

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique Et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة باجي مختار-عنابة-Annaba-Badji-Mokhtar Université



Faculté : Sciences de l'Ingénieur

Département : Electrotechnique



MEMOIRE DE MASTER

DOMAINE : Sciences et Technologies

FILIERE : Électrotechnique

OPTION : Electrotechnique industriel

Thème

***DIAGNOSTIQUE DES
DEFAUTS D'UNE
MACHINE TOURNANTE
EN FONCTIONNEMENT***

Préparer par

Chaab Abdelaziz

Frihi Aymen

Devant le jury composé de :

Mr Omeiri Amar

Prof

President

Mr.Mihoub Med Larbi

Doct

Encadreur

Mme Ghoudelbourk Siham

Doct

Examineur

Année Universitaire : 2020-2021

Remerciement

On remercie le bon dieu tout puissant et miséricordieux de nous avoir donné la santé et la volonté de suivre nos études et de réaliser ce mémoire.

On adresse aussi nos reconnaissances à tous les professeurs du département d'électrotechnique et au corps administratifs pour leurs conseils et leurs connaissances généreusement transmises.

Ce travail ne serait pas aussi riche et n'aurait pu avoir le jour sans l'aide et l'encadrement de Mr.Mihoub Med Larbi tout en le remerciant pour ses précieux conseils et remarques, sa disponibilité et ses encouragements.

Un grand remerciement, plein d'amour pour mes parents, ma femme, mes enfants, mes frères et sœurs et a toute la famille qui m'ont tellement soutenue.

A tous mes amis avec qui j'ai passé d'agréables moments, pour leurs aides et encouragements.

Enfin, nos remerciements vont également aux membres de juré d'avoir accepté de juger notre travail.

ملخص

بالرغم من التسارع التكنولوجي الحاصل في المجال الصناعي تبقى الآلات الدوارة دوما ركيزة المنشآت الصناعية لذا وجب تحسين هذا العمل يهدف إلى دراسة الطرق فاعليتها وتطوير قدرتها على التنبؤ بالعطب قبل وقوعه لتجنب الإخلال بعملية الإنتاج والمردودية المستعملة في معالجة وتحليل الأعطاب وذلك من خلال تصميم منصة تجارب تشمل معظم عناصر الآلة الدوارة الحقيقية (مسننات، محامل دحرجية، محاور دوران...)، ومن خلال إحداث أعطاب محددة في العناصر المراد دراستها (تآكل أو كسر سنن من المسننة، خلل في المدحرجة، إرخاء نقاط التثبيت.....) ثم نقوم باستخراج الإشارات الناتجة وتطبيق أشهر التقنيات الحالية لدراستها وتحليلها واختيار أدقها وأكثرها وضوحا بما يتناسب مع كل نوع من هذه الاعطاب

الكلمات المفتاحية:

الآلات الدوارة، معالجة الإشارة، الاعطاب، تشخيص الاهتزازات

RESUME

Ces dernières années, on peut constater un développement technologique très important dans différents secteurs et plus particulièrement dans le domaine des machines tournantes et leurs utilisations.

Malgré l'accélération technologique surtout dans le Domaine industriel, les machines tournantes conservent toujours leurs places et leur poids dans les installations. Et pour cela il faut développer et améliorer la fonctionnalité et la capacité de prévision des défauts pour éviter de causer des arrêts non programmés sur notre machine ce qui est synonyme de pertes de productivité. Ce travail a pour but d'étudier les méthodes utilisées dans le traitement et l'analyse des défauts concernant les machines tournantes, et avec la réalisation d'un banc d'essais qui contient la majorité des organes mécaniques d'une machine réelle. Nous allons réaliser des défauts prédéterminés sur les éléments à étudier, de là nous allons collecter les signaux résultants pour l'application des différents techniques de traitement actuel, et la sélection de la plus précise et la plus convenable pour chaque type de défaut.

Mots clés: machine tournante, traitement du signal, défauts, diagnostic vibratoire,

ABSTRACT

Despite the acceleration of technology especially in the industrial field, rotating machines still hold their position and their weight in the facilities. Then we need to develop and improve the functionality and the ability to predict the defects before causing unscheduled breakdowns on our machine which is synonym of loss of productivity. This work aims to study the methods used for the treatment and analysis of rotating machines related defects, and the realization of a test bench that contains the majority of the mechanical components of a real machine (rotation axes, gears, bearings, shaft bearings ...) We will induce predetermined defects (misalignment, crushing of tooth, loosening ...), on the element to study, we will then collect the resulting signals for the application of the various current treatment techniques, and proceed to the selection of the most accurate and the most convenient for each type of defect.

Keywords: rotating machine, signal processing, defects, vibration diagnosis.

Sommaire

Introduction Generale.....	1
Chapitre I : Diagnostic De La Machine Asynchrone	3
1. Introduction	4
2. diagnostic et surveillance.....	4
2.1 Diagnostic	4
2.2 Default (panne, défaillance).....	4
2.3 Identification default.....	4
2.4 Disponibilité.....	4
2.5 Fiabilité.....	4
2.6 Sécurité.....	4
2.7 Surveillance	4
2.8 Supervision	4
2.9 Perturbation	4
2.10 Symptôme	4
2.11 Disfonctionnement.....	4
2.12 Résidu.....	4
3. Terminologie relative à la maintenance et diagnostique.....	5
3.1 Définition de la maintenance	5
3.2 Maintenabilité	5
3.3 La maintenance corrective	6
3.4 La maintenance préventive	6
3.5 La maintenance conditionnelle	6
4. Constitution de la machine asynchrone	6
4.1. Introduction.....	6
4.2 Le stator	7
4.3 Le rotor à cage	8
4.4 Organes mécaniques.....	9
4.4.1 La carcasse	9
4.4.2 L'arbre	9
4.5 Les ventilateurs	9
4.6 Le circuit magnétique.....	9
4.7 Les enroulements.....	9
5. Principe de fonctionnement de la machine asynchrone	10
6. Caractéristiques	10
6.1 Fonctionnement à vide	10
6.2 Fonctionnement en charge.....	11
7. Conclusion	11

Chapitre II : Les Défaits Dans Les machines Asynchrones12

1. Introduction	13
2. Principaux défauts de la machine asynchrone triphasée à cage	13
2.1 Défauts internes	13
2.2 Défauts externes	13
3. Principaux défauts des entrainements électrique.....	16
3.1 Défauts d'ordre mécanique	17
3.1.1 Défauts de flasque	17
3.1.2 Défauts de l'arbre	18
3.1.3 Défauts des roulements mécaniques.....	18
4. Autres défauts mécanique.....	19
5. Défauts au stator	19
5.1 Défauts d'isolants dans un enroulement.....	19
5.1.1 Un court-circuit entre spire de la même phase	20
5.1.2 Un court-circuit entre phase	20
6. Défauts de circuits magnétique	20
7. Défauts au rotor	20
8. Excentricité	21
9. Rupture de barres et d'anneaux de court-circuit	22
10. Eude statistique des défauts de la machine asynchrone	22
10.1 Défauts statorique	24
10.1 Défauts rotorique	25
11. Recherche indispensable des symptômes	25
12. Conclusion	26

Chapitre III : Les Méthodes De Diagnostic De La Machine Asynchrone.....27

1. Introduction	28
2. Délérents méthodes de diagnostic	28
2.1 Technique mécanique	28
2.1.1 Diagnostique par mesure de la température.....	28
2.1.2 Diagnostique par mesure des vibrations.....	29
2.2 Diagnostique chimiques	29
2.3 Technique magnétique et électrique.....	30
2.3.1 Diagnostique par mesure du flux magnétique axial de fuite.....	30
2.3.2 Diagnostique par l'analyse du courant statorique	31
3. Conclusion	31

Chapitre IV : Modélisation Et Simulation De La Machine Asynchrone.....32

1. Introduction	33
2. Modélisation de la machine asynchrone	33
2.1 Modèle triphasé	33
3. Modélisation du stator.....	34
3.1 Structure de stator.....	34
3.2 Les équations électriques statoriques.....	35
4. Modélisation du rotor.....	36

