

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

Université Amar Telidji de Laghouat



Faculté : Technologies
Département : d'électrotechnique
Option : Electrotechnique Industrielle

MEMOIRE DE MASTER

**Diagnostic des défauts statoriques des machines
Asynchrones par l'approche LS-SVM**

Présenté par HEMKA Abdenmour

Jury de soutenance:

Nom et Prénom	Grade	Qualité
Mr. Seghier Tahar	PRF	Président
Mr. Sid Ahmed BESSEDIK	MCB	Examineur
Mr. Birame M'hamed	MCF	Encadreur
Mr. Bachir Mokhtari	MCA	Co-encadreur

2022 - 2023

Dédicaces

À tous ceux qui ont contribué à la réalisation de ce travail

Ce modeste travail est le fruit de votre soutien et de votre encouragement. Il est dédié à vous tous, pour votre amour, votre confiance et votre amitié.

À mes chers parents

Je vous dédie ce travail en témoignage de mon affection et de ma reconnaissance pour tous vos sacrifices. Vous êtes ma source d'inspiration et ma force.

À mes frères et tous les membres de ma famille

Je vous dédie ce travail en témoignage de mon amour et de ma gratitude. Vous êtes ma famille et je vous aime.

À tous mes amis dans le voyage de ma vie

Je vous dédie ce travail en témoignage de mon amitié et de ma gratitude. Vous êtes mes compagnons de route et je vous suis reconnaissant pour votre soutien et votre présence.

À tous les membres du régiment des scouts d'Al-Aqsa

Je vous dédie ce travail en témoignage de mon attachement et de ma gratitude. Vous êtes ma deuxième famille et j'ai appris beaucoup de vous.

À tous mes amis rencontrés grâce au scoutisme et tous les membres des Scouts Islamiques Algériens

Je vous dédie ce travail en témoignage de mon respect et de ma gratitude. Vous êtes des personnes formidables et j'ai eu le plaisir de vous rencontrer.

Avec ma profonde gratitude.

Remerciements

Tout d'abord, je tiens à remercier Allah Tout-Puissant, qui m'a donné la force et la persévérance nécessaires pour mener à bien ce travail.

Je remercie également mes parents, qui m'ont toujours soutenu et encouragé dans mes études.

Je suis également reconnaissant envers mes professeurs et mes mentors, qui m'ont transmis leurs connaissances et leur expertise.

Je remercie enfin tous mes amis et collègues, qui m'ont apporté leur soutien et leur aide tout au long de ce parcours.

Je tiens à remercier tout particulièrement Mon encadreur, Mr BIRAME Mohammed et Mr Mokhtari Bachir, pour son soutien et ses conseils précieux. Grâce à lui, j'ai pu développer mes compétences et approfondir mes connaissances dans ce domaine.

Sans oublier le Dr Sid Ahmed BESSEDIK qui a eu un grand mérite dans la réalisation de ce travail.

Je termine en remerciant tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail.

الملخص

يقدم هذا العمل تشخيصًا للخطأ (دائرة قصر بين المنعطفات) باستخدام خوارزمية تصنيف آلة ناقل دعم المربعات الصغرى (LS-SVM). تم تطوير عدة طرق لمراقبة حالة الآلات بالاعتماد على تقنيات ذكية مثل الشبكات العصبية والمنطق الضبابي ومرشح كالمان وغيرها. ومع ذلك، فإن استخدام LS-SVM لمراقبة سلامة الجهاز وتشخيص الأخطاء لا يزال نادرًا. يوفر LS-SVM تصنيفًا دقيقًا للغاية لمراقبة صحة الماكينة وتشخيصها، مما يوفر أداءً تعميميًا ممتازًا.

- **كلمات مفتاحية:** آلات الحث، الأعطال التشخيص، LS-SVM، تقنيات الذكاء الاصطناعي، مراقبة حالة الآلات، الموثوقية، سهولة الصيانة.

Résumé

Ce travail présente un diagnostic d'un défaut (court-circuit entre spires) à l'aide de l'algorithme de classification des machines à vecteurs de support de moindres carrés (LS-SVM). Plusieurs méthodes ont été développées pour surveiller l'état des machines sur la base de techniques intelligentes telles que les réseaux de neurones, la logique floue, le filtre de Kalman, etc. Cependant, l'utilisation de LS-SVM pour le contrôle de l'état des machines et le diagnostic des pannes est encore rare. LS-SVM fournit une classification extrêmement précise pour le contrôle de l'état des machines et le diagnostic, ce qui offre des performances de généralisation excellentes.

Mots-clés : Machine à induction ,Défaut (court-circuit entre spires) Diagnostic, Machine à vecteurs de support de moindres carrés (LS-SVM) ,Techniques intelligentes, Surveillance de l'état des machines.

Abstract

This work presents a diagnosis of a fault (inter-turn short circuit) using the least squares support vector machine (LS-SVM) classification algorithm. Several methods have been developed to monitor the condition of machines based on intelligent techniques such as neural networks, fuzzy logic, Kalman filter, etc. However, the use of LS-SVM for machine health monitoring and fault diagnosis is still rare. LS-SVM provides highly accurate classification for machine health monitoring and diagnosis, which provides excellent generalization performance.

Keywords: Induction machine Fault (inter-turn short circuit), Diagnosis, least square support vector machine (LS-SVM), Intelligent techniques, Machine condition monitoring

Liste des figures

I.1	Diagramme des différents concepts de maintenance	06
I.2	Le différent élément d'un moteur asynchrone	08
I.3	Stator d'une machine asynchrone	09
I.4	Rotors de machines asynchrones	09
I.5	Rotor en cage d'écureuil	10
I.6	Cage rotorique balayée par le champ tournant statorique	13
I.7	Différent type de défauts agissant sur un système	16
I.8	Causes externes de défauts de la machine asynchrone	17
I.9	Causes internes de défauts de la machine asynchrone	17
I.10	Différents défauts statoriques de la machine asynchrone.	19
I.11	Les différents types de défauts statoriques.	20
I.12	Défaut d'une barre cassée	23
I.13	Rupture d'une et deux portions adjacentes d'anneau	24
I.14	L'excentricité (a) statique, (b) dynamique mixte.	25
I.15	Les différentes méthodes de diagnostic	27
I.16	Principe de fonctionnement de la méthode de redondance analytique	28
I.17	Principe de fonctionnement de la méthode à base du modèle	29
I.18	Approche physique utilisation des observateurs.	31
I.19	Architecture générale d'un système expert de diagnostic	32
II.1	Repérage angulaire des systèmes d'axes dans l'espace électrique	42
II.2	Circuits éclectiques des trois phases statoriques.	46
II.3	Schéma équivalent de la cage d'écureuil rotorique	47
II.4	Circuit équivalent prenant en compte la bobine de court-circuit	50

II.5	Position des axes des parties de la bobine touchée par le court-circuit	50
III.1	Schéma fonctionnel du LS-SVM pour le diagnostic de défaut de court-circuit d'enroulement de stator	59
III.2	Courant stator du moteur sain	61
III.3	Vitesse de rotation du moteur sain sous charge ($C_e = 3 \text{ Nm}$ à $t=0.7\text{s}$)	62
III.4	Couple électromagnétique du moteur sain sous charge ($C_e = 3 \text{ Nm}$ à $t=0.7\text{s}$)	62
III.5	Courant stator avec court-circuit (20% à $t=0.9\text{s}$) sous charge ($C_e = 1 \text{ Nm}$ à $t=0.7\text{s}$)	62
III.6	Vitesse de rotation avec court-circuit (20% à $t=0.9\text{s}$) sous charge ($C_e = 1 \text{ Nm}$ à $t=0.7\text{s}$)	63
III.7	Couple électromagnétique avec court-circuit (20% à $t=0.9\text{s}$) sous charge ($C_e = 1 \text{ Nm}$ à $t=0.7\text{s}$)	63
III.8	Courbes de courants statoriques avec différentes charges et différents rapports de court-circuit	64-65
III.9	Variation du degré de défaut en fonction du nombre de vecteurs pour l'ensemble d'apprentissage.	66
III.10	Variation du degré de défaut en fonction du nombre de vecteurs pour l'ensemble de test.	66
III.11	Courbes de formation d'erreur absolue	66
III.12	Courbes de test d'erreur absolue	67

Listes des tableaux

III.1	Base de données pour la formation et les tests	61
-------	--	----

Sommaire

Résumé

Liste des figures et des tableaux

Sommaire

Introduction Générale 02

Chapitre I

Etat de l'art sur le diagnostic des machines asynchrones

I.1 Introduction 05

I.2 En quoi consiste le diagnostic ? 05

I.3 Terminologies relatives au diagnostic 05

I.4 Constitution de la machine asynchrone 07

I.4.1 Stator 08

I.4.2 Rotor 09

I.4.3 Paliers 11

I.5 Fonctionnement 12

I.6 Applications 13

I.7 Avantages 14

I.8 Inconvénient 14

I.9 Différents types de défauts 15

I.10 Les défaillances de la machine asynchrone 16

I.10.1 Défauts extérieurs (d'environnement) 17

I.10.2 Défaut statorique 18

I.10.3 Défaut Court-circuit 20

I.10.4 Entre spires 20

I.10.5 Entre phases 21

I.10.6 Les défauts d'isolation	21
I.10.7 Défauts rotoriques	22
I.10.8 Ruptures de barre	22
I.10.9 Ruptures d'anneaux	23
I.10.10 Défauts d'excentricité	24
I.10.11 Défauts de roulement	25
I.11 Méthodes de diagnostic des defaults	26
I.11.1 Méthodes internes	27
I.11.1.1 La redondance analytique et matérielle	28
I.11.1.2 La méthode à base du modèle	28
I.11.1.3 Méthode basée sur l'espace de parité	29
I.11.1.4 Estimation des paramètres	29
I.11.1.5 Le diagnostic à base d'observateurs	30
I.11.2 Méthodes externes	31
I.11.2.1 Diagnostic par systèmes experts	31
I.11.2.2 Méthodes basées sur l'intelligence artificielle (IA)	33
I.11.2.3 Diagnostic basé sur le traitement des signaux	34
I.12 CONCLUSION	34

Chapitre II

Modélisation de défaut de court-circuit entre spires statorique

II.1 Introduction	36
II.2 Hypothèses considérées pour le modèle circuit électrique de la MAS	36
II.3 Modélisation de la machine asynchrone saine	36
II.3.1 Equation électrique de tension	37

II.3.2 Equation magnétique	37
II.3.3 Équations mécaniques	39
II.3.4 couple électromagnétique [mas]	39
II.3.5 Transformation triphasé- biphasé	39
II.3.5.1 Transformation de CLARKE	39
II.3.5.2 Transformation de Concordia	40
II.3.5.3 Transformation de Park	41
II.3.6 Choix du Référentiel	43
II.3.6.1 Référentiel lié au stator	43
II.3.6.2 Référentiel lié au rotor	43
II.3.6.3 Référentiel lié au champ tournant	43
II.3.7 Expression du couple électromagnétique instantané	44
II.4 Modèle multi-enroulement	45
II.4.1 Hypothèses simplificatrices	45
II.4.2 Equations électriques du stator	45
II.4.3 Equations électriques du rotor	46
II.4.4 Equations mécaniques de la machine	47
II.5 Modèle multi-spires	48
II.6 Modèle de la machine asynchrone avec défaut	49
II.6.1 Modèle du défaut dans le repère abc	50
II.6.2 Modèle de défaut dans le repère α, β	52
II.6.3 Mise sous forme d'état	53
II.7 Conclusion	54

Chapitre III **MACHINES VECTORIELLES DE SUPPORT DES MOINDRES CARRÉS.**

III.1 Introduction	56
III.2 Application de la méthode LSSVM	56
III.2.2 MACHINES VECTORIELLES DE SUPPORT DES MOINDRES CARRÉS	57
III.3 METHODOLOGIE	60
III.3.1 Extraction des caractéristiques	60
III.3.2 Sélection de la base de données	60
III.3.3 Détection de défaut du stator à l'aide du LS-SVM	62
III.4 RÉSULTATS ET DISCUSSION	62
III.4.1 Fonctionnement normal du moteur	62
III.4.2 Fonctionnement avec un défaut de court-circuit de 20 %	63
III.4.3 Influence du défaut de court-circuit sur le courant du stator	64
III.4.4 Résultats de l'approche LS-SVM	67
III.5 Conclusion	68
 Conclusion générale	 70

Introduction Générale

Introduction Générale

La machine asynchrone est largement utilisée dans l'industrie en raison de sa simplicité de construction, de son coût d'achat abordable et de sa robustesse mécanique. Cependant, cette machine peut être sujette à des défauts potentiels qui peuvent compromettre la sécurité de la production, la qualité du service et la rentabilité des installations. Par conséquent, il est intéressant de développer des systèmes de diagnostic pour détecter ces défauts à un stade précoce.

La surveillance des machines électriques rotatives est essentielle pour garantir leur fiabilité et leur bon fonctionnement au sein des systèmes auxquels elles sont intégrées. Le diagnostic et la détection des défauts dans les composants de conversion électromécanique font partie intégrante de cette surveillance, ce qui nécessite le développement de techniques de mesure, d'acquisition, d'analyse et de prise de décision.

En général, les méthodes de diagnostic requièrent la connaissance de l'état normal de fonctionnement de la machine, quelle que soit la variable physique utilisée. La détection d'un défaut repose ensuite sur la comparaison de la signature d'un état donné avec celle de l'état supposé normal, en utilisant un indicateur basé sur une mesure sensible à un défaut spécifique. La difficulté réside souvent dans le fait que ces indicateurs sensibles existent déjà pour la machine en bon état (comme les raies d'un spectre). Ainsi, c'est leur variation, généralement une augmentation, qui peut fournir des informations sur la présence d'un défaut.

D'autre part, la charge appliquée à la machine peut perturber le diagnostic car elle engendre plusieurs états normaux de fonctionnement.

La modélisation des défauts dans les systèmes industriels, en particulier les défauts électriques, constitue une première étape nécessaire pour prédire le comportement du système en présence ou dès l'apparition d'un défaut. La modélisation locale des effets de ces défauts permet de déterminer si le système peut continuer à fonctionner ou s'il doit être arrêté immédiatement.

Dans ce contexte, notre travail se concentre sur la modélisation des défauts électriques au niveau du stator de la machine asynchrone. Nous avons étudié séparément le court-circuit entre les spires du stator, puis nous les avons combinés. Notre objectif est d'analyser les signaux générés par ces défauts afin d'en extraire leur signature respective et d'examiner leur impact sur le fonctionnement de la machine. Nous avons réalisé des simulations à l'aide d'un programme développé et exécuté sous MATLAB.

Pour cela, notre mémoire sera organisé comme suit :

Le mémoire est structuré en trois chapitres majeurs, qui se concentrent sur un aspect clé du diagnostic des défauts statoriques des machines asynchrones. Le premier chapitre examine l'état de l'art sur le diagnostic des machines asynchrones, en passant en revue les différentes techniques et méthodes développées. Cela permet de mettre en évidence les limites et les lacunes actuelles, justifiant ainsi la nécessité de développer de nouvelles approches.

Le deuxième chapitre se focalise sur la modélisation du court-circuit défaut entre les spires statoriques, qui est les défauts les plus courants rencontrés dans les machines asynchrones. Cette modélisation est cruciale

pour comprendre les caractéristiques de ce défaut et développer des méthodes de diagnostic efficaces. Différents modèles de mathématiques et de simulations ne sont pas présentés, ce qui permet à l'analyseur de comparer la machine aux données actuelles.

Enfin, le troisième chapitre présente en détail la méthode des machines vectorielles supportant les moindres carrés (LS-SVM) et son application pour les diagnostics de défauts statistiques des machines asynchrones. Les résultats obtenus à partir de cette méthode sont présentés et interprétés pour évaluer la performance et l'efficacité du diagnostic. Des expériences pratiques et des comparaisons avec d'autres méthodes sont également incluses pour valider l'approche proposée.

Chapitre I

Etat de l'art sur le
diagnostic des machines
asynchrones

I.1 Introduction

Les machines asynchrones sont des machines électriques qui fonctionnent sans synchronisation précise entre le stator et le rotor. On les appelle aussi machines à induction car elles induisent un courant dans le rotor sans qu'il y ait de contact électrique direct entre le stator et le rotor.

Dans ce chapitre, nous allons approfondir les différents aspects des machines asynchrones, notamment leur fonctionnement, leurs types, leurs caractéristiques, leurs applications, leurs avantages et leurs inconvénients, et analyser les différents dysfonctionnements pouvant survenir sur la machine asynchrone, ainsi que les techniques ou méthodes utilisées pour diagnostiquer des défauts.

I.2 En quoi consiste le diagnostic ?

Dans le contexte des machines, le diagnostic fait référence au processus d'identification et de résolution des problèmes ou des pannes qui peuvent survenir dans une machine ou un système. Il s'agit d'une méthode utilisée pour déterminer la cause sous-jacente d'un dysfonctionnement et pour déterminer les mesures correctives nécessaires.

I.3 Terminologies relatives au diagnostic

Défaut (panne, défaillance) : Un événement qui entraîne un changement dans le fonctionnement du processus. La condition ne correspond plus à un fonctionnement normal. Le système ne peut plus remplir complètement sa fonction.

Disponibilité : capacité d'un dispositif ou d'un système de fonctionner chaque fois que cela est nécessaire, chaque fois que cela est demandé chaque fois qu'on le sollicite, c'est-à-dire que l'on assure une fiabilité totale pendant les phases de fonctionnement. La disponibilité nécessite des opérations de maintenance préventive afin de prévenir tout vieillissement ou défaillance.

Sécurité : Ce terme regroupe les concepts de disponibilité, de fiabilité, de maintenabilité et de sécurité. Elle caractérise la confiance qui peut être mis en fonctionnement.

Surveillance : ensemble de fonctions s'exécutant en temps réel ayant pour but de reconstituer l'état réel du procédé au sein des modèles utilisés par le système de conduite du procédé. Elle consiste à l'enregistrement de l'information ainsi qu'à la reconnaissance et l'indication des comportements anormaux.

Supervision : est la surveillance d'un système physique et la prise de décisions appropriées pour maintenir son exploitation face à des défaillances.

Dysfonctionnement : exécution d'une fonction du système durant laquelle le service rendu n'est pas fourni ou est fourni de manière incomplète.

Maintenance : Ensemble de toutes les actions techniques, administratives et de management durant le cycle de vie d'un bien, destinées à le maintenir ou à le rétablir dans un état dans lequel il peut accomplir la fonction requise. (Norme AFNOR X60-010). Bien maintenir, c'est assurer ces opérations pour que le coût global soit optimum.

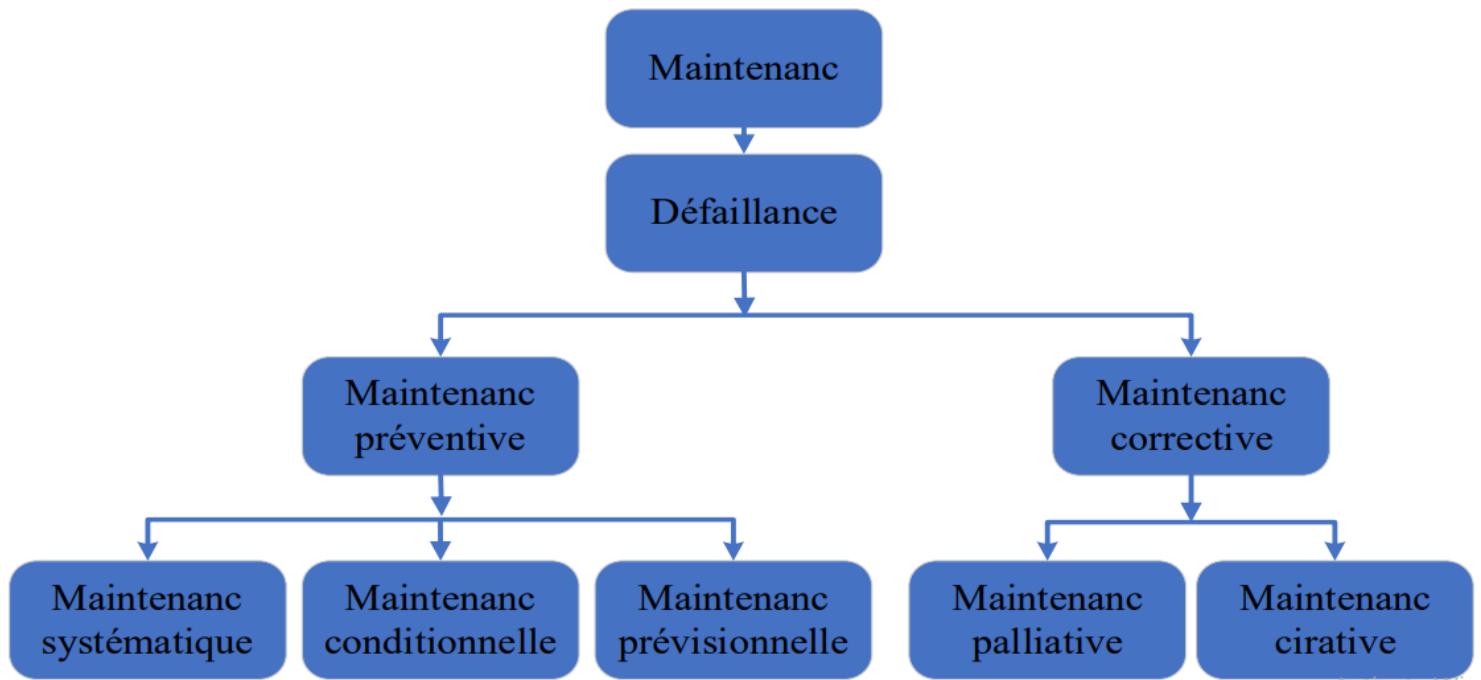


Figure.I.1 Diagramme des différents concepts de maintenance

Maintenabilité : est l'aptitude d'un bien à être maintenu ou rétabli dans un état dans lequel il peut accomplir une fonction requise lorsque la maintenance est accomplie dans des conditions données avec des procédures et des moyens prescrits.

C'est aussi la faculté de répétitivité ou simplification des tâches visant à entretenir et réparer le matériel (accessibilité, encombrement, montage, démontage, sécurité, ...).

Il existe aussi une définition probabiliste plus stricte de la maintenabilité : c'est la probabilité de remettre un système en état de fonctionner en un temps donné avec des moyens donnés et dans des conditions données en retrouvant la fiabilité initiale.

Fiabilité : C'est l'aptitude d'un dispositif à accomplir une fonction requise ou degré de confiance que l'on accorde dans des conditions données pendant une durée donnée.

La fiabilité est destinée non seulement au concepteur et réalisateur mais aussi au responsable de la maintenance pour :

- Le choix judicieux de nouveaux équipements ;
- La définition de la politique de maintenance à appliquer ;
- En cas de besoin ; l'amélioration de leur disponibilité ;

L'indicateur essentiel de la fiabilité d'un équipement MTBF

I.4 Constitution de la machine asynchrone

La constitution de base d'une machine asynchrone comprend un stator, un rotor et un système de ventilation.

Le stator est la partie fixe de la machine et est composé d'un empilement de tôles de fer laminé avec des encoches pour contenir les bobines de cuivre. Les bobines sont disposées à intervalles réguliers autour du stator, créant ainsi des pôles magnétiques.

Le rotor est la partie mobile de la machine et est également composé d'un empilement de tôles de fer laminé. Les barres de cuivre sont placées dans les encoches du rotor et reliées à des anneaux de cuivre (ou bagues) à chaque extrémité. Lorsque le rotor tourne, un champ magnétique est créé par l'interaction avec le champ magnétique du stator.

