

UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA

Faculté des Sciences Appliquées

Département de Génie Electrique



Mémoire

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et technologies

Filière : Génie électrique

Spécialité : Eélectrotechnique Industrielle

Présenté par :

BECHOUA MILOUD

Thème :

**Détection de défauts de court-circuit entre spires statoriques dans
une machine asynchrone par la technique d'analyse spectrale**

Soumis au jury composé de :

M ^r taibi djamal	MCA	Président	UKM Ouargla
M ^r zahir ider	MCB	Encadreur/rapporteur	UKM Ouargla
M ^r kourass sid ali	MCA	Examineur	UKM Ouargla

Année universitaire 2020/2021

الملخص

يركز العمل المقدم على نمذجة الدارة القصيرة بين اللفات في الآلة غير المتزامنة ثلاثية الطور، والهدف الرئيسي هو تحديد أعراض هذا

العيب في التيارات الثابتة، وقد تم تحقيق هذا العيب بواسطة برنامج ماطلاب

تم اجراء هذه المحاكاة باستعمال برنامج ماطلاب للآلة اللاتزامنية في حالة صحية وحالة وجود عطل مع التحليل الطيفي للتيار في

الجزء الثابت للطور الذي يحتوي على عطل، وقد مكنت نتائج هذه المحاكاة الاختبارات من فهم تأثير الدائرة القصيرة بين اللفات في سلوك الماكينة والكشف عن الأعطال الناتجة .

الكلمات المفتاحية : الآلة اللاتزامنية . الأعطال . FFT

Résumé :

Le travail présenté est axé sur la modélisation du court-circuit entre les enroulements dans une machine asynchrone triphasée, et l'objectif principal est d'identifier les symptômes de ce Le défaut est dans les courants constants, et ce défaut a été étudié par le programme MATLAB.

Cette simulation a été réalisée à l'aide du programme MATLAB pour la machine asynchrone en état sain et en défaut avec analyse spectrale (FFT) du courant en le stator de phase est en défaut, et les résultats de cette simulation ont permis aux tests de comprendre l'effet du court-circuit entre les enroulements sur le comportement de la machine.

Mots clés : machine asynchrone, défauts, FFT,

Abstract :

The presented work is focused on the modeling of the short circuit between the windings in a three-phase asynchronous machine, and the main objective is to identify the symptoms of this The fault is in constant currents, and this fault has been studied by the MATLAB program.

This simulation was carried out using the MATLAB program for the asynchronous machine in healthy state and in fault with spectral analysis (FFT) of the current in the phase stator is in fault, and the results of this simulation allowed the tests of understand the effect of the short circuit between the windings on the behavior of the machine.

Keywords : induction machine, faults, FFT,

REMERCIEMENTS

Qu'il me soit d'abord permis de remercier et d'exprimer ma gratitude envers Allah, qui m'adonné la patience et la volonté pour que je puisse continuer

ce travail. Je tiens à remercier Dr. z. ider. pour son encadrement de ce mémoire et surtout pour ces qualités scientifiques et humaines.

Je remercie également à tous membre de jury d'avoir accepté de juger de

ce mémoire.

Je remercie également tous mes collègues pour leurs soutiens morales durant ce année de préparation de ce mémoire.

DÉDICACE

Je dédie ce modeste travail :

Avant tout, je tien à remercies Allah, et l'unique qui

M'offre le courage et la volonté nécessaire pour affronter les

vie,

A ceux qui sont les plus chers du monde, ma mère et mon père,

à qui je n'arriverai jamais à exprimer ma gratitude et ma

Reconnaissance, que dieu les protège. à toute ma famille et à mes

Amis,

Sommaire

Introduction Générale.....2

Chapitre I .Généralités sur les défauts dans la machine asynchrone et différents méthode de détection différente.....

Introduction 3

I. 1. Constitution de la machine asynchrone :3

 I .2. 1. Le Stator 4

 I .2. 2. Le Rotor 4

 I .2. 3 Paliers 6

I .2. Les différents défauts de la machine asynchrone 7

 I .2. 1. Défauts statoriques : 7

 I .2.2. Défauts rotoriques 10

 I .2.4. Autres défaillances 14

 I .2.5. Défauts extérieurs (d'environnement) : 14

I.3. Méthodes de détection des machines électriques..... 15

 I.3.1 Des grandeurs mesurables et des signaux de défaut 15

 I.3.2 Approche signal 16

 I.3.3.Analyse spectrale 16

I.4. Conclusion : 19

Chapitre II. Modélisation de la machine asynchrone avec et sans défaut de court-circuit statorique

Introduction 21

II.1.Modélisation de la machine asynchrone saine..... 21

II.1.1. Hypothèses simplificatrices	21
II.1.2. Modèle triphasé / triphasé.....	22
II.1.3. Modèle de Park.....	23
II.1.4. Modèle multi-spires	25
II.2.Modélisation du défaut de court-circuit entre spires	27
II.2.1. Modèle de court-circuit dans l'enroulement statorique (phase Sa)	27
CONCLUSION	30
Chapitre III .Simulations et application de l'analyse spectrale pour la détection de défaut.....	
Introduction	31
III.1 Simulation de la machine asynchrone triphasée :	31
III.1 .1 Résultats de simulation lors d'un fonctionnement de la machine asynchrone saine.....	31
III.1.2 Résultats de simulation lors d'un fonctionnement avec défaut Statorique	34
III.2. analyse spectrale du courant statorique en l'utilisant la FFT (Faste Fourier Transformer) pour la détection de défauts.....	39
Conclusion.....	44
Conclusion générale.....	45

Liste des symboles et notations

V_{sd}, V_{sq} : Tensions statoriques suivant l'axe d et q, respectivement.

i_{rd}, i_{rq} : Courants rotoriques suivant l'axe d et q, respectivement.

ϕ_{rd}, ϕ_{rq} : Flux rotoriques suivant l'axe d et q, respectivement.

R_s, R_r : Résistances statorique et rotorique, respectivement.

L_s, L_r et M_{sr} : Inductances cycliques statorique, rotorique mutuelle, respectivement.

I_d : Matrice identité. i_f : courant de court-circuit et θ : décalage angulaire entre le Stator et le rotor.

X_{abc} : $X=v$ (tension), $X=i$ (courant), $X=\phi$ (flux) et l'indice $x = s$ (stator), r (rotor).

l_s, l_r : Inductances propres statorique et rotorique et r_f, l_f : résistance et inductance de Court-circuit.

l_{sf}, l_{rf} : Inductances de fuite statorique et rotorique.

$M_{sr}(\theta)$: Matrice inductance mutuelle qui est fonction de décalage angulaire entre le Stator et le rotor

γ_a : Taux de spires en court-circuit dans la phase S_a .

f_a : Fréquence de défauts

$f = f_s$: Fréquence statorique

MAS : machine asynchrone

FFT : Faste Fourier Transformer

Table des Figures

FIGURE .I. 1 ELEMENTS DE CONSTITUTION D'UNE MAS A CAGE D'ECUREUIL	3
FIGURE .I. 2. STATOR	4
FIGURE .I. 3 . ROTOR A SIMPLE CAGE.....	5
FIGURE. I. 4. ROTOR A DOUBLE CAGE.....	6
FIGURE I. 5. DEFAUTS STATORIQUES [7]	10
FIGURE I. 6. EXCENTRICITE STATIQUE, DYNAMIQUE	12
FIGURE I. 7. DIFFERENCE DEFAILLANCE DE ROULEMENT A BILLES	13
FIGURE I. 8. REPRESENTATION DE QUELQUE GRANDEUR MESURABLE SUR LA MACHINE ELECTRIQUE [4]	15
FIGURE I. 9. PRINCIPE DE LA SURVEILLANCE PAR ANALYSE SPECTRALE.....	17
FIGURE I. 10. MESURES VIBRATOIRES DE LA MACHINE ASYNCHRONE [09].....	18
FIGURE II. 11. CIRCUIT EQUIVALENT DU STATOR.....	26
FIGURE .II. 12. DEFAUT DE SPIRES DANS L'ENROULEMENT STATORIQUE [11].....	28
Figure.III.1. Evolution des grandeurs électriques et électromécaniques à vide et sans défaut...32	
Figure .III.2. Evolution des grandeurs électromécaniques sans défaut.....34	
Figure .III.3. Evolution des grandeurs électriques et électromécaniques avec défauts en avide...36	
Figure .III.4. Evolution des grandeurs électriques et électromécaniques avec défauts en charge.38	
Figure.III.5. FFT algorithmme [12].....	40
Figure .III.6 <i>Spectre du courant statorique de la machine saine a la phase (a), dans la plage [0-300] Hz.....</i>	41
Figure III.7. <i>Spectre du courant statorique en présence à la machine avec court-circuit 5% à la phase (a) dans la plage [0-300] Hz.....</i>	42
Figure .III.8. <i>Spectre du courant statorique en présence à la machine avec court-circuit 10% à la phase(a) dans la plage [0-300] Hz.....</i>	4

Introduction Générale

Introduction Générale

La machine asynchrone à cage d'écurueil est connue pour sa robustesse, sa simplicité de fonctionnement et ses faibles coûts d'achat et de maintenance. Cette machine est largement utilisée dans la plupart des entraînements électriques dans plusieurs domaines industriels, notamment pour des applications à vitesse variable. La machine asynchrone présente avec le temps un défaut de fonctionnement électrique ou mécanique au niveau du stator comme le court-circuit entre spires de la même phase. Ce défaut est assez fréquent. Il 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 dans le cas des machines asynchrones. 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 deuxième court-circuit). Par contre, le couple électromagnétique moyen délivré par la machine reste sensiblement identique excepté une augmentation des oscillations de couple liées au déséquilibre des courants de phases engendré par le défaut. [1]

Le travail porte sur le diagnostic des machines asynchrones triphasées. La croissance de ce type de machine 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 tous les domaines industriels et en particulier dans les secteurs de pointe comme l'aéronautique, le nucléaire, la chimie ou encore les transports ferroviaires. A titre d'exemple, aux Etats-Unis, 70 millions de moteurs asynchrones sont fabriqués chaque année pour une population d'environ 300 millions de personnes. Toute proportion gardée, il est clair que ces moteurs nous conduisent à porter une attention de plus en plus sérieuse quant à leur fonctionnement et leur disponibilité.

En effet, l'apparition d'un défaut conduit le plus souvent à un arrêt irrémédiable de la machine asynchrone entraînant, en conséquence, un coût de réparation non négligeable pour l'entreprise (cas des machines de fortes puissances), sans oublier la perte de production occasionnée. La surveillance et le diagnostic des machines asynchrones a fait l'objet de nombreux travaux. L'analyse des signatures spectrales des courants de lignes en était la première tentative

pour la détection des pannes dans les machines électrique, en se basant sur des logiciels de surveillance.

Ces derniers moins performants et moins précis ont été de nos jours améliorés dans un contexte industriel par mis en œuvre de différentes méthodes, par exemple l'analyse temps-fréquence et temps-échelle, diagnostic des défauts par estimation paramétrique, diagnostic des défauts par l'analyse du vecteur de Park, technique additionnelle et le diagnostic des défauts par le suivi des grandeurs mesurables. Nous basant particulièrement sur cette dernière méthode en utilisant la modélisation réelle triphasé-triphasé.

Cette mémoire est structurée en trois chapitres :

Le premier chapitre, est scindé en deux parties dont la première est consacrée à un rappel sur la Construction de la machine asynchrone triphasée et le principe de fonctionnement de cette dernière, quant à la deuxième partie, est consacré à la description des différents défauts qui peuvent apparaître dans la machine asynchrone et leurs causes aussi que les différentes méthodes de détection de défauts.

Le deuxième chapitre, nous allons présenter un modèle mathématique (modélisation) de la Machine asynchrone à cage d'écureuil saine et défauts statorique (court-circuit entre spires)

Le troisième chapitre, nous présenterons les résultats de simulation du moteur Asynchrone triphasée dans les différentes conditions de fonctionnement, (avec et sans défaut). Nous monterons les effets du court-circuit entre spires sur les différentes grandeurs électriques et électromagnétiques de la machine. Finalement on applique la transformation de Fourier rapide(FFT) pour l'analyse spectrale des courants statorique.

Nous terminerons ce mémoire par une conclusion générale et des perspectives.

Chapitre I

*Généralités sur les
défauts dans la machine
asynchrone et les
différentes méthodes de
détection*

Introduction

La machine asynchrone, souvent appelée moteur à induction comprend un stator et un rotor, constitués d'empilement de tôles d'acier au silicium et comportant des encoches dans lesquelles sont placées les enroulements. Le stator est fixe ; on y trouve les enroulements reliés à la source, l'objectif étant d'obtenir une répartition des forces magnétomotrices et du flux la plus sinusoïdale possible dans l'entrefer, Le rotor est monté sur un axe de rotation [2]

I. 1. Constitution de la machine asynchrone :

La machine asynchrone, souvent appelée moteur à induction comprend un stator et un rotor, constitués de tôles d'acier au silicium et comportant des encoches dans lesquelles on place les enroulements. Le stator est fixe ; on y trouve les enroulements reliés à la source. Le rotor est monté sur un axe de rotation. Selon que les enroulements du rotor sont accessibles de l'extérieure ou sont fermés sur eux-mêmes en permanence, on définit deux types de rotor : bobiné ou à cage d'écurieil. Toutefois, nous admettons que sa structure est électriquement équivalente à celle d'un rotor bobiné dont les enroulements sont en court-circuit. Dans ce travail, nous nous intéressant à la machine asynchrone à cage d'écurieil. [2]

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

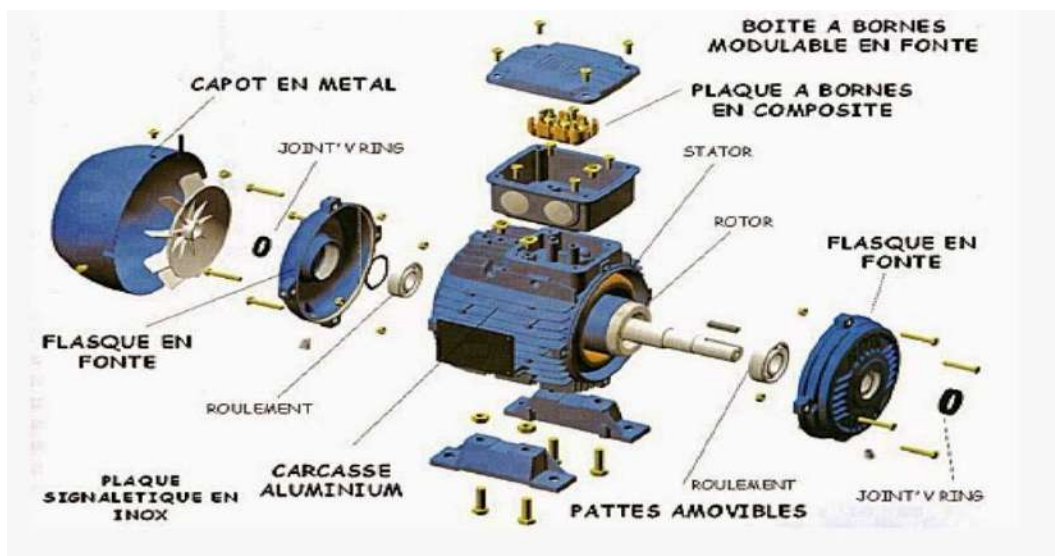


Figure .I. 1 Eléments de constitution d'une MAS à cage d'écurieil

I .2. 1. Le Stator

Il est constitué par une couronne des tôles empilées. Ce sont des tôles minces (0.5mm), De la qualité 1.6 W/kg. Cette couronne est serrée dans une carcasse. Débouchant à l'intérieur de l'anneau ainsi formé, des encoches contiennent un enroulement Triphasé. Cet enroulement peut être bipolaire, tétra polaire, à six pole, etc. Les entrées et les sorties des trois phases aboutissent à une plaque à borne [3].