4.1 Structure du rotor.....	36
4.2 Équation de tensions rétorquées.....	37
5. Système d'équations globale de la machine.....	39
6. Modèle de la machine asynchrone.....	40
6.1 Transforme de Park direct et inverse.....	40
6.2 Equations électriques.....	40
6.3 Equations mécaniques.....	41
6.4 La machine asynchrone sur bloc Simulink.....	43
6.5 Résultats de simulation.....	44
6.6 Machine saine.....	44
6.7 La signature spectrale du courant statorique de la machine saine.....	45
6.8 Défaut au stator de la machine.....	46
6.9 Défaut rotor.....	47
7. Partie mécanique.....	47
7.1 Modèle utilise.....	49
7.2 Modèle de la transmission.....	49
7.3 Les roulements.....	50
8. Conclusion	53
9. Conclusion générale	53
10. Bibliographie.....	54
11. Annexe.....	57

Liste des figures

Chapitre I : Diagnostic de la machine asynchrone

Figure I.1	Diagramme des différents concepts de maintenance	5
Figure I.2	Evolution des informations traitées par le système	6
Figure I.3	Eléments de constitution d'une machine asynchrone	7
Figure I.4	Vue schématique en perspective du stator	8
Figure I.5	Vue schématique en perspective du rotor	9

Chapitre II : Les défauts dans la machine asynchrone

Figure II.1	Causes internes de défauts de la machine asynchrone triphasée à cage	14
Figure II.2	Causes externes de défauts de la machine asynchrone triphasée à cage	15
Figure II.3	Schéma de principe des catégories de défauts des entraînements électriques	17
Figure II.4	Structure d'un roulement à billes	18
Figure II.5	Types d'excentricité : (a) rotor concentré ; (b) excentricité statique ; c) excentricité dynamique	21
Figure II.6	Répartition des causes des défauts pour une machine asynchrone	23
Figure II.7	Facteurs aggravant le défaut	23
Figure II.8	Répartition des défauts	24
Figure II.9	Répartition des défauts statoriques	24
Figure II.10	Répartition des défauts rotoriques	25

Chapitre III : les méthodes de diagnostic dans la machine asynchrone

Figure III.1	Les différentes grandeurs de diagnostic Dans une machine	28
Figure III.2	Bobine exploratrice pour la mesure du flux de fuite axial	31

Chapitre VI : Modélisation et simulation

Figure VI.1	Schéma de principe de la machine asynchrone	34
Figure VI.2	Circuits électriques adoptés pour la modélisation des trois phases statoriques	34
Figure VI.3	circuit équivalent d'un rotor a cage sain	37

Figure VI.4 Transformé de Park direct et inverse	40
Figure VI.5 La machine asynchrone sur bloc Simulink	41
Figure VI.6 : les courants statoriques des phases	42
Figure VI.7 : la vitesse de la machine saine	43
Figure VI.8 : le couple électromagnétique (machine sain)	43
Figure VI.9 : spectre du courant statorique de la phase a	44
Figure VI.10 : l'allure du courant et le spectre du courant statorique avec défaut sur une phase au stator	45
Figure VI.11 : l'allure du courant et le spectre du courant statorique avec défaut sur une phase Au rotor	46
Figure VI.12 : modelé de transmission flexible	47
Figure VI.13 : géométrie du roulement à bille	48
Figure VI.14 : spectre de la référence de couple pour un default sur la bague interne	49
Figure VI.15 : spectre de la référence de couple pour un default sur la bille	50

Introduction Générale

Introduction générale

Actuellement, les machines asynchrones sont considérées comme l'outil de conversion électromécanique le plus utilisé dans le milieu industriel. Cet engouement pour ce type de machine est justifié par sa simplicité de construction, son faible coût d'achat et sa robustesse mécanique. Des applications de la machine asynchrone à vitesse variable, ont vu le jour dans divers domaines en l'occurrence l'aéronautique, la robotique et dans certains mécanismes industriels à haute précision.

Toutefois, cette machine peut être affectée par des défauts potentiels qui se répercutent sur la sécurité de la production, la qualité du service et la rentabilité des installations. Par conséquent, il est très intéressant de développer des systèmes de diagnostic pour détecter de manière anticipée les défauts pouvant surgir dans ce type de machines.

L'apparition d'un défaut conduit le plus souvent à un arrêt irrémédiable de la machine asynchrone entraînant, en conséquence, un coût de réparation non négligeable pour l'entreprise (cas des machines de fortes puissances) sans oublier la perte de production occasionnée.

En effet, malgré sa robustesse, la machine asynchrone triphasée subit, au cours de sa durée de vie, un certain nombre de sollicitations externes et internes qui la rendent, potentiellement, défaillante. Malgré, l'augmentation croissante des exigences industrielles en termes de fiabilité, maintenabilité, disponibilité et sécurité, il était important de disposer d'un certain nombre d'outils et de techniques permettant de diagnostiquer l'état de la machine. Ces outils de diagnostic sont basés sur la détection de la signature des défauts au niveau des grandeurs mesurables habituelles dans l'industrie (grandeurs électriques statoriques) soit par le biais de l'analyse du contenu harmonique de ces grandeurs soit encore par le biais de l'observation comportementale de la machine.

Le 1^{er} chapitre est essentiellement consacré au Diagnostic de la machine asynchrone et la déférente terminologie relative au diagnostic et à la maintenance avec un rappelle sur les éléments de constitution de cette machine et leurs principe de fonctionnement

Le 2^{ème} chapitre traite les déférents défauts de la machine asynchrone à cage d'écureuil avec une étude statistique des défauts sur cette machine

Le 3^{ème} chapitre est contribué sur l'étude de différentes méthodes de diagnostic qui peuvent être employées dans la machine asynchrone

Le 4^{ème} chapitre concerne la modélisation et le diagnostic de défauts de la machine asynchrone

Chapitre 1

Diagnostic De La Machine Asynchrone

1. Introduction

Le diagnostic est une composante principale du module de supervision. Il consiste à déterminer à chaque instant le mode de fonctionnement dans lequel le système se trouve. Il s'appuie sur une connaissance a priori des modes de fonctionnement et sur une connaissance instantanée matérialisée par une nouvelle observation de l'état du système.

2. diagnostic et surveillance

2.1 Diagnostic : ensemble d'actions visant à évaluer l'état d'un procédé à partir de la connaissance de son fonctionnement. A partir de l'observation du procédé on détermine, par comparaison avec les divers états de fonctionnement connus, l'origine de ces défaillances, leurs causes et le degré de défaillance du système.

2.2 Défaut (panne, défaillance) : évènement engendrant une modification du fonctionnement du procédé. L'état ne correspond plus à un fonctionnement normal. Le système n'est plus apte à assurer totalement sa fonction.

2.3 Identification de défauts : détermination de la taille et du comportement temporel d'un défaut C'est une fonction qui suit la localisation [R.CAS-03].

2.4 Disponibilité : faculté d'un matériel ou d'un système à pouvoir fonctionner chaque fois que cela est nécessaire, 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.

2.5 Fiabilité : capacité d'un système à fonctionner pendant un certain temps sans panne ; elle se caractérise par le temps moyen de bon fonctionnement.

2.6 Sécurité : ce terme regroupe les notions de disponibilité, fiabilité, maintenabilité et sécurité du système. Elle caractérise la confiance que l'on peut apporter au fonctionnement.

2.7 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 [R.CAS-03].

2.8 Supervision : représente la surveillance d'un système physique et la prise de décisions appropriées en vue de maintenir son opération face à des défaillances [R.CAS-03].

2.9 Perturbation : signal d'entrée non contrôlé dont la présence est non souhaitable mais considérée comme normale [R.CAS-03].