Le système de ventilation assure la circulation de l'air à travers la machine pour maintenir la température à un niveau acceptable et éviter la surchauffe. Les ventilateurs sont souvent montés sur l'arbre du rotor pour une ventilation efficace.

En somme, la machine asynchrone est constituée d'un stator, d'un rotor et d'un système de ventilation, qui travaille ensemble pour convertir l'énergie électrique en énergie mécanique.

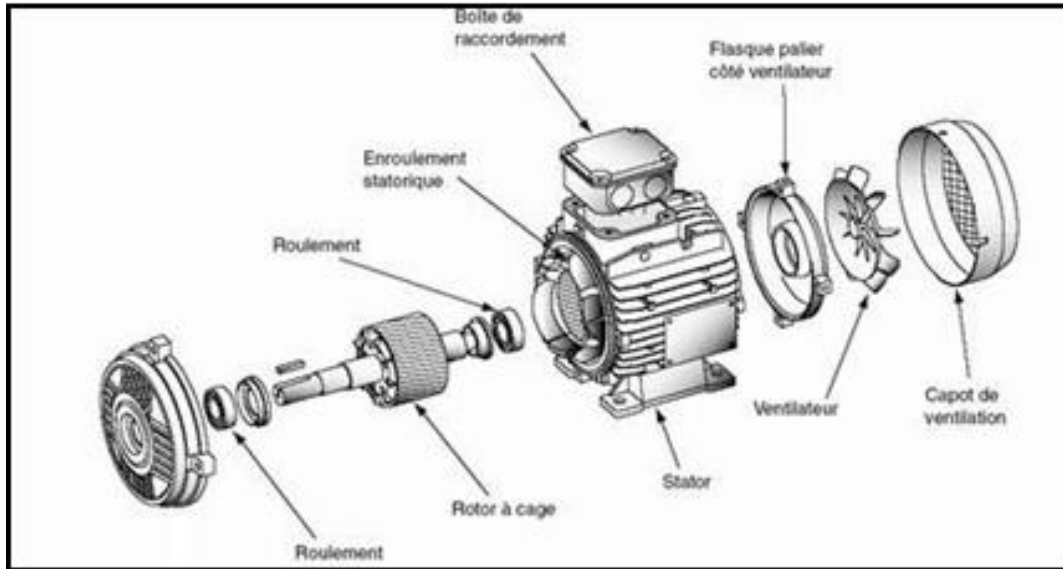


Figure I.2 Le différent élément d'un moteur asynchrone

I.4.1 Stator

Le stator d'une machine asynchrone est la partie fixe de la machine qui est composée de bobines de cuivre entourant le noyau en fer. Lorsque le stator est alimenté par un courant alternatif, il crée un champ magnétique tournant qui entraîne le rotor de la machine à tourner également.

Les bobines de cuivre sont placées à des intervalles réguliers sur le stator pour créer un champ magnétique uniforme autour de l'axe de la machine. Le nombre de paires de pôles sur le stator détermine la vitesse de rotation du champ magnétique tournant et donc la vitesse de rotation de la machine.

Le stator est conçu pour être solide et robuste afin de supporter les forces électromagnétiques générées par la rotation du champ magnétique. Il peut être constitué de tôles d'acier empilées pour réduire les pertes par courants de Foucault et le noyau peut être également enrobé de matériau isolant pour protéger les bobines contre les court-circuits et l'humidité.

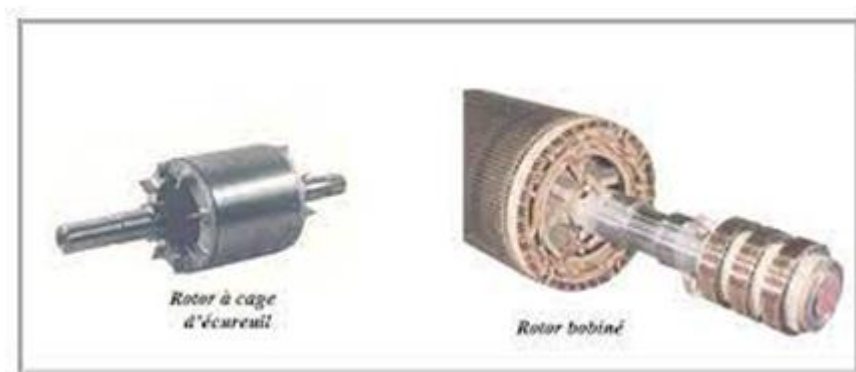


Figure I.3 Stator d'une machine asynchrone

I.4.2 Rotor

Le rotor d'une machine asynchrone est la partie mobile de la machine qui tourne autour de son axe. Il est composé d'un noyau en acier laminé sur lequel sont fixées des barres en cuivre ou en aluminium, appelées "cages d'écureuil" en raison de leur forme. Les barres sont reliées entre elles par des anneaux en cuivre ou en aluminium pour former un circuit fermé.

Lorsque la machine est alimentée en courant électrique, un champ magnétique est créé dans le stator (la partie fixe de la machine), qui induit un courant électrique dans les barres du rotor. Ce courant crée à son tour un champ magnétique dans le rotor qui réagit avec le champ magnétique du stator pour produire un couple de rotation.



Figur I.4 Rotors de machines asynchronies

Le rotor d'une machine asynchrone peut être de deux types :

- Le rotor en cage d'écureuil, également connu sous le nom de rotor à cage d'écureuil ou simplement rotor d'induction, est un type de rotor utilisé dans les moteurs électriques à induction. Il est appelé "en cage d'écureuil" en raison de sa conception qui ressemble à une cage en métal avec des barres de cuivre ou d'aluminium fixées dans les fentes de la cage.

Le rotor en cage d'écureuil est le type de rotor le plus couramment utilisé dans les moteurs électriques à induction en raison de sa simplicité de conception, de sa fiabilité, de son faible coût et de sa robustesse. Il fonctionne en créant un champ magnétique tournant dans le stator (la partie fixe du moteur) qui induit un courant électrique dans les barres de cuivre ou d'aluminium du rotor. Ce courant crée un champ magnétique opposé qui tourne en synchronisation avec le champ magnétique du stator, ce qui fait tourner le rotor et entraîne le moteur.

Les rotors en cage d'écureuil sont utilisés dans une large gamme d'applications, notamment les ventilateurs, les pompes, les compresseurs et les machines-outils. Ils sont également utilisés dans les générateurs électriques pour produire de l'électricité à partir de sources d'énergie renouvelables telles que l'énergie éolienne ou hydraulique.

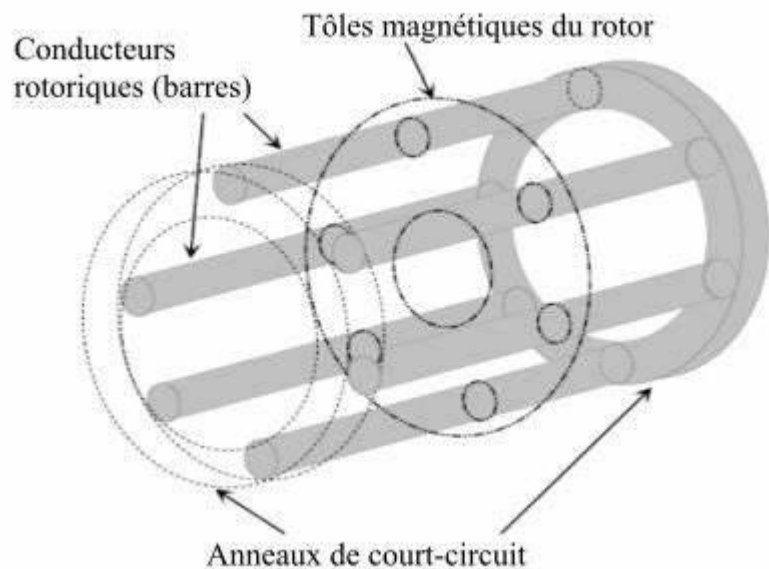


Figure I.5 Rotor en cage d'écureuil

- **Rotor bobiné** Un rotor bobiné est un type de rotor utilisé dans les machines asynchrones, également connues sous le nom de moteurs asynchrones. Contrairement au rotor à cage d'écureuil, qui a une cage en cuivre ou en aluminium, le rotor bobiné est constitué d'un certain nombre de bobines enroulées autour d'un noyau de fer.

Les bobines du rotor sont généralement en cuivre et sont isolées électriquement les unes des autres. Chaque bobine est connectée à une bague de glissement, qui permet de transférer l'énergie électrique et la puissance mécanique entre le stator et le rotor.

Lorsque l'alimentation électrique est appliquée au stator de la machine asynchrone, cela crée un champ magnétique tournant qui entraîne le rotor à tourner. Dans un rotor bobiné, les courants sont induits dans les bobines du rotor à mesure que le champ magnétique du stator tourne autour du rotor. Ces courants créent un deuxième champ magnétique dans le rotor, qui interagit avec le champ magnétique du stator pour produire un couple de rotation.

Le rotor bobiné est utilisé dans les applications à haute puissance où un couple élevé est nécessaire, comme dans les laminoirs, les machines de forage et les compresseurs. Cependant, il est plus coûteux et plus complexe à fabriquer que le rotor à cage d'écureuil, ce qui le rend moins couramment utilisé dans les applications de faible puissance.

I.4.3 Paliers

Les paliers de machines asynchrones sont des éléments essentiels des moteurs asynchrones pour supporter les charges radiales et axiales et garantir un fonctionnement fiable et efficace.

Il existe différents types de paliers pour les machines asynchrones, notamment :

1. **Paliers lisses** : Ils sont constitués de deux surfaces en contact direct, généralement en métal, et sont lubrifiés pour réduire la friction et l'usure.
2. **Paliers à roulements** : Ils sont constitués d'une bague extérieure, d'une bague intérieure et de roulements à billes ou à rouleaux qui réduisent la friction et les charges radiales et axiales.
3. **Paliers magnétiques** : Ils utilisent des champs magnétiques pour maintenir la position de l'arbre, éliminant ainsi le besoin de contact physique et réduisant l'usure et la friction.

Le choix du type de palier dépend de divers facteurs, tels que la taille de la machine, la vitesse de rotation, la charge, la durée de vie attendue et l'environnement de fonctionnement. Les paliers doivent être sélectionnés avec soin pour assurer une performance fiable et prolonger la durée de vie de la machine.

I.5 Fonctionnement

Le principe de fonctionnement de la machine asynchrone est basé entièrement sur les lois de l'induction ; la machine asynchrone est considérée comme un transformateur à champ magnétique tournant dont le stator étant comparable à l'enroulement primaire et le rotor à l'enroulement secondaire en court-circuit.

Ce fonctionnement est reposé sur le principe de l'interaction électromagnétique du champ tournant, créé par le courant triphasé fourni à l'enroulement statorique par le réseau, et des courants induits dans l'enroulement rotorique lorsque les conducteurs de ce dernier sont coupés par le champ tournant.

Lorsque le rotor tourne à une vitesse N_S différente du synchronisme, l'application de la loi de **FARADAY** à un des roulements rotoriques montre que celui-ci devient le siège d'une force électromotrice qui étant court-circuitée sur les enroulements va donner naissance à un courant dont l'intensité est limitée par l'impédance de ce dernier. L'interaction entre ce courant et le champ glissant va donner naissance à des forces s'exerçant sur les brins du rotor dont le moment par rapport à l'axe de rotation constituera le couple de la machine. Lorsque le champ est sinusoïdal, sa vitesse de rotation est :

$$N_S = \frac{f}{p} \text{ En tr/s ou } N_S = \frac{60f}{p} \text{ en tr/min}$$

Où f : est la fréquence d'alimentation.

p : représente le nombre de paires de pôles.

L'interaction électromagnétique des deux parties de la machine n'est possible que lorsque la vitesse du champ tournant (n_1) diffère de celle du rotor (n), c'est à dire lorsque $n \neq n_1$, car dans le cas contraire, c'est-à-dire lorsque $n \neq n_1$, le champ serait immobile par rapport au rapport au rotor et aucun courant ne serait induit dans

$$g = \frac{n_s - n_r}{n_s} \quad \text{l'enroulement rotorique.}$$

Le rapport est appelé glissement de la machine asynchrone.

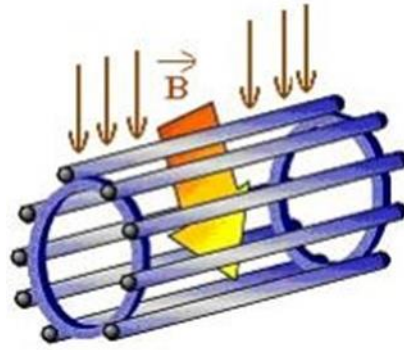


Figure I.6 Cage rotorique balayée par le champ tournant statorique

I.6 Applications

Les machines asynchrones sont des machines électriques qui fonctionnent sans synchronisation avec le réseau électrique. Elles sont largement utilisées dans de nombreuses applications industrielles et commerciales en raison de leur robustesse, de leur fiabilité et de leur capacité à fonctionner à des vitesses variables.

Voici quelques-unes des applications courantes des machines asynchrones :

1. Les pompes et les compresseurs : les machines asynchrones sont souvent utilisées pour alimenter des pompes et des compresseurs dans les applications industrielles. Ces machines peuvent fonctionner à des vitesses variables et sont capables de fournir un débit constant.
2. Les ventilateurs et les soufflantes : les machines asynchrones sont également utilisées pour alimenter des ventilateurs et des soufflantes dans les systèmes de ventilation et de climatisation. Ces machines sont capables de fonctionner à des vitesses variables et sont très efficaces pour maintenir une circulation d'air constante.
3. Les convoyeurs : les machines asynchrones sont souvent utilisées pour alimenter des convoyeurs dans les applications industrielles. Ces machines peuvent fonctionner à des vitesses variables et sont capables de fournir une puissance constante pour faire avancer les matériaux transportés.
4. Les machines-outils : les machines asynchrones sont également utilisées pour alimenter des machines-outils dans les usines. Ces machines peuvent fonctionner à des vitesses variables et sont capables de fournir une puissance constante pour des opérations de fraisage, de tournage et de perçage.

5. Les ascenseurs : les machines asynchrones sont souvent utilisées pour alimenter les moteurs des ascenseurs. Ces machines peuvent fonctionner à des vitesses variables et sont capables de fournir une puissance constante pour déplacer l'ascenseur et ses passagers en toute sécurité.

En bref, les machines asynchrones sont utilisées dans de nombreuses applications industrielles et commerciales en raison de leur capacité à fonctionner à des vitesses variables et à fournir une puissance constante.

I.7 Avantages

Les machines asynchrones, ont plusieurs avantages, notamment :

1. Fiabilité : Les machines asynchrones sont très fiables et nécessitent peu d'entretien en raison de leur conception simple et robuste. Elles peuvent fonctionner pendant de longues périodes avec peu ou pas d'intervention de maintenance.
2. Coût : Les machines asynchrones sont généralement moins chères à fabriquer que les machines synchrones, car elles ont moins de pièces mobiles et ne nécessitent pas de système d'excitation.
3. Rendement élevé : Les machines asynchrones ont un rendement élevé et peuvent convertir efficacement l'énergie électrique en énergie mécanique.
4. Adaptabilité : Les machines asynchrones sont très adaptatives et peuvent fonctionner dans une variété d'applications, de la propulsion de navires aux systèmes de climatisation et de ventilation.
5. Facilité de contrôle : Les machines asynchrones sont relativement faciles à contrôler et peuvent être utilisées avec des variateurs de fréquence pour régler la vitesse et le couple.
6. Fiabilité en environnement hostile : Les machines asynchrones peuvent fonctionner dans des environnements hostiles, tels que les températures élevées ou basses et les conditions humides, ce qui les rend très utiles dans les industries pétrolières et gazières, les mines et les centrales électriques.

I.8 Inconvénient

Les machines asynchrones, sont des moteurs électriques largement utilisés dans les applications industrielles et commerciales. Bien qu'elles aient de nombreux avantages, elles présentent également certains inconvénients, notamment :

1. Performance limitée à basse vitesse : Les machines asynchrones ont une plage de vitesse limitée, ce qui peut les rendre moins adaptées à certaines applications à faible vitesse.
2. Faible efficacité à faible charge : Les machines asynchrones peuvent avoir une efficacité réduite lorsqu'elles fonctionnent à des charges légères ou nulles.
3. Démarrage difficile : Les machines asynchrones peuvent nécessiter un courant de démarrage élevé, ce qui peut causer des problèmes de surcharge pour les circuits électriques.
4. Bruit et vibrations : Les machines asynchrones peuvent être bruyantes et produire des vibrations qui peuvent causer des problèmes de maintenance et d'usure prématurée.
5. Besoin d'entretien régulier : Les machines asynchrones nécessitent un entretien régulier pour assurer leur bon fonctionnement, ce qui peut représenter un coût supplémentaire pour les propriétaires d'installations.
6. Contrôle de la vitesse difficile : Les machines asynchrones peuvent être plus difficiles à contrôler en termes de vitesse par rapport à d'autres types de moteurs électriques, ce qui peut limiter leur utilisation dans certaines applications.

Il est important de noter que certains de ces inconvénients peuvent être atténués ou résolus par des techniques de conception ou de contrôle appropriées.

I.9 Différents types de défauts

Un défaut est une déviation du comportement normal du système, de son régulateur ou de son système d'instrumentation. Les défauts peuvent être aléatoires ou évolutifs, en cas de vieillissement ou d'usure. Les défauts se produisent à différents points du système. Une classification appropriée des défauts peut être basée sur la nature du composant concerné.

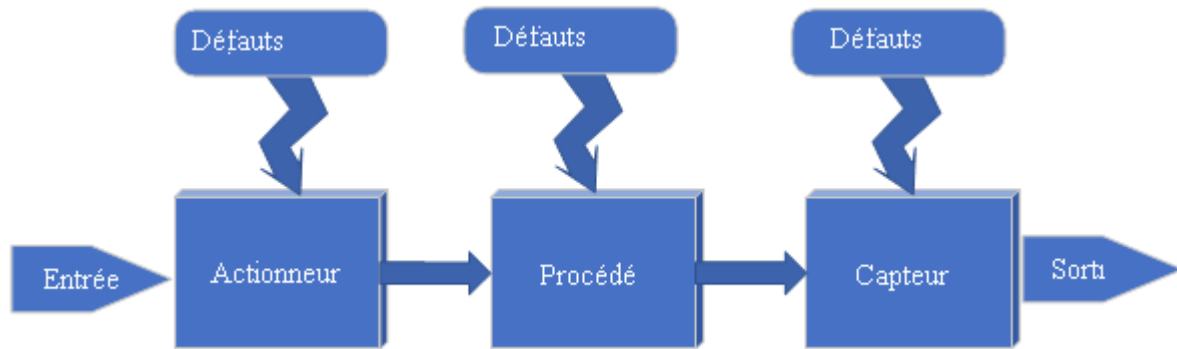


Figure. I.7 Différent type de défauts agissant sur un système

Défauts actionneurs : Les défauts actionneurs agissent au niveau de la partie opérative et détériorent le signal d'entrée du système ce qui introduit une défaillance totale ou partielle de l'actionneur qui agit sur le système.

Défauts système : Ce type de défaut provient du système lui-même. Néanmoins, un défaut composant résulte de la casse ou de l'altération d'un composant du système réduisant les capacités de celui-ci à effectuer une tâche.

Défauts capteurs : Ce type de défaut est la cause d'une mauvaise image de l'état physique du système. Un défaut capteur partiel produit un signal avec plus ou moins d'adéquation avec la valeur vraie de la variable à mesurer. Un défaut capteur total produit une valeur qui n'est pas en rapport avec la grandeur à mesurer.

I.10 Les défaillances de la machine asynchrone

Bien que la machine asynchrone soit dite robuste, elle peut parfois présenter différents types de défauts. Ces défauts se retrouvent dans les différentes parties de la machine, en commençant par la connexion des phases du stator et en terminant par l'accouplement mécanique entre l'arbre tournant et la charge. Ces pannes peuvent être prévues ou inattendues, mécaniques, électriques ou magnétiques, et elles ont des causes très différentes.

D'après les organigrammes, les origines des défauts sont diverses : Thermique, mécanique, électrique ou encore environnemental.