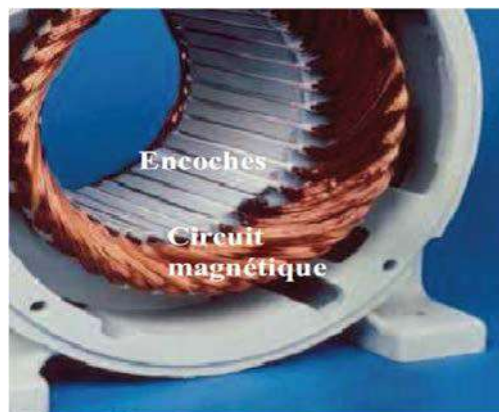


Figure .I. 2. Stator

I .2. 2. Le Rotor

A. Rotor à simple cage

Le circuit du rotor est constitué de barres conductrices régulièrement réparties entre deux couronnes métalliques formant les extrémités, le tout rappelant la forme d'une cage d'écureuil. Bien entendu, cette cage est insérée à l'intérieur d'un circuit magnétique analogue à celui du moteur à rotor bobiné.

Ce type de moteur, beaucoup plus aisé à construire que le moteur à rotor bobiné, est d'un prix de revient inférieur et a une robustesse intrinsèquement plus grande. Il n'est donc pas étonnant qu'il constitue, et de loin, la plus grande partie du parc des moteurs asynchrones en service. Son inconvénient majeur est qu'il ne permet pas d'insérer un rhéostat et qu'il a, au démarrage, de mauvaises performances (courant élevé et couple faible). C'est pour remédier à cette situation

qu'ont été développés deux autres types de moteur (rotor à double cage et rotor à encoches profondes) [3].

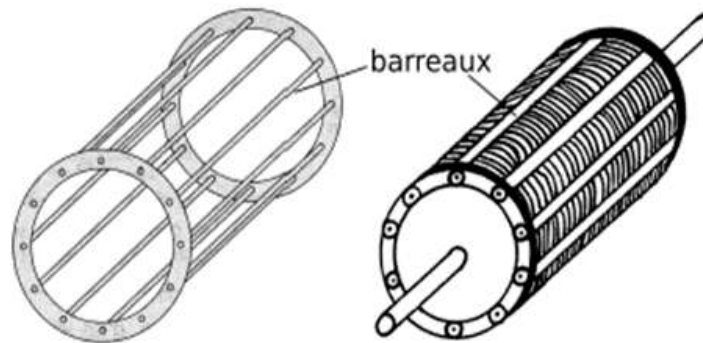


Figure .I. 3 . Rotor à simple cage

B. Rotor à double cage

Le rotor comporte deux cages coaxiales :

L'une (fréquemment réalisée en laiton ou en bronze), externe, à résistance relativement élevée, est placée près de l'entrefer l'autre (en cuivre), interne, de plus faible résistance, est noyée dans le fer, ayant ainsi une inductance des fuites supérieures à la première.

Au démarrage, le courant rotorique, de fréquence égale à la fréquence f du réseau d'alimentation, se répartit de façon inversement proportionnelle aux réactances des cages, qui sont alors grandes devant les résistances. Dans ces conditions, c'est la cage externe qui est parcourue par le maximum de courant ; sa relativement forte résistance réduit l'appel de courant et accroît le couple.

Au contraire, lorsque le moteur atteint son régime nominal de fonctionnement, normalement caractérisé par un faible glissement g et une fréquence basse f_b , ce sont les résistances qui contrôlent la répartition du courant, ce qui favorise le passage du courant dans la cage interne de faible résistance.

On peut, ainsi, obtenir des couples de démarrages de l'ordre de deux à trois fois supérieurs à ceux du rotor à simple cage [3].

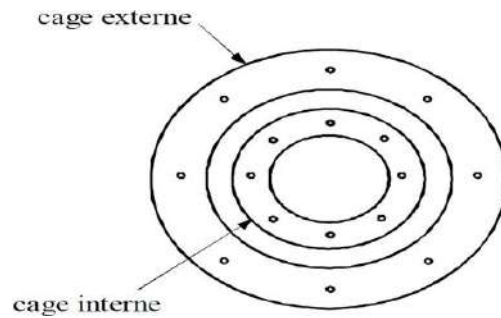


Figure. I. 4. Rotor à double cage

I .2. 3 Paliers

Les paliers ont pour rôle de soutenir le rotor et assurent sa libre rotation. Les déplacements axiaux sont bloqués par un calage longitudinal sur l'un des paliers ; l'autre palier est libre pour assurer les dilatations thermiques de l'arbre. Lorsque les forces axiales exercées sur le rotor sont importantes, le calage longitudinal est assuré par une butée. Les dissymétries des reluctances du circuit magnétique engendrent des courants dans l'arbre qui sont éliminés par isolation électrique de l'un des paliers par une feuille isolante. On distingue deux types de paliers

A. Palier lisses

Ces paliers comportent deux parties principales, Corps de paliers et palier à pied le corps de palier flasque est généralement fixé sur la carcasse. Le rotor est alors centré dans le stator au moment de la construction de la machine. Le palier à pieds utilisé pour les machines de grandes dimensions et de masse supérieure à 20 tonnes, il est désolidarisé de la carcasse.

B. paliers à roulement

Sont utilisés dans les petites et les moyennes machines, de masse inférieure à 20 tonnes, Leur encombrement est plus faible que celui des paliers lisses et les longueurs totales des machines sont donc réduites. [3].

I .2. Les différents défauts de la machine asynchrone

I .2. 1. Défauts statoriques :

L'armature statorique, munie de son bobinage est une partie de la machine qui subit beaucoup de contraintes et dont les effets sont plus importants à cause de la complexité de la structure et la fragilité de certaines parties telles que les isolants. Pour le stator, les défaillances sont principalement dues à un problème [4] :

- **Thermique** : l'isolation est conçue pour avoir une certaine durée de vie à la température nominale. Toutefois, si la température augmente au-dessus de cette température de fonctionnement, la durée de vie raccourcit rapidement. Cette augmentation de la température peut être due à une variation de tension ou de déséquilibre, à la répétition des démarrages dans un court laps de temps, à des surcharges, à une mauvaise ventilation ou alors à une haute température ambiante [4]

- **Electrique** : Une tension supérieure à la valeur nominale ou de hautes valeurs de dV/dt dû à l'ouverture et la fermeture des interrupteurs du convertisseur statique, vont conduire à la dégradation du diélectrique assurant l'isolation des bobines. La présence d'un fort champ électrique interne conduira à des décharges partielles dans les cavités de l'isolant. Il en résulte des spots carbonisés dans l'isolation. Ces spots causent des déformations du champ électrique (augmentation dans la région du défaut) [4]

- **Mécanique** : les démarrages répétitifs de machine ont pour conséquence d'augmenter la température dans le cuivre (bobinage statorique et cage). Cet effet cyclique provoque des dilatations et contractions répétitives de l'isolant. Cela pourrait entraîner des fissures dans l'isolant qui peuvent se propager et provoquer un début de court-circuit interne. Les efforts mécaniques sur les tôles et les conducteurs ont des composantes alternatives qui provoquent des vibrations de la structure [4] Ces vibrations provoquent l'érosion et l'abrasion de l'isolant entraînant leur détérioration.

- **Environnemental** : La présence d'humidité ou de produits chimiques dans l'air ambiant peut détériorer la qualité de l'isolation et conduire à défaut d'enroulement. Le début de la dégradation entraîne des courants de fuites qui accélèrent la détérioration de l'isolant jusqu'au court-circuit franc. Une autre conséquence est la création de l'ozone et les oxydes d'azote qui peuvent se combiner avec l'humidité pour former de l'acide nitrique, qui détruit l'isolant. Les

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

A. défauts d'isolant dans un enroulement :

La dégradation des isolants dans les enroulements peut provoquer des court-circuités. En effet, les différentes pertes (Joule, fer, mécanique,...) engendrent une augmentation de la température des différents constituants du moteur. Or les matériaux d'isolation ont une limite de température, de tension et mécanique. Dans ce cas, un court-circuit peut apparaître dans l'enroulement concerné [06]. Les différentes causes pour ce type de défaut sont :

- ✓ Dégradation de l'isolant à la fabrication.
- ✓ Tension de l'enroulement supérieure à la limite du matériau d'isolation.
- ✓ Courant élevé dans l'enroulement dû à un court-circuit, un défaut du convertisseur, une surcharge.
- ✓ vibrations mécaniques.
- ✓ vieillissement naturel des isolants. Tous les matériaux isolants ont une durée de vie limitée. Même dans une utilisation normale, l'isolant finit naturellement par se dégrader.
- ✓ Fonctionnement dans un environnement sévère.

Lorsque le défaut de l'isolant se crée sur une spire, le courant de défaut circule entre le cuivre de cette spire et la tôle du stator (défaut phase - masse). Il peut aussi circuler entre deux spires d'une même phase si l'isolant qui les sépare est détérioré (défaut entre-spires).

Dans le cas des bobinages à deux couches, une même encoche peut contenir des conducteurs de deux phases différentes. La détérioration simultanée et dans une même zone, des isolants de ces deux bobines provoque un contact électrique entre deux spires de deux phases différentes (défaut phase-phase).

Ce type de défaut peut aussi exister dans les bobinages à une couche au niveau des têtes de bobines où les conducteurs de deux phases différentes peuvent entrer en contact. La topologie du circuit électrique est ainsi influencée par ces défauts.

B. Court-circuit entre spires

Un court-circuit entre spires de la même phase est un défaut assez fréquent. Ce défaut 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 dans le cas des machines asynchrones [4]. 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 de couple liées au déséquilibre des courants de phases engendré par le défaut.

c. 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 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. [5]...

- **Conséquences des défauts statoriques**

En générale, l'effet d'un court-circuit est de perturber la répartition spatiale du champ tournant. D'une part cela conduit à des oscillations du couple électromagnétique, donc de la vitesse. Il en découle des vibrations mécaniques qui, si elles sont fortes, peuvent avoir des effets destructeurs pour les organes mécaniques environnant la machine. D'autre part, le courant circulant dans la boucle créée par le court-circuit peut atteindre des valeurs élevées. [8]

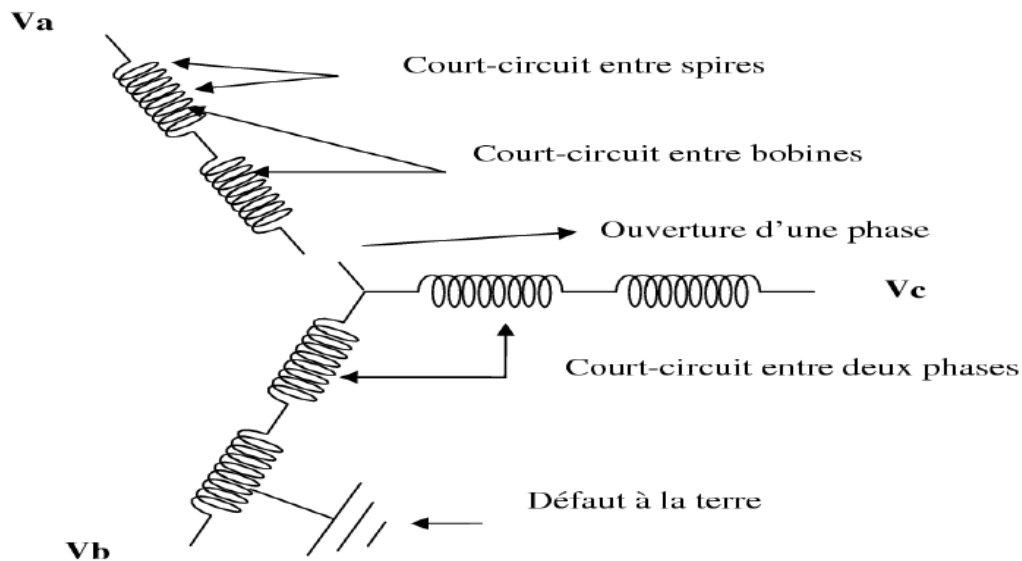


Figure I. 5. Défauts statoriques [7]

I .2.2. Défauts rotoriques

Les défauts rotoriques se situent au niveau de la cage ou au niveau de l'entrefer. Au niveau de la cage les défauts se résument à la rupture de barres de la cage ou à la rupture d'anneaux de court-circuit. Au niveau de l'entrefer les défauts se manifestent par une excentricité statique, dynamique ou mixte. Ces défaillances sont essentiellement dues à un problème [4] :

- thermique (surcharge,...)
- électromagnétique
- résiduel (déformation,...)
- dynamique (arbre de transmission,...)
- environnemental (agression,...)

Les défauts qui sont les plus récurrents, localisés au niveau du rotor, peuvent être définis comme suit :

A. Ruptures 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. [3].

B. Ruptures d'anneaux

La rupture d'une portion de l'anneau de court-circuit dans une machine asynchrone à cage, est un défaut qui apparaît aussi fréquemment que la cassure de barres. Ces ruptures peuvent être dues à des bulles de coulées ou aux dilatations différentielles entre les barres et les anneaux. Comme il est difficile de le détecter, ce défaut est généralement groupé, voire confondu, avec la rupture de barres dans les études statistiques. Ces portions d'anneaux de court-circuit véhiculent des courants plus importants que ceux des barres rotoriques.

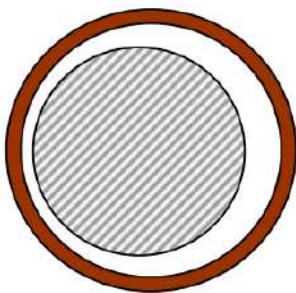
De ce fait, un mauvais dimensionnement des anneaux, une détérioration des conditions de fonctionnement (température, humidité,...) ou une surcharge de couple et donc de courants, peuvent entraîner leur cassure. La rupture d'une portion d'anneau déséquilibre la répartition des courants dans les barres rotoriques et de ce fait, engendre un effet de modulation d'amplitude sur les courants statoriques similaire à celui provoqué par la cassure de barres. [3].

C. Excentricité statique, dynamique et mixte

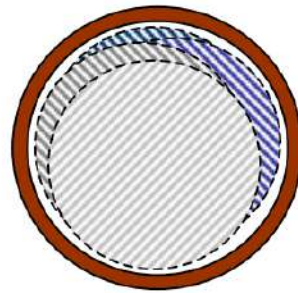
Parfois, la machine électrique peut être soumise à un décentrement du rotor, se traduisant par des oscillations de couple (décalage entre le centre de rotation de l'arbre et le centre du rotor, **Figure (1.5)**). Ce phénomène est appelé excentricité (statique et dynamique) dont l'origine peut être liée à un positionnement incorrect des paliers lors de l'assemblage, à un défaut roulement (usure), à un défaut de charge, ou à un défaut de fabrication (usinage). [4]

Trois cas d'excentricité, sont généralement distingués :

- l'excentricité statique, le rotor est déplacé du centre de l'alésage stator mais tourne toujours autour de son axe.
- l'excentricité dynamique, le rotor est positionné au centre de l'alésage mais ne tourne plus autour de son axe.
- l'excentricité qu'on pourrait qualifier de 'mixte', associant les deux cas précédemment cités



Excentricité statique



Excentricité dynamique

(plusieurs positions du rotor au cours de la rotation)

Figure I. 6. Excentricité statique, dynamique

Ce défaut modifie les comportements magnétique et mécanique de la machine. En effet, l'augmentation de l'excentricité dans l'entrefer induit une augmentation des forces électromagnétiques qui agissent directement sur l'armature statorique ainsi que l'enroulement

correspondant, ce qui engendre une dégradation de son isolation. D'autre part, cette augmentation peut avoir comme conséquence des frottements entre le stator et le rotor en raison des forces d'attraction magnétique qui déséquilibrent le système. Ceci donne naissance à des niveaux de vibration considérables dans les enroulements [4]

D. Roulement à billes

Les roulements à billes jouent un rôle très important dans le fonctionnement de tout type de machines électriques. Les défauts des roulements peuvent être causés par un mauvais choix de matériau à l'étape de fabrication. Les problèmes de rotation au sein de la culasse du roulement, causés par un roulement abimés, écaillé ou fissuré, peuvent créer des perturbations au sein de la machine. Nous savons que des courants électriques circulent au niveau des roulements d'une machine asynchrone ce qui, pour des vitesses importantes, peut provoquer la détérioration de ces derniers. La graisse, qui permet la lubrification et la bonne rotation.

L'analyse vibratoire de la machine ou l'analyse harmonique des courants statorique permet de détecter ce type de défaillances. [4]

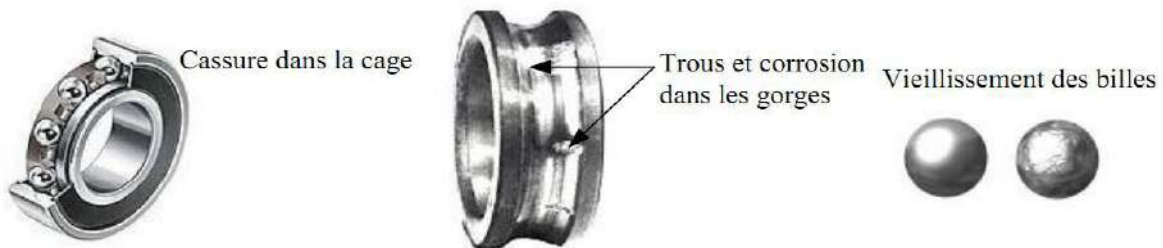


Figure I. 7. différence défaillance de roulement à billes

Classiquement ce type de défaut est diagnostiqué à partir du spectre d'une mesure acoustique ou vibratoire [04], on distingue :

Trous dans les gorges du roulement intérieurs et extérieures,

- Ondulation de la surface du roulement,
- Attaque des billes,
- Corrosion due à l'eau,
- Défaut de graissage, problème dû à la température,
- Décollement, effritement de surface, provoquée par une surcharge.

Sur le système, ce type de défaut se traduit par des oscillations du couple de charge, une apparition de pertes supplémentaires et un jeu entre la bague interne et la bague externe du roulement entraînant des vibrations par les déplacements du rotor autour de l'axe longitudinale de la machine. Dans le cas le plus défavorable, la présence d'un roulement défectueux peut amener au blocage du moteur.

I .2.3. Défauts dans les flasques

Ce genre de défaut est souvent causé à l'étape de fabrication. En effet un mauvais positionnement des flasques suscite un désalignement des roulements à billes, donc une excentricité au niveau de l'arbre de la machine qui va engendrer des vibrations et une variation de l'entrefer qui va modifier le comportement électromagnétique de la machine. [6]

I .2.4. Autres défaillances

Au stator, il n'y a pas de pièces mobiles donc a priori pas de défaillances mécaniques.

Cependant, il peut apparaître des phénomènes d'oxydation liés à l'environnement de la machine et plus précisément au taux de salinité qui influe sur l'étanchéité et les contacteurs.[4]

I .2.5. Défauts extérieurs (d'environnement) :

Ces effets sont principalement dus à un problème de nature [4] :

- Electriques : régime transitoire et déséquilibré d'alimentation,
- Thermiques : la température ambiante élevée, points chauds, surcharge...
- Mécaniques : agression, choc en service, jeux,
- Dynamiques : arbre de transmission de rotor et le bobinage pour le stator.

- Chimiques : corrosion, humidité

I.3. Méthodes de détection des machines électriques

I.3.1 Des grandeurs mesurables et des signaux de défaut

La démarche la plus souvent utilisée pour le diagnostic de défauts sur les machines électriques, est l'analyse des grandeurs mesurables et les signaux de défaut. La **figure I.8** montre une représentation des mesures sur une machine électrique.

- ✓ Les grandeurs et signaux de défauts les plus fréquemment utilisés sont :
- ✓ les courants statoriques ;
- ✓ le flux rayonnant de dispersion ;
- ✓ la tension d'alimentation ;
- ✓ la tension de neutre ;
- ✓ le couple électromagnétique ;
- ✓ la vitesse de rotation ;
- ✓ les courants dans le repère de Park i_d, i_q
- ✓ la vibration mécanique.

Ces signaux donnent des informations qui peuvent être ou non redondantes. Cependant, l'équipement nécessaire pour l'acquisition des signaux reste encore coûteux. Le traitement des informations mesurées est un travail d'identification de la panne à travers sa signature [4]

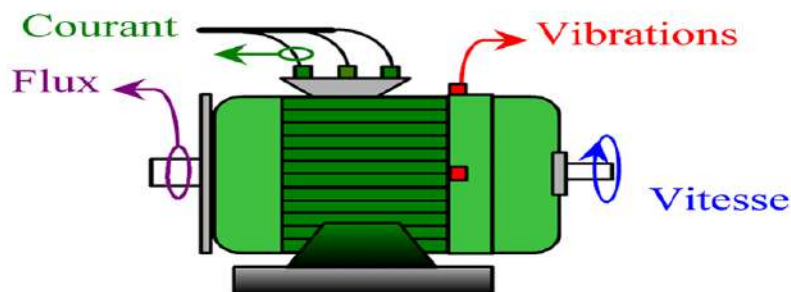


Figure I. 8.représentation de quelque grandeur mesurable sur la machine électrique [4]

I.3.2 Approche signal

Le principe des méthodes d'analyse de signal repose sur l'existence de caractéristiques fréquentielles propres au fonctionnement sain ou défaillant du procédé. La première étape dans cette approche concerne la modélisation des signaux en les caractérisant dans le domaine fréquentiel, en déterminant leur contenu spectral, leur variance, etc. [4]

L'apparition d'un défaut étant à l'origine de nombreux phénomènes tels que le bruit, l'échauffement, les vibrations, etc. Ces symptômes sont la manifestation flagrante d'une modification des caractéristiques temporelles et fréquentielles des grandeurs électriques et mécaniques. Dans la littérature, sont présentées plusieurs techniques de détection de défauts par traitement du signal.

Le traitement du signal est utilisé depuis de nombreuses années pour détecter des défaillances dans les machines électriques, essentiellement les défauts rotoriques. Le défaut étant traduit par l'apparition de fréquences directement liées à la vitesse de rotation, ces méthodes se trouvent bien adaptées à la détection de défauts. Exigeant uniquement un capteur de courant ou/et un capteur de vitesse, l'analyse spectrale est de loin la méthode de diagnostics la plus économique et la plus rapide, d'où son succès auprès des industriels. Cependant, cette méthode se prête uniquement au diagnostics à vitesse constante et principalement sur des machines alimentées par le réseau à fréquence constante. Avec le développement des applications à vitesse variable, ces méthodes se trouvent inexploitable, principalement à cause de la non stationnarité des signaux et de l'effet de la modulation de largeur d'impulsion (MLI) qui parasite le traitement fréquentiel des données, rendant ainsi difficile la détection des fréquences de défaut.

I.3.3. Analyse spectrale

L'analyse spectrale est utilisée depuis de nombreuses années pour détecter des défaillances dans les machines électriques, essentiellement les ruptures de barres au rotor des machines asynchrones, la dégradation des roulements, les excentricités et le court-circuit dans les bobinages. Ces cas se prêtent bien à cette approche dans la mesure où de nombreux phénomènes se traduisent par l'apparition de fréquences directement liées à la vitesse de rotation ou à des multiples de la fréquence d'alimentation.

La surveillance par analyse spectrale de la machine asynchrone consiste donc à effectuer une transformée de Fourier des grandeurs affectées par le défaut, et à visualiser les fréquences parasites constituant la signature d'un défaut dans la machine. Les grandeurs choisies sont soit électriques (plus particulièrement les courants de ligne), soit mécaniques (vibration, couple électromagnétique). Cette technique permet une surveillance rapide et peu onéreuse car elle exige un simple capteur de courant ou de vibration.

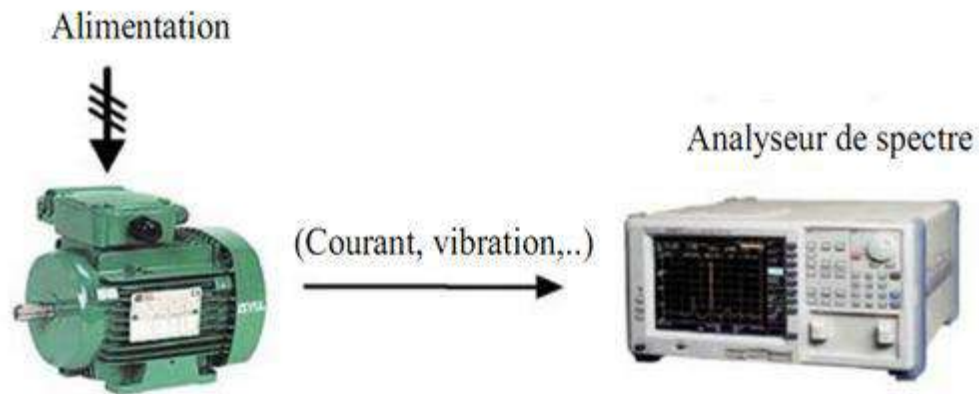


Figure I. 9. Principe de la surveillance par analyse spectrale

A. mesure des vibrations mécaniques

L'analyse spectrale des vibrations a été utilisée dans les machines tournantes pour le diagnostic pendant des décennies. Il est affirmé que la surveillance des vibrations est la méthode la plus fiable d'évaluer la santé globale d'un système rotor. Les forces radiales, créées par le champ d'entrefer, provoquent des vibrations dans la machines asynchrones. Ces forces sont proportionnelles au carré de l'induction magnétique.

$$F_{\text{radial}}(\theta, t) = \frac{B_s^2(\theta, t)}{2\mu_0} \quad (\text{I-1})$$

La distribution de l'induction magnétique dans l'entrefer, est le produit de la F.m.m (Fm) et de la permanée (P) [09].

$$B = F_m \cdot P \quad (\text{I-2})$$

La permanence dépend de la variation de l'entrefer (à cause des ouvertures des encoches statoriques et rotoriques, l'excentricité), ce qui influe sur la force magnétomotrice. Au même titre que les courants, l'ASS de vibrations fournit des informations pratiquement sur tous les défauts mécaniques fréquemment rencontrés, elle permet aussi la détection des défauts électriques. Les spectres des signaux de vibrations, relevés du moteur actuel et en exploitation, sont comparés avec ceux enregistrés lorsque le moteur est sain. Une simple lecture comparative nous fait découvrir l'état et le type de défaut de notre moteur s'il y a lieu.

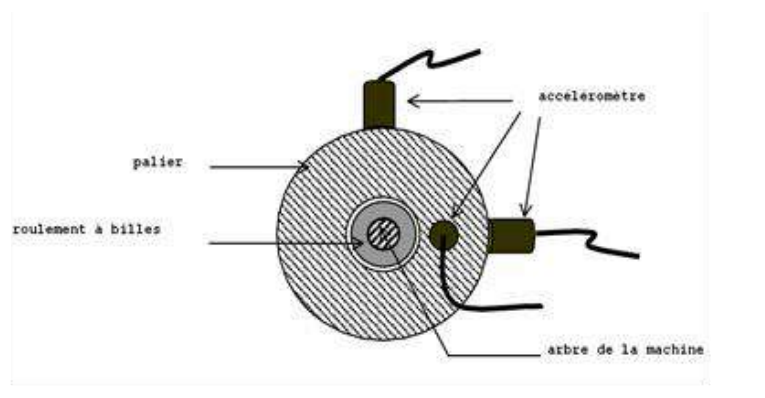


Figure I. 10. mesures vibratoires de la machine asynchrone [09].

B. mesure du Flux magnétique axial de fuite

Dans le cas idéal de fonctionnement, les courants et les tensions statoriques de la machine sont équilibrés. Mais lors d'un défaut quelconque, il entraîne un déséquilibre électrique et magnétique dans la partie statorique, ce qui provoque l'apparition des flux de fuite axial de valeurs liées au degré de sévérité du défaut. Pour analyser ce flux axial, on place à l'extrémité de la machine ou autour de l'arbre une bobine. Elle sera le siège d'une force électromotrice induite. Le flux de mesure peut être utilisé dans l'analyse spectrale pour le suivi de l'état électrique et détecter le type de défauts d'un MI à cage [09].

C. L'analyse des tensions statoriques induites

La rupture d'une barre va affecter directement la tension induite dans les enroulements statoriques. En utilisant cette technique pour exploiter le contenu fréquentiel de la tension induite, par le flux rotorique, directement dans les enroulements statoriques pendant la déconnexion du moteur de réseau, en éliminant ainsi toutes les asymétries de la source d'alimentation (déséquilibres, harmoniques) ou la non linéarité des caractéristiques magnétiques de la machine [09].

D. mesure du couple électromagnétique et de la vitesse rotorique

Lorsqu'une rupture de barre apparaît, les spectres fréquentiels de la vitesse rotorique et du couple électromagnétique laissent paraître des composantes supplémentaires situées aux fréquences $2kfs$. Cependant, il s'est avéré que l'analyse de ses composantes ne nous renseigne pas aussi bien sur le défaut rotorique que celles présentes dans le spectre du courant statorique (augmentation des amplitudes moins significatives). De plus, l'acquisition de ces deux signaux nécessite un équipement assez coûteux par rapport à un simple capteur de courant, ce qui limite leur utilisation pour le diagnostic de défauts des machines asynchrones. Certains systèmes reconstruisent une image du couple électromagnétique à partir des tensions et des courants mesurés sur la machine, mais cette approche reste moins efficace que les méthodes précédemment citées [09].

E. Analyse fréquentielle de la tension de neutre

En 1998, Cash a utilisé la tension présente entre le neutre de la source d'alimentation et le neutre de la machine asynchrone pour détecter des court-circuités entre spires dans le bobinage statorique. Une analyse similaire a été effectuée dans le but de détecter un défaut rotorique dans les machines asynchrones. On montre que l'information donnée par la tension présente entre les deux neutres était pertinente pour le diagnostic des défauts rotoriques. Cette technique a tout d'abord été testée sur différents essais de simulation. L'information la plus significative pour permettre un diagnostic fiable de la cage rotorique se situe au niveau des composantes harmoniques de fréquence [09].

F .mesure du courant statorique

L'analyse des courants statoriques dans le domaine fréquentiel reste la méthode la plus couramment utilisée car le spectre résultant contient une source de renseignement sur la majorité des défauts électriques et magnétiques pouvant apparaître au sein d'une machine asynchrone

Cette technique est dénommée dans la littérature "Mots Current Signature Analysis" (MCSA). Les défauts de la machine asynchrone se traduisent dans le spectre du courant statorique soit par :

Les raies spectrales qui apparaissent avec des fréquences qui sont directement liées à la vitesse de rotation de la machine, aux vitesses des champs tournants et aux paramètres physiques de la machine. Les raies spectrales ont une modification de leurs amplitudes, dans le spectre du courant. Le technicien de la surveillance doit avoir une bonne connaissance des défauts et leurs signatures à partir du courant statorique.

I.4. Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons rappelés quelques définitions sur les différents éléments de constitution des machines asynchrones. En citant les différents défauts pouvant les affectés. et la cause de défauts et la Méthodes de détection des machines électriques.

Chapitre II

*Modélisation de la
machine asynchrone
avec et sans défaut
de court-circuit entre
spires statoriques*

Introduction

La simulation sur ordinateur du fonctionnement des moteurs électriques est particulièrement utile pour gagner en perspective dans le comportement dynamique ainsi que l'interaction électromécanique. Avec un modèle approprié, les défauts du moteur ainsi que le changement des paramètres correspondants peuvent être simulés. La lecture de la littérature nous révèle une multitude de modèle dédié au diagnostic et à la surveillance des défauts statoriques du moteur asynchrone. Pourtant, avant de développer une méthode de diagnostic efficace, il faudrait définir un modèle sur la base duquel une méthode de surveillance des machines pourra être construite.

Le but de ce chapitre est de présenter la modèle qui nous semblent les plus adéquat pour la simulation de la machine asynchrone orienté au défaut de court-circuit entre spires. Ce modèle doit permettre une prise en charge optimale du défaut afin d'extraire les signatures susceptibles d'être sensible à ce dernier.

II.1.Modélisation de la machine asynchrone saine

II.1.1. Hypothèses simplificatrices

Il est indispensable de poser certaines hypothèses qui ont pour but de faciliter la mise en équations des circuits électriques de la machine comme : [10]

- Les pertes fer sont négligées.
- La saturation du circuit magnétique est négligée.
L'effet d'extrémité des têtes des bobines est négligé.
- La cage rotorique est assimilée à un système triphasé dont les phases sont en courts-circuits.
- Dans le modèle utilisé, nous avons supposé la linéarité du circuit magnétique (perméabilité relative du fer très grande devant 1). Cette hypothèse nous a permis d'utiliser le concept d'inductance propre et mutuelle entre les bobinages statoriques et rotoriques.

II.1.2. Modèle triphasé / triphasé

Le moteur est constitué de deux parties, le circuit électrique et le circuit magnétique. Le Circuit électrique est constitué de trois bobinages reparties au stator, alimenté en triphasé Alternatif. Le rotor du moteur est constitué de barres court-circuités et disposées en cage D'écureuil. Il est représenté dans le modèle triphasé-triphasé par trois phases court-circuités Entre elles et ramenées au stator. On modélise la machine asynchrone à cage, en Fonctionnement sain, dans le repère a, b, c selon le système d'équations ci-après :

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

$$[V_{rabc}] = [R_r][i_{rabc}] + \frac{d}{dt}[\phi_{rabc}]$$

Avec

$$[V_{sabc}] = [V_{sa} \quad V_{sb} \quad V_{sc}]^t \quad \text{Les tensions statoriques}$$

$$[i_{sabc}] = [i_{sa} \quad i_{sb} \quad i_{sc}]^t \quad \text{Les courants statoriques}$$

$$[V_{rabc}] = [0 \quad 0 \quad 0]^t \quad \text{Les tensions nulles du rotor étant la cage rotorique en court-circuit.}$$

$$\text{ET } [i_{rabc}] = [i_{ra} \quad i_{rb} \quad i_{rc}]^t \quad \text{les courants rotoriques traversant les phases du rotor.}$$

Pour ce qui est des flux à travers les enroulements statoriques et rotoriques nous avons Respectivement :

$$[\phi_{sabc}] = [L_s][i_{sabc}] + [M_{sr}][i_{rabc}] \quad (\text{II-2})$$

$$[\phi_{rabc}] = [L_r][i_{rabc}] + [M_{rs}][i_{sabc}]$$

Tel que: $[R_s]$, $[L_s]$ et $[R_r]$, $[L_r]$ sont les matrices des résistances et inductances statoriques et Rotoriques respectivement.

Le couple électromagnétique est donné par :

$$c_{em} = \frac{1}{2} [i_s]^t \frac{\partial}{\partial \theta} [M_{sr}] [i_r] \quad (\text{II-3})$$

Ou

$$[I]^t = (i_{sa} \quad i_{sb} \quad i_{sc} \quad i_{ra} \quad i_{rb} \quad i_{rc})$$

et:

$$[L] = \begin{pmatrix} [L_s] & [M_{sr}] \\ [M_{sr}]^t & [L_r] \end{pmatrix}$$

$$\begin{aligned} c_{em} = & \left[i_{sa} \sin \theta + i_{sb} \sin \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) + i_{sc} \sin \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) \right] \cdot i_{ra} + \\ & + \left[i_{sa} \sin \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) + i_{sb} \sin \theta + i_{sc} \sin \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) \right] \cdot i_{rb} + \\ & + \left[i_{sa} \sin \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) + i_{sb} \sin \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) + i_{sc} \sin \theta \right] \cdot i_{rc} \end{aligned} \quad (\text{II-4})$$

Avec :

$$\theta = (1 - g)\omega_s t + \theta_0$$

Il sera accompagné des équations mécaniques suivantes :

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{P}{J} (c_{em} - c_r) \quad (\text{II-5})$$

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega_r \quad (\text{II-6})$$

Ou ω_r est la vitesse rotorique.

II.1.3. Modèle de Park

Dans ce modèle, les enroulements des phases a, b et c de la machine sont considérés en des Enroulements équivalents disposés selon deux axes "o" "d" et "q" soit homopolaire, direct et en quadrature respectivement. Ce modèle est largement utilisé car il permet une diminution du nombre des équations qui régit le moteur ainsi que la disparition de l'inter dépendance entre les équations statorique et rotorique localisée au niveau de la matrice des inductances Mutuelles. Ces enroulements fictifs sont équivalents du point de vue électrique et magnétique aux enroulements réels. Une matrice unique de transformation $[P(\alpha)]$ sera appliquée aux courants, aux tensions. Ainsi qu'aux flux du modèle triphasé/triphasé de la machine asynchrone. [10]

$$[P(\alpha)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos \left(\alpha - \frac{2\pi}{3} \right) & -\sin \left(\alpha - \frac{2\pi}{3} \right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos \left(\alpha + \frac{2\pi}{3} \right) & -\sin \left(\alpha + \frac{2\pi}{3} \right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix} \quad (\text{II-7})$$

L'utilisation de cette matrice dans les équations de la machine asynchrone nous donnera :

$$[V_{\text{sabc}}] = [P(\theta_s)] \cdot [V_{\text{sodq}}] \quad (\text{II-8})$$

$$[i_{\text{sabc}}] = [P(\theta_s)] \cdot [i_{\text{sodq}}]$$

$$[\phi_{\text{sabc}}] = [P(\theta_s)] \cdot [\phi_{\text{sodq}}]$$

Ainsi, au final, nous aurons en prenant le composant homopolaire nul, le système d'équation

Suivant :

➤ *Equations électromagnétiques*

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s \times i_{sd} + L_s \times \frac{di_{sd}}{dt} + M_{sr} \times \frac{di_{rd}}{dt} - L_s \times \omega_s \times i_{sq} - M_{sr} \times \omega_s \times i_{rq} \\ V_{sq} = R_s \times i_{sq} + L_s \times \frac{di_{sq}}{dt} + M_{sr} \times \frac{di_{rq}}{dt} + L_s \times \omega_s \times i_{sd} + M_{sr} \times \omega_s \times i_{rd} \\ 0 = R_r \times i_{rd} + L_r \times \frac{di_{rd}}{dt} + M_{sr} \times \frac{di_{sd}}{dt} - L_r \times \omega_r \times i_{rq} - M_{sr} \times \omega_r \times i_{sq} \\ 0 = R_r \times i_{rq} + L_r \times \frac{di_{rq}}{dt} + M_{sr} \times \frac{di_{sq}}{dt} + -\omega_r \times L_r \times i_{rd} + M_{sr} \times \omega_r \times i_{sd} \end{cases} \quad (\text{II-9})$$

$$L = \begin{bmatrix} L_s & 0 & M_{sr} & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M_{sr} \\ M_{sr} & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M_{sr} & 0 & L_r \end{bmatrix} \quad (\text{II-10})$$

$$R = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & 0 \\ 0 & M_{sr} \cdot \omega & R_r & L_r \cdot \omega \\ -M_{sr} \cdot \omega & 0 & -L_r \cdot \omega & R_r \end{bmatrix} \quad (\text{II-11})$$

➤ *Equations électriques*

$$\frac{dI}{dt} = \text{inv.}(L) \cdot (V - R \cdot I) ; \quad (\text{II-12})$$

Un choix judicieux du repère offrira une plus grande flexibilité du modèle pour différente

Application. Soit :

Des axes de référence fixes par rapport au stator, caractérisés par :

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

- des axes fixes par rapport au rotor :

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

Ou enfin nous garderons les axes de reference tournant au synchronism.

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

Tel que :

$$\omega_s = \omega - \omega_r \text{ et } \omega = p \cdot \Omega$$

Avec

ω_s : La pulsation des grandeurs statoriques.

ω_r : La pulsation des grandeurs rotoriques

Ω : La vitesse et p = nombre de paires de pôles.

➤ *Equation du couple*

$$C_e = p \times \frac{M_{sr}}{L_r} \times [\phi_{rd} \times i_{sq} - \phi_{rq} \times i_{sd}] \quad (\text{II-13})$$

II.1.4. Modèle multi-spires

Pour avoir un modèle plus fin, on représente les phases statoriques comme un enroulement

Polyphasé dont le nombre de phases est égale au nombre de spires. [10]

Chaque spire est constituée de quatre conducteurs « aller, retour, et têtes de bobine ». (Voir

Figure. II.1

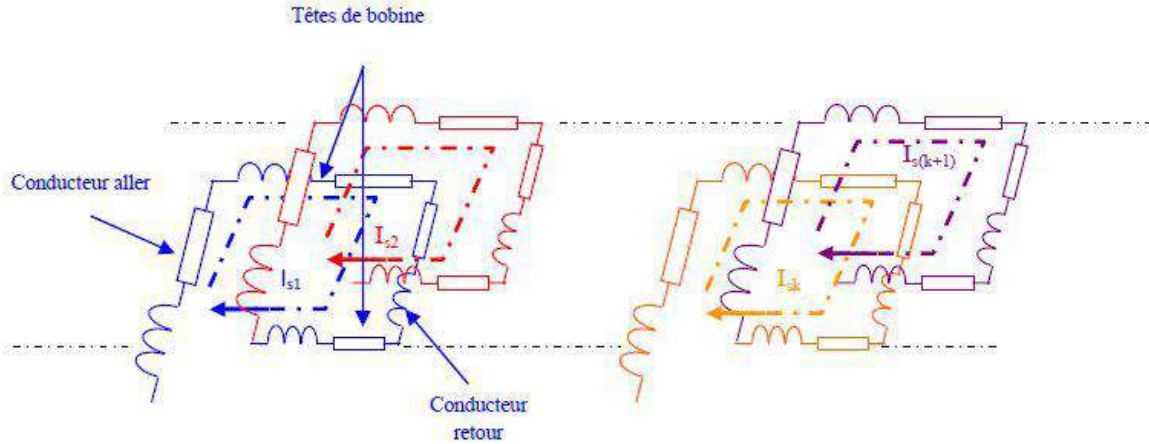


Figure II. 11. Circuit equivalent du stator

Les équations des tensions pour les « $m = 3 \times N_t$ » spires du stator peuvent être écrites sous la forme suivante :

$$[V_{SS}] = [R_{SS}][I_{SS}] + \frac{d[\varphi_{SS}]}{dt} \tag{II-14}$$

N_s : Nombre de spires par phase.

Les vecteurs des tensions, des courants et des flux des « $3 \cdot N_s$ » spires statoriques et les trois phases du rotor sont donnés par les équations suivantes:

$$\begin{aligned} [V_{SS}] &= [V_{sa_1} \quad v_{sa_2} \quad \cdots \quad v_{sa_{N_s}} \quad v_{sb_1} \quad v_{sb_2} \quad \cdots \quad v_{sb_{N_s}} \quad v_{sc_1} \quad v_{sc_2} \quad \cdots \quad v_{sc_{N_s}}]^t \\ [I_{SS}] &= [i_{sa_1} \quad i_{sa_2} \quad \cdots \quad i_{sa_{N_s}} \quad i_{sb_1} \quad i_{sb_2} \quad \cdots \quad i_{sb_{N_s}} \quad i_{sc_1} \quad i_{sc_2} \quad \cdots \quad i_{sc_{N_s}}]^t \\ [\varphi_{SS}] &= [\varphi_{sa_1} \quad \varphi_{sa_2} \quad \cdots \quad \varphi_{sa_{N_s}} \quad \varphi_{sb_1} \quad \varphi_{sb_2} \quad \cdots \quad \varphi_{sb_{N_s}} \quad \varphi_{sc_1} \quad \varphi_{sc_2} \quad \cdots \quad \varphi_{sc_{N_s}}]^t \end{aligned} \tag{II-15}$$

Pour les équations du rotor, on gardera ceux du système triphasé/triphasé pour cela, se référer a (II-1) et (II-2) pour les équations des tensions et des flux respectivement.

Nous obtenons finalement le système d'équations électriques nécessaire à l'étude du Fonctionnement de la machine :

$$\begin{aligned} [V_{SS}] &= [R_{SS}][I_{SS}] + \frac{d\{[L_{SS}][I_{SS}]\}}{dt} + \frac{d\{[M_{SSr}][i_{rabc}]\}}{dt} \\ [V_{rabc}] &= [R_r][i_{rabc}] + \frac{d\{[L_{rabc}][i_{rabc}]\}}{dt} + \frac{d\{[M_{rs}][I_{SS}]\}}{dt} \end{aligned} \quad (\text{II-16})$$

Expression du couple électromagnétique c_{em} peut être déterminé grâce à la relation:

$$c_{em} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} [I_{SS}] \\ [i_{rabc}] \end{bmatrix} \frac{d\theta}{dt} \begin{bmatrix} [L_{SS}] & [M_{SSr}] \\ [M_{rSS}] & [L_{rabc}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [I_{SS}] \\ [i_{rabc}] \end{bmatrix} \quad (\text{II-17})$$

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

$$J \frac{d\Omega}{dt} = c_{em} - c_r - c_f \quad (\text{II-18})$$

$$c_f = f\Omega \quad \Omega = P\omega_r \quad \omega_r = \frac{d\theta}{dt} \quad (\text{II-19})$$

Avec ω_r la vitesse rotorique

II.2. Modélisation du défaut de court-circuit entre spires

II.2.1. Modèle de court-circuit dans l'enroulement statorique (phase Sa)

Un défaut de spires dans l'enroulement statorique de la machine asynchrone provoque un grand courant de circulation dans les spires en court-circuit de l'ordre deux de celui du rotor bloqué, qui peut causer des dommages irréversibles du noyau.

La modélisation de la machine asynchrone *avec* des spires en court-circuit est la phase initiale dans le développement d'une structure de détection de défaut de spires. Un court-circuit entre spires

Désigne un court-circuit entre deux enroulements dans la même phase du stator, son circuit

Électrique du stator connecté en étoile est montré sur la **Figure II. 2** [11]

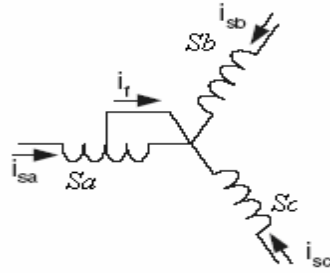


Figure II. 2.

Figure II. 12. Défaut de spires dans l'enroulement statorique [11]

A. Modèle du machine asynchrone dans le repère abc

Figure II. 2 Montre un court-circuit entre le neutre du moteur et un point arbitraire de La bobine de la phase *Sa*. Nous faisons sortir les équations des mailles des circuits et en Réarrangeant les équations, le modèle décrivant le machine asynchrone avec un court-circuit dans la phase *Sa*

du stator sous forme matricielle peut être décrit par

$$\begin{aligned} \mathbf{v}_{sabc} &= \mathbf{r}_s (\mathbf{i}_{sabc} - \boldsymbol{\gamma} \cdot \mathbf{i}_f) + \frac{d\boldsymbol{\phi}_{abc}}{dt} + \mathbf{v}_0 \cdot \mathbf{I}_d \\ \mathbf{0} &= \mathbf{r}_r \cdot \mathbf{i}_{rabc} + \frac{d\boldsymbol{\phi}_{rabc}}{dt} \end{aligned} \quad (\text{II-20})$$

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\phi}_{sabc} &= \mathbf{l}_s \cdot (\mathbf{i}_{sabc} - \boldsymbol{\gamma} \cdot \mathbf{i}_f) + \mathbf{M}_{sr}(\boldsymbol{\theta}) \cdot \mathbf{i}_{rabc} \\ \boldsymbol{\phi}_{rabc} &= \mathbf{l}_r \cdot \mathbf{i}_{rabc} + \mathbf{M}_{sr}(\boldsymbol{\theta}) \cdot (\mathbf{i}_{sabc} - \boldsymbol{\gamma} \cdot \mathbf{i}_f) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mathbf{l}_f \cdot \frac{d\mathbf{i}_f}{dt} &= \mathbf{i}_f \cdot \mathbf{r}_f + \boldsymbol{\gamma} \cdot \mathbf{v}_{sabc} \\ \mathbf{r}_s &= \mathbf{R}_s \cdot \mathbf{I}_d, \mathbf{r}_r = \mathbf{R}_r \cdot \mathbf{I}_d, \mathbf{l}_s = \mathbf{l}_{sf} \cdot \mathbf{I}_d + \mathbf{M}_{sr}(\boldsymbol{\theta}) \text{ et } \mathbf{l}_r = \mathbf{l}_{rf} \cdot \mathbf{I}_d + \mathbf{M}_{sr}(\boldsymbol{\theta}) \end{aligned} \quad (\text{II-21})$$

$$\boldsymbol{\gamma} = [\boldsymbol{\gamma}_a \quad \mathbf{0} \quad \mathbf{0}], \mathbf{l}_f = \boldsymbol{\gamma}_a (\mathbf{1} - \boldsymbol{\gamma}_a) \mathbf{l}_{sf}$$

$$\mathbf{r}_f = \boldsymbol{\gamma}_a (\mathbf{1} - \boldsymbol{\gamma}_a) \mathbf{r}_s$$

B. Modèle du MAS dans le repère de Park [11]

➤ Equations électromagnétiques

En utilisant la transformation de PARK, le modèle triphasé précédent est transformé dans le repère biphasé, fixé au stator. Nous obtenons ainsi le modèle décrit par les équations suivantes :

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s \left(i_{sd} - \frac{2}{3} \gamma_a \cdot i_f \cos \theta \right) + \frac{d\phi_{sd}}{dt} \\ V_{sq} = R_s \left(i_{sq} - \frac{2}{3} \gamma_a \cdot i_f \sin \theta \right) + \frac{d\phi_{sq}}{dt} \end{cases} \quad (\text{II-22})$$

$$\begin{cases} 0 = R_r \cdot i_{rd} + \frac{d\phi_{rd}}{dt} - \omega \cdot \phi_{rq} \\ 0 = R_r \cdot i_{rq} + \frac{d\phi_{rq}}{dt} + \omega \cdot \phi_{rd} \end{cases} \quad (\text{II-23})$$

$$\begin{cases} \phi_{sd} = L_s \left(i_{sd} - \frac{2}{3} \gamma_a i_f \cdot \cos \theta \right) + M_{sr} i_{rd} \\ \phi_{sq} = L_s \left(i_{sq} - \frac{2}{3} \gamma_a \cdot i_f \sin \theta \right) + M_{sr} i_{rq} \end{cases} \quad (\text{II-24})$$

$$\begin{cases} \phi_{rd} = L_r \cdot i_{rd} + M_{sr} \left(i_{sd} - \frac{2}{3} \gamma_a i_f \cdot \cos \theta \right) \\ \phi_{rq} = L_r \cdot i_{rq} + M_{sr} \left(i_{sq} - \frac{2}{3} \gamma_a \cdot i_f \sin \theta \right) \end{cases} \quad (\text{II-25})$$

$$L_f \frac{di_f}{dt} + R_f \cdot i_f = \gamma_a \cdot V_{sd} \quad (\text{II-26})$$

avec:

$$R_f = r_f + \frac{1}{3} \gamma_a^2 \cdot R_s, L_f = l_f + \frac{1}{3} \gamma_a^2 \cdot l_{sf} \quad (\text{II-27})$$

Posons :

$$\begin{cases} i'_{sd} = \left(i_{sd} - \frac{2}{3} \gamma_a \cdot i_f \cos \theta \right) \\ i'_{sq} = \left(i_{sq} - \frac{2}{3} \gamma_a \cdot i_f \sin \theta \right) \end{cases} \quad (\text{II-28})$$

Nous écrivons les tensions statoriques en fonction des courants statoriques et les flux rotoriques nous obtenons :

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s i'_{sd} + L_s \left(1 - \frac{M_{sr}^2}{L_s L_r} \right) \frac{di'_{sd}}{dt} + \frac{M_{sr}}{L_r} \left(\frac{M_{sr} \cdot R_r}{L_{rc}} i'_{sd} - \frac{R_r}{L_{rc}} \phi_{rd} + \omega \phi_{rq} \right) \\ V_{sq} = R_s i'_{sq} + L_s \left(1 - \frac{M_{sr}^2}{L_s L_r} \right) \frac{di'_{sq}}{dt} + \frac{M_{sr}}{L_r} \left(\frac{M_{sr} \cdot R_r}{L_r} i'_{sq} - \frac{R_r}{L_r} \phi_{rq} - \omega \phi_{rd} \right) \end{cases} \quad (\text{II-29})$$

Soit $\sigma = \left(1 - \frac{M_{sr}^2}{L_s L_r} \right)$: Coefficient de dispersion.

Donc nous aurons :

$$\begin{cases} V_{sd} = \left(R_s + \frac{M_{sr}^2 R_r}{L_r^2} \right) i'_{sd} + L_s \sigma \cdot \frac{di'_{sd}}{dt} - \frac{M_{sr}}{L_r} \left(\frac{M_{sr} R_r}{L_r} \phi_{rd} - \omega \phi_{rq} \right) \\ V_{sq} = \left(R_s + \frac{M_{sr}^2 R_r}{L_r^2} \right) i'_{sq} + L_s \sigma \cdot \frac{di'_{sq}}{dt} - \frac{M_{sr}}{L_r} \left(\frac{M_{sr} R_r}{L_r} \phi_{rq} + \omega \phi_{rd} \right) \end{cases} \quad (\text{II-30})$$

➤ *Equation du couple*

L'équation du couple électromagnétique incluant le terme de défaut est donnée par :

$$C_e = \frac{3}{2} \cdot \mathbf{p} \cdot \mathbf{M}_{sr} (i'_{sq} i_{rd} - i'_{sd} i_{rq}) - \mathbf{p} \cdot \mathbf{M}_{sr} \gamma_a \cdot i_f i_{rq} \quad (\text{II-31})$$

CONCLUSION

Nous avons présenté dans ce chapitre le modèle qui permet de prendre en compte un défaut statorique de court-circuit inter-spires d'une machine asynchrone. Les équations de Ce modèle comprennent celles relatives à la machine saine et des termes introduits par des Défauts. Cette décomposition facilite la compréhension des effets induits dans les paramètres Normaux de la machine suite au défaut. Dans le chapitre suivant nous représenté des Simulations du modèle dans les cas sain et défaillant. et appliqué les analyse spectrale sur la Résultats.

Chapitre III

**Simulation de la machine
avec et sans défauts et
application de l'analyse
spectrale pour la
détection de défauts**

Introduction

Après avoir défini le modèle de la machine fonctionnant en modes asynchrone triphasée sans et avec défaut. Nous réalisons au cours de ce chapitre différentes simulations obtenus sous l'environnement MATLAB. L'accent sera mis sur l'impact des défauts dans le bobinage sur le comportement de la machine.

III.1 Simulation de la machine asynchrone triphasée

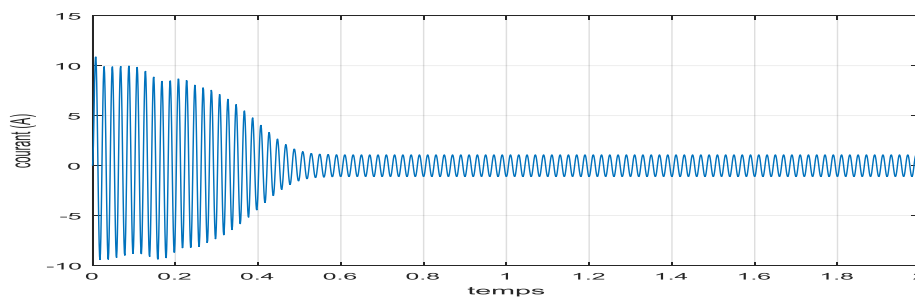
III.1.1 Résultats de simulation lors d'un fonctionnement de la machine asynchrone saine

Nous avons tracé l'évolution de grandeurs temporelles telles que les courants, le couple et la vitesse de rotation lors de l'alimentation d'une seule étoile machine asynchrone, le bobinage statorique est

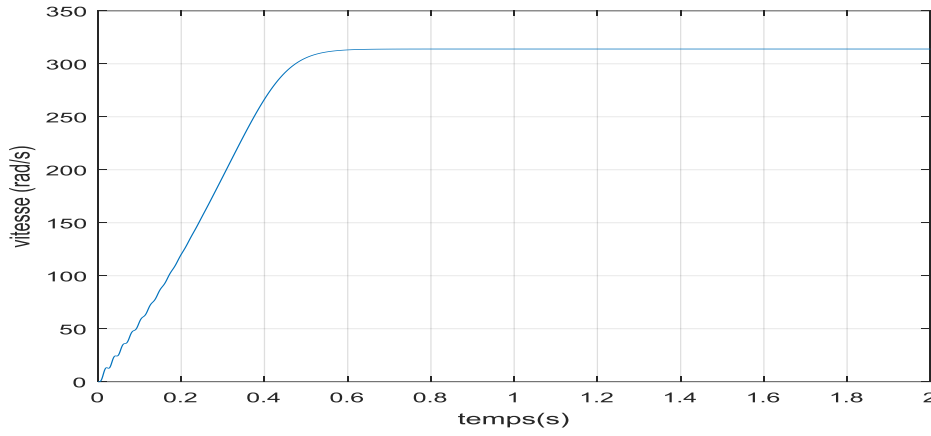
Considérons sain. La *Figure.III.1* montre l'évolution des courants de la machine, la vitesse de rotation et le couple électromagnétique et les courants de défauts lors d'un démarrage à vide sous une tension nominale.

La *Figure.III.2* concerne l'évolution des mêmes grandeurs de l'application d'une charge, le couple résistant est de **3.6 Nm**. A partir de $t = 1s$, nous appliquons un échelon de couple résistant d'amplitude égale à **3.6 Nm**. La *Figure.III.2.a)* représente l'allure du courant de phase statorique, nous distinguons les phases de fonctionnement à savoir l'avant et l'après l'application du couple de charge.

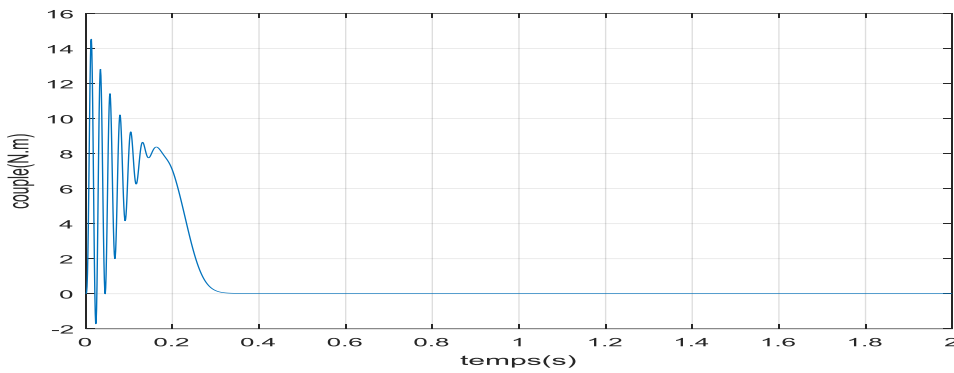
Les *Figures (III.2.b), (III.2.c), (III.2.d)* représentent les allures de la vitesse de rotation, du couple électromagnétique, des courants de défauts respectivement. Nous constatons que la vitesse diminue pour atteindre la valeur nominale et le couple électromagnétique rejoint le couple résistant.



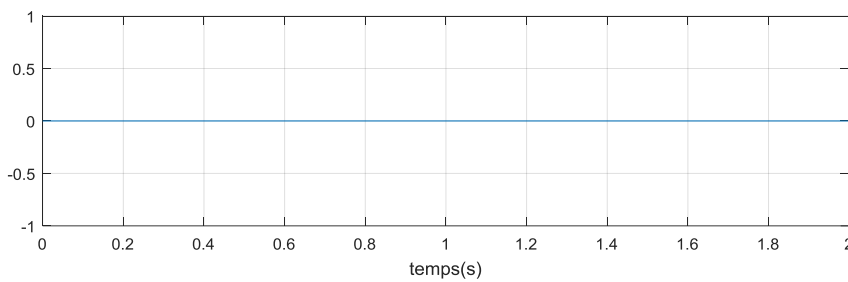
a. courant de phase (a)



b. la vitesse de rotation

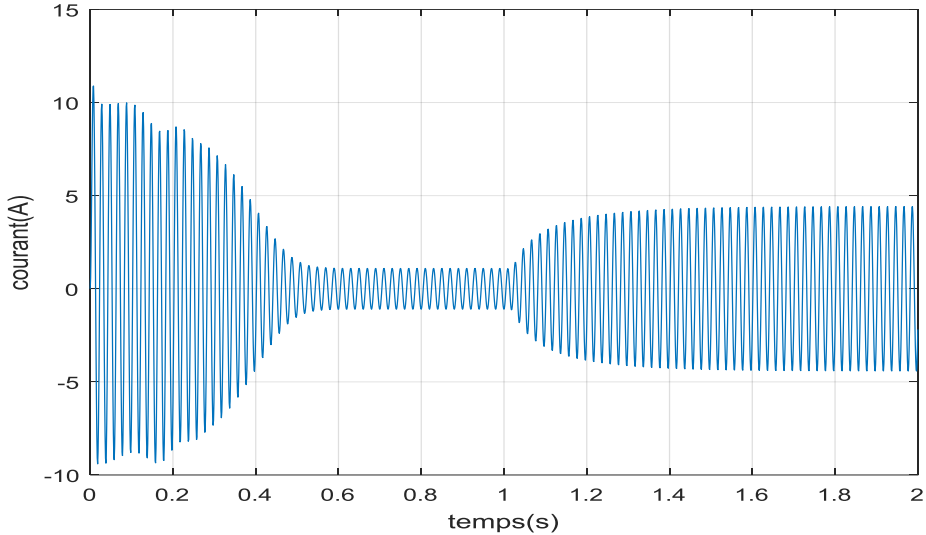


c. La couple électromagnétique

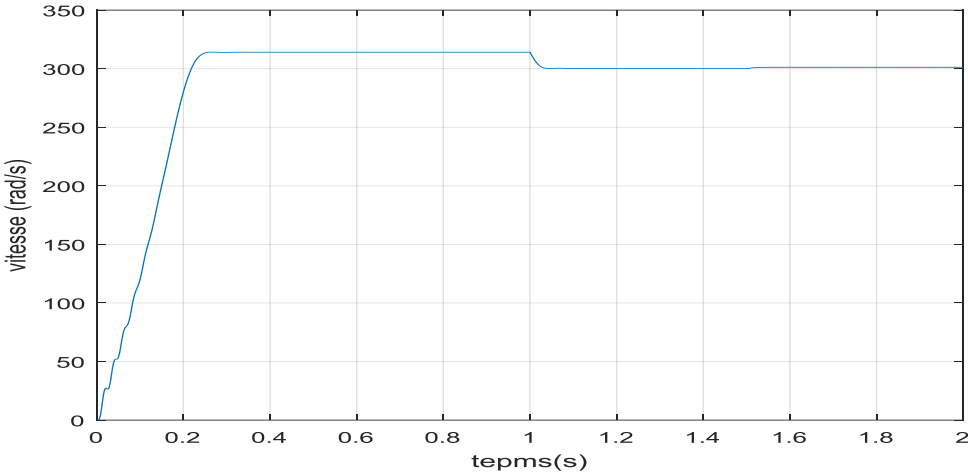


d. Courant de défauts

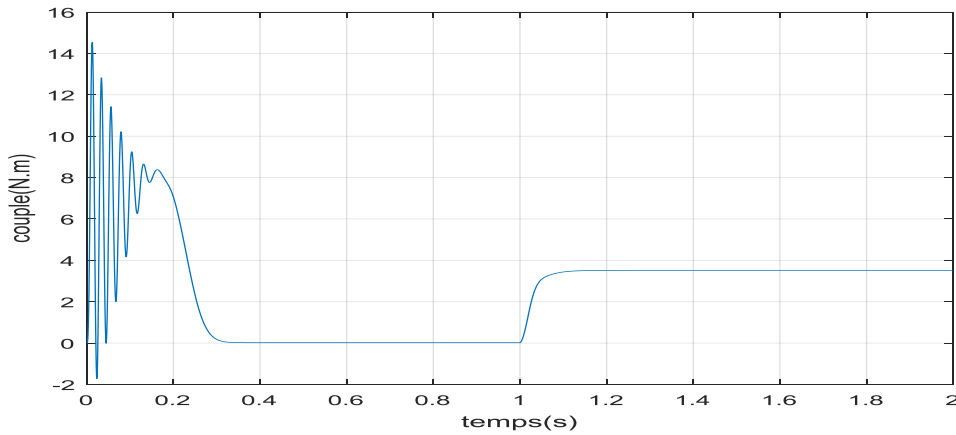
Figure.III.1. Evolution des grandeurs électriques et électromécaniques à vide et sans défaut.



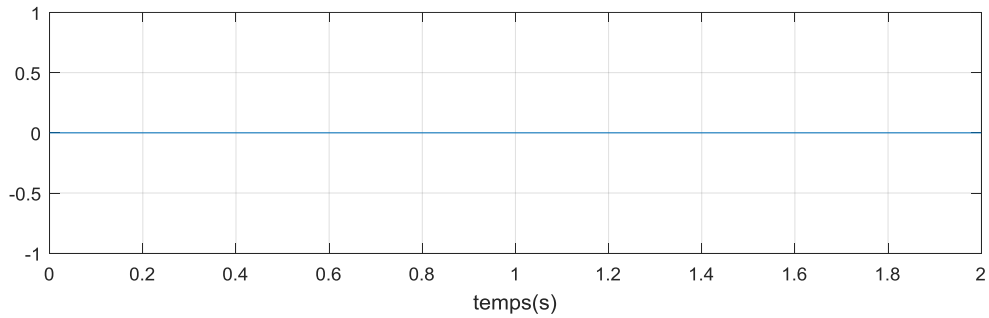
a. courant de phase (a)



b. la vitesse de rotation



c. La couple électromagnétique



d. Courant de défauts

Figure .III.2.Evolution des grandeurs électromécaniques sans défaut.

On remarque une diminution de la vitesse de rotation et une augmentation du courant statorique et du courant rotorique à l'instant de l'application du couple résistant.

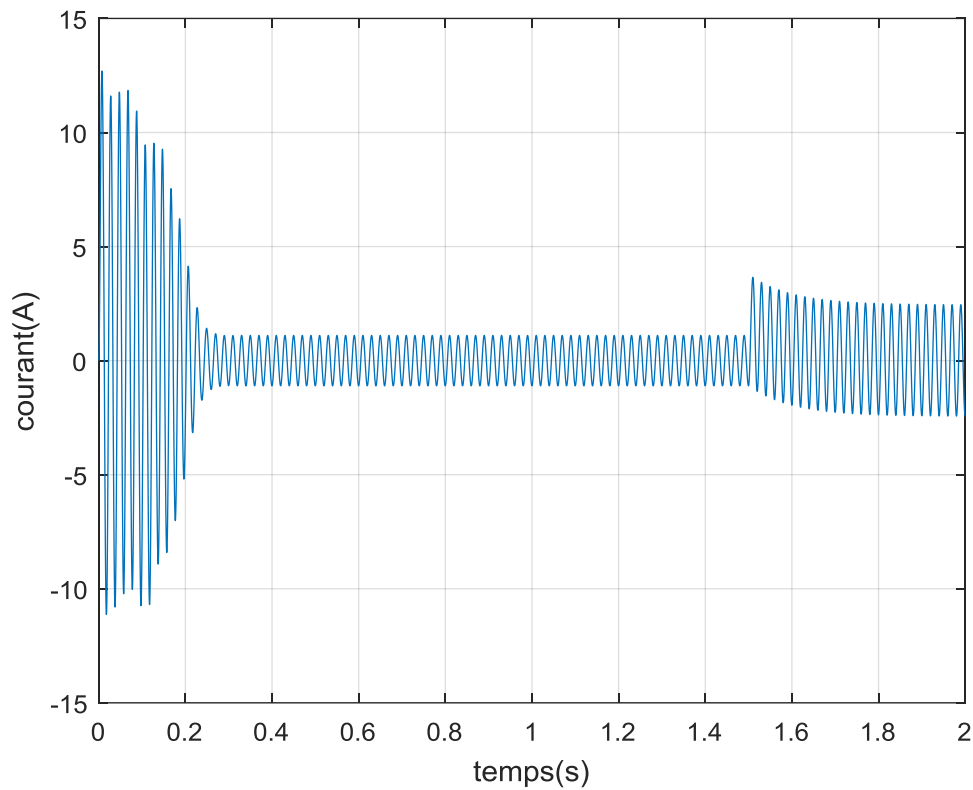
III.1.2 Résultats de simulation lors d'un fonctionnement avec défaut Statorique

Afin d'étudier le défaut entre-spores, des simulations ont été effectués. Des courts circuits ont été pratiqués uniquement sur le bobinage d'une phase. Nous avons tracé l'évolution de grandeurs temporelles telles que les courants, le couple et la vitesse de rotation avec défaut.

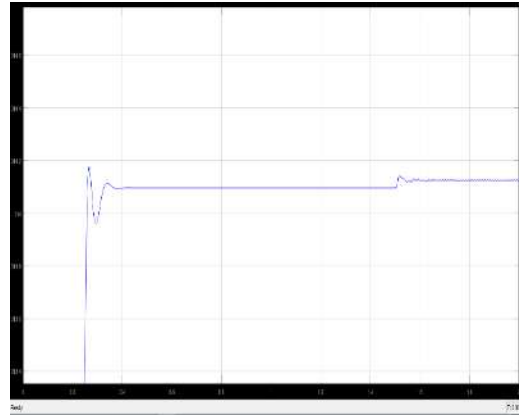
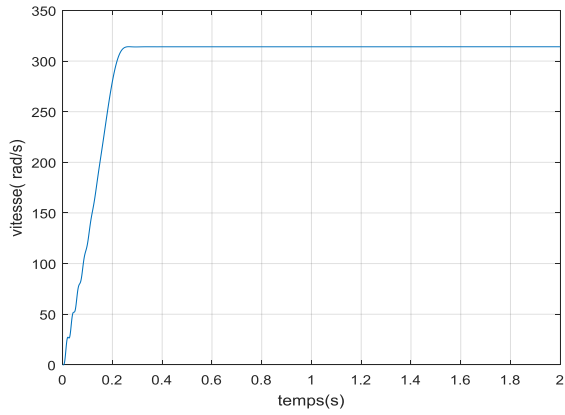
La *Figure. (III.3)* montre l'évolution des courants de la machine, la vitesse de rotation, et le couple électromagnétique et les courants de défauts lors d'un démarrage à vide sous une tension nominale.

La *Figure. (III.4)* concerne l'évolution des mêmes grandeurs de l'application d'une charge, le couple résistant est de **3.6 Nm**. A partir de $t = 1s$, nous appliquons un échelon de couple résistant d'amplitude égale à **3.6 Nm**. *Figure. (III.4.a)* représente l'allure du courant de phase statorique, nous distinguons les phases de fonctionnement à savoir l'avant et l'après l'application du couple de charge.

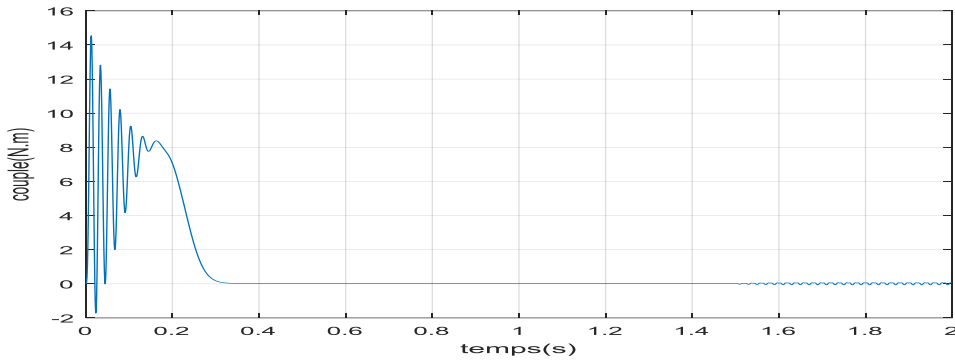
Les *Figures. (III.4.b), (III.4.c), (III.4.d)* représentent les allures de la vitesse de rotation, du couple électromagnétique, des courants de défauts respectivement.



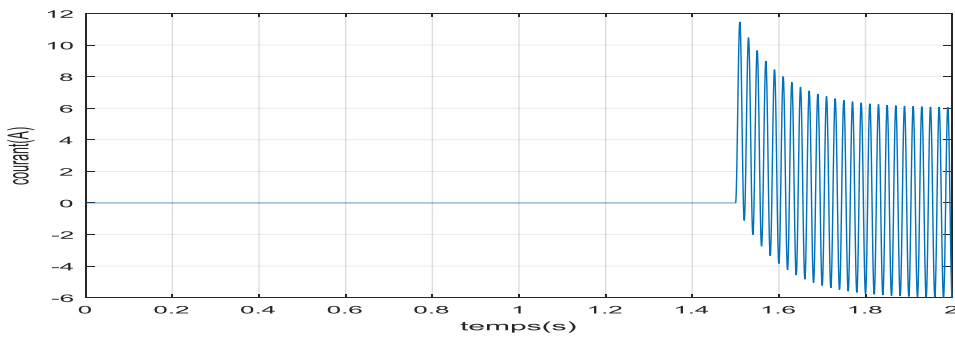
a. courant de phase (a)



