

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



Mémoire de Fin d'Études

Présenté à

L'Université Echahid Hamma Lakhdar d'El Oued

Faculté de Technologie

Département de Génie Electrique

En vue de l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

En Machines électriques

Présenté par

SOUAKER Med Elhadi- GUETROUN Abdelali et ZEKRI Abdelkader

Thème

**diagnostic des défauts statoriques des machines
asynchrones**

Soutenu le 16/06/2019. Devant le jury composé de :

Dr. BESOUS Nouredine

Maitre de conférences Président

Dr. ALLAL Abderrahim

Maitre de conférences Rapporteur

Mr. CHERIF Hakima

Maitre de conférences Examineur

Promotion juin 2019

Remerciements

Nos remerciements vont tout premièrement, le bon DIEU le tout puissant de nous avoir donné le courage, la patience et la santé durant toutes ces années et que grâce à lui ce travail a pu être réalisé.

Nous tenons ainsi à exprimer nos vifs remerciements et notre profonde gratitude à Dr. ALLAL ABDELRAHIM pour les conseils précieux, les orientations, et l'aide qu'elle nous a accordé pour mener ce travail à terme.

Nous remercions également les membres de juré d'avoir accepté d'examiner ce travail.

Notre profonde reconnaissance et nos respects les plus distingués à l'ensemble des enseignants de la faculté de technologie de l'université d'Eloued, qui ont assuré notre formation tout au long de nos années d'études.

Nous voudrions associer à nos remerciements toutes personnes qui ont contribué de près ou de loin à ce travail.

A ce jeu, il est impossible de ne pas oublier des noms.

On voudrait présenter d'avance nos excuses à ceux qui pourraient alors subir les affres de l'oubli.

Dédicaces

Je dédie ce travail :

A ma très chère mère, pour son soutien et sa confiance, que Dieu, lui procure
santé et longue vie.

A mon défunt père, parti à l'éternité, mais qui a été toujours présent dans mon
cœur, je lui rends un grand hommage.

A ma grand-mère et a tout mes oncles

A toute ma famille

A tout mes amis (es) et collègues

A tous ceux que j'aime

MOHAMMED EL-HADI

Dédicaces

Je dédie ce travail :

A mes très chers parents, pour leur soutien et leur confiance, que Dieu, leur
procure santé et longue vie.

A mes frères

A mes sœurs

A mes grands parents

A toute ma famille

A tout mes amis (es) et collègues

A tous ceux que j'aime

ZEKRI

Dédicaces

Je dédie ce travail :

A mes très chers parents, pour leur soutien et leur confiance, que Dieu, leur
procure santé et longue vie.

A mes frères

A mes soeurs

A mes grands parents

A toute ma famille

A tous mes amis (es) et collègues

A tous ceux que j'aime

Abdelali

Sommaire

Sommaire

Listes des figures

Listes des tableaux

Noations et symboles

Introduction général

Chapitre I : Aperçu sur le diagnostic des MAS

I.1- Introduction.....	3
I.2- Diagnostic des machines électriques.....	3
I.3- Constitution des machines asynchrones.....	5
I.3.1- Le stator.....	6
I.3.2- Le rotor.....	7
I.3.3- Les roulements.....	8
I.4- Les défauts des machines asynchrones.....	8
Fig. I.6: Pourcentage Les défauts des machines.....	8
I.4.1- Recherche indispensable des symptômes.....	9
I.4.2 - Défauts mécaniques.....	10
I.4.3- Défauts de roulements.....	10
I.4.4- Défauts d'excentricité.....	10
I.4.5- Défauts électriques.....	11
I.4.6- Les défauts statoriques.....	12
I.4.6.1- Défauts d'isolant dans un enroulement	13
I.4.6.2-Court-circuit entre spires	13
I.4.6.3- Court-circuit entre phases.....	14
I.4.6.4- Court-circuit phase / bâti.....	14
I.4.7- Défauts rotoriques.....	15
I.4.7.1- Cassure de barre.....	15
I.5- les méthode de diagnostic des machine asynchrone.....	17
I.5.2- Diagnostic par l'analyse des tensions statorique induites	17
I.5.3- Diagnostic par mesure du couple électromagnétique.....	17
I.6. Conclusion	18

Chapitre II: Modélisation De La machine Asynchrone

II.1 Introduction	19
II.2 Hypothèses simplificatrices	19
II.3- Le modèle multi enroulement de la mas	20
II.3.1- Modèle multi-enroulements.....	20
II.3. 2-Transformation de PARK.....	25
II.3.3- Expression du couple électromagnétique :.....	29
II.3.4 -Système d'équation global.....	30
II.3.5 -Calcul des inductances.....	32
II.3.5.1- Inductances statoriques	32
II.3.5.2 -Inductances rotoriques	33
II.3.5.3 -Inductances mutuelles entre enroulements statoriques et rotoriques :.....	35
II.3.5.4 Calcul des inductances en cas de court-circuit entre spires Statorique :.....	37
II.5 Conclusion	38

Chapitre III : Simulation des Défauts Statoriques d'un Moteur Asynchrone

III.1- Introduction	40
III.2- Interprétation des résultats de simulation	40
III.3- Défaut de court-circuit	44
III.4 Conclusion	50

Chapitre IV : Résultats Expérimentaux analyse spectrale du courant statorique

IV.1 Introduction.....	51
IV.2 Théorie générale sur les harmoniques de la MAS.....	51
IV.2.1 Etude du courant de stator avec ses harmoniques.....	53
IV.3-Les matériels utilisés	56
IV.4- Réalisation pratique.....	57
IV.5- Résultats expérimentaux.....	58
IV.5.1- Cas d'une machine saine	58
IV.5.2- Cas d'une machine avec court circuit statorique	59
IV.6- Conclusion.....	61

Conclusion générale

Résumé

Bibliographie

Anexe

Liste de figure

Fig I.1: Classification des défauts selon leurs origins.....	4
Fig I.2: Constitution des machines.....	6
Fig I.3: Le stator.....	6
Fig I.4: vue schématique en perspective du rotor.....	7
Fig I.5: Rotor bobiné.....	7
Fig I.6: Pourcentage Les défauts des machines.....	8
Fig I.7: Défauts d'excentricité statique et dynamique.....	11
Fig I.8: Différents défauts au niveau de stator de la machine asynchrone.....	12
Fig I.9: Représentation des différents défauts statoriques concerne le court circuit.....	15
Fig I.10: Défaut de rupture de barres et d'anneau de court-circuit.....	15
Fig I.11: Défaut de rupture de barres.....	16
Fig. II.1: Trois phases statorique sous formes des circuits électriques.....	20
Fig. II.2: Schéma électrique équivalent d'une maille rotorique [SCH 99].....	22
Fig. II.3 : Schéma électrique équivalent simplifié d'une maille rotorique.....	23
Fig. II.4 : Transformation de PARK (a, b, c) à (d, q) [SCH 99].....	25
Fig. II.5 : Induction magnétique produit par une maille rotorique.....	34
Fig. II.6 : Position de la maille (k) par rapport à la bobine statorique de la phase "a".....	35
Fig. II.10 : Représentation élémentaire d'un court-circuit entre spires.....	38
Fig. II.11 : Représentation d'un circuit statorique contenant un court-circuit entre spires.....	39
Fig. III. 1: Couple électromagnétique.....	40
Fig .III. 2: le courant statorique.....	41
Fig. III. 3: vitesse de rotation mecanique(tr/min).....	42
Fig. III. 4: spectre linéaire du courant.....	42
Fig. III. 5: spectre logarithmique du courant.....	43
Fig .III. 6: courant dans la barre 1 et la barre 2.....	43
Fig. III. 7: courant dans un portion daneaux de court circuit.....	44
Fig. III. 8: défauts de couple électromagnétique.....	44
Fig .III. 9: défauts de courant statorique.....	45
Fig. III. 10: défauts vitesse de rotation mecanique en (tr/min).....	46
Fig.III. 11: Défauts spectre linéaire du courant.....	46
Fig .III. 12: défaut logarithmique du courant	47
Fig III. 13: défaut spectre logarithmique du courant.....	47
Fig. III. 14: défaut de courant dans la barre 1 et la barre 2.....	48
Fig. III. 15: défaut courant dans un portion d'anneaux de court circuit.....	49
Fig.IV.1 : source d'alimentation 380v.....	56
Fig.IV.2 : moteur saine et moteur modifie CC.....	56
Fig.IV.3 :les élément de moteur asynchrone.....	56

Fig.IV.4 : capteur de courant.....	57
Fig.IV.5 : ScienceWorkshop®750 Interface (USB) Model No. CI-7599.....	57
Fig.IV.6 : Banc d'essai (Labo de machines électronique de l'université d'el oued).....	57
Fig.IV.7 : Spectre expérimental du courant statorique avec ses harmoniques(Etat saine).....	58
Fig.IV.8 : le courant statorique cas saine.....	58
Fig.IV.9 : Spectre expérimental du courant statorique avec ses harmoniques (Etat CC).....	59
Fig.IV.10 :Le courant statorique.....	59
Fig.IV.11 :Spectre expérimental du courant statorique avec ses harmoniques...	60
Fig.IV.12 :Le courant statorique.....	61

Liste de tableaux:

Tab II.1 : Tableau récapitulatif de toutes les inductances de la machine asynchrone à cage	37
Tableau .IV.1 Expression générale des différentes harmoniques du courant statorique.....	54

Notations

N_s : nombre de spires statoriques par phase.

N_r : nombre de barres rotorique.

n : entier naturel.

$F.m.m$: force magnétomotrice .

e : l'épaisseur de l'entrefer [m].

f_s : fréquence d'alimentation [Hz].

μ_0 : perméabilité magnétique de l'air.

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^{iem} maille rotorique

L_b : inductance d'un 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

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 bouclerotorique [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 $k^{\text{ème}}$ maille et les mailles adjacentes

B_{msr} : L'induction produite par la bobine de la phase « n » dans la $k^{\text{ème}}$ 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 $((N_r+4) \times 1)$

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

$[I]$: 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 $(N_r+1) \times (N_r+1)$.

J : moment d'inertie total sur l'arbre du moteur.

C_r: couple de charge.

C_e: couple électromagnétique produit par la machine.

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.

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.

C_e : couple électromagnétique [N.m].

J : moment d'inertie [Kg.m²].

K₀ : coefficient de frottement.

w_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.

μ₀ : perméabilité magnétique du vide [H.m⁻¹]

f_{cc} : fréquence de court-circuit ;

f_{bc}: fréquence de barre cassé.

f_{exc}= Fréquence d'excentricité

f_s=fréquence d'alimentation.

R=nombre d'encoches au rotor,

f_c :caractéristiquesfréquences

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

INTRODUCTION GENERAL:

Les machines asynchrones spécialement les moteurs asynchrones jouent un rôle important dans le domaine de la conversion de l'énergie électromécanique. Surtout avec l'évolution de l'électronique de puissance, Du fait de sa simplicité de construction, d'utilisation et d'entretien, de sa robustesse et son faible coût d'achat de fabrication De plus, la vitesse de rotation est presque constante sur une large plage de puissance. Mais les machines subissent de plus en plus de perturbation auxquelles sont sensibles. Suite aux exigences de la continuité de service vont dans le sens que l'on doit avoir continuellement une information sur l'état de fonctionnalité de la machine (états et paramètres) et notamment sur la manière avec laquelle sa commande est réglée lors l'apparitions d'une défaillance. [32]

La surveillance d'un dispositif implique le diagnostic des défaillances il consiste en la détection d'un changement anormal dans le comportement ou dans l'état d'un système et dans la localisation de sa cause. Les systèmes de surveillance et de diagnostic peuvent être mis en œuvre en cours d'exploitation (en ligne) ou pendant les phases normales d'arrêt d'exploitation (hors ligne). En cours d'exploitation, le but est de garantir la sécurité et la continuité de service et d'enregistrer les événements utiles pour la maintenance curative. En arrêt d'exploitation, l'objectif est d'évaluer le degré de vieillissement de certains éléments, de décider d'une opération de maintenance préventive ou curative.

Le travail proposé s'attarde sur le diagnostic des machines asynchrones triphasé à cage d'écureuil. La croissance de ce type de machines électrique, essentiellement due à sa simplicité de construction, son faible coût d'achat et de fabrication, sa robustesse mécanique ou encore sa quasi-absence d'entretien, est telle que nous la trouvons maintenant dans tout les domaines industriels.

C'est dans cette optique que ce mémoire est orienté. Il s'intéresse, en effet, à la surveillance et au diagnostic des défauts du moteur asynchrone, en l'occurrence les défauts statorique. Elle s'appuie sur des compétences dans les domaines des machines électriques et de traitement du signal.

Notre premier objectif en abordant ce mémoire était la compréhension et l'analyse des défauts qui peuvent apparaître dans la machine asynchrone. Alors que la recherche et le développement d'outils de surveillance et de diagnostic des défauts fut notre second objectif et qui a été abordé avec soin dans le dernier chapitre.

- Le premier chapitre, est consacré sur le diagnostic de défaut de la machine asynchrone ; une citation des divers défauts pouvant affecter le bon fonctionnement de la machine asynchrone ainsi que les différents méthodes de détection et diagnostique de ces défauts.de traitement du signal.
- Le deuxième chapitre, sera consacré à une étude de modélisation de la machine asynchrone.
- Le troisième chapitre, est consacré à la simulation de la machine asynchrone à utilisation de différents défauts statorique, MATLAB pour déduire les résultats appliqués dans le module RK4 et pour résumer et discuter les résultats.
- Le quatrième chapitre, nous avons extraies les résultats expérimentaux d'un banc dans notre laboratoire 19 de la faculté de technologies de l'université d'El-Oued .Nous avons découvert l'influence des défauts statoriques sur les harmoniques de temps et quel harmonique le plus sensible pour ce type de défaut.

Chapitre I

Aperçu sur le diagnostic des MAS

LA MACHINE ASYNCHRONE



I.1- Introduction :

Ce chapitre dresse un panorama des défauts des machines électriques et leur diagnostic, avec une référence particulière aux machines asynchrones et leur détection de défauts, sachant que ces techniques peuvent être facilement étendues à d'autres types de machines électriques. La surveillance des machines électriques, pour le diagnostic et la prévision de pannes, a suscité de nombreux travaux ces dernières années, à cause de son influence considérable sur la continuité opérationnelle de nombreux processus industriels. Un bon diagnostic et une détection précoce de défauts permettent de minimiser le temps d'arrêt ainsi que le temps de maintenance du processus en question. Ils permettent aussi d'éviter les conséquences nuisibles, parfois dévastatrices, des défauts ainsi que de réduire les pertes financières. Une bonne procédure de détection doit prendre les mesures minimales nécessaires à partir du processus en question, ainsi que d'extraire un diagnostic donnant une indication claire des modes de défaillance, par l'analyse des données, dans un minimum de temps. Le but de ce chapitre est de présenter les défauts et les méthodes de diagnostic appliquées à la machine asynchrone. Ces méthodes sont classées en deux catégories, celles qui utilisent un modèle mathématique du système et celles qui consistent à analyser les signaux mesurés[1].

I.2- Diagnostic des machines électriques :

Les machines électriques et les systèmes d'entraînement sont soumis à de nombreux types de défauts. Ces derniers peuvent être classés selon leurs causes en deux grandes familles (fig I.1) : les défauts à causes internes et les défauts à causes externes . Les défauts externes sont provoqués par les tensions d'alimentation, la charge mécanique ainsi que par l'environnement d'utilisation de la machine. Les défauts internes sont causés par les constituants de la machine (circuits magnétiques, bobinages du stator et du rotor, entrefer mécanique, cage rotorique,...). A titre d'exemple, nous pouvons citer d'une manière non exhaustive les défauts suivants[1]. :

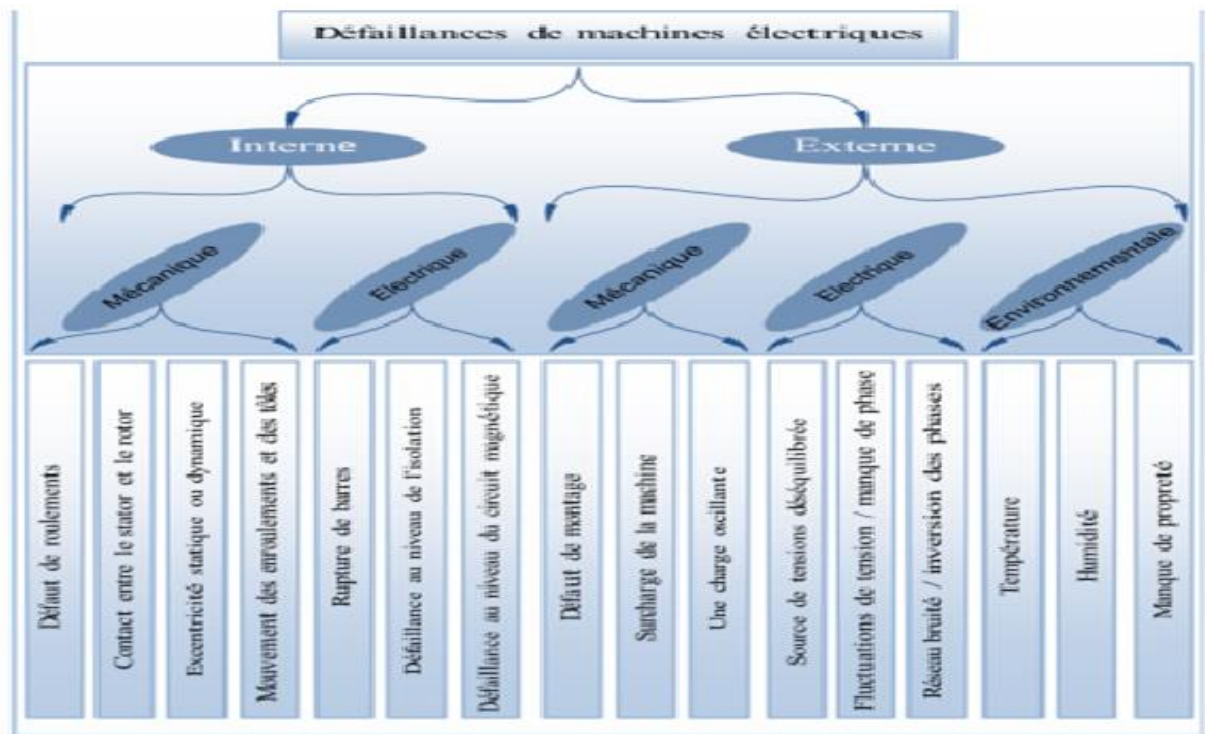


Fig. I.1: Classification des défauts selon leurs origines[1].

- Les défauts électriques au niveau stator, qui se manifestent par l'ouverture d'une phase ou un court circuit au sein d'une même phase, entre deux phases ou entre une phase et la carcasse du stator.
- Les défauts électriques au niveau rotor, qui comprennent une ouverture ou un court-circuit des spires pour les machines a rotor bobine et de rupture ou fissure des barres et/ou des anneaux de court-circuit pour les machines à cage.
- Les défauts mécaniques au niveau de l'alésage du stator, ou au niveau du rotor tels que les défauts de roulement, d'excentricité et d'alignement.
- Une défaillance au niveau des composants électroniques de puissance de la commande du système d'entraînement. En raison de la symétrie des machines électriques, toute apparition d'un défaut induit une distorsion au niveau du champ magnétique tournant, qui règne dans l'entrefer de cette dernière. Elle provoque l'apparition d'harmoniques, caractérisant ces défauts, sur les signaux de mesures. La mesure de signaux pertinents nous permet de surveiller, d'une manière non invasive, le fonctionnement de la machine. Ces signaux peuvent être électriques ou mécaniques tels que les courants, les tensions, le flux, le couple et la

vitesse. Les techniques de détection et d'identification des défauts font encore l'objet de nombreux travaux de recherche, car il reste encore plusieurs questions ouvertes :

- La définition d'une unique procédure de diagnostic pour la détection et l'identification de tout type de défaut.
- L'augmentation de la robustesse des techniques de détection en les rendant insensibles aux conditions d'exploitation.
- La détection des pannes pour un fonctionnement avec un contrôle de position, de vitesse et de couple.
- La détection fiable de pannes dans des conditions de travail variables. Un diagnostic efficace ouvre la voie à une commande tolérante aux défauts, et doit par conséquent augmenter la robustesse du processus industriel. Ces dernières décennies, l'avènement de l'électronique de puissance a permis d'envisager des nouvelles applications, ainsi que de retirer les meilleures performances du fonctionnement des machines électriques.

Néanmoins cette avancée technologique a apporté d'autres risques de défaillance au niveau des processus d'entraînements électriques. Actuellement, plusieurs laboratoires de recherche se penchent sur la conception et l'élaboration de nouvelles stratégies de commande [2], permettant de rattraper les pertes de performances, qui suivent l'apparition des défauts au niveau de la machine ou de la commande[1]..

I.3- Constitution des machines asynchrones :

Le moteur d'induction triphasé (souvent appelé moteur asynchrone triphasé) comprend deux parties principales :

- un inducteur fixe nommé stator : le stator, partie fixe de la machine ou est connectée l'alimentation électrique.
- un induit mobile nommé rotor: le rotor, partie tournante qui permet de mettre en rotation la charge mécanique.