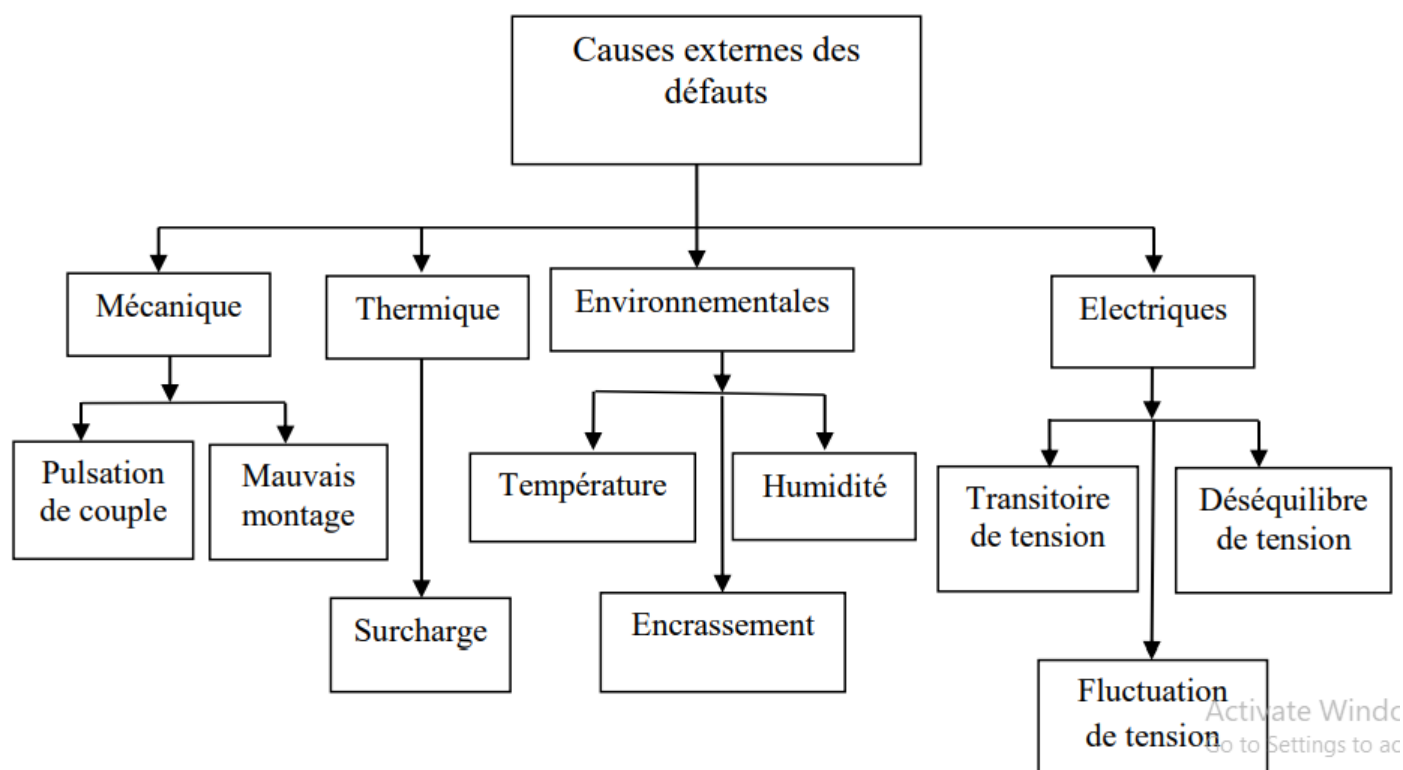


Figure I.8 Causes externes de défauts de la machine asynchrone

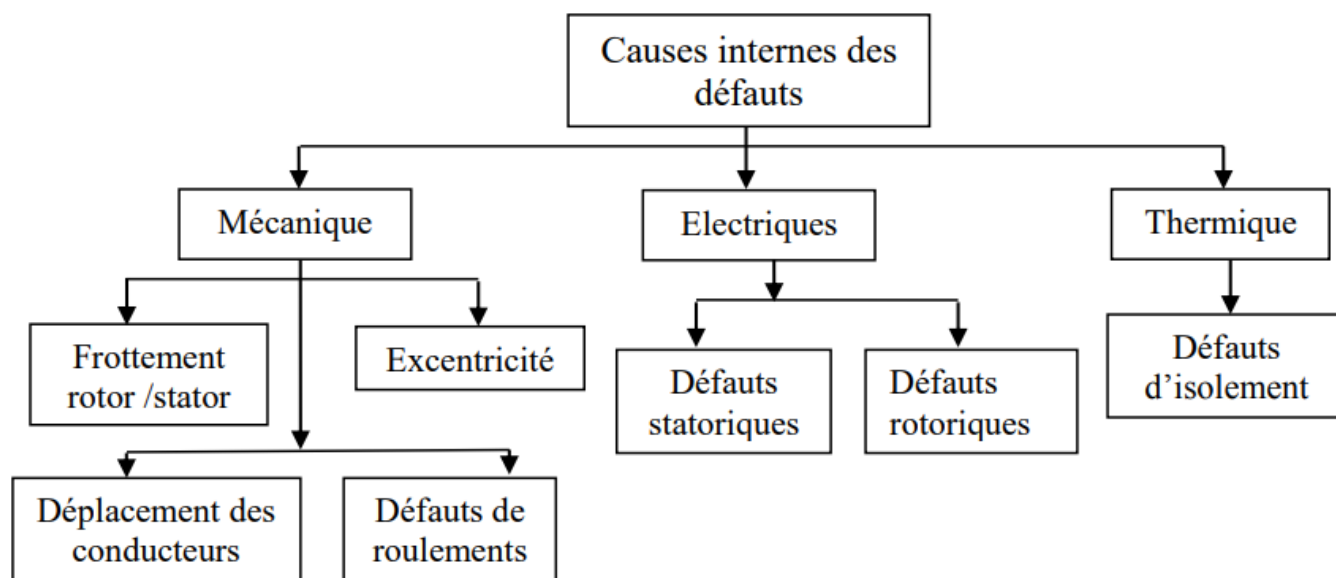


Figure I.9 Causes internes de défauts de la machine asynchrone

I.10.1 Défauts extérieurs (d'environnement)

Ces effets sont principalement dus à un problème de nature :

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

I.10.2 Défaut statorique

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

- Thermique : l'isolation est conçue pour avoir une certaine durée de vie à la température nominale. Toutefois, si la température augmente au-dessus de cette température de fonctionnement, la durée de vie raccourcit rapidement. Cette augmentation de la température peut être due à une variation de tension ou de déséquilibre, à la répétition des démarrages dans un court laps de temps, à des surcharges, à une mauvaise ventilation ou alors à une haute température ambiante.
- Electrique : Une tension supérieure à la valeur nominale ou de hautes valeurs de dv/dt dû à l'ouverture et la fermeture des interrupteurs du convertisseur statique, vont conduire à la dégradation du diélectrique assurant l'isolation des bobines. La présence d'un fort champ électrique interne conduira à des décharges partielles dans les cavités de l'isolant. Il en résulte des spots carbonisés dans l'isolation. Ces spots causent des déformations du champ électrique (augmentation dans la région du défaut).



Ouverture dans une phase l'alimentation



Courts-circuits entre – phase



Déséquilibre de l'alimentation



Endommagement dû à la surcharge



Masse dans l'encoche



Dégradation causée par une surtension

Figure I.10 Différents défauts statoriques de la machine asynchrone.

- Mécanique : les démarrages répétitifs de machine ont pour conséquence d'augmenter la température dans le cuivre (bobinage statorique et cage). Cet effet cyclique provoque des dilatations et contractions répétitives de l'isolant. Cela pourrait entraîner des fissures dans l'isolant qui peuvent se propager et provoquer un début de court-circuit interne. Les efforts mécaniques sur les tôles et les conducteurs ont des composantes alternatives qui provoquent des vibrations de la structure. Ces vibrations provoquent l'érosion et l'abrasion de l'isolant entraînant leur détérioration.
- Environnemental : La présence d'humidité ou de produits chimiques dans l'air ambiant peut détériorer la qualité de l'isolation et conduire à défaut d'enroulement. Le début de la dégradation

entraîne des courants de fuites qui accélèrent la détérioration de l'isolant jusqu'au court-circuit franc. Une autre conséquence est la création de l'ozone et les oxydes d'azote qui peuvent se combiner avec l'humidité pour former de l'acide nitrique, qui détruit l'isolant.

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

I.10.3 Défaut Court-circuit

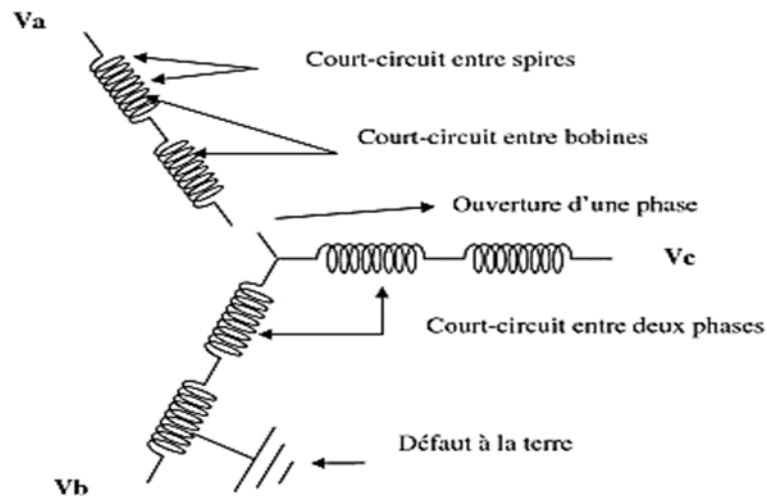


Figure I.11 Les différents types de défauts statoriques.

I.10.4 Entre spires

Un court-circuit entre spires de la même phase est un défaut assez fréquent. Ce défaut a pour origine un ou plusieurs défauts d'isolant dans l'enroulement concerné. Il entraîne une augmentation des courants statoriques dans la phase affectée, une légère variation de l'amplitude sur les autres phases, modifie le facteur de puissance et amplifie les courants dans

Le circuit rotorique dans le cas des machines asynchrones. Ceci a pour conséquence une augmentation de la température au niveau du bobinage et, de ce fait, une dégradation accélérée des isolants, pouvant provoquer ainsi, un défaut en chaîne. Par contre, le couple électromagnétique moyen délivré par la machine reste sensiblement identique hormis une augmentation des oscillations de couple liées au déséquilibre des courants de phases engendré par le défaut

I.10.5 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 a de moins graves conséquences ; il engendre un déséquilibre des courants de phases avec un risque moindre de la fusion des conducteurs.

Les courants statoriques sont totalement déséquilibrés et ce déséquilibre dépend de la localisation du défaut. Dans le cas des machines asynchrones, les courants dans les barres ainsi que dans les anneaux sont augmentés lors de l'apparition de ce type de défaut. La détection de ce type de défaut peut reposer sur le déséquilibre des courants de phases.

I.10.6 Les défauts d'isolation

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

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

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

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

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

I.10.7 Défauts rotoriques

Les défauts rotoriques se situent au niveau de la cage ou au niveau de l'entrefer. Au niveau de la cage les défauts se résument à la rupture de barres de la cage ou à la rupture d'anneaux de court-circuit. Au niveau de l'entrefer les défauts se manifestent par une excentricité statique, dynamique ou mixte.

Ces défaillances sont essentiellement dues à un problème :

- Thermique (surcharge...)
- Électromagnétique
- Résiduel (déformation...)
- Dynamique (arbre de transmission...)
- Environnemental (agression...)

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

I.10.8 Ruptures de barre

La cassure ou rupture de barre est un des défauts les plus fréquents au rotor. Elle peut se situer soit au niveau de son encoche soit à l'extrémité qui la relie à l'anneau rotorique. La détérioration des barres réduit la valeur moyenne du couple électromagnétique et augmente l'amplitude des oscillations, qui elles-mêmes provoquent des oscillations de la vitesse de rotation, ce qui engendre des vibrations mécaniques et donc, un fonctionnement anormal de la machine. La grande amplitude de ces oscillations accélère la détérioration de

la machine. Ainsi, le couple diminue sensiblement avec le nombre de barres cassées induisant un effet cumulatif de la défaillance. L'effet d'une cassure de barre croît rapidement avec le nombre de barres cassées.



Figure I.12 Défaut d'une barre cassée

I.10.9 Ruptures d'anneaux

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

La rupture d'une portion d'anneau déséquilibre la répartition des courants dans les barres rotoriques et de ce fait, engendre un effet de modulation d'amplitude sur les courants statoriques similaire à celui provoqué par la cassure de barres.

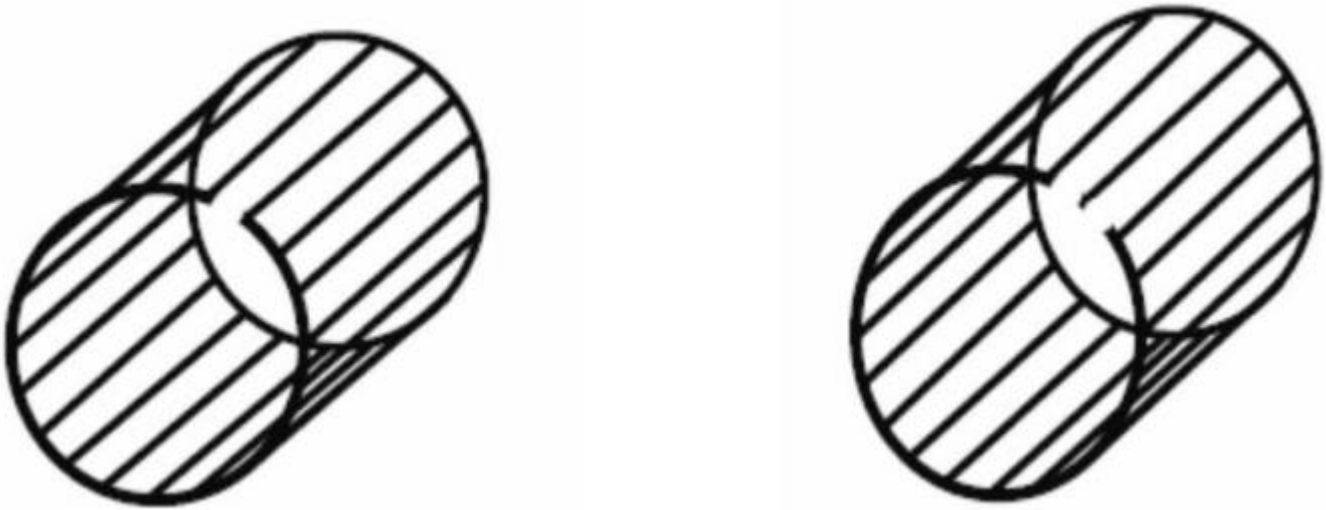


Figure I.13 Rupture d'une et deux portions adjacentes d'un anneau

I.10.10 Défauts d'excentricité

Les défauts mécaniques d'excentricité sont l'un des défauts les plus courants qui affectent les machines asynchrones. Ce défaut est généralement causé par un désalignement entre le rotor et le stator de la machine, ce qui entraîne une asymétrie dans l'espace d'air entre les deux. Lorsque cette asymétrie se produit, le flux magnétique généré par le stator est également déformé, ce qui peut entraîner des courants induits dans le rotor. Les courants induits peuvent à leur tour générer des forces magnétiques qui peuvent endommager les paliers, les roulements et les autres composants de la machine.

Les symptômes typiques d'un défaut d'excentricité mécanique dans une machine asynchrone sont des vibrations anormales et des bruits excessifs. Ces symptômes peuvent être détectés à l'aide d'outils de surveillance tels que des capteurs de vibrations, des analyseurs de spectre ou des caméras thermiques.

L'excentricité statique L'excentricité statique peut avoir plusieurs causes, telles que des tolérances de fabrication incorrectes, une installation incorrecte ou une usure de la machine. Lorsque l'excentricité statique est présente, cela peut entraîner des problèmes de vibrations, de bruit et une usure prématurée des paliers et des roulements. Cela peut également entraîner une réduction de l'efficacité et de la puissance de la machine.

L'excentricité dynamique Ce défaut peut être causé par plusieurs facteurs tels qu'un déséquilibre du rotor, une usure des paliers, une déformation du rotor ou une perte d'alignement entre le rotor et le stator. Lorsque l'excentricité dynamique est présente, cela peut entraîner des vibrations importantes et une usure accrue des paliers et des roulements, ce qui peut réduire considérablement la durée de vie de la machine.

L'excentricité mixte associant les deux cas précédemment cités.

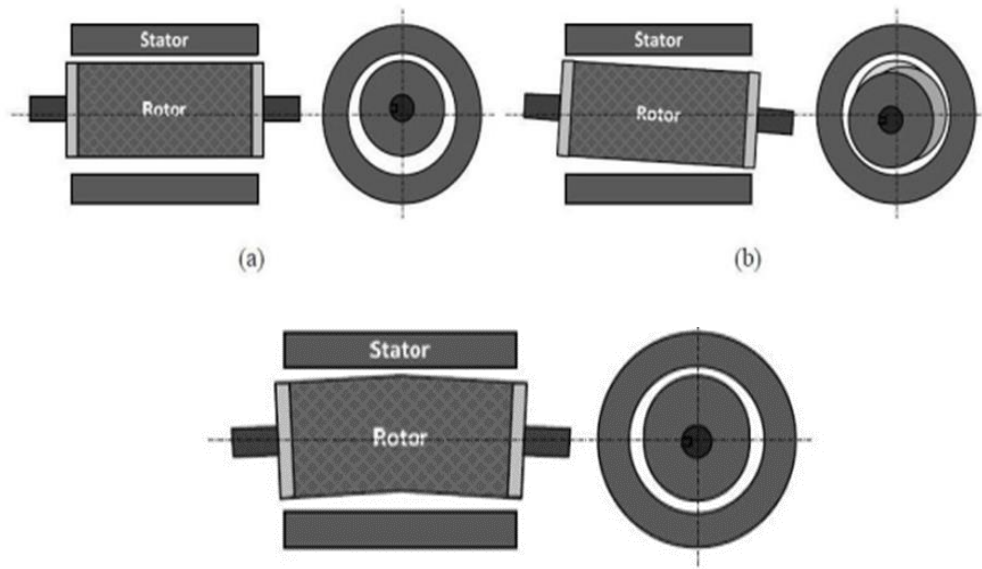


Figure I.14 L'excentricité (a) statique, (b) dynamique mixte.

I.10.11 Défauts de roulement

Les défaillances mécaniques des roulements dans les machines asynchrones peuvent être causées par divers facteurs tels que l'usure, la corrosion, la fatigue, la contamination, la mauvaise installation ou l'alignement, la surcharge, les vibrations excessives, etc.

Voici quelques-unes des causes les plus courantes de défaillance des roulements dans les machines asynchrones :

1. Usure : les roulements subissent une usure naturelle avec le temps, mais cette usure peut être accélérée en raison de la contamination, des charges de travail excessives, des vibrations ou d'autres facteurs.
2. Corrosion : les roulements peuvent subir une corrosion due à la présence d'eau ou de produits chimiques corrosifs, qui peuvent endommager les surfaces de contact et entraîner une défaillance prématurée.
3. Fatigue : les roulements peuvent subir une fatigue due à une utilisation prolongée ou à des charges de travail excessives, ce qui peut entraîner une fissuration ou une déformation des composants du roulement.
4. Contamination : la contamination par des particules étrangères telles que la poussière, la saleté ou les débris peut affecter les surfaces de contact et entraîner une usure prématurée du roulement.

5. Mauvaise installation ou alignement : une mauvaise installation ou un alignement incorrect peut entraîner une charge inégale sur les roulements, ce qui peut entraîner une défaillance prématurée.
6. Surcharge : une surcharge due à une utilisation excessive peut entraîner une défaillance prématurée des roulements.
7. Vibrations excessives : les vibrations excessives peuvent endommager les roulements en provoquant une usure et une fatigue prématurées des composants.

I.11 Méthodes de diagnostic des defaults

Le diagnostic, qu'il soit médical ou industriel, repose toujours sur la comparaison entre le comportement du procédé défaillant et la connaissance du comportement sain ou de son modèle.

La comparaison nécessite des indicateurs, révélateurs de symptômes qui, une fois analysés, permettent d'abord de détecter un comportement fautif, d'inférer (localiser) la fonction ou l'élément dysfonctionnement, puis d'en identifier la cause et, enfin, s'il est réparable.

Au cours des deux dernières décennies, des chercheurs du monde entier ont travaillé sur le diagnostic des machines asynchrones afin de les améliorer et de faciliter la détection des anomalies susceptibles de les affecter. La raison de notre choix est de décrire brièvement les méthodes les plus populaires pour diagnostiquer les pannes des machines asynchrones.

Les méthodes de diagnostic sont divisées en deux grandes familles :

- Les méthodes internes.
- Les méthodes externes.

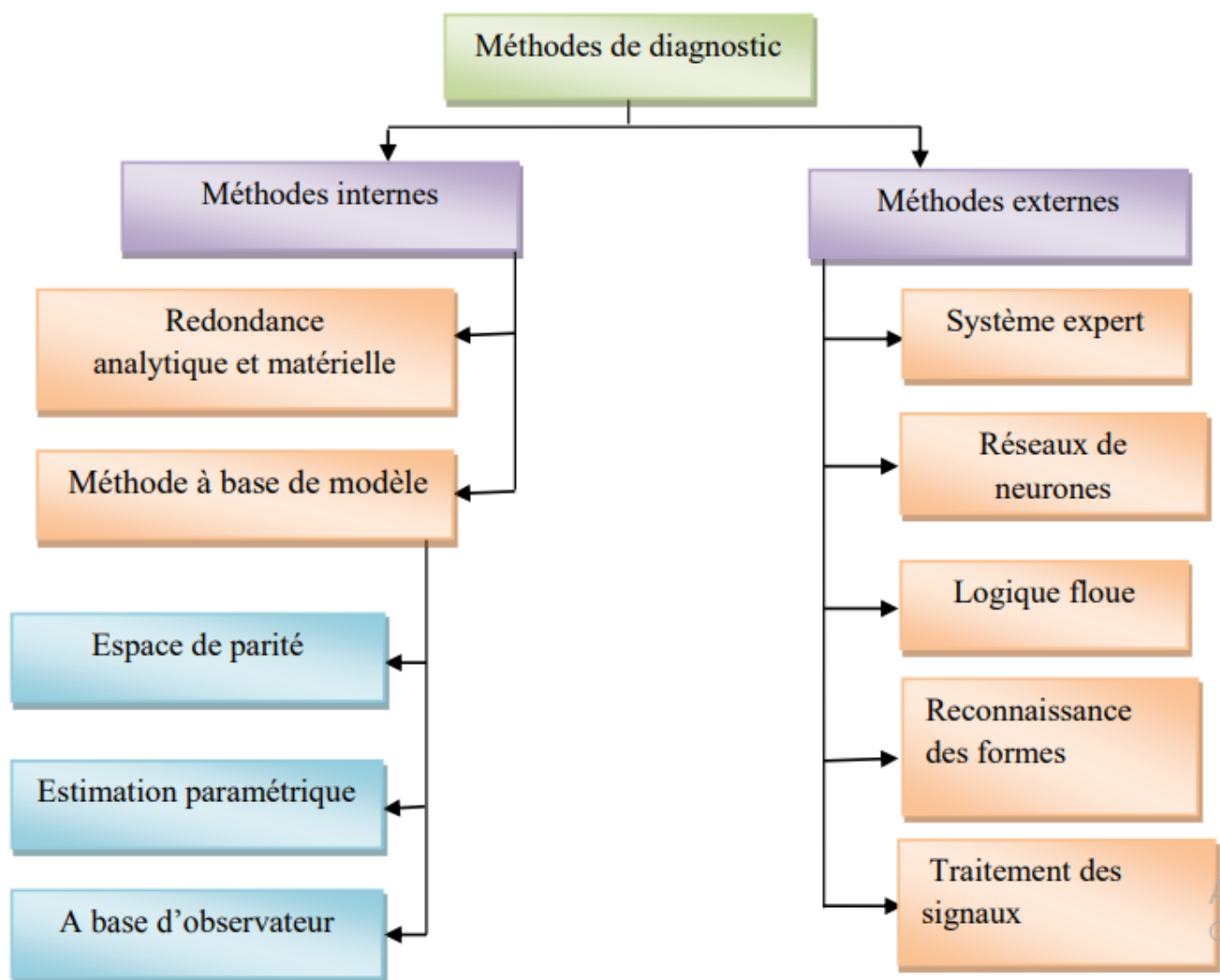


Figure I.15 Les différentes méthodes de diagnostic

I.11.1 Méthodes internes

Ces méthodes sont issues principalement de l'automatique et supposent une connaissance a priori du système. Elles s'appuient sur le suivi d'évolution des paramètres caractéristiques du système étudié ou sur la différence entre le modèle et le processus (méthode des résidus). Une comparaison entre les paramètres mesurés ou calculés et ceux associés à un mode de fonctionnement normal (sain) nous renseigne sur la présence éventuelle d'un défaut.

I.11.1.1 La redondance analytique et matérielle

La redondance analytique se base sur la connaissance d'un modèle mathématique du système à surveiller, ce modèle placé dans les mêmes conditions que le système est calculé en temps réel, fournit les relations de redondances nécessaires à la comparaison du procédé avec le modèle.

D'un côté, il existe une méthode par la redondance matérielle qui consiste à doubler ou à tripler l'équipement et plusieurs actionneurs plusieurs capteurs et plusieurs systèmes de commande.

Le diagnostic utilisant la redondance physique se limite à la surveillance des éléments redondants (capteur, actionneurs, ...) présents sur une installation. A l'aide de cette unique technique, il ne sera pas possible de détecter des pannes survenant sur des éléments non redondants.