2.10 Symptôme : changement d'une quantité observable par rapport à un comportement normal.

2.11 Dysfonctionnement : exécution d'une fonction du système au cours de laquelle le service rendu n'est pas délivré ou il est délivré de manière incomplète [R.CAS-03].

2.12 Résidu : les résidus (Résiduel) sont définis comme étant des indicateurs de défauts.

Ils expriment l'écart par rapport au fonctionnement normal dans un espace de représentation donné.

Cet espace dépend de la nature des informations manipulées (variable numérique, booléenne, variable qualitative, forme). C'est sur la base de leurs valeurs que la décision de détection est prise ou pas. Souvent, les résidus sont considérés nuls (statistiquement) en l'absence de défaut.

3. Terminologie relative à la maintenance

3.1 Définition de la maintenance

AFNOR (Association Française de Normalisation) par la norme NF EN 13306 (avril 2001) définit la maintenance comme étant l'ensemble des actions techniques, administratives et management durant le cycle de vie d'un bien, destinées à le rétablir dans un état dans lequel il peut accomplir la fonction requise.

Bien maintenir, c'est assurer l'ensemble de ces opérations au coût optimal

3.2 Maintenabilité : La maintenabilité est une caractéristique précisant la facilité et la rapidité avec lesquelles un système peut être remis en un état de fonctionnement total avec une fiabilité correspondant à son âge.

La rapidité de remise en état d'un système peut être mesurée par la durée active du dépannage. Par active, on entend qu'on ne comptera pas les temps morts non imputables à la conception du système, tels que les délais de réponse des dépanneurs, les durées d'attente des pièces de rechange ou les temps passés à la rédaction des pièces administratives, car ces temps dépendent de l'organisation et de l'efficacité du service de maintenance et non de la conception du système.

La figure I.1 représente le diagramme des différents concepts de maintenance et les événements associés.

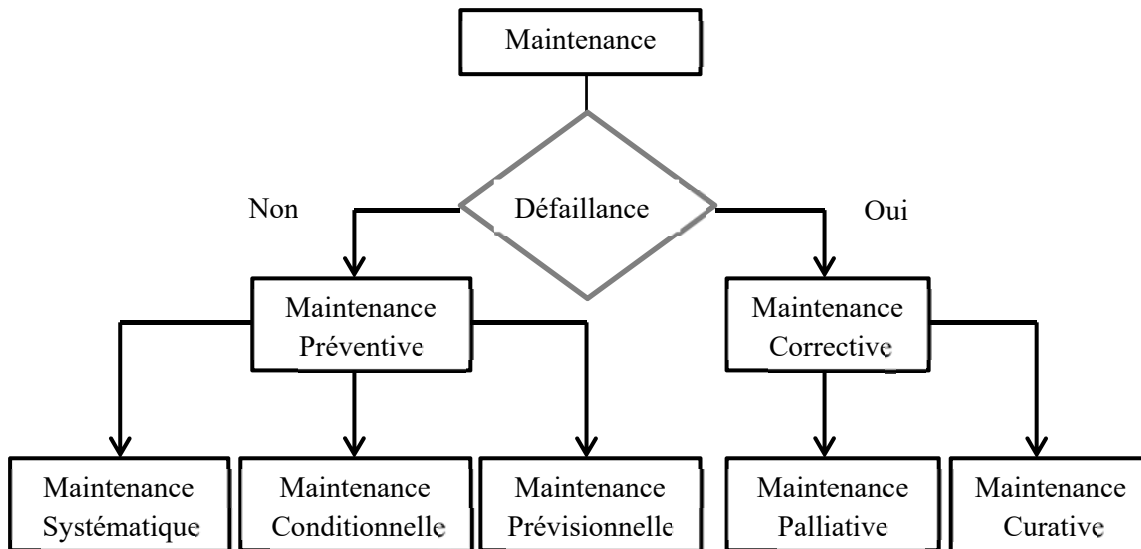


Figure I.1 Diagramme des différents concepts de maintenance

On peut citer trois types de maintenance :

3.3 Maintenance corrective : intervient après la détection et la localisation d'un défaut.

3.4 Maintenance préventive : maintenance effectuée dans l'intention de réduire la probabilité de défaillance d'un bien ou la dégradation d'un service rendu. C'est une intervention de maintenance prévue, préparée et programmée avant la date probable d'apparition d'une défaillance.

3.5 Maintenance conditionnelle : alternative à la maintenance systématique, fait l'objet d'une demande croissante dans un grand nombre d'applications industrielles. Cette maintenance est basée sur la surveillance en continu de l'évolution du système, afin de prévenir un dysfonctionnement avant qu'il n'arrive. Elle n'implique pas la connaissance de la loi de dégradation. La décision d'intervention préventive est prise lorsqu'il y a évidence expérimentale du défaut imminent, ou approche d'un seuil de dégradation prédéterminé. Elle impose donc des traitements en ligne, au moins une partie.

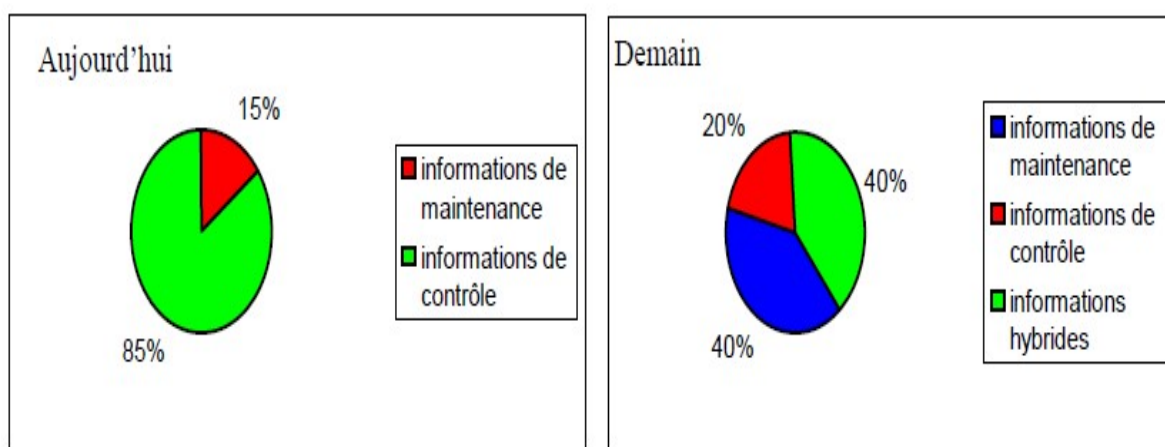


Figure I.2 Evolution des informations traitées par le système

4. Constitution de la machine asynchrone

4.1. Introduction

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

Dans ce chapitre, nous allons considérer le cas d'une machine asynchrone à cage d'écureuil le sujet du mémoire.

Les éléments de constitution d'une machine asynchrone à cage d'écureuil sont illustrés dans La figure I.3.