b. la vitesse de rotation

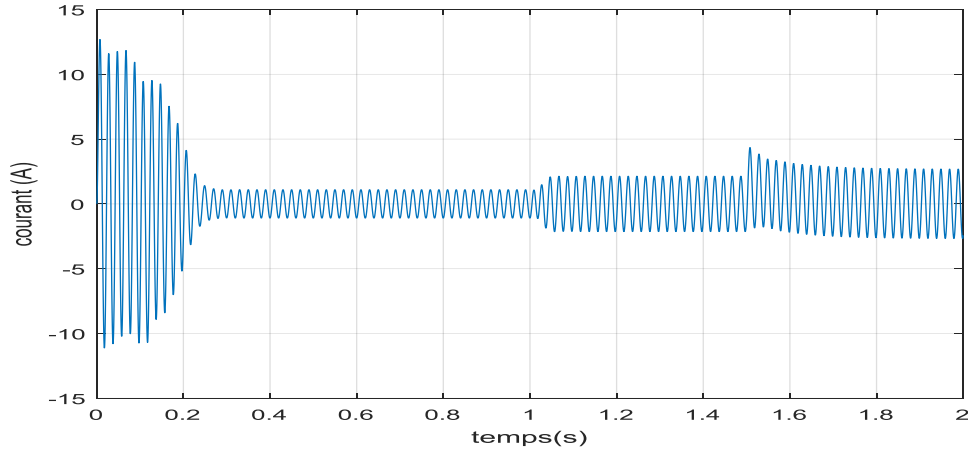


c. La couple électromagnétique

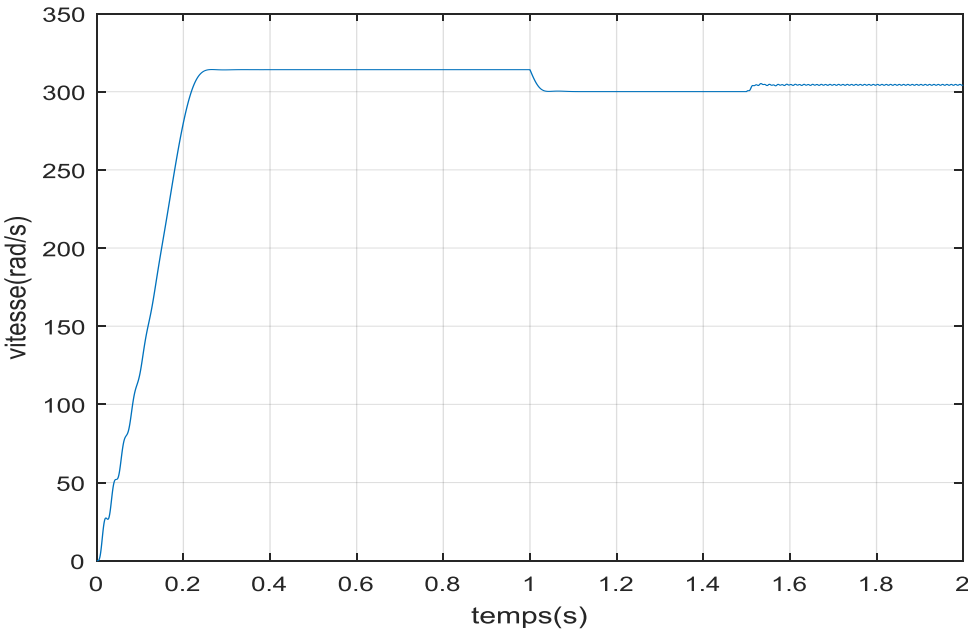


d. Courant de défauts

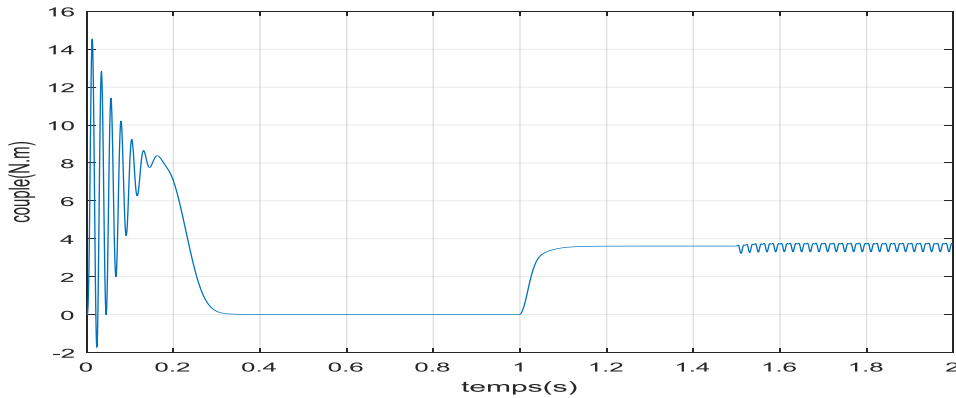
Figure III.3. Evolution des grandeurs électriques et électromécaniques avec défauts en avide



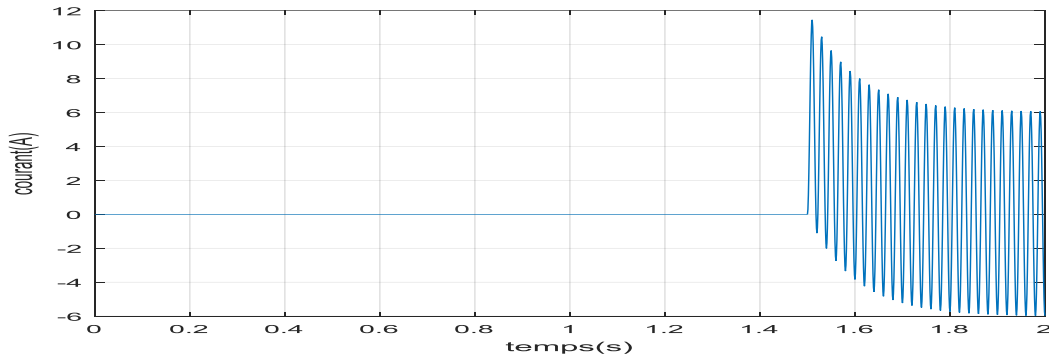
a. courant de phase (a)



b. la vitesse de rotation



c. La couple électromagnétique



d. Courant de défauts

Figure III.4. Evolution des grandeurs électriques et électromécaniques avec défauts en charge.

Nous constatons que l'amplitude du courant dans la phase présentant un c-circuit est supérieure aux courants des autres phases. Toutefois, les courants qui parcourent ces phases sont amplifiés par rapport au cas du moteur sain. Cette amplification est fonction du nombre de spires en court-circuit. Nous constatons une augmentation proportionnelle au défaut des amplitudes des courants rotoriques par rapport au cas sain. D'autre part, le facteur de puissance global décroît avec l'augmentation du nombre de spires en court-circuit. Ceci peut être interpréter par la modification de la distribution du bobinage, qui introduit une variation de l'inductance propre de

la phase concernée par le défaut et affecte les autres phases par couplage magnétique. Concernant les oscillations de la vitesse de rotation, elles augmentent avec le nombre de spires en court-circuit.

Lors de l'application d'un défaut de court-circuit, le couple électromagnétique possède une valeur moyenne à peu près égale au couple développé par la machine saine mais en présentant des bruits qui prennent de l'importance au fur et à mesure que le court-circuit devient important. Les résultats nous montrent clairement que l'analyse directe du courant s'avère très difficile puisque, comme nous voyons, la modulation de l'amplitude est très faible à observer clairement et par conséquent il donne un diagnostic faible. La pauvreté du signal temporel du courant, en renseignements nécessaires pour détecter les défauts en questions, nous amène au signal fréquentiel qui offre des informations précieuses sur sa composition.

Lors de l'application d'un défaut de court-circuit, le couple électromagnétique possède une Valeur moyenne à peu près égale au couple développé par la machine saine mais en présentant des bruits qui prennent de l'importance au fur et à mesure que le court-circuit devient important. L'analyse directe des grandeurs électriques et électromécaniques reste imprécise pour l'étude des défauts. Dans ce qui suit nous utilisons la transformée de Fourier Rapide (FFT) pour mieux quantifier les anomalies introduites par les défauts en analysant particulièrement les raies de fréquences à proximité du fondamental.

III.2. analyse spectrale du courant statorique en l'utilisant la FFT (Fast Fourier Transformer) pour la détection de défauts.

Nous déterminons le contenu fréquentiel du courant statorique tout en utilisant la transformée de Fourier rapide (FFT), et par la suite nous retrouverons les raies et les bandes latérales associées aux défauts statoriques. [12]

L'analyse par la transformée de Fourier rapide (FFT) permet de mettre en évidence les raies présentes dans le spectre du signal par la suite du l'algorithme suivant :

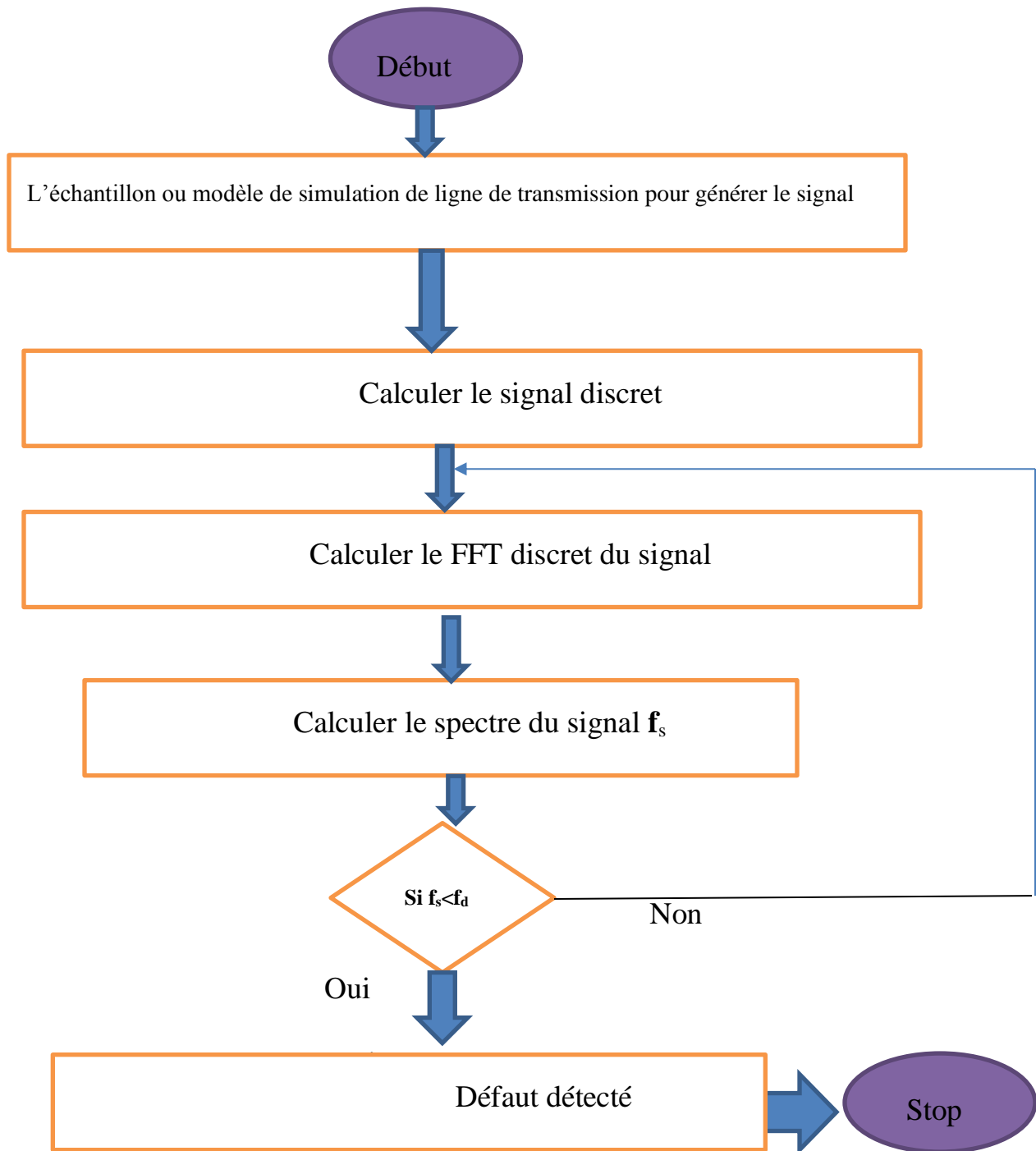


Figure.III.5. algorithme de FFT [12]

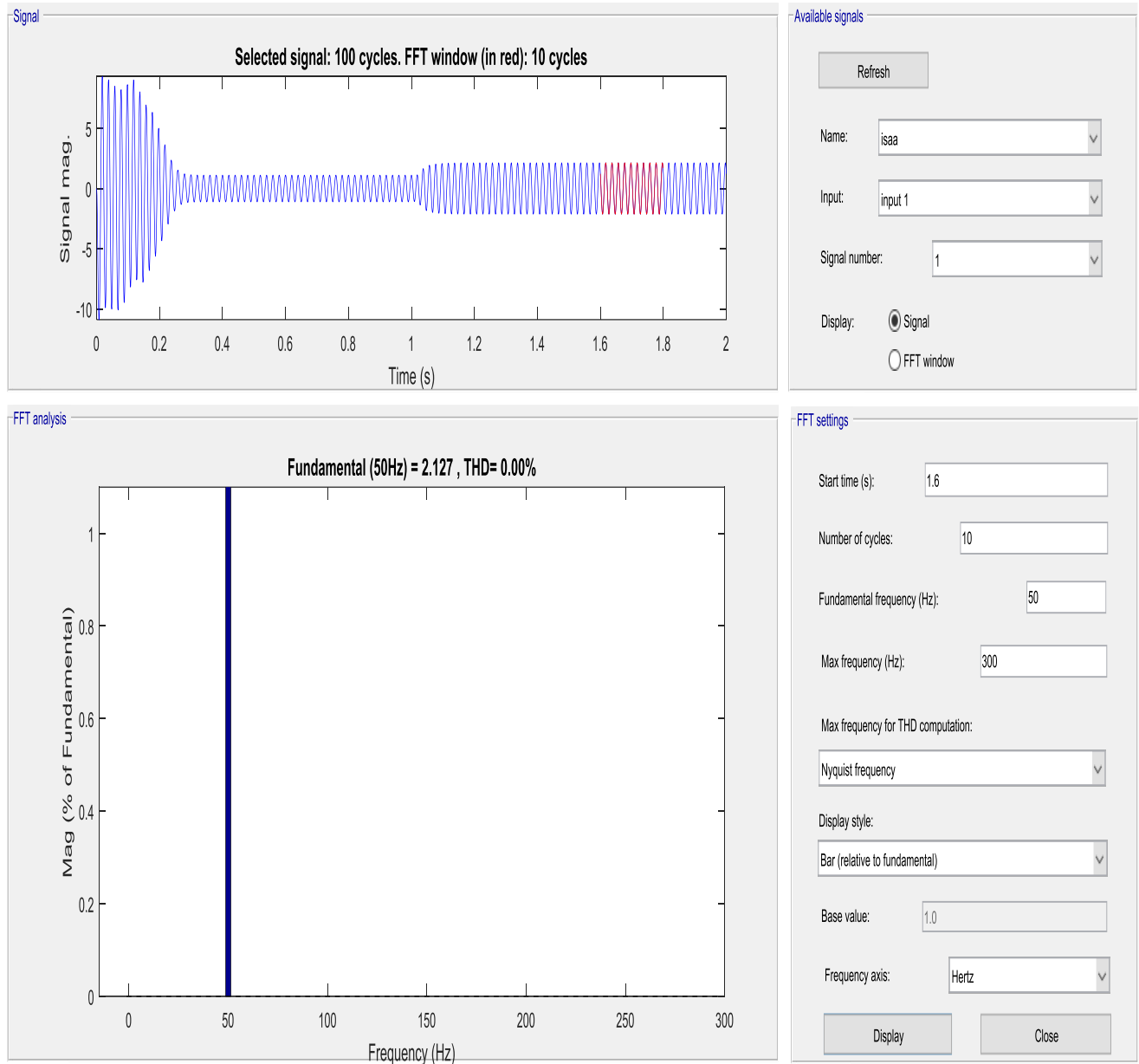


Figure .III.6 Spectre du courant statorique de la machine saine à la phase (a), dans la plage [0-300] Hz

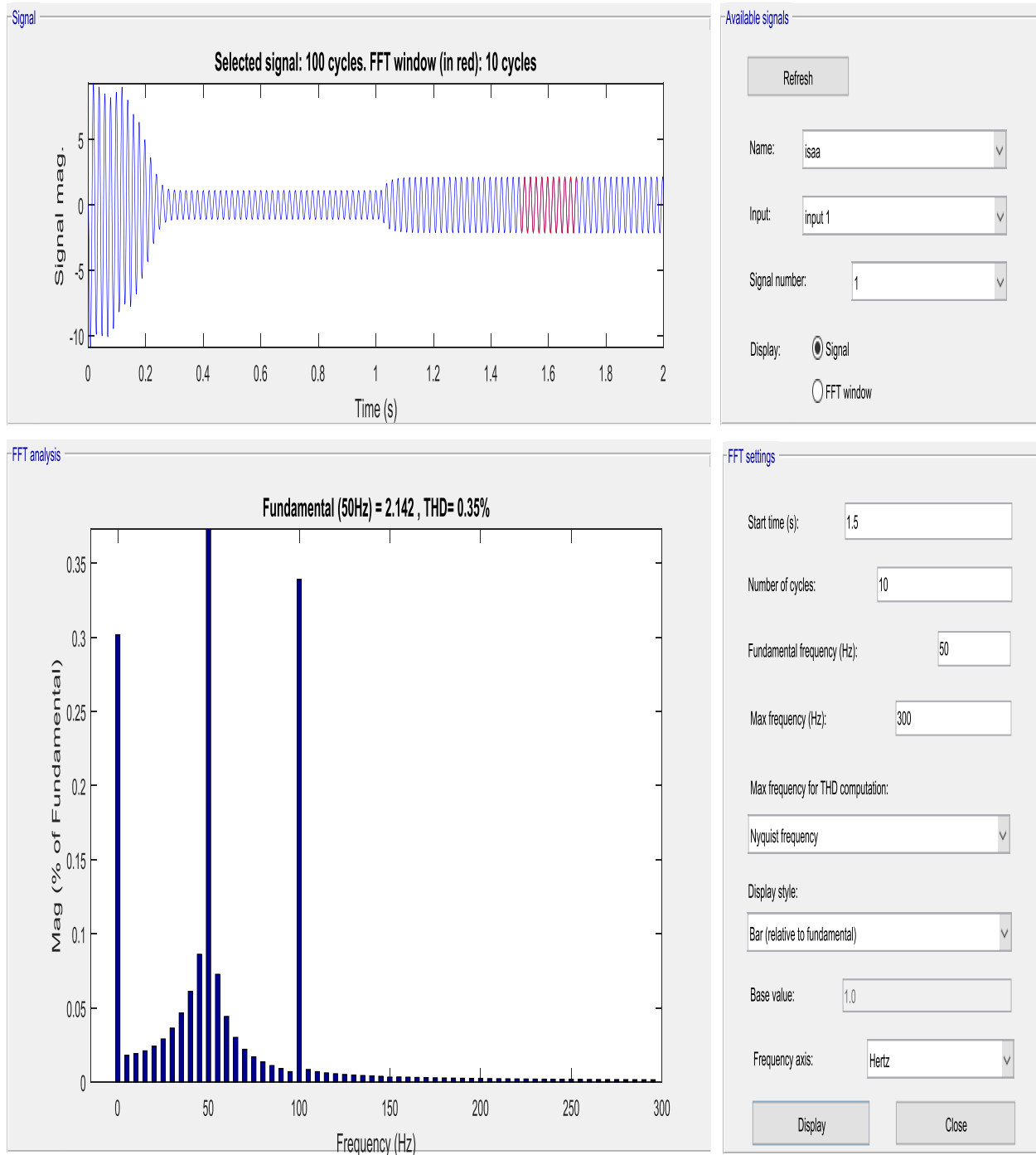


Figure III.7. Spectre du courant statorique en présence à la machine avec court-circuit 5% à la phase (a) dans la plage [0-300] Hz

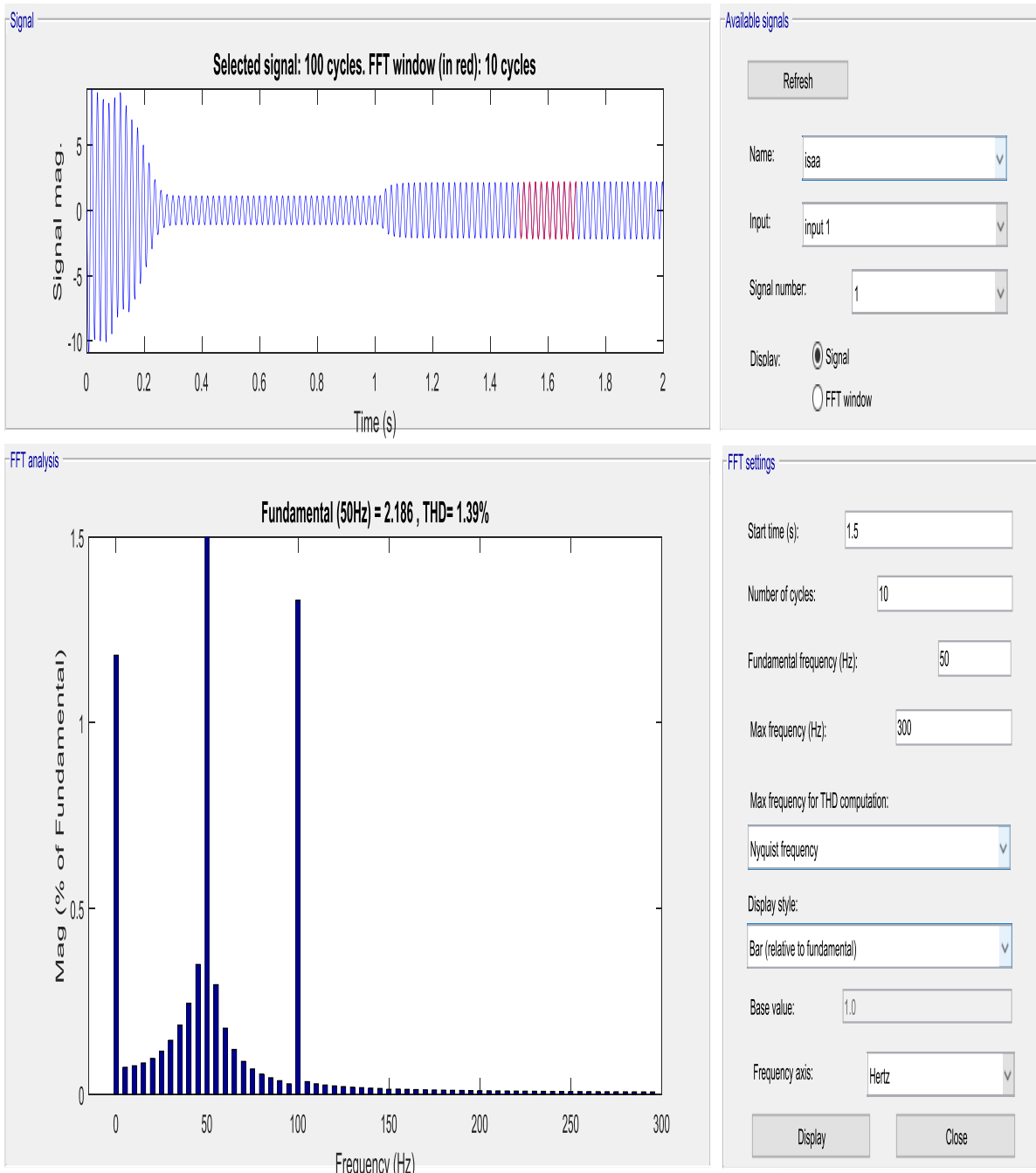


Figure III.8. Spectre du courant statorique en présence à la machine avec court-circuit 10% à la phase (a) dans la plage [0-300] Hz

Les figures (Figure. **III. 6**) et (Figure. **III. 7**) et (Figure. **III. 8**) mettent en évidence l'allure du spectre fréquentielle du courant statorique de la machine asynchrone, en charge à l'état sain et en présence de défaut de court-circuit statorique.

D'abord, la Figure. **III. 6** présentes le contenu spectral du courant statorique en régime permanent lorsque la machine fonctionne sous conditions saine. Ainsi, nous n'observons aucunes raies latérales mais juste la fondamentale oscillant à 50 Hz.

Les figures (Figure. **III. 7**) et (Figure. **III. 8**) montre le spectre du courant dans le cas court-circuit statorique, d'ont la manifeste par la création d'harmonique de fréquence 100HZ

On voit sur la (Figure. **III. 7**) qui résulte d'un défaut de 5% qu'il y a les harmoniques pence 0.34% à la fréquence 100 HZ

On remarque sur la (Figure. **III. 8**) que lorsqu'un défaut de 10% a une valeur d'harmonique, sa valeur est de 1.40 % lorsqu'elle est de fréquence 100 .HZ

Conclusion

Les défauts de court-circuit (spire entre spire) crée des harmoniques sous paire et impaire l'ampleur des défauts de contribue à l'amplification de l'amplitude (créé par encoches, l'onduleuretc.), Plus le défauts augmente plus l'amplitude plus des harmoniques augmente.

Conclusion générale

L'évolution croissante des machines asynchrones dans les secteurs industriels oblige certains utilisateurs à se prémunir contre l'apparition d'un défaut provoquant le plus souvent un arrêt intempestif de la machine. Le travail présenté traite donc du diagnostic de défauts statoriques (plus précisément des courts circuits inter-spires au niveau du stator) d'une machine asynchrone à rotor bobiné. En effet, le défaut a modifié les allures des variables tracées. La validation de la machine asynchrone triphasée est faite, en développant un modèle sur la base de la combinaison directe des différentes équations de cette machine.

Afin de limiter l'apparition de ces défaillances dans les machines asynchrones et de minimiser de leur effets ; nous proposons de faire un bon dimensionnement de la machine, une bonne application des cotes fonctionnelles de fabrication. Aussi éviter son exposition à des grandes températures qui avancent la détérioration des isolants et le choix de l'emplacement en assurant la ventilation de système, éviter les surcharges, appliquer une alimentation stable en tension et en fréquence. En plus, il faut une maintenance régulière, un bon nettoyage des enroulements à billes à fin de limiter leur usures et de les graissés et de bien faire le couplage du moteur avec la charge pour avoir l'homogénéité de système couplé.

Nous avons fait la simulation des performances de la machine (le couple, la vitesse de rotation, le courant statorique...) à l'état sain puis avec défaut de court-circuit statorique Le troisième chapitre a été consacré à la présentation et l'analyse des différents résultats de la simulation en s'appuyant sur l'analyse spectrale du courant.

Les signaux issus de la machine, sont analysés par la maintenance, en effectuant l'évolution temporelle et fréquentielles de ces signaux qui peuvent être exploité pour détecter les anomalies qui affectent le bon fonctionnement de la machine, c'est l'analyse spectrale.

Nous nous sommes embrassés par analyse spectral du courant statorique, C'est quand la machine est saine ne crée pas des harmonique, Lors de l'application d'un défaut, nous remarquons qu'il y a des harmonique, il augmente avec par apport les défauts

Ce travail non exhaustif évidemment, pourrait donner lieu à des études complémentaires dans la direction suivante :

- Utiliser une base de données pratique ;
- Utiliser d'autres méthodes nouvelles de détection.

Bibliographie

- (1). **ZELLOUMA Dalal** « *Commande Directe du Couple sans Capteur Mécanique d'une Machine Asynchrone : Application au Diagnostic des Défauts statoriques* » Mémoire master, Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued /2019
- (2) **Abla Bouguerne** « *Diagnostic automatique des défauts des moteurs asynchrones* » MEMOIRE ,Magister En Electrotechnique UNIVERSITE MENTOURI – CONSTANTINE / 2009
- (3). **AYACHE MOHAMED et EL FANI YASSINE** « *Modélisation et Diagnostic des défauts de court-circuit entre spires d'une machine asynchrone* » Mémoire master, Université SAAD DAHLAB de BLIDA 2017/2018
- (4). **NEZLIOUI Said et YAKOUB Yazid** « *Diagnostic des défauts de court-circuit statorique d'une machine asynchrone* » Mémoire master , Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou 2011/2012
- (5) **SADKI Nour elhouda** « *SIMULATION DES DÉFAUTS STATORIQUE D'UN MOTEUR A ASYNCHRONE* » Mémoire MASTERACADEMIQUE , UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA ,2014-2015
- (6) **MESSAOUDI Yacine et OUKACINE Belkacem** « *Modélisation fine multi-spires de la machine asynchrone en vue de sa simulation en régime sain et de défauts de court-circuités entre spires* », Mémoire master , Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, **2007 – 2008**
- (7) **HARIR Miloud** « *Etude des Défauts dans La Machine Asynchrone à Cage d'Ecureuil par l'Emploi de la Fonction d'Enroulement Modifiée* » Mémoire master ; Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed BOUDIAF 2008/2009
- (8) **Saadi SAKHARA** « *DIAGNOSTIC DES DEFAUTS D'UN ENTRAINEMENT ELECTRIQUE PAR LA TECHNIQUE ONDELETTE* » THESE, Université Badji Mokhtar-Annaba, 19 /01/ 2017
- (9) **Allal Abderrahim** « *Grandeurs non invasives pour le diagnostic des machines asynchrones* »Mémoire Magister En Electrotechnique, UNIVERSITE FERHAT ABBAS - SETIF- UFAS (ALGERIE) , 2010

(10) **BABAA FATIMA** « *Contribution à la modélisation et à la commande de la machine asynchrone : "Application au diagnostic des défauts statoriques"* » THESE , Doctorat en sciences En électrotechnique, UNIVERSITE CONSTANTINE 1 ,11/06/ 2014

(11) Henrik Rasmussen and Roozbeh Izadi-Zamanabadi « Estimation of Stator Winding Faults in Induction Motors Using an Adaptive Observer Scheme » article, Département of Control Engineering, Aalborg University, Fredriks Bajers Vej 7 ,DK-9200 Aalborg Ø, Denmark 2004

(12) **ELBORDJ Mohammed Elamine et HOUICHITI Brahim** « *Détection Des Défauts d'une Machine Asynchrone Alimentée par un Onduleur Commandé par Modulation à Largeur d'impulsion* » Mémoire master, Université de Ghardaïa, 20/10/2020

Annexe

Caractéristiques de la machine asynchrone triphasée

- Puissance : 1.1 kW
- Fréquence d'alimentation : 50Hz
- Vitesse nominale : $N_n = 2850 \text{ tr /mn.}$
- Couple résistant : 3.6 N.m
- Tension nominale entre phases : 380 V
- Courant nominal : 2.6 A
- Résistance statorique : 7.58 Ω
- Résistance rotorique: 0.000035336 Ω
- Dimension de l'entrefer 0.25 mm
- Nombre de spires statorique/phase : 160
- Nombre de barres rotorique 16
- Nombre de pair de pôles : 1
- Moment d'inertie : 0.0054 kg m²
- Coefficient de frottement : 0.006 Nm s
- Fréquence d'alimentation : 50Hz
- Angle électrique d'une maille rotorique : 0.3927
- Inductance propre statorique : 0.5711 H
- Inductance de fuite statorique : 0.0265 H
- Inductance cyclique statorique : 0.5976 H
- Mutuelle inductance stator-maille rotorique : 0.0016 H
- glissement 0.05