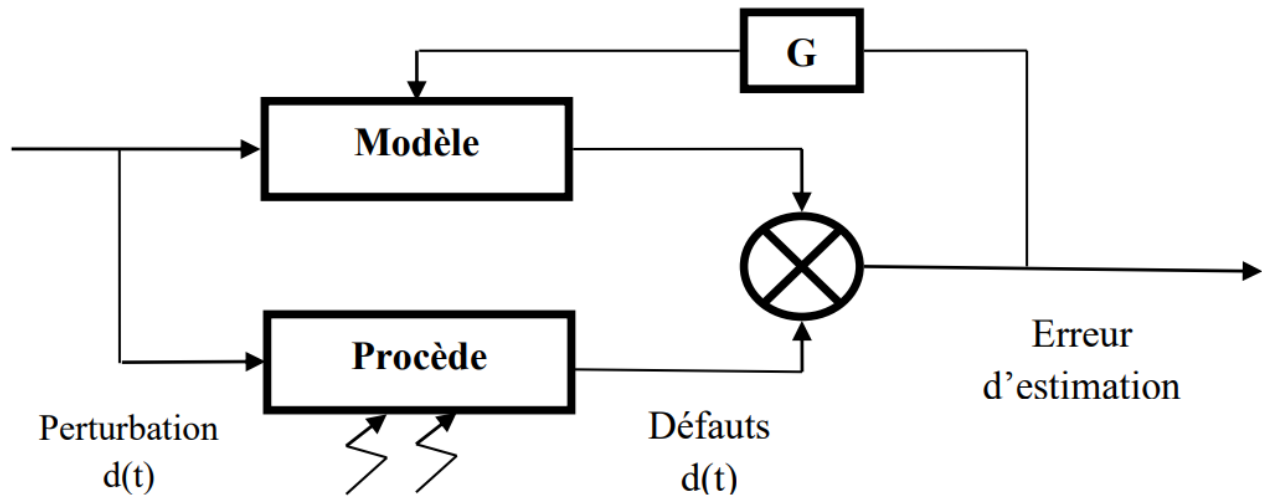


Figure I.16 Principe de fonctionnement de la méthode de redondance analytique

I.11.1.2 La méthode à base du modèle

La méthode du diagnostic basée sur le modèle consiste à comparer les grandeurs déduites d'un modèle représentatif du fonctionnement des différentes entités du processus avec les mesures directement observées sur le processus industriel.

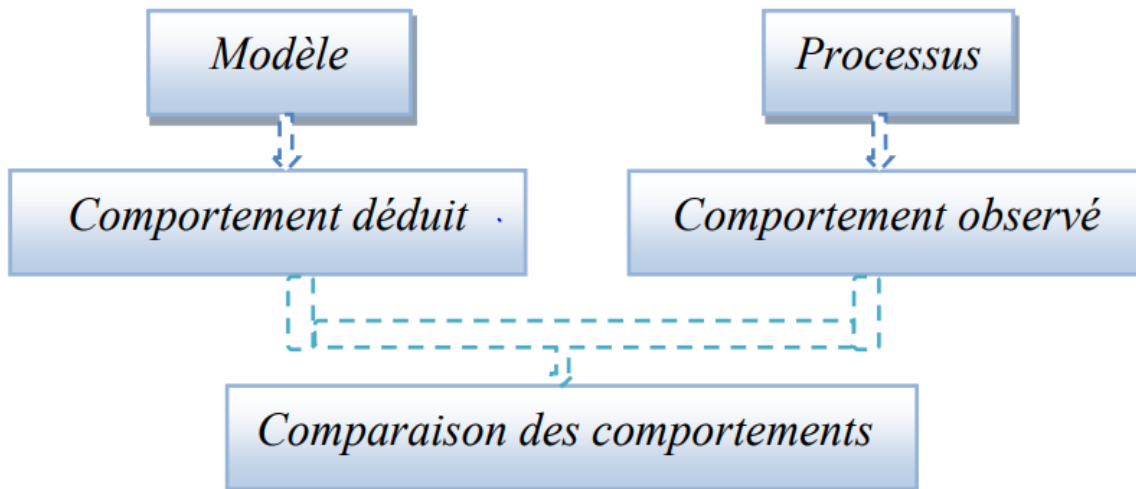


Figure I.17 Principe de fonctionnement de la méthode à base du modèle

I.11.1.3 Méthode basée sur l'espace de parité

L'idée de base de cette méthode est de vérifier la cohérence entre les relations mathématiques du système et les mesures (relations redondance analytique). On suppose qu'une mesure puisse s'exprimer en fonction des autres par une relation connue. La différence entre la mesure et sa valeur calculée à l'aide du modèle est appelée résidu. Alors si le résidu est nul, les mesures sont cohérentes par rapport au modèle, donc le système est déclaré sans défaut. Et dans le cas où le résidu est non nul, indique l'apparition d'un écart, qui veut dire un défaut. Donc la méthode par espace de parité suppose la connaissance d'un modèle mathématique du système.

La redondance est une notion essentielle des techniques de diagnostic. Le terme redondance est utilisé ici pour traduire la possibilité de connaître la valeur d'une variable de différentes manières. On distingue deux types de redondances, la redondance statique et la redondance dynamique.

I.11.1.4 Estimation des paramètres

Cette méthode de diagnostic utilise les paramètres structuraux d'un modèle de connaissance et extrait par la suite les paramètres du système à partir des lois de connaissance pour détecter et localiser les défaillances. Le point essentiel dans l'efficacité de cette méthode est le choix du modèle de connaissance. En effet, le type de défaut que l'on voudra détecter sera fonction du modèle utilisé.

Les premiers travaux relatant de l'estimation de paramètres ont débuté avec des modèles relativement simples (modèle de Park par exemple) utilisés depuis plusieurs années pour la commande des machines

électriques. Ces modèles n'ont besoin que de quatre paramètres pour effectuer le diagnostic de défaut ce qui, dans certain cas, ne permet pas de localiser avec précision la défaillance. L'étape suivante est donc nécessairement le passage à un modèle de connaissance plus fin de la machine, tout en gardant la possibilité d'identifier les paramètres souhaités. Ces modèles peuvent être des modèles triphasés, qui s'affranchissent de l'hypothèse d'une machine magnétiquement équilibrée, ou encore des modèles à n phases, capables de refléter le fonctionnement de la machine sur une large bande de fréquences.

Des algorithmes spécifiques ont été élaborés pour l'estimation séquentielle de paramètres. Le filtre de Kalman apparaît comme le plus adéquat de tous mais aussi le plus délicat à mettre en œuvre. Tout d'abord, en tant qu'algorithme d'identification en temps réel, le filtre de Kalman étendu délivre un modèle adaptatif, capable de prendre en compte les évolutions normales des paramètres de la machine telles que la variation des résistances.

I.11.1.5 Le diagnostic à base d'observateurs

Les méthodes d'observateurs sont basées sur le principe de génération de résidus en comparant les grandeurs disponibles du système réel aux grandeurs estimées (issues de l'observateur). Cette technique se doit de donner une importance grandissante car elle donne lieu à la conception de générateur de résidus flexible.

La génération de résidus à l'aide d'une estimation d'état consiste à reconstruire l'état ou, plus généralement, la sortie du processus à l'aide d'observateur et à utiliser l'erreur d'estimation comme résidu. Cette méthode s'est beaucoup développée car elle donne lieu à la conception de générateurs de résidus flexibles.

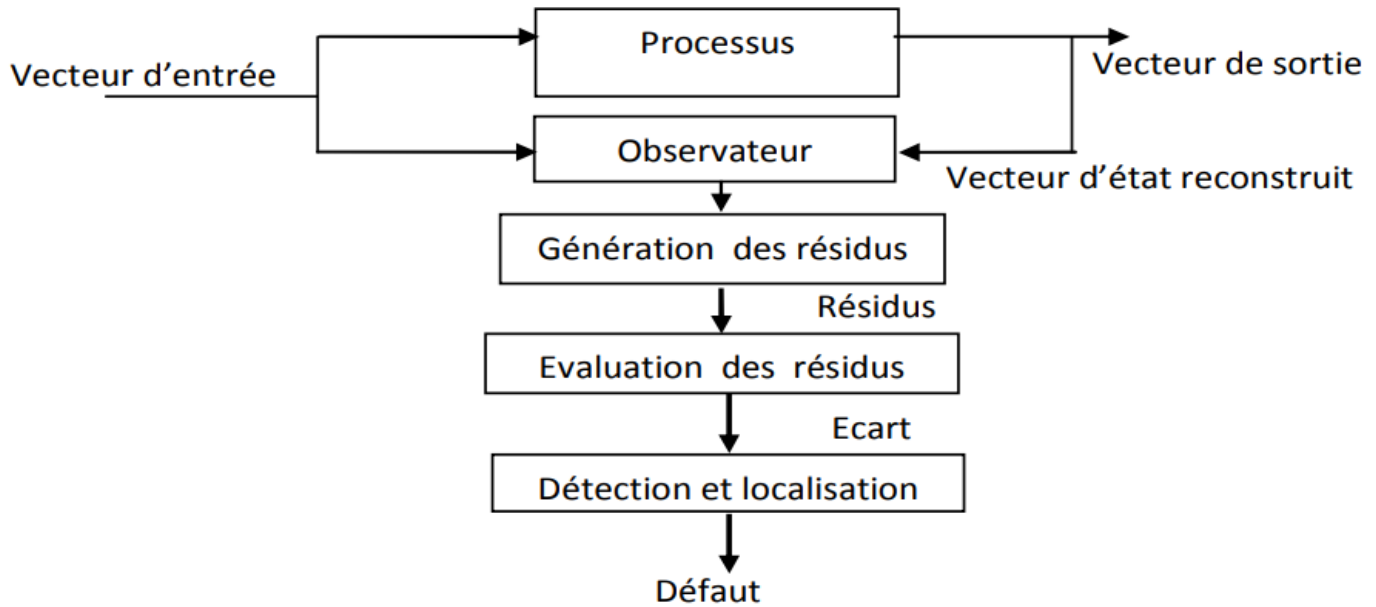


Figure I.18 Approche physique utilisation des observateurs.

I.11.2 Méthodes externes

Nous avons vu que la première famille de méthodes nécessite la connaissance du comportement dynamique de la machine asynchrone. Dans cette deuxième partie, nous nous intéressons aux résultats obtenus à partir du suivi direct des grandeurs telles que les courants, le couple estimé ou mesuré, les flux ou encore les vibrations. Ces méthodes dites 'sans modèles' se basent sur l'analyse des signaux d'acquisitions. Elles ont l'avantage de l'indépendance de l'analyse par rapport aux fluctuations internes du système. D'autre part, l'information contenue dans les signaux, n'étant pas filtrée par la modélisation, elle reste intacte.

I.11.2.1 Diagnostic par systèmes experts

Un système expert doit fournir des réponses associées à une situation donnée sachant que la complexité du domaine étudié ne permet pas d'établir a priori toutes les configurations possibles des situations ; ainsi un spécialiste du dépannage réalise son diagnostic à l'aide d'une description partielle de la situation. A partir de l'ensemble de symptômes dont il dispose, il peut déduire toutes les conclusions possibles, élaborer de nouvelles hypothèses et approfondir son diagnostic en exploitant des informations supplémentaires collectées sur le système à diagnostiquer.

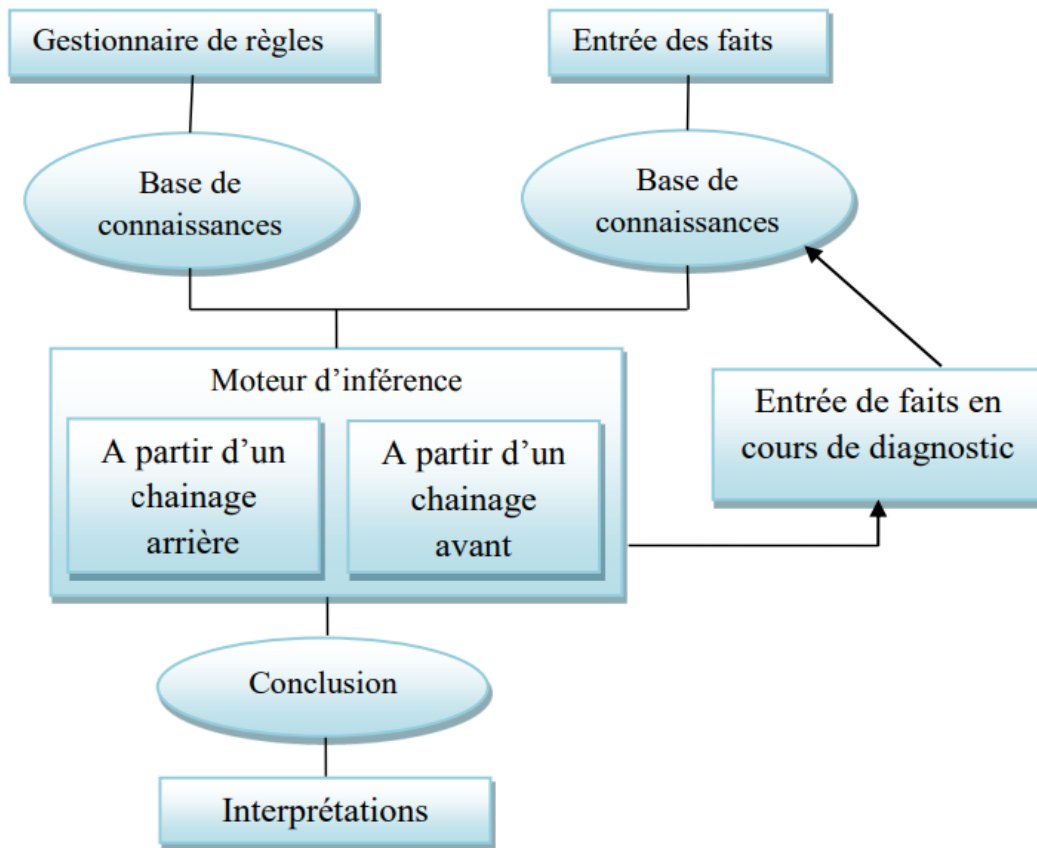


Figure I.19 Architecture générale d'un système expert de diagnostic

La base de connaissances : La base de connaissances est souvent la partie stable du système, elle est immédiatement exécutée dès l'appel du système et c'est elle qui rassemble les connaissances nécessaires à la résolution des problèmes du domaine.

La base de faits : Les faits sont les objets élémentaires de l'application ; la base de faits qui au départ contient les informations initiales relatives au domaine s'enrichit progressivement de conclusions ou de nouveaux faits déduits par le moteur d'inférence.

Le moteur d'inférence : Le moteur d'inférence exploite de façon indépendante les informations contenues dans la base de faits et la base de connaissances pour fournir une solution au problème donné. Par ailleurs, le moteur d'inférence produit dans son mécanisme de raisonnement de nouveaux faits qui sont mémorisés dans la base de faits.

I.11.2.2 Méthodes basées sur l'intelligence artificielle (IA)

En dépit des diverses techniques mentionnées précédemment, ces dernières années, la surveillance et la détection de défaut des machines électriques se sont éloignées des techniques traditionnelles pour s'orienter vers des techniques dites d'intelligence artificielle (IA).

L'intelligence artificielle (IA) est une branche de l'informatique qui traite la reproduction par la machine de certains aspects de l'intelligence humaine tels qu'apprendre à partir d'une expérience passée à reconnaître des formes complexes et à effectuer des déductions

L'intérêt de recourir à l'intelligence artificielle (IA) pour résoudre le problème de diagnostic des défaillances, est dû principalement aux avantages suivants :

- La non disponibilité de modèle explicite pour le cas de défaillances est un problème que les techniques de l'intelligence artificielle (IA) peuvent résoudre car basées sur la non nécessité de modélisation.
- L'insertion de connaissance d'expert, données sous forme linguistique soit pour la détection, ou la localisation de défauts ce qui permet de rendre le système de contrôle commande apte à effectuer l'insertion automatique des symptômes et la mémorisation de chaque nouvel acte (possibilité de son auto instruction).
- La simplicité dans la mise en œuvre, une fois préparées les règles d'expert.
- La robustesse face aux perturbations.

Parmi ces méthodes, nous pouvons citer :

- a. Réseaux de neurones artificiels.
- b. Reconnaissances des formes (RDF).
- c. Logique floue.
- d. **LS.SVM (Least squares support vector machine).**

I.11.2.3 Diagnostic basé sur le traitement des signaux

Le principe des méthodes d'analyse des signaux repose sur l'existence de caractéristiques propres au fonctionnement sain ou défaillant du procédé. L'apparition d'un défaut étant à l'origine de nombreux phénomènes tels que le bruit, l'échauffement et les vibrations. Ces symptômes sont la manifestation apparente d'une modification des caractéristiques temporelles et fréquentielles des grandeurs électriques et mécaniques. Les grandeurs accessibles et mesurables d'une machine asynchrone pouvant être utilisées pour le diagnostic sont :

- Les courants absorbés ;
- Le flux de dispersion ;
- La vitesse rotorique.

Les outils de traitement du signal font appel à des méthodes statistiques (changement de moyenne, rupture de modèle, analyse spectrale, analyse temps-fréquence, ondelettes). Parmi ces signaux, il semblerait que l'analyse du spectre du courant statorique soit la plus révélatrice et la plus fiable pour le diagnostic. La surveillance par l'analyse du flux dans l'entrefer n'est pas attractive car elle nécessite une intervention sur le moteur lui-même pour être fiable. Cela ne peut se faire aisément dans le milieu industriel. En effet, il faudrait doter ces actionneurs de capteurs in situ. Une autre possibilité instrumentée. Un autre moyen consiste à traiter des signaux issus de flux de fuites. Ils contiennent les informations relatives au fonctionnement. Hélas, il a été montré que ceux-ci sont fortement dépendants de la charge. Donc, un diagnostic fiable sera très difficile à faire, surtout dans un milieu industriel.

I.12 CONCLUSION

Nous avons présenté dans ce chapitre les différentes définitions lie au diagnostic, la constitution de la MAS, les principaux défauts qui sont les plus récurrents dans cette machine, et une analyse critique faite sur les méthodes du diagnostic, il a été déduit que les méthodes du diagnostic des défaillances sont bien adaptées au système à étudier, car la modélisation physique de toutes les défaillances de la machine asynchrone ne peut pas être réalisée.

Par ailleurs, le chapitre suivant sera consacré à la modélisation du comportement de la machine asynchrone vis-à-vis aux défauts et dans le cas du fonctionnement normal. Et en présence du default.

Chapitre II

Modélisation de défaut de court-circuit entre spires statorique

II.1 Introduction

La modélisation des machines est la description mathématique de la conversion électromagnétique d'énergie par des modèles mathématiques (ensembles des équations différentielles et algébriques).

Le premier objectif de ce chapitre est la présentation d'un modèle mathématique de la machine asynchrone saine définie dans un référentiel biphasé, à partir du référentiel triphasé conventionnel. Le deuxième objectif est la présentation d'un modèle mathématique de la machine asynchrone avec un défaut de court-circuit entre spires définie aussi dans un référentiel biphasé, à partir du référentiel triphasé conventionnel.

Les machines électriques sont des systèmes très complexes, pour en tenir compte dans leurs modélisations de tous les phénomènes physiques qu'elles contiennent. Il est alors essentiel d'admettre quelques hypothèses simplificatrices conventionnelles

II.2 Hypothèses considérées pour le modèle circuit électrique de la MAS

Afin de modéliser la machine asynchrone par un modèle de type circuit électrique, certaines hypothèses simplificatrices, ne mettant pas en cause les phénomènes principaux, sont admises :

- La machine est symétrique à entrefer constant.
- Le bobinage statorique et la cage d'écureuil de la machine saine sont considérés équilibrés.
- Le rotor est muni d'une cage d'écureuil qui ne génère pas d'harmoniques supplémentaires.
- La machine est considérée non saturée et la répartition de la force magnétomotrice dans l'entrefer est supposée sinusoïdale (suffisamment d'encoches par pôle et phase).
- L'effet de la denture et les harmoniques qu'il génère sont négligés (stator et rotor sont supposés lisses).
- Les effets d'extrémités sont négligés.

II.3 Modélisation de la machine asynchrone saine

Le comportement dynamique de la machine asynchrone est complexe à cause du phénomène d'induction qui est le principe fondamental sur lequel fonctionne cette machine. L'ensemble des hypothèses admises permet d'écrire :

$$\begin{aligned} R_s &= R_{as} = R_{bs} = R_{cs} & , & & R_r &= R_{ar} = R_{br} = R_{cr} \\ L_s &= L_{as} = L_{bs} = L_{cs} & , & & L_r &= L_{ar} = L_{br} = L_{cr} \\ M_s &= M_{abs} = M_{acs} = M_{bcs} & , & & M_r &= M_{abr} = M_{acr} = M_{bcr} \end{aligned} \quad (II-1)$$

Où :

- R_s : résistance des bobines statoriques.
- R_r : résistance des bobines équivalentes rotoriques.
- (L_s, M_s) et (L_r, M_r) : sont les inductances propres et mutuelles inductances entre phases des bobines

statoriques et des bobines équivalentes rotoriques.

II.3.1 Equation électrique de tension

La loi de Faraday permet d'écrire :

$$V = Ri + \frac{d\Phi}{dt} \quad (II-02)$$

Pour les trois phases on peut écrire les équations sous formes matricielle condensée :

$$[V_{abc}] = R[i_{abc}] + \frac{d}{dt}[\Phi_{abc}] \quad (II-03)$$

• Pour le stator :

$$\begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{as} \\ \Phi_{bs} \\ \Phi_{cs} \end{bmatrix} \quad (II-04)$$

• Pour le rotor :

$$\begin{bmatrix} V_{ar} \\ V_{br} \\ V_{cr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{ar} \\ \Phi_{br} \\ \Phi_{cr} \end{bmatrix} \quad (II-05)$$

II.3.2 Equation magnétique

Chaque flux comporte une interaction avec les courants de toutes les phases y compris la sienne (notion de flux / inductance propre).

Le flux total pour la phase (a) par exemple s'écrit comme suit :

$$\Phi_{as} = \underbrace{L_s i_{as} + M_s i_{bs} + M_s i_{cs}}_{\text{flux dus aux courants statorique}} + \underbrace{M_1 i_{ar} + M_3 i_{br} + M_2 i_{cr}}_{\text{flux dus aux courants rotoriques}} \quad (II-06)$$

Les coefficients instantanés de mutuelles inductances entre le rotor et le stator s'expriment en fonction de (θ) comme suite :

$M_1 = M_{sr} \cos(\theta)$: mutuelle inductance entre la phase (as) et (ar).

$M_2 = M_{sr} \cos(\theta - 2\pi/3)$: mutuelle inductance entre la phase (as) et (cr).

$M_3 = M_{sr} \cos(\theta + 2\pi/3)$: mutuelle inductance entre la phase (as) et (br).

Les équations, en grandeurs de phase, régissant le fonctionnement de la machine asynchrone sont données par :

$$[V_{abc s}] = [R_s][I_s] + \frac{d}{dt} [\Phi_{abc s}] \quad (II-07)$$

Le rotor est en court-circuit, les tensions sont nulles donc :

$$[V_{abc r}] = [R_r][I_r] + \frac{d}{dt} [\Phi_{abc r}] = [0] \quad (II-08)$$

Où :

$$[V_{abc s}] = [V_{as} \quad V_{bs} \quad V_{cs}]^t \quad ; \quad [I_{abc s}] = [i_{as} \quad i_{bs} \quad i_{cs}]^t$$

sont respectivement les vecteurs tension et courant statorique.

$$[V_{abc\ r}] = [V_{a\ r} \ V_{b\ r} \ V_{c\ r}]^t \quad ; \quad [I_{abc\ r}] = [i_{a\ r} \ i_{b\ r} \ i_{c\ r}]^t$$

sont respectivement la vecteur tension et courant rotorique.