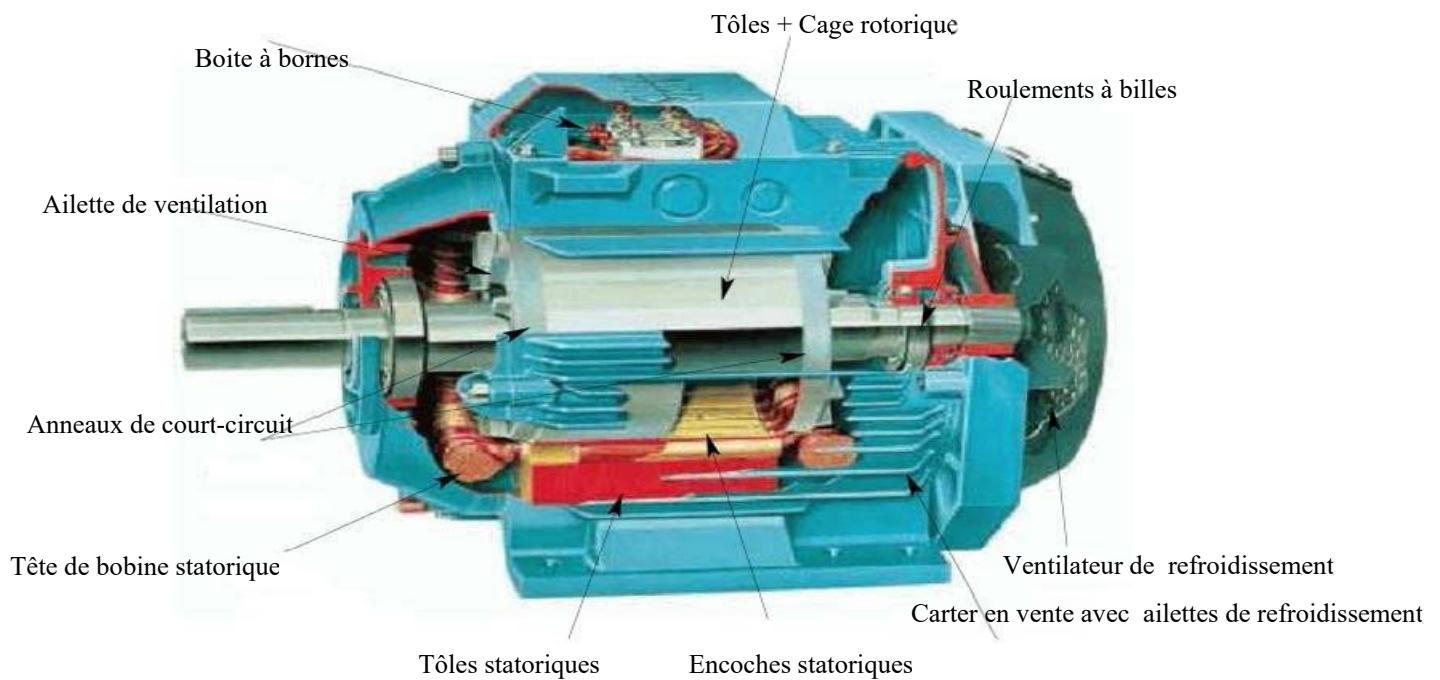


Figure I.3 Eléments de constitution d'une machine asynchrone a cage d'écureuil [DID-04]

4.2 Le stator

Il est constitué d'un enroulement bobiné réparti dans les encoches du circuit magnétique. Ce circuit magnétique est constitué d'un empilage de tôles dans lesquelles sont découpées des encoches parallèles à l'axe de la machine (figure I.4). Le bobinage statorique peut se décomposer en deux parties : les conducteurs d'encoches et les têtes de bobines [OND-06].

Les conducteurs d'encoches permettent de créer dans l'entrefer le champ magnétique à l'origine de la conversion électromagnétique. Les têtes de bobines permettent, quant à elles, la fermeture des courants en organisant la circulation judicieuse des courants d'un conducteur d'encoche à l'autre.

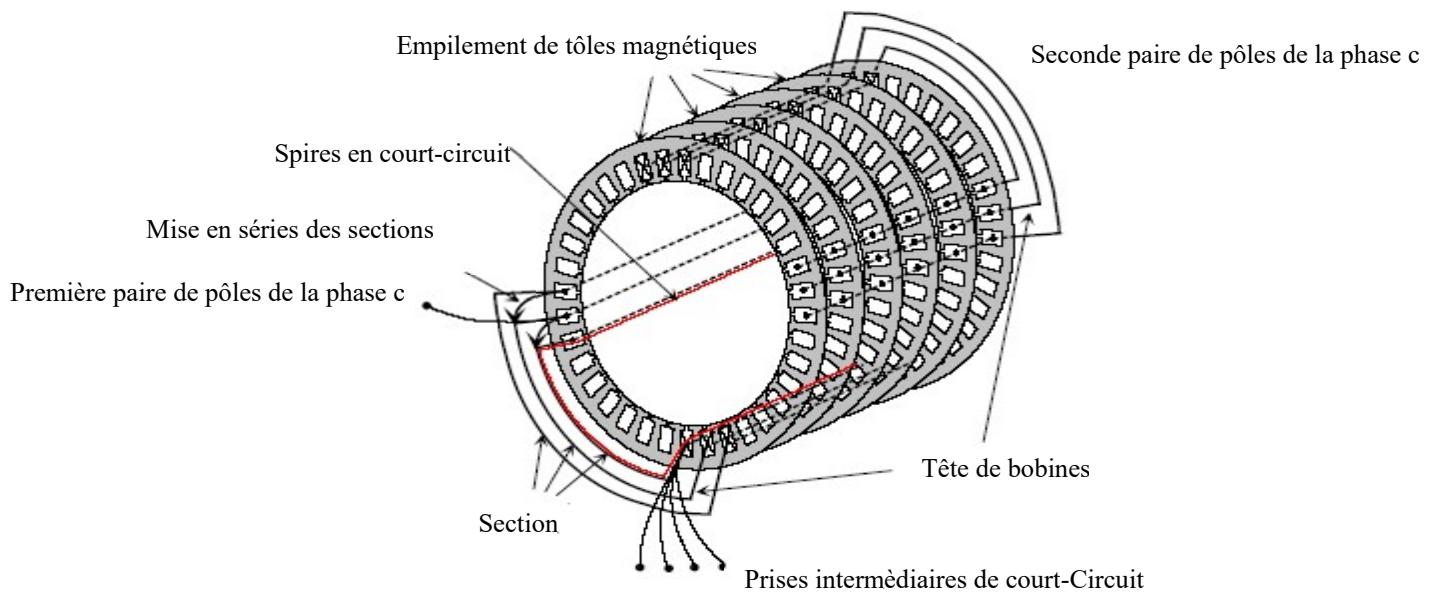


Figure I.4 Vue schématique en perspective du stator [SCH-99]

4.3 Le rotor à cage

Le circuit du rotor est constitué de barres conductrices régulièrement réparties entre deux couronnes métalliques formant les extrémités, le tout rappelant la forme d'une cage d'écureuil. (Figure I.5).

Cette cage est insérée à l'intérieur d'un circuit magnétique constitué de disques en tôles empilés sur l'arbre de la machine analogue à celui du moteur à rotor bobiné.

Les barres sont faites en cuivre, en bronze ou en aluminium, suivant les caractéristiques mécaniques et électriques recherchées par le constructeur.

Ce type de moteur, beaucoup plus simple à construire que le moteur à rotor bobiné et, de ce fait, son prix de revient est inférieur. De plus, il dispose d'une plus grande robustesse. Il constitue la plus grande partie du parc de moteurs asynchrones actuellement en service.

Son inconvénient majeur est qu'il a, au démarrage, de mauvaises performances

(Courant élevé et faible couple). C'est pour remédier à cette situation qu'ont été développés deux autres types de cages (rotor à double cage et rotor à encoches profondes).

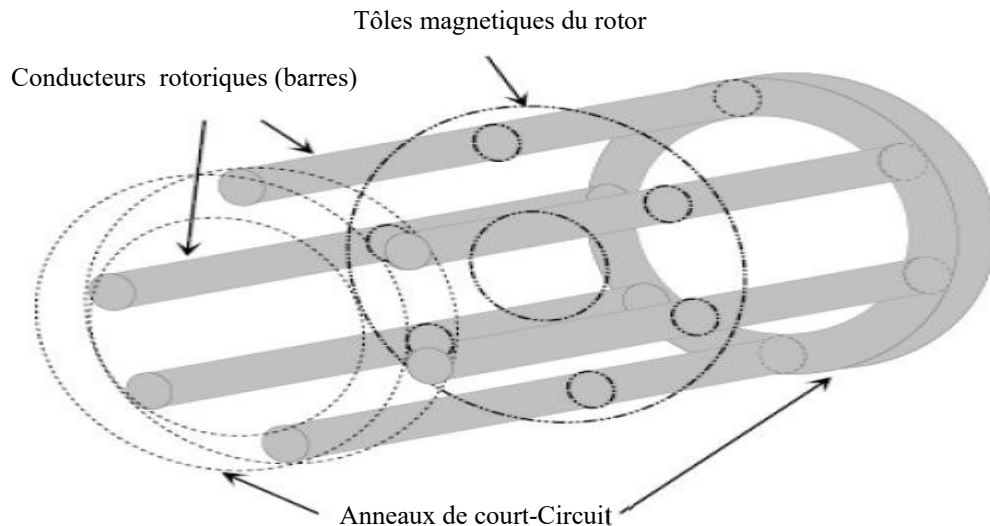


Figure I.5 Vue schématique en perspective du rotor [SCH-99]

4.4 Organes mécaniques

4.4.1 La carcasse : sert de support. Elle joue le rôle d'enveloppe et assure la protection contre l'environnement extérieur.