Plus la partie qui fait l'assemblage des deux nommée les paliers: partie mécanique qui permet la mise en rotation de l'arbre moteur.

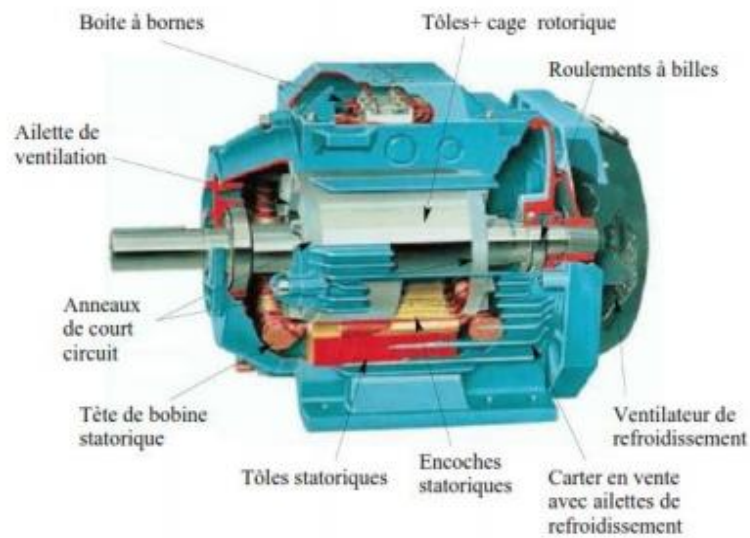


Fig. I.2: Constitution des machines [3].

I.3.1- Le stator :

Le stator comporte une carcasse en acier renfermant un empilage de tôles minces identiques en forme de couronne qui constituent un cylindre vide ; ces tôles sont percées de trous à leur périphérie intérieure. L'alignement de ces trous forme des encoches dans lesquelles on loge un bobinage triphasé. Cette couronne est serrée dans une carcasse en fonte.[3]

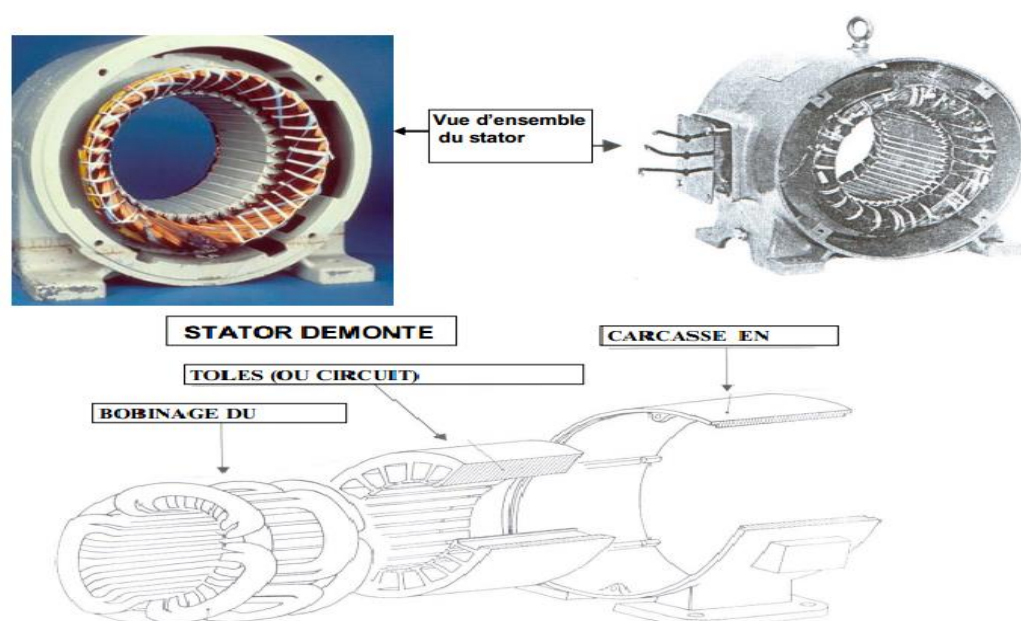


Fig. I.3: Le stator[3].

I.3.2- Le rotor :

Le rotor ,monté sur l'arbre moteur se compose d'un cylindre fait de tôles empilées. Des encoches sont percées à la périphérie extérieure destinées à recevoir des conducteurs. Il est séparé du stator par un entrefer très court de l'ordre de 0,4 à 2 mm seulement. Il existe deux types de rotor : *le rotor à cage d'écureuil* et *le rotor bobiné* [4].

▪ **Rotor à cage:** Dans le rotor à cage, les anneaux de court-circuit permettent la circulation des courants d'un conducteur d'encoche (barre rotoriques) à l'autre. Ces barres conductrices sont régulièrement réparties, et constituent le circuit du rotor (fig I.4). Cette cage est insérée à l'intérieur d'un circuit magnétique constitué de disques en tôles empilés sur l'arbre de la machine analogue à celui du moteur à rotor bobiné[4].

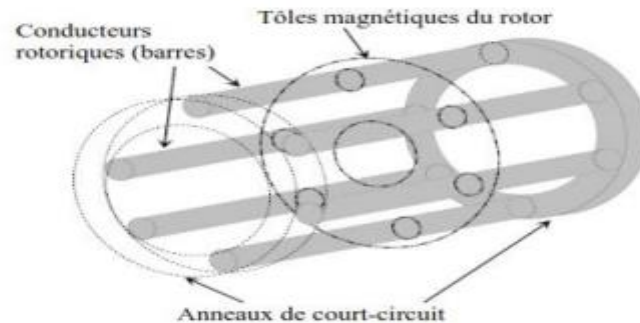


Fig. I.4: vue schématique en perspective du rotor[1].

▪ **Rotor bobiné:** Les tôles de ce rotor sont munies d'encoches où sont placés des conducteurs formant des bobinages. On peut accéder à ces bobinages par l'intermédiaire de trois bagues et trois balais. Ce dispositif permet de modifier les propriétés électromécaniques du moteur[1].



Fig. I.5: Rotor bobiné[1].

I.3.3- Les roulements :

Les paliers sont constitués de roulements à billes et de flasques. Les roulements à billes sont insérés à chaud sur l'arbre, permettant ainsi d'assurer le guidage en rotation de l'arbre. Les flasques, moulés en alliage de fonte, sont fixés sur le carter statorique grâce à des boulons ou des tiges de serrage. L'ensemble ainsi établi constitue alors la machine asynchrone[1].

I.4- Les défauts des machines asynchrones :

Bien que la machine asynchrone soit réputée robuste, elle peut parfois présenter différents types de défauts. Ces défauts se déclarent dans les différentes parties de la machine en commençant par la connexion des phases statoriques et en finissant par l'accouplement mécanique du rotor à la charge. Ces défaillances peuvent être prévisibles ou intempestives, mécaniques, électriques ou magnétiques, et leurs causes sont très variées. Une étude statistique menée par [5] sur les machines asynchrones à cage d'écureuil, exploitées dans le domaine de l'industrie pétrochimique, nous révèle que certaines défauts sont plus fréquentes que d'autres comme exposé par le diagramme de la fig I.6 en présentant le pourcentage de défauts susceptibles d'affecter ces machines de grande puissance[1].

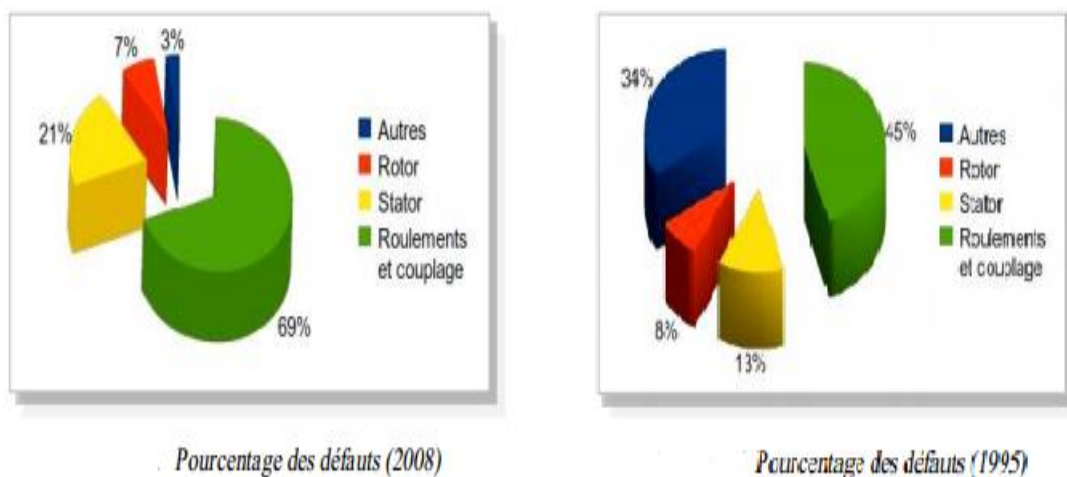


Fig. I.6: Pourcentage Les défauts des machines[5].

I.4.1- Recherche indispensable des symptômes :

En comparant ces résultats à ceux issus de publications plus anciennes, réalisées par [7] sur des machines de même type (100KW à 1MW), nous remarquons que, ces dernières décennies, la répartition du pourcentage de ces défauts a changé, du fait des conditions de fabrication des moteurs.

Les défauts dans le stator et le rotor sont de moins en moins fréquents, la principale source de défaillances est constituée actuellement par les roulements. L'avancée technologique dans le domaine de l'électronique de puissance a permis aussi d'introduire des nouvelles techniques de commande des machines électriques. Dans le cas des machines commandées par des convertisseurs de puissance, les enroulements sont excités par des tensions comprenant des harmoniques de rang élevé. Cette dernière option est devenue la norme pour le contrôle des systèmes électriques. Ce type d'alimentation accélère le vieillissement de l'isolation du bobinage statorique. Une solution est le développement d'une meilleure isolation de matériaux. Ces statistiques ne sont pas pour autant valables pour toutes les circonstances, il est à noter que ces défauts sont très sensibles aux conditions d'exploitation de ces machines et que leurs origines peuvent être très variées [6]. Recensons par exemple, les origines :

- mécaniques : mauvaise fabrication, vibrations de la machine, forces électromagnétique déséquilibrées, forces centrifuges, fluctuations de la charge .
- électriques : dégradations d'isolement, décharges partielles, étincelles .
- thermiques : pertes dans le cuivre, manque de refroidissement général ou localisé .
- environnementales : humidité, poussière ,...

Lorsque plusieurs défauts présentent les mêmes symptômes, il devient indispensable, pour l'opérateur, de rechercher systématiquement l'existence des symptômes en plus. Il faut insister d'emblée sur le fait que certains de ces symptômes ne sont pas spécifiques à un défaut en particulier et c'est l'analyse minutieuse qui doit faire montrer cela. Le diagnostic des défauts est facile lorsqu'il est fait en temps réel et lorsque les symptômes sont clairs. Ces défauts produisent un ou plusieurs symptômes qui peuvent être :

- un déséquilibre des courants de ligne et des tensions .
- une augmentation des oscillations du couple .
- une diminution du couple moyen .
- une augmentation des pertes et donc une réduction de l'efficacité énergétique .
- un échauffement excessif et donc un vieillissement accéléré. Ainsi, dans le but d'une présentation synthétique, nous avons classé ces défauts en deux familles principales : les défauts mécaniques et les défauts électriques. L'étude des défauts des machines asynchrones à un double objectif :

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

I.4.2 - Défauts mécaniques :

Plus de 40% de défauts de moteurs asynchrones sont des défauts mécaniques. Ces défauts peuvent être des défauts de roulements, des défauts d'excentricité, . . .

I.4.3- Défauts de roulements :

La raison principale des défaillances des machines concerne les défauts des roulements à billes qui ont de nombreuses causes telles que la contamination du lubrifiant, une charge excessive ou encore des causes électriques comme la circulation de courants de fuite induits par les onduleurs à MLI [8]. Les défauts de roulements entraînent de manière générale plusieurs effets mécaniques dans les machines tels qu'une augmentation du niveau sonore et l'apparition de vibrations. Il a été montré également que les défauts de roulements induisent des variations dans le couple de charge de la machine asynchrone.

I.4.4- Défauts d'excentricité :

Les conséquences des défauts mécaniques se manifestent généralement au niveau de l'entrefer : par des défauts d'excentricité statique, dynamique [9] (fig I.7) ou mixte :

- Le défaut d'excentricité statique est généralement dû à un désalignement de l'axe de rotation du rotor par rapport à l'axe du stator, dont la cause la plus fréquente est un défaut de centrage des flasques.
- Le défaut d'excentricité dynamique peut être causé par une déformation du cylindre rotorique, ou la détérioration des roulements à billes.
- L'excentricité mixte, la plus fréquente, est la combinaison d'une excentricité statique et d'une excentricité dynamique.



Fig. I.7: Défauts d'excentricité statique et dynamique[5].

Une analyse vibratoire, une analyse par ultrasons, une analyse fréquentielle des courants absorbé ou simplement une analyse visuelle de l'arbre de la machine permettent de détecter ces types de défaillance. Nous pouvons trouver dans la littérature des ouvrages très complets qui traitent ces divers problèmes [5].

I.4.5- Défauts électriques :

Les défaillances électriques, au niveau du stator ou au niveau du rotor, peuvent avoir plusieurs formes et plusieurs causes. A titre d'exemple : le déséquilibre des tensions d'alimentation de la machine ou encore les démarrages fréquents provoquent un échauffement excessif des bobinages statorique conduisant à terme à une destruction locale de l'isolant.

De même, les efforts électrodynamiques que subissent les conducteurs des phases, se traduisent par des vibrations mécaniques ayant pour effet de détériorer l'isolant. Sur le plan électrique, les fronts de tension générés par les convertisseurs statiques accentuent le phénomène et réduisent, par conséquent, la durée de vie de l'isolant des conducteurs. Quant aux origines environnementales, nous pouvons citer l'humidité, les produits corrosifs ou abrasifs, . . .

Bien que les machines asynchrones à cage d'écureuil soient réputées robustes, elles peuvent parfois présenter différents types de défauts, ces défauts peuvent être soit d'origine électrique, soit d'origine mécanique. Un problème minime à l'étape de fabrication peut être à l'origine d'un défaut, tout comme une utilisation non conforme de la machine[1].

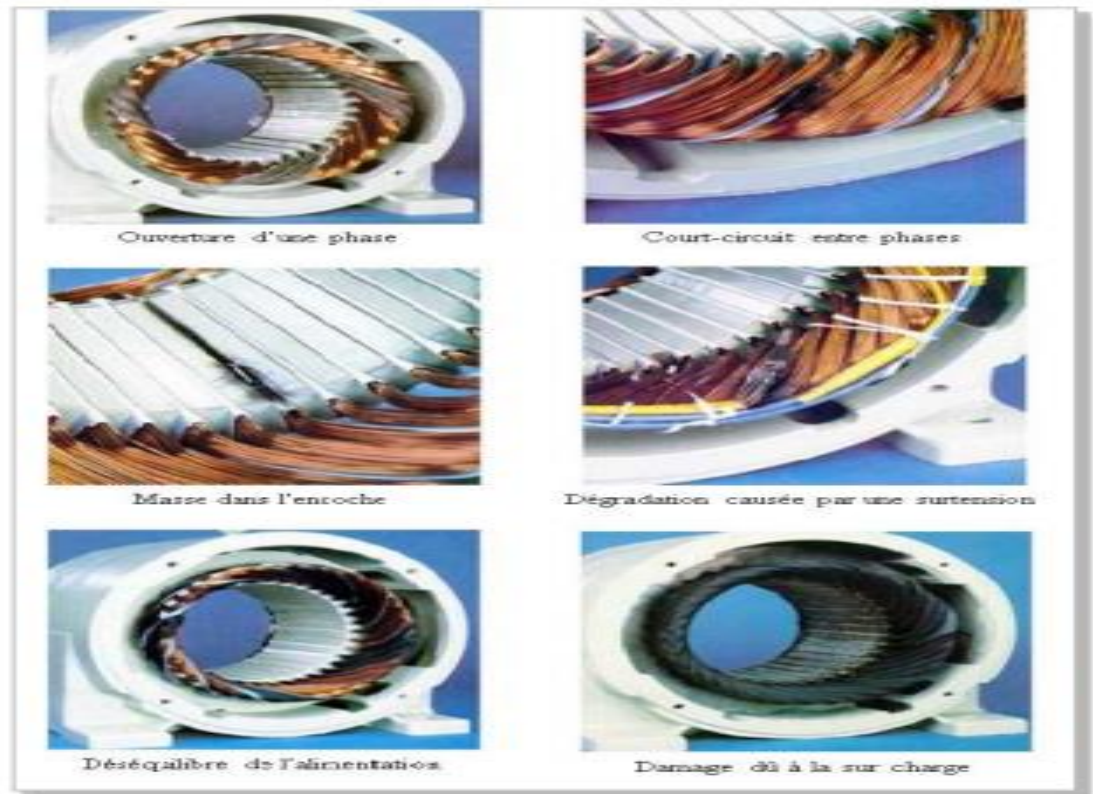
I.4.6- Les défauts statoriques:

Fig .I.8: Différents défauts au niveau de stator de la machine asynchrone[2].

Pour le stator, les défaillances sont principalement dues à un problème [2] :

- Thermique (surcharge,...)
 - Électrique (diélectrique,...)
 - Mécanique (bobinage,...)
 - Environnemental (agression,...) Les défauts qui sont les plus récurrents, localisés au niveau du stator, peuvent être définis comme suit :
- Défaut d'isolant.
 - Court-circuit entre spires.
 - Court-circuit entre phases.
 - Court-circuit phase/bâti.
 - Déséquilibre d'alimentation.

I.4.6.1- Défauts d'isolant dans un enroulement :

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

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

I.4.6.2-Court-circuit entre spires :

Un court-circuit entre spires de la même phase est un défaut assez fréquent. Cette défaillance a pour origine un ou plusieurs défauts d'isolant dans l'enroulement concerné. Il entraîne une augmentation des courants statoriques dans la phase affectée, une légère variation de l'amplitude sur les autres phases, modifie le facteur de puissance et amplifie les courants dans le circuit rotorique. Ceci a pour conséquence une augmentation de la température au niveau du bobinage et, de ce fait, une dégradation accélérée des isolants, pouvant provoquer ainsi, un défaut en chaîne (apparition d'un 2ème court-circuit). Par contre, le couple électromagnétique moyen délivré par la machine reste sensiblement identique hormis une augmentation des oscillations proportionnelle au défaut [2].

I.4.6.3- Court-circuit entre phases :

Ce type de défaillance peut arriver en tout point du bobinage, cependant les répercussions ne seront pas les mêmes selon la localisation. Cette caractéristique rend difficile une analyse de l'incidence de ce défaut sur le système. L'apparition d'un court-circuit proche de l'alimentation entre phases, induirait des courants très élevés qui conduiraient à la fusion des conducteurs d'alimentation et/ou à la disjonction par les protections.

D'autre part, un court-circuit proche du neutre entre deux phases engendre un déséquilibre sans provoquer la fusion des conducteurs. Les courants statoriques sont totalement déséquilibrés et ce déséquilibre est proportionnel au défaut qui apparaît. Les courants dans les barres ainsi que dans les anneaux sont augmentés lors de l'apparition de ce défaut. La détection de ce type de défaut peut reposer sur le déséquilibre des courants de phases [2].

I.4.6.4- Court-circuit phase / bâti :

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

En présence de ce type de défaillance, la tension de la phase concernée ne change pas. Cependant le courant circulant dans cette phase augmente avec la réduction de la résistance et de l'inductance. Cette augmentation du courant se traduit par une augmentation de la température homopolaire entraînant l'apparition d'un couple pulsatoire. Une mesure du courant de fuite pourrait permettre de détecter ce type de défaut [2]. On peut clarifier les différents défauts possibles de court circuit par la figure (I.9).

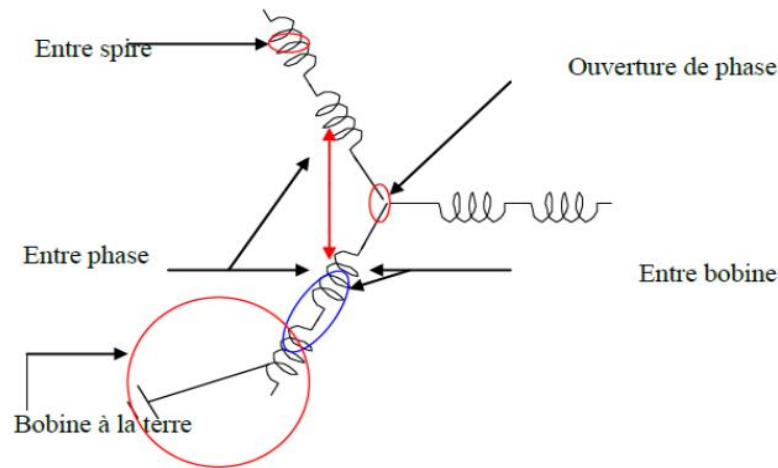


Fig. I.9: Représentation des différents défauts statoriques concerne le court circuit [3]

I.4.7- Défauts rotoriques :

Un rotor bobiné peut être affecté par les mêmes défauts que le stator. Pour un rotor à cage les défauts se résument à la rupture de barres ou à la rupture d'anneaux de court-circuit .

