S. GUEDIDI , et al. ,Detection of inter-turn short-circuit in induction motors using Park–Hilbert method, International Journal of System Assurance Engineering and Management , Vol 5 (No.3),2014,p 337-351.
DOI: 10.1007/s13198-013-0173-6

[30] M. SAHRAOUI , S. E. ZOUZOU, A. GHOGGAL ,et al. ,A new method to detect inter-turn short- circuit in induction motors,19nd ed., International conference on Electrical Machine (ICEM,2010), Sept ,2010,(Rome,Italy), IEEE, 2010 ,p 1-6.
<https://doi.org/10.1109/ICELMACH.2010.5607854>

[31] T. SRIBOVORNMONGKOL ,Evaluation of motor online diagnosis by FEM simulations, Master's Thesis ,Royal Institute of Technology Stockholm, Sweden , 2006.

[32] J. ZAREI , J. Poshtan , An advanced Park's vectors approach for bearing fault detection, Tribol. Int., Vol 42(No.2), 2009, p 213-219. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2008.06.002>

[33] M. SAHRAOUI, SE. ZOUZOU, A. MENACER, A. ABOUBOU et A. DERGHAL
«diagnostic des défauts dans les moteurs Asynchrones triphases a cage» partie i : modèle dédié à la simulation des ruptures de barres,courrier du savoir – N°05, Juin 2004, pp. 09-16, Laboratoire de Modélisation des Systèmes Energétiques Département d'Electrotechnique. Université Mohamed KHIDER BP 145, Biskra. Algérie. 2004

Résumé

Abstract

The presented work concern the diagnosis of squirrel cage induction motors failures, using new techniques such as spectral analysis, neural networks and fuzzy logic. It is obviously impossible to identify, simultaneously, all failures possibilities and combinations.

So we will examine more precisely the rotor failures. For this reason we used the multi-winding model to analyze the machine behavior's, in absence and presence failure's.

Keywords: Squirrel cage induction machine, Rotor defect, ,diagnosis, surveillance, detection., Multi-winding model.

Résumé

Le travail présenté s'inscrit dans le cadre du diagnostic des défauts rotoriques dans les moteurs asynchrones triphasés à cage d'écureuil, utilisant des nouvelles techniques tel que l'analyse spectrale , les réseaux de neurones et la logique floue.

Il est évidemment qu'il est impossible de cerner, simultanément, toutes les combinaisons possibles des défauts où peuvent apparaître. Nous avons examiné plus précisément les défauts qui peuvent apparaître au niveau du rotor. Pour cela nous avons utilisé le modèle multi-enroulements de pour analyser le comportement de la machine en absence et en présence des défaillances.

Mots-clés: Machine asynchrone triphasée à cage, Défaut rotorique, , diagnostic, surveillance ,détection ,Modèle multi-enroulement,

ملخص

العمل المقدم في هذه المدكرة يدخل تحت إطار تشخيص أعطاب المحركات الغير متزامنة دات القفص السنجابي ، بإستخدام تقنيات جديدة مثل التحليل الطيفي لتيار الكهربائي ، الشبكات العصبية والمنطق الغامض.

من البديهي أنه يستحيل تديد كل الأعطاب وجميع إحتمال حدوثها في أن واحد. لهذا قمنا بدراسة الأعطاب التي يمكن أن تحدث في العضو الدوار بصفة خاصة ، مستخدمين في ذلك النموذج المتعدد اللفات لتحليل سلوك المحرك في غياب ووجود العطب .

كلمات مفتاحية : المحركات الغير متزامنة دات القفص ، خطأ الدوار ، تشخيص ، المراقبة ، الكشف ، نموذج متعدد اللفات

Annexes a

Paramètres du moteur utilisé [17]

Symboles	Paramètres	Valeurs
p	Puissance nominale	$P=3\text{kw}$
V_n	Tension nominale	220/380 V
N_r	Nombre de barres rotoriques	24
p	Nombre de paires de pôles	1
N_t	Nombre de spires en série par phase	360
f_s	Fréquence d'alimentation	50 Hz
J	Moment d'inertie	$0.0077 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$
e	Epaisseur de l'entrefer	$0.172\cdot 10^{-3} \text{ m}$
R_s	Résistance d'une phase statorique	3Ω
R_e	Résistance d'un segment d'anneau de court-circuit	$1.23\cdot 10^{-6} \Omega$
R_b	Résistance d'une barre rotorique	$1.93\cdot 10^{-4} \Omega$
L_b	Inductance de fuite d'une barre rotorique	$0.6031\cdot 10^{-6} \Omega$
L_e	Inductance de fuite d'un anneau de court-circuit	$2\cdot 10^{-9} \text{ H}$
$L_{sl} \text{ ou } L_{sf}$	Inductance de fuite d'une phase statorique	$13.8 \cdot 10^{-3} \text{ H}$
L	Longueur de la machine	0.096 m
R	Rayon moyen de l'entrefer	$39.55\cdot 10^{-3} \text{ m}$
$K0$		$4.54\cdot 10^{-4}$
f_r	coefficient de frottement	$5.70 \cdot 10^{-4} \text{ Nm}\cdot\text{s} / \text{rad}$

Tableau: Résultats des paramètres de la machine asynchrone

Annexes b

Méthodes de diagnostic de type MCSA[15].

Approche temporelle

La recherche de paramètres ou de signatures caractéristiques d'un défaut est très rarement effectuée dans le domaine temporel. Les approches fréquentielles et temps-fréquences sont en effet privilégiées dans la majorité des travaux relatifs au diagnostic des machines électriques. Cependant, certaines études se sont intéressées à l'apport de ce type d'analyse pour le diagnostic des machines électriques.

De nombreuses signatures temporelles sont introduites dans, Les auteurs de ces études présentent notamment des paramètres énergétiques (valeur efficace, amplitude crête-à-crête etc.), des moments statistiques (écart-type, skewness, kurtosis, etc.) et autres (facteur de crête, de forme, etc.) en vue d'une utilisation pour la surveillance des machines électriques. Dans et , certains de ces paramètres temporels sont intégrés dans un système de fusion de données avec d'autres signatures issus de différents outils. Ces méthodes sont testées expérimentalement sur la détection de différents types de défauts de roulements et l'intégration

de paramètres temporels contribue à leur bonne détection. Nous pouvons enfin noter que l'analyse temporelle des signaux vibratoires et acoustiques a également été souvent utilisée dans la surveillance de différents types de défauts de roulements .

Ce type d'analyse reste cependant marginal dans le diagnostic des défauts présentés dans le tableau 1.2, en particulier lorsque des signaux électriques sont utilisés pour réaliser la détection.

Approche fréquentielle

De nombreuses études ont porté sur la recherche de signatures caractéristiques des défauts mécaniques et électriques dans le domaine spectral. Beaucoup de défauts provoquent en effet l'apparition de certains harmoniques dans les différentes grandeurs du système. Les fréquences de ces harmoniques, ou signatures, peuvent être prédites et le suivi de ces composantes permet alors de surveiller l'évolution du défaut recherché.

Dans, plusieurs méthodes de diagnostic des défauts de roulements basées sur l'analyse spectrale classique des courants statoriques sont présentées. La transformée de Fourier rapide est généralement utilisée pour passer du domaine temporel au domaine fréquentiel et ainsi estimer les signatures. Cette approche est utilisée par exemple pour les défauts de roulements mais ses dérivés comme la densité spectrale de puissance ou le périodogramme peuvent également être utilisés .

Ces mêmes outils du traitement du signal peuvent également être appliqués sur les courants statoriques pour la détection d'autres défauts d'origine mécanique. Le spectre des courants est en effet étudié dans et afin de fournir des signatures adaptées à la surveillance des boîtes de vitesse. Des méthodes de détection basées sur le même principe sont également proposées dans pour la détection des défauts de balourd et dans et pour la surveillance des problèmes d'alignement et d'excentricité.

Enfin, des signatures caractéristiques de ces défauts sont également visibles dans d'autres grandeurs que les courants statoriques. Dans des harmoniques caractéristiques du défaut de barres cassées sont détectés dans le champ magnétique externe d'un moteur asynchrone. Le spectre de la puissance instantanée est analysé dans et permet de fournir des signatures sensibles aux défauts de balourd et d'excentricité. L'analyse spectrale de la fréquence et de l'amplitude instantanée des courants, respectivement notées FI et AI, peut également aboutir à d'excellentes signatures de défaut et constitue une piste intéressante pour la surveillance des défaillances d'origine mécanique .

Le principe général du diagnostic via le suivi de signatures de défaut dans le domaine fréquentiel est illustré sur la figure 1.8 dans le cas général d'un défaut générant une signature à la fréquence f_{defaut} dans le signal de courant $i(t)$.

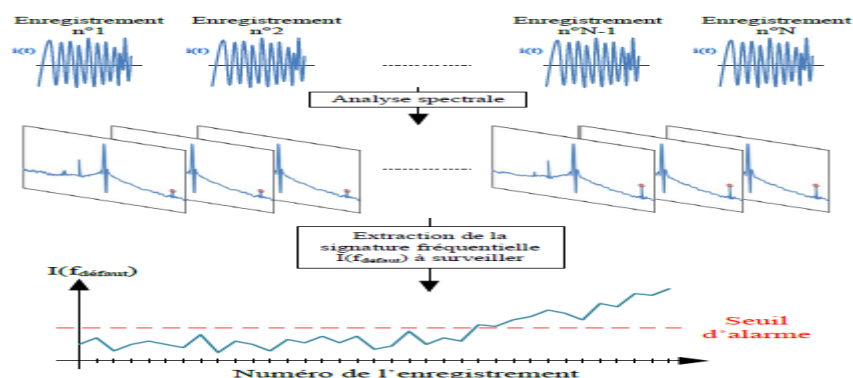


Figure 1.8 – Principe de fonctionnement du diagnostic par l'approche signal dans le domaine fréquentiel. Le comportement de l'harmonique du courant $I(f_{\text{defaut}})$ est surveillé afin de détecter la présence du défaut associé[15].

Approche temps-fréquence

Dans certaines conditions, les approches temporelle et fréquentielle ne permettent pas de réaliser correctement le diagnostic des machines électriques. D'une part, selon l'application entraînée par le moteur électrique (automobile, levage, etc.), le point de fonctionnement de celui-ci peut varier de manière continue et imprévisible au cours du temps et rendre impossible l'utilisation des outils de l'analyse fréquentielle classique (transformée de Fourier, périodogramme, etc.). Dans ce cas, l'analyse temps-fréquence (ou temps-échelle), permettant de représenter l'évolution du contenu spectral en fonction du temps, peut permettre le diagnostic. Les outils temps-fréquence couramment utilisés sont les ondelettes, la transformée de Fourier à court-terme (STFT), la transformée de Wigner-Ville et d'autres représentations temps-fréquence des signaux étudiés. De plus, certains travaux ont permis d'améliorer la lisibilité et l'interprétation des représentations temps-fréquence obtenues avec ces outils.

Cette problématique n'est cependant pas présente dans notre étude où le point de fonctionnement du système (ventilateur, pompe ou compresseur) peut être considéré comme stationnaire sur une période de quelques secondes. En revanche, les méthodes d'analyse dans le domaine temps-fréquence peuvent également être utiles en fonctionnement stationnaire lorsque la signature du défaut surveillé n'est pas connue précisément ou encore lorsque le défaut lui-même possède un caractère non-stationnaire. Le bilan contrasté de ces méthodes sera présenté dans la section 1.2.5