4.4.2 L'arbre : est un organe de transmission du mouvement de rotation. Il comprend une partie centrale qui sert de support au corps du rotor et un bout d'arbre sur lequel est fixé un demi-accouplement. Il est, généralement, constitué en acier moulé ou forgé

4.5 Les ventilateurs

La transformation de l'énergie électrique, ou inversement, ne peut s'effectuer sans pertes, l'énergie ainsi perdue étant transformé en chaleur.

La ventilation a pour but d'extraire les pertes internes de leurs différentes sources et d'assurer un refroidissement aussi homogène que possible des bobinages.

4.6 Le circuit magnétique

Il a pour fonction la canalisation des lignes d'induction magnétique, le maintien des conducteurs, la conduction thermique des conducteurs vers les zones de refroidissement (Canaux de ventilation, entrefer). Donc il doit présenter à la fois des propriétés magnétiques, des caractéristiques mécaniques déterminées et une bonne conductivité thermique. En régime établi, l'induction en chaque point du circuit est variable. L'origine de cette variation est électrique (ondes magnétiques créées par un circuit électrique pour un stator ou un rotor).

Les pertes fer, hystérésis et par courants de Foucault sont relativement importantes. Dans ce type de circuit on utilise des tôles de faible épaisseur, à grande perméabilité et à pertes magnétiques réduites [S.AIS et B.CH].

4.7 Les enroulements

Les enroulements servent à véhiculer les courants électriques à l'intérieur de la machine.

On distingue principalement les enroulements statoriques et rotoriques.

Ces enroulements sont, dans le cas général du type polyphasé, chaque encoche contient un certain nombre de conducteurs.

5. Principe de fonctionnement de la machine asynchrone

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-circuité 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 :

$$N_S = \frac{f}{p} \text{ En tr/s } \text{ ou } N_S = \frac{60f}{p} \text{ en tr/min} \quad (\text{I.1})$$

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 $n=n_1$, le champ serait immobile par rapport au rotor et aucun courant ne serait induit dans l'enroulement rotorique.

Le rapport $g = \frac{n_1 - n}{n_1}$ est appelé glissement de la machine asynchrone. (I.2)

6. Caractéristiques

6.1 Fonctionnement à vide :

A vide le moteur n'entraîne pas de charge.

Le glissement est nul et le moteur tourne à la vitesse de synchronisme.

A vide : $g = 0$ donc $v_0 = v_s$, le facteur de puissance à vide est très faible (< 0.2) et le courant absorbé reste négligeable (P est petit et Q grand). On parle alors de courant réactif ou magnétisant (ils servent à créer le champ magnétique) [Nan, T.h99].

6.2 Fonctionnement en charge

Le moteur absorbe maintenant de la puissance active et fournit la puissance mécanique, le stator appelle un courant actif.

7. Conclusion

Ce premier chapitre est essentiellement consacré à l'état de l'art de la machine asynchrone et sur le diagnostic qui est une partie intégrante de la fonction maintenance et cette dernière nécessite la connaissance des éléments constitutifs de la machine asynchrone et les défauts mécaniques les plus fréquents dans la machine asynchrone.

Chapitre II

Les Défaits Dans Les Machines Asynchrones

1. Introduction

Les procédures de diagnostic pour la surveillance en ligne de l'état des moteurs électriques sont déjà utilisées depuis plusieurs décennies, une attention particulière étant accordée aux types les plus couramment utilisés, les moteurs asynchrones à cage. De nos jours, de plus en plus les entraînements électriques industriels ont tendance à être supervisés par telles techniques. Parmi les défauts des machines asynchrones à cage possibles, les chercheurs traitent principalement les défauts d'enroulements statoriques, ou des différents défauts mécaniques, tels que des défauts de roulements, des excentricités rotoriques, asymétrie électrique du rotor due aux ruptures des barres rotoriques ou segments d'anneau d'extrémité. Certaines de ces méthodes pourraient également être utilisées pour la détection de défauts mixtes [CH-A17]

2. Principaux défauts de la machine asynchrone

Les principaux défauts de la machine asynchrone triphasée à cage apparaissent dans les différentes parties constituant la machine classée en deux types :

2.1 Défauts internes

Des défauts causés par les constituants de la machine (circuits magnétiques rotorique et statorique, bobinages statoriques, entrefer mécanique, cage rotorique...)

2.2 Défauts externes

Des défauts sont provoqués, soit par les tensions d'alimentation et la charge mécanique, soit par l'environnement de l'utilisation de la machine.

Celons l'organigramme des figure II.1 et figure II.2, les origines des défauts sont diverses :

1. Mécaniques : mauvaise fabrication, vibrations de la machine, force électromagnétiques déséquilibrées, force centrifuge, fluctuations de la charge.
2. Electriques : dégradations d'isolement, décharges partielles, étincelles.
3. Thermiques : pertes dans le cuivre, manque de refroidissement général ou localisé.
4. Environnementales : humidité, ou zone, poussière.

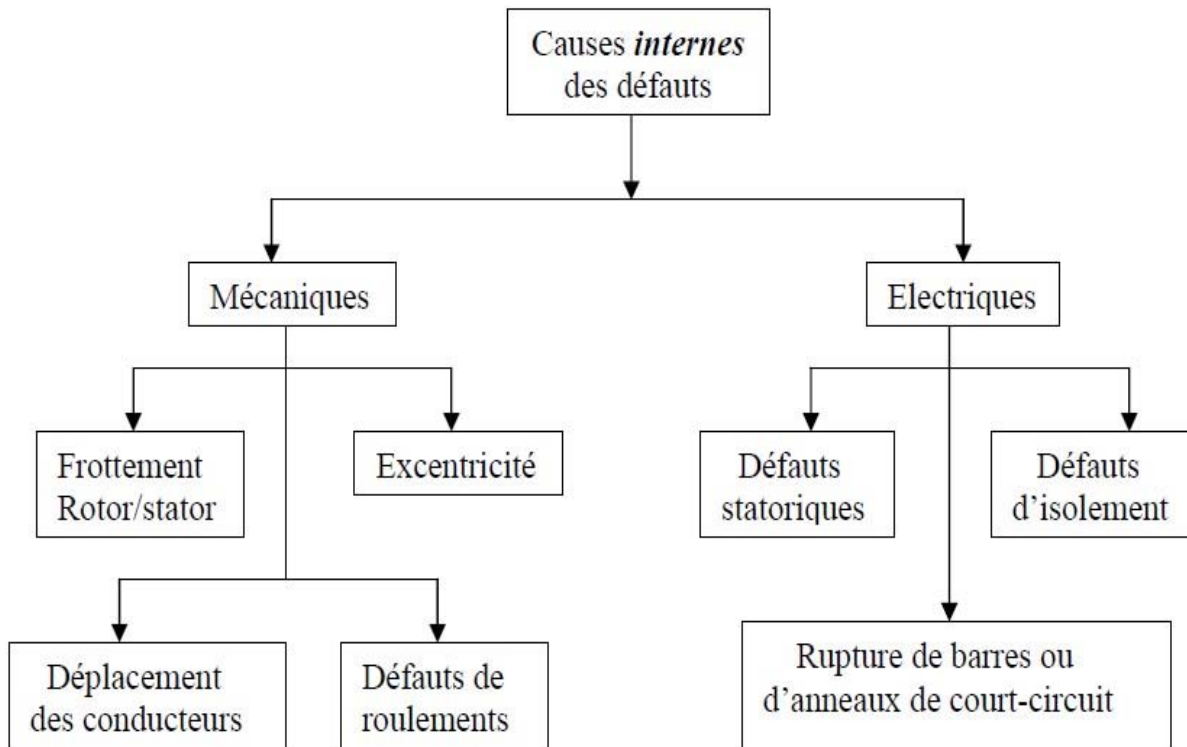


Figure II.1 Causes internes de défauts de la machine asynchrone triphasée à cage [KHA-08]