On peut écrire les flux de toutes les phases sous forme matricielle comme suit :

$$\begin{bmatrix} \Phi_{sa} \\ \Phi_{sb} \\ \Phi_{sc} \\ \Phi_{ra} \\ \Phi_{rb} \\ \Phi_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & M_s & M_s & M_1 & M_3 & M_2 \\ M_s & L_s & M_s & M_2 & M_1 & M_3 \\ M_s & M_s & L_s & M_3 & M_2 & M_1 \\ M_1 & M_2 & M_3 & L_r & M_r & M_r \\ M_3 & M_1 & M_2 & M_r & L_r & M_r \\ M_2 & M_3 & M_1 & M_r & M_r & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \\ I_{ra} \\ I_{rb} \\ I_{rc} \end{bmatrix} \quad (II-09)$$

En remarque que la matrice des flux réel fait apparaître quatre sous matrices d'inductances.

$$\begin{bmatrix} \Phi_{abc\ s} \\ \Phi_{abc\ r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{ss} & M_{sr} \\ M_{rs} & L_{rr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{abc\ s} \\ I_{abc\ r} \end{bmatrix} \quad (II-10)$$

avec

$$[M_{sr}] = [M_{rs}]^t \quad ; \quad [L_{ss}] = \begin{bmatrix} L_s & M_s & M_s \\ M_s & L_s & M_s \\ M_s & M_s & L_s \end{bmatrix} \quad ; \quad [L_{rr}] = \begin{bmatrix} L_r & M_r & M_r \\ M_r & L_r & M_r \\ M_r & M_r & L_r \end{bmatrix}$$

Sont des matrices d'inductances statoriques et rotoriques. où

L_s : est l'inductance propre d'une phase statorique.

L_r : est l'inductance propre d'une phase rotorique.

M_s : est l'inductance mutuelle entre deux phases statoriques.

M_r : est l'inductance mutuelle entre deux phases rotoriques.

M_{sr} : est le maximum de l'inductance mutuelle entre une phase statorique et une phase rotorique.

$$[M_{sr}] = M_{sr} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta + 2\pi/3) & \cos(\theta - 2\pi/3) \\ \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta) & \cos(\theta + 2\pi/3) \\ \cos(\theta + 2\pi/3) & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta) \end{bmatrix}$$

est la matrice des mutuelles inductances stator-rotor qui est une matrice circulante.

où : $[M_{sr}]$: Matrice des inductances mutuelles du couplage stator-rotor.

θ : Angle électrique définit la position relative instantanée entre les axes rotoriques et les axes statoriques qui sont choisi comme axes de références.

On obtient finalement :

$$[V_{abc\ s}] = [R_s][I_s] + \frac{d}{dt} ([L_s][I_{abc\ r}] + [M_{sr}][I_{abc\ s}]) \quad (II-11)$$

Le rotor est en court-circuit, les tensions sont nulles donc :

$$[V_{abc\ r}] = [R_r][I_r] + \frac{d}{dt} ([L_r][I_{abc\ s}] + [M_{rs}][I_{abc\ r}]) = [0] \quad (II-12)$$

II.3.3 Équations mécaniques

L'équation mécanique de la machine s'écrit comme suit :

$$J \frac{d\Omega}{dt} = C_{em} - C_r - f\Omega \quad (II-13)$$

avec :

J : Moment d'inertie.

Ω : Vitesse de rotation rotorique de la machine.

C_{em} : Couple électromagnétique.

C_r : Couple résistant (couple de charge).

f : Coefficient de frottement.

II.3.4 Couple électromagnétique [mas]

Le couple électromagnétique s'exprime par la dérivée partielle de stockage d'énergie électromagnétique par rapport à l'angle géométrique de rotation du rotor.

$$C_{em} = \frac{d}{d\theta_m} W_{mag} = P \frac{d}{d\theta_e} W_{mag} \quad (II-14)$$

avec

$$W_{mag} = \frac{1}{2} ([I_s]^t [\Phi_s] + [I_r]^t [\Phi_s]) \quad (II-15)$$

D'où

$$C_{em} = p [I_{as} \quad I_{bs} \quad I_{cs}] \frac{d}{dt} [M_{sr}] [I_{ar} \quad I_{br} \quad I_{cr}]^t \quad (II-16)$$

Avec : p : Nombre de pair de pôle

II.3.5 Transformation triphasé- biphasé

II.3.5.1 Transformation de CLARKE

Considérons un système composé de trois grandeurs triphasées $\mathbf{G}_{123}$, dépendant du temps. Il existe plusieurs transformations pour faire correspondre au système triphasé deux grandeurs diphasées $\mathbf{G}_{\alpha\beta}$ et une grandeur homopolaire $\mathbf{G}_0$. Une des plus connue est celle de Clarke, définie par la matrice $[\mathbf{C}_3]$ que l'on décompose en deux sous-matrices. Elle s'écrit sous la forme suivante :

$$[\mathbf{C}_3] = [[\mathbf{C}_{31}], [\mathbf{C}_{32}]] \quad (II-17)$$

avec

$$[\mathbf{C}_{31}] = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} ; [\mathbf{C}_{32}] = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \quad (II-18)$$

Les propriétés de sous-matrices sont :

$$[C_{31}][C_{32}]^t = 0 \quad (II-19)$$

$$[C_{31}]^t[C_{32}] = 0 \quad (II-20)$$

$$[C_{31}]^{-1} = \left[\frac{1}{3}[C_{31}]^t; \frac{2}{3}[C_{32}]^t \right] \quad (II-21)$$

On peut écrire :

$$[G_{123}] = [C_{31}]G_o + [C_{32}][G_{\alpha\beta}] \quad (II-22)$$

L'inconvénient de la transformation de Clarke est qu'elle n'est pas normée, elle ne conserve donc pas la puissance. La transformation de Concordia permet de pallier à cet inconvénient.

II.3.5.2 Transformation de Concordia

La machine triphasée peut être transformée en une machine biphasée équivalente à l'aide de la transformation de Concordia :

Un vecteur $\mathbf{X}$ de grandeur triphasée peut être décrit par les signaux sur chacune des trois phases (**123**) : $\mathbf{X}_{123} = [\mathbf{X}_1 \quad \mathbf{X}_2 \quad \mathbf{X}_3]^t$. Un changement de repère approprié (**123**) à un repère (**oαβ**) qui permet de réduire la complexité du système sous certaines hypothèses. Supposant que l'axe **o** soit orienté suivant la composante homopolaire du système triphasé (c'est à dire la somme des trois signaux de phase). Lorsque le système triphasé est équilibré, cette composante est nulle, ce qui permet de réduire

le système triphasé à un système biphasé (axes **αβ**). Sans prise en compte de la composante homopolaire (hypothèse : $(\mathbf{X}_1 + \mathbf{X}_2 + \mathbf{X}_3) = 0$:

$$[G_{\alpha\beta}] = [T_{23}][G_{123}] \text{ avec } [T_{23}] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \quad (II-23)$$

Avec prise en compte de la composante homopolaire :

$$[G_{\alpha\beta o}] = [T_{33}][G_{123}] \text{ avec } [T_{33}] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (II-24)$$

La transformation de Concordia présente les propriétés suivantes :

- elle est orthogonale :

$$[T_3]^t = [T_3]^{-1}$$

$$[T_{31}][T_{31}]^t = 1$$

$$[T_{32}][T_{32}]^t = 1$$

$$[T_{31}][T_{32}]^t = 0$$

$$[T_{32}][T_{31}]^t = 0$$

- elle est normée et conserve donc la puissance

II.3.5.3 Transformation de Park

La transformation de Park consiste à transformer le système d'enroulements triphasés statoriques d'axes a, b, c, en un système équivalent à deux enroulements biphasés d'axes d, q créant la même force magnétomotrice.

La composante homopolaire ne participe pas à cette création de sorte que l'axe homopolaire peut être choisi orthogonal au plan (d, q)

La matrice de Park en générale définie par :

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta + 2\pi/3) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta + 2\pi/3) \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \quad (II-25)$$

La transformation de Park:

$$[G_{dqo}] = [P(\theta)][G_{abc}]$$

Tel que

G_{abc} : grandeurs triphasées équilibrées.

G_{dqo} : grandeurs biphasées dans le repère (d, q).

La transformation de Park inverse : $[G_{abc}] = [P(\theta)]^{-1}[G_{dqo}]$

Sachant que

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

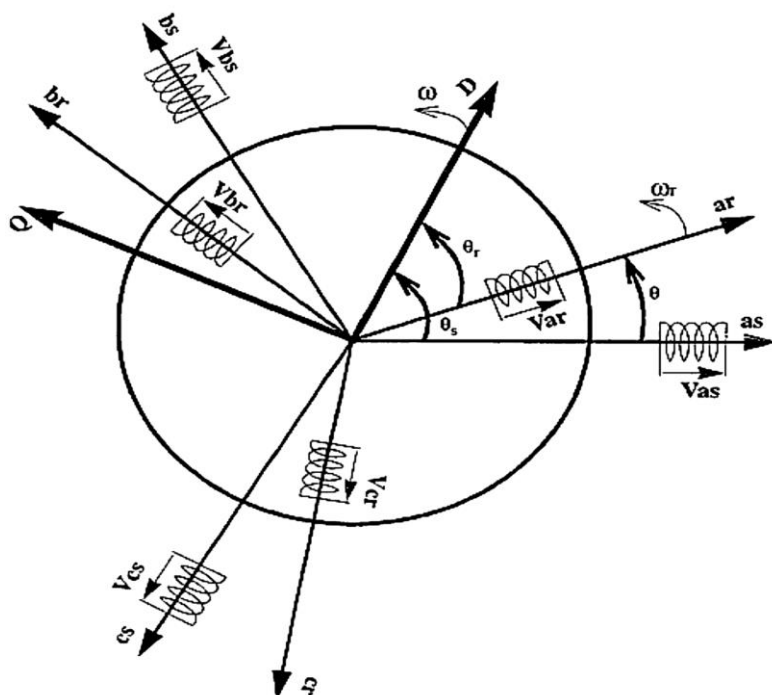


Figure II-1 Repérage angulaire des systèmes d'axes dans l'espace électrique

Cependant, c'est au niveau de l'écriture des flux que ça devient intéressant :

$$\begin{bmatrix} \Phi_{dqs} \\ \Phi_{dqr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{dqs} \\ I_{dqr} \end{bmatrix} \quad (II-26)$$

avec :

$L_s = L_s - M_s$: Inductance cyclique propre du stator.

$L_r = L_r - M_r$: Inductance cyclique propre du rotor.

$[M] = \frac{3}{2} M_{sr}$: Inductance cyclique mutuelle stator-rotor.

Le système matriciel (II-26) peut également être écrit sous la forme suivante :

$$\begin{aligned} \Phi_{ds} &= L_s i_{ds} + M i_{dr} \\ \Phi_{qs} &= L_s i_{qs} + M i_{qr} \\ \Phi_{dr} &= L_r i_{dr} + M i_{ds} \\ \Phi_{qr} &= L_r i_{qr} + M i_{qs} \end{aligned} \quad (II-27)$$

Et les équations des tensions deviennent :

$$\begin{aligned}
V_{ds} &= R_s i_{ds} + \frac{d\Phi_{ds}}{dt} - \Phi_{qs} \frac{d\theta_a}{dt} \\
V_{qs} &= R_s i_{qs} + \frac{d\Phi_{qs}}{dt} + \Phi_{ds} \frac{d\theta_a}{dt} \\
V_{dr} &= R_r i_{dr} + \frac{d\Phi_{dr}}{dt} - \Phi_{qr} \frac{d(\theta_a - \theta_r)}{dt} \\
V_{qr} &= R_r i_{qr} + \frac{d\Phi_{qr}}{dt} + \Phi_{dr} \frac{d(\theta_a - \theta_r)}{dt}
\end{aligned} \tag{II-28}$$

où :

$\frac{d\theta_s}{dt}$ et $\frac{d\theta_r}{dt}$ sont les dérivées des angles des transformations de Park des grandeurs statoriques et rotoriques respectivement.

II.3.6 Choix du Référentiel

Les équations de la machine asynchrone triphasée peuvent être exprimées dans différents référentiels selon la vitesse attribuée au repère (d, q).

II.3.6.1 Référentiel lié au stator

Dans ce référentiel, les axes (d, q) sont immobiles par rapport au stator ($\omega_a = 0$).

Dans ce cas, la phase a_{s1} et d coïncident. Ce référentiel est le mieux adapté pour travailler avec les grandeurs instantanées et dont l'avantage ne nécessite pas une transformation vers le système réel.

On remplace dans le système (II-34) avec :

$$\frac{d\theta_s}{dt} = 0 \text{ et } \frac{d\theta}{dt} = \frac{d}{dt}(\theta_s - \theta_r) = -\omega_r \tag{II-29}$$

Ce référentiel est choisi lorsqu'on désire étudier les variations de la vitesse de rotation, associé ou non avec des variations de la fréquence d'alimentation.

II.3.6.2 Référentiel lié au rotor

Dans ce référentiel, les axes (d, q) sont immobiles par rapport au rotor tournant à une vitesse ω_r donc ($\omega_a = \omega_r$).

$$\frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s \text{ et } \frac{d\theta}{dt} = \frac{d}{dt}(\theta_a - \theta_r) = 0 \tag{II-30}$$

Ce référentiel est intéressant dans les problèmes où la vitesse de rotation est considérée comme constante, par exemple pour l'étude des contraintes d'un court-circuit.

II.3.6.3 Référentiel lié au champ tournant

Dans ce référentiel, les axes (d, q) sont immobiles par rapport au champ électromagnétique créé par les deux étoiles du stator ($\omega_a = \omega_s$).

Nous pouvons alors écrire :

$$\begin{aligned}
V_{ds} &= R_s i_{ds} + \frac{d\Phi_{ds}}{dt} - \omega_s \Phi_{qs} \\
V_{qs} &= R_s i_{qs} + \frac{d\Phi_{qs}}{dt} + \omega_s \Phi_{ds} \\
V_{dr} &= R_r i_{dr} + \frac{d\Phi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega_r) \Phi_{qr} \\
V_{qr} &= R_r i_{qr} + \frac{d\Phi_{qr}}{dt} + (\omega_s - \omega_r) \Phi_{dr}
\end{aligned} \tag{II-31}$$

avec

$$\begin{aligned}
\Phi_{ds} &= L_s i_{ds} + M i_{dr} \\
\Phi_{qs} &= L_s i_{qs} + M i_{qr} \\
\Phi_{dr} &= L_r i_{dr} + M i_{ds} \\
\Phi_{qr} &= L_r i_{qr} + M i_{qs}
\end{aligned} \tag{II-32}$$

Le glissement g est défini par la relation :

$$g = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s} \quad \text{et} \quad \omega_r = g \omega_s \tag{II-33}$$

Donc

$$\begin{aligned}
V_{ds} &= R_s i_{ds} + \frac{d\Phi_{ds}}{dt} - \omega_s \Phi_{qs} \\
V_{qs} &= R_s i_{qs} + \frac{d\Phi_{qs}}{dt} + \omega_s \Phi_{ds} \\
V_{dr} &= R_r i_{dr} + \frac{d\Phi_{dr}}{dt} - g \omega_s \Phi_{qr} \\
V_{qr} &= R_r i_{qr} + \frac{d\Phi_{qr}}{dt} + g \omega_s \Phi_{dr}
\end{aligned} \tag{II-34}$$

Ce référentiel est généralement utilisé dans le but de pouvoir appliquer une commande de vitesse, de couple, etc. puisque les grandeurs dans ce référentiel sont de forme continue.

II.3.7 Expression du couple électromagnétique instantané

Dans le cas général, la puissance électrique instantanée (P_e) fournie aux les enroulements statoriques et rotoriques s'exprime en fonction des grandeurs d'axes d, q :

$$p_e = V_{ds} i_{ds} + V_{qs} i_{qs} + V_{dr} i_{dr} + V_{qr} i_{qr} \tag{II-35}$$

Elle se décompose en trois séries de termes qui correspondent respectivement aux trois colonnes des équations des tensions :

- **Puissance dissipée en pertes joule :**

$$R_s (i_{ds}^2 + i_{qs}^2) + R_r (i_{dr}^2 + i_{qr}^2) \tag{II-36}$$

- **Puissance représentant les échanges d'énergie électromagnétique avec les sources :**

$$i_{ds} \left(\frac{d\Phi_{ds}}{dt} \right) + i_{qs} \left(\frac{d\Phi_{qs}}{dt} \right) + i_{dr} \left(\frac{d\Phi_{dr}}{dt} \right) + i_{qr} \left(\frac{d\Phi_{qr}}{dt} \right) \tag{II-37}$$

- **Puissance mécanique P_m regroupant l'ensemble des termes liés aux dérivées des positions angulaires :**

$$p_e = (\Phi_{ds} i_{qs} - \Phi_{qs} i_{ds}) \left(\frac{d\theta_s}{dt} \right) + (\Phi_{dr} i_{qr} - \Phi_{qr} i_{dr}) \left(\frac{d\theta_r}{dt} \right) \quad (II-38)$$

En tenant compte des équations des flux on peut donc écrire que :

$$p_e = (\Phi_{ds} i_{qs} - \Phi_{qs} i_{ds}) \left(\frac{d(\theta_s - d\theta_r)}{dt} \right) \quad (II-39)$$

Où la puissance mécanique est aussi égale à $C_e \cdot \Omega$ ou à $C_e \cdot \omega/p$, on en tire l'expression du couple

$$C_e = p(\Phi_{ds} i_{qs} - \Phi_{qs} i_{ds}) \quad (II-40)$$

II.4 Modèle multi-enroulement

II.1 Hypothèses simplificatrices

Pour mettre en évidence l'influence des défauts électriques sur les grandeurs temporelles de la machine asynchrone, il est indispensable de poser certaines hypothèses qui ont pour but de faciliter la mise en équations des circuits électriques de la machine. Mais, il faut imposer un minimum d'hypothèses si nous voulons que le vecteur de sortie soit le plus exploitable possible

- Circuit magnétique linéaire (la perméabilité du fer très grande devant 1).
- Effet de peau est négligeable.
- Barres rotoriques sont isolées les unes des autres.
- Pertes fer, les effets capacitifs et les effets thermiques sont négligeables.
- Pas d'effet d'excentricité.

II.2 Equations électriques du stator :

Le stator de la machine étudiée est un stator triphasé de m encoches statoriques. Une phase statorique est composée de plusieurs bobines logées dans les encoches du stator. Ces bobines statoriques sont placées de sorte à obtenir une distribution de la force magnétomotrice la plus sinusoïdale possible le long de l'entrefer. La (figure II.7) donne une représentation de la modélisation choisie pour les trois phases statoriques de la machine asynchrone. La valeur des inductances est fonction du nombre de bobines ainsi que du type de bobinage mis en place dans les encoches statoriques (concentrique, imbriqué, ...), celle des résistances dépend essentiellement de la longueur, de la section et du type de cuivre utilisé

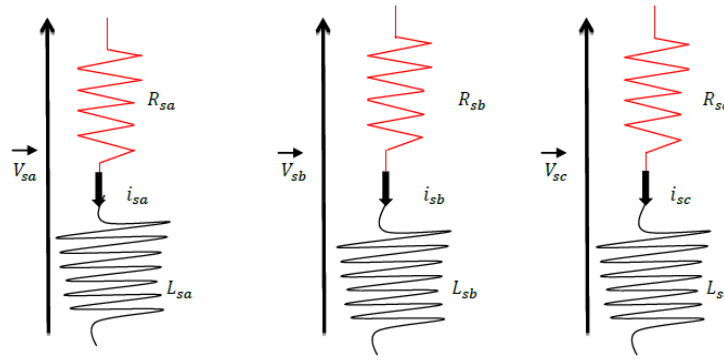


Figure II-6 Circuits éclectiques des trois phases statoriques.

L'équation de tension statorique se met sous la forme suivante :

$$[V_s] = [R_s] \cdot [i_s] + \frac{d[\Phi_s]}{dt} \quad (II-41)$$

où

$[V_s]$ représenter le vecteur de tension :

$[I_s]$ le vecteur de courant

$[\Phi_s]$ le vecteur de flux.

$$[\Phi_s] = [L_s][i_s] + [M_{sr}][J_r] \quad (II-42)$$

Le vecteur $[J_r]$ regroupe les $(N_r + 1)$ courants de boucles rotoriques :

$$[J_r] = [J_{r1} J_{r2} J_{r3} \dots J_{rk} \dots J_{rNr} J_{rcc}] \quad (II-43)$$

Les matrices $[L_s]$, $[R_s]$ et $[M_{sr}]$ sont définies au début du chapitre (II)

II.3 Equations électriques du rotor :

La cage d'écureuil de la machine se compose de N_r encoches rotoriques qui peuvent être soit ouvertes soit fermées sur l'entrefer. La cage rotorique peut se décomposer en $(N_r + 1)$ circuits électriques rotoriques indépendants. En effet, si nous considérons deux barres rotoriques adjacentes ainsi que les segments d'anneau de court-circuit les reliant, nous obtenons une boucle rotorique fermée qui peut être étudiée sous forme de circuit électrique. Un des anneaux de court-circuit crée par conséquent une boucle supplémentaire ce qui porte le nombre de boucle totale à $(N_r + 1)$. Nous associons à chacune de ces boucles un courant, ce qui nous amène à calculer $(N_r + 1)$ courants rotoriques. Chaque barre rotorique est modélisée par une inductance en série avec une résistance, tout comme chaque segment d'anneau de court-circuit. La (Figure II-7) nous donne la forme des circuits électriques adoptée pour la modélisation de la cage d'écureuil rotorique

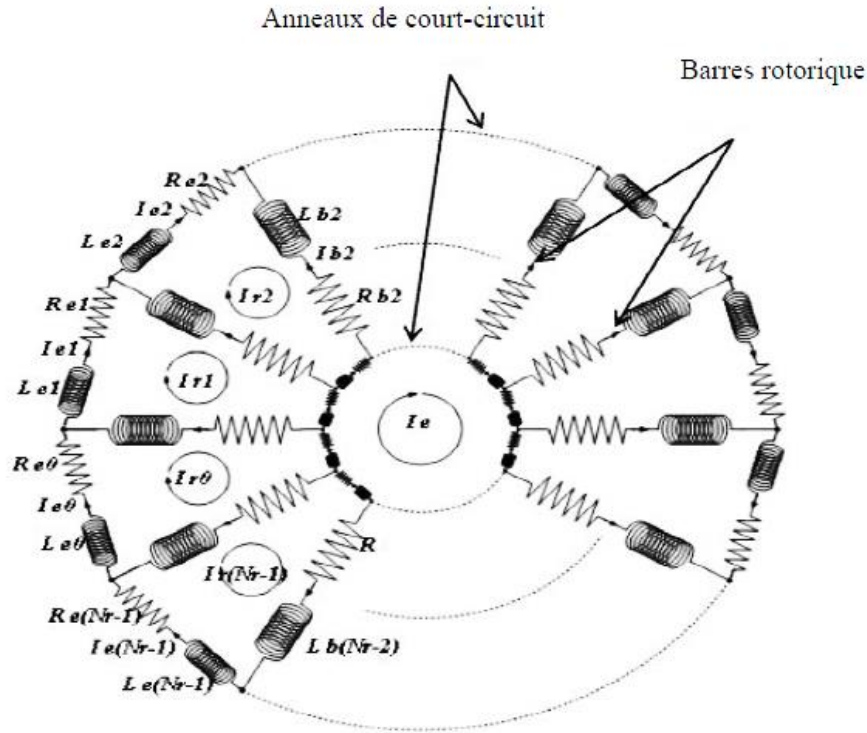


Figure II-7 Schéma équivalent de la cage d'écureuil rotorique

Tout comme pour les équations du stator de la machine asynchrone, les équations des circuits électriques rotoriques peuvent se mettre sous une forme matricielle. On relie les tensions de chacune des boucles rotoriques avec les courants et les flux, grâce à l'équation

$$[Vr] = [Rr].[jr] + \frac{d[\Phi r]}{dt} \quad (II-44)$$

Le vecteur $[\Phi r]$, donné dans l'équation précédente, se décompose de la façon suivante :

$$[\Phi r] = [\Phi r_1 \Phi r_2 \Phi r_3 \dots \Phi r_k \dots \Phi r_{Nr} \Phi r_{cc}]^t \quad (II-45)$$

$$[\Phi r] = [L_r][j_r] + [M_{rs}][i_r] \quad (II-46)$$

Les matrices $[R_r]$, $[L_r]$ et $[M_{rs}]$ sont définies au début du chapitre II.

II.4 Equations mécaniques de la machine :

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

$$J \frac{d\Omega}{dt} = C_e - C_r - C_f \quad (II-47)$$

$$C_f = f\Omega \quad \Omega = \omega/p \quad \text{et} \quad \omega = \frac{d\theta}{dt}$$

L'expression du couple électromagnétique C_e peut être déterminée grâce à la relation :

$$C_e = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} i_r \\ j_r \end{bmatrix}^t \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} [L_{ss}] & [M_{sr}] \\ [M_{rs}] & [L_{rr}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_r \\ j_r \end{bmatrix} \quad (II-48)$$

II.5 Modèle multi-spires

Pour avoir un modèle plus fin, on représente les phases statoriques comme un enroulement polyphasé dont le nombre de phases est égale au nombre de spires. Chaque spire est constituée d'une résistance et inductance.

Les équations des tensions pour les « 3. N_s » spires du stator et les trois phases du rotor peuvent être écrites sous la forme suivante :

$$[V_{ss}] = [R_{ss}] \cdot [i_{ss}] + \frac{d[\Phi_{ss}]}{dt} \quad (II-49)$$

$$[V_r] = [R_r] \cdot [i_r] + \frac{d[\Phi_{rr}]}{dt} \quad (II-50)$$

N_s : Nombre de spires par phase.

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

$$[V_{ss}] = [V_{sa1} \ V_{sa2} \ \dots \ V_{san} \ V_{sb1} \ V_{sb2} \ \dots \ V_{sbn} \ V_{sc1} \ V_{sc2} \ \dots \ V_{sbn}]^t \quad (II-51)$$

$$[i_{ss}] = [i_{sa1} \ i_{sa2} \ \dots \ i_{san} \ i_{sb1} \ i_{sb2} \ \dots \ i_{sbn} \ i_{sc1} \ i_{sc2} \ \dots \ i_{sbn}]^t \quad (II-52)$$

$$[\Phi_{ss}] = [\Phi_{sa1} \ \Phi_{sa2} \ \dots \ \Phi_{san} \ \Phi_{sb1} \ \Phi_{sb2} \ \dots \ \Phi_{sbn} \ \Phi_{sc1} \ \Phi_{sc2} \ \dots \ \Phi_{sbn}]^t \quad (II-53)$$

$$[V_r] = [V_{ra} \ V_{rb} \ V_{rc}]^t \quad ; \quad [I_r] = [i_{ra} \ i_{rb} \ i_{rc}]^t \quad ; \quad [\Phi_r] = [\Phi_{ra} \ \Phi_{rb} \ \Phi_{rc}]^t$$

Les flux totalisés $[\Phi_s]$ et $[\Phi_r]$ des phases statoriques et rotoriques s'expriment sous la forme :

$$[\Phi_s] = [L_{ss}][i_{ss}] + [M_{sr}][I_r] \quad (II-54)$$

$$[\Phi_r] = [L_r][i_r] + [M_{rs}][I_r] \quad (II-55)$$

En introduisant les équations (II.55) et (II.56) dans (II.49) et (II.50), nous obtenons le système d'équations électriques nécessaire à l'étude du fonctionnement de la machine :

$$[V_s] = [R_s] \cdot [i_s] + \frac{d\{[L_s][i_s]\}}{dt} + \frac{d\{[M_{sr}][I_r]\}}{dt} \quad (II-56)$$

$$[V_r] = [R_r] \cdot [i_r] + \frac{d\{[L_r][i_r]\}}{dt} + \frac{d\{[M_{rs}]^t[i_s]\}}{dt} \quad (II-57)$$

où :

$[R_{ss}]$: La matrice de la résistance de la spire statorique.

$[i_{ss}]$: La matrice du courant de la spire statorique.

$[L_{ss}]$: La matrice de l'inductance du la spire statorique.

$[\mathbf{M}_{ssr}]$: La matrice de mutuelle entre la spire statorique et équivalente rotorique.

$[\mathbf{V}_{ss}]$: La matrice de tension de la spire statorique.

$[\mathbf{M}_{rss}]$: La matrice de mutuelle entre la spire rotorique et statorique

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

$$J \frac{d\Omega}{dt} = C_e - C_r - C_f \quad (II-58)$$

$$C_f = f\Omega \quad \Omega = \omega/p \quad \text{et} \quad \omega = \frac{d\theta}{dt}$$

L'expression du couple électromagnétique C_e peut être déterminée grâce à la relation :

$$C_e = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} i_r \\ J_r \end{bmatrix}^t \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} [L_{ss}] & [M_{sr}] \\ [M_{sr}]^t & [L_{rr}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_r \\ J_r \end{bmatrix} \quad (II-59)$$

II.6 Modèle de la machine asynchrone avec défaut :

Nous définissons un défaut entre-spires comme étant un court-circuit entre les spires d'une même phase via une résistance dont la valeur définit la sévérité du défaut. En pratique, ce défaut peut être dû à une altération des isolants (vernis ou émail) sur les fils du cuivre. Nous représentons une telle situation par un circuit supplémentaire liant une partie de la phase en défaut vers le point neutre comme indiqué sur la figure [3]. Dans la (**Figure II-8**) le bobinage de la phase a été subdivisé en deux parties : la partie saine ($as1$) et la partie court-circuitée ($as2$). La résistance de défaut (rf) dont la valeur varie entre l'infini pour une machine saine et zéro pour un court-circuit franc, n'est qu'une représentation globale de phénomènes locaux qui peuvent être dispersé tout le long des bobines.

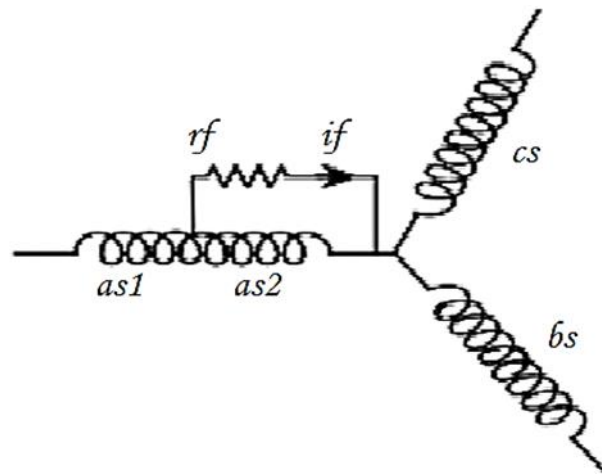


Figure II-8 Circuit équivalent prenant en compte la bobine de court-circuit

II.6.1 Modèle du défaut dans le repère abc :

On peut considérer la machine asynchrone avec défaut de court-circuit entre les spires de la phase (a) comme représentée la (Figure II-9).

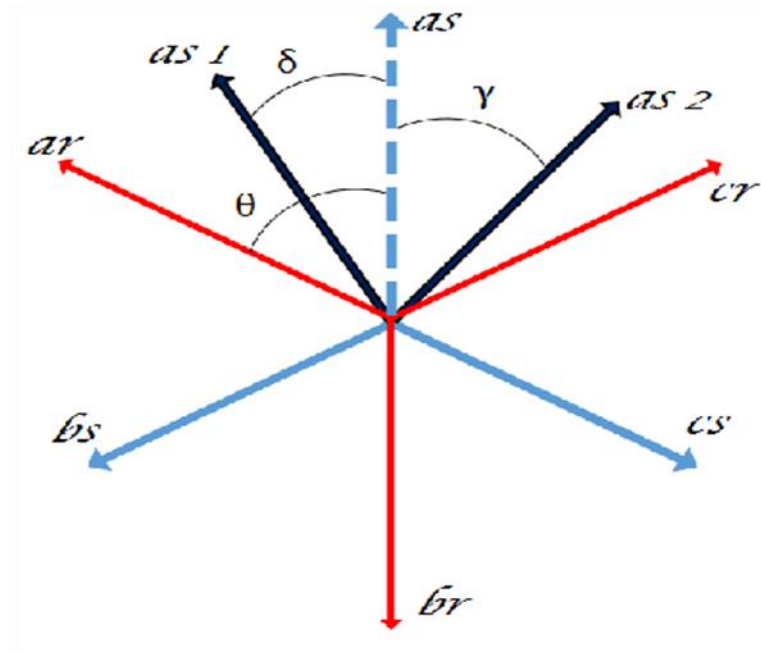


Figure II-9 Position des axes des parties de la bobine touchée par le court-circuit

Telle que :

$as1$: l'axe de la partie saine de la bobine.

$as2$: l'axe de la partie en court-circuit de la bobine.

L'angle δ représente le déplacement de l'axe de la partie ($as1$) par rapport à l'axe initial de la phase (as) lorsqu'elle est saine.

L'angle γ représente le déplacement de l'axe de la partie ($as2$) par rapport à l'axe initial de la phase (as)

lorsqu'elle est saine.

Les valeurs des angles δ et γ dépendent de la localisation physique du défaut mais aussi de la proportion des spires en court-circuit

D'où

$$\delta = \frac{\mu}{2} * \pi \quad \text{et} \quad \gamma = \frac{(1-\mu)}{2} * \pi$$

μ : le pourcentage des spires en court-circuit par rapport au nombre total de spires de la bobine.

Conformément au schéma de la Figure II-9, l'équation du circuit de la phase as peut-être écrite de la manière suivante :

$$\begin{aligned} V_{as} &= V_{as1} + V_{as2} \\ 0 &= V_{as2} - r_f i_f \end{aligned} \quad (II-60)$$

Dans le cadre des hypothèses émises au début de ce chapitre et en considérant la présence du défaut, les équations électriques des circuits statorique et rotorique peuvent être écrites sous la forme :

$$\begin{aligned} [V_{abcfs}] &= [R_{abcfs}] \cdot [i_{abcfs}] + \frac{d\{[L_{abcfs}][i_{abcfs}]\}}{dt} + \frac{d\{[M_{abcfs}][i_{abcf r}]\}}{dt} \\ [V_{abcf r}] &= [R_{abcf r}] \cdot [i_{abcf r}] + \frac{d\{[L_{abcf r}][i_{abcf r}]\}}{dt} + \frac{d\{[M_{abcf r}][i_{abcfs}]\}}{dt} \end{aligned} \quad (II-61)$$

avec :

$$\begin{aligned} [V_{abcfs}] &= [V_{as} V_{bs} V_{cs} 0]^t \\ [i_{abcfs}] &= [i_{as} i_{bs} i_{cs} i_{fs}]^t \end{aligned} \quad (II-62)$$

telle que

$$[R_{abcfs}] = \begin{bmatrix} (1-\mu)R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \mu R_s \end{bmatrix} \quad (II-63)$$

$$[L_{abcfs}] = \begin{bmatrix} (1-\mu)^2 L_s & M_{a1_b} & M_{a1_c} & M_{a1_{a2}} \\ M_{b_{a1}} & L_s & -L_s/2 & M_{b_{a2}} \\ M_{c_{a1}} & -L_s/2 & L_s & M_{c_{a2}} \\ M_{a2_{a1}} & M_{a2_b} & M_{a2_c} & \mu^2 L_s \end{bmatrix} \quad (II-64)$$

$$M_{a1_b} = M_{b_{a1}} = (1-\mu)L_s \cos\left(\frac{2\pi}{3} - \delta\right)$$

$$M_{a1_c} = M_{c_{a1}} = (1-\mu)L_s \cos\left(\frac{4\pi}{3} - \delta\right)$$

$$M_{a1_{a2}} = M_{a2_{a1}} = (1-\mu)\mu L_s \cos(\delta + \gamma)$$

$$M_{a2_b} = M_{b_a2} = \mu L_s \cos\left(\frac{2\pi}{3} + \gamma\right)$$

$$M_{a2_c} = M_{c_a2} = \mu L_s \cos\left(\frac{4\pi}{3} + \gamma\right)$$

$$[M_{abc\ fs}] = M_{sr} * C \quad (II-65)$$

$$C = \begin{bmatrix} (1 - \mu) \cos(\theta - \delta) & (1 - \mu) \cos(\theta - \delta + \frac{2\pi}{3}) & (1 - \mu) \cos(\theta - \delta + \frac{4\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{4\pi}{3}) & \cos(\theta) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{4\pi}{3}) & \cos(\theta) \\ \mu \cos(\theta + \gamma) & \mu \cos(\theta + \gamma + \frac{2\pi}{3}) & \mu \cos(\theta + \gamma + \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix}$$

Dans les conditions d'un défaut, le couple électromagnétique s'exprime aussi par la dérivation de la Co-énergie magnétique. Nous avons donc :

$$C_e = (i_{abc\ fs}) \frac{\partial M_{abc\ fsr}}{\partial \theta} i_{abc\ r} \quad (II-66)$$

II.6.2 Modèle de défaut dans le repère α, β :

Dans le cas d'un système équilibré, les composantes homopolaires sont nulles si bien que la machine peut être représentée uniquement dans le repère diphasé α, β . La présence d'un circuit supplémentaire correspondant au défaut conduit à l'introduction d'une variable supplémentaire pour décrire le système après la projection sur les axes α, β . Dans ces conditions, les équations des circuits statorique et rotorique d'une machine asynchrone dans un repère lié au stator en présence de défaut au stator sont de la forme.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} [V_{\alpha\beta fs}] \\ [V_{\alpha\beta r}] \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} [R_{\alpha\beta fs}] & 0 \\ 0 & [R_{\alpha\beta r}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [i_{\alpha\beta fs}] \\ [i_{\alpha\beta r}] \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} [L_{\alpha\beta fs}] & 0 \\ 0 & [L_{\alpha\beta r}] \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} [i_{\alpha\beta fs}] \\ [i_{\alpha\beta r}] \end{bmatrix} \\ &+ \begin{bmatrix} 0 & [M_{\alpha\beta fsr}] \\ [M_{\alpha\beta rfs}] & 0 \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} [i_{\alpha\beta fs}] \\ [i_{\alpha\beta r}] \end{bmatrix} + \dot{\theta}_r \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ [M_{\beta\alpha f rs}] & [L_{\beta\alpha r}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [i_{\alpha\beta fs}] \\ [i_{\alpha\beta r}] \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (II-67)$$

où

$$[R_{\alpha\beta fs}] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & -R'_{a2} \\ 0 & R_s & 0 \\ -R'_{a2} & 0 & R'_f \end{bmatrix} ; \quad [R_{\alpha\beta r}] = \begin{bmatrix} R_r & 0 \\ 0 & R_r \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned}
[L_{\alpha\beta f s}] &= \begin{bmatrix} L_s & 0 & M_{f\alpha s} \\ 0 & L_s & M_{f\beta s} \\ M_{f\alpha s} & M_{f\beta s} & L_f \end{bmatrix} ; & [L_{\alpha\beta r}] &= \begin{bmatrix} L_r & 0 \\ 0 & L_r \end{bmatrix} \\
[M_{\alpha\beta f sr}] &= \begin{bmatrix} \frac{3}{2}M_{sr} & 0 \\ 0 & \frac{3}{2}M_{sr} \\ M_{f\alpha r} & M_{f\beta r} \end{bmatrix} ; & [M_{\alpha\beta f rs}] &= [M_{\alpha\beta f sr}]^t \\
[M_{\beta\alpha f rs}] &= \begin{bmatrix} 0 & \frac{3}{2}M_{sr} & M_{f\beta r} \\ -\frac{3}{2}M_{sr} & 0 & -M_{f\alpha r} \end{bmatrix} ; & [L_{\alpha\beta r}] &= \begin{bmatrix} 0 & L_r \\ -L_r & 0 \end{bmatrix}
\end{aligned}$$

Avec

$$\begin{aligned}
R'_{a2} &= \sqrt{(2/3)}R_{a2} = \sqrt{(2/3)}\mu R_s ; & R'_f &= R_{a2} + r_f \\
M_{f\alpha r} &= \mu \cdot M_{sr} \cdot \cos(\gamma) ; & M_{f\beta r} &= \mu \cdot M_{sr} \cdot \cos(\gamma + \frac{\pi}{2}) \\
M_{f\alpha s} &= \sqrt{(2/3)}(L_{a2} + M_{a1a2} - M_{a2b}) \\
M_{f\beta s} &= 0
\end{aligned}$$

$$[X_{\alpha\beta f}] = [T][X_{abcf}]$$

avec

$$[T] = \begin{bmatrix} 1 & \frac{-1}{2} & \frac{-1}{2} & 0 \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{-\sqrt{3}}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix}$$

La matrice $[T]$ est appelée la matrice de Concordia étendue. On y ajoute une ligne pour représenter la phase en défaut. Il est à noter que la transformation triphasé-diphasé est effectuée uniquement sur les grandeurs du régime sain (axes triphasés équilibrés de la machine). Comme la composante homopolaire des courants est nulle, l'expression du couple est :

$$C_e = (i_{\alpha\beta f s}) \frac{\partial M_{\alpha\beta f sr}}{\partial \theta} i_{\alpha\beta r} \quad (II-68)$$

II.6.3 Mise sous forme d'état :

La simulation numérique de la machine nécessite la mise sous forme d'état des équations différentielles qui la régissent indépendamment du repère choisi. Dans le cas du repère de Concordia augmenté, nous avons

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{\alpha\beta f s} \\ i_{\alpha\beta r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [L_{\alpha\beta f s}] & [M_{\alpha\beta f sr}] \\ [M_{\alpha\beta f rs}] & [L_{\alpha\beta r}] \end{bmatrix}^{-1} \left(- \begin{bmatrix} [R_{\alpha\beta f s}] & 0 \\ \dot{\theta}_r \cdot [M_{\beta\alpha f rs}] & [K] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\alpha\beta f s} \\ i_{\alpha\beta r} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} [V_{\alpha\beta f s}] \\ [V_{\alpha\beta r}] \end{bmatrix} \right)$$

(II-68)

$$K = \begin{bmatrix} R_r & \dot{\theta}_r \cdot L_r \\ -\dot{\theta}_r \cdot L_r & R_r \end{bmatrix}$$

Nous regroupons les vecteurs tensions et courants dans des notations standard telles que :

$$X = \begin{bmatrix} [i_{\alpha\beta f s}] \\ [i_{\alpha\beta r}] \end{bmatrix} ; \quad U = \begin{bmatrix} [V_{\alpha\beta f s}] \\ [V_{\alpha\beta r}] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [V_{\alpha\beta f s}] \\ 0 \end{bmatrix}$$

Pour retrouver une forme classique d'équation d'état d'un système physique

$$(\dot{x} = Ax + Bu)$$

Nous avons :

$$A = - \begin{bmatrix} [L_{\alpha\beta f s}] & [M_{\alpha\beta f sr}] \\ [M_{\alpha\beta f rs}] & [L_{\alpha\beta r}] \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} [R_{\alpha\beta f s}] & 0 \\ \dot{\theta}_r \cdot [M_{\beta\alpha f rs}] & [K] \end{bmatrix} ,$$

$$B = \begin{bmatrix} [L_{\alpha\beta f s}] & [M_{\alpha\beta f sr}] \\ [M_{\alpha\beta f rs}] & [L_{\alpha\beta r}] \end{bmatrix}^{-1}$$

II.7 Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté les modèles qui nous semblent les plus couramment utilisés pour modéliser la machine asynchrone : le modèle triphasé-triphasé qui ne contient aucune transformation, le modèle de Park, le modèle multi enroulements, le modèle multi-spires et le model de la machine asynchrone avec défaut de court-circuit entre spires.

Le modèle triphasé-triphasé permet de voir les dissymétries qui peuvent apparaître lors du défaut. Cependant, sa complexité rend l'observation lourde et nécessite des ressources de calcul importantes.

Le modèle de Park pour sa part, est plus simple, ce qui facilite la synthèse des observateurs. La représentation sur deux axes masque néanmoins des informations qui peuvent être nécessaires au diagnostic et n'est plus valable lors de la dissymétrie de l'alimentation ou de la machine. Ensuite, nous avons présenté les modèles multi-enroulements et multi-spires, modèles plus fin qui essayent de représenter la machine le plus exhaustif possible. Ces modèles permettent respectivement de considérer de manière plus concrète les défauts rotoriques et statoriques. Par notre cas, nous avons opté pour le modèle multi-spires car il permettait de simuler les défauts sur les phases de la machine directement sans passer par aucune transformation. Nous avons également utilisé le modèle multi-spires car celui-ci permet de manière plus précise de connaître la ou les spires touchées par le défaut de court-circuit entre spires.

Chapitre III

MACHINES VECTORIELLES DE SUPPORT DES MOINDRES CARRÉS.

III.1 Introduction

La méthode LSSVM, abréviation de "Least Squares Support vectorielles Machine" (Machine à vecteurs de support des moindres carrés), est une technique d'apprentissage automatique supervisé utilisée pour la classification et la régression. Elle est basée sur les principes des machines à vecteurs de support (SVM) et utilise une approche de régression linéaire avec des moindres carrés pour résoudre les problèmes d'apprentissage.

La méthode LSSVM combine les avantages des SVM et des régressions linéaires pour résoudre des problèmes de classification et de régression. Elle vise à trouver une fonction linéaire qui maximise la marge entre les points de données de différentes classes (dans le cas de la classification) ou qui minimise l'erreur de prédiction (dans le cas de la régression). La méthode LSSVM utilise une fonction de base pour transformer les données d'entrée en un espace de caractéristiques de dimension supérieure, où une frontière de décision linéaire peut être trouvée. Elle utilise ensuite un processus d'optimisation pour trouver les poids optimaux qui minimisent la fonction de perte quadratique, c'est-à-dire les poids qui permettent de prédire au mieux les étiquettes de classe ou les valeurs cibles. La méthode LSSVM présente plusieurs avantages, tels que sa capacité à gérer des ensembles de données de grande taille, sa robustesse face aux données bruitées et sa capacité à gérer des problèmes de régression non linéaire en utilisant des fonctions de base non linéaires.

Il convient de noter que la méthode LSSVM peut être étendue pour traiter des problèmes non linéaires en utilisant des noyaux non linéaires, similaires aux SVM traditionnelles. Cela permet d'appliquer la méthode LSSVM à des problèmes de classification et de régression non linéaires en projetant les données dans un espace de caractéristiques de dimension supérieure.

III.2 Application de la méthode LSSVM

La méthode LSSVM (Least Squares Support Vector Machines) peut être utilisée dans le diagnostic des pannes en suivant les étapes générales suivantes :

1. Collecte des données : Rassemblez un ensemble de données comprenant des informations sur les pannes passées, telles que les symptômes, les mesures de performance, les conditions de fonctionnement, etc.
2. Prétraitement des données : Effectuez une étape de prétraitement pour nettoyer et normaliser les données. Cela peut inclure l'élimination des valeurs aberrantes, la gestion des valeurs manquantes, la normalisation des variables, etc.

3. Sélection des caractéristiques : Identifiez les caractéristiques pertinentes pour le diagnostic des pannes. Cela peut être réalisé à l'aide de techniques telles que l'analyse de corrélation, l'analyse en composantes principales (ACP), ou toute autre méthode de sélection de caractéristiques adaptée à votre problème.
4. Partition des données : Divisez l'ensemble de données en un ensemble d'entraînement et un ensemble de test. L'ensemble d'entraînement sera utilisé pour entraîner le modèle LSSVM, tandis que l'ensemble de test servira à évaluer les performances du modèle.
5. Entraînement du modèle LSSVM : Appliquez la méthode LSSVM à l'ensemble d'entraînement pour apprendre la relation entre les caractéristiques et les pannes. La méthode LSSVM combine des techniques de régression linéaire et de machines à vecteurs de support pour trouver une fonction qui minimise l'erreur de prédiction.
6. Réglage des paramètres : Optimisez les paramètres du modèle LSSVM pour améliorer ses performances. Cela peut être réalisé à l'aide de techniques d'optimisation telles que la validation croisée ou la recherche par grille.
7. Évaluation du modèle : Évaluez les performances du modèle LSSVM à l'aide de l'ensemble de test. Mesurez des métriques telles que la précision, le rappel, la F-mesure ou la courbe ROC pour évaluer la capacité du modèle à diagnostiquer les pannes.
8. Prédiction des pannes : Une fois que le modèle a été évalué et validé, il peut être utilisé pour prédire les pannes sur de nouvelles données en appliquant la fonction apprise lors de l'étape d'entraînement.

Il est important de noter que la méthode LSSVM nécessite un ensemble de données approprié, un bon choix de caractéristiques et un réglage approprié des paramètres pour obtenir de bons résultats de diagnostic des pannes. Il est également recommandé de suivre les bonnes pratiques de validation croisée et d'évaluation du modèle pour s'assurer de sa robustesse.

III.2 MACHINES VECTORIELLES DE SUPPORT DES MOINDRES CARRÉS

Une brève description des LS-SVM est présentée dans cette section, tandis qu'une explication détaillée peut être trouvée dans la référence.

Les LS-SVM peuvent résoudre les problèmes à petite échantillonnage, non linéaires et à haute dimension, mais lorsqu'elles sont utilisées pour résoudre des problèmes non linéaires, la sélection de la fonction noyau affecte directement le résultat final de classification.

Étant donné un ensemble d'apprentissage de N points de données.

$$\{y_k, x_k\}_{k=1}^N \quad (\text{III-1})$$

Où représente le k-i -ème motif d'entrée.

Si "x" représente le k-i -ème motif de sortie, le classifieur peut être construit en utilisant la méthode des vecteurs de support sous la forme suivante :

$$y(x) = \text{sign} \left[\sum_{k=1}^N \alpha_k y_k K(x, x_k) + b \right] \quad \alpha = [\alpha_1; \dots; \alpha_N] \quad (\text{III-2})$$

Où sont appelées valeurs de support et b est une constante. L'est le noyau, qui peut être soit

$$K(x, x_k) = x_k^T x \quad (\text{SVM linéaire}) \quad (\text{III-3})$$

$$K(x, x_k) = (x_k^T x + 1)^d \quad (\text{Polynôme SVM de degré d}) ; \quad (\text{III-4})$$

$$K(x, x_k) = \tanh[\kappa x_k^T x + \theta] \quad (\text{Perceptron multicouche SVM}), \text{ où } \quad (\text{III-5})$$

$$K(x, x_k) = \exp \left\{ -\|x - x_k\|_2^2 / \sigma^2 \right\} \quad (\text{RBF SVM}), \text{ où } K, \theta \text{ et } \sigma \text{ sont des constantes.} \quad (\text{III-6})$$

Par exemple, le problème de la classification de deux classes est défini comme :

$$\begin{cases} w^T \varphi(x_k) + b \geq +1 & \text{if } y_k = +1 \\ w^T \varphi(x_k) + b \leq -1 & \text{if } y_k = -1 \end{cases} \quad (\text{III-7})$$

Cela peut aussi s'écrire comme

$$y_k [w^T \varphi(x_k) + b] \geq 1, k = 1, \dots, N \quad (\text{III-8})$$

Où $\varphi()$ est un mappage de fonction non linéaire de l'espace d'entrée à un espace de dimension supérieure.

Classificateurs LS-SVM

$$\min_{w,b,e} J_{LS}(w, b, e) = \frac{1}{2} w^T w + \gamma \frac{1}{2} \sum_{k=1}^N e_k^2 \quad (\text{III-9})$$

Soumis aux contraintes d'égalité :

$$y_k [w^T \varphi(x_k) + b] = 1 - e_k, k = 1, \dots, N \quad (\text{III-10})$$

Le lagrangien est défini comme

$$L(w, b, e; \alpha) = J_{LS} - \sum_{k=1}^N \alpha_k \{y_k [w^T \varphi(x_k) + b] - 1 + e_k\} \quad (\text{III-11})$$

Avec multiplicateurs de Lagrange $\alpha_k \in \mathbb{R}$ (appelés valeurs de support).

Les conditions d'optimalité sont données par

$$\begin{cases} \frac{\partial L}{\partial w} = 0 & \rightarrow & w = \sum_{k=1}^N \alpha_k y_k \varphi(x_k) \\ \frac{\partial L}{\partial b} = 0 & \rightarrow & \sum_{k=1}^N \alpha_k y_k = 0 \\ \frac{\partial L}{\partial e_k} = 0 & \rightarrow & \alpha_k = \gamma e_k \\ \frac{\partial L}{\partial \alpha_k} = 0 & \rightarrow & y_k [w^T \varphi(x_k) + b] - 1 + e_k = 0 \end{cases} \quad (\text{III-12})$$

Pour $k=1 \dots N$. Après élimination de w et e on obtient la solution :

$$\begin{bmatrix} 0 & Y^T \\ YZZ^T + \gamma^{-1}I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b \\ \alpha \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1_v \end{bmatrix} \quad (\text{III-13})$$

Avec

$$\begin{aligned} Z &= [\varphi(x_1)^T y_1, \dots, \varphi(x_N)^T y_N], \\ Y &= [y_1; \dots, y_N], 1_v = [1; \dots; 1], \\ e &= [e_1; \dots, e_N] \end{aligned} \quad (\text{III-14})$$

$$\text{Et. } \alpha = [\alpha_1, \dots, \alpha_N] \quad (\text{III-15})$$

La condition de Mercer est appliquée à la matrice $\Omega = ZZ^T$ avec

$$\Omega_{kl} = y_k y_l \varphi(x_k)^T \varphi(x_l) = y_k y_l K(x_k, x_l) \quad (\text{III-16})$$

Les paramètres du noyau, c'est-à-dire σ pour le noyau RBF, peuvent être choisis de manière optimale en optimisant une borne supérieure sur la dimension VC. Les valeurs de support α_k sont proportionnelles aux erreurs aux points de données dans le cas LS-SVM, tandis que dans le cas SVM standard, de nombreuses valeurs de support sont généralement égales à zéro. Lors de la résolution de grands systèmes linéaires, il devient nécessaire d'appliquer des méthodes itératives.

III.3 METHODOLOGIE

Cette section présente la méthodologie proposée, qui comprend l'extraction des caractéristiques, la sélection de la base de données et la proposition du LS-SVM pour le diagnostic des courts-circuits dans l'enroulement du stator.

III.3.1 Extraction des caractéristiques

Dans ce cas, les ensembles de données concernant les défauts de l'enroulement du stator ont été utilisés pour l'entraînement et le test de l'approche proposée (Figure III.1).

La variable d'entrée (i_{sMax}) de l'algorithme LS-SVM représente les valeurs de l'amplitude maximale du courant du stator $i_{sa}(t)$ dans différentes conditions de fonctionnement du moteur. La variable de sortie prend cinq valeurs décrivant l'indication du défaut de court-circuit :

- 0 : Moteur sain.
- 1 : 10 % des spires en court-circuit.
- 2 : 20 % des spires en court-circuit.
- 3 : 30 % des spires en court-circuit.
- 5 : 50 % des spires en court-circuit.

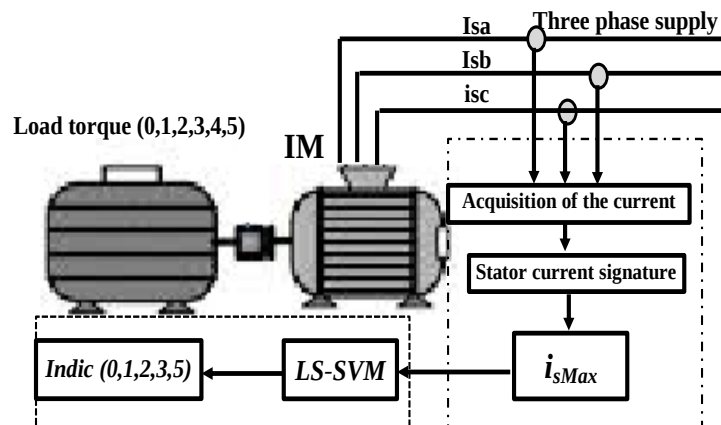


Figure III.1 Schéma fonctionnel du LS-SVM pour le diagnostic de défaut de court-circuit d'enroulement de stator

III.3.2 Sélection de la base de données

Une base de données constituée d'ensembles de données d'entrée et de sortie a été utilisée pour entraîner et tester l'approche LS-SVM. Les données d'entrée-sortie sont collectées à partir de simulations dans l'environnement Matlab.

L'ensemble de données utilisé, dérivé des simulations, est composé de 60 échantillons.

L'ensemble d'entraînement est composé de 30 échantillons représentant l'amplitude maximale du courant du stator I_{sa} Max dans différentes conditions de charge $C_e=0, 1, 2, 3, 4$ et 5 Nm.

L'ensemble de test est composé de 30 échantillons représentant l'amplitude maximale du courant du stator I_{sa} Max dans différentes conditions de charge $C_e=0.5, 1.5, 2.5, 3.5, 4.5$ et 5.5 Nm, utilisées pour tester ses performances.

Chaque motif de l'ensemble d'entraînement et de test comprend une signature de courant d'entrée du stator I_{sa} Max et une sortie qui représente l'indication de la gravité du défaut de court-circuit (Indic).

cc %	C_e	(I_{sa}) Max train	C_e	(I_{sa}) Max test	Indiquer
0%	0	3,5574	0.5	3,5602	<u>0</u>
0%	1	3,5775	1.5	3,6086	<u>0</u>
0%	2	3,6537	2.5	3,7123	<u>0</u>
0%	3	3,7841	3.5	3,8684	<u>0</u>
0%	4	3,9647	4.5	4,0722	<u>0</u>
0%	5	4,1903	5.5	4,3184	<u>0</u>
10%	0	9,5708	0.5	9,7547	<u>1</u>
10%	1	9,9494	1.5	10,1347	<u>1</u>
10%	2	10,3357	2.5	10,5335	<u>1</u>
10%	3	10,74	3.5	10,9522	<u>1</u>
10%	4	11,1699	4.5	11,3933	<u>1</u>
10%	5	11,6228	5.5	11,8587	<u>1</u>
20%	0	18,0303	0.5	18,2184	<u>2</u>
20%	1	18,4315	1.5	18,6132	<u>2</u>
20%	2	18,8375	2.5	19,0337	<u>2</u>
20%	3	19,253	3.5	19,4834	<u>2</u>
20%	4	19,7235	4.5	19,9746	<u>2</u>
20%	5	20,2383	5.5	20,5166	<u>2</u>
30%	0	26,7037	0.5	26,8866	<u>3</u>
30%	1	27,1105	1.5	27,2743	<u>3</u>
30%	2	27,5216	2.5	27,6961	<u>3</u>
30%	3	27,9371	3.5	28,1595	<u>3</u>
30%	4	28,4147	4.5	28,6888	<u>3</u>
30%	5	28,9864	5.5	29,3148	<u>3</u>
50%	0	44,1895	0.5	44,3518	<u>5</u>
50%	1	44,6003	1.5	44,709	<u>5</u>
50%	2	45,0148	2.5	45,1097	<u>5</u>
50%	3	45,4332	3.5	45,5751	<u>5</u>
50%	4	45,8556	4.5	46,1498	<u>5</u>
50%	5	46,5135	5.5	46,9782	<u>5</u>

Tableau 1. Base de données pour la formation et les tests

III.3.3 Détection de défaut du stator à l'aide du LS-SVM

Une fois que les données sont regroupées, nous les présentons en tant qu'entrée à l'approche LS-SVM. Le système effectue son apprentissage afin d'être prêt à prédire la gravité du défaut de court-circuit.

Nous effectuons un test pour valider les performances du système en présentant en entrée de nouvelles données qui ne font pas partie de la base d'apprentissage. Une fois le test terminé avec succès (erreur de prédiction acceptable), le système est prêt à classifier la gravité du défaut de court-circuit.

À partir du problème d'apprentissage LS-SVM, on peut constater qu'il existe deux paramètres libres, à savoir le paramètre de largeur du noyau RBF (Sigma σ^2) et le paramètre de régularisation γ , qui peuvent affecter les performances de généralisation du LS-SVM. Ces paramètres doivent être soigneusement sélectionnés.

III.4 RÉSULTATS ET DISCUSSION

III.4.1 Fonctionnement normal du moteur

La simulation du modèle de la machine saine a permis de tracer les courbes des grandeurs électromécaniques (courant du stator, couple et vitesse).

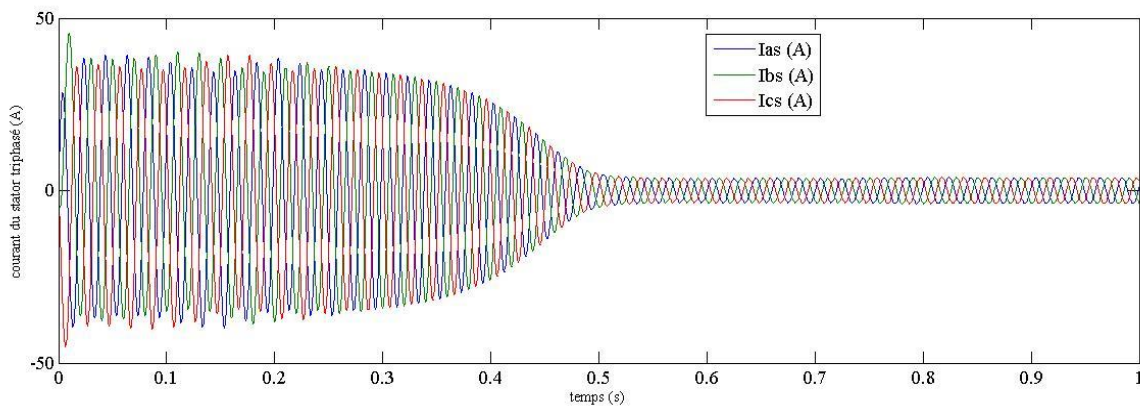
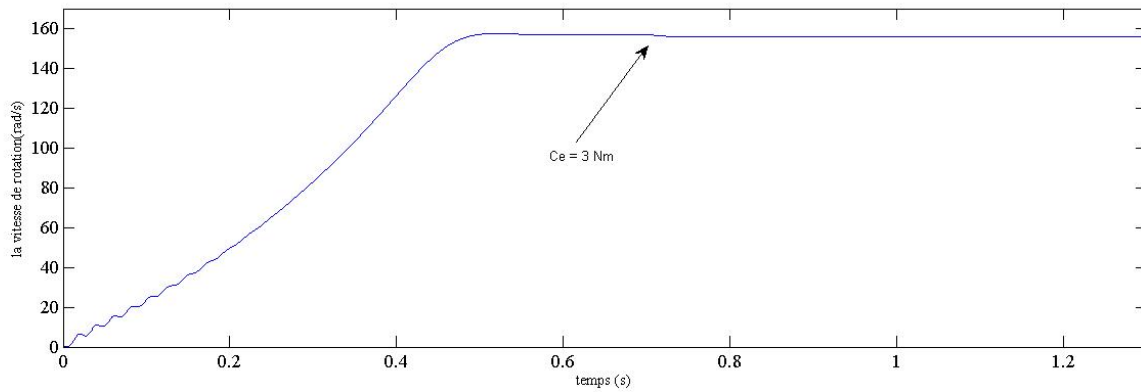
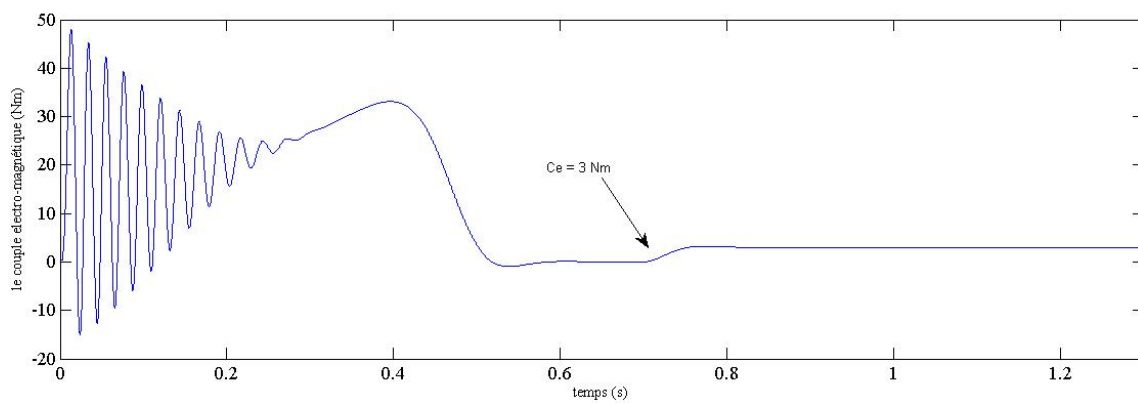
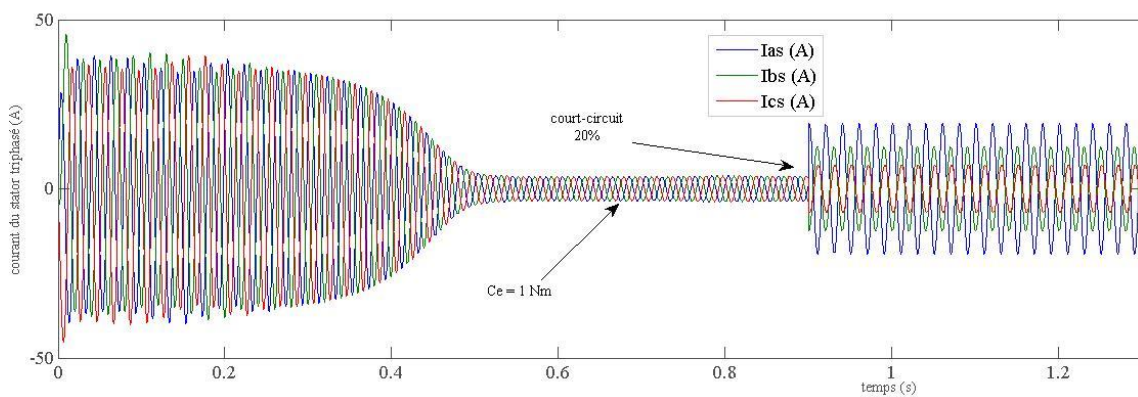


Figure III.2 Courant stator du moteur sain

Figure III.3 Vitesse de rotation du moteur sain sous charge ($C_e = 3 \text{ Nm}$ à $t=0.7\text{s}$)Figure III.4 Couple électromagnétique du moteur sain sous charge ($C_e = 3 \text{ Nm}$ à $t=0.7\text{s}$)

III.4.2 Fonctionnement avec un défaut de court-circuit de 20 %

Nous présenterons maintenant les résultats de la simulation pour un fonctionnement du moteur à induction avec un défaut de court-circuit entre les spires du stator. Le degré du court-circuit est de 20 % à l'instant 0,9 s.

Figure III.5 Courant stator avec court-circuit (20% à $t=0.9\text{s}$) sous charge ($C_e = 1 \text{ Nm}$ à $t=0.7\text{s}$)

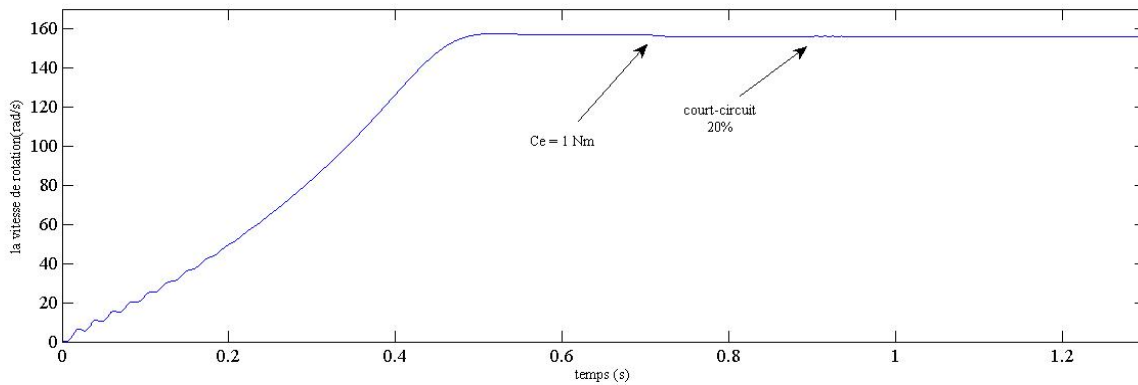


Figure III.6 Vitesse de rotation avec court-circuit (20% à $t=0.9s$) sous charge ($C_e = 1 \text{ Nm}$ à $t=0.7s$)

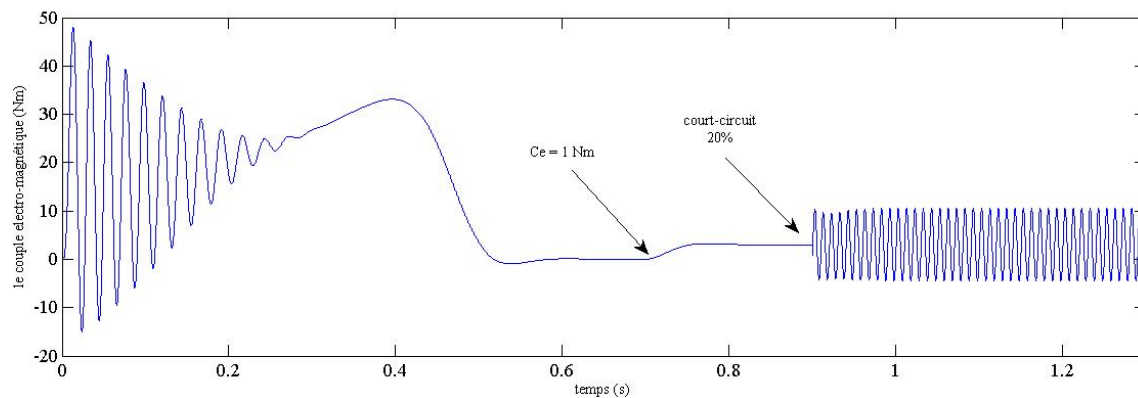
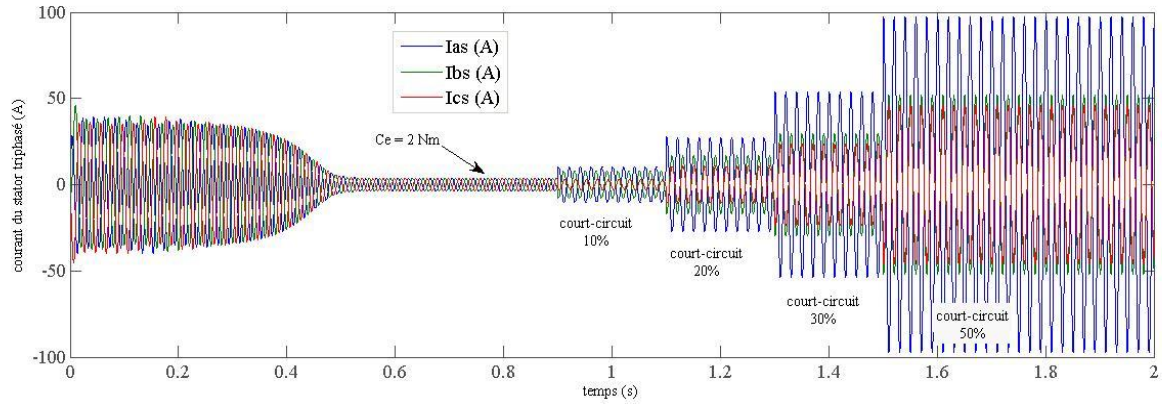
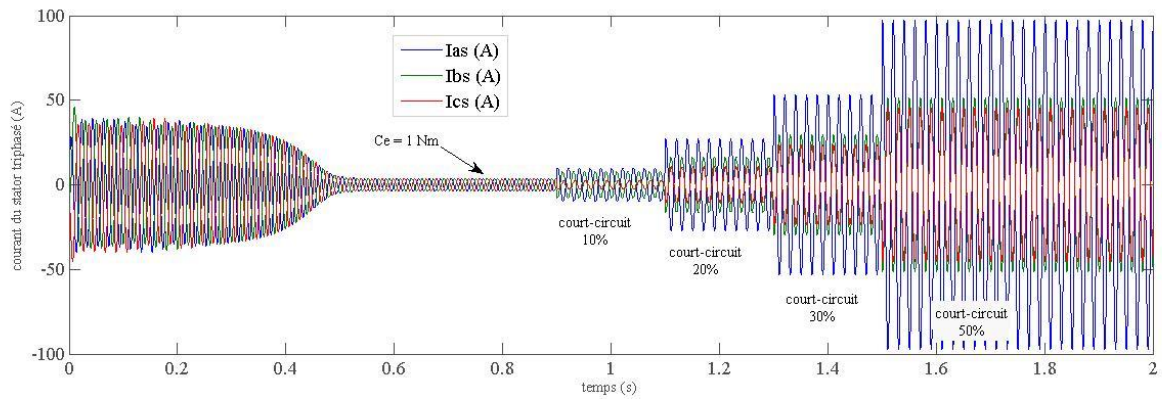
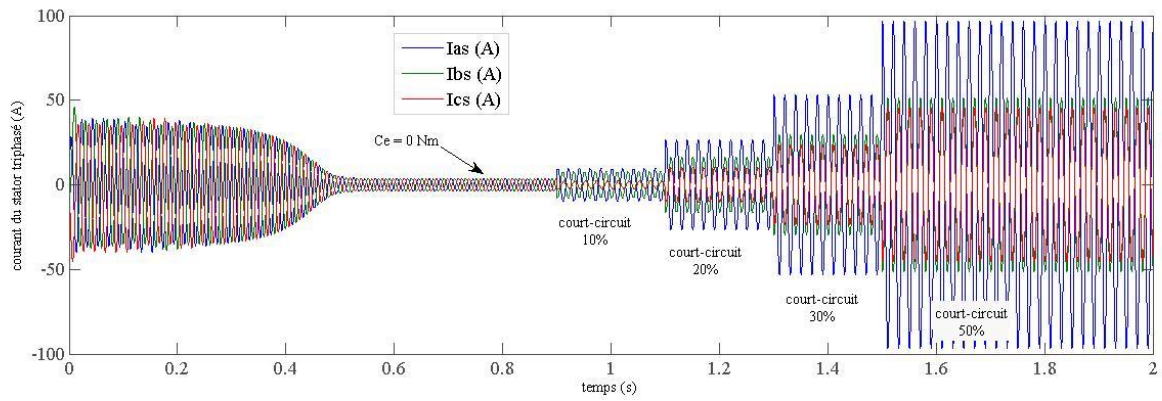


Figure III.7 Couple électromagnétique avec court-circuit (20% à $t=0.9s$) sous charge ($C_e = 1 \text{ Nm}$ à $t=0.7s$)

Dans la phase initiale, jusqu'à $t=0,9 \text{ s}$, le niveau de court-circuit est fixé à zéro, ce qui représente un moteur à induction sain sans aucun défaut. Un couple de charge égal à 1 Nm est appliqué à $0,7 \text{ s}$. Un défaut est appliqué à $t=0,9 \text{ s}$ (20 %). Pour tester la gravité du défaut. L'impact du défaut apparaît sur les courants du stator (Figure III.5), la vitesse de rotation (Figure III.6) et le couple électromagnétique (Figure III.7), avec des oscillations croissantes.

III.4.3 Influence du défaut de court-circuit sur le courant du stator

Dans ce qui suit (Figure III.8), nous présentons les résultats de simulation du fonctionnement du moteur avec un court-circuit des spires d'une bobine à (10 %, 20 %, 30 % et 50 %) pour chaque charge (de 0 Nm à 5 Nm), afin d'enregistrer les valeurs maximales du courant du stator.



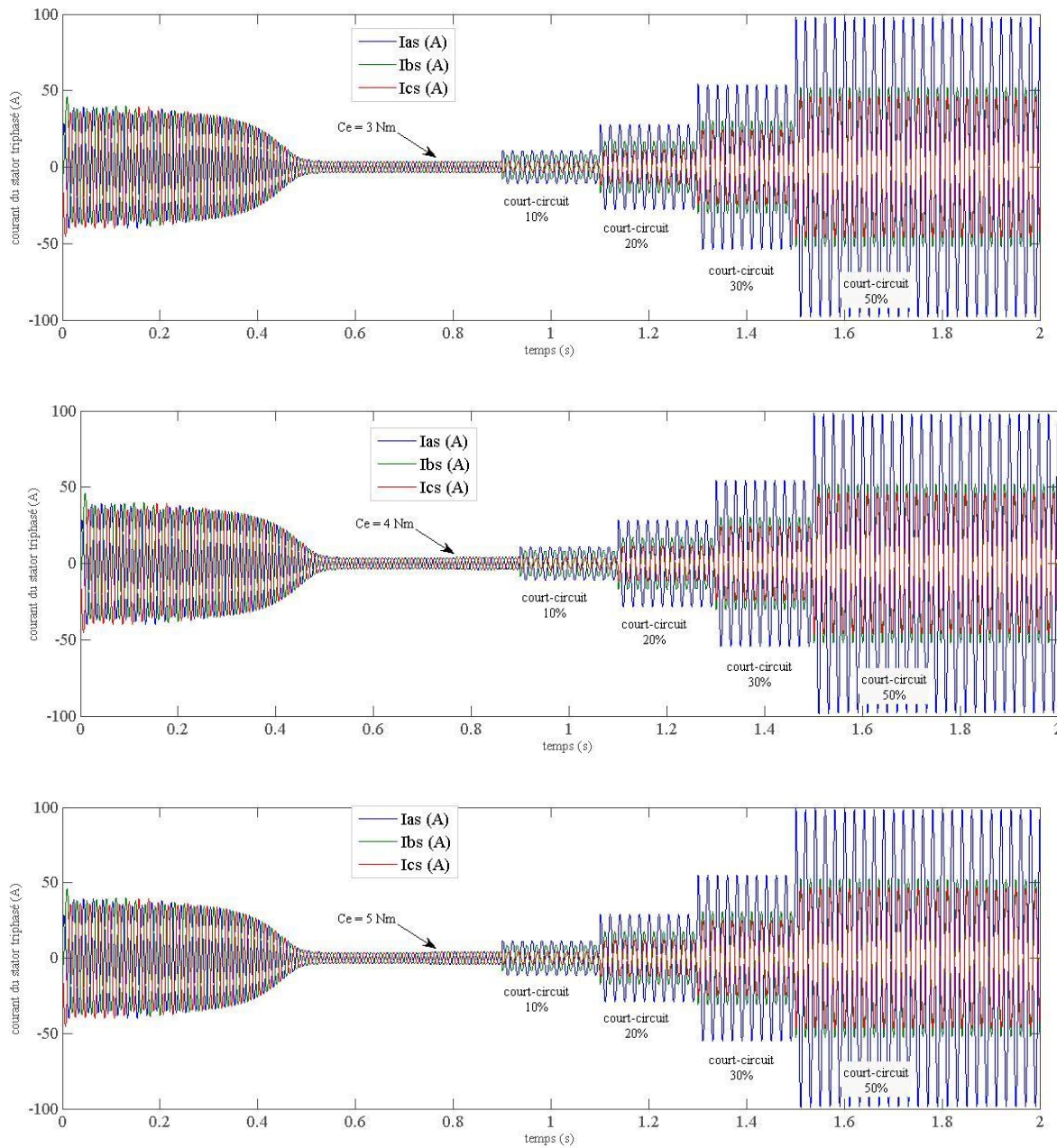


Figure III.8 Courbes de courants statoriques avec différentes charges et différents rapports de court-circuit

On peut constater que, avec l'augmentation du taux de défaut de la phase affectée (a_s) et de l'augmentation du couple de charge, l'amplitude (ou la valeur maximale) du courant de phase du stator, $I_{sa \text{ Max}}$, augmente.

III.4.4 Résultats de l'approche LS-SVM

Les paramètres de l'approche LS-SVM ont été sélectionnés après plusieurs tests. Par conséquent, les paramètres adoptés pour cette étude sont : $\gamma = 1000$, $\sigma^2 = 0,01$. Les résultats de simulation de l'approche proposée sont présentés respectivement dans les figures, dans lesquelles 30 données sont utilisées pour entraîner le modèle et 30 autres données sont utilisées pour tester ses performances (Tableau 1).

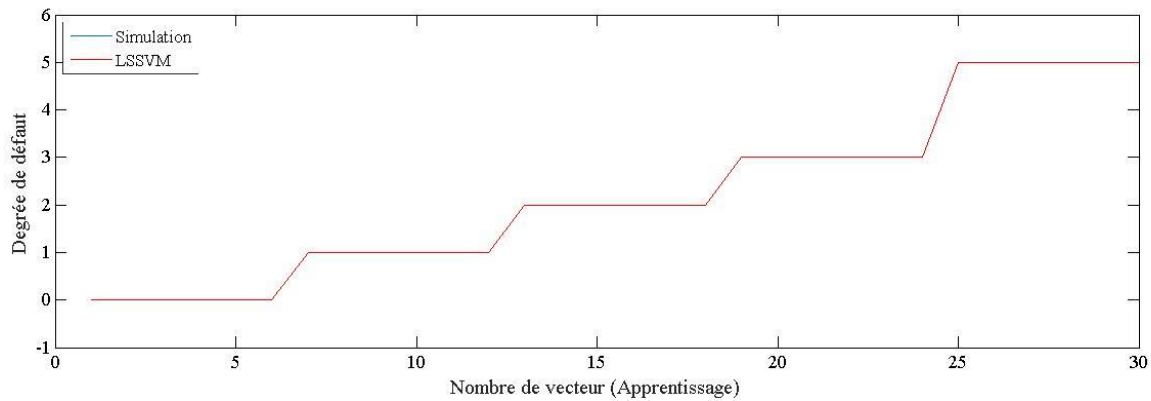


Figure III.9 Variation du degré de défaut en fonction du nombre de vecteurs pour l'ensemble d'apprentissage.

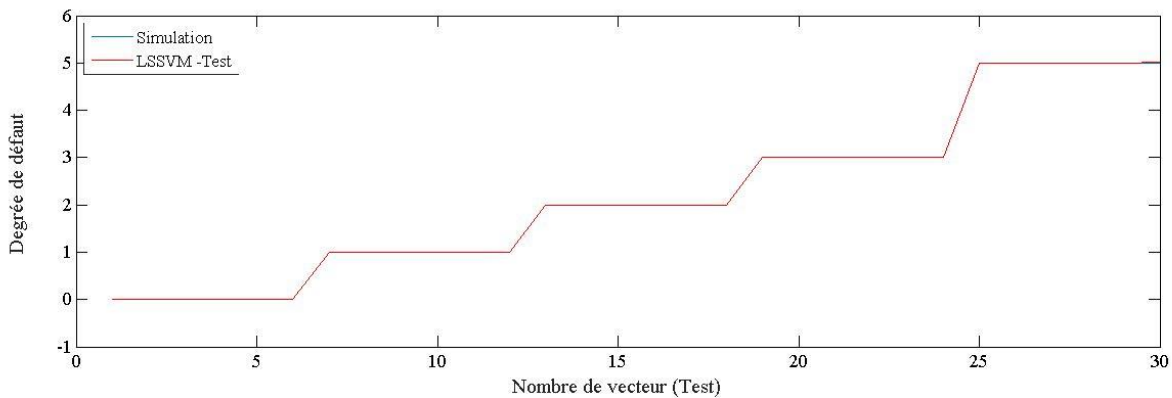


Figure III.10 Variation du degré de défaut en fonction du nombre de vecteurs pour l'ensemble de test.

À partir des figures, il est très clair que l'algorithme LS-SVM fournit des valeurs presque identiques (très bonne adaptation) à celles souhaitées (objectifs). De plus, la figure montre clairement que les erreurs correspondant à l'entraînement et au test sont très faibles, avec des valeurs d'erreur absolue plus élevées de 0,011 pour la phase de test.

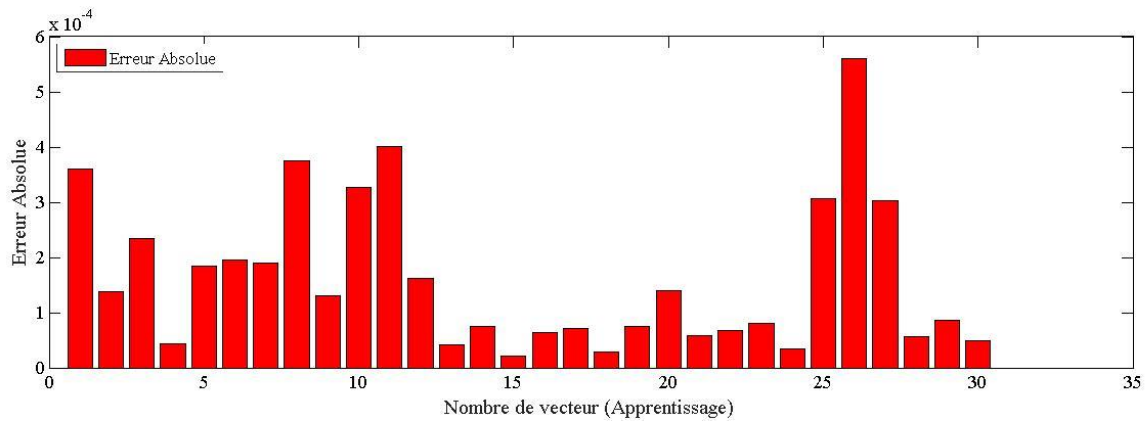


Figure III.11 Courbes de formation d'erreur absolue

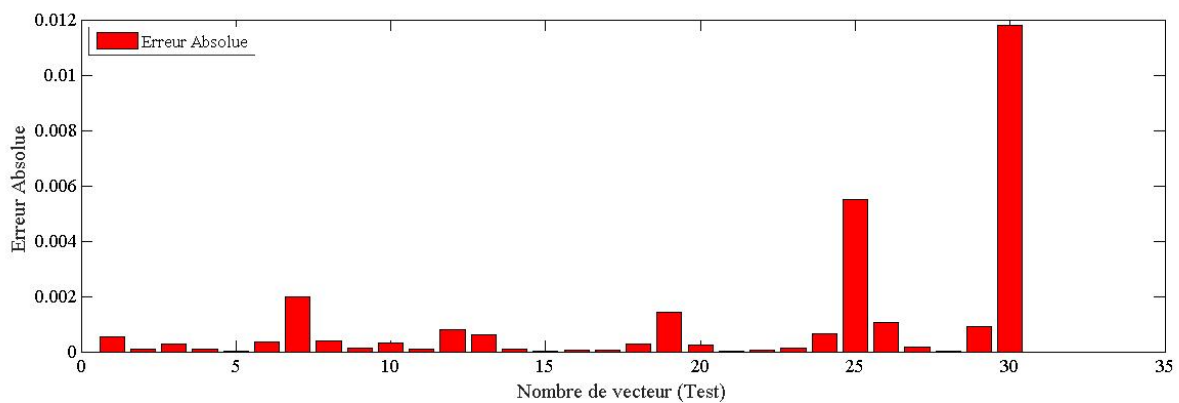


Figure III.12 Courbes de test d'erreur absolue

III.5 Conclusion

Dans ce chapitre, recherche, un algorithme de base sur LS-SVM a été étudié pour détecter une panne de court-circuit dans une bobine de la même phase d'une machine à induction. L'algorithme LS-SVM repose sur l'utilisation d'une base de données (les valeurs maximales du courant statorique d'une phase d'un moteur à induction) pour l'apprentissage dans les cas de panne (diminution du nombre de spires d'une bobine).

La simulation montre une très bonne adaptation de l'algorithme LS-SVM à la base de données utilisées respectivement pour l'entraînement et les tests.

Conclusion générale

Conclusion générale

En conclusion, la thèse constitue une contribution importante dans le domaine du diagnostic des machines asynchrones, en se concentrant spécifiquement sur les défauts statoriques. À travers ses différents chapitres, la thèse a abordé plusieurs aspects essentiels pour la compréhension et la résolution de ce problème.

Le premier chapitre a présenté un état de l'art approfondi sur le diagnostic des machines asynchrones. Il a fourni une description détaillée des composants clés des machines asynchrones, ainsi qu'une liste exhaustive des différents défauts auxquels elles peuvent être confrontées. De plus, diverses méthodes de diagnostic ont été examinées, mettant en évidence les approches existantes pour détecter et identifier les défauts dans ces machines.

Le deuxième chapitre a été consacré à la modélisation de la machine asynchrone, en se concentrant spécifiquement sur le défaut de court-circuit entre les spires statoriques. Ce défaut a été analysé en profondeur, en mettant en évidence ses causes, ses conséquences et ses manifestations. Des techniques de modélisation ont été utilisées pour représenter ce défaut et faciliter son diagnostic ultérieur.

Le troisième chapitre a introduit la méthode des Machines à Vecteurs de Support avec Moindres Carrés (LS-SVM) en tant qu'outil de diagnostic potentiel pour les défauts statoriques des machines asynchrones. Des simulations de dommages de court-circuit dans le stator ont été réalisées, et les résultats obtenus ont été analysés en comparant l'étude de cas avec les sorties d'apprentissage du modèle LS-SVM. Cette approche a démontré sa capacité à détecter et à diagnostiquer efficacement les défauts statoriques dans les machines asynchrones.

En somme, cette thèse constitue une avancée significative dans le domaine du diagnostic des défauts statoriques des machines asynchrones. Les résultats obtenus ont démontré l'efficacité de l'approche LS-SVM dans la détection et l'identification précises de ces défauts. Ces recherches ouvrent la voie à de futures études et applications dans le domaine du diagnostic des machines asynchrones, contribuant ainsi à améliorer la fiabilité, la durabilité et les performances de ces machines essentielles dans de nombreux domaines industriels.

Références bibliographies

- [1] : BABAK VASEGHI, « Contribution à l'étude des machines électriques en présence de défaut entre-spires », Thèse, L'Institut National Polytechnique de Lorraine, Génie Electrique, 2009.
- [2] : BELHAMDI SAAD, « Diagnostic des défauts de la machine asynchrone contrôlée par différentes techniques de commande » Thèse, université Mohamed khider–Biskra, génie électrique, 2014.
- [3] : BENKATTAS SMAIL et BOUCHNAK SAÏD, « diagnostic des défauts entre spires statoriques des machines asynchrones », Mémoire de Master département d'électrotechnique, option Électromécanique Université Amar Telidji Laghouat, juin 2018.
- [4] : ABLA BOUGUERNE, « Diagnostic automatique des défauts des moteurs asynchrones, », Mémoire université mentouri – Constantine, Faculté des sciences de l'ingénieur, département d'électrotechnique, 2009
- [5] : Mr. MOHAMED ARHOJDAM « Détection des défauts électriques et mécaniques dans la machine asynchrone par l'analyse du courant statorique ». Thèse, Ecole Normale Supérieure de l'enseignement Technique - RABAT 27 juin 2013/2014.
- [6] : RADOUANE BOUSSEKSOU, « Modélisation analytique des machines asynchrones, application au diagnostic », Mémoire de magister en électrotechnique, université mentouri – Constantine, 2007.
- [7] : S. BAZINE, « Conception et implémentation d'un Méta-modèle de machines asynchrones en défaut » Thèse de doctorat, Laboratoire d'Automatique et d'Informatique Industrielle , Université de Poitiers, 2009.
- [8] : ABDELALI AMEUR et GUEDDOUH SADEK, « Détection des courts-circuits par suivi paramétrique dans les Machines synchrones à aimants permanents », Mémoire de Master département d'électrotechnique, Électromécanique et système de commande Université Amar Telidji Laghouat, 2015/2016.

- [9] : ONDEL O.«Diagnostic par reconnaissance des formes: Application a un ensemble convertisseur – machine asynchrone» Thèse de Doctorat, Ecole centrale de Lyon,France,2006.
- [10] : ACHOUR HOUSSAM, « étude comparative des indicateurs des défauts rotoriques dans les machines asynchrones à cage. » Mémoire de Master, département d'électrotechnique, option machines électriques, université Mohamed khider–Biskra, 2014.
- [11] : INTERNET(www.bacmoteur.wordpress.com / www.fr.m.wikipedia.org/wiki.com).
- [12] E. SCHAEFFER, " Diagnostic des machines asynchrones modèles et outils paramétriques dédiés à la simulation et à la détection de défauts". Thèse de doctorat, Université De Nantes 1999
- [13] SAHOUI MOHAMED et BENACHOUR OUASSIM, Modélisation et diagnostic de la cassure des barres rotorique d'une machine asynchrone, Mémoire de Master, Université Amar Thlidji-Lagouat 2018.
- [14] NOREDDINE LAHCENE, diagnostic de défauts au rotor d'une machine asynchrone à cage d'écureuil. Mémoire de magister département de génie électrique. Ecole Nationale Polytechniques. Alger. Octobre 2005.
- [15] HARRAT REDOUANE et LAKHAL MOKHTAR. Analyse des grandeurs électriques pour le diagnostic des défauts électriques et mécaniques dans la machine asynchrone. Mémoire de Master domaine science et techniques option électromécanique et systèmes de commandes ...université Ammar Tleidji de Laghouat 2013
- [16] A. Abed, L. Baghli, H. Razik et A. Rezzoug, Modelling induction motors for diagnosis purposes, EPE'99, Lausanne, Suisse, pp. 1-8, September 1999.
- [17] A. Makki, A. Ah-jaco, H. Yahoui et G. Grellet, Modelling of capacitor single-phase asynchronous motor under stator and rotor winding faults, IEEE International SDEMPED'97, Carry-le-Rouet, France, pp. 191-197, September 1997.
- [18] P. Vas, F. Filippetti, G. Franceschili et C. Tassoni, Transient modeling oriented to diagnostics of induction machines with rotor asymmetries, ICEM'94, December 1994.

- [19] Melle. Drif Malika "Diagnostic des Défaits dans les Machines Electriques et leur Surveillance par Emploi de l'intelligence Artificielle". Mémoire de magistère U.S.T. Oran JUIN 2004
- [20] B. Scholkopf and A. J. Smola, "Learning with Kernels Support Vector Machines", Regularization, Optimization, and Beyond. MIT Press, Cambridge, MA, USA, 2001
- [21] J. A. K. Suykens and J. Vandewalle, "Least squares support vector machine classifiers", Neural Processing Letters, Vol 9, No. 3, pp. 293-300, June 1999
- [22] J.A.K. Suykens, L. Lukas, and J. Vandewalle, "Sparse approximation using least squares support vector machines", In IEEE International Symposium on Circuits and Systems ISCAS'2000, pp. 757-760, 2000