

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Amar Telidji de Laghouat



Faculté de Technologie
Département d'électrotechnique
Mémoire de fin d'étude

En vue de l'obtention du diplôme de **MASTER II** en Électromécanique
Option : Électromécanique

Présenté par

Ahmed Mohamed Belly

Moulaye elHassen Brahim Mougeya

THÈME

**Diagnostic des Moteurs Asynchrones Triphasés
à cage d'écureuil par l'analyse des courants
statoriques (Banc d'essai LM.lagh)**

Soutenu le: 09/06/2024 devant le jury composé de:

M'hammed Birame	MCA	à L'UATL	Président
Bensedik Sid Ahmed	Pr	à L'UATL	Examineur
Saroute Mohamed	MAA	à L'UATL	Encadreur
Mohamed Hamidat	Doctorant	à L'UATL	Co-encadreur

REMERCIEMENTS

Nous remercions très infiniment dieu le tout puissant pour nous avoir donné le courage et la volonté d'élaborer ce travail.

Nous tenons à remercier énormément notre cher encadreurs Mr : SAROUTE Mohamed pour leur encadrement, leur soutien et votre expertise, vos conseils avisés et votre disponibilité ont été inestimables pour la réalisation de notre travail.

Nous remercions vivement notre Co-encadreur Mr : HAMIDAT Mohamed pour leur disponibilité et votre patience ont été essentielle pour nous aider à surmonter les défis rencontrés dans la partie de simulation.

Nous remercions vivement Mr : Hadj Aïssa Aboubakeur.

Nous remercions aussi les responsables du laboratoire :

KARBOUNE Khaled et Nouredinne pour leurs efforts

Nous remercions vivement Mr : HADJADJ Ahmed pour leur disponibilité et ses efforts.

Nous remercions tous les membres de jury qui nous ont fait l'honneur d'avoir accepté d'examiner et d'évaluer notre travail.

Président de jury : M'hammed Birame

Examineur : Bessedik Sid Ahmed

Nous remercions aussi tous ceux qui de près ou de loin nous ont aidés et soutenus pour la réalisation de ce modeste travail.

Ahmed Mohamed Belly

Moulaye El Hassen Brahim Mougeya

DÉDICACE

Nous dédions ce travail

A nos chers parents pour leur soutien, vos encouragements vos sacrifices innombrables nous ont permis de poursuivre nos études et d'atteindre nos objectifs.

A nos chers frères

A nos chères sœurs

A tous nos amis

Ahmed Mohamed Belly

Moulaye El Hassen Brahim Mougeya

المخلص: يعد المحرك لا تزامني ذو القفص السنجابي ثلاثي الأطوار من أكثر المحركات استخداما في المجال الصناعي وذلك يعود لسبب كلفته المنخفضة والمتانة وسهولة الصناعة والصيانة رغم هذه الميزات التي يمتاز بها هذا المحرك فهو معرض إلى أعطاب يمكن أن تؤدي إلى توقفه عن العمل مما يؤدي إلى توقف الإنتاج. من أجل ضمان استمرارية الإنتاج وتقليل تكاليف الصيانة لابد من تشخيص مبكر لهذه الأعطاب. هذا العمل المقدم في هذه المذكرة هو عبار عن دراسة واقعية على محركين لا تزامنين عن طريقهما نتمكن من إحداث أعطاب عن طريق إحداث خلل في تيارات الجزء الثابت عبر قصر بين حلقات الجزء الثابت للمحرك وإحداث كسر في موصل من موصلات الجزء الدورا ومعرفة مدى تأثير هذه الأعطال عن طريق تشخيص عملي على أداء المحرك بالإضافة إلى معرفة علاقة هذه الأعطاب بإحداث اهتزازات على مستوى المحرك وفي الأخير قمنا بمحاكات لهذه الأعطاب عبر برنامج المحاكات من أجل التحقق وتأكيد النتائج المتحصل عليه عن طريق التجربة الواقعية.

الكلمات المفتاحية: المحرك لا تزامني، تشخيص عملي، خلل التيار الساكن، النمذجة، اهتزازات

Résumé :

Le moteur asynchrone à cage d'écureuil triphasé est l'un des moteurs le plus largement utilisés dans l'industrie en raison de son cout, sa robustesse, de sa facilité de fabrication et de maintenance. Malgré les avantages majeurs de la machine asynchrone elle présente quelques défauts, qui peuvent entrainer son arrêt et l'arrêt de production. Donc un diagnostic précoce de ces défauts est nécessaire. Ce travail présenté dans ce mémoire est une étude réaliste sur deux moteurs asynchrones à cage d'écureuil, nous allons provoquer un défaut statorique court-circuit entre les spires des enroulements statoriques, avec un défaut rotorique cassure d'une barre rotorique en observant aussi l'effet de ces défauts sur la vibration du moteur. En fin, nous avons simulé ce défaut à travers un logiciel de simulation afin de vérifier et confirmer les résultats expérimentaux.

Mots clés : Diagnostic, Défauts de Court-circuit, MAS, Simulation, Vibration.

Abstract:

The three-phase squirrel cage asynchronous motor is one of the most widely used motors in the industry due to its cost, robustness, ease of manufacturing and maintenance. Despite the major advantages of the asynchronous machine, it has some defects, which can lead to its shutdown and the cessation of production. Therefore, early diagnosis of these defects is necessary. This work presented in this dissertation is a realistic study on two asynchronous squirrel cage motors, we will cause a short-circuit stator fault between the turns of the stator bearings, with a rotor fault breakage of a rotor bar by also observing the effect of these defects on engine vibration. Finally, we simulated this defect using simulation software in order to verify and confirm the experimental results.

Keywords: Diagnosis, Short-circuit Faults, Three-phase squirrel cage asynchronous machines.

Keywords: Diagnosis, Faults of Short-circuit, Asynchronous Machine, vibration

LISTE DES SYMBOLES

Symboles liés à la machine asynchrone

$\mathbf{u}_s, \mathbf{u}_r$	Vecteurs des tensions statoriques et rotoriques,
$\mathbf{i}_s, \mathbf{i}_r$	Vecteurs des courants statoriques et rotoriques,
$\boldsymbol{\phi}_s, \boldsymbol{\phi}_r$	Vecteurs des flux statoriques et rotoriques,
$[\mathbf{R}_s], [\mathbf{R}_r]$	Matrices des résistances statoriques et rotoriques.
θ_m	Angle entre la phase (a_s) du stator et la phase (a_r) du rotor avec $\omega = d\theta_m/dt$
L_s, L_r	Inductance propre respective d'une phase statorique et rotoriques.
M_s, M_r	Inductance mutuelle respective entre deux phases statoriques et rotoriques.
L_{sr}	Inductance mutuelle maximale entre une phase du stator et une phase du rotor.
ω_s	La vitesse de rotation du référentiel.
ω_r	La vitesse électrique de rotation du rotor.
L_s, L_r	Inductances propres cycliques du stator et du rotor respectivement
L_m	Inductance mutuelle cyclique entre stator et rotor ($L_{sr} = 3/2 M_{sr}$).
M_{sr}	Inductance mutuelle entre une phase statorique et une phase rotorique.
$[\mathbf{X}]$	Vecteur d'état.
$[\mathbf{U}]$	Vecteur de commande.
$[\mathbf{P}]$	La matrice de transformation directe de Park.
$[\mathbf{P}]^{-1}$	La matrice de transformation inverse de Park.

LISTE DES ABREVIATIONS

LM. Lagh : Laboratoire Machine Laghouat

MAS : Machine Asynchrone

LE. L : Laboratoire Electronique Laghouat

INDEX DES FIGURES

Chapitre I

Figure (1.1)	Parties constituantes d'un moteur asynchrone à cage d'écureuil	4
Figure (1.2)	Parties constituantes du stator	4
Figure (1.3)	les parties du rotor à cage	5
Figure (1.4)	Rotor bobiné	5
Figure (1.5)	Symbole du moteur à cage(a) et à rotor bobiné(b)	5
Figure (1.6)	Cage rotorique balayée par le champ tournant statorique	6
Figure (1.7)	Plaque signalétique de notre machine	8
Figure (1.8)	Schéma de bobinage du moteur	8
Figure (1.9)	Les différents connexion des bobines	9
Figure (1.10)	Plaque à bornes du moteur	9
Figure (1.11)	Perçage de barre rotorique	10
Figure (1.12)	Les machines de notre banc d'essai	10
Figure (1.13)	Alimentation	11
Figure (1.14)	Un oscilloscope	11
Figure (1.15)	(a) Ampèremètre ; (b) Voltmètre	12
Figure (1.16)	Capteur de courant	12
Figure (1.17)	Capteur de Vibration	12

Chapitre II

Figure (2.1)	Pourcentage des défauts dans les années 90	16
Figure (2.2)	Evolution du pourcentage des défauts pendant une décennie	16
Figure (2.3)	Représentation des différents défauts statoriques Concerne le court-circuit	17
Figure (2.4)	Défaut d'un rotor à cage d'écureuil :(a) rupture de barres ; (b) rupture d'anneau de court-circuit.	19
Figure (2.5)	État des roulements (a) sain, (b) bague intérieure défectueuse, (c) bague extérieure défectueuse, (d) bille défectueuse	20

Figure (2.6)	Principe d'estimation d'état	22
Figure (2.7)	Génération des résidus	22
Figure (2.8)	Principe des techniques d'identification	23
Figure (2.9)	Schéma de principe de la surveillance par analyse spectrale	24

Chapitre III

Figure (3.1)	Représentation d'une machine asynchrone triphasée au stator et au rotor	28
Figure (3.2)	Représentation spatiale de la transformation triphasé/biphasé	31
Figure (3.3)	Représentation du modèle de Park	32
Figure (3.4)	Bloc de simulation de la machine asynchrone triphasé	35
Figure (3.5)	Bloc de référentiel d & q	35
Figure (3.6)	Evolution des courants des phases statoriques	36
Figure (3.7)	Evolution du couple électromagnétique	37
Figure (3.8)	Evolution de la vitesse de rotation	37
Figure (3.9)	Modèle de la machine en défaut	38
Figure (3.10)	Modèle de simulation de défaut	38
Figure (3.11)	Courants statoriques lors de court-circuit	39
Figure (3.12)	Evolution du couple électromagnétique lors de court-circuit	39
Figure (3.13)	Vitesse de rotation lors de court-circuit	40

Chapitre VI

Figure (4.1)	Banc d'essai	42
Figure (4.2)	Formes d'onde des courants des phases du moteur sain	42
Figure (4.3)	Les pourcentages de court-circuit	43
Figure (4.4)	Courant statorique Phase(a) avec un défaut de 0.5%	43
Figure (4.5)	Courant statorique Phase(b) avec un défaut de 1%	43
Figure (4.6)	Courant statorique avec un défaut de 3%	44
Figure (4.7)	Les Courants statoriques des trois phases saines et avec défauts	45

Figure (4.8)	Formes d'onde des courants des phases du moteur en défaut rotorique	46
Figure (4.9)	Formes d'onde des courants en présence de défaut rotorique /statorique((a)=0.5% ;(b) =1% ; (c)=3% de spires)	46
Figure (4.10)	Courant de la phase(a) moteur sain	48
Figure (4.11)	Courant de la phase(a), mesuré moteur sain	48
Figure (4.12)	Courant de la phase(a) moteur avec défaut (0.5%)	49
Figure (4.13)	Courant de la phase(b), mesuré moteur avec défaut (0.5%)	49
Figure (4.14)	Courant de la phase(a) moteur avec défaut (1%)	50
Figure (4.15)	Courant de la phase(a), mesuré moteur avec défaut (1%)	50
Figure (4.16)	Courant de la phase(a) moteur avec défaut (3%)	51
Figure (4.17)	Courant de la phase(a) moteur avec défaut (3%)	51
Figure (4.18)	Capteur piézoélectrique	53
Figure (4.19)	Onde vibratoire du moteur sain	53
Figure (4.20)	Onde vibratoire de la phase a avec 0.5% court-circuit entre spires	54
Figure (4.21)	Onde vibratoire de la phase a avec 1% court-circuit entre spires	54
Figure (4.22)	Onde vibratoire de la phase a avec 3% court-circuit entre spires	54
Figure (4.23)	(a) capteur ;(b) DAQ ; (c) Label VIEW installé dans un ordinateur	55
Figure (4.24)	L'onde vibratoire du moteur sain	55
Figure (4.25)	L'onde vibratoire du moteur en défaut statorique 0,5%	56
Figure (4.26)	L'onde vibratoire du moteur en défaut statorique 1%	56
Figure (4.27)	L'onde vibratoire du moteur en défaut statorique 3%	56
Figure (4.28)	L'onde vibratoire du moteur en défaut rotorique	57
Figure (4.29)	L'onde vibratoire du moteur en défaut rotorique et statorique (0,5%)	57
Figure (4.30)	L'onde vibratoire du moteur en défaut rotorique et statorique (1%)	58
Figure (4.31)	L'onde vibratoire du moteur en défaut rotorique et statorique (3%)	58

Sommaire

Introduction Générale.....1

Chapitre I : machines asynchrones et banc d'essai

I.1 Introduction	3
I.1.1 Historique de la machine asynchrone	3
I.2 Constitution de la machine asynchrone	3
I.2.1 Définition	3
I.2.2 Constitution	4
I.2.2.1 Stator	4
I.2.2.2 Rotor	5
I.2.2.3 Les paliers	6
I.3 Principe de fonctionnement	6
I.3.1 Démarrage	6
I.3.1.1 Moteur à cage	7
I.3.1.2 Moteur à rotor bobiné à bagues	7
I.4 Description et présentation de banc d'essai	8
I.5 Les appareils utilisés pour des mesures des grandeurs	11
I.6 Conclusion	13

Chapitre II: Diagnostic des défauts des moteurs asynchrones Triphasés

II.1 Introduction	16
II.2 Défauts des machines électriques	16
II.3 Défauts statoriques	17
II.3.1 Défauts d'isolant dans un roulement	17
II.3.2 Court-Circuit entre spires	18
II.3.3 Court-Circuit entre phase	18
II.3.4 Court-Circuit phase/bâti	18
II.4 Défauts rotoriques	19
II.4.1 Défauts de rupture de barres et d'anneau de court-circuit	19

II.4.2 Défaut de Roulement	20
II.4.3 Excentricité	20
II.5 Méthodes de diagnostic des Machines électriques	21
II.5.1 Méthode de diagnostic avec modèle analytique	21
II.5.1.1 Technique d'estimation d'état	21
II.5.1.2 Technique de génération de résidus	22
II.5.1.3 Technique d'identification	22
II.5.2 Méthode de diagnostic sans modèle analytique	23
II.5.2.1 Méthode par traitement de signal	23
II.5.2.2 Méthode par intelligence Artificielle (IA)	24
II.6 Conclusion	25

Chapitre III: Simulation de la Machine asynchrone

III.1 Introduction	27
III.2 Modélisation de la Machine asynchrone	27
III.2.1 Hypothèses simplificatrices	27
III.2.2 Schéma d'un moteur asynchrone-triphasé	28
III.2.3 Mise en équations du modèle de la machine asynchrone	28
III.2.3.1 Equations électriques	28
III.2.3.2 Equations magnétiques	29
III.2.3.3 Équations mécaniques	30
III.3 Transformation de Park	30
III.3.1 Application aux équations de la machine	32
III.3.2 Equations des tensions	32
III.3.3 Equations des flux	32
III.3.4 Equations mécaniques	33
III.4 Représentation d'état du modèle de la MAS	33
III.5 Modélisation de la machine asynchrone « en présence du défaut »	34
III.6 Modèle de Simulation du moteur Sain	35

III.6.1 Résultats de simulation en fonctionnement sain	36
III.7 Modèle de Simulation du moteur en défaut	38
III.7.1 Résultats de Simulation du modèle en défaut	39
III.8 Conclusion	40

Chapitre IV: Essais et mesures des courants statorique pour différents Défauts

IV.1 Introduction	42
IV.2 Essai Expérimentaux	42
IV.2.1 Essai pour moteur sain	42
IV.2.2 Essai du moteur en Défaut (statorique)	43
IV.2.2.1 Court-circuit de la phase (a) avec un défaut de 0.5%	43
IV.2.2.2 Court-circuit de la phase (b) avec un défaut de 1%	43
IV.2.2.3 Court-circuit de la phase (c) avec un défaut de 3%	44
IV.3 Etude de l'influence des spires en défaut	44
IV.4 Essai du moteur en défaut Rotorique et mixte	46
IV.4.1 Essai du moteur avec un Défaut rotorique	46
IV.4.2 Essai simultané de défaut stator/rotor	46
IV.5 Comparaison des Résultats de simulation et les résultats expérimentaux	48
IV.5.1 Interprétation des résultats	52
IV.6 L'effet de défaut statorique sur la vibration de la machine	53
IV.6.1 Essai avec capteur(a) pour l'état sain et avec défaut(statorique)	53
IV.6.2 Essai avec capteur(b) pour l'état sain et avec défaut (statorique, mixte)	55
IV.7 Interprétation de résultats	58
IV.8 Conclusion	59

Conclusion générale	61
----------------------------	----

Références bibliographiques

Annexe

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Introduction générale

Les moteurs asynchrones triphasés sont largement utilisés dans diverses applications industrielles en raison de leur robustesse, de leur coût relativement bas, et de leur efficacité. Cependant, comme tout équipement électromécanique, ils peuvent subir des défaillances qui peuvent mener à des arrêts non planifiés et coûteux des systèmes de production. Il est donc crucial de développer des méthodes de diagnostic fiables pour surveiller l'état de ces moteurs et détecter les défauts à un stade précoce.

Le diagnostic préventif des moteurs asynchrones vise à identifier et à prévoir les pannes potentielles avant qu'elles ne provoquent des dysfonctionnements majeurs. Cela permet non seulement de réduire les coûts de maintenance et de réparation, mais aussi d'améliorer la sécurité et la fiabilité des opérations industrielles. Parmi les différentes techniques de diagnostic, l'analyse des courants statoriques est particulièrement prometteuse.

L'analyse des courants statoriques consiste à examiner les signaux de courant électriques circulant dans les enroulements du stator du moteur. Cette méthode présente plusieurs avantages. Elle ne nécessite pas de modifications physiques importantes sur le moteur, car les capteurs de courant peuvent être facilement installés sur les câbles d'alimentation. Les courants statoriques contiennent des informations sur divers types de défauts, tels que les déséquilibres, les défauts d'enroulement, les barres de rotor cassées, et les problèmes de roulements.

Dans notre travail, on utilise l'analyse spectrale du courant statorique de la machine asynchrone qui peut conduire à la détection des défauts et pour voir les effets imposés sur la machine.

Dans ce but, notre mémoire est composée de quatre chapitres :

Le premier chapitre, concerne la présentation de la machine asynchrone à cage d'écureuil en donnant les différentes parties qui la composent, et nous décrivons le banc d'essai réalisé au niveau du Laboratoire de machines électriques de Laghouat, utilisé pour le diagnostic de tous les défauts des machines électriques, à l'exception des défauts de roulements, qui demande un montage et démontage de roulement pour chaque essai.

Au second chapitre, l'état de l'art du diagnostic des défauts des moteurs asynchrones et les approches qui peuvent être utilisées dans le diagnostic.

Le troisième chapitre, est la simulation par Matlab Simulink, de la machine asynchrone triphasé pour représenter les courants statoriques. Deux cas de figures, qui se représentent : cas du moteur sain et cas du moteur avec défaut, dont le but de faire une comparaison avec les résultats pratiques, pour la validation de nos résultats pratiques.

En fin dans **le dernier chapitre**, nous relevons les résultats expérimentaux des défauts des courants statorique, pour le cas du moteur sain, puis par introduction de défauts, par élimination des spires statoriques sur le banc, puis essai avec cassure de barre. En outre, une mesure de vibration et température est indispensable, pour les différents essais utilisés en défauts pour chercher la corrélation entre les défauts statorique et les vibrations, en outre la température. En utilisent des capteurs de vibration et de température, avec une carte d'acquisition USB 6009 avec le logiciel LabVIEW, et traiter logiciel ORIGINE 8.1. Suivie d'une comparaison avec les résultats de simulation pour le cas des défauts des courants statorique. Nous terminons notre mémoire par une conclusion générale.

CHAPITRE I

MACHINES ASYNCHRONES ET BANC D'ESSAI

I.1.Introduction

Le moteur asynchrone, appelé aussi machine à induction, est une machine électrique à courant alternatif. Le moteur asynchrone est le plus utilisé dans l'industrie en raison de sa fiabilité, de sa robustesse, de sa simplicité de construction et de son faible besoin d'entretien. Dans ce chapitre nous présentons un aperçu sur cette machine.

I.1.1 Historique de la machine asynchrone

La paternité de la machine asynchrone est controversée. Elle pourrait être attribuée à trois inventeurs en 1887, Nikola Tesla dépose un brevet sur la machine asynchrone puis en mai de l'année suivante. Pendant la même période Galileo Ferraris publie des traités sur les machines tournantes, avec une expérimentation en 1885, puis une théorie sur le moteur asynchrone en avril 1883. En 1888, Michail Ossipowitsch Doliwo-Dobrowolski, électricien allemand d'origine russe, invente le premier moteur asynchrone à courant triphasé à cage d'écureuil qui sera construit industriellement à partir en 1891. Du fait de sa simplicité de construction, d'utilisation et d'entretien, de sa robustesse et son faible prix de revient, la machine asynchrone est aujourd'hui très couramment utilisée comme moteur dans une gamme de puissance allant de quelques centaines de watts à plusieurs milliers de kilowatts. Quand la machine asynchrone est alimentée par un réseau à fréquence fixe, il est difficile de faire varier sa vitesse. En outre, au démarrage, le couple est faible et le courant appelé est très élevé. Deux solutions historiques ont résolu ce dernier problème : le rotor à encoches profondes et le rotor à double cage mis au point en 1912 par Paul Boucherot. Grâce aux progrès de l'électronique de puissance, l'alimentation par un onduleur à fréquence variable permet maintenant de démarrer la machine convenablement et de la faire fonctionner avec une vitesse réglable dans une large plage. C'est pourquoi il est utilisé pour la motorisation des derniers TGV ainsi que des nouveaux métros parisiens. [1]

I.2. Constitution du moteur asynchrone

I.2.1 Définition :

La machine Asynchrone, souvent appelée moteur à induction comprend un stator fixe alimenté par une source alternatif et un rotor, Le rotor est monté sur un axe de rotation on définit deux types de rotor : bobiné ou à cage d'écureuil.