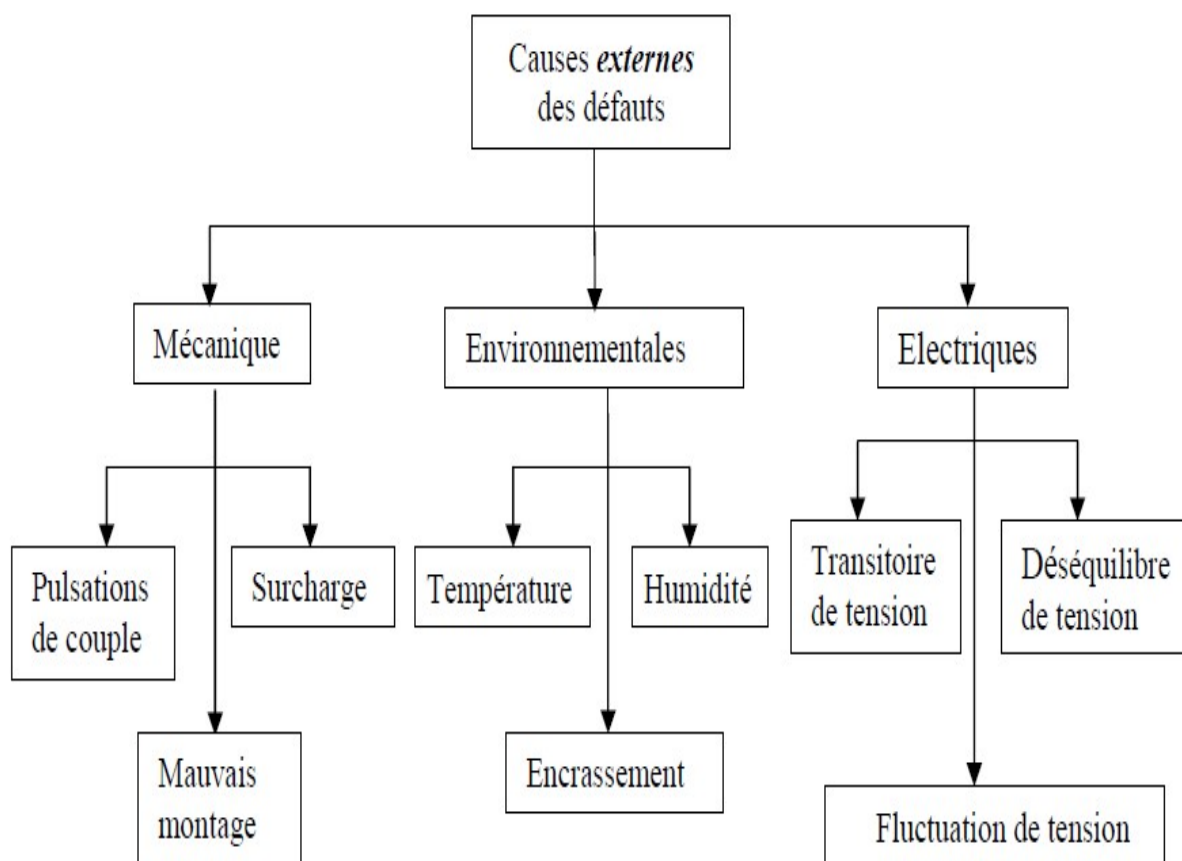


Figure II.2 Causes externes de défauts de la machine asynchrone triphasée à cage [KHA-08]

Celles-ci engendrent par conséquent des sur échauffements et des contraintes mécaniques conduisant à terme à des fissures puis à une cassure de barres. Par effet d'avalanche la barre cassée accélère la rupture des barres adjacentes pouvant aboutir jusqu'à la destruction totale du rotor. De même, les efforts électrodynamiques que subissent les conducteurs des phases se traduisent par des vibrations mécaniques ayant pour effet de détériorer l'isolation. Sur le plan électrique, les fronts de tensions générés par les convertisseurs statiques accentuent le phénomène de décharges partielles et réduisent, par conséquent, la durée de vie de l'isolant.

Quant aux origines environnementales, l'humidité et les produits corrosifs ou abrasifs sont les plus rencontrés.

Au niveau de l'entrefer, les défauts se manifestent par une excentricité statique, une excentricité dynamique ou une excentricité mixte. Le défaut d'excentricité statique est généralement dû à un désalignement de l'axe de rotation du rotor par rapport à l'axe du stator. Le défaut d'excentricité dynamique peut être causé aussi bien par une déformation du cylindre rotorique que par une déformation du cylindre statorique. L'excentricité mixte est une combinaison des deux.

Au niveau de la cage, les défauts se manifestent par la rupture de barres ou d'anneaux de court-circuit. Ces ruptures de barres ou de portions d'anneau peuvent être dues,

Par exemple, à une surcharge mécanique (démarrages fréquents,..), à un échauffement local excessif ou encore à un défaut de fabrication (bulles d'air ou mauvaises soudures).

Au niveau des paliers nous pouvons citer le défaut de décentrage des flasques conduisant généralement à une excentricité statique alors qu'une détérioration de roulements à billes conduit le plus souvent à une excentricité dynamique.

Il est important de signaler que plusieurs études statistiques ont été menées dans le but de quantifier l'impact de chaque type de défaut sur la fiabilité de la machine et leurs pourcentages ont été cités dans plusieurs publications. Les résultats obtenus restent quand même assez différents d'une étude à l'autre. Cependant, toutes les études convergentes pour classer les défauts de paliers comme étant les plus fréquents, suivis par les défauts statoriques et, en dernier, les défauts de cage rotorique.

Principaux défauts des entraînements électriques

Les composants et/ou les systèmes électriques ont tendance à souffrir d'usure, de détérioration de l'isolation, du vieillissement des pièces en plastique, de la fatigue due à la flexion, à la contamination par la saleté et l'humidité,...etc. Les défauts courants survenant dans les entraînements électriques peuvent être classés comme suites :

- Défauts électriques: court-circuit d'enroulement de stator, barre de rotor cassée, bague d'extrémité cassée, défaillance de l'onduleur.
- Défauts mécaniques: excentricité du rotor, défauts de roulement, désalignement d'arbre, défauts dans la partie de charge. [LA-S20]