I.4.7.1- Cassure de barre :

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 [2].

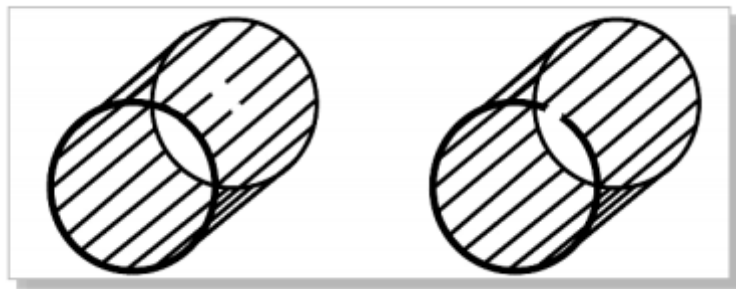


Fig .I.10: Défaut de rupture de barres et d'anneau de court-circuit[2].



Fig. I.11: Défaut de rupture de barresv[2].

Ces ruptures de barres ou de portions d'anneau peuvent être dues, par exemple, à une surcharge mécanique (démarrages fréquents, . . .), à un échauffement local excessif ou encore à un défaut de fabrication (bulles d'air ou mauvaises soudures) [5]. Ce défaut fait apparaître des oscillations sur les courants et le couple électromagnétique d'autant plus apparentes que l'inertie est très grande (vitesse constante).

Lorsque l'inertie de l'entraînement est plus faible, des oscillations apparaissent sur la vitesse mécanique et sur l'amplitude des courants statorique. La cassure de portion d'anneau est un défaut qui apparaît aussi fréquemment que la cassure de barres. En fait les cassures sont dues soit à des bulles de coulées ou aux dilatations différentielles entre les barres et les anneaux, d'autant que les portions d'anneaux de court-circuit véhiculent des courants plus importants que ceux des barres rotorique. De ce fait, un mauvais dimensionnement des anneaux, une détérioration des conditions de fonctionnement ou une surcharge de couple et donc des courants peuvent entraîner leur cassure.

Un défaut de rupture de barres n'induit pas à un arrêt de la machine, du fait que le courant qui traversait la barre cassée se répartit sur les barres adjacentes. Ces barres sont alors surchargées, ce qui peut conduire à leur rupture, et ainsi de suite jusqu'à la rupture d'un nombre suffisamment important de barres pour provoquer l'arrêt de la machine. Devant la multitude des défauts envisageables et les conséquences de leurs apparitions, les techniques de surveillance se sont rapidement imposées auprès des utilisateurs des machines électriques. Elles commencent également à intéresser les concepteurs.

I.5- les méthode de diagnostic des machine asynchrone:

I.5.1- Méthodes sans modèle :

Ces méthodes sont basées soit sur le traitement de signaux issus de capteurs de grandeurs physiques affectées par les défauts ou soit par des systèmes experts mettant en œuvre des techniques d'intelligence artificielle. Puisque les allures temporelles ne donnent pas beaucoup d'information, on est obligé d'aller vers les techniques de traitement de signal. Les méthodes se basant sur l'analyse des signaux d'acquisition ont l'avantage d'être indépendante des fluctuations internes du système. Ainsi, l'information contenue dans les signaux n'est pas affectée par une éventuelle erreur de modélisation. Plusieurs techniques de traitement de signal ont été utilisées depuis longtemps pour analyser le contenu spectral des différents signaux issus des machines électriques tels que : les courants, les puissances, le couple, la vitesse, le flux, les vibrations,...etc[33].

I.5.2- Diagnostic par l'analyse des tensions statorique induites :

Cette technique est basée sur l'exploitation du contenu fréquentiel de la tension induite par le flux rotorique dans les enroulements statorique pendant la déconnexion de la machine du réseau. En utilisant cette approche, les effets de non idéalité de la source (déséquilibres et présence des harmoniques) ainsi que le non linéarité des caractéristiques magnétiques de la machine peuvent être évitées[33].

I.5.3- Diagnostic par mesure du couple électromagnétique :

Le couple électromagnétique développé dans la machine, 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 du signale du couple (mesuré ou estimé), donne des informations sur l'Etat de santé de la machine [11].

I.6. Conclusion : La protection des moteurs est une fonction essentielle pour la continuité du fonctionnement des machines. Le choix du dispositif de protection doit être fait avec rigueur. La recherche d'anomalies et la rapidité de remise en route seront ainsi nettement améliorées. De là vient le rôle du diagnostic des machines électriques a été (et il est encore) un thème de recherche très important depuis plusieurs décennies, tel que rapporte dans la bibliographie (non exhaustive) citée dans ce chapitre. L'avènement de la surveillance à révolutionne l'entretien des systèmes basés sur des machines électriques. En fait, ce terme se réfère à un suivi du système permettant de diagnostiquer l'état d'un moteur à courant alternatif afin de déterminer les types de défaillance et leur gravité quand le moteur est dans des conditions de fonctionnement normales [12] .

Dans ce chapitre nous avons essayé de regrouper le maximum d'information sur les symptômes d'une machine asynchrone. Pour chaque symptôme, une liste de causes possibles est nécessaire pour la détermination possibles d'origines pour chaque type de défaut.

II.1 Introduction :

Tant dans le domaine du diagnostic que dans celui de la commande des machines électriques, il est intéressant de disposer de modèles capables de représenter le comportement du système en présence de déséquilibres structurels. La mise au point d'une procédure de diagnostic à base de modèle analytique pour la machine asynchrone recouvre un certain nombre de problèmes qui doivent être résolus. L'un de ces problèmes est le problème de la synthèse de modèles décrivant le comportement de la machine[13].

Ceci non pas d'une façon moyenne comme pour la commande, mais d'une façon plus exacte en intégrant certains paramètres pour décrire le plus précisément possible le comportement de la machine. Pour cela il fallut s'orienter vers des modèles plus sophistiqués (modèles de type circuit, modèle multi enroulements) pour une description adaptée aux défauts, que ce soit pour une simulation plus réaliste ou pour une utilisation dans la méthode de détection [13].

II.2 Hypothèses simplificatrices:

La machine asynchrone, avec la répartition de ses enroulements et sa géométrie propre est très complexe pour se prêter à une analyse tenant compte de sa configuration exacte, alors il est nécessaire d'adopter des hypothèses simplificatrices [14] :

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

Parmi les conséquences importantes de ces hypothèses on peut écrire :

- L'additivité du flux.
- La constance des inductances propres.
- Les inductances mutuelles entre les enroulements statoriques et rotoriques sont constantes.

II.3- Le modèle multi enroulement de la mas :

II.3.1- Modèle multi-enroulements :

Evidence l'influence des défauts étudiés sur les grandeurs mesurables de la machine, principalement les courants, afin d'étudier les phénomènes mise en jeu, deux approches sont possibles, la première s'appuie sur la distribution des champs et des courants en tout point de la machine, et permet de simuler son fonctionnement en régime de défaut, cette méthode coûteuse en temps de calcul, et nécessite la connaissance des paramètres géométriques et des caractéristiques des matériaux relatifs au moteur asynchrone, la seconde approche consiste à modéliser le rotor de la machine par des mailles reliées entre elles électriquement et couplées magnétiquement, c'est à cette dernière que nous nous sommes intéressés afin de disposer d'une modèle mathématique où les paramètres mesurables apparaissent explicitement et ne nécessitent pas d'outils de calcul complexes. On introduit dans notre étude le modèle de la machine asynchrone où on considère le stator a des constitutions symétrique pour permettre d'avoir une force magnétomotrice sinusoïdale dans l'entrefer et le rotor à une structure[14].

- **Equations différentielles associées :**

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

- **Modélisation du stator :**

Les équations électriques du stator sont élaborées à partir de la théorie des circuits statoriques sont présentés dans la (fig II.1)

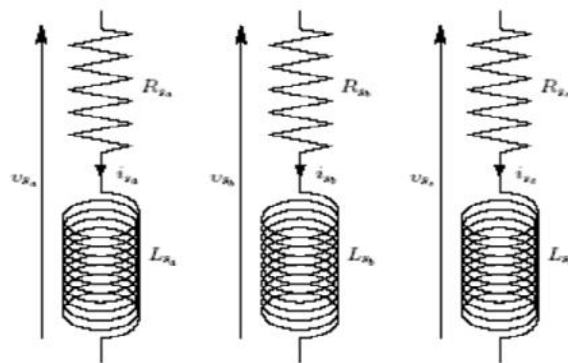


Fig. II.1: Trois phases statoriques sous formes des circuits électriques[15].

Les équations des tensions des trois phases statoriques sont:

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

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

$[R_s]$: matrice des résistances statoriques.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

où : $k=0, 1, 2, \dots, N_r-1$

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

- **Modélisation du rotor :**

Le modèle multi-enroulements, permet de mieux se rapprocher de la structure réelle de la cage rotorique [3]. Le rotor est assimilé à un enroulement polyphasé de (n_b+1) mailles, chaque maille est constituée de deux barres adjacentes et de deux portions des deux anneaux de court-circuit

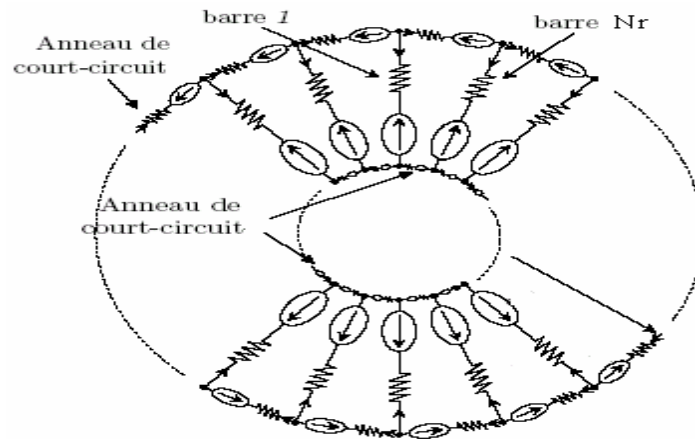


Fig. II.2: Schéma électrique équivalent d'une maille rotorique [15]

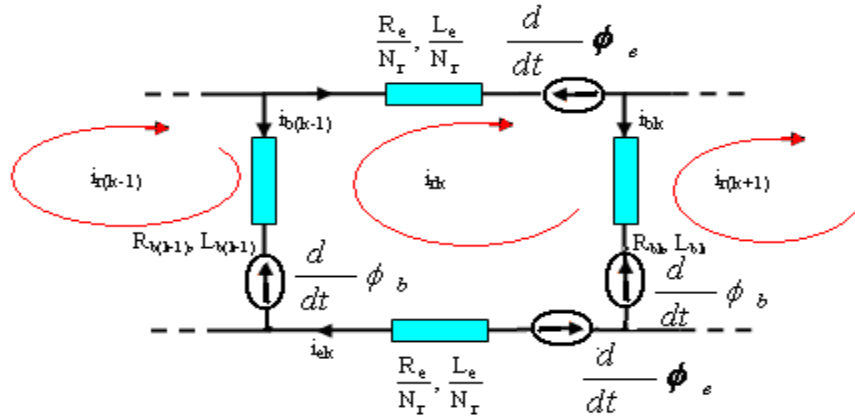


Fig. II.3 : Schéma électrique équivalent simplifié d'une maille rotorique [16].

Tout comme pour les équations du stator de la machine asynchrone, les équations natives des circuits électriques rotoriques peuvent se mettre sous une forme matricielle. Nous relierons les tensions de chacune des boucles rotoriques avec les courants et les flux grâce aux équations [16] [17]:

Sachant que :

$$\begin{aligned} i_{ek} &= i_{rk} - i_e \\ i_{bk} &= i_{rk} - i_{r(k+1)} \end{aligned}$$

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

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

avec :

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

Il faut compléter le système d'équations des circuits du rotor par celle de l'anneau de court-circuit [18]. On a alors :

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

- **Equation globale des tensions :**

L'équation globale des tensions est: $[V] = [R] [I] + [L] \frac{d[I]}{dt} + \frac{d[L]}{dt} [I]$ (II.9)

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

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

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

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

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

Avec : $[R_r]$: la matrice des résistances rotoriques [18].

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

$[L] = \begin{bmatrix} [L_s] & \vdots & [M_{sr}] \\ \dots & \vdots & \dots \\ [M_{sr}]^T & \vdots & [L_r] \end{bmatrix}$, la matrice globale des inductances.

Avec : $[L_r]$: matrice des inductances rotoriques [18].

$$[L_r] = \begin{bmatrix} Lrp + 2L_b + 2\frac{L_e}{N_r} & Mrr - L_b & Mrr & \dots & Mrr - L_b & \vdots & -\frac{L_e}{N_r} \\ Mrr - L_b & Lrp + 2L_b + 2\frac{L_e}{N_r} & Mrr - L_b & Mrr & \dots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ Mrr - L_b & Mrr & \dots & Mrr - L_b & Lrp + 2L_b + 2\frac{L_e}{N_r} & \vdots & -\frac{L_e}{N_r} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \vdots & \dots \\ -\frac{L_e}{N_r} & \dots & \dots & \dots & -\frac{L_e}{N_r} & \vdots & L_e \end{bmatrix} \quad (II.11)$$

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

II.3. 2-Transformation de PARK [19]

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) [19].

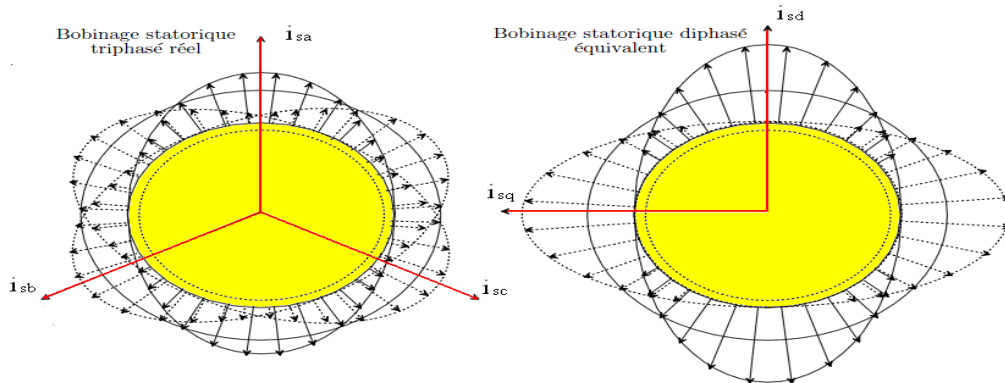


Fig. II.4 : Transformation de PARK (a, b, c) à (d, q) [15]

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

La matrice de Park modifiée est définie par [19],[20] :

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \cos \theta & -\sin \theta \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (\text{II.12})$$

La dérivée de la matrice de Park est

$$\frac{d[P(\theta)]}{dt} = -\sqrt{\frac{2}{3}} \omega \begin{bmatrix} 0 & \sin \theta & \cos \theta \\ 0 & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ 0 & \sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (\text{II.13})$$

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

$$[T] = \begin{bmatrix} [P(\theta)] & \vdots & [0] \\ \dots\dots\dots & \vdots & \dots\dots \\ [0]^T & \vdots & [1] \end{bmatrix} \quad (\text{II.14})$$

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

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

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

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

$$\text{Avec : } \begin{cases} v_{ds} = \sqrt{\frac{3}{2}} v_m \cos(\omega_s - \omega_r)t \\ v_{qs} = \sqrt{\frac{3}{2}} v_m \sin(\omega_s - \omega_r)t \end{cases} \quad (\text{II.16})$$

L'équation (II.9) devient :

$$[T][V_{tr}] = [R][T][I_{tr}] + [L] \frac{d[T][I_{tr}]}{dt} + \frac{d[L]}{dt}[T][I_{tr}] \quad (II.17)$$

$$\Leftrightarrow [V_{tr}] = \left(\underbrace{[T]^{-1}[R][T]}_A + \underbrace{[T]^{-1}[L] \frac{d[T]}{dt}}_B + \underbrace{[T]^{-1} \frac{d[L]}{dt}[T]}_C \right) [I_{tr}] + \underbrace{[T]^{-1}[L][T]}_D \frac{d[I_{tr}]}{dt} \quad (II.18)$$

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

$$A = [T]^{-1}[R][T] = \begin{bmatrix} [P(\theta)]^{-1}[R_s][P(\theta)] & \vdots & [0] \\ \dots & \vdots & \dots \\ [0] & \vdots & [R_r] \end{bmatrix} \quad (II.19)$$

$$B = [T]^{-1}[L] \frac{d[T]}{dt} = \begin{bmatrix} [P(\theta)]^{-1}[L_s] \frac{d[P(\theta)]}{dt} & \vdots & [0] \\ \dots & \vdots & \dots \\ [M_{sr}]^T \frac{d[P(\theta)]}{dt} & \vdots & [0] \end{bmatrix} \quad (II.20)$$

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

$$D = [T]^{-1}[L][T] = \begin{bmatrix} [P(\theta)]^{-1}[L_s][P(\theta)] & \vdots & [P(\theta)]^{-1}[M_{sr}] \\ \dots & \vdots & \dots \\ [M_{sr}]^T [P(\theta)] & \vdots & [L_r] \end{bmatrix} \quad (II.22)$$

La mise en équation du modèle de la machine, conduit à un système complet de dimension $Nr+4$ [19]:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{v}_{os} \\ \mathbf{v}_{ds} \\ \mathbf{v}_{qs} \\ \dots \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ \dots \\ 0 \end{bmatrix} = [\mathbf{L}_{tr}] \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \mathbf{i}_{os} \\ \mathbf{i}_{ds} \\ \mathbf{i}_{qs} \\ \dots \\ \mathbf{i}_{ro} \\ \vdots \\ \mathbf{i}_{rk} \\ \vdots \\ \mathbf{i}_{r(N_r-1)} \\ \dots \\ \mathbf{i}_e \end{bmatrix} + [\mathbf{R}_{tr}] \begin{bmatrix} \mathbf{i}_{os} \\ \mathbf{i}_{ds} \\ \mathbf{i}_{qs} \\ \dots \\ \mathbf{i}_{ro} \\ \vdots \\ \mathbf{i}_{rk} \\ \vdots \\ \mathbf{i}_{r(N_r-1)} \\ \dots \\ \mathbf{i}_e \end{bmatrix} \quad (II.23)$$

$[L_{tr}]$ et $[R_{tr}]$ sont les matrices globales des résistances et des inductances après la transformation de Park [17], [21] et [19]:

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

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

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

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

A ces équations, on ajoute les équations électromécaniques afin d'avoir la vitesse électrique de rotation et la position θ_r du rotor [21] ,[20]:

$$\frac{d}{dt} \omega_m = \frac{1}{J} (C_e - C_r - k_0 \omega_m) \quad (\text{II.26})$$

$$\frac{d}{dt} \theta_r = \omega_r \quad (\text{II.27})$$

II.3.3- Expression du couple électromagnétique :

[18], [22] et [20]

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

$$\text{On a: } \begin{bmatrix} \Psi_{odqs} \\ \Psi_{kr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [P(\theta)]^{-1} & [0] \\ [0] & [1] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [L_s] & [M_{sr}] \\ [M_{sr}]^T & [L_r] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [P(\theta)]^{-1} & [0] \\ [0] & [1] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{odqs} \\ i_{kr} \end{bmatrix} \quad (\text{II.28})$$

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

$$\text{On aura : } \begin{bmatrix} \Psi_{odqs} \end{bmatrix} = [P(\theta)]^{-1} [L_s] [P(\theta)] i_{odqs} + [P(\theta)]^{-1} [M_{sr}] i_{kr} \quad (\text{II.30})$$

Après le calcul on obtient :

$$\begin{cases} \Psi_{ds} = (L_s - M_s) i_{ds} + \sqrt{\frac{3}{2}} L_{sr} \sum_{k=0}^{Nr-1} i_{rk} \cos(k a) \\ \Psi_{qs} = (L_s - M_s) i_{qs} + \sqrt{\frac{3}{2}} L_{sr} \sum_{k=0}^{Nr-1} i_{rk} \sin(k a) \end{cases} \quad (\text{II.31})$$

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

$$\begin{aligned} P_{sa}(t) &= [v_{sabs}]^T [i_{sabc}] \\ &= ([P(\theta)] [v_{dqs}])^T [P(\theta)] [i_{dqs}] \\ &= [v_{dqs}]^T [i_{dqs}] \end{aligned} \quad (\text{II.32})$$

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

$$\begin{cases} v_{ds} = r_s i_{ds} + \frac{d\Psi_{ds}}{dt} - \omega_r \Psi_{qs} \\ v_{qs} = r_s i_{qs} + \frac{d\Psi_{qs}}{dt} + \omega_r \Psi_{ds} \end{cases} \quad (\text{II.33})$$

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

$$P_{sa}(t) = r_s (i_{ds}^2 + i_{qs}^2) + \left(i_{ds} \frac{d\Psi_{ds}}{dt} + i_{qs} \frac{d\Psi_{qs}}{dt} \right) + \omega_r (\Psi_{ds} i_{qs} - \Psi_{qs} i_{ds}) \quad (\text{II.34})$$

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

$$C_e = P (\Psi_{ds} i_{qs} - \Psi_{qs} i_{ds}) \quad (\text{II.35})$$

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

$$C_e = \sqrt{\frac{3}{2}} P L_{sr} \left\{ i_{qs} \sum_{k=0}^{Nr-1} i_{rk} \cos(ka) - i_{ds} \sum_{k=0}^{Nr-1} i_{rk} \sin(ka) \right\} \quad (\text{II.36})$$

II.3.4 -Système d'équation global

Nous pouvons regrouper ces équations dans une représentation matricielle unique pour aboutir à [23] :

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

forme condensée :

$$[U] = [B'] [X] + [A'] \begin{bmatrix} \dot{X} \end{bmatrix}, \quad (\text{II.38-a})$$

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

$$\begin{bmatrix} \dot{X} \end{bmatrix} = [A']^{-1} \cdot [U] - [A']^{-1} \cdot [B'] \cdot [X], \quad (\text{II.38-b})$$

Nous pouvons la mettre sur la forme suivante :

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

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

AVEC

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

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

$$[X] = \begin{bmatrix} [I] \\ \Omega r \\ \theta_r \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} \dot{X} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I} \end{bmatrix} \\ \dot{\Omega}_r \\ \dot{\theta}_r \end{bmatrix}, \quad [U] = \begin{bmatrix} [V] \\ -Cr \\ 0 \end{bmatrix}$$

Avec la définition des matrices B et A donnée par:

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

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

$$G_{mt} = \Omega r \frac{d[L]}{d\theta_r}, \quad (\text{II.39})$$

On se retrouve ainsi face à un système d'équations différentielles régissant le fonctionnement de la machine. Pour parvenir à la solution, une méthode numérique doit être mise en oeuvre, la méthode explicite de Runge Kutta s'avère la plus utilisée dans ces cas. Bien avant ça, nous devons définir les matrices A' et B' de manière à traduire l'état interne de la machine, à savoir, état sain ou état de défaut [24].

II.3.5 -Calcul des inductances :

II.3.5.1- Inductances statoriques :

En premier temps, on suppose que les enroulements statoriques sont idéalement distribués autour du périphérique de l'entrefer de sorte que l'induction résultante puisse être supposée sinusoïdale. Dans ce cas, l'expression de la F.m.m de la première phase statorique "a" sera [25], [26] ,[27] et [28]:

$$F_m(\theta) = \frac{2 N_s i_{sa}}{p \pi} \cos(\theta) \quad (\text{II.40})$$

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

$$B_s(\theta) = \frac{2 \mu_0 N_s i_{sa}}{e p \pi} \cos(\theta) \quad (\text{II.41})$$

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

$$\phi_s = \iint_S B_s dS = \int_0^l dz \int_{-\frac{\pi}{2p}}^{\frac{\pi}{2p}} B_s R d\theta \quad (\text{II.42})$$

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

$$\phi_s = \frac{4 \mu_0 N_s R l}{\pi e p^2} i_{sa} \quad (\text{II.43})$$

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

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

$$\Psi_{saT} = N_s \phi_s = N_s i_{sa} \frac{2\mu_0 N_s R l}{e p^2 \pi} \int_{-\frac{\pi}{2p}}^{\frac{\pi}{2p}} \cos(\theta) d\theta = L_{sp} i_{sa} \quad (II.44)$$

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

$$L_{sp} = L_{ms} = \frac{4\mu_0 N_s^2 R l}{e \pi p^2} \quad (II.45)$$

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

$$L_{as} = L_{sp} + L_{sf} \quad (II.46)$$

Puisque les enroulements statoriques sont symétriques, les inductances propres des trois phases sont égales ($L_{as} = L_{bs} = L_{cs} = L_s$). Les enroulements statoriques étant identiques et symétriques et du fait qu'ils sont décalés de $2\pi/3$, les inductances mutuelles entre enroulements statoriques auront pour valeurs :

$$M_s = -\frac{L_{sp}}{2} \quad (II.47)$$

II.3.5.2 -Inductances rotoriques :

En définissant les flux rotoriques qui entrent en jeu, et en faisant référence à la représentation équivalente du rotor, il sera possible de donner l'expression des différentes inductances. La (fig II.5) représente, en fonction de l'ouverture angulaire θ' dans un référentiel lié au rotor, l'allure de l'induction magnétique dans l'entrefer, supposée radiale, produite par une maille rotorique "k" dans l'entrefer. Cela en admettant que les barres rotoriques sont identiques, régulièrement décalées et séparées l'une de l'autre par un angle $Nr/2\pi$ (rad) [26],[27] et [28].

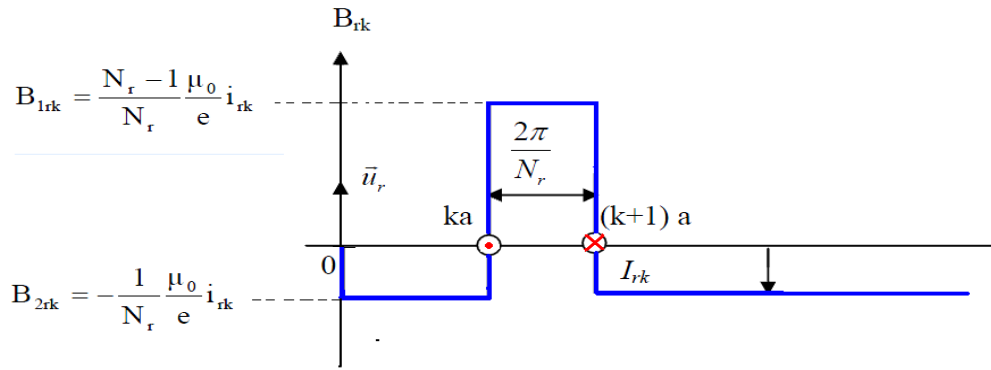


Fig. II.5 : Induction magnétique produit par une maille rotorique[18]

Chaque maille rotorique, considérée comme une bobine à une seule spire, parcourue par un courant i_{rk} , est le siège d'un flux principal exprimé par [26]:

$$\phi_{rk} = \int_0^l dz \int_{ka}^{(k+1)a} \left(\frac{N_r - 1}{N_r} \frac{\mu_0}{e} R i_{rk} \right) d\theta' = \frac{N_r - 1}{N_r^2} \mu_0 \frac{2\pi R l}{e} i_{rk} \quad (\text{II.48})$$

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

$$L_{rp} = \frac{N_r - 1}{N_r^2} \mu_0 \frac{2\pi}{e} R l \quad (\text{II.49})$$

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

$$L_{rr} = L_{rp} + 2L_b + 2L_e \quad (\text{II.50})$$

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

la maille k est donné par :

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

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

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

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

$$M_{r_{k(k-1)}} = M_{r_{k(k+1)}} = M_{rr} - L_b \quad (\text{II.53})$$

II.3.5.3 -Inductances mutuelles entre enroulements statoriques et rotoriques :

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

Le champ magnétique dans l'entrefer dû au courant i_{sa} s'écrit en fonction de θ' lié au rotor de l'équation (II.42), donne [17] [26] [28]:

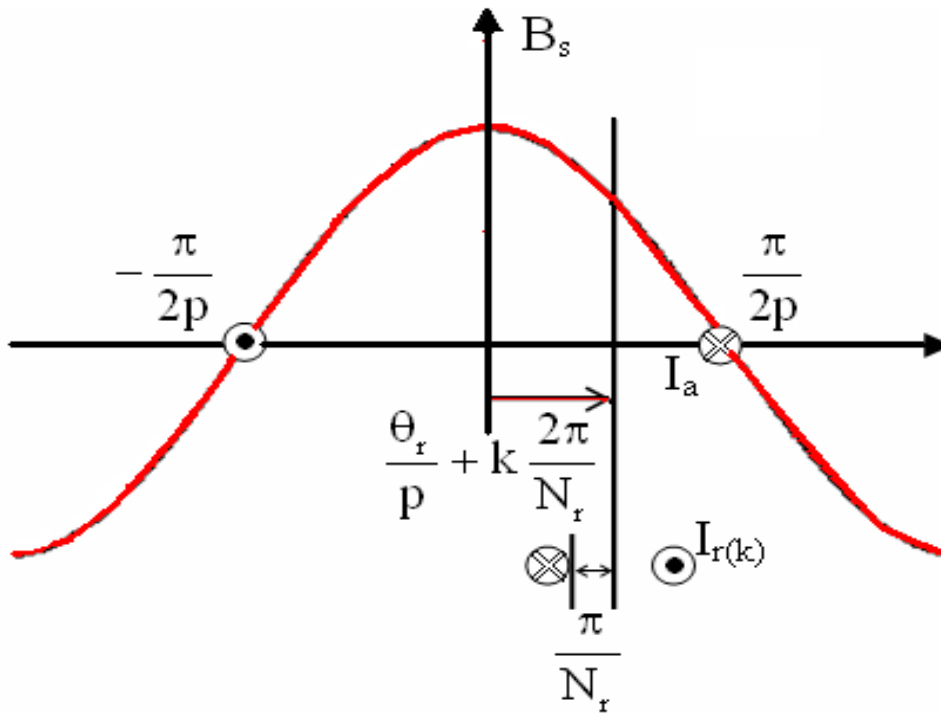


Fig. II.6 : Position de la maille (k) par rapport à la bobine statorique de la phase "a" [17]

$$B_s(\theta') = \frac{2\mu_0 N_s i_{sa}}{e p \pi} \cos[(\theta' + \omega_r t)] \quad (\text{II.54})$$

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

$$\phi_{rk sa} = \int_0^l dz \int_{k a}^{(k+1)a} B_s(\theta') R d\theta' \quad (\text{II.55})$$

L'intégrale de l'équation ci-dessus conduit à [29] [27] [28] :

$$\phi_{rk\ sa} = L_{sr} i_{sa} \cos[\omega_r t + k a] \quad (\text{II.56})$$

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

$$M_{rk\ sa} = L_{sr} \cos(\omega_r t + k a) \quad (\text{II.57})$$

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

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

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

$$M_{rk\ sb} = L_{sr} \cos\left(\omega_r t + k a - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (\text{II.59})$$

$$M_{rk\ sc} = L_{sr} \cos\left(\omega_r t + k a - \frac{4\pi}{3}\right) \quad (\text{II.60})$$

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

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

Tab II.1 : Tableau récapitulatif de toutes les inductances de la machine asynchrone à cage [22]

II.3.5.4 Calcul des inductances en cas de court-circuit entre spires Statorique :

II.3.5.4.1 Exemple élémentaire :

Soit le simple exemple élémentaire d'une bobine A'-X' à cinq spires occupant deux encoches tel que représente la (fig II.10) Lorsqu'un court-circuit apparaît entre les points de contact et a1 et a2 on obtient quelques spires en série et une spire additionnelle court-circuitée. Il en résulte moins de spires effectives dans le circuit de la phase; donc un affaissement de la FMM résultante, et la création d'une nouvelle maille court-circuitée et couplée magnétiquement avec les autres circuits de la machine [25],[15].

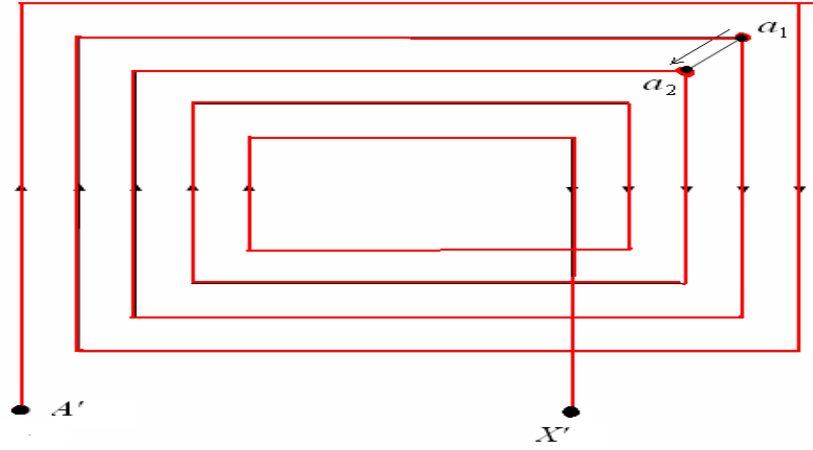


Fig. II.10 : Représentation élémentaire d'un court-circuit entre spires [25].

II.3.5.4.2 Système d'équations correspondant :

La (fig II.11) représente le circuit statorique équivalent du nouveau système avec deux branches additionnelles, relatives aux spires court-circuitées et *contact* relative à la branche de court-circuit. R_{sd} représente la résistance effective de la branche court-circuitée, et est généralement petite, tandis que $R_{scontact}$ est la résistance de la branche de court-circuit qui doit être très grande dans l'état sain. La simulation du court-circuit brusque consiste à faire annuler en un instant t_{cc} la résistance $R_{scontact}$.

Il est à rappeler que la maille court-circuitée résultante est couplée magnétiquement avec les autres circuits de la machine, ce qui impose le calcul des nouvelles inductances toujours selon les notions préétablies. Aucun couplage ne sera envisagé avec la branche *scontact* en raison de son caractère non inductif. [25].

Quant au model mathématique, la formulation de base relative au système d'équations différentielles données par les équations (II.37) et (II.38-b) ne subit pas de grands changements, à part l'extension des vecteurs tension et courant en leurs nouvelles expressions données par :

$$[V_s] = [V_{sA} \dots V_{sB} \dots V_{sd} \dots V_{scontact}]^T, \quad (II.74)$$

$$[I_s] = [i_{sA} \dots i_{sB} \dots i_{sd} \dots i_{scontact}]^T, \quad (II.75)$$

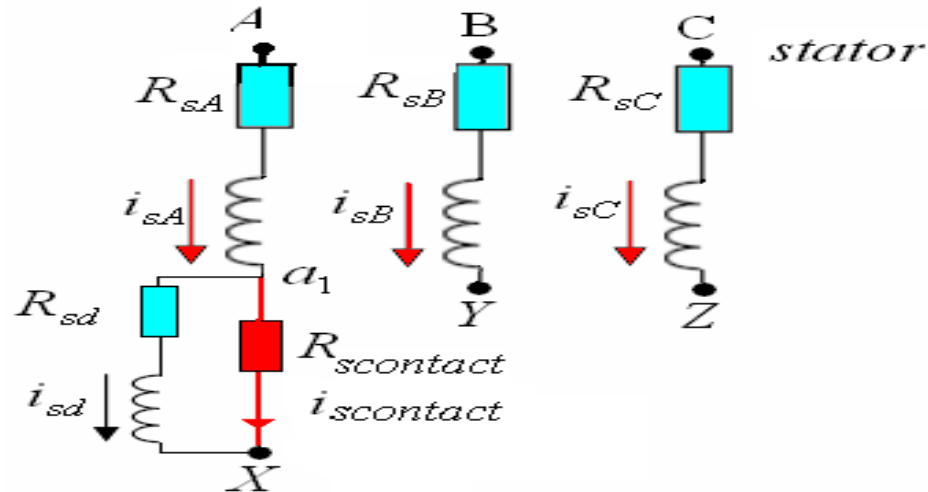


Fig. II.11 : Représentation d'un circuit statorique contenant un court-circuit entre spires[25]..

Et par conséquent, la réinitialisation des matrices inductances et résistances en tenant compte des branches nouvellement introduites [25] ,[15].

II.3.5.4.3 Application à la machine étudiée:

Considérant le cas d'un court-circuit qui touche 50% des tours de la première bobine de la phase A. La résistance de la maille court-circuitée sera, dans ce cas pour la nouvelle résistance de la phase A, d'une valeur réduite qui dépend du nombre de spires court-circuitées

II.4 Conclusion:

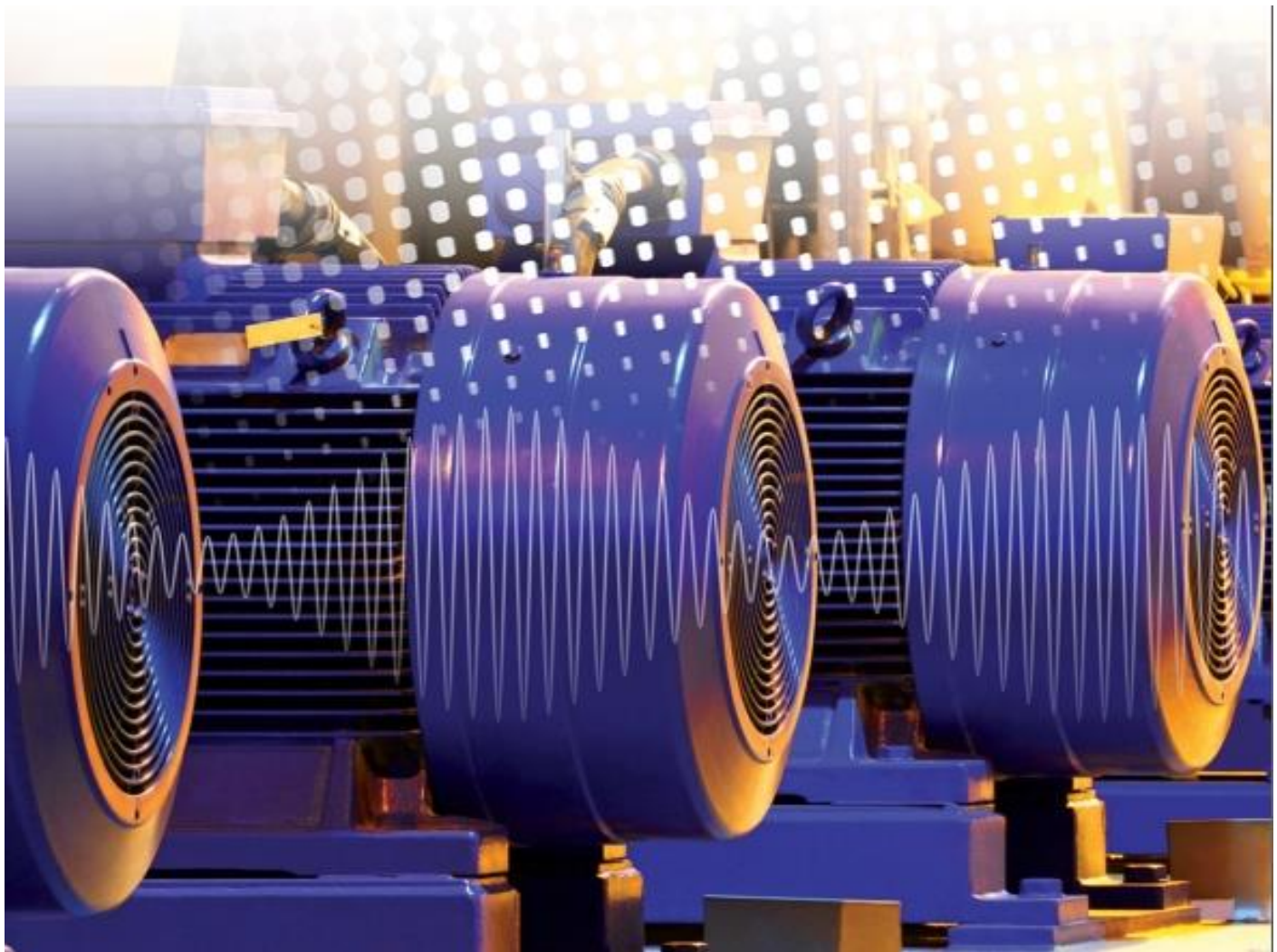
Nous avons bien illustré, dans ce chapitre, le modèle multi enroulement qui tient compte de la structure complète du rotor. Le choix d'un tel modèle est imposé par l'objectif de pouvoir simuler une rupture de barre ou de portion d'anneaux de court-circuit au rotor. Pour cela, nous avons représenté toutes les équations de divers types de barres et de portions d'anneaux du rotor.

Avec tous les changements qui s'ajoutent aux paramètres du moteur dans le cas d'un défaut de court-circuit statorique ou d'excentricité pour que notre modèle reflète le plus possible notre ME étudié.

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

Chapitre III

Simulation des Défaits Statoriques d'un Moteur Asynchrone



III.1- Introduction :

Comme tout projet, l'expérimentation en labo ou en atelier est une étape obligatoire pour valider un prototype mais la simulation numérique s'impose comme une deuxième approche dans la plupart des disciplines. elle ne remet nullement en cause l'efficacité de l'expérimentation mais elle s'efforce à apporter des explications aux phénomènes étudiés pour mieux comprendre et prévoir des perspectives futures.[19]

Le logiciel MATLAB joue plus que jamais un rôle respectable dans le monde des logiciels de simulation. Possédant une large base de données et incluant l'outil Simulink pour les simulations électrotechniques. [19]

III.2- Interprétation des résultats de simulation :

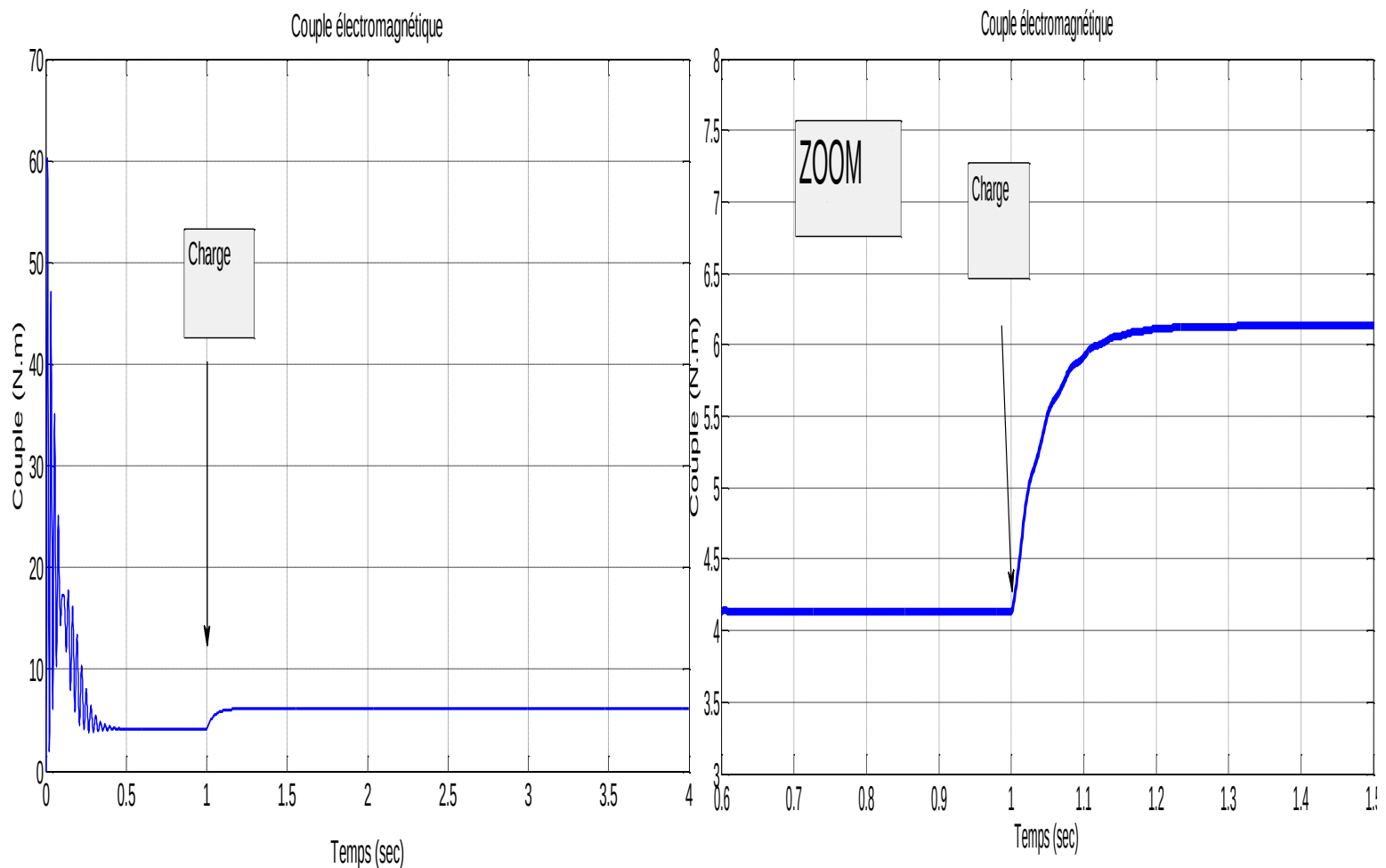


Fig. III. 1: Couple électromagnétique

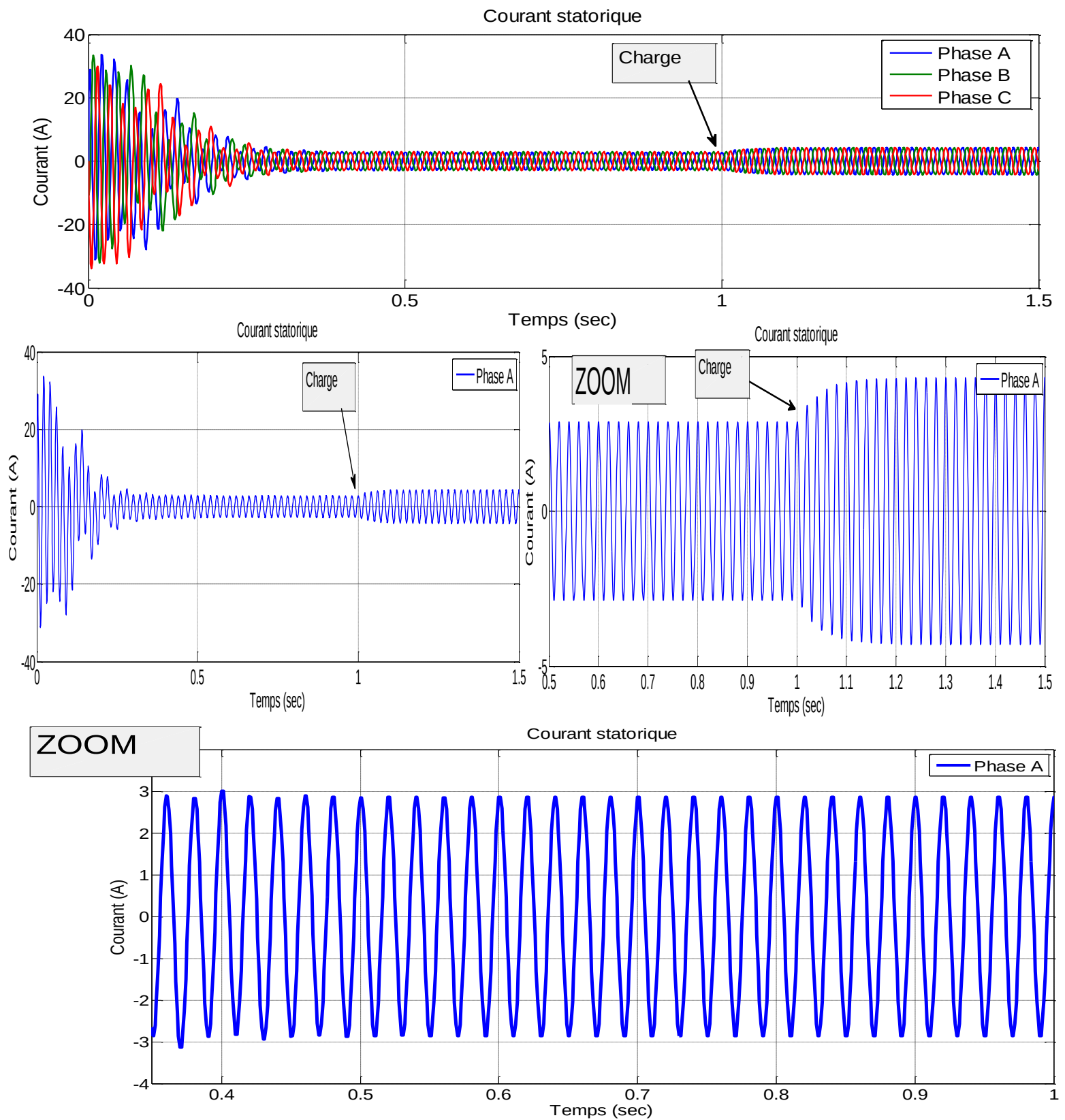


Fig .III. 2: le courant statorique

On remarque que le régime transitoire est oscillatoire pendant une durée de 0.5s, pour les différentes grandeurs de la machine.

La vitesse atteint une valeur proche de (2850 tr/min). Le couple électromagnétique atteint une valeur maximale de (60 N.m) au régime transitoire, on note que les courants statorique ont une valeur importante au démarrage avant la convergence vers faible valeur due l'effet réactif de la MAS.

Lors de l'application de la charge, nous remarquons que la machine répond à cette perturbation, par une diminution de la vitesse, le couple électromagnétique augmente et prend la valeur du couple de charge (6.2 Nm).

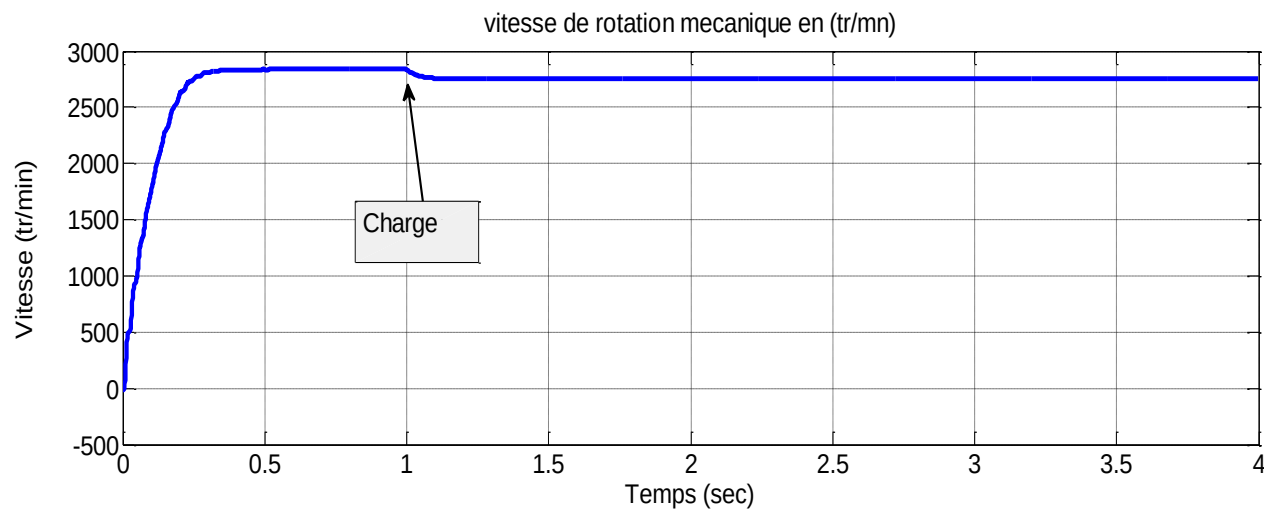


Fig. III. 3: vitesse de rotation mecanique(tr/min)

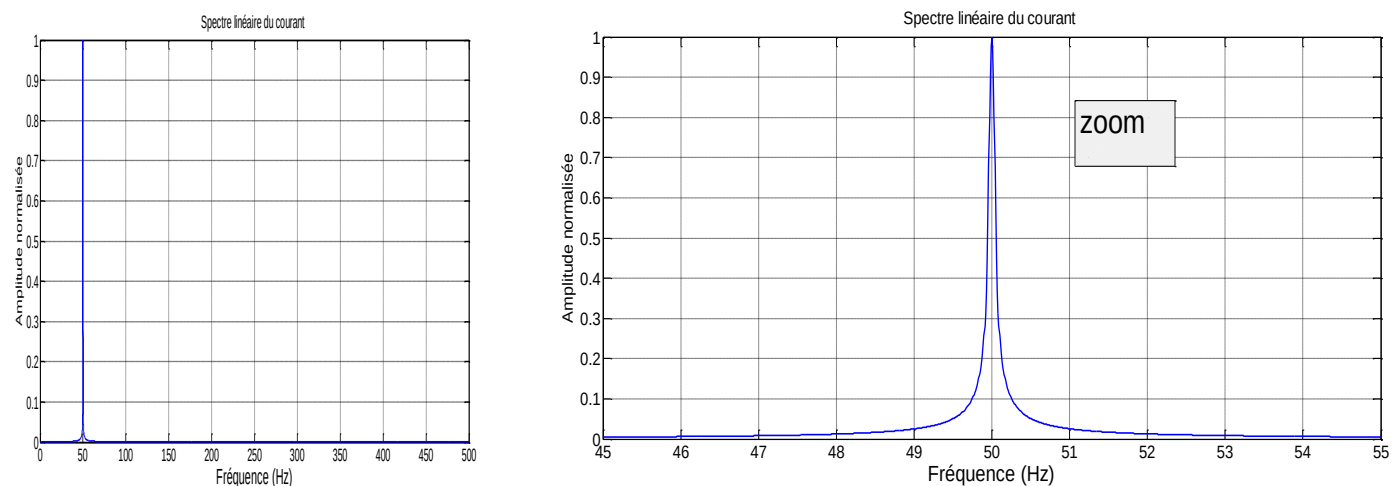


Fig. III. 4: spectre linéaire du courant amplitude [(1→f=50hz)]

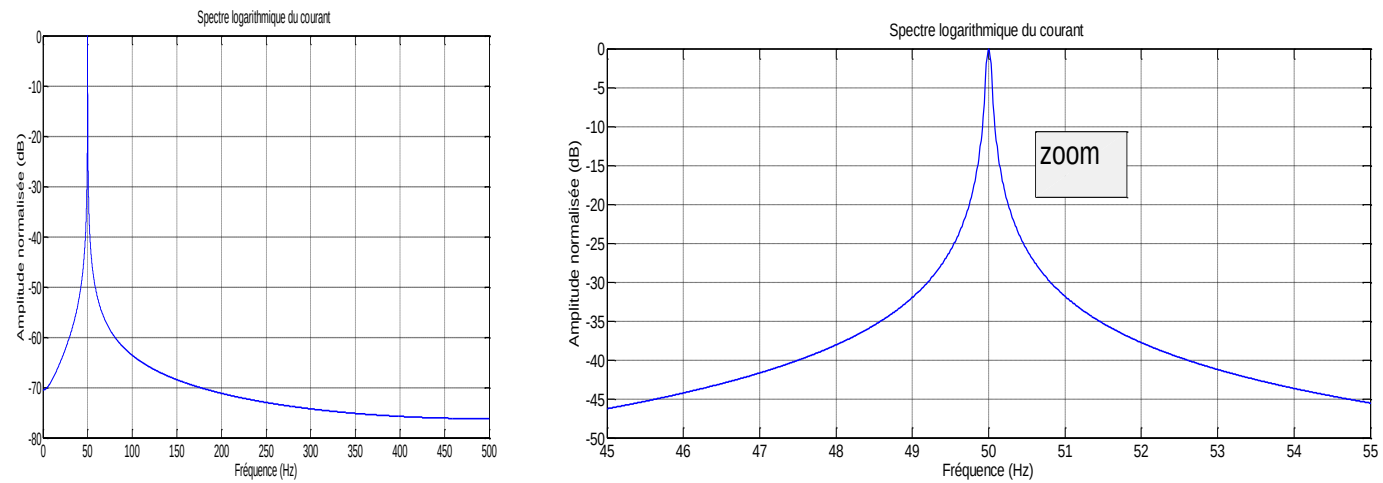


Fig. III. 5: spectre logarithmique du courant [amplitude =1 → fréquence =50hz]

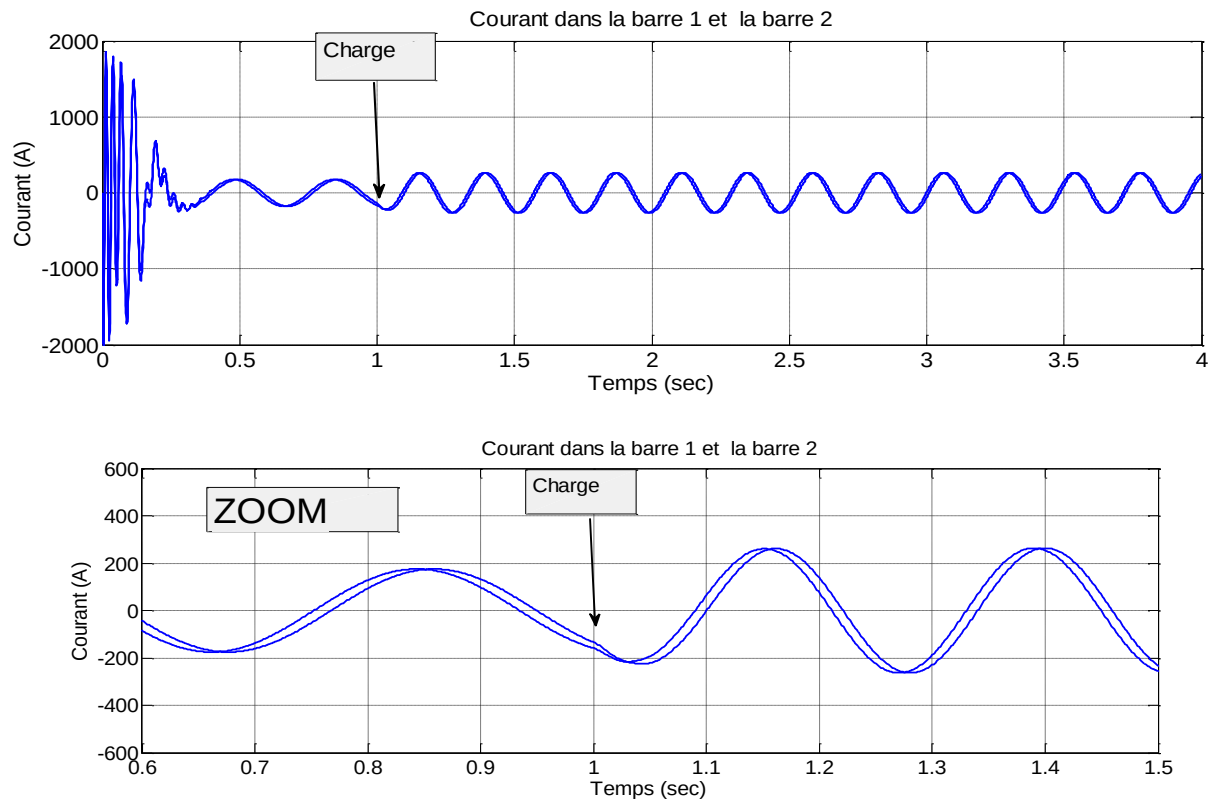


Fig .III. 6: courant dans la barre 1 et la barre 2

Augmenter la valeur actuelle lorsque la charge est ajoutée (220A).

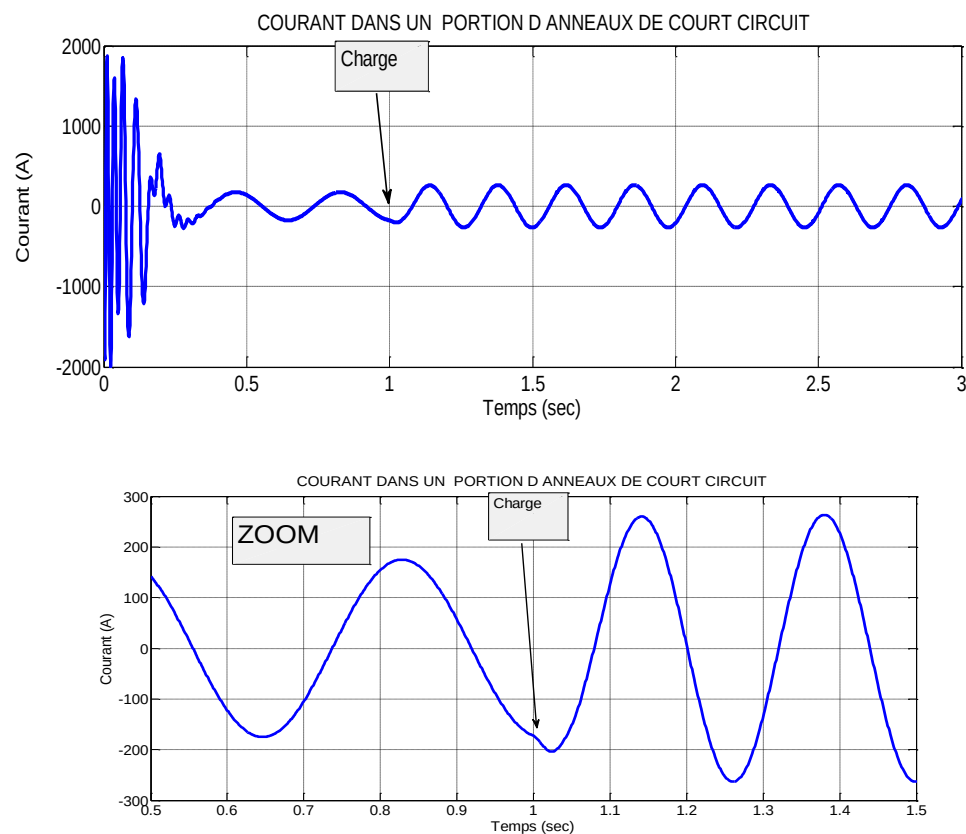


Fig. III. 7: courant dans un portion daneaux de court circuit:

- Augmenter la valeur actuelle lorsque la charge est ajoutée 220A.

III. 3 Défaut de court circuit :

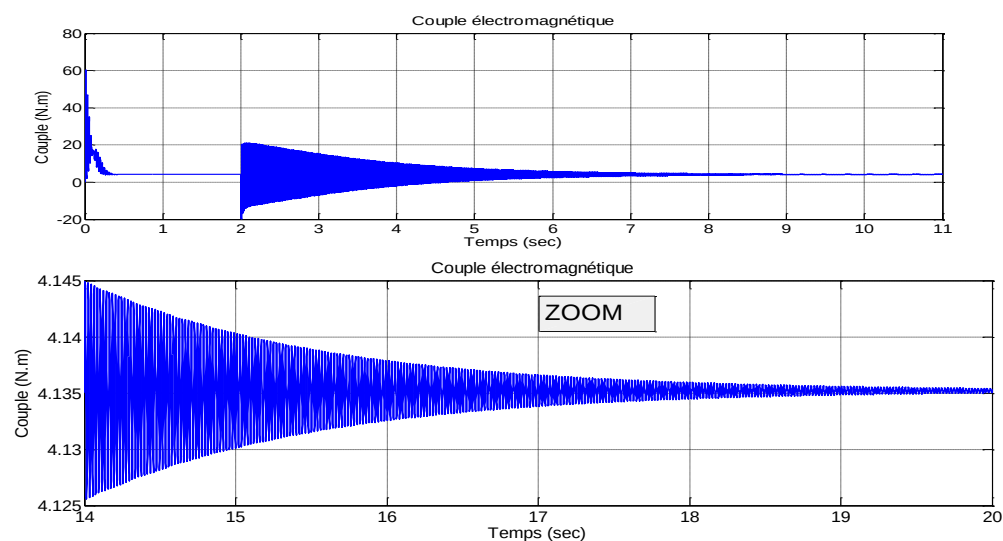


Fig. III. 8: défauts de couple électromagnétique:

-Diminution significative de la valeur du couple électromagnétique $\rightarrow$ (4.135 Nm), le valeur naturelle (6.2Nm).

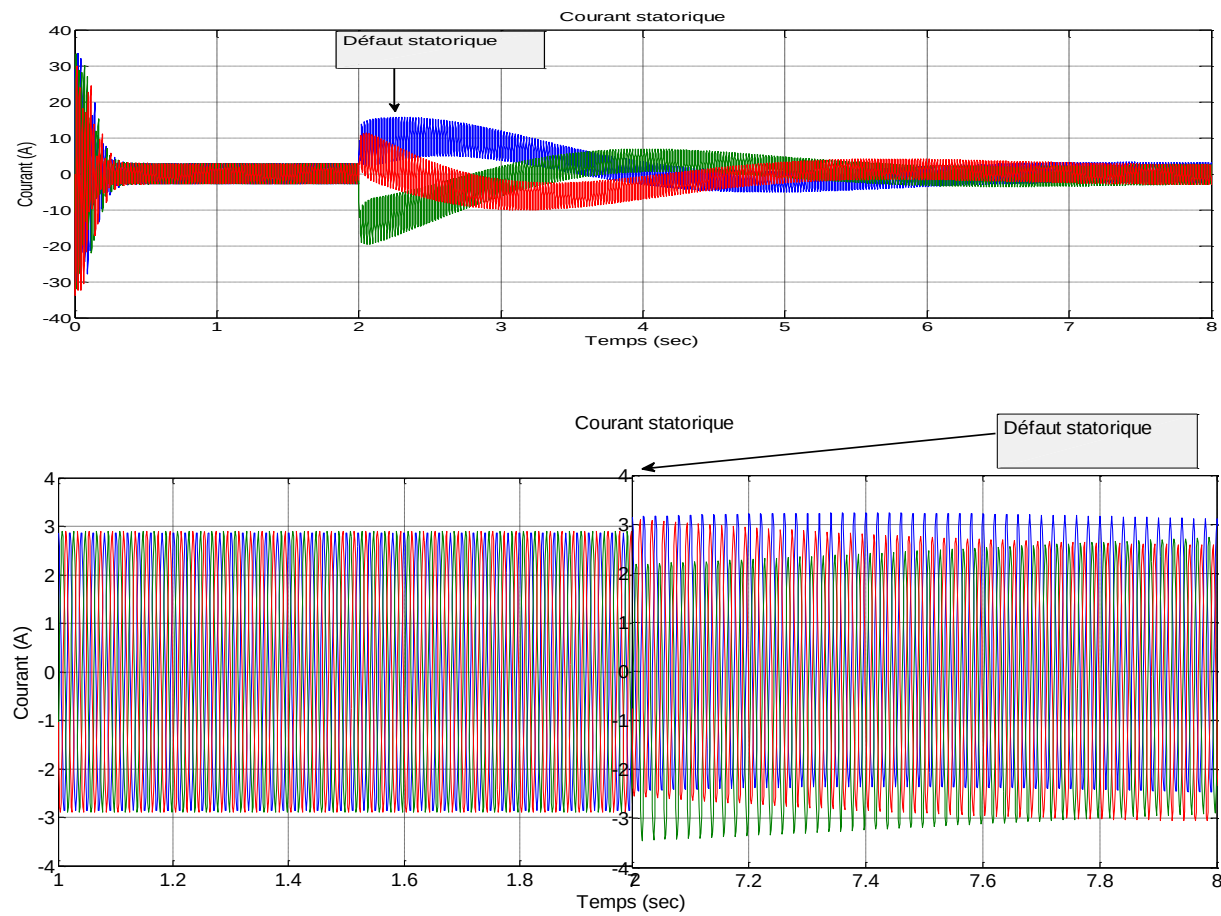


Fig .III. 9:défauts de courant statorique[i=3.5A].

-Augmenter la valeur du courant lorsque le circuit est en court-circuit et une oscillation importante et nette du signal naturel, [i= 3.5A] .

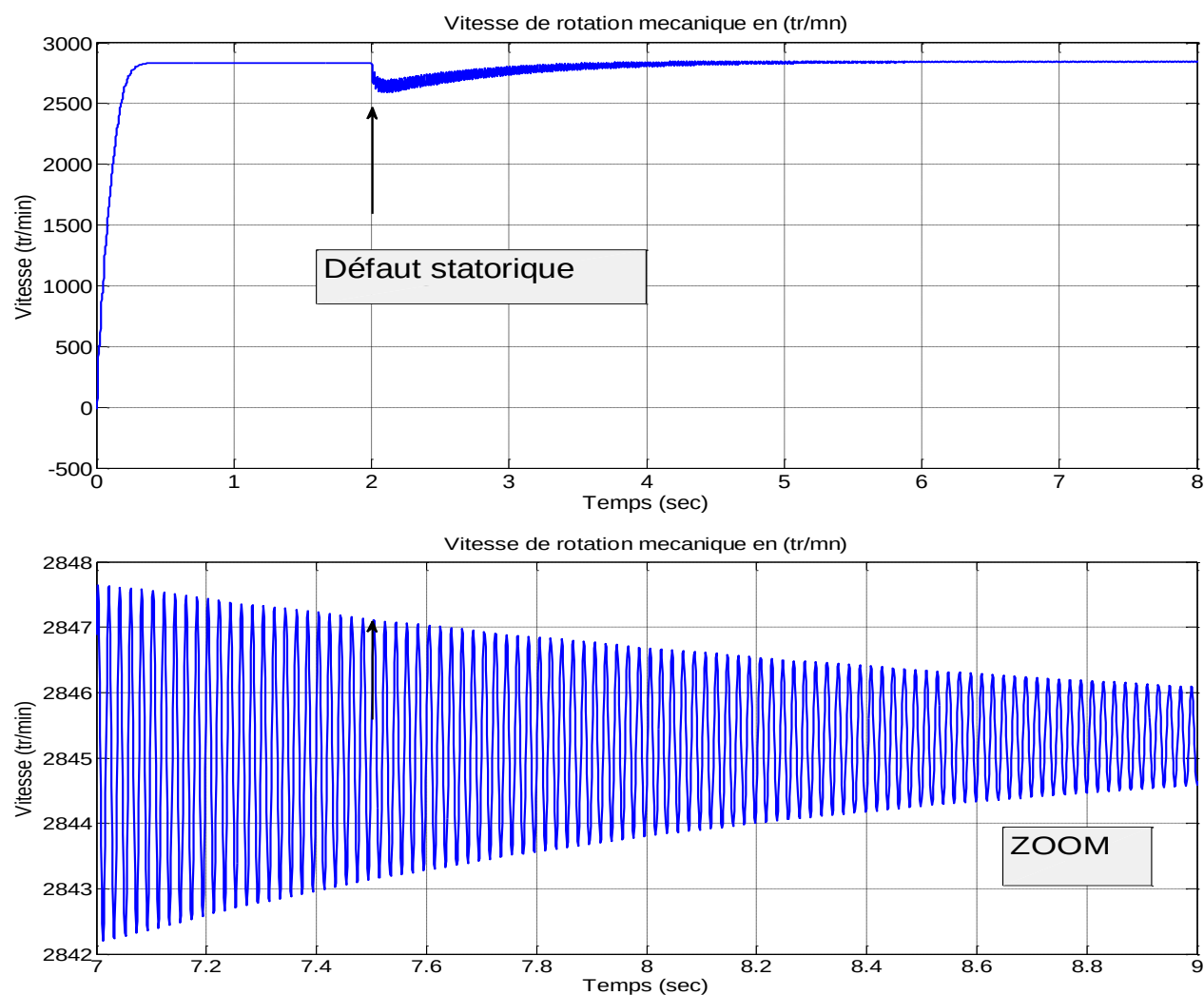


Fig. III. 10: défauts vitesse de rotation mécanique en (tr/min).

-Faible de vitesse presque 2840tr/min Lorsqu'un court-circuit se produit.

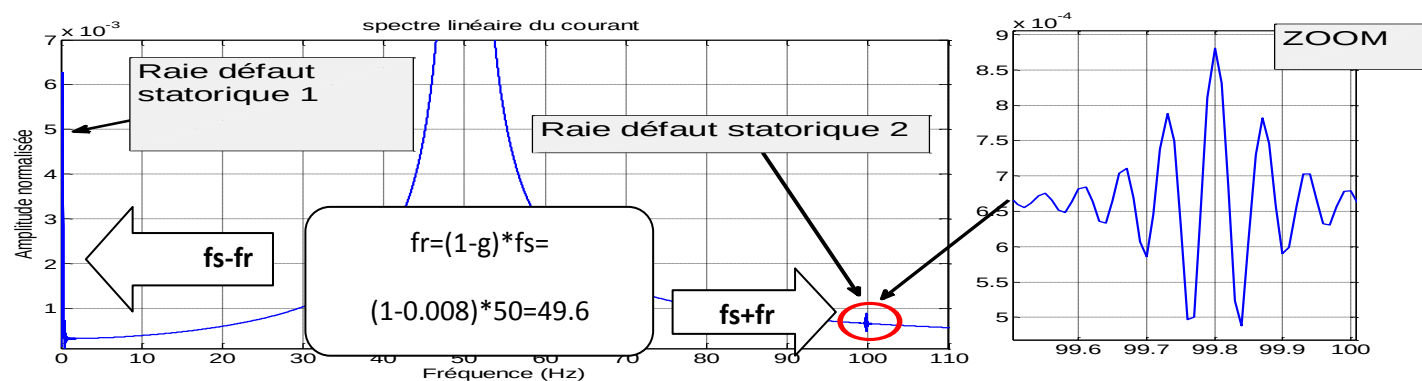


Fig.III. 11: Défauts spectre linéaire du courant.

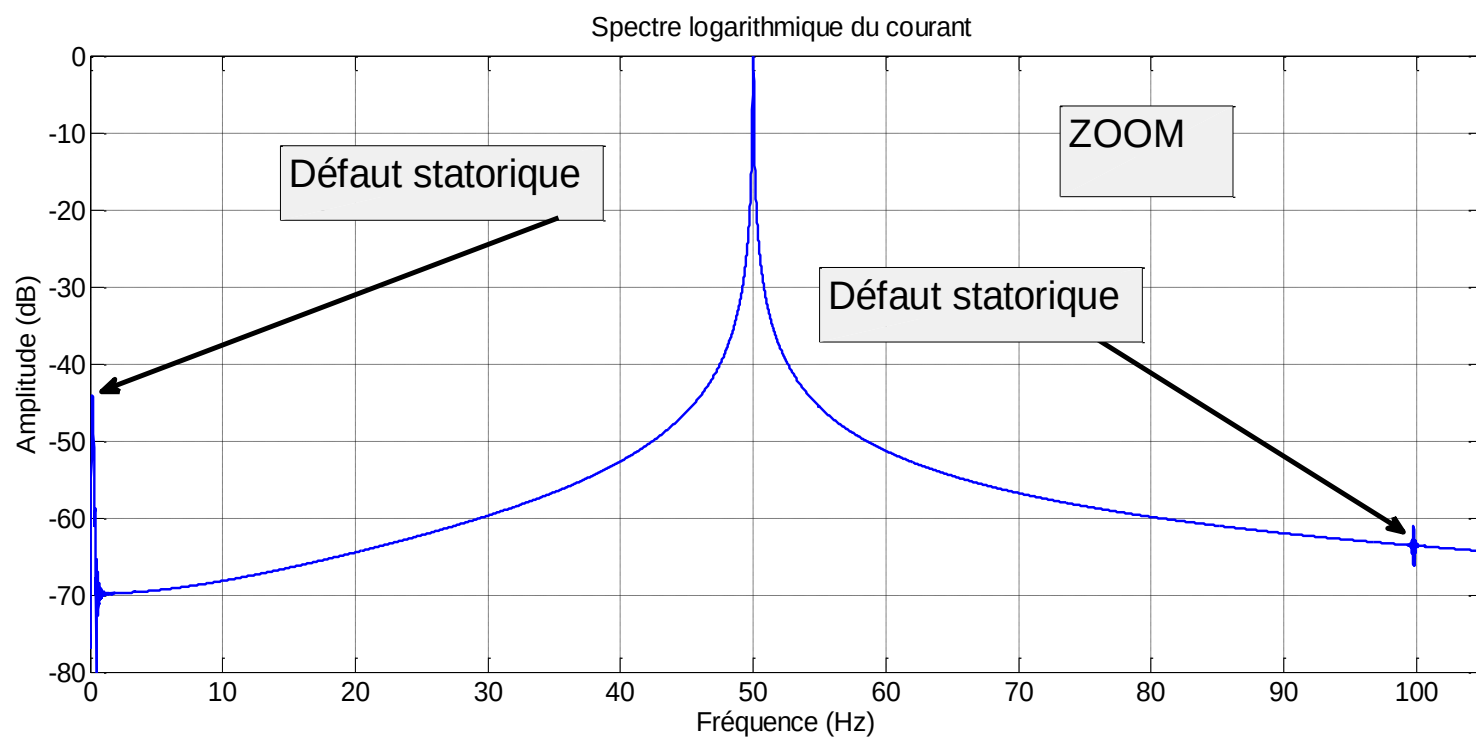


Fig .III. 12: défaut logarithmique du courant:

-Notez également la distorsion dans l'énoncé du spectre logarithmique du courant dans son ensemble des plaques passées (courant ,couple et vitesse).

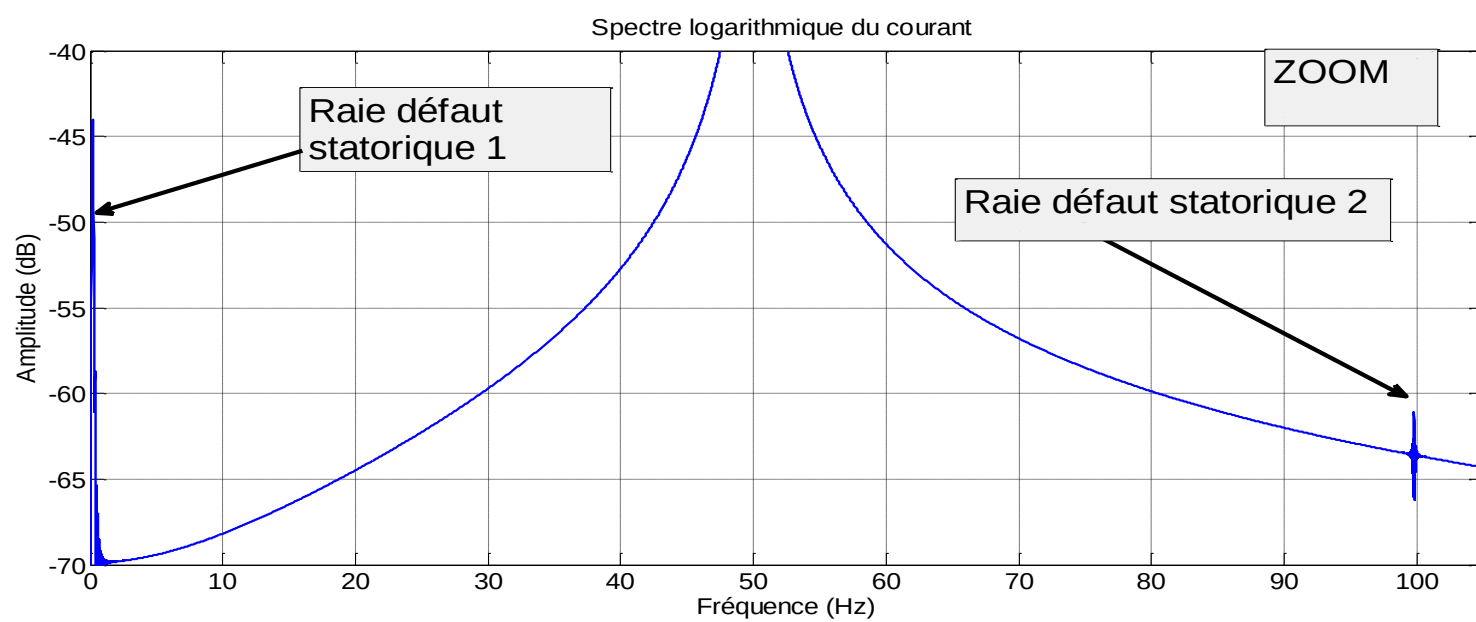
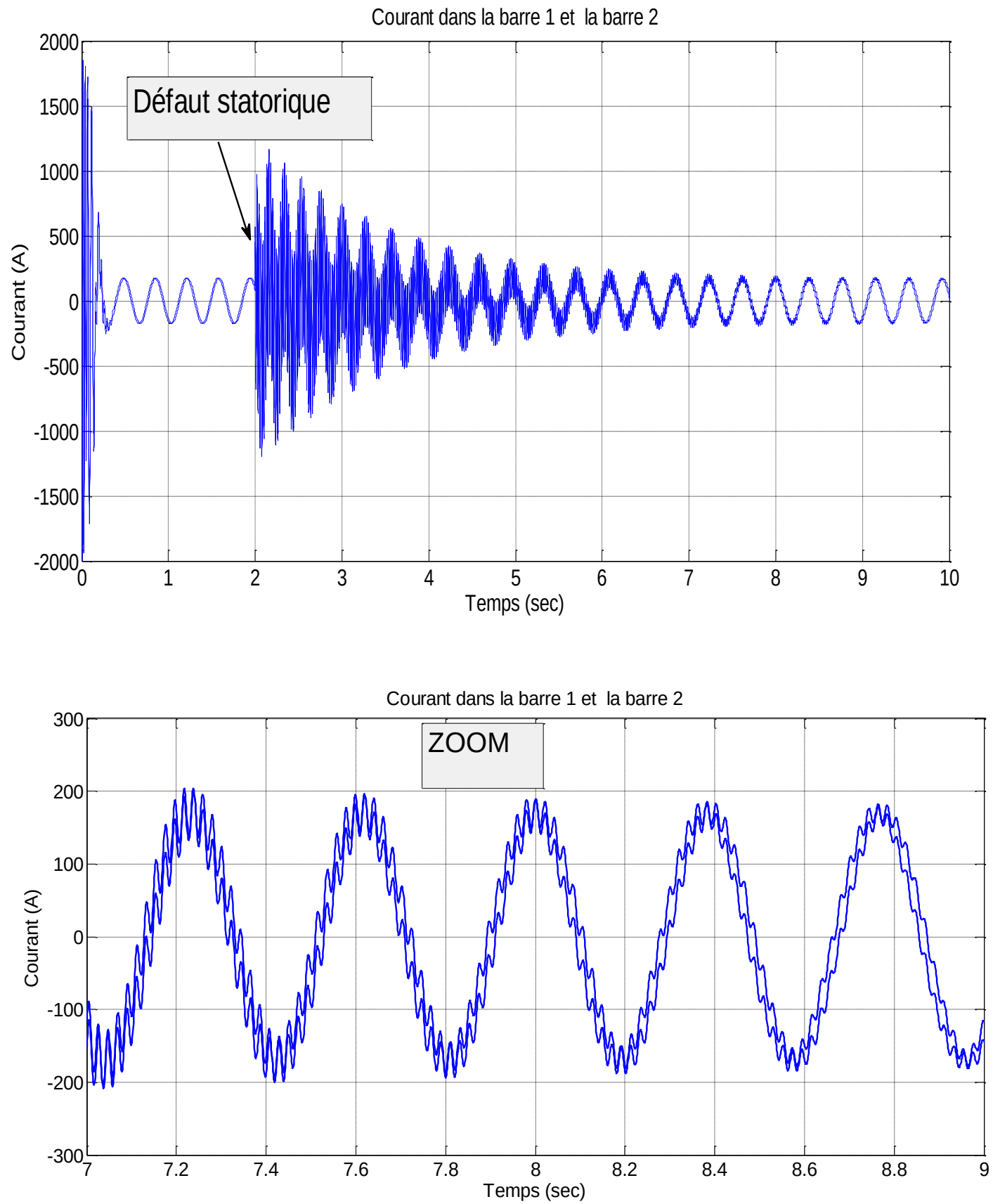


Fig III. 13: défaut spectre logarithmique du courant.

**Fig. III. 14:** défaut de courant dans la barre 1 et la barre 2.

-Nous notes faible le valeur du courant dans la barre 1 et la barre 2 (180A).le valeur naturelle (200A).

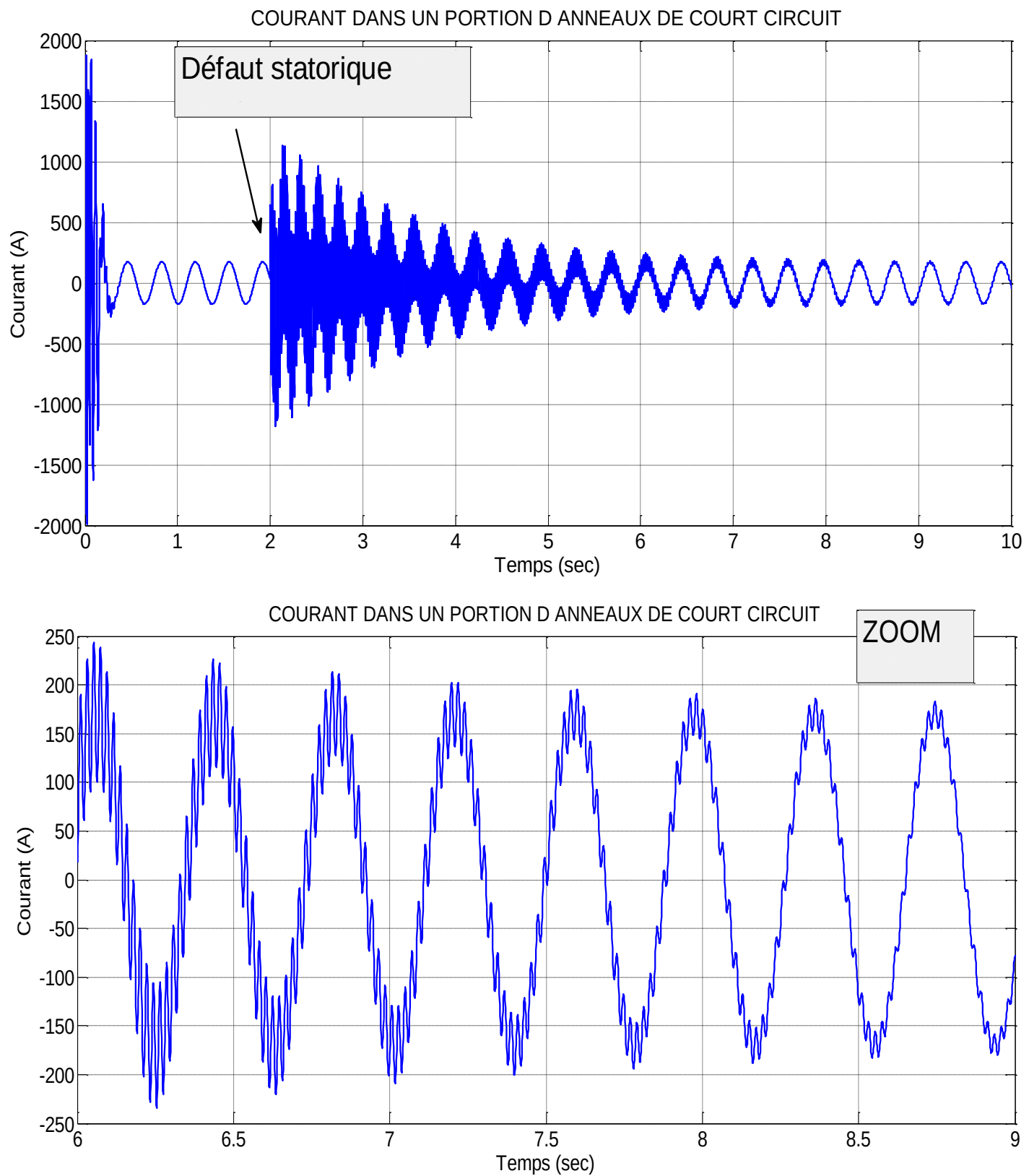


Fig. III. 15: défaut courant dans un portion d'anneaux de court circuit.

-Diminuer de valeur du courant dans un portion d'anneaux Quand le court- circuit.

III.4 Conclusion:

Dans ce chapitre nous avons étudié les performances du moteur asynchrone triphasé pendant les défauts statorique interne en utilisant MATLAB simulation , Nous avons examiné et suivi les éléments ou valeurs les plus importants du fonctionnement du moteur asynchrone.(courant, couple ,électromagnétique , vitesse courant dans un portion d'anneaux et courant dans la barre.

Le chapitre suivant sera consacré à la réalisation de cette résultats réellement dans notre laboratoire de la faculté de technologies de l'université d'El-Oued .Nous avons découvert l'influence des défauts statoriques sur les harmoniques de temps et quel harmonique le plus sensible pour ce type de défaut.

Chapitre IV

Résultats Expérimentaux

analyse spectrale du courant statorique

IV.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.

IV.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 [34] :

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

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 $f_{sh}(p, N_r, k)$.

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

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

: la valeur du courant maximale rotorique I_{rm}

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 [35],

[KAI 10] :

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

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 : $f_s, 3f_s, 5f_s, 9f_s, \dots$ nous obtenons des harmoniques que ce soit pour le fonctionnement sain ou défectueux tel que [7] :

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

En général, nous avons deux séries d'harmoniques [36], [37],[38] et [39]:

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 :

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

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

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**) :

3- Une série d'harmoniques de défaut de barres « *Harmonics of Rotor Bar Fault* » (**RBFH**) de fréquences caractéristiques [40,] ,[41].

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

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

fréquences caractéristiques[41] :

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

IV.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)[41].

avec

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

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

Types d'harmoniques	Leurs fréquences caractéristiques	Leurs causes ^{a)}
Harmoniques de temps (TH):	$TH = hf_s$	Imposés par la source d'alimentation ou l'asymétrie du bobinage ^{a)}
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) ^{a)}
Harmoniques des défauts de barres rotoriques (RBFH)	$R^\pm = (h \pm 2ks)f_s $	Dus à l'assymétrie du rotor de la cage rotorique ^{a)}
Harmoniques des défauts d'excentricité (EFH)	$E^\pm = hf_s \pm kf_r $	Dus à l'excentricité mixte naturelle du rotor ^{a)}

Tableau .IV.1 Expression générale des différentes harmoniques du courant statorique-[41].

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 [41].

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

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

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 [41]:

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

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

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 [41]:

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

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

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

Dans cette chapitre, nous essayons de diagnostique les défauts interne les plus importants du moteur et de comparer les résultats. Les important défauts qui présenté: (court-circuit cas 5% et cas 10%).

IV.3-Les matériels utilises :

1: source d'alimentation:



Fig.IV.1 : Source d'alimentation 380v

2: moteurs asynchrones triphasés (3kw 4.1 ph)

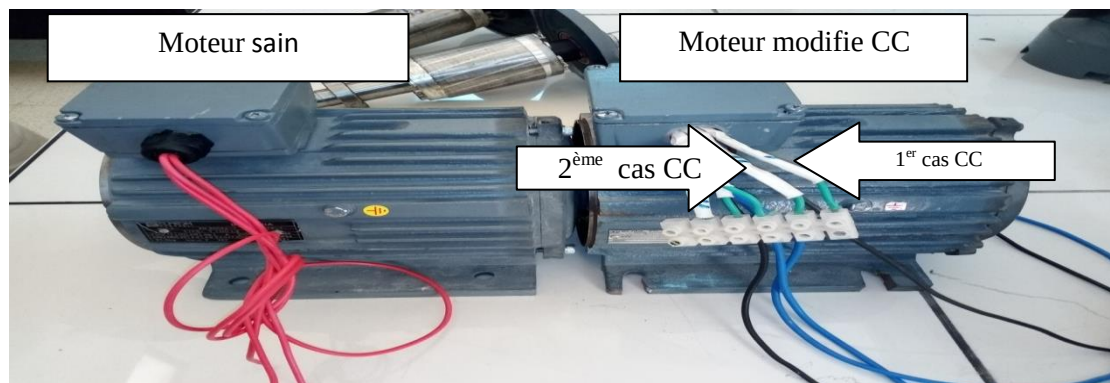


Fig.IV.2 : Moteur saine et moteur avec prises de courts-circuit statoriques

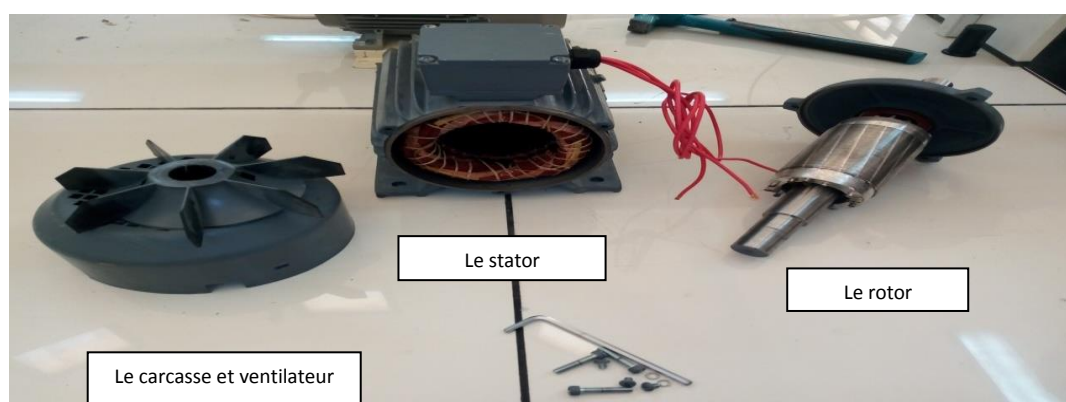


Fig.IV.3 :Eléments de moteur asynchrone

3:Capteur de courant:



Fig.IV.4 : capteur de courant

4: ScienceWorkshop®750 Interface (USB) Model No. CI-7599

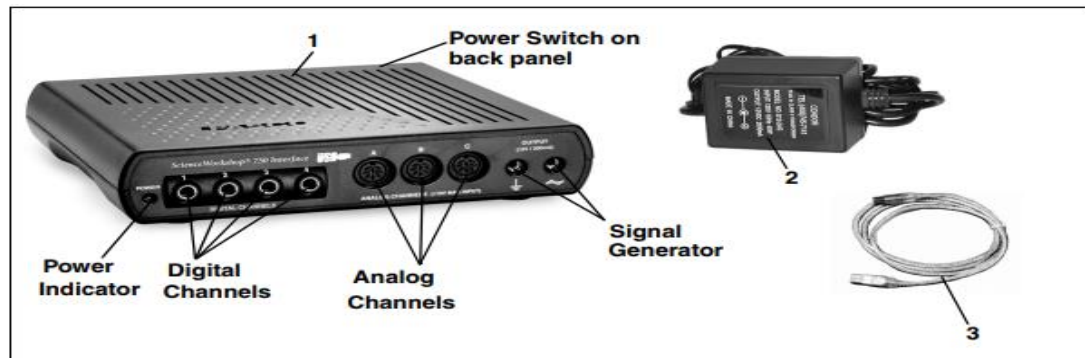


Fig.IV.5 : ScienceWorkshop®750 Interface (USB) Model No. CI-7599

IV.4- Réalisation pratique:

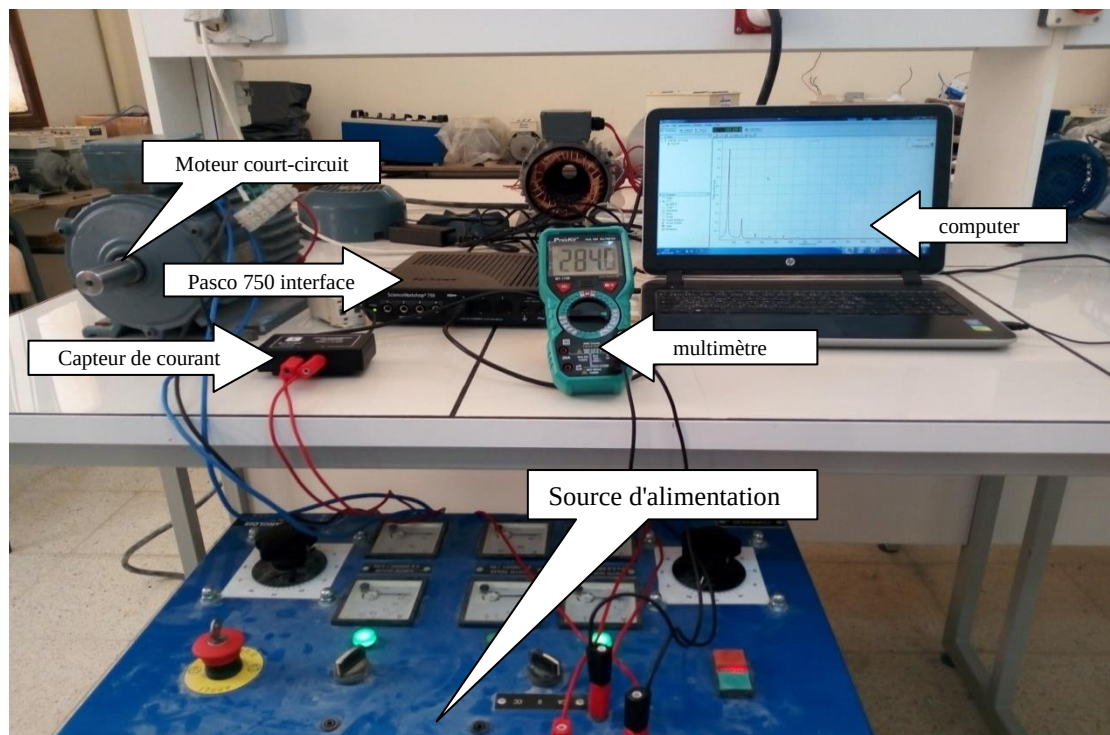


Fig.IV.6 : Banc d'essai (Labo de machines électronique de l'université d' El Oued)

IV.5- Résultats expérimentaux:

IV.5.1- Cas d'une machine saine :

-Spectre expérimental du courant statorique:

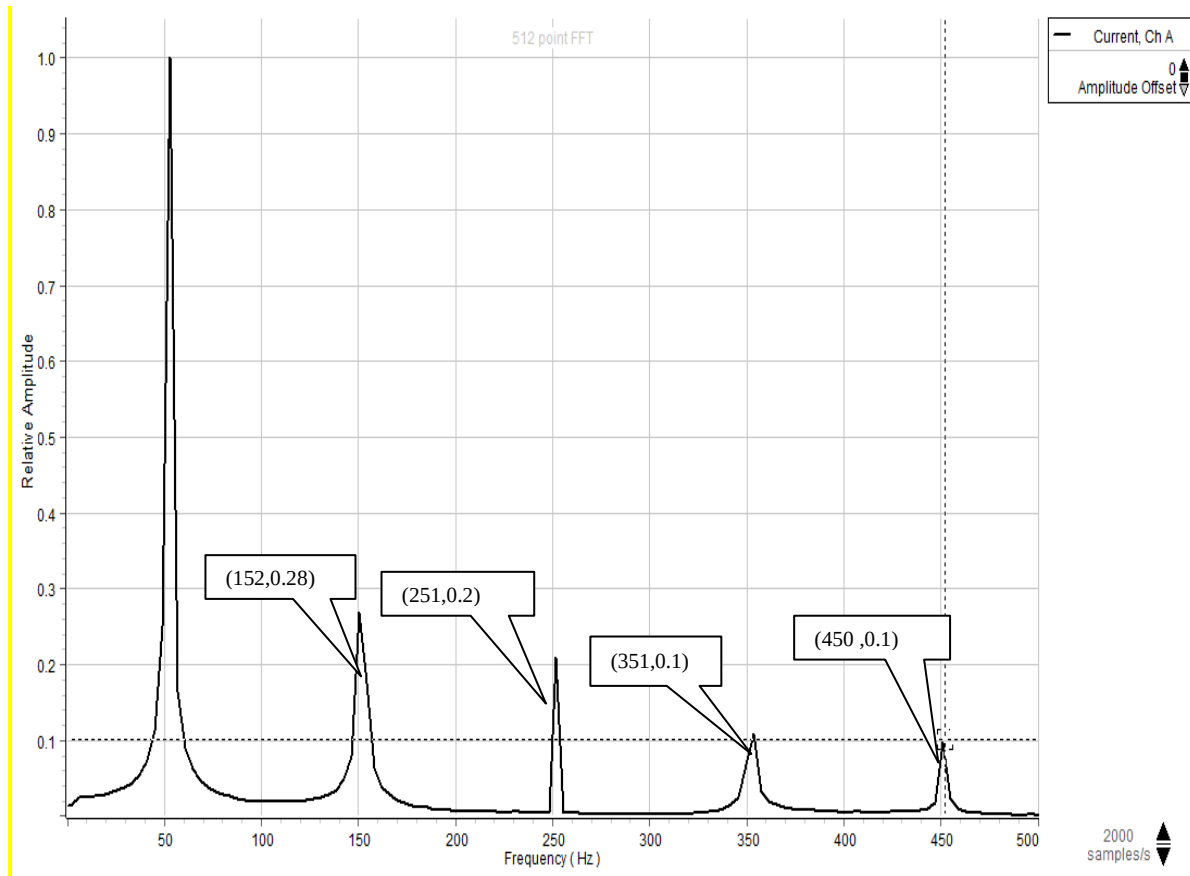


Fig.IV.7 : Spectre expérimental du courant statorique avec ses harmoniques(état sain)

- Courant statorique:

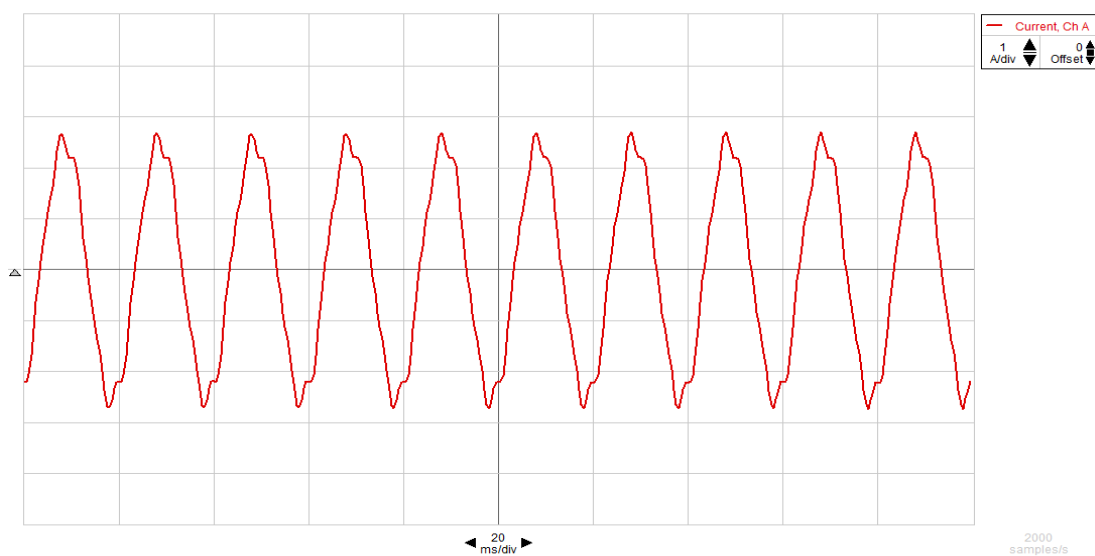


Fig.IV.8 : Courant statorique cas sain.

IV.5.2- Cas d'une machine avec court circuit statorique

(1^{er} cas 5%):

Spectre expérimental du courant statorique avec ses harmoniques de temps

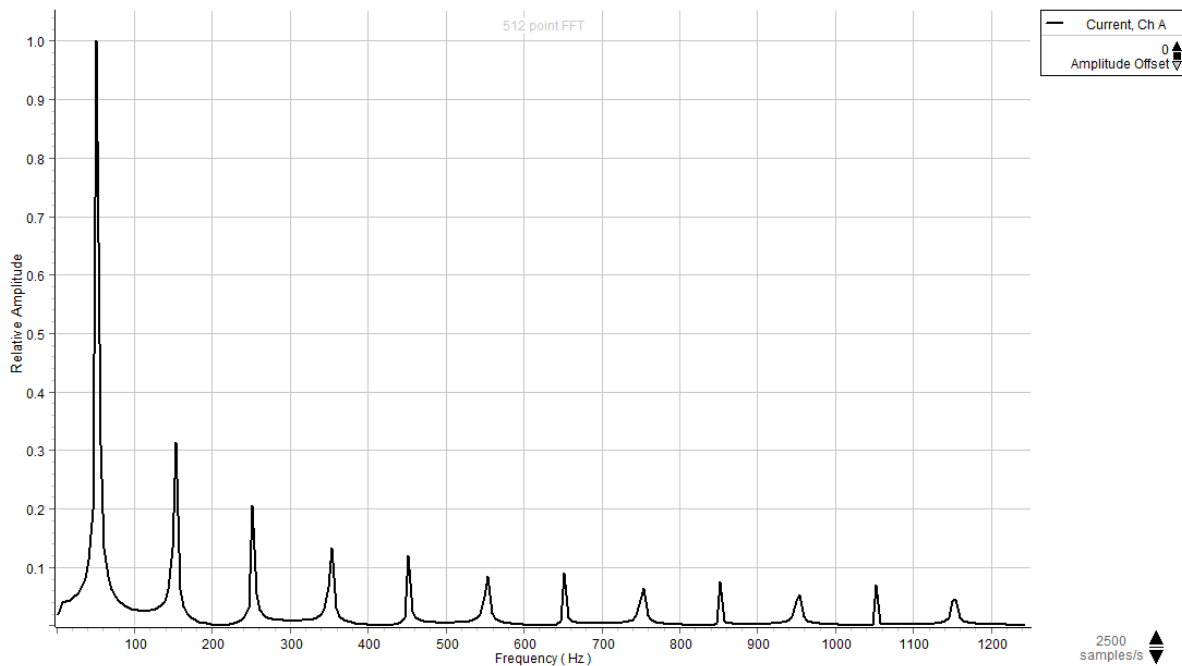


Fig.IV.9 : FFT expérimentale du courant statorique avec ses harmoniques de temps
(avec courts-circuit statoriques de 5 %)

-le raie1= $[0.3/0.28 = 1.07\%]$

-Le raie 2= $[0.2/0.2 = 1\%]$

-Le raie 3= $[0.13/0.1=1.3\%]$, Le raie 3 Taux le plus élevé.

-Courant statorique:

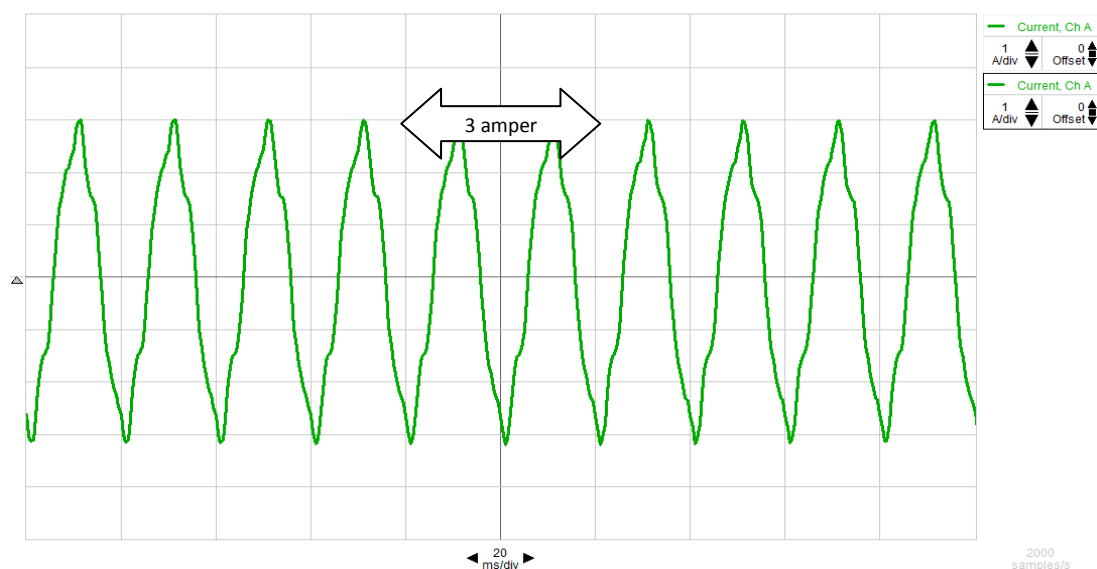


Fig.IV.10 :Courant statorique

Remarque :

Nous observons l'augmentation de la valeur du courant à une valeur très significative et claire lorsqu'il est appliqué "court circuit 5%".

(2^{ème} cas 10%)

Spectre expérimental du courant statorique avec ses harmoniques temps:

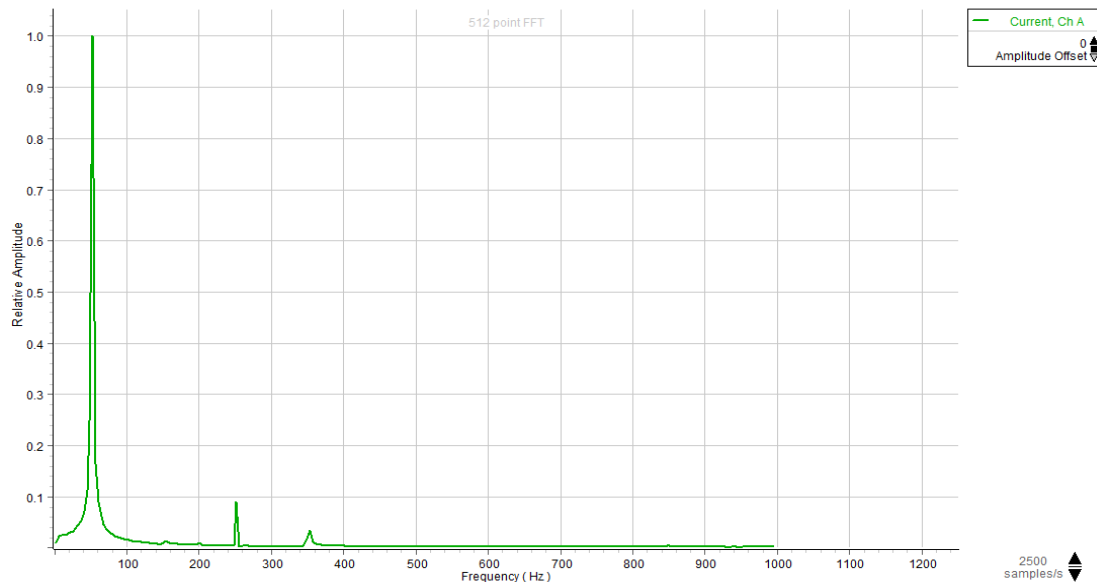


Fig.IV.11 : Spectre expérimental du courant statorique avec ses harmoniques.

Trouvez le taux d'erreur le plus élevé -le raie1= $[0.1 / 0.3 = 0.33\%]$

-Le raie 2= $[0.20 / 0.2 = 0.1\%]$

-Le raie 3= $[0 / 0.1 = 0\%]$

Le raie 1 Taux le plus élevé:

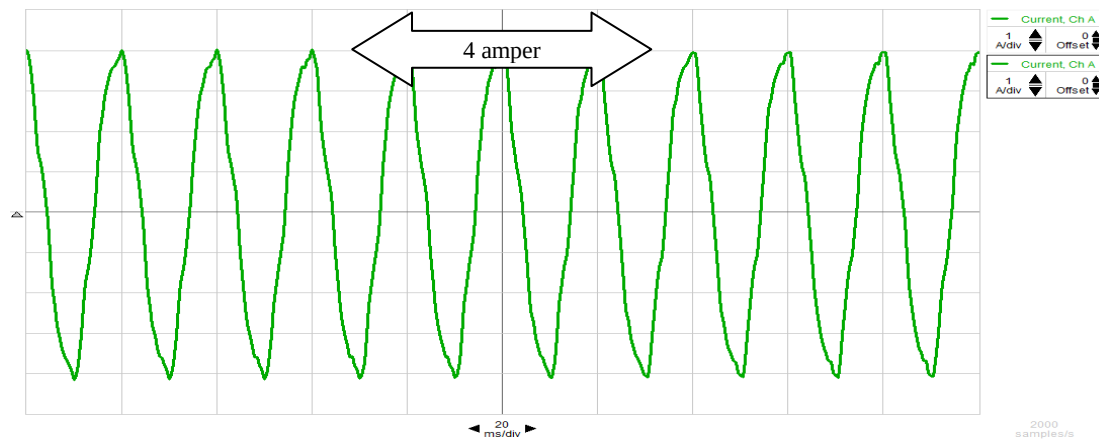
-Le courant statorique:

Fig.IV.12 :Le courant statorique

Remarque :

Nous observons l'augmentation de la valeur du courant à une valeur très significative et claire lorsqu'il est appliqué "court circuit 10%".

IV.6- Conclusion:

Nous concluons de ce travail expérimental en laboratoire que toute modification du moteur, telle que ce que nous avons fait (court-circuit), nous remarquons que la différence augmente très clairement la valeur du courant à un taux significatif . c'est l'un des défauts les plus fondamentaux qui peuvent être diagnostiqué, ce qui représente 45% des défauts qui endommagent le moteur .

CONCLUSION GENERALE :

Le travail présenté dans ce mémoire entre dans le cadre du diagnostic des machines asynchrones fréquemment atteints par des anomalies et des défaillances suite à leur utilisation continue et exhaustive dans le domaine industriel et économique. Le travail présenté dans ce mémoire est l'étude expérimentale et simulée des défauts de la machine asynchrone de 3 KW à cage d'écureuil. Parmi les défauts les plus répandus dans la machine sont ceux entraînés par le court-circuit entre spires dans les phases statoriques. Le contenu spectral du courant statorique nous a permis de détecter les fréquences caractéristiques du défaut $f_s - kfr$ relatives respectivement au défaut type statorique. En constatant que les courants statoriques produisent des oscillations de couple donc des vibrations sur la vitesse de rotation.

Dans le premier chapitre, nous avons rappelé les différents défauts qui peuvent affecter le bon fonctionnement de la machine asynchrone triphasée à cage, ainsi que leurs causes. Les méthodes du diagnostic et les approches utilisées pour la modélisation sont aussi présentées.

Dans le deuxième chapitre nous avons opté pour la modélisation de la machine asynchrone saine (sans défaut), en réduisant les dimensions du modèle triphasé au modèle biphasé par l'utilisation de la transformation de Park, et pour pouvoir exploiter le modèle obtenu en multi-enroulement.

Dans le troisième chapitre, notre objectif était de modéliser la machine asynchrone, ce modèle semble bien adapté à la simulation de défaut, En plus il permet de simuler à la fois le défaut statorique (court-circuit de spires 5%) et le défaut rotorique (court-circuit de spires 10 %).

Dans le quatrième chapitre, nous avons effectué une étude expérimentale afin de pouvoir comprendre les harmoniques de temps et l'influence des défauts statoriques sur ces harmoniques. Une analyse spectrale expérimentale du courant statorique dans notre laboratoire à l'université d'El-Oued, nous a permis de constater une certaine similitude entre sa signature et celle du défaut. Cette comparaison en régime permanent entre les essais expérimentaux et les résultats simulés est encourageante pour ce qui suit dans l'exploitation du modèle avec estimation paramétrique éventuellement dans le cadre de la commande de la machine avec défaut.

Résumé :

La machine asynchrone à cage devient actuellement l'élément clé de la plupart des équipements industriels. Malgré ces avantages, un certains nombres de contraintes de natures très différentes peuvent affecter la durée de vie de cette machine, en occasionnant des pertes économiques considérables. Ce travail de thèse est : l'étude simultanée du modèle simulé et expérimentale des défauts pour une machine asynchrone le point sur les modèles conçus (avec et sans défaut). Après avoir décrit les principaux défauts pouvant survenir sur ceux-ci, nous proposons un modèle appelé « Modèle de la machine asynchrone avec défauts en vue de l'estimation paramétrique ». Ce modèle permet d'étudier l'influence d'un défaut de barre et court-circuit sur le comportement général du moteur asynchrone. Après avoir étudié les phénomènes créés par les défauts statoriques sur les différentes grandeurs temporelles de la machine dont leurs interprétations est quasi difficile pour déceler la nature du défaut, d'où la nécessité de faire une analyse spectrale du courant statorique. La compréhension du fonctionnement avec et sans défaut, ainsi que la vérification des algorithmes de détection des défauts, nécessite la synthèse d'un modèle décrivant le comportement de la machine d'une façon la plus fine, cela n'était possible que par la validation des résultats simulées de ce modèle avec les mesures expérimentales réalisées au laboratoire LGEA.

Mots clés : machine asynchrone, analyse spectrale, modèle de défaut en vue de l'estimation paramétrique, diagnostic de défauts, , spires en court-circuit

Summary : The asynchronous cage machine is currently becoming the key element of most industrial equipment. Despite these advantages, a certain number of constraints of very different natures can affect the lifetime of this machine, causing considerable economic losses. This work of thesis is: the simultaneous study of the simulated and experimental model of defects for an asynchronous machine the point on the models designed (with and without defect). After having described the main defects that can occur on these, we propose a model called "Model of the asynchronous machine with defects for the estimation of parametric". This model makes it possible to study the influence of a defect of bar And short-circuiting the overall behavior of the asynchronous motor. After having studied the phenomena created by stator and rotor defects on the different temporal magnitudes of the machine, whose interpretations are almost difficult to detect the nature of the defect, hence the need to perform a spectral analysis of the stator current. Understanding the fault-free operation and the verification of fault detection algorithms requires the synthesis of a model describing the behavior of the machine in a finest way, this was only possible by validation

Of the simulated results of this model with the experimental measurements carried out in the LGEA laboratory.

Keywords: asynchronous machine, spectral analysis, fault model for parametric estimation, fault diagnosis, , short circuit

- [1] KAZZAZ S.A.S.A., Singh G.K., « Experimental investigations on induction machine condition monitoring and fault diagnosis using digital signal processing techniques », Electric Power Systems Research, vol. 65, p. 197-221, Elsevier, 2003.
- [2] BIANCHI Bolognani S., Pré M.D., « Strategies for the fault-tolerant current control of a five-phase permanent-magnet motor », IEEE Transaction on industry Applications, vol.43, no.4, p. 960-970, July August 2007.
- [3] GAUTHIER J., Hammouri H., Othman S., “A simple observer for non-linear systems applications to bioreactors”, IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 37, no. 6, p. 875-880, 1992.
- [4] MULLER G., LANDY C., “Vibration produced in squirrel-cage induction motors having broken rotor bars and interbar currents”, International Conferences on Electrical Machines, 1994.
- [5] BONNETT A.H., YUNG C., “Increased efficiency versus increased reliability”, IEEE industry Applications Magazine, p.1077-2618, January-February 2008.
- [6] THORSEN O.V., DALVA M., “Failure identification and analysis for high voltage motors in petrochemical industry”, Conference Publication, IEE 1997, no. 444, Condition monitoring methods, 1-3 September 1997.
- [7] THORSEN O.V., DALVA M., “ A survey of fault on induction motors in offshore oil industry, petrochemical industry, gaz terminals, and oil refineries”, IEEE industry Application Magazine, vol. 31, no. 5, September 1995.
- [8] STACK J.R., HABETLER T.G., Harley R.G., “Experimentally generating faults in rolling element bearings via shaft current”, IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 41, no. 1, p. 25-29, January-February 2005.
- [9] SAHRAOUI M., GHOGGAL A., ZOUZOU S., BENBOUZID M., «

Dynamic eccentricity in squirrel
cage induction motor-simulation and analytical study of its spectral
signature on stator-cage induction
motor-Simulation.

[10] BAZINE S., Conception et implémentation d'un Méta-modèle de
machines asynchrones en défaut, PhD
thesis, University of Poitiers, Ecole nationale d'ingénieurs de Tunis, June
2009.

[11] J.P Caron, J.P Hautier, „Modélisation Et Commande De La Machine
Asynchrone“, Edition Technique,
Paris 1995.

[12] SCHNEIDER électrique « guide des solutions d'automatisme
» publication technique, paris 2007.

[13] A.Dida, S.Torurqui " Simulation du moteur asynchrone à cage
«Modèle multi enroulement» dédié au diagnostic des défauts ", P F E en
Electrotechnique, Biskra, 2004.

[14] N. MANSOURI, L. BENSAADIA, "Etude de différents estimateurs
du flux statorique.

[15]: 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.

[16] : G. Didier “ Modélisation et diagnostic de la machine asynchrone en
présence de défaillances ”.Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré,
Nancy I, 2004

[17] : L. Baghli, “ Contribution à la commande de la machine
asynchrone, utilisation de la logique floue, des réseaux de neurones et des
algorithmes génétiques ” Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré,
Nancy-I, 1999

[18] :A.Maghraoui, A.Deboucha, “Diagnostic des défauts dans les moteurs asynchrones triphasés à cage”. Université de Biskra (Algerie) 2006

. [19] : 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

[20] :Zebri.Fouad,Mehamelle.Houcine “ Detection et localisation des défauts de la machine asynchrone à double stator application de la .technique l’intelligence artificielle” Université de Biskra (Algerie).

[21]: Mohamed Boucherma , Mohamed Yazid Kaikaa Abdelmalek Khezzar “Park model of squirrel cage induction machine including space harmonics effects” Journal of Electrical Engineering, Vol. 57, N°. 4, 2006, 193–199.

[22] : Khatir.Abdelfatah “Etude comparative des modèles des MAS utilisés en diagnostic des pannes” mémoire de Magistère , Université Ferhat Abbas-Sétif UFAS (Algérie),2008.

[23] :H. Razik, G. Didier “ notes de cours sur le diagnostic de la machine asynchrone ”.Université Henri Poincaré, Nancy-I, 7-janvier 2003.

[24] : Bouharket. Melek , “ Etude de l’évolution des courants rotoriques d’une machine asynchrone à cage en regime dynamique ”, Thèse de Doctorat 2006,Université de Batna (Algerie).

[25] :Ghoggal. Adel : “ Diagnostic de la machine asynchrone triphasée : dédié à la détection des défauts ”Mémoire de Magister, Université de Batna, Soutenue 2005

. [26]: H.Hamidi ,A.R. Nasiri , F. Taringoo “ Detection and isolation of mixed eccentricity in three phase induction motor via wavelet packet decomposition” Islamic Azad University of Boroujerd.

[27]: Hamid A.Toliat, Thomas A.Lipo, J.Coleman White “ Analysis of a concentrated winding machine for adjustable speed drive applications part 1(motor analysis)” IEEE Transactions on Energy conversion, Vol.6 N°4 ,December 1991.pp 679-683

. [28]:Jonathan. Sprooten “Finite element and electrical circuit modelling of faulty induction machines–study of internal effects and fault detection techniques-A” thesis submitted to the Universite Libre de Bruxelles (ULB) 2007.

[29] :Sahraoui.Mohamed “Contribution aux diagnostics des machines asynchrones triphasées à cage ”Université Mohamed Khider Biskra, 10/2003.

[31]: M. Sahraoui , A. Ghoggal, S.E. Zouzou, M.E. Benbouzid “Dynamic eccentricity in squirrel cage induction motors – Simulation and analytical study of its spectral signatures on stator currents” Laboratoire de Génie Electrique de Biskra (LGEB), University of Biskra, BP 145 Biskra, Algeria.

Journal homepage: www.elsevier.com/locate/simpat.

. [30]: Marcio Massakiti Kubo, Ernesto Ruppert Filho “Three-phase induction motor dynamic mathematical model considering air-gap irregularities” International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives Vienna, Austria, 7-9 September 2005.

[31]: M. Sahraoui , A. Ghoggal, S.E. Zouzou, M.E. Benbouzid “Dynamic eccentricity in squirrel cage induction motors – Simulation and analytical study of its spectral signatures on stator currents” Laboratoire de Génie Electrique de Biskra (LGEB), University of Biskra, BP 145 Biskra,

Algeria.

Journal homepage: www.elsevier.com/locate/simpat.

[32] : Hamza ADDAD «Commande Vectorielle sans capteur de vitesse de la Machine Asynchrone », thèse de master Université Larbi ben m'hidi Oum el bouaghi -2015-

[33] Taibi Djamel: Détection et diagnostic de défauts statorique externe d'un moteur asynchrone triphasé à l'aide de la carte ARDUINO MEGA 2560

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

[35] K. Bacha, S. Ben Salem, A. Chaari , An improved combination of Hilbert and Park transforms for fault detection and identification in three-phase induction motors , Electrical Power and Energy Systems ,Vol 43 (No.1),2012, p1006–1016.
<https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2012.06.056>

[36]. 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

[37]. M. Sahraoui , Etude comparative des méthodes de diagnostic des machines asynchrones (Comparative study of the methods of diagnosis in the asynchronous machines), Thesis for the degree of Doctor of Science, Biskra university ,Algeria, 2010.(in French).

[38] 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>

[39]. A. Allal, B. Chetate , A new and best approach for early detection of rotor and stator faults in induction motors coupled to variable

loads,Frontiers in Energy, Vol 10 (No.2),2016, P 176-191.DOI:
10.1007/s11708-015-0386-2

[40]. A. Allal, Nouvelles méthodes et techniques de diagnostic des machines asynchrones à rotor en cage d'écureuil (New methods and diagnostic techniques asynchronous machines of squirrel cage rotor)), Thesis for the degree of Doctor of Science, Boumerdes university, Algeria, 2017.(in French).

[34,35,36,37,38,39,40]. Les cette bibliographie tous sont mentionnés

Et présenté dans le mémoire:

Allal A and Chetate B. High sensitivity detection of the stator short-circuit faults in induction motor using Hilbert Park's vector product. J. Fundam. Appl. Sci., 2019, 11(2), 994-1022.

Annexe 1

Paramètres de la machine utilisée en simulation:

Pour nos expérimentations, nous avons utilisé une machine, conçue par le constructeur ELMA-TROYAN ses caractéristiques détaillées sont données comme suit :

Plaque signalétique :

Constructeur	ELMA TROYAN
Puissance	3 kw
Tension nominale	Δ/ Y 220/380 V
Courant nominale	Δ /Y 11.2/6.5 A
Cos (φ)	0.87
Vitesse nominale	2880 min ⁻¹
Nombre de paires de pole	1
Freauqnce	50 Hz