I.2.2 Constitution

Le Moteur asynchrone est constitué principalement de deux parties l'une fixée appelée stator et l'autre est mobile appelée rotor entre les deux parties il ya l'entrefer. Du point de vue mécanique, la machine asynchrone triphasée est composée de trois parties distinctes :

- Le stator c'est la partie fixe de la machine.
- Le rotor c'est la partie tournante de la machine.
- Les paliers, c'est la partie mécanique qui supporte les bouts d'arbre du rotor tout en lui assurant le degré de liberté de la rotation [1].

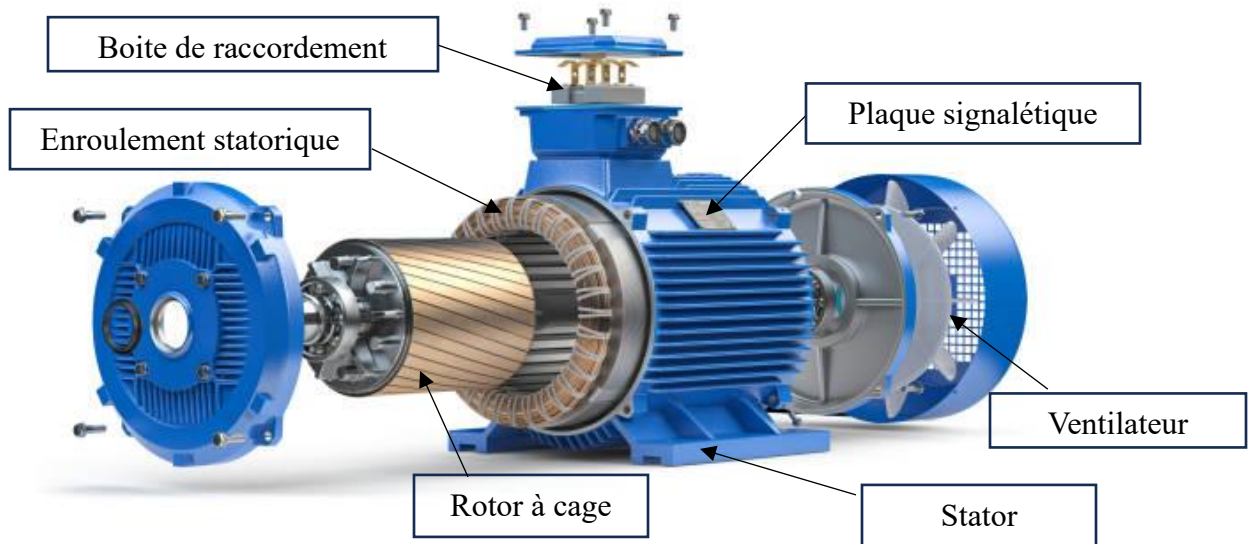


Figure 1.1: Parties constituant d'un moteur asynchrone à cage d'écureuil.

I.2.2.1 Le stator : c'est la partie fixe du moteur, elle comporte trois enroulements répartis dans les encoches, ces enroulements dont le rôle de créer ou générer le champ tournant.

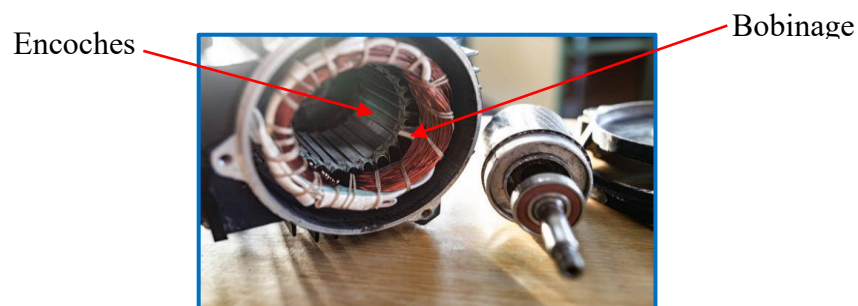


Figure 1.2: Parties constituant du stator

I.2.2.2. Le rotor :

C'est la partie tournante de la machine, elle est constituée d'un ensemble de conducteurs mais en court-circuit. On distingue deux types de rotors :

a) Rotor à cage d'écureuil

Le rotor est constitué de barres conductrices, en cuivre ou en aluminium, ces barres sont inclinées par rapport à l'axe de rotation. Les extrémités de ces barres sont court-circuitées par deux anneaux de même métal.

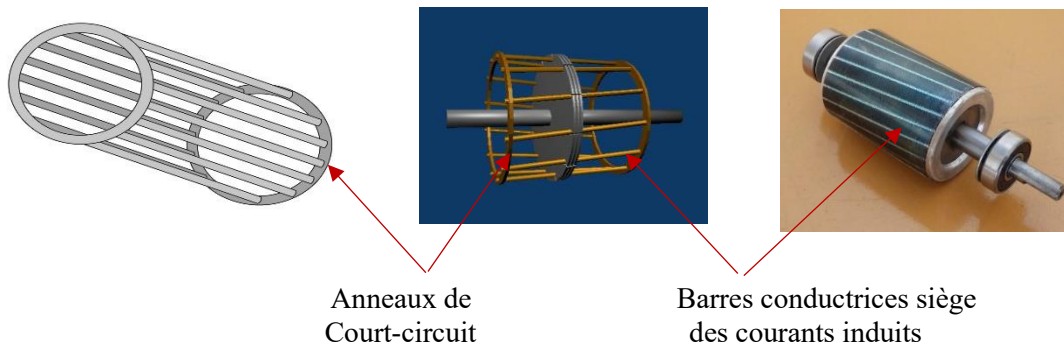


Figure 1.3 : les parties du rotor à cage

b) Rotor bobiné (à bagues)

Les enroulements sont généralement accessibles par l'intermédiaire de 3 bagues et de 3 balais, permettant ainsi de modifier les caractéristiques de la machine. Le rotor comporte des encoches dans lesquelles sont logés des conducteurs formant un enroulement triphasé.

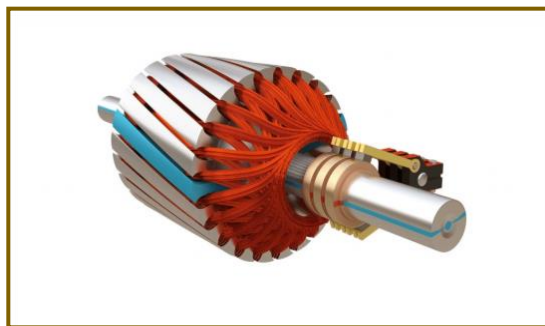


Figure 1.4 : Rotor bobiné

c) Symboles :

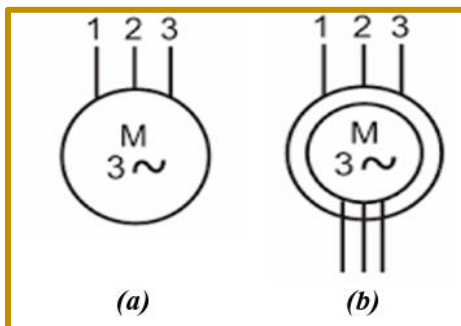


Figure 1.5 : symbole du moteur à cage(a) et à rotor bobiné(b)

I.2.2.3. Les Paliers

Les paliers sont constitués de roulements à billes et de flasque. 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 [2].

I.3 Principe de fonctionnement

Le stator, alimenté par un réseau de fréquence f va créer dans l'entrefer un champ magnétique tournant (selon le théorème de **Ferraris**) à la Vitesse N_s , telle que $N_s=f/p$.
Où f : est la fréquence d'alimentation.

p : représente le nombre de paires de pôles.

Le champ tournant balaie le rotor et des forces électromotrices sont engendrées dans les conducteurs (la loi de **FARADAY** $e = \frac{d\Psi}{dt}$). Comme les circuits rotoriques sont fermés, des courants rotoriques prennent naissance. Il apparaît des forces électromotrices dues à l'action de l'induction statorique sur les courants rotoriques. En vertu de la loi de **Lenz** ces forces tendent à entraîner le rotor dans le sens des inductions tournantes.

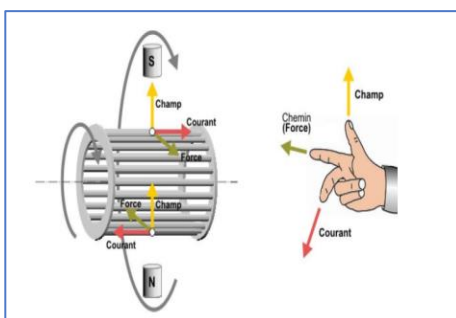


Figure 1.6 : Cage rotorique balayée par le champ tournant statorique

I.3.1 Démarrage

Lors de la mise sous tension, le moteur provoque un appel de courant sur le réseau, de l'ordre 5 à 8 fois l'intensité nominale, qui peut provoquer une chute de tension du réseau dommageable, pour les moteurs de faible puissance, on peut Utiliser un démarrage direct pour les moteurs de forte puissance on emploiera des solutions devenues classiques et autres solutions modernes (démarrage électronique). [3].

I.3.1.1 Moteur à cage

Les procédés de moteur à cage résultent d'un compromis entre la réduction de l'intensité du courant appelé au réseau et l'obtention du couple accélérateur suffisant.

Nous citons :

- **Le démarrage étoile – triangle** : le principe consiste à coupler d'abord les enroulements en étoile, ce qui revient à les alimenter sous une tension réduite puis en triangle, ce qui revient à les alimenter sous la tension nominale. Le démarrage donc temporisés et progressif.
- **Le démarrage par résistances statoriques** : il consiste à démarrer le moteur en lui appliquant une tension réduite grâce à des résistances montées en série avec les enroulements lorsque la vitesse est stabilisée, un dispositif temporisé élimine les résistances et couple le moteur directement au réseau.
- **Le démarrage par auto – transformateur à une ou plusieurs prises**
- **Le démarrage électronique** : par gradateurs à thyristor dont l'angle de retard à l'amorçage est réglé automatiquement pour adapter la valeur efficace de la tension statorique à la vitesse instantanée il existe un certain nombre d'applications ou l'utilisation du moteur à cage n'est pas possible ; en particulier en cas :
 - De démarrage difficiles et de longue durée (couple résistant élevé, par exemple : broyeurs ; inertie importante)
 - D'appels de courant au démarrage incompatible avec la puissance de court – circuit du réseau. [3].

I.3.1.2 Moteur à rotor bobiné à bagues

Grâce à l'insertion dans le circuit rotorique d'un rhéostat à résistance métalliques associé ou non à un gradateur ou encore d'un rhéostat électrolytique, les possibilités suivantes :

- Adapter le couple moteur au couple résistant de la machine entraînée.
- Supporter des démarrages de longue durée car l'essentiel de l'énergie perdue et dissipée dans le rhéostat extérieur.
- Limiter convenablement l'appel de courant. [3]

I.4 Description et présentation de banc d'essai

Généralement, les travaux sur le diagnostic des machines électriques sont essentiellement destinés ou axés sur la machine asynchrone grâce à sa basse tension, simplicité, sa robustesse sont cout peu éleve et sont entretain facile, des nombreux travaux et des recherches sont consacrés ou daignostic du défaut statorique présent dans ce type de machines, la majorité de méthodes des diagnostic sont axés sur l'analyse spectral du courant statorique. L'utilisation de cette méthode nécessite à un banc d'essai pour créer les défauts et réaliser le diagnostic pour cela nous avons apporté un banc d'essai qui a été réalisé par des étudiants au niveau de l'abaratoire des machines électriques **laghouat** on va esseyer de compléter ses études en utilisant ce banc d'essai [4].

Ce banc d'essai est composé des deux machines asynchrone à cage dont les caracteristiques comme indique **la figure (1.7)**.



Figure 1.7: plaque signalétique de notre machine. LM. Lagh

L'ensemble des machines utilisées a été modifié de facon à ce qu'elles offrent la possibilité des cout-cuites entre les spires. Afin de pouvoir réaliser une étude de défaut de court-circuit sur cette machine, la machine a été rebobinée suivant le schéma donné par la **Figure 1.8** :

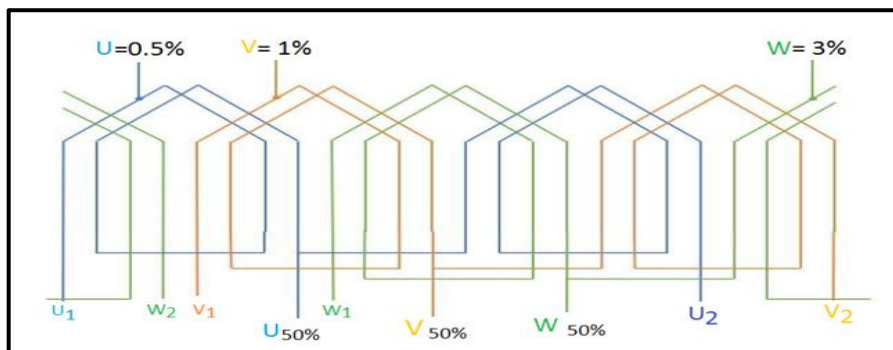


Figure 1.8 : Schéma du bobinage réalisé pour les moteurs.

Les stators des machines ont été rebobinées de sorte que les entrées et les sorties des différents sections elementaires statoriques soient extraites de la carcasse et ramenés à un bornes qui est fixé ou-dessous de la machine comme indique à la **figure (1.9)**.



Figure 1.9: Les différents connexion des bobines. *LM.Lagh*

Le bornier ainsi réaliser permet de créer facilement un court-circuit sur chacun des sections alimentaires de la machine. Ce défaut est mis en œuvre simplement par une connexion de deux bornes voisines d'une meme phase grace à une straps comme indique à la **figure (1.10)**.

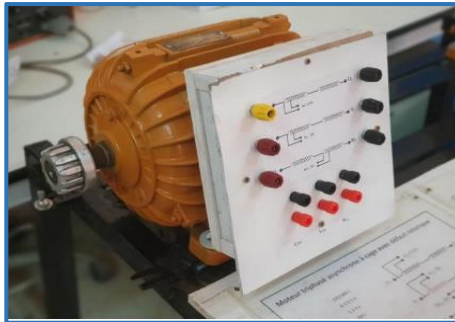


Figure 1.10 : plaque à bornes du moteur. *LM. Lagh.*

Le défaut statorique correspond donc à court-circuiter une pourcentage d'une phase de bobinage statorique, les trois phases sont décomposés en section chaque section qui permet de court-circuiter une pourcentage bien définit de chaque phase **0.5%** ou **1%** ou **3%** ou les trois sections ensembles.

Concernant les défauts rotoriques, l'une des deux machines subit un perçage au niveau d'une barre rotorique pour visualiser l'effet de ce défaut sur la machine comme indiqué à la **figure (1.11)**.



Figure 1.11: perçage de la barre rotorique. *LM. Lagh*

Donc les deux machines peuvent subir un défaut statorique à partir d'un court-circuit au niveau des enroulements statoriques, par contre l'une des deux machines peut subir à la fois les défauts rotoriques et statoriques comme montre **la figure (1.12)**.

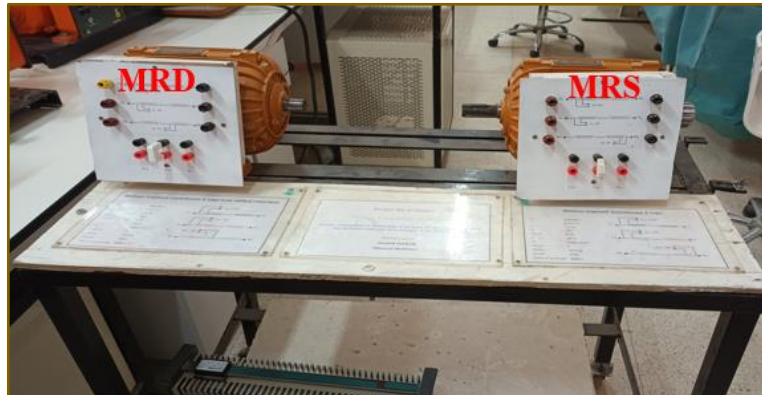


Figure 1.12: les machines de notre banc d'essai. *LM. Lagh*

I.5 les appareils utilisés pour les mesures des grandeurs

Des dispositifs et des appareils de mesure et d'alimentation utilisés lors des essais
Des capteurs de courant et de vibration, une poste d'alimentation un oscilloscope des
ampermetres et voltmetres pour mesurer les grandeurs électriques.

- poste d'alimentation

Une Alimentation triphasée Variable



Figure 1.13 : Alimentation. *LM.Lagh*

-Un oscilloscope numérique

L'oscilloscope permet de visualiser le signal de courant statorique et de convertir le signal temporel en un spectre de fréquences. Cette analyse spectrale permet de décomposer le signal en ses composants fréquentielles, révélant ainsi les harmoniques et les distorsions présentes, cela peut être particulièrement utile pour l'analyse des moteurs électriques, car les harmoniques et les distorsions du courant statorique peuvent indiquer des problèmes tels que des défauts d'enroulement ou des déséquilibres.



Figure 1.14 : un oscilloscope pour traiter le signal
du courant statorique d'une des trois phases
LM.Lagh

- Ampèremètre et Voltmètre

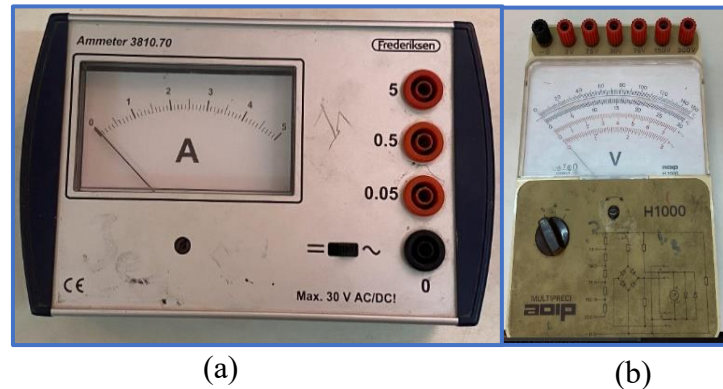


Figure 1.15 : (a) Ampèremètre ; (b) Voltmètre

- Capteur de courant

Plusieurs types de capteurs peuvent être utilisés pour la mesure du courant. Dans notre travail on a utilisé un transformateur de courant.



Figure 1.16 : Capteur de courant. LE. Lagh

- Capteur de Vibration

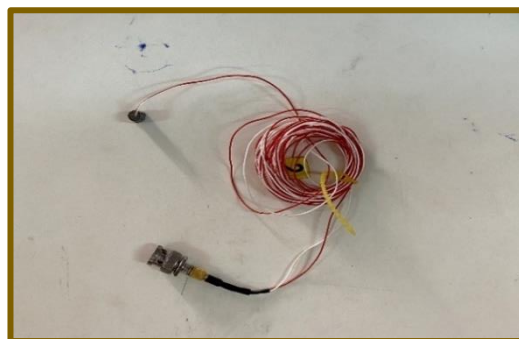


Figure 1.17 : Capteur de Vibration. LM. Lagh

I.6 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté un aperçu sur la constitution de la machine asynchrone et les méthodes de démarrage, puis nous avons décrit le banc d'essai qu'on va utiliser pour créer les défauts statoriques et rotoriques. Ce banc d'essai est composé de deux moteurs asynchrones à cage qui ont été rebobiné d'une manière ou on peut créer les défauts statoriques et rotoriques, nous avons cité aussi les appareils des mesures et le capteur de courant qui va capter les courants statoriques.

CHAPITRE II

DIAGNOSTIC DES DÉFAUTS DES MOTEURS ELECTRIQUES ASYNCHRONE

II.1 Introduction

Ce chapitre présente un aperçu sur les défauts qui peuvent apparaître sur les machines asynchrones dans cette étude nous intéressons par le défaut statorique qui présente 60% selon une étude statistique effectuée par une compagnie d'assurance allemande des systèmes industriels sur les pannes des machines asynchrones [5].

D'autre part les mêmes études montrent qu'entre 1973 et 1998 les pannes au stator sont passées de 78% à 60%. Ces variations sont dues à l'amélioration de la technique de fabrication de la machine.

II.2 Défauts des machines électriques

Les machines électriques peuvent présenter des différents défauts qui peuvent à court ou long terme provoquer son endommagement et causer inévitablement l'arrêt du processus.

Ces défauts peuvent être classés selon leurs origines en deux catégories : interne et externe le **tableau 2.1** présente une classification des défauts des machines électriques selon leurs origine.

Tableau 2.1 : Défauts des machines électriques selon leurs origines [6].

Défaillances des machines électriques	Interne	Mécanique	Contact entre le stator et rotor
			Défaut de roulements
			Excentricité
		Électrique	Mouvement des enroulements et des tôles
			Défaillance au niveau de l'isolation
			Rupture de barre
	Externe	Mécanique	Défaillance au niveau du circuit magnétique
			Charge oscillante
			Surcharge de la machine
		Environnementale	Défaut de montage
			Humidité
			Température
		Électrique	Propreté
			Fluctuation de la tension
			Sources de tensions déséquilibrées
Réseau bruité			

Plusieurs études ont été effectuées sur la fiabilité des machines électriques la plupart de ces études concernent précisément les machines asynchrones de moyenne et grande puissance exploitées dans l'industrie.

Parmi l'une de ces études, une étude effectuée par Thorsen dans les années 90 sur des machines asynchrones de grande puissance (de 100KW à 10MW) ont montré que sur cette gamme de puissance certains pannes sont plus fréquents que d'autres, comme montre la **figure 2.1** qui récapitule la distribution des défauts dans les moteurs examinés dans cette étude.

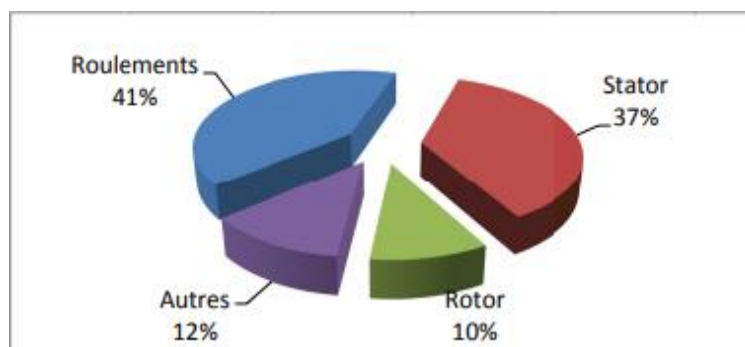


Figure 2.1: pourcentage des défauts dans les années 90

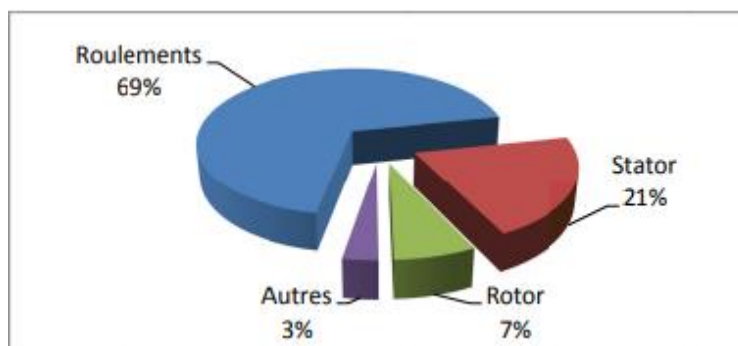


Figure 2.2: Evolution du pourcentage des défauts pendant une *décennie*

Une autre étude faite par Bonnet sur les machines asynchrones de grande puissance, exploitées dans l'industrie pétrochimique, montre que 69% de pannes se situent sur les roulements, 21% au stator, 7% au rotor et 3% dans les autres régions de la machine (voir figure 2.2). [6].

A partir de ces études et la répartition de défauts qu'on a vu dans les figures précédent **figure 2.1** et **figure 2.2** on confirme que les défauts de la machine proviennent de roulements et du bobinage statorique

D'autre part la deuxième étude nous montre que la réparation de ces défauts a changé les défauts des roulements sont passés de 41% à 69% et les défauts au stator sont passés de 37% à 2%, et celles du rotor de 10% à 7%.

Les causes qui provoquent les défauts statoriques et rotoriques sont nombreux.

II.3 Défauts statoriques

L'Armature statorique, c'est le siège du champ magnétique, munie de son bobinage est une partie de la machine qui subit plusieurs contraintes et des défauts à cause de fragilité et la complexité de certaines parties tels que les isolants. Principalement les défauts statoriques sont dus à un problème soit thermique, électrique, mécanique et Environnemental.

Les défauts les plus fréquents, localisés au niveau du stator, peuvent être définis comme suit, défauts d'isolant, court-circuit entre spires, court-circuit entre phase, déséquilibré d'alimentation défaut de circuit magnétique.

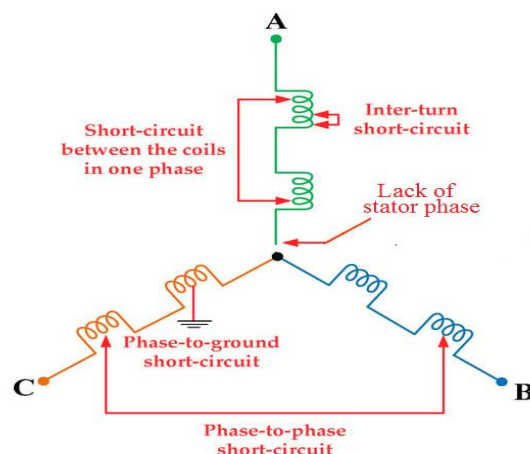


Figure 2.3 : Représentation des différents défauts statoriques concerne le court-circuit

II.3.1 Défauts d'isolant dans un enroulement

La dégradation des isolants dans les enroulements statoriques peut provoquer des courts-circuits. En effet, les différentes pertes (Joule, fer, mécanique) engendrent des phénomènes thermiques se traduisent par une augmentation de la température des différents constituants du moteur. Sachant-que les matériaux d'isolant ont limite de température, tension. De ce fait si l'isolant dépasse ce limite ce matériau dégrade de manière prématurée. Ce qui traduise par un court-circuit dans l'enroulement concerné.

II.3.2 Court-circuit entre spires

Le court-circuit de la même phase est un défaut fréquent qui peut apparaître soit au niveau des têtes des bobinages soit dans les encoches. Ce qui entraîne une augmentation des courants statoriques dans les phases effectuées, une légère variation de l'amplitude sur les autres phases, modifié le facteur de puissance et amplifie les courants dans les circuits rotorique dans le cas de la machine asynchrone.

Par contre, le couple électromagnétique moyen délivré par la machine subit des oscillations liées au déséquilibres des courants de phase engendré par le défaut [5][6].

II.3.3 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 [7].

II.3.4 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 [7].

II.4. Défauts rotoriques

Le rotor subit des défauts soit un court-circuit d'anneau ou une rupture de barres en cas du rotor à cage, dans le cas du rotor bobiné peut être affecté par les mêmes défauts que le stator.

II.4.1. Défauts de rupture de barres et d'anneau de court-circuit

Les ruptures des 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, etc.), cela fait apparaître des oscillations sur les courants et le couple électromagnétique d'autant plus apparentes que l'inertie est très grande (vitesse constante). Si l'inertie de l'entraînement est plus faible, des oscillations apparaissent sur la vitesse mécanique et sur l'amplitude des courants statoriques [2].

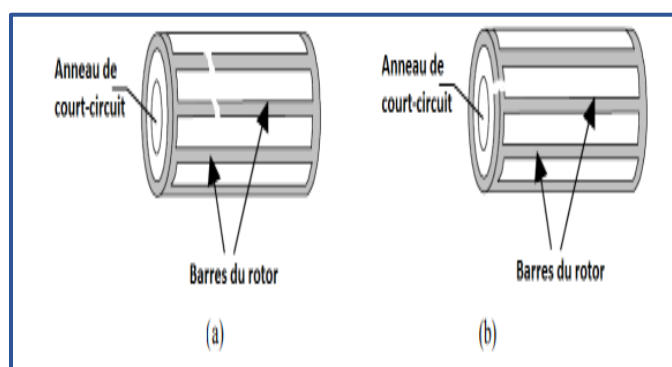


Figure 2.4 : Défaut d'un rotor à cage d'écureuil :
(a) rupture de barres ; (b) rupture d'anneau de court-circuit. [6]

La cause de portion d'anneau est un défaut qui apparaît aussi fréquemment que la cassure de barres. En fait cassures sont dues soit à des bulles de coulées ou aux dilatations différentielles entre les barres et les anneaux de court-circuit véhiculent des courants plus importants que les barres rotoriques. 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.

L'apparition d'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.

II.4.2 Défauts de roulements

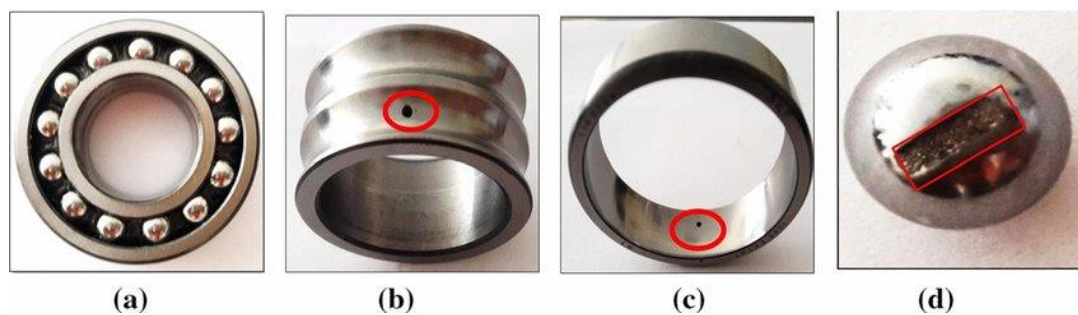


Figure 2.5: État des roulements (a) sain, (b) bague intérieure défectueuse, (c) bague extérieure défectueuse, (d) bille défectueuse

Selon l'étude statistique indiquée sur la figure 2.2, on constate que la majorité des défauts dans les machines électriques concernent les défauts de roulements qui ont de nombreuses causes, peuvent être à cause de l'écaillage de fatigue, la contamination du lubrifiant, une charge excessive ou des causes électrique comme la circulation de courants ou des fuite induits par les onduleurs.

Les défauts des enroulements peuvent provoquer des défauts mécaniques qui agissent négativement sur la machine tels que l'apparition de vibration par les déplacements du rotor autour de l'axe longitudinal de la machine ils peuvent induire également des oscillations dans le couple de charge.

II.4.3 Excentricité

La machine électrique subit parfois un décentrement du rotor par rapport au stator, ce phénomène est appelé excentricité dont l'origine peut être liée à un positionnement incorrect des paliers lors de l'assemblage ou un défaut de roulement ou défaut de charge.

On peut distinguer généralement trois types d'excentricité :

- L'excentricité statique : due à un désalignement de l'axe de rotation du rotor par rapport à l'axe du stator, la cause principale c'est un défaut de centrage des flasques.
- L'excentricité dynamique : le rotor est positionné au centre de l'alésage mais ne tourne plus autour de son axe, la cause principale de ce type est la déformation du cylindre rotorique ou la détérioration des roulements à billes.
- L'excentricité mixte : associant les deux types précédents.

II.5 Méthodes de diagnostic des machines électriques

Les machines asynchrones jouent de nos jours un rôle très important dans toutes les applications industrielles donc il est nécessaire de développer des systèmes permettant d'assurer la sûreté de fonctionnement et de diagnostiquer l'état de santé de cette machine. Il existe des méthodes de diagnostic appliqués aux machines électriques, on peut les classer en des catégories, celles qui utilisent un modèle analytique du système et celles qui dispensent de ce modèle.

II.5.1 Méthodes de diagnostic avec modèle analytique

Ces méthodes de détection reposent sur la connaissance des modèles et des paramètres représentant le processus physique à étudier la comparaison des signaux expérimentaux Représentent le fonctionnement du système et des signaux générés par les modèles (ou des paramètres estimés) permet la détection ainsi que l'identification de la défaillance susceptible de se produire ces techniques supposent la connaissance de la plage de variation de ces modèles et de ces paramètres selon les conditions de fonctionnement du système. Ces techniques peuvent être classées en trois catégories.

II.5.1.1 Techniques d'estimation d'état

Les modèles analytiques font intervenir un nombre fini de variables internes, appelés aussi variables d'état. Ces variables sont généralement non mesurables (pour des raisons d'inaccessibilité), elles peuvent être dépourvues de sens physiques ou le coût d'installation de capteurs est trop élevé l'évolution temporelle du système est caractérisée par l'évolution de ces variables, on a souvent recours à des techniques d'estimation (capteurs logiciel) pour suivre l'évolution de leurs valeurs.

Le schéma de principe de l'estimation d'état à partir des grandeurs mesurées (les signaux d'entrée et les signaux de sortie du système). [2]

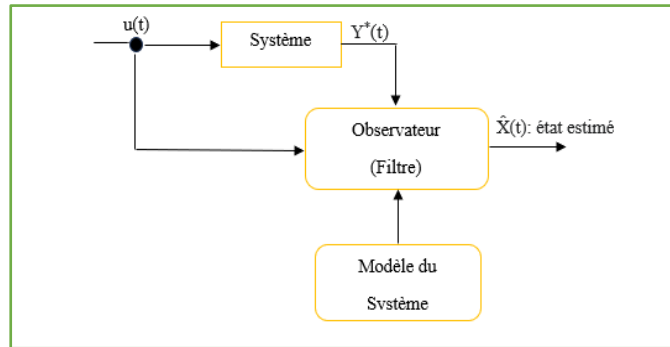


Figure 2.6: Principe de l'estimation d'état

II.5.1.2 Technique de génération de résidus

Les résidus sont des signaux qui reflètent l'écart entre un modèle et le système à surveiller, (figure 2.5) dépendent de la technique avec laquelle ils ont été générés. Ces techniques d'extraction des résidus visent à fournir des signaux significatifs et exploitables pour détecter la présence d'une défaillance spécifique, plusieurs études ont montré que ces techniques de générations de résidus sont mieux adaptées à la détection de défauts d'actionneurs et surtout de capteurs. [2]

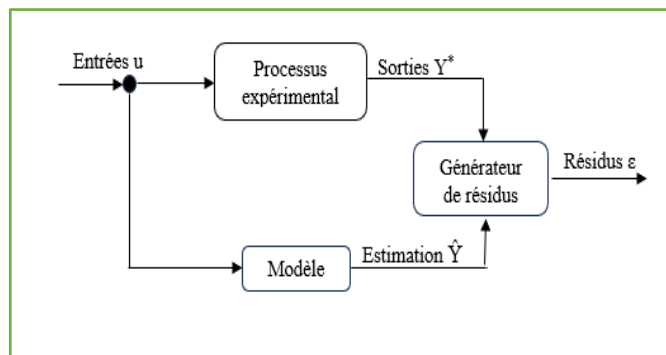


Figure 2.7: Génération des résidus

II.5.1.3 Technique d'identification

La technique d'identification a pour objectif de déterminer un modèle dynamique du système à surveiller à partir de mesures expérimentales d'entrée et de sortie. L'idée fondamentale est que les paramètres caractérisant ce modèle identifié vont être sensibles aux défauts affectant la machine, et vont donc permettre par leurs variations de caractériser ces défauts, l'estimation des paramètres du modèle est assurée par un algorithme de minimisation de l'erreur entre la sortie du modèle et celle de la machine, la figure 2.7 traduit cette procédure. [2]

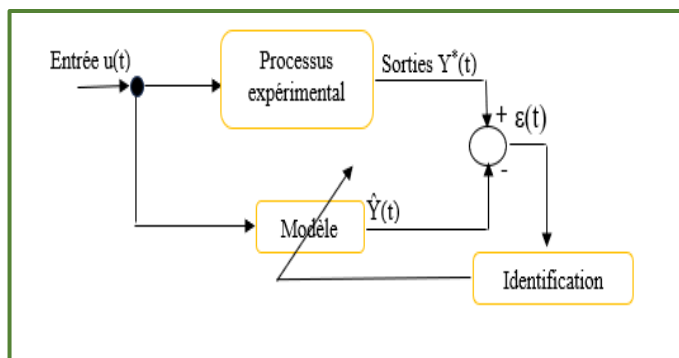


Figure 2.8: Principe des techniques d'identification

II.5.2 Méthode de diagnostic sans modèle analytique

Ces méthodes ne nécessitent pas forcément de modèle précis du système mais reposent sur une reconnaissance de signatures les signatures de défauts, obtenues par modélisation ou pour mesure sur maquette sont généralement classés dans une base de données. L'analyse est réalisée par une interprétation du type signal au par système expert. Les défauts étudiés par ces méthodes de diagnostic sont :

- La ruptures de barres ou de portions d'anneaux au rotor ;
- L'excentricité statique et dynamique;
- La défaillance des paliers;
- Le court-circuit entre spires au stator.

II.5.2.1 Méthode par traitement de signal

Pour des raisons de simplicité et d'efficacité l'approche signal est très utilisée actuellement en diagnostic. Cette approche repose sur la connaissance du comportement du système sain elle est ensuite comparée avec les signaux mesurés.

Les méthodes courantes d'analyse des signaux de diagnostic en régime transitoire et en régime permanent sont :

- L'analyse spectrale,
- Le spectrogramme,
- L'analyse temporelle et la distribution de Wigner- Ville,

➤ **L'analyse spectrale:**

Les approches basées sur l'analyse de la signature spectrale sont les plus couramment rencontrées pour détecter la présence d'une anomalie, le principal défaut de l'analyse spectrale est qu'elle est très sensible à la qualité de mesure, ainsi qu'à la fréquence d'échantillonnage et au nombre d'échantillons. Les procédures de surveillance de fonctionnement sont généralement orientées vers défaillances intervenant sur l'une des trois parties de la machine : le stator, le rotor ou les paliers.

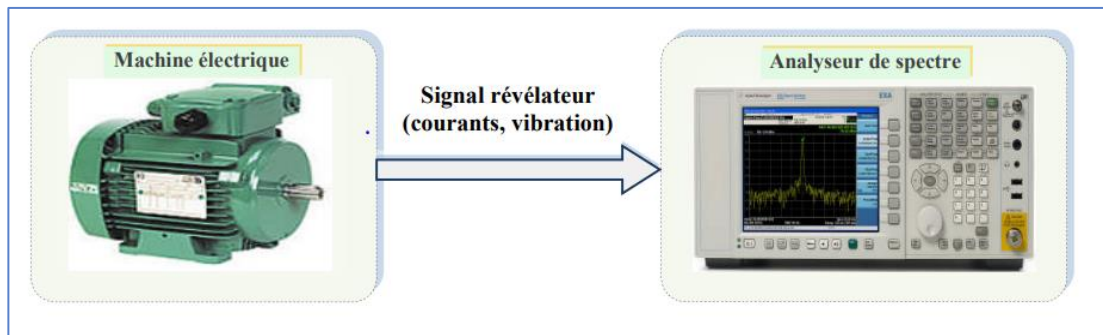


Figure 2.9: Schéma de principe de la surveillance par analyse spectrale

➤ **La technique de spectrogramme**

Cette technique permet d'effectuer des analyses fréquentielles des signaux en régime dynamique de fonctionnement du système. Cette technique consiste à effectuer un calcul répétitif de la FFT sur une fenêtre temporelle glissante, ce qui rend cette technique sensible à la longueur de la fenêtre, au type de fenêtrage, à la durée totale de supervision et au pas de glissement de la fenêtre,

Bien que cette technique permette d'analyser des signaux en régime dynamique, la rapidité du régime dynamique des machines asynchrones de l'ordre de 150ms réduit significativement la précision de cette technique

II.5.2.2 Méthode par intelligence artificielle (IA)

L'intelligence artificielle est de plus en plus utilisée dans le domaine de la supervision et du diagnostic, elle a permis d'augmenter l'efficacité et la fiabilité du diagnostic. Dans le domaine de la supervision des machines électriques, les industriels et les chercheurs ont de plus en plus recours à ce genre de technique pour augmenter l'efficacité du système.

Le terme « intelligence artificielle » comprend diverses techniques telles que :

- Les systèmes experts
- Les réseaux de neurones
- La logique floue

Qui peuvent être utilisés de manière indépendante ou combinés pour améliorer leur efficacité.

Ces techniques d'intelligence artificielle cherchent à imiter et à acquérir le raisonnement humain de manières différentes, les réseaux de neurones artificiels imitent la structure neuronale d'un cerveau humain ; Ils sont formés par un réseau complexe de blocs arithmétique simples. Ils peuvent facilement représenter les systèmes non linéaires multi-entrées/multi-sorties.

Cette technique a largement été utilisée dans le domaine du diagnostic des machines électriques selon plusieurs démarches et techniques :

- Apprentissage à partir de signaux temporels ou fréquentiels issus de simulation ou d'expérimentation ;
- Diagnostic en temps réel et autonome ;
- Mise à jour dynamique de la structure du réseau ;
- Filtrage des transitoires, des perturbations et du bruit ;
- Détection des défauts de leurs naissance ;

II.6 Conclusion

Nous avons commencé ce chapitre par un rappel sur les défauts susceptible d'affecter les différentes parties des machines électriques, Nous avons présenté aussi un tableau qui engendre les défauts mécaniques et électriques de la machine.

Nous avons présenté par la suite les différentes Méthodes de diagnostics utilisées pour la détection de ces défauts.

CHAITRE III

SIMULATION DE LA MACHINE ASYNCHRONE À CAGE D'ÉCUREUIL

III.1 Introduction

La modélisation des machines électriques est une étape importante pour le diagnostic des défauts. Grâce à progrès de l'informatique et les logiciels ont permis de réaliser des modélisations, cette modélisation permet de guider les développements pour la qualification des phénomènes et recouvre un certain nombre de problèmes des machines dans ce chapitre Nous présentons une modélisation de la machine asynchrone triphasée. Nous utilisons un modèle mathématique en exprimant les équations électriques et magnétiques et mécaniques, ensuite, nous développons un modèle de défaut statorique traduisant le dysfonctionnement de la machine en présence d'un défaut statorique de court-circuit entre spires.

III.2 Modélisation de la machine asynchrone

La modélisation de la MAS sous quelques hypothèses permet de simplifier le modèle et ainsi l'analyse et le diagnostic lors de son fonctionnement.

III.2.1 Hypothèses simplificatrices

Afin de modéliser la machine asynchrone, un certain nombre d'hypothèses doit être pris en considération en vue de simplifier la modélisation :

- La saturation dans le circuit magnétique est négligée, ce qui explique la linéarité des flux en fonction des courants.
- Le circuit magnétique est parfaitement feuilleté afin de négliger les courants des Foucault.
- Les pertes par hystérésis et l'effet de peau sont négligées
- L'épaisseur de l'entrefer est considérée constante sur toute la périphérie de la machine. En négligeant en plus l'effet des encoches.
- La force magnétomotrice est sinusoïdale.
- La machine est considérée comme un système symétrique et équilibré.

III.2.2 Schéma d'un moteur asynchrone - triphasé

La machine asynchrone à cage d'écureuil est constituée de trois enroulement logés symétriquement dans les encoches du stator et d'une cage d'écureuil conductrice au rotor. On modélise la machine asynchrone à cage dans un repère a, b, c (modèle triphasé-triphasé) ou dans un repère orthonormé dqo (modèle diphasé). La figure 3.1 montre la représentation spatiale d'une machine asynchrone à cage comprenant un enroulement triphasé au stator (a_s, b_s, c_s) comme au rotor (a_r, b_r, c_r). Dans le modèle biphasé, les grandeurs statoriques (rotoriques) liées au repère a_s, b_s, c_s (a_r, b_r, c_r), décalées de 120° , sont ramenées vers les grandeurs biphasées équivalentes S_d, S_q (r_d, r_q) en quadrature de phase. [8]

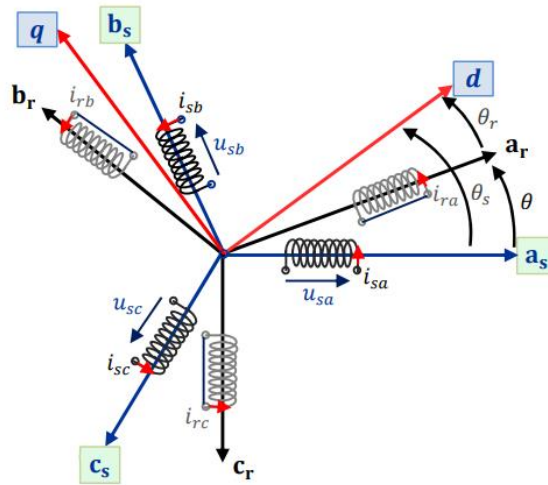


Figure 3.1 : Représentation d'une machine asynchrone triphasée au stator et au rotor

III.2.3 Mise en équations du modèle de la machine asynchrone

La machine asynchrone est constituée par deux circuits couplés magnétiquement. Pour représenter le modèle d'une machine dans un repère triphasé, il faut écrire les équations différentielles liant les tensions, les courants et les flux pour chaque enroulement du stator et du rotor.

III.2.3.1 Equations électriques :

$$\begin{cases} u_s = [R_s] \cdot i_s + \frac{d}{dt} \phi_s \\ 0 = [R_r] \cdot i_r + \frac{d}{dt} \phi_r \end{cases} \quad (\text{III.1})$$

avec

$$\begin{aligned} u_s &= \begin{bmatrix} u_{sa} \\ u_{sb} \\ u_{sc} \end{bmatrix}; i_s = \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix}; \phi_s = \begin{bmatrix} \phi_{sa} \\ \phi_{sb} \\ \phi_{sc} \end{bmatrix}; [R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix}; \\ u_r &= \begin{bmatrix} u_{ra} \\ u_{rb} \\ u_{rc} \end{bmatrix}; i_r = \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix}; \phi_r = \begin{bmatrix} \phi_{ra} \\ \phi_{rb} \\ \phi_{rc} \end{bmatrix}; [R_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}; \end{aligned}$$

u_s, u_r : vecteurs des tensions statoriques et rotoriques,

i_s, i_r : vecteurs des courants statoriques et rotoriques,

ϕ_s, ϕ_r : vecteurs des flux statoriques et rotoriques,

$[R_s], [R_r]$: matrices des résistances statoriques et rotoriques.

III.2.3.2 Equations magnétiques

$$\begin{cases} [\Phi_{sabc}] = [L_s][i_{sabc}] + [L_{sr}][i_{rabc}] \\ [\Phi_{rabc}] = [L_{sr}][i_{sabc}] + [L_r][i_{rabc}] \end{cases} \quad (\text{III.2})$$

$$[L_s] = \begin{bmatrix} L_s & M_s & M_s \\ M_s & L_s & M_s \\ M_s & M_s & L_s \end{bmatrix} \quad \text{Et} \quad [L_r] = \begin{bmatrix} L_r & M_r & M_r \\ M_r & L_r & M_r \\ M_r & M_r & L_r \end{bmatrix}$$

Matrice inductance propre statorique

Matrice inductance propre rotoriques

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

$$[L_{sr}] = [L_{rs}]^t$$

θ_m : Angle entre la phase « a_s » du stator et la phase « a_r » du rotor avec $\omega = d\theta_m/dt$

L_s, L_r : Inductance propre respective d'une phase statorique et rotoriques.

M_s, M_r : Inductance mutuelle respective entre deux phases statoriques et rotoriques.

L_{sr} : Inductance mutuelle maximale entre une phase du stator et une phase du rotor.

Sous une forme développée, les expressions deviennent :

$$\begin{cases} [V_{abc}] = [R_s][i_{sabc}] + [L_s] \frac{d}{dt} [i_{sabc}] + \frac{d}{dt} \{ [L_{sr}][i_{rabc}] \} \\ 0 = [R_r][i_{rabc}] + [L_r] \frac{d}{dt} [i_{rabc}] + \frac{d}{dt} \{ [L_{rs}][i_{sabc}] \} \end{cases} \quad (\text{III.3})$$

D'après ses équations, il apparaît clairement que le système est à coefficients variables dépendant de θ_m ; ce qui rend la résolution plus difficile.

III.2.3.3 Equations mécaniques

L'équation du couple s'exprime comme :

$$C_{em} = \frac{1}{2} [i]^t \left\{ \frac{d}{dt} [L][i] \right\} \quad (\text{III.4})$$

Avec :

$$[i]^t = [i_{sa}, i_{sb}, i_{sc}, i_{ra}, i_{rb}, i_{rc}]^t \quad \text{et} \quad [L] = \begin{bmatrix} L_s & L_{sr} \\ L_{sr} & L_r \end{bmatrix}$$

Sachant que les matrices L_s et L_r contiennent des termes constants, alors l'expression du couple électromagnétique sera :

$$C_{em} = \frac{1}{2} [i_{abc}]^t \left\{ \frac{d}{d\theta_m} [L_{sr}][i_{ABC}] \right\}$$

On aboutit ainsi à un système de six équations différentielles et une expression du couple dont certains coefficients font intervenir des fonctions sinusoïdales dues au mouvement de rotation du rotor, ce qui a pour conséquence une certaine complexité dans la résolution analytique. Afin de surmonter cette difficulté, nous adoptons la transformation triphasée–biphasée dite de « Park ».

III.3 Transformation de Park

La transformation de Park est constituée d'une transformation triphasé-diphasé suivie d'une rotation. Elle permet de passer du repère « abc » vers le repère « $\alpha\beta$ », puis le repère « dq ».

Le repère « $\alpha\beta$ » est toujours fixe par rapport au repère « abc », par contre le repère « dq » est mobile. Il forme avec le repère « $\alpha\beta$ » un angle qui est appelé l'angle de transformation de Park ou angle de Park. Ces transformations utilisées doivent conserver non seulement la puissance instantanée, mais aussi, la réciprocité des inductances mutuelles, ce qui permet d'établir une expression du couple électromagnétique dans le repère correspondant au système transformé qui reste variable pour la machine réelle [9].

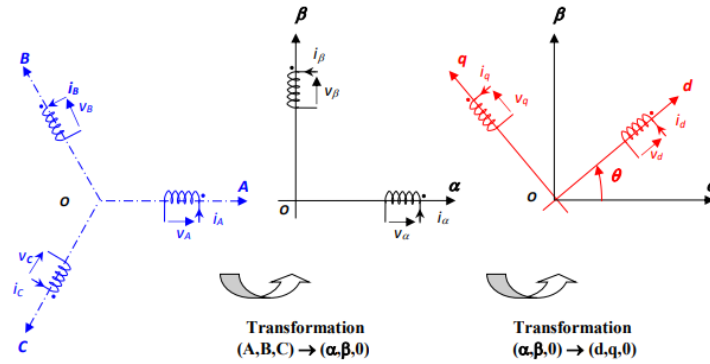


Figure 3.2: Représentation spatiale de la transformation triphasé/biphase

D'après cette figure (3.2) on peut définir une matrice $[P(\theta)]$, permettant d'assurer le passage des Composantes $xABC$ du système triphasé aux composantes $xdqo$ du système biphase tournant à la même vitesse.

$$[P](\theta) = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{III.5})$$

θ : étant l'angle entre l'axe « αs » du stator et l'axe « ds » du référentiel de Park.

La matrice de changement de base $[P(\theta)]$ étant orthonormée, aussi le calcul de sa matrice inverse est très simple définie par :

$$[P(\theta)]^{-1} = [P(\theta)]^t$$

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

III.3.1 Application aux équations de la machine

La représentation de la machine asynchrone à cage dans le plan de Park est illustrée par la figure 3.3.

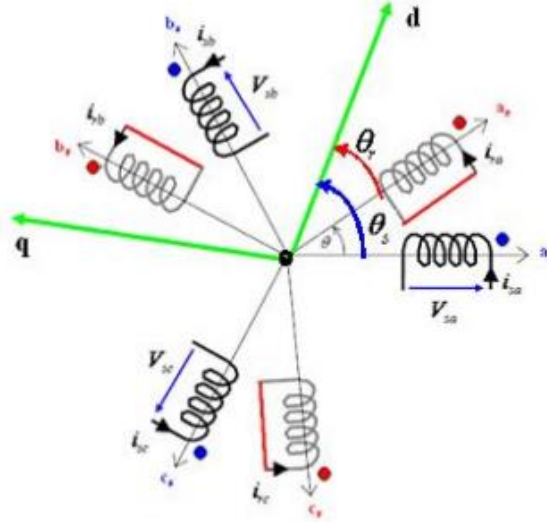


Figure 3.3 : Représentation du modèle de Park

III.3.2 Equations des tensions

Dans le repère biphasé de Park d'axe « dq » tournant à la vitesse de rotation du référentiel, les équations électriques de tensions s'écrivent :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d}{dt} \Phi_{ds} - \omega_s \Phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d}{dt} \Phi_{qs} + \omega_s \Phi_{ds} \end{cases} \quad (\text{III.6})$$

$$\begin{cases} 0 = R_r i_{dr} + \frac{d}{dt} \Phi_{dr} - (\omega_s - \omega_r) \Phi_{qr} \\ 0 = R_r i_{qr} + \frac{d}{dt} \Phi_{qr} + (\omega_s - \omega_r) \Phi_{dr} \end{cases} \quad (\text{III.7})$$

III.3.3 Equations des flux

Dans ce même repère les équations de flux s'écrivent :

$$\begin{cases} \Phi_{ds} = L_s i_{ds} + L_{sr} \Phi_{qr} \\ \Phi_{qs} = L_s i_{qs} + L_{sr} \Phi_{dr} \end{cases} \quad (\text{III.8})$$

$$\begin{cases} \Phi_{dr} = L_r i_{dr} + L_{sr} \Phi_{qs} \\ \Phi_{qr} = L_r i_{qr} + L_{sr} \Phi_{ds} \end{cases} \quad (\text{III.9})$$

avec :

$\omega_s = d\theta_s/dt$ La vitesse de rotation du référentiel.

$\omega_r = p\Omega = p d\theta_r/dt$ La vitesse électrique de rotation du rotor.

L_s, L_r : Inductances propres cycliques du stator et du rotor respectivement:

$$L_s = L_{as} - M_{as} \text{ et } L_r = L_{ar} - M_{ar}$$

L_m : Inductance mutuelle cyclique entre stator et rotor ($L_{sr} = 3/2 M_{sr}$).

M_{sr} : Inductance mutuelle entre une phase statorique et une phase rotorique.

III.3.4 Equations mécaniques

D'une manière générale, l'expression du couple, pour une machine à « P » paires de pôles, est donnée par :

$$C_{em} = \frac{PL_{sr}}{L_r} (i_{qs} \Phi_{dr} + \Phi_{qr} i_{ds}) \quad (\text{III.10})$$

III.4 Représentation d'état du modèle de la machine asynchrone

En considérant d'une part, les tensions statoriques (V_{ds}, V_{qs}), et la pulsation ω_s comme variables de commande et d'autre part, les courants statorique (i_{ds}, i_{qs}), les flux rotoriques (Φ_{qr}, Φ_{dr}) et la vitesse mécanique Ω_r comme variables d'état, la représentation d'état du modèle mathématique de la machine asynchrone dans le repère lié au champ tournant est donnée par la forme matricielle suivante [9] :

$$[x] = [A][X] + [B][U] \quad (\text{III.11})$$

$$[A] = \begin{bmatrix} \frac{-R_s}{\sigma L_s} & \omega_s & \frac{L_{sr}}{\sigma L_s L_r T_r} & \frac{L_{sr}}{\sigma L_s L_r} \cdot \omega_r \\ -\omega_s & \frac{-R_s}{\sigma L_s} & \frac{L_{sr}}{\sigma L_s L_r} \cdot \omega_r & \frac{L_{sr}}{\sigma L_s L_r T_r} \\ \frac{L_{sr}}{T_r} & 0 & -\frac{1}{T_r} & (\omega_s - \omega_r) \\ 0 & \frac{L_{sr}}{T_r} & (\omega_s - \omega_r) & -\frac{1}{T_r} \end{bmatrix} \text{ et } [B] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{III.12})$$

$[X]$: vecteur d'état, $X = [i_{ds} \quad i_{qs} \quad \Phi_{dr} \quad \Phi_{qr}]^t$

$[U]$: vecteur de commande, $U = [V_{ds} V_{qs} \quad 0 \quad 0]^t \quad T_r = \frac{L_r}{R_r} \quad \text{et} \quad \sigma = 1 - \frac{L_{sr}^2}{L_s L_r}$

III.5 Modélisation de la machine asynchrone « en présence de défaut »

Le type de court-circuit statorique qu'on va traiter Dans notre travail concerne le court cuit entre spires de même phase on suppose qu'on nombre de spires pour celles de phase (a) est court-cuité, la section court-circuitée est définie par le rapport « c » ce rapport on introduit dans le modèle mathématique de la machine ce qui change la forme de équations des tensions statoriques :

$$[V_{abc}] = [R_s][i_{abc}] + \frac{d}{dt} [\Phi_{abc}] \quad (\text{III.13})$$

$$[V_s] = [V_{sa} \quad V_{sb} \quad V_{sc} \quad V_d]^t, \quad [i_s] = [i_{sa} \quad i_{sb} \quad i_{sc} \quad i_d]^t,$$

$$[\Phi_{abc}] = [\Phi_{sa} \quad \Phi_{sb} \quad \Phi_{sc} \quad \Phi_{sd}]^t$$

$$[R_s] = \begin{bmatrix} (1-cc)R_s & 0 & 0 & cc \cdot R_s \\ 0 & R_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & 0 & cc \cdot R_s \end{bmatrix} \quad (\text{III.14})$$

Les équations des tension rotoriques nous gardons inchangée en supposent les phases « b » et « c » sain Donc la nouvelle matrice des inductances statoriques devient comme suit :

$$[L_{ss}] = L_{fs} \text{diag} [(1-cc)11cc] + M_s \begin{bmatrix} (1-cc) & -\frac{1-cc}{2} & -\frac{1-cc}{2} & cc(1-cc) \\ -\frac{1-cc}{2} & 1 & -\frac{1-cc}{2} & -\frac{1-cc}{2} \\ -\frac{1-cc}{2} & -\frac{1}{2} & 1 & -\frac{1-cc}{2} \\ 0 & -\frac{cc}{2} & -\frac{cc}{2} & cc \end{bmatrix} \quad (\text{III.15})$$

Par conséquent, la matrice des inductances mutuelles devient :

$$[M_{sr}] = M \begin{bmatrix} (1-cc)\cos \theta_r & (1-cc)\cos \left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & (1-cc)\cos \left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos \left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos \theta_r & \cos \left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos \left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos \left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos \theta_r \\ ccc \cos \theta_r & ccc \cos \left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & ccc \cos \left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \quad (\text{III.16})$$

La matrice des inductances rotoriques demeure égale à celle du cas non défaillant :

$$[L_{rr}] = \begin{bmatrix} M_r + L_{fr} & -\frac{M_r}{2} & -\frac{M_r}{2} \\ -\frac{M_r}{2} & M_r + L_{fr} & -\frac{M_r}{2} \\ -\frac{M_r}{2} & -\frac{M_r}{2} & M_r + L_{fr} \end{bmatrix}$$

III.6. Modèle de simulation du moteur Sain

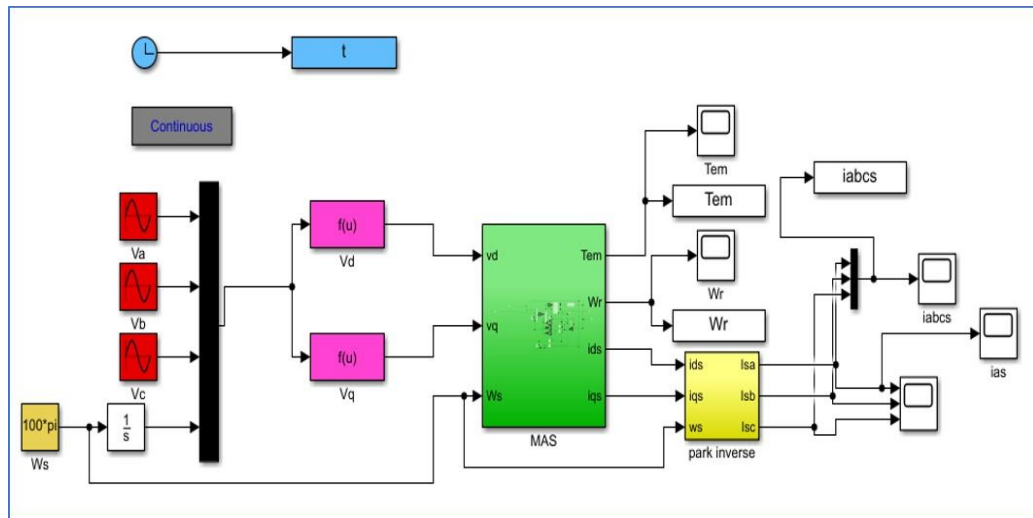


Figure 3.4: Bloc de simulation de la machine asynchrone triphasé

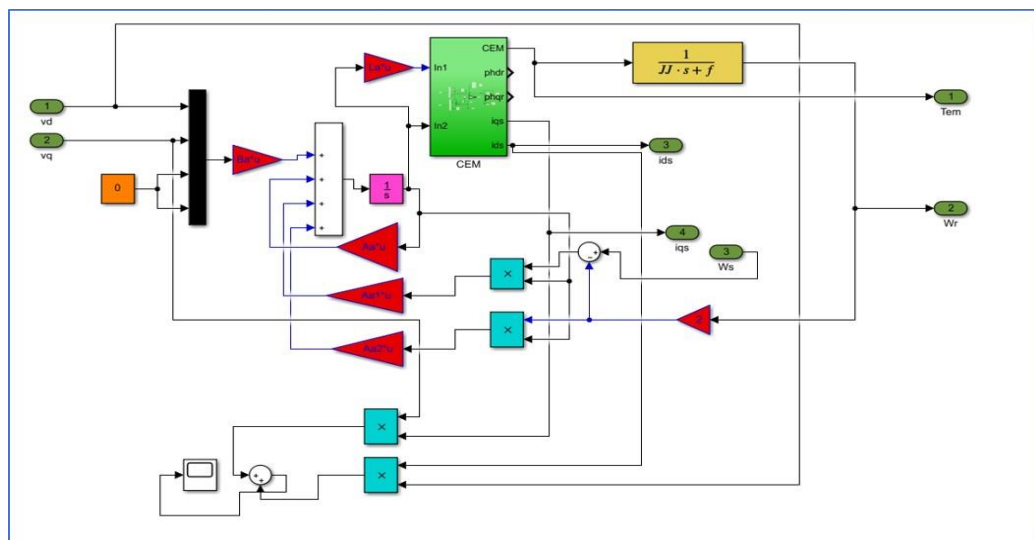


Figure 3.5: Bloc de référentiel d & q

III.6.1 Résultats de simulation en fonctionnement sain

Le modèle Sian de la machine asynchrone nous permette d'étudier le comportement des grandeurs temporelles tels que les courants, le couple et la Vitesse lorsque la machine ne présente aucun défaut.

La figure 3.6 montre que les courant statorique présente des oscillations importantes aux régime transitoire puis après ce régime il se stabilise à la régime permanent avec une Valeur égal à 2A.

La figure 3.7 montre que l'évolution du couple électromagnétique au régime transitoire le couple fortement pulsatoire, présente aux premiers instants de démarrage des battements importants, en régime stationnaire, le couple électromagnétique s'annule.

La figure 3.8 montre l'évolution de la vitesse de rotation du moteur, aux premiers instants du démarrage la vitesse augmente en atteignant 157rad/s puis il se stabilise à la régime permanent.

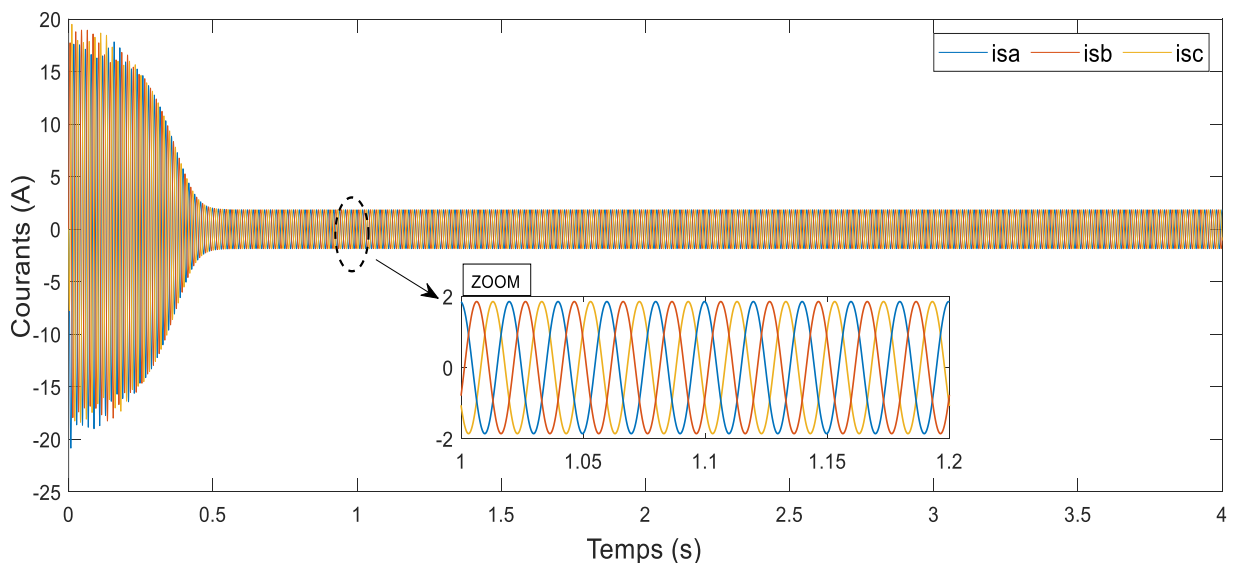


Figure 3.6: Evolution des courants des phases statoriques

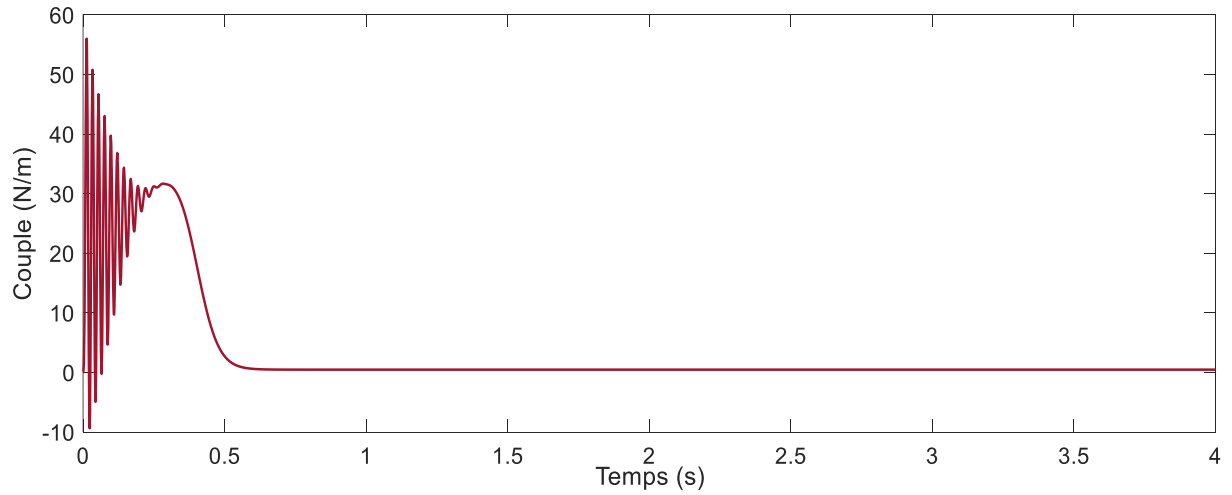


Figure 3.7: Evolution du couple électromagnétique

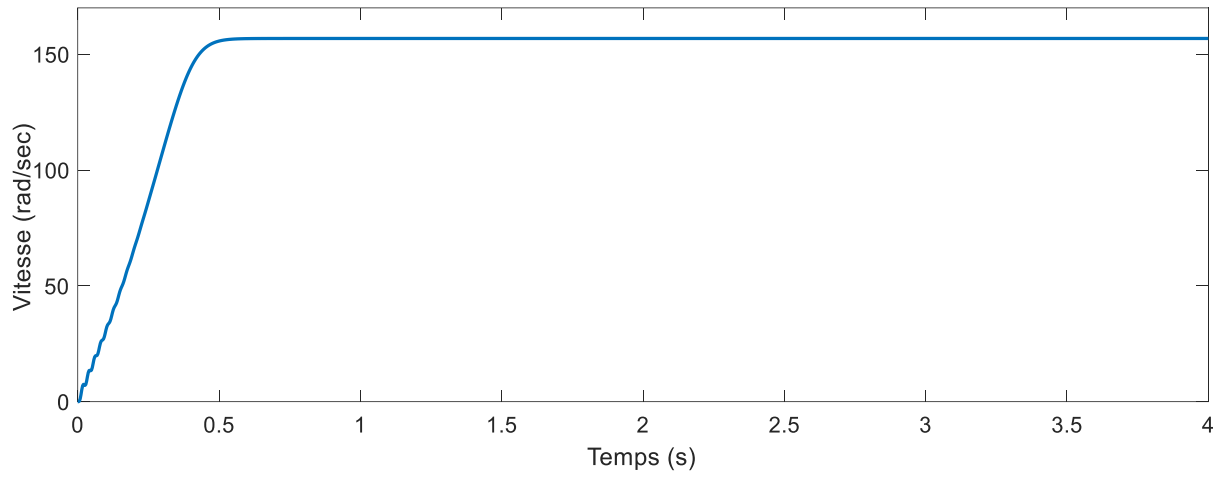


Figure 3.8: Evolution de la vitesse de rotation

III.7. Modèle de Simulation du moteur en défaut

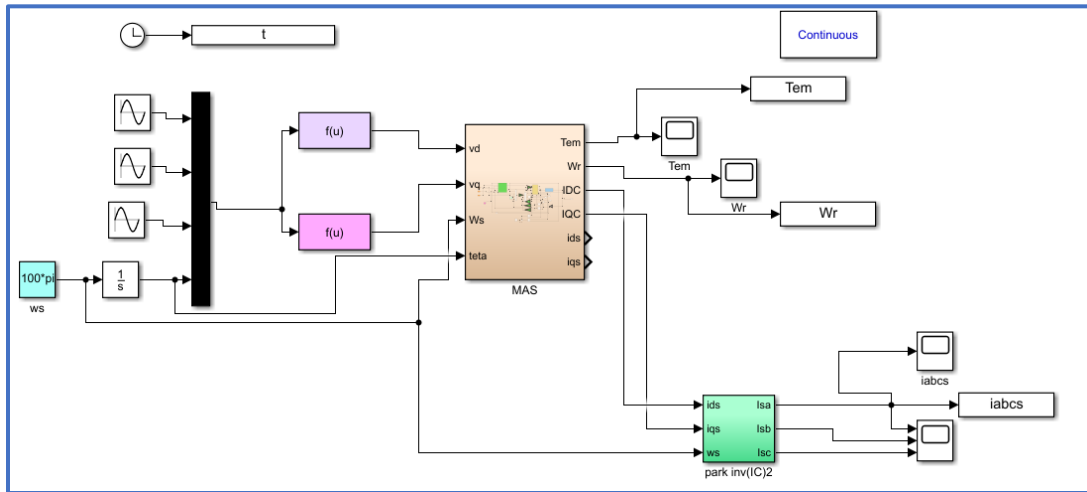


Figure 3.9: Modèle de la machine en défaut

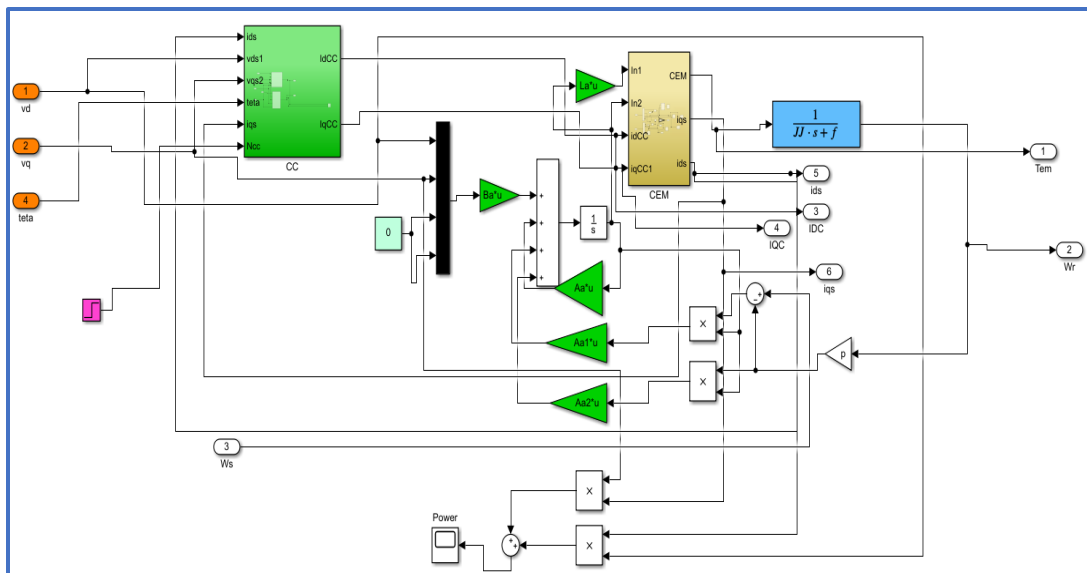


Figure 3.10: Modèle de simulation de défaut

III.7.1 Résultats de simulation du modèle en défaut

La figure 3.11 montre l'évolution du courant de la phase où se produit le défaut avec une pic importante et une augmentation moins importante pour les deux autres phases qui sont affectées aussi par le court-circuit.

La figure 3.12 représente l'évolution du couple électromagnétique qui montre que lors de l'application de court-circuit à 1s on 'observe des ondulations Au niveau du couple à cause de déséquilibre des courants causé par le défaut, des harmoniques d'amplitude plus élevée apparaissent dans la forme d'onde du couple.

Les résultats de simulation montrent que la vitesse de rotation est affectée aussi par le défaut de court-circuit comme montre la figure (3.13)

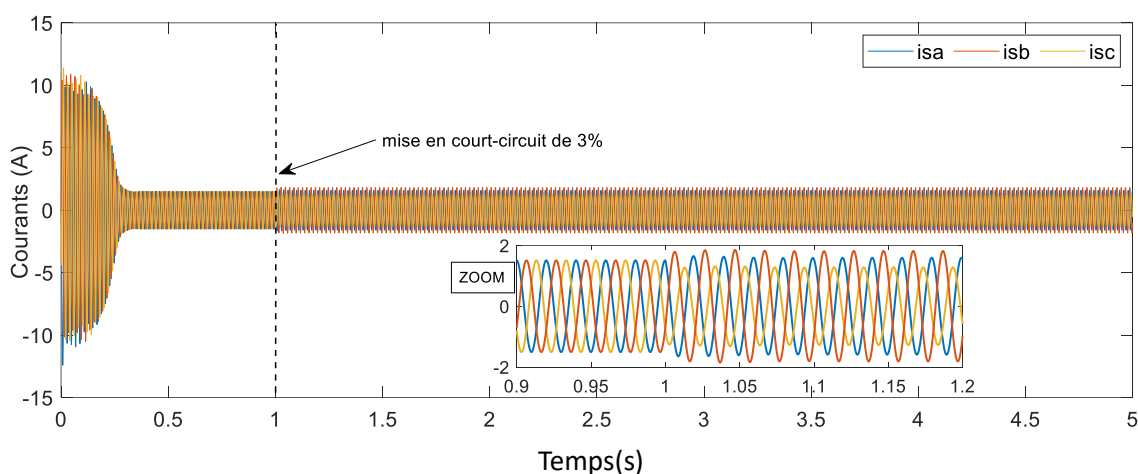


Figure 3.11: Courants statoriques lors de court-circuit

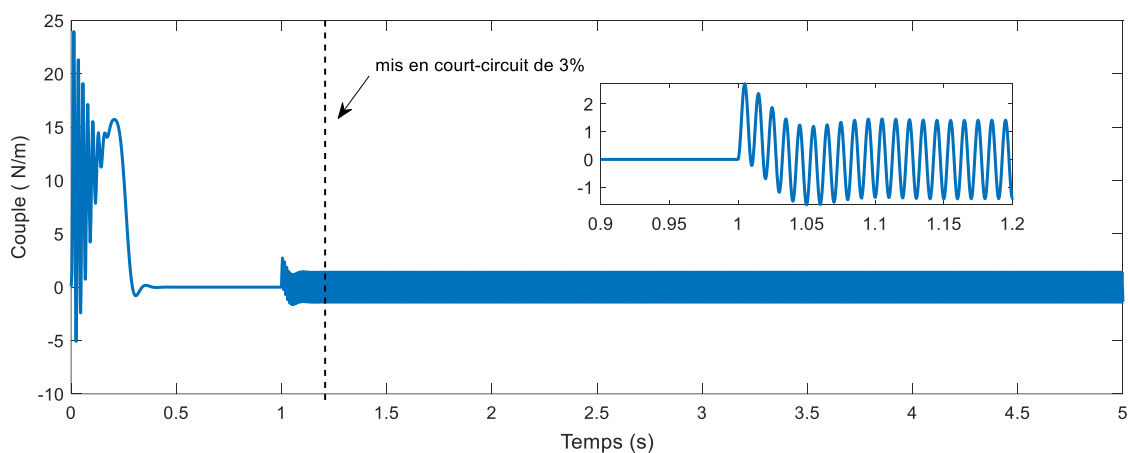


Figure 3.12 : Evolution du couple électromagnétique lors de court-circuit

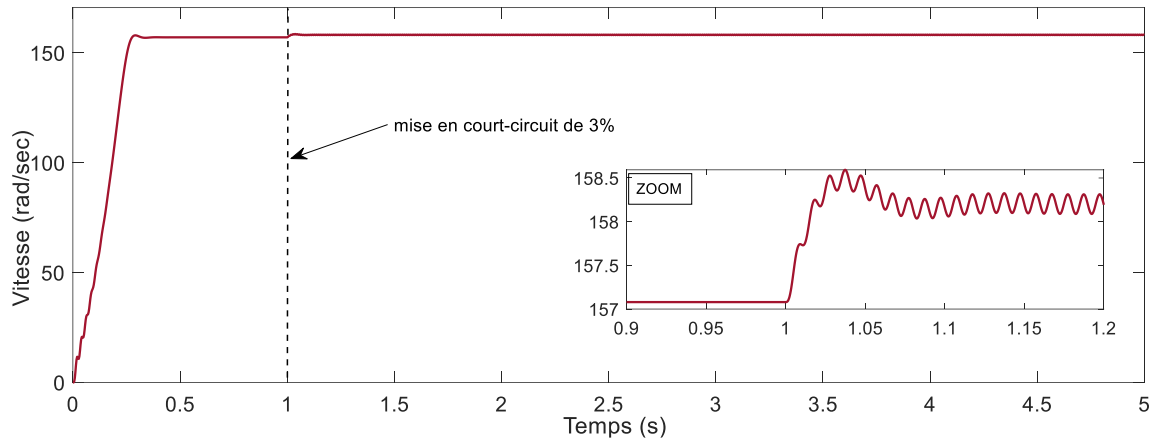


Figure 3.13: Vitesse de rotation lors de court-circuit

III.8 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté le modèle mathématique de la MAS avec simulation de défaut de court-circuit entre spires au niveau de la première phase du stator par avoir l'effet du courant circulant dans la phase défaillante d'enroulement.

Les résultats de simulation qu'on a vus, nous a permis de dire qu'il est important de détecter le défaut en temps pour limiter le risque et protéger le moteur. Plusieurs méthodes utiliser pour le diagnostic parmi ces méthodes l'analyse spectrale qui basé sur l'empreinte de grandeur électrique ce qui fera l'objet du quatrième chapitre.

CHAPITRE IV

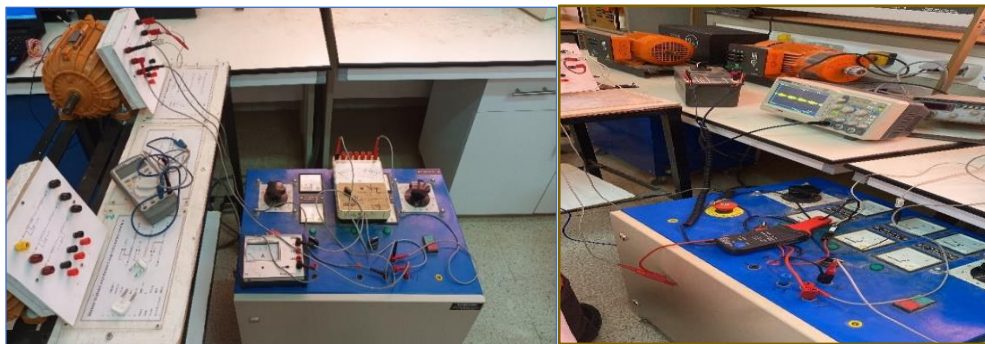
ESSAIS ET MESURES DES COURANTS STATIQUES POUR DIFFERENTS DÉFAUTS

IV.1 Introduction

Dans ce chapitre on va présenter les résultats expérimentaux des essais qu'on a relevée sur les deux moteurs grâce au banc d'essai présenté au chapitre I ce banc d'essai nous permettons de faire des essais expérimentaux, à partir de ces résultats expérimentaux effectués on va les comparée avec les résultats de simulation qu'on a simulé par **Matlab Simulink** (*Annexe 1*).

IV.2 Essai Expérimentaux

Dans ces essais on a deux moteurs l'un sain et l'autre avec défaut rotorique et statorique le défaut rotorique présente par un perçage d'une barre rotorique, le défaut statorique assure par une straps comme montre **la figure (4.1)**.



La figure (4.1) : Banc d'essai

IV.2.1 Essai pour moteur sain

Après l'alimentation, on relève le courant statorique de chaque phase à l'aide d'un capteur relié avec un oscilloscope numérique on a trouvé les résultats suivants :

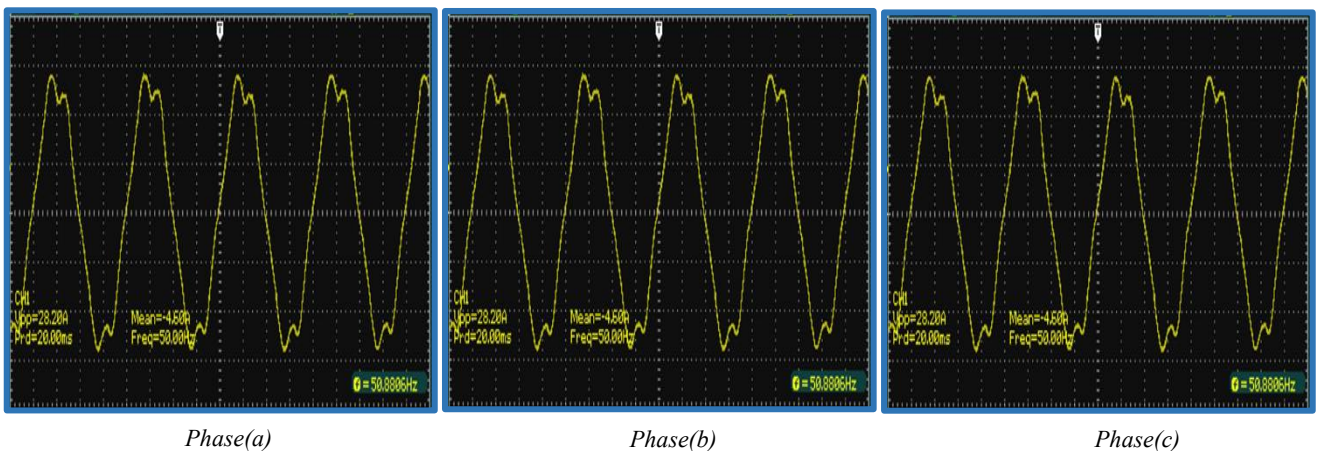


Figure 4.2: Formes d'onde des courants statoriques, moteur sain.

La figure (4.2) montre l'évolution des courants statoriques dans le cas où le moteur est sain, les courants sont équilibrés et de même amplitude.

IV.2.2 Essai du moteur en Défaut (statorique)

Dans cette partie d'essai du moteur à défaut statorique chaque enroulement possède un pourcentage de court-circuit phase(a)= 0.5% et phase(b)=1%, phase(c)= 3%

Voir la figure (4.3)

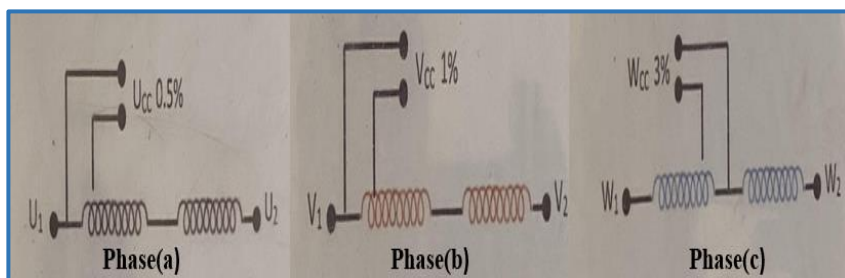
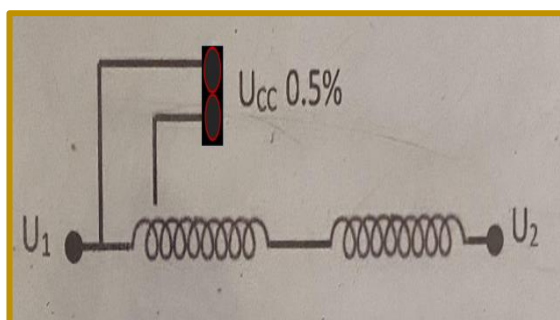


Figure 4.3: les pourcentages de court-circuit

IV.2.2.1 Court-circuit de la phase (a) avec un défaut de 0.5%

La forme d'onde du courant statorique de la phase(a) avec un court-circuit de 0.5% des spires.



Avec straps pour 0.5% de spires

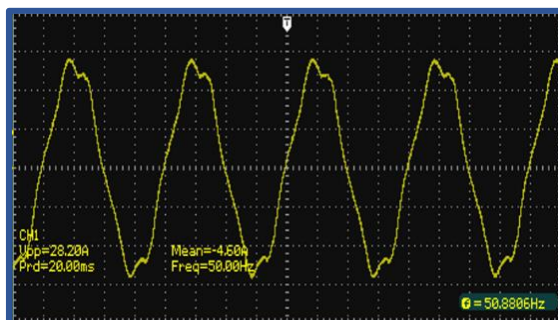
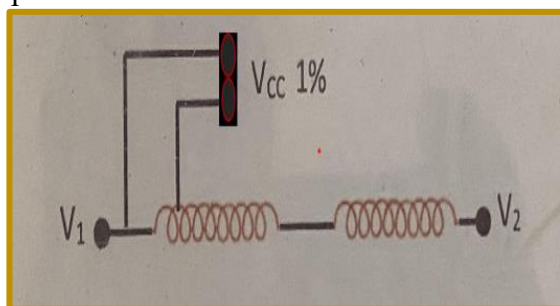


Figure 4.4: Courant statorique Phase(a) avec un défaut de 0.5%

IV.2.2.2 Court-circuit de la phase (b) avec un défaut de 1%

La forme d'onde du courant statorique de la phase(b) avec un court-circuit de 1% des spires.



Avec straps pour 1% de spires

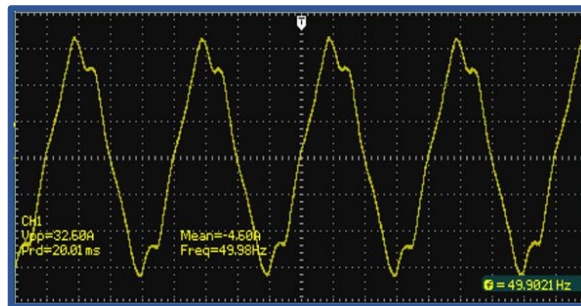
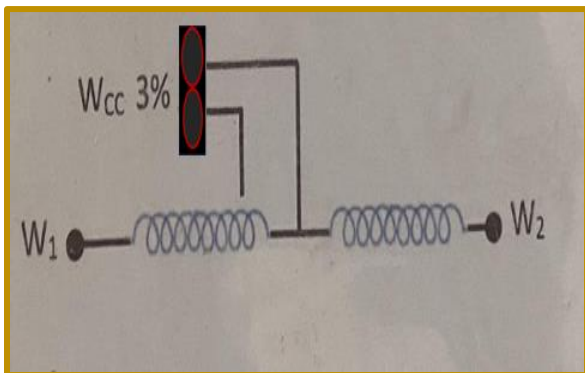


Figure 4.5: Courant statorique Phase(b) avec un défaut de 1%

IV.2.2.3 Court-circuit de la phase (c) avec un défaut de 3%

La forme d'onde du courant statorique de la phase(c) avec un court-circuit de 3% des spires.



Avec straps pour 3% de spires

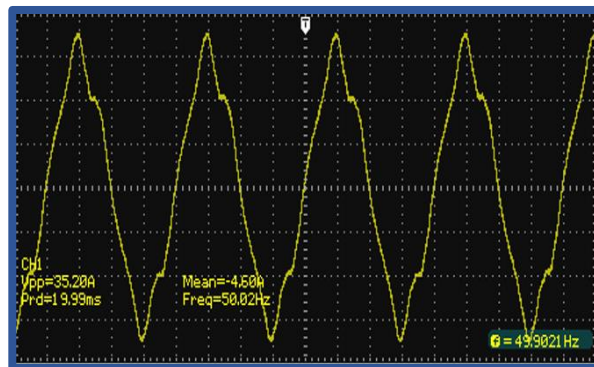
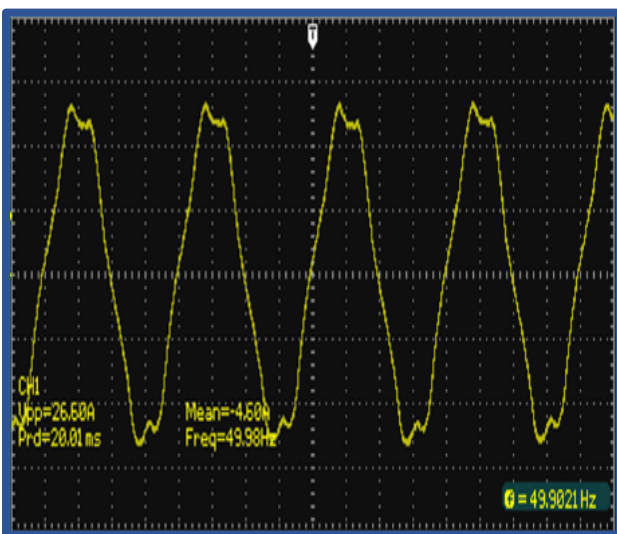


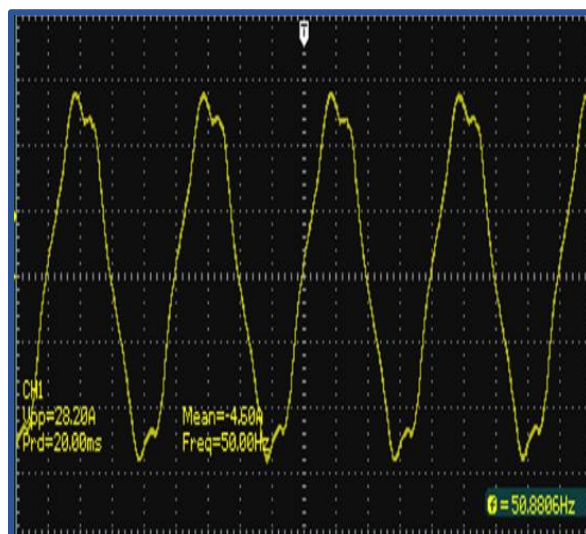
Figure 4.6: Courant statorique avec un défaut de 3%

IV.3 Etude de l'influence des spires en défaut

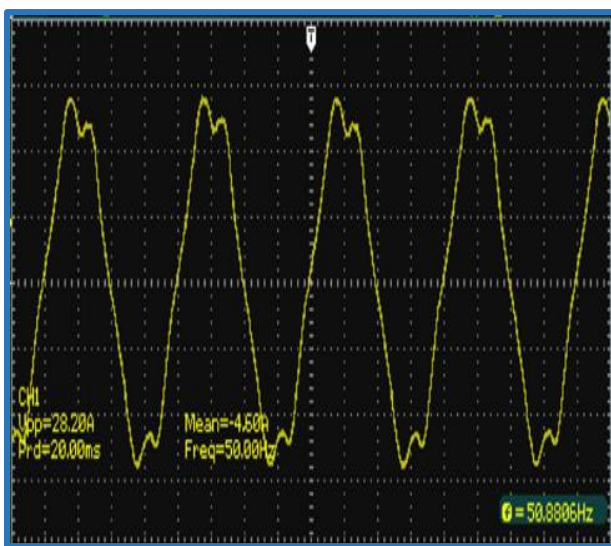
Nous avons étudié l'influence de taux de court-circuit sur le comportement des gradeurs électriques (courant statorique) de la machine pour ce faire, nous effectuons un court-circuit de chaque phase, puis on a comparé avec l'état sain lorsque la machine ne subit aucun défaut voir **figure (4.7)**.



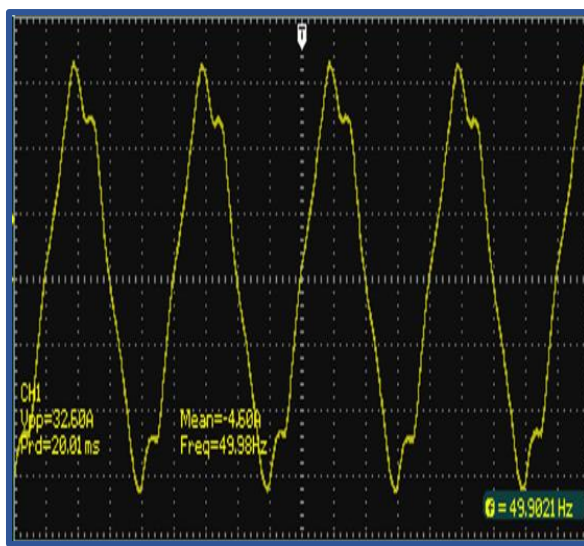
Phase(a), moteur sain



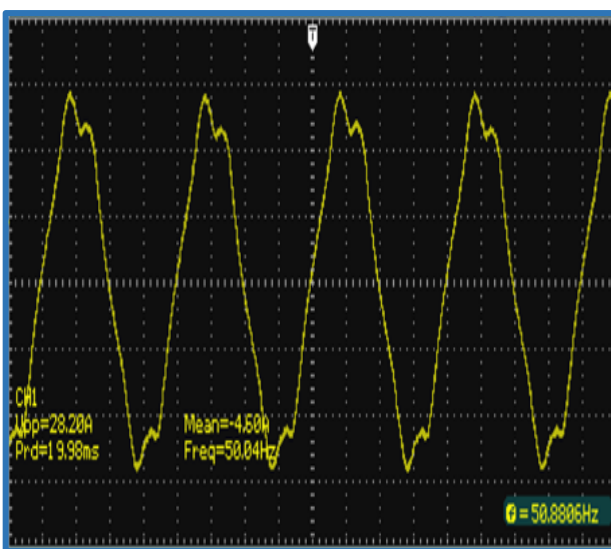
Phase(a), moteur avec défaut (0.5%)



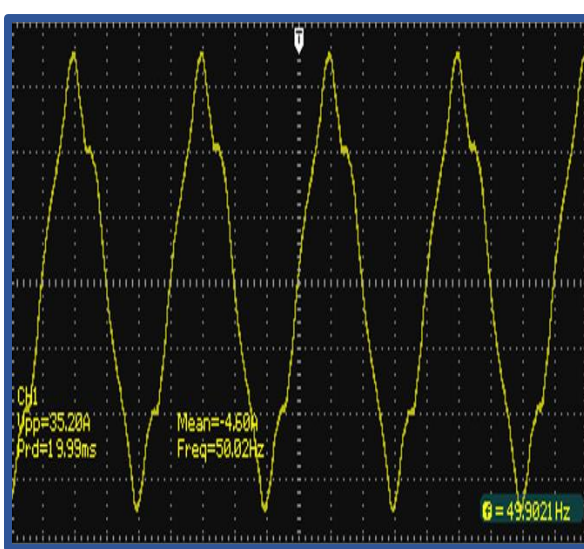
Phase(b), moteur sain



Phase(b), moteur avec défaut 1%



Phase(c), moteur sain



Phase(c), moteur avec défaut (3%)

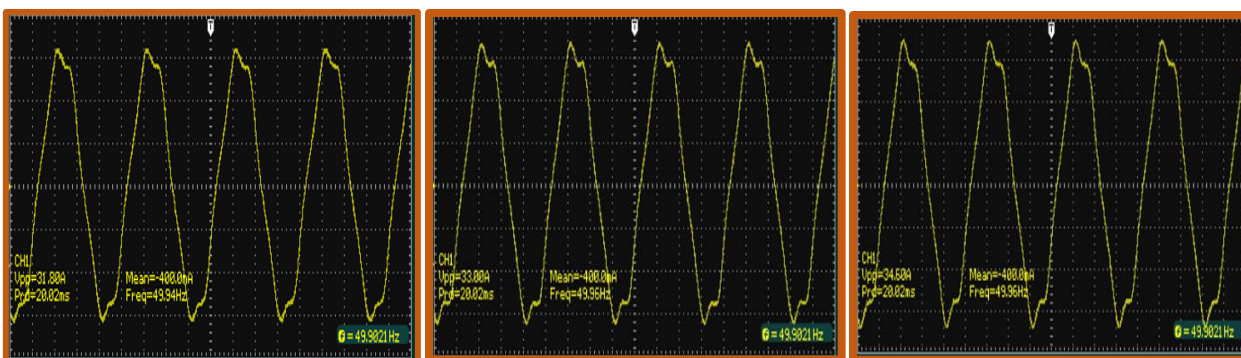
Figure 4.7: les Courants statoriques des trois phases saines et avec défauts

A partir des résultats précédents nous remarquons que le défaut de court-circuit provoque un courant dont l'amplitude peut être très importants, il est prévisible aussi que le courant de défaut croit lorsque le pourcentage de court-circuit augmente comme montre le dernier cas ou le court-circuit égal à 3%.

IV.4 Essai du moteur en défaut Rotorique et mixte

Dans cette partie de ce chapitre nous avons relevé les courants statoriques du moteur à défaut rotorique pour avoir l'effet de défaut rotorique sur les courants statoriques puis nous avons strapé les enrouements statoriques de ce moteur pour observer l'effet mixte des deux défauts rotoriques et statoriques à la fois.

IV.4.1 Essai du moteur avec un Défaut rotorique



Phase(a) avec défaut rotorique

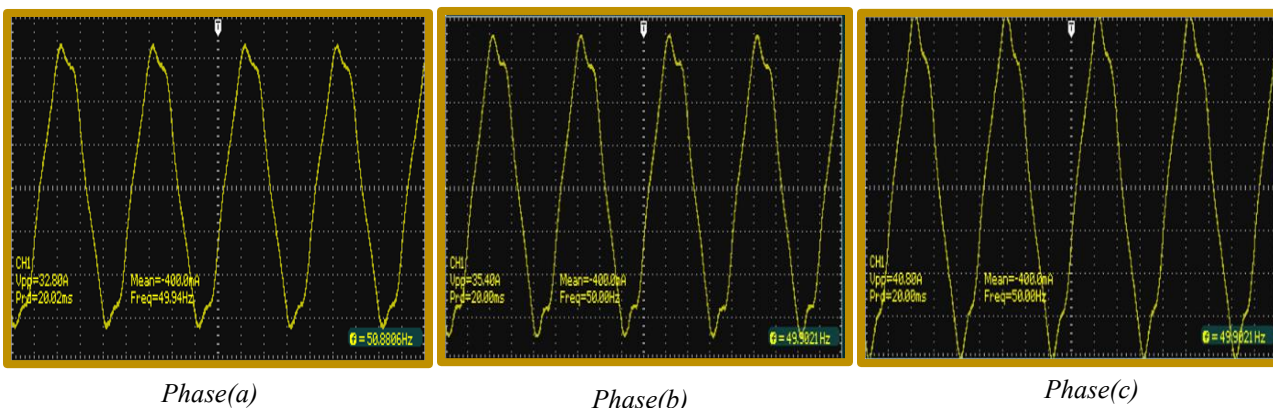
Phase(b) avec défaut rotorique

Phase(c) avec défaut rotorique

Figure 4.8: Formes d'onde des courants des phases du moteur en défaut rotorique.

La figure au-dessus montre l'évolution des courants des phases en cas de défaut rotorique (perçage d'une barre rotorique) nous constatons que le courant dans les trois phases prennent une valeur importante par rapport à l'état sain du moteur (**figure 4.2**). Donc le défaut au niveau du rotor à une influence sur les courants statoriques.

IV.4.2 Essai simultané de défaut (stator/rotor)



Phase(a)

Phase(b)

Phase(c)

Figure 4.9: Formes d'onde des courants en présence de défaut rotorique / statorique((a)=0.5% ;(b) =1% ;(c)=3% de spires)

La figure 4.9 montre l'évolution du courant dans les trois phases avec un défaut simultané (stator/rotor). Un défaut statorique de 0.5% de spires court-circuitées sur la phase(a) et 1% sur la phase(b), 3% sur la phase(c). Et un défaut rotorique de type perçage de barre on remarque une augmentation importante dans les trois courants, précisément la troisième phase ou le pourcentage de court-circuit est très élevés.

IV.5 Comparaison des Résultats de simulation et les résultats expérimentaux

Dans la comparaison des ces résultats, on a simulé l'influence de court-circuit sur une seule phase avec les différents pourcentages de court-circuit par contre dans la pratique on a relevé l'onde de courant statorique de chaque phase avec son pourcentage de court-circuit.

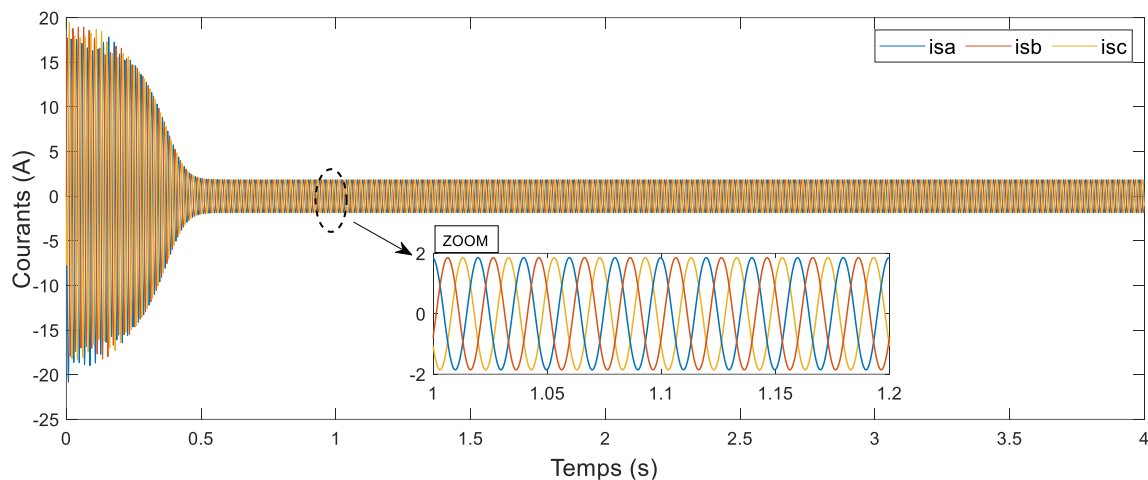


Figure 4.10: Courant de la phase(a) moteur sain

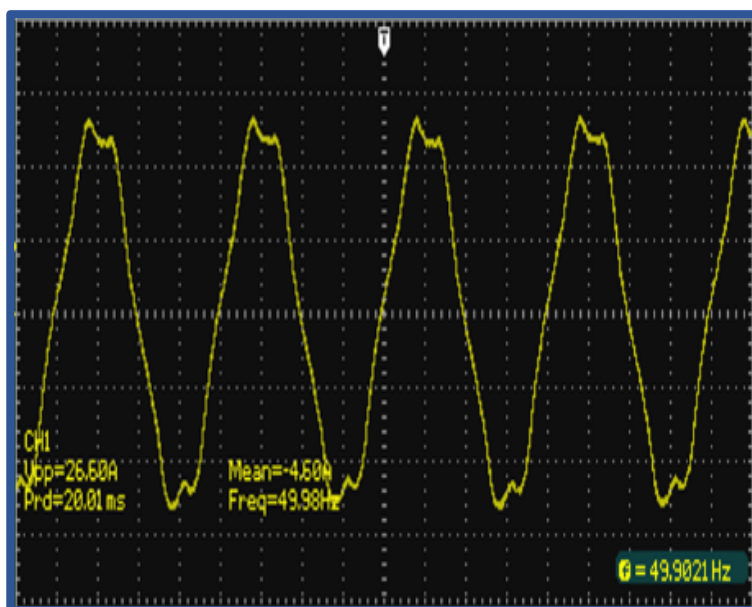


Figure 4.11: Courant de la phase(a), mesuré moteur sain

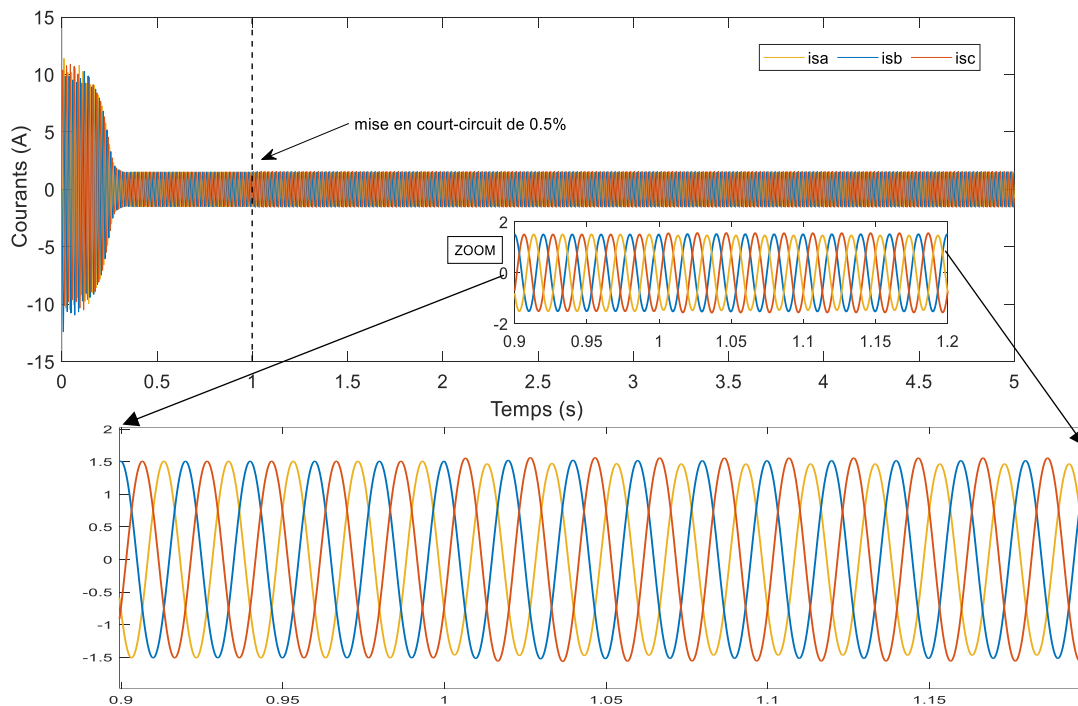


Figure 4.12: Courant de la phase(a) moteur avec défaut (0.5%)

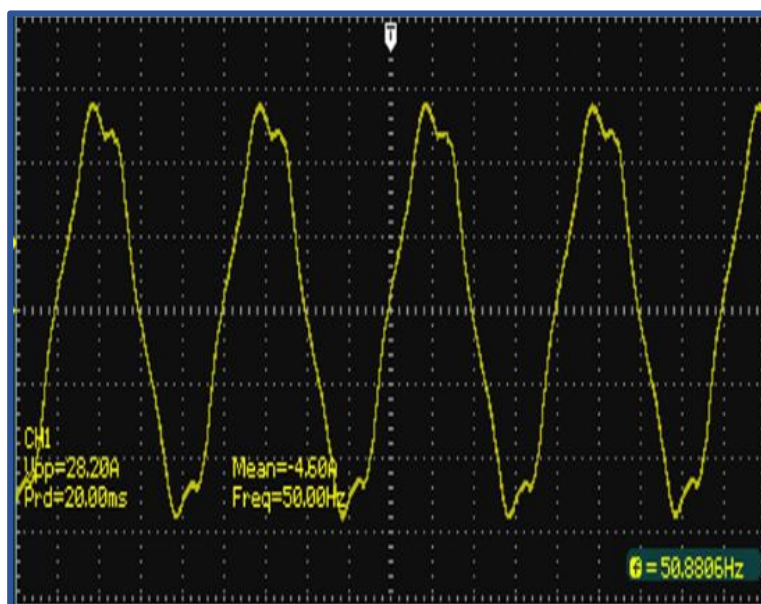


Figure 4.13: Courant de la phase(a), mesuré moteur avec défaut (0.5%)

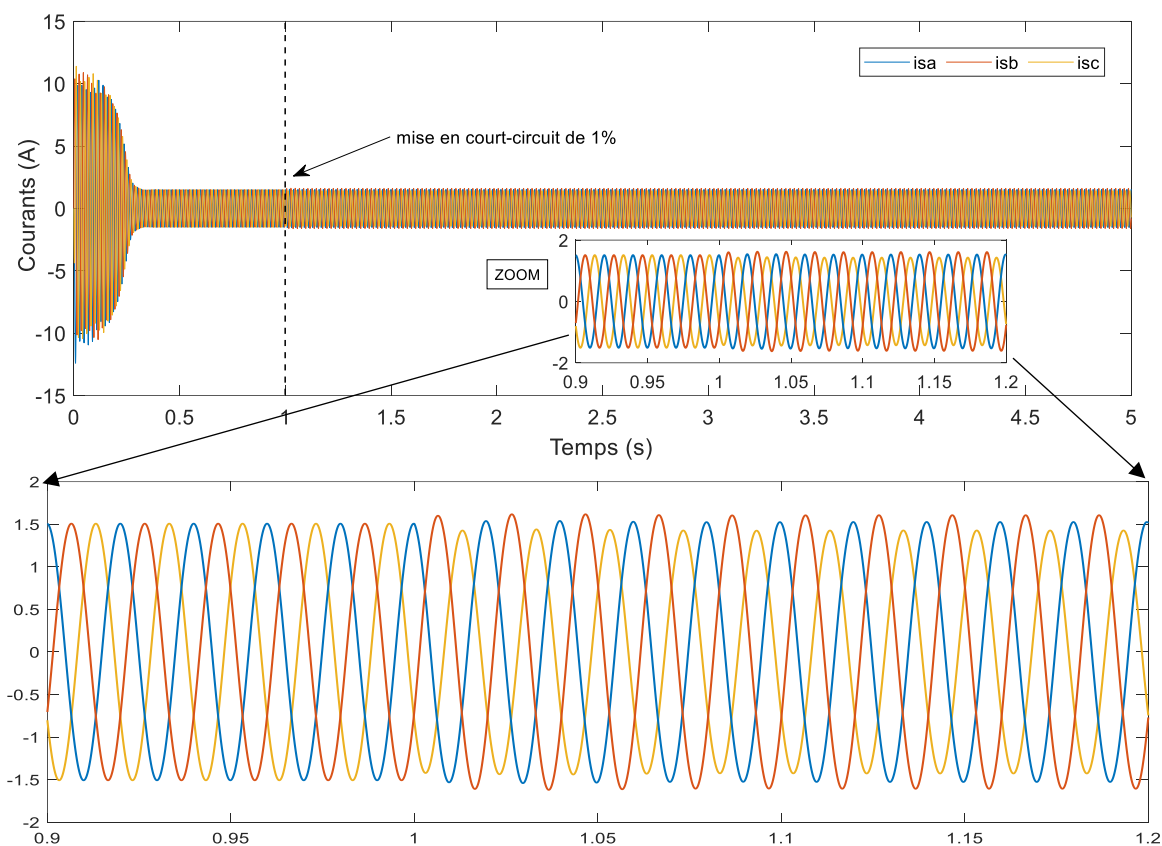


Figure 4.14: Courant de la phase(a) moteur avec défaut (1%)

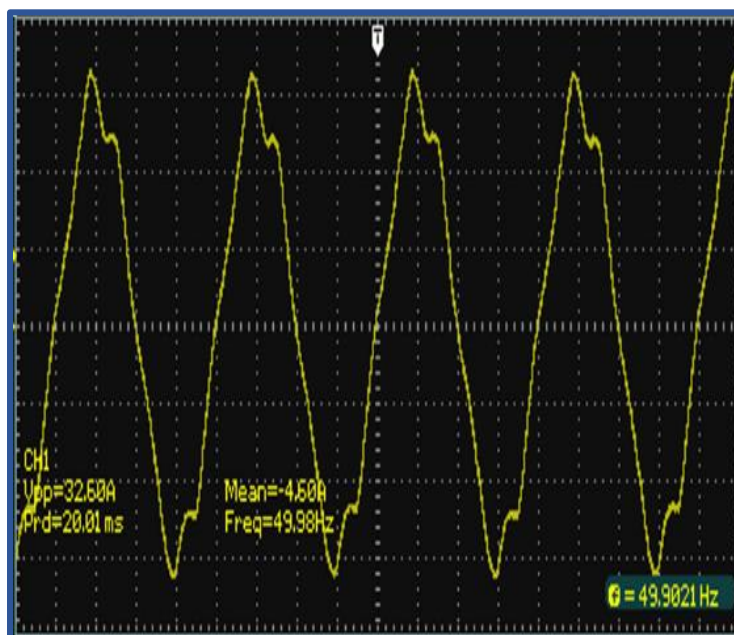


Figure 4.15: Courant de la phase(b), mesuré moteur avec défaut (1%)

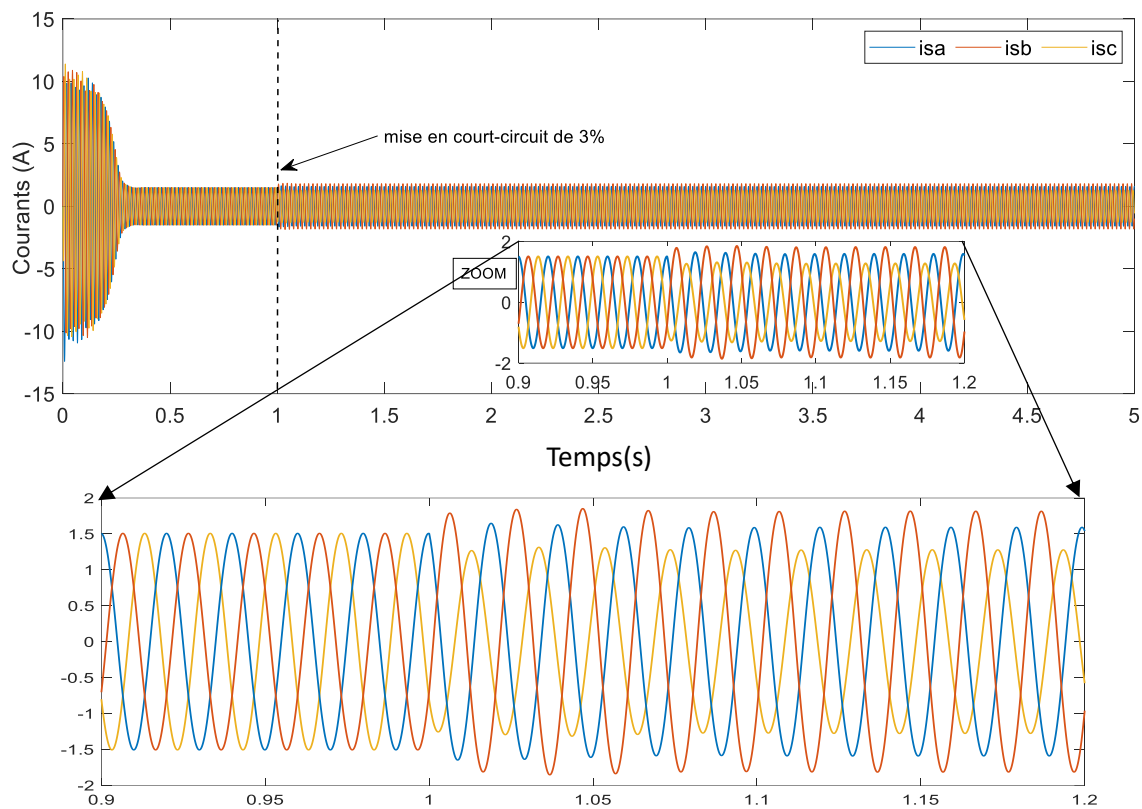


Figure 4.16: Courant de la phase(a) moteur avec défaut (3%)

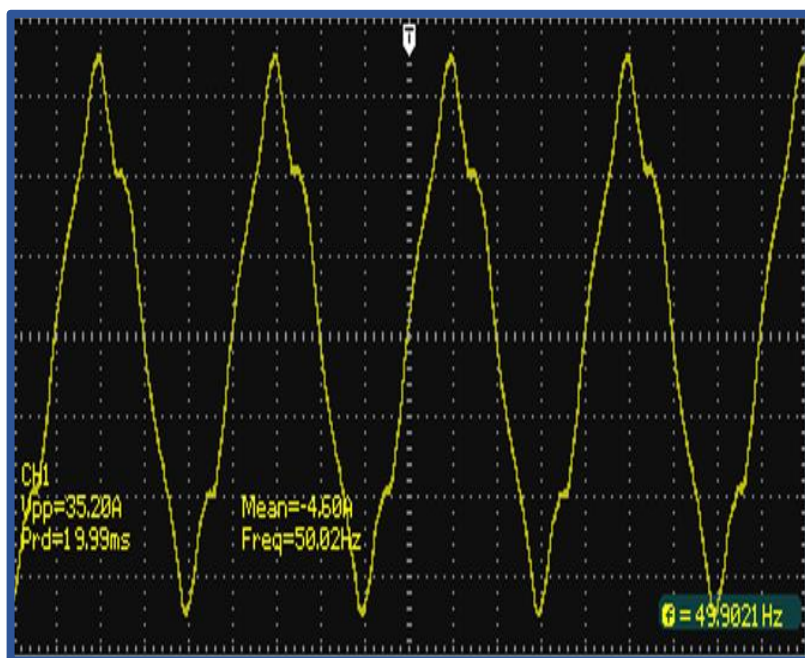


Figure 4.17: Courant de la phase(c) moteur avec défaut (3%)

IV.5.1 Interprétation des résultats

On a deux cas à interpréter :

a) Cas du moteur Sain

La figure (4.10) montre l'évolution des courants statoriques du moteur sain simulé par Matlab on remarque que le courant prend une forme sinusoïdale alternatif et une amplitude égale à 2A en régime permanent. Sachant qu'il existe une petite différence entre les formes des signales voir **La figure (4.11)** tandis que le signal de simulation est parfaitement sinusoïdale alternatif cette différence expliqué par des perturbations générées par les dispositifs de mesure lors des essais, la distorsion harmoniques ou l'effets du Réseau électriques.

b) Cas moteur du moteur en défaut

Si on fait une comparaison entre le signal du courant statorique simulé et ce lui qui a relevé pratiquement on constate que lors de mis en court-circuit entre les spires de phases l'amplitude de courant croit selon le pourcentage de court-circuit voire **figure (4.17)**. L'augmentation du courant cause par le défaut de court-circuit provoque de déséquilibres dans les phases et la création des harmoniques dans le courant et un échauffement au niveau de la machine.

IV.6 L'effet de défaut statorique sur la vibration de la machine

Dans cette partie nous étudions l'effet de défaut statorique sur la vibration de la machine dans ce processus on a utilisé des capteurs et des logiciels pour capter le signal vibratoire on a commencé par **Audacity** pour traiter l'effet de vibration on a connecté ce logiciel avec un capteur pour avoir et traiter le signal vibratoire voir (*Annexe 2*).

on a réalisé un autre capteur piézoélectrique et on a connecté avec l'oscilloscope pour visualiser le signal vibratoire.

Avec le temps on a trouvé un capteur professionnel avec sa **DAQ** et son logiciel de traitement de signal. Dans cette partie on va présenter les résultats relevés par le capteur qu'on a réalisé au niveau de **LML.agh**, voir **figure (4.18)** noté capteur(a) puis on présente les résultats qu'on a relevé par le capteur professionnel noté capteur(b).

IV.6.1 Essai avec capteur (a) pour l'état sain et avec défaut (Statorique)

Après la fixation du capteur sur notre moteur on relie la sonde du capteur avec l'oscilloscope pour traiter le signal.



Figure 4.18: capteur piézoélectrique

Voici les résultats qu'on a relevé par ce capteur dans le cas où le moteur sain puis avec les différents pourcentages de court- circuit statoriques :

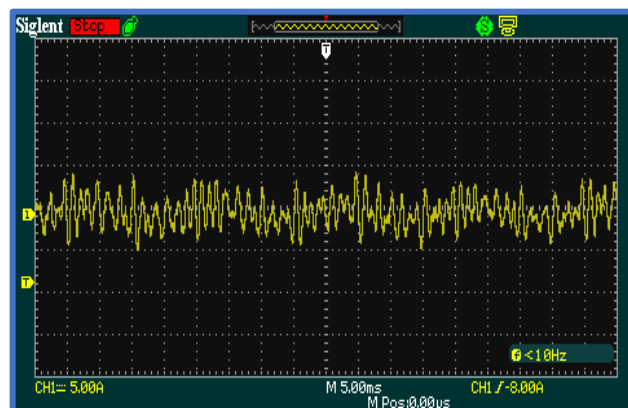


Figure 4.19: onde vibratoire du moteur sain

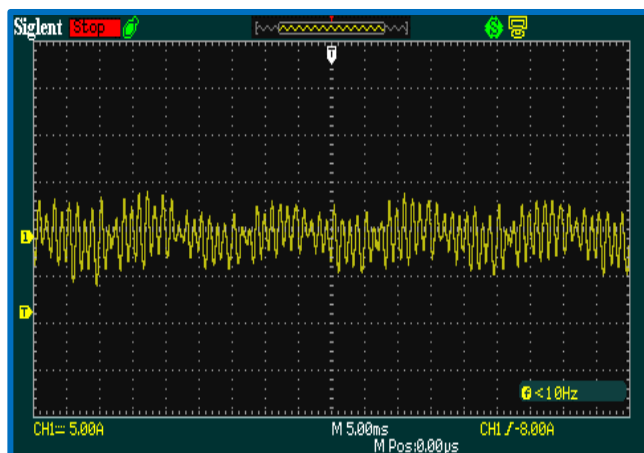


Figure 4.20: onde vibratoire de la phase(a) avec 0.5% court-circuit entre spires

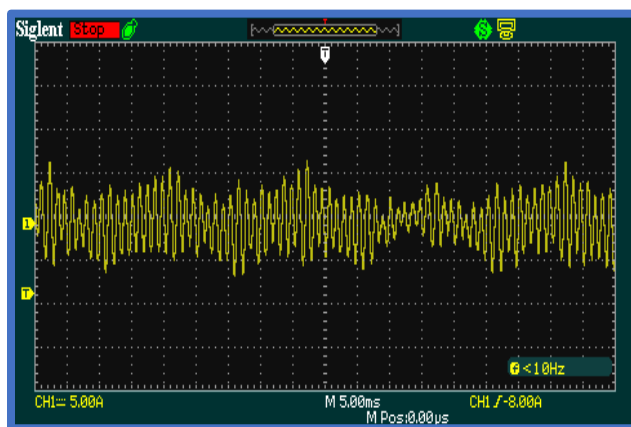


Figure 4.21: onde vibratoire de la phase(b) avec 1% court-circuit entre spires

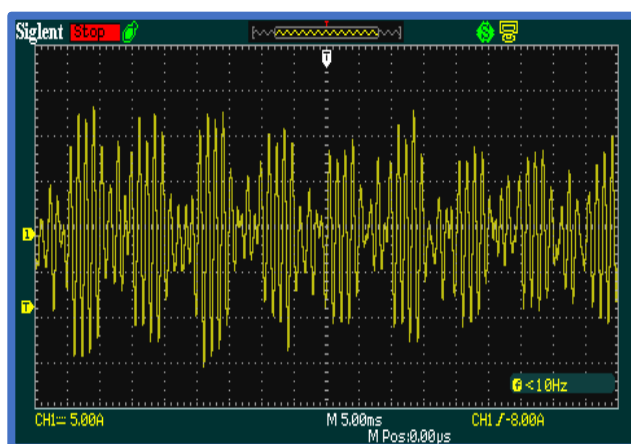


Figure 4.22: onde vibratoire de la phase(c) avec 3% court-circuit entre spires

IV.6.2 Essai avec capteur (b) pour l'état sain et avec défaut (Statorique, mixte)

Dans cette phase d'essai on a installé le capteur(b) voir [Annexe\(3\)](#) sur notre moteur, ce capteur est connecté avec DAQ voir [Annexe\(4\)](#), La DAQ nous permettons de traiter les informations capté par le capteur sur notre ordinateur grâce à un logiciel (**label VIEW**), [Annexe\(5\)](#) après le traitement des informations on les introduire dans un autre logiciel (**ORIGIN 8.1**) voir [Annexe\(6\)](#) ce logiciel nous permettons de ploter les graphes de vibration pour les différents défauts.

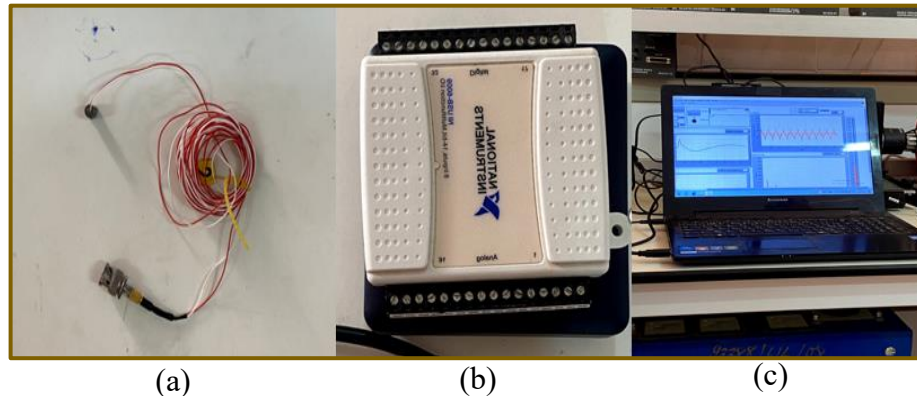


Figure 4.23 : (a) capteur ; (b) DAQ ; (c) Label VIEW installé dans un ordinateur

Voici les résultats qu'on a relevé dans cet essai :

a) Moteur sain

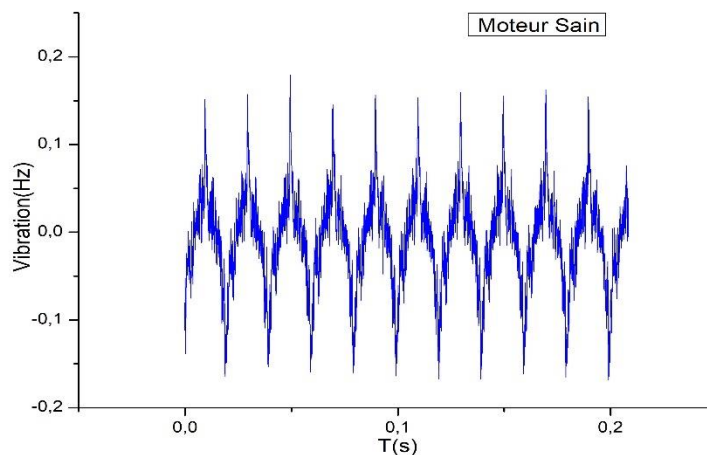


Figure 4.24 : L'onde vibratoire moteur sain

b) Moteur avec défaut statorique

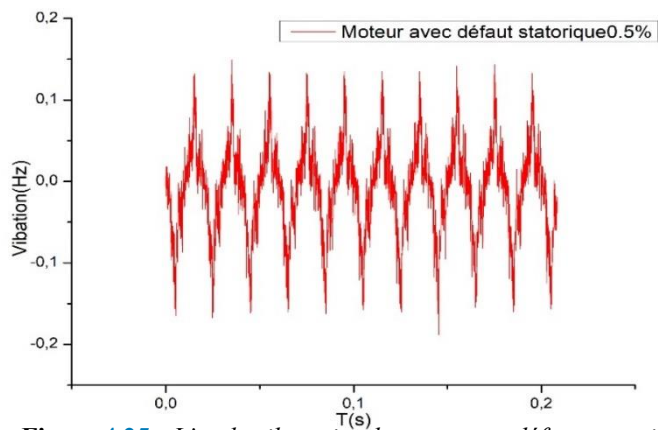


Figure 4.25 : L'onde vibratoire du moteur en défaut statorique phase(a) 0.5%

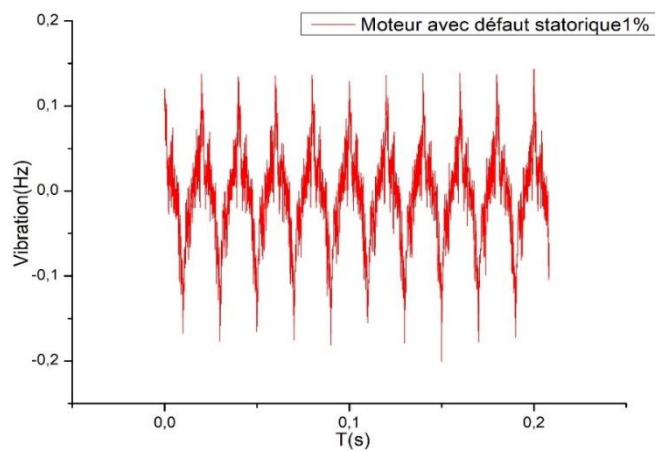


Figure 4.26 : L'onde vibratoire du moteur en défaut statorique phase(b) 1%

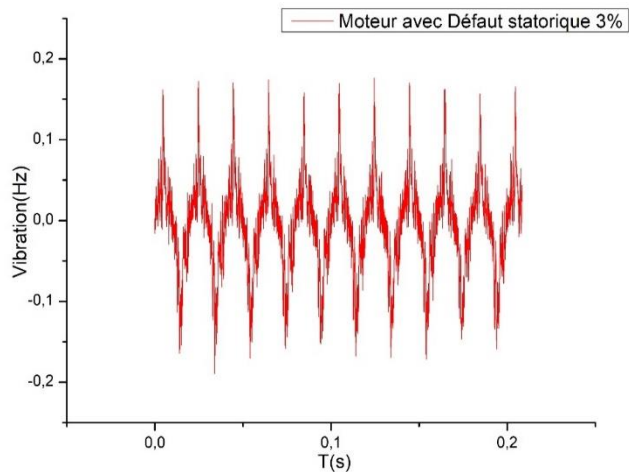


Figure 4.27 : L'onde vibratoire du moteur en défaut statorique phase(c) 3%

c) Moteur avec défaut mixte (statorique/rotorique)

Dans cette phase d'essai on a relevé le spectre de vibration du moteur en cas de défaut rotorique puis on a misé simultanément les deux défauts statorique/rotorique voici les résultats des essais avec les différents pourcentages de court-circuit phase(a)= 0.5%; phase(b)=1% ; phase(c)=3% comme indique les figures suivantes :

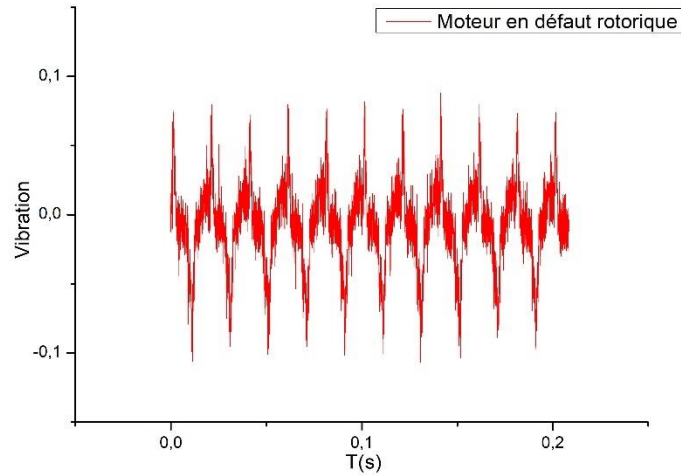


Figure 4.28 : L'onde vibratoire du moteur en défaut rotorique

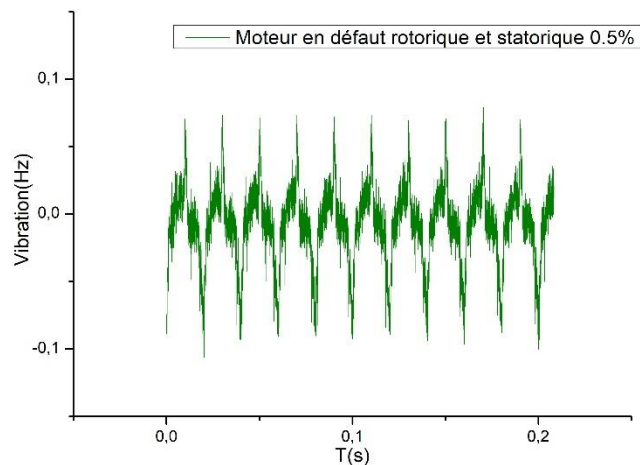


Figure 4.29 : L'onde vibratoire du moteur en défaut rotorique et statorique (0.5%)

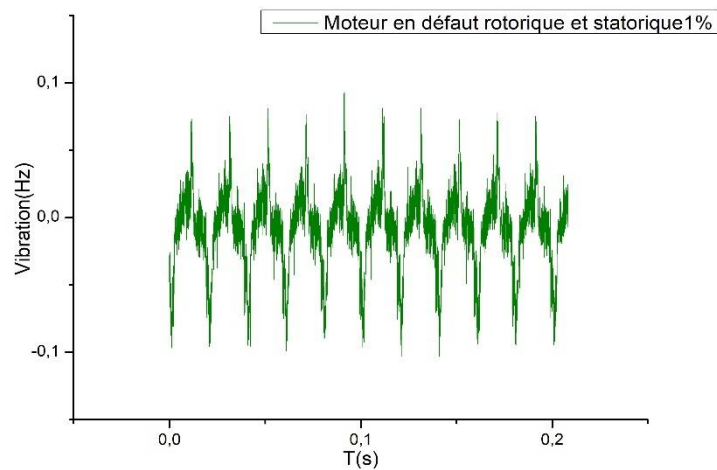


Figure 4.30 : L'onde vibratoire du moteur en défaut rotorique et statorique (1%)

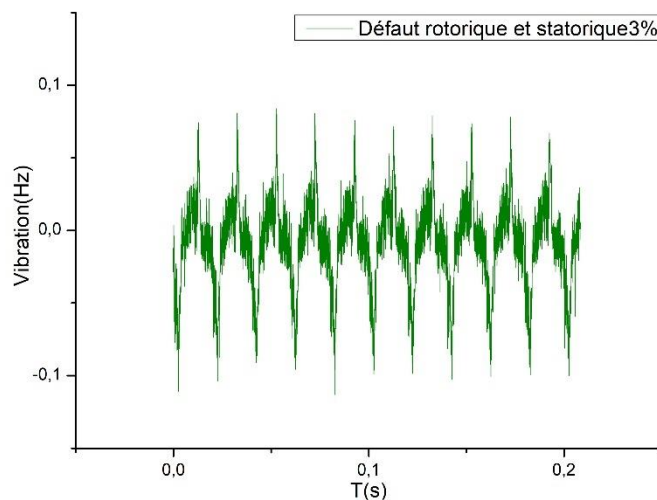


Figure 4.31 : L'onde vibratoire du moteur en défaut rotorique et statorique 3%)

IV.7 Interprétation de résultats :

Les figures précédentes montrent l'évolution de l'onde vibratoire du moteur en trois cas :

1. **Cas moteur du sain :**

Dans la figure 4.24 Nous constatons que l'onde vibratoire présente des amplitudes moins élevées c'est le cas du moteur sain.

2. Cas du moteur en présence du défaut statorique :

On remarque comme indique les figures 4. (25,26,27) que les amplitudes prennent une autre forme caractérisée par des amplitudes très élevés sachant que les amplitudes proportionnelles avec le taux de pourcentage de court-circuit.

3. *Cas du moteur en présence de défaut mixte statorique/rotorique :*

La **figure 4.28** montre la forme d'onde vibratoire en cas de défaut rotorique cassure d'une seule barre, nous remarquons que ce signal présente des amplitudes pulsatoires moins élevés.

Par contre la **figure 4.31** montre la forme d'onde vibratoire en présence de défaut mixte (statorique/rotorique), la comparaison entre les deux résultats défaut mixte et le défaut statorique voir **figure 4.27** nous constatons que le défaut statorique court-circuit entre spires a une influence très élevée sur la vibration de la machine que celui généré par le défaut mixte.

Donc La faite de créer deux défauts l'un dans la partie d'excitation et l'autre dans la partie induit est du moment que l'effet des phénomènes induit compense par contre réaction les effets qui leurs a donné naissance qui est le courant statorique nous avons remarqué que les imbriquassions de deux défauts réduit en peu la vibration dans le moteur.

Comparativement ou cas d'équilibre quand on crée un défaut dans le rotor et la faite que la barre cassure elle tourne dans l'entrefer elle passe par les trois phases elle comprit les deux phases saines elle crée une sorte de rééquilibre au niveau du moteur, elle réduit par conséquence la vibration dans le moteur.

IV.7 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté le problème de court-circuit d'une même phase dans un premier temps nous avons présenté les résultats pratique, relevé à l'aide de notre banc d'essai on a fait une comparaison entre le courant sain et le courant en défaut du moteur avec les résultats pratiques qui ont été validé par la simulation ce qui nous permettons de prendre la forme d'onde du courant sain comme référence ou empreinte en cas de diagnostic des défauts statoriques de la machine puis nous avons vu l'effet de défaut de court-circuit entre spires sur la vibration de la machine.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Conclusion générale

Les défauts des courants statoriques dans les moteurs asynchrones triphasés peuvent avoir Des impacts significatifs sur leur performance et leur durée de vie. Une détection précoce, une maintenance préventive efficace et des mesures correctives appropriées sont essentielles pour assurer le fonctionnement optimal et prolonger la durée de vie des moteurs.

L'objectif de notre travail, était le diagnostic des défauts de la MAS à cage d'écureuil triphasée par l'analyse des courants statoriques, sur un banc d'essais réalisé spécialement pour le diagnostic de tous les défauts des moteurs asynchrones triphasés, sauf celui déroulements. La première partie, une étude théorique sur le diagnostic de défauts statorique et rotorique de la machine asynchrone à rotor à cage d'écureuil, et description du banc d'essais réalisé au niveau de notre laboratoire de machines université de Laghouat.

La deuxième partie, une simulation de la machine asynchrone triphasée, pour le cas d'un moteur à stator sain, et rotor sain (courant, vitesse, et couple). Suivie d'une simulation du moteur en défaut statorique (0.5%,1%, et 3% de spires défectueuses) et rotor avec barre casée. Toute cette simulation pour valider nos résultats expérimentaux. La troisième partie, des essais expérimentaux, pour le cas du moteur sain, suivie d'une combinaison d'essais, défauts statorique et rotor sain, puis défaut statorique et rotor avec une barre cassée.

Une comparaison entre les résultats d'essais pour le cas sain et défectueux, on a remarqué, une augmentation de l'amplitude du courant statorique, avec l'augmentation de nombre de spires en court-circuit. Ces résultats sont validés par les simulations citées ultérieurement. Pour pousser notre étude, on a réalisé, des essais par analyse vibratoire de la machine lors des essais de court-circuit, par deux méthodes différentes. La première, capture de vibration du moteur par un capteur piézoélectrique réalisé par nous-mêmes, et les résultats sont enregistrés directement par le logiciel Audacity.

Les résultats sont satisfaisants, elles montrent l'augmentation des vibrations avec l'augmentation de nombre de spires en court-circuit. Une deuxième méthode utilisée, avec un capteur piézoélectrique professionnel, qui utilise une carte d'acquisition USB6009 avec LabVIEW, puis les résultats sont traités par le logiciel Origine Pro.

Les résultats montrent bien l'augmentation de l'amplitude du signal avec Un autre facteur, est pris en considération dans notre étude, est le facteur de température, Les courants anormaux dans les enroulements statoriques entraînent une surchauffe qui peut endommager l'isolation des bobinages, réduisant ainsi la durée de vie du moteur. Lors de court-circuit des spires dans notre Banc d'essai, on a relevé avec un capteur de température et notre carte d'acquisition les températures, des trois cas de figure de notre moteur. Les résultats montrent que la température augmente avec le nombre de spires en court-circuit, L'augmentation de nombre de spires en court-circuit.

Finalement on peut dire, comme conséquences des défauts :

Un déséquilibre des courants peut provoquer des vibrations et du bruit, augmentant l'usure Mécanique et affectant les performances globales de la machine. Les courants anormaux dans les enroulements statoriques entraînent une surchauffe qui peut endommager l'isolation des bobinages, réduisant ainsi la durée de vie du moteur.

Les défauts des courants statoriques diminuent l'efficacité énergétique du moteur, augmentant ainsi les coûts opérationnels.

En perspective, pour améliorer notre étude du diagnostic des défauts de la machine, l'étude pourrait être élargie en considérant d'autres types de défauts rotorique et statoriques (Excentricité statique et/ou dynamique, court-circuit entre phases, le désalignement, le balourd, coupure d'une phase...) et d'autres outils de diagnostic et de détection avancés (traitement du signal reconnaissances des formes, ...) ou par estimation paramétrique surtout en régime variable.

Bibliographie

- [1] Belhait Houssem Eddine, "Détection des défauts de moteur asynchrone par l'analyse de courant statorique", Université Badji Mokhtar – Annaba, Algérie, 2020
- [2] Jean-Claud Trigeassou, "Diagnostic des Machines électriques" Bibliothèque d'université Ammar Thelidji Laghouat (guide de génie électrique de référence 621.3-269).
- [3] J.-P. Caron, J.-P. Hautier "Modélisation et commande de la machine asynchrone " Editions TECHNIP, Paris, 1995.
- [4] Mokhtari Mourad, Hadjadj Ahmed " Etude, conception et réalisation d'un banc d'essai pour diagnostic des défauts rotorique et statorique d'un MAS triphasé " " Mémoire Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master, université Amar telidji, Algérie ,2021.
- [5] Babak VASEGHI, "Contribution à l'étude des machines électriques en présence de défauts entre-spire", thèse doctorat, L'Institut National Polytechnique de Lorraine, 3-décembre- 2009.
- [6] ANDRIAN CEBAN, "Méthode globale de diagnostic des Machines électriques" thèse doctorat, Université Lille de Nord de France, 2 février 2012.
- [7] SOUAKER Med Elhadi-GUETROUN Abdelali et ZEKRI Abdelkader "diagnostic des défauts statoriques des machines asynchrones" Mémoire Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master, L'Université Echahid Hamma Lakhdar d'El Oued ,Algérie, 16 -Juin- 2019.
- [8] Abdallah HAMOUDI, "Contribution au Diagnostic de la Machine Asynchrone par les techniques d'identification", en vue l'obtention du diplôme de doctorat en sciences, USTO-MB ,Algérie, 2018.
- [9] Dameche Salah Eddine, Lamri Marouane, "Diagnostic des défauts statorique dans les machines asynchrones par l'approche Neuro-Floue de type ANFIS" Mémoire Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master, université Amar telidji, Algérie ,2019.
- [10] Tahar ACHOUR "Diagnostic de défauts électriques et mécaniques de la machine asynchrone à simple cage d'écureuil", Projet de fin d'études Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en électrotechnique, Ecole Nationale Polytechnique, Algérie 2008.

ANNEXE

Annexe [1]

MATLAB est un langage de script destiné au calcul numérique, et émulé par l'environnement de développement du même nom. Le nom MATLAB est un mot-valise construit sur l'anglais matrix laboratory.

Simulink est un logiciel de modélisation système multi-physique édité par l'entreprise américaine The MathWorks.

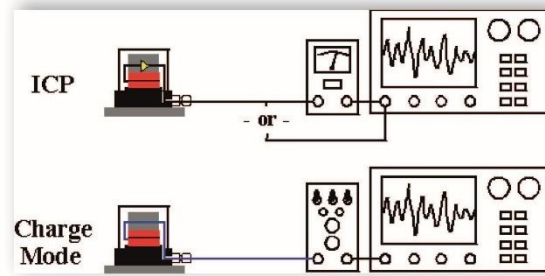
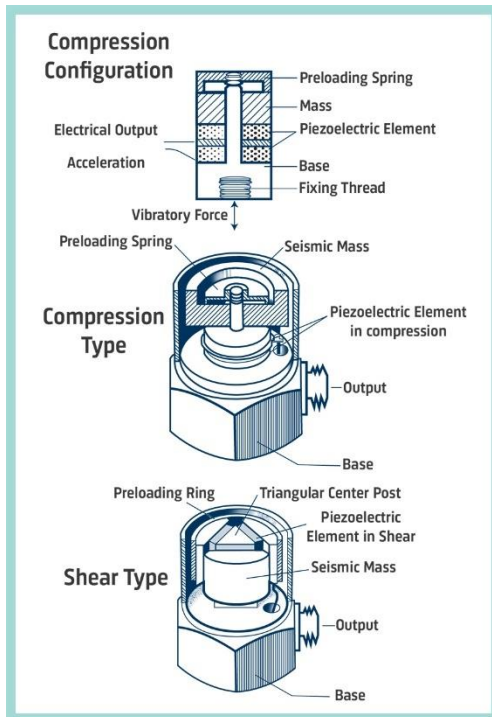


Annexe [2]

Audacity est un logiciel d'édition audio. Il offre une gamme de fonctionnalités pour l'enregistrement, l'édition et la manipulation de fichiers audio. Vous pouvez enregistrer des sons à partir de diverses sources, éditer des pistes audio avec des outils comme la découpe, le collage et le mixage, et appliquer des effets tels que l'écho ou la réverbération.



Annexe [3]



PCB utilise la marque déposée ICP® pour indiquer les capteurs comprenant une électronique intégrée. Les capteurs dépourvus d'électronique intégrée sont appelés capteurs mode de charge.

Annexe [3]

L'**USB-6009** est un matériel d'acquisition de données multifonction à faible coût. Il est doté d'E/S analogiques, d'E/S numériques et d'un compteur 32 bits. L'USB-6009 offre des fonctionnalités élémentaires pour des applications telles que l'enregistrement de données simples, les mesures portables et les expériences de travaux pratiques pour l'enseignement. Il est proposé dans un boîtier mécanique léger et est alimenté par le bus pour être aisément transporté. Vous pouvez raccorder facilement des capteurs et signaux à l'USB-6009 par le biais d'une connectique par bornier à vis. Le driver NI-DAQmx et l'utilitaire de configuration inclus simplifient la configuration et les mesures.



DAQ

Annexe [4]

LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) est un logiciel de programmation graphique développé par National Instruments, principalement utilisé pour l'acquisition de données, le contrôle automatique et l'automatisation des processus. Il permet de créer des applications de mesure et de contrôle à l'aide d'une interface graphique intuitive.

Applications :

- Expériences scientifiques
- Processus industriels
- Enseignement en ingénierie

LabVIEW est idéal pour les ingénieurs et les scientifiques cherchant à automatiser et analyser leurs systèmes efficacement.

Ressources :

- [National Instruments] (<https://www.ni.com>)
- [Documentation USB-6009] (<https://www.ni.com/pdf/manuals/374781a.pdf>)



Annexe [5]

Origin

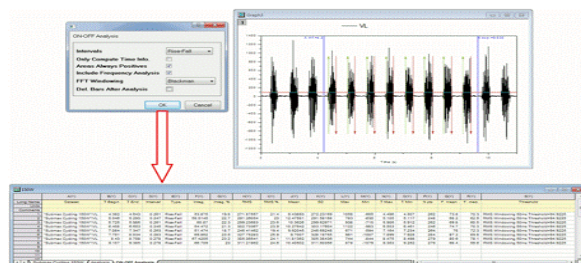
Logiciel : Origin est un logiciel puissant développé par OriginLab, largement utilisé pour l'analyse et la visualisation des données scientifiques et techniques. Il permet aux chercheurs, ingénieurs et scientifiques de créer des graphiques de haute qualité et de réaliser des analyses statistiques avancées.

Ressources :

Site Officiel de OriginLab : OriginLab

Documentation et Tutoriels : Support OriginLab

<https://chatgpt.com/c/17183a42-c4c7-4878-9b5f-433293f97bd8#:~:text=Site%20Officiel%20de,%3A%20Support%20OriginLab>



Caractéristiques de la machine simulé	
Paramètres	Valeurs
La tension	$U=220/380V$
La fréquence	50Hz
Résistance Statorique	$R_s=10 \Omega$
Résistance Rotorique	$R_r=6.3\Omega$
Inductance rotorique	$L_r=0.6530H$
Inductance statorique	$L_s=0.6560H$
La mutuelle	$M=0.613H$
Nombre de paires de pôles	$P=2$
Moment d'inertie	$J=0.02Kg/m^2$
Coefficient de frottement	$f=0 \text{ N. m. s/rad}$