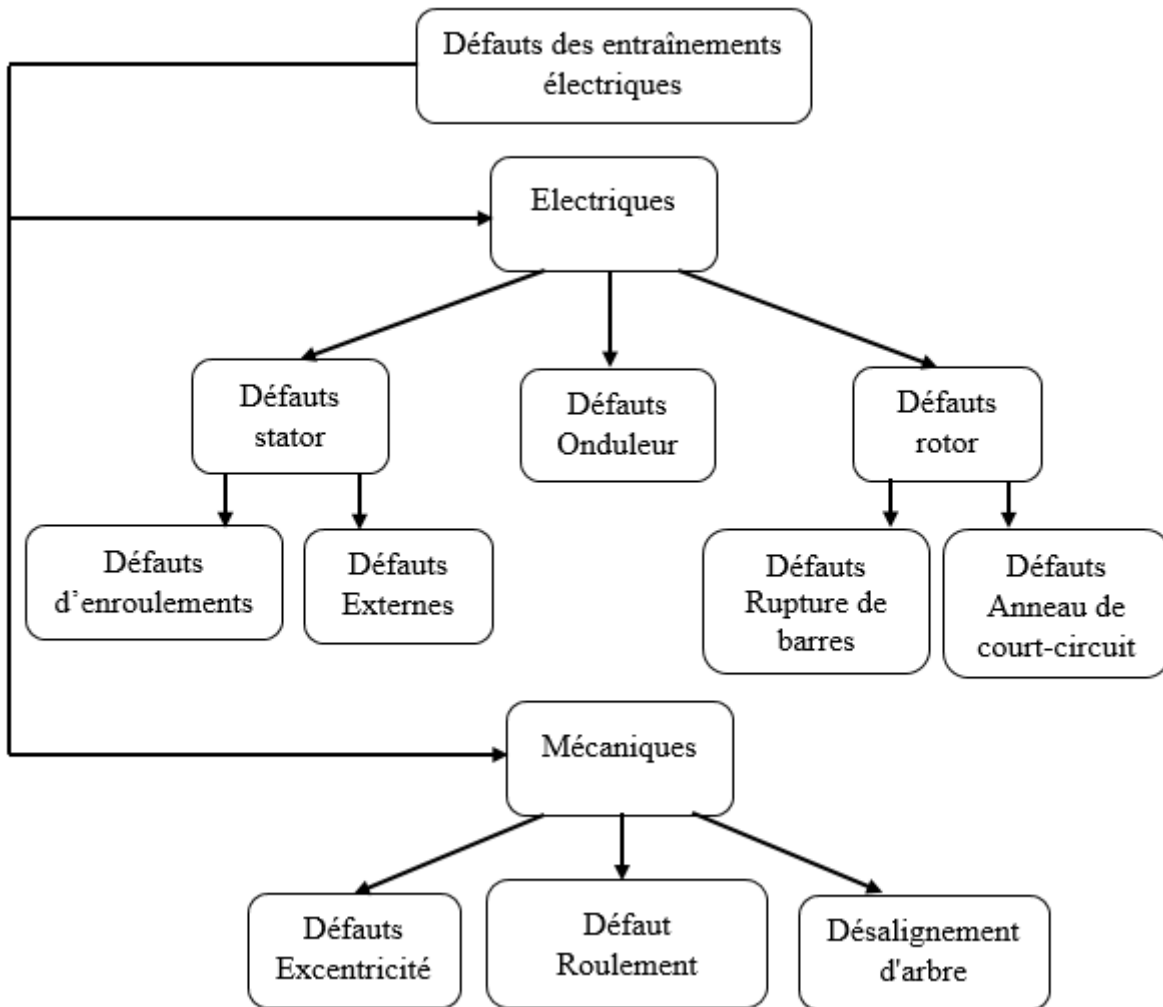


Figure II3 Schéma de principe des catégories de défauts des entraînements électriques.

3.1 Défauts d'ordre mécanique

Les défaillances d'ordre mécanique, les plus souvent rencontrées Ces défauts peuvent apparaître au niveau des roulements à billes, des flasques ou encore de l'arbre moteur.

3.1.1 Défauts du flasque

Les défauts créés par les flasques de la machine asynchrone sont le plus généralement causés à l'étape de fabrication. En effet, un mauvais positionnement des flasques provoque un désalignement des roulements à billes, ce qui induit une excentricité au niveau de l'arbre de la machine. Il est possible de détecter ce type de défaillance par une analyse vibratoire ou une analyse harmonique des courants absorbés par la machine.

3.1.2 Défauts de l'arbre

L'arbre de la machine peut laisser apparaître une fissure due à l'utilisation d'un mauvais matériau lors de sa construction. A court ou long terme, cette fissure peut mener à une fracture nette de l'arbre provoquant ainsi un arrêt immédiat de la machine asynchrone. Les milieux corrosifs peuvent aussi affaiblir la robustesse de l'arbre de la machine. Une excentricité statique, dynamique ou mixte peut induire des efforts considérables sur l'arbre moteur.

3.1.3 Défauts des roulements mécaniques

Le roulement à billes est un organe de base dans la machine asynchrone qui joue le rôle d'interface mécanique entre le stator et le rotor. En plus, il représente l'élément de maintien de l'axe de la machine permettant de garantir une bonne rotation du rotor

Le roulement est composé des éléments suivants [IBR-09] :

Deux bagues concentriques en acier, appelées bague intérieure et bague extérieure, comportant des chemins de roulement (surfaces sur lesquelles "roulent" les corps roulants).

- Des corps roulants, billes ou rouleaux généralement en acier, permettant le mouvement des deux bagues avec un frottement minimal.
- Une cage séparant et guidant les corps roulants (en polyamide, tôle acier, laiton ou résine).

La figure I.8 montre la construction typique d'un roulement à billes.

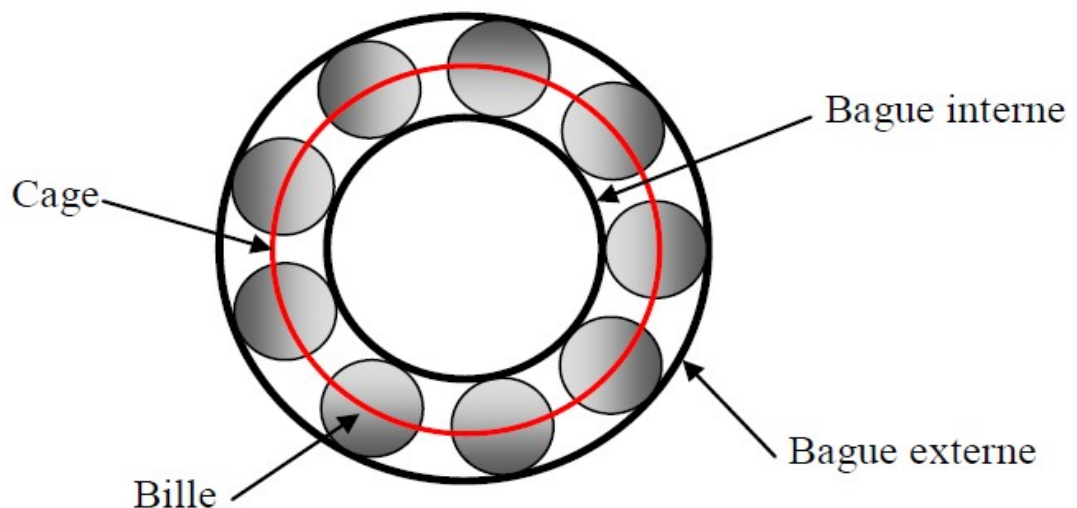


Figure II.4 Structure d'un roulement à billes [IBR-09]

Suivant l'emplacement géométrique du défaut dans le roulement, nous pouvons distinguer les types de défauts suivants [BON-93] :

- . Défaut de bague extérieure
- . Défaut de bague intérieure
- . Défaut de billes

Les roulements peuvent être endommagés par les causes suivantes [IBR-09], [BON-93], [VAS-09].

- . Contamination du roulement par des particules extérieures : poussière, grains de sable, etc.
- . Corrosion engendrée par la pénétration d'eau, d'acides,
- . Lubrification inadéquate qui peut causer un échauffement et l'usure du roulement.
- . Mauvais alignement du rotor.
- . Une température de fonctionnement élevée.
- . Courant qui traverse le roulement et qui cause des arcs électriques.
- . Installation inexacte du roulement ; en forçant incorrectement le roulement sur l'arbre du rotor ou dans les flasques (dû au désalignement), des entailles seront formées sur les chemins de roulement.

4. Autres Défauts mécaniques

Au stator, il n'y a pas de pièces mobiles donc à priori pas de défaillances mécaniques. Cependant, il peut apparaître des phénomènes d'oxydation liés à l'environnement de la machine et plus précisément au taux de salinité qui influe sur l'étanchéité et les contacteurs [OND-06].

5. Défauts au stator

Les défaillances au stator sont attribuées à la dégradation d'isolants. Les causes les plus fréquentes des défauts d'enroulements statoriques sont [IBR-09], [VAS-09], [ESF-14] :

- 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.
- Échauffement excessif du noyau et des enroulements du stator.
- Fissures dans la tôle, de fixation, et des jonctions.
- Mauvaise connexion des têtes des enroulements.
- Fonctionnement dans un environnement sévère, contamination provoquée par l'humidité et la saleté.
- Courant élevé dans l'enroulement dû à un court-circuit, un défaut du convertisseur, une surcharge.
- Décharges électriques.
- Tension de l'enroulement supérieure à la limite du matériau d'isolation.
- Fuites dans les systèmes de refroidissement.

5.1. Défauts d'isolant dans un enroulement

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

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

Différentes. La détérioration simultanée et dans une même zone, des isolants de ces deux bobines provoque un contact électrique entre deux spires de deux phases différentes (défaut phase-phase

5.1.1 Un court-circuit entre spires de la même phase

Le chauffage excessif provoqué par le court-circuit entre spires est la raison pour laquelle les moteurs tombent en panne presque toujours en quelques minutes, si ce n'est quelques secondes. Ainsi, chaque 10°C additionnel augmente la détérioration de l'enroulement deux fois plus rapidement que dans un fonctionnement à température normale [IBR-09]

5.1.2 Un court-circuit entre phases

Ce défaut peut arriver en tout point du bobinage, mais les plus fréquents apparaissent dans les têtes de bobines, puisque c'est dans celles-ci que les conducteurs de phases différentes se côtoient [VAS-09].

L'influence de ce type de défaut sur le fonctionnement de la machine dépend de la localisation du défaut (de la partie affectée).

Si le court-circuit est proche de l'alimentation entre phases, il induit des courants très élevés qui conduisent à la fusion des conducteurs d'alimentation ce qui provoque un arrêt net de la machine [BOU-13].

Si le court-circuit est proche du neutre entre deux phases, il engendre un déséquilibre des courants de phases avec un risque moindre de fusion des conducteurs

6. Défauts de circuit magnétique

Les tôles du circuit magnétique sont feuilletées et isolées entre elles, cependant elles peuvent se retrouver court-circuitées. Les causes de défaut de circuit magnétique sont liées à un défaut d'excentricité statique et/ou dynamique qui peut conduire à un contact front entre le stator et le rotor ce qui détruit le circuit magnétique, ou bien court-circuit des conducteurs qui peut également provoquer un échauffement dans les tôles, ainsi la projection des corps étrangers dans l'entrefer peut entraîner l'abrasion des tôles et ainsi les court-circuitées [SAH-10].

7. Défauts au rotor

Plusieurs facteurs manifestent l'apparition des défaillances au niveau du rotor de la machine asynchrone, parmi eux, on cite [VAS-09] :

- Thermique (surcharge, ...).
- Electromagnétique (force en $B^2(t)$...).
- Dynamique (arbre de transmission, ...).

Les défauts qui sont les plus répétitifs, localisés au niveau du rotor sont : l'excentricité statique et dynamique, la rupture de barres rotoriques et la rupture d'une portion d'anneau de court-circuit.

8. Excentricité

Les effets des défauts mécaniques se manifestent généralement au niveau de l'entrefer par des défauts d'excentricité, Lors du fonctionnement de la machine, deux causes principales aggraveront l'excentricité [CEB-12] :

1. La première est inhérente à la chaîne cinématique dans laquelle la machine intervient et qui peut imposer une force radiale sur l'arbre de cette machine, qui va engendrer une usure des roulements et une amplification du décentrement.

2. Le deuxième phénomène le décentrement génère un déséquilibre dans la distribution des efforts radiaux entre le stator et le rotor. L'effort radial est maximal à l'endroit où se situe l'épaisseur minimale de l'entrefer et va tendre à diminuer encore plus la valeur de l'entrefer minimum et augmenter par conséquent encore plus le déséquilibre des efforts radiaux. Trois catégories d'excentricité sont généralement distinguées, [WER-12] :

- L'excentricité statique : généralement due à un désalignement de l'axe de rotation du rotor par rapport à l'axe du stator. Elle résulte d'un défaut de centrage des en raison des méthodes de fabrication et d'assemblage [CEB-12] (voir figure II.5.b).
- L'excentricité dynamique : ce type d'excentricité est causé par une déformation du cylindre rotorique, une déformation du cylindre statorique ou la détérioration des roulements à billes. Elle correspond au décalage du centre de rotation du rotor par rapport au centre géométrique du stator, avec en plus, une rotation du centre du rotor autour du centre géométrique de ce stator [CEB-12] (voir figure II.5.c).
- L'excentricité mixte : en réalité, les excentricités statiques et dynamiques ont tendance à coexister, [FAI-09]. L'excentricité devient suffisamment grande pour développer des forces radiales déséquilibrées qui peuvent créer un frottement entre le stator et le rotor, ce qui mène à une panne très grave de la machine.

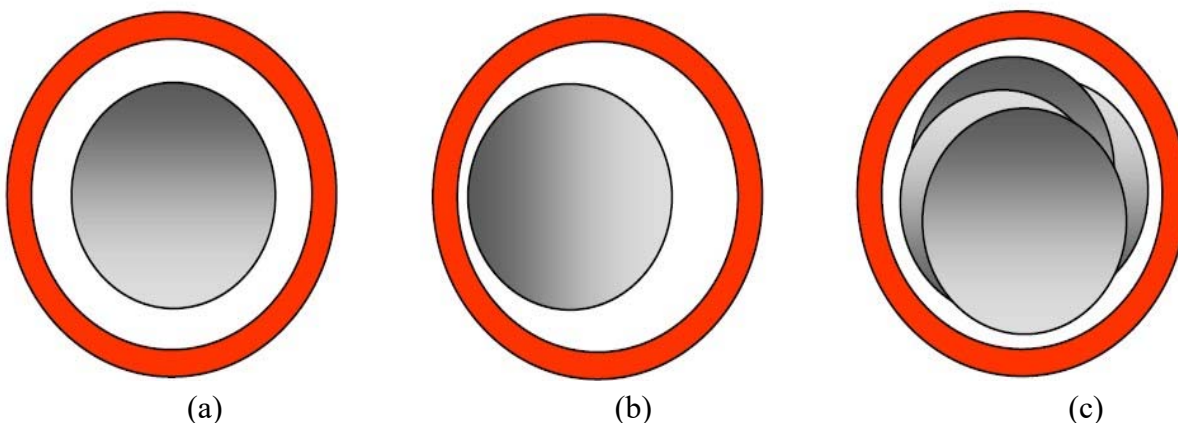


Figure II.5 Types d'excentricité : (a) rotor concentré ; (b) excentricité statique ; (c) excentricité dynamique

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

D'autre part, cette augmentation peut avoir comme conséquence des frottements entre le stator et le rotor en raison des forces d'attraction magnétique qui déséquilibrent le système.

Ceci donne naissance à des niveaux de vibration considérables dans les enroulements [VAS-09].

9. Rupture de barres et d'anneau de court-circuit

Elle peut se situer soit au niveau de son encoche soit à l'extrémité qui la relie à l'anneau de court-circuit. Les ruptures de barres ou de portions d'anneau peuvent être dues, à une surcharge mécanique (démarrages fréquents, etc.), à un échauffement local excessif ou à un défaut de fabrication (bulles d'air ou mauvaises soudures) [BON-92]. 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 cassure de barres dans une machine asynchrone à cage sont dues soit à des bulles de coulées ou aux dilatations différentielles entre les barres et les anneaux, d'autant que les portions d'anneaux de court-circuit véhiculent des courants plus importants que ceux des barres rotoriques, conduit à une détérioration des conditions de fonctionnement ou une surcharge de couple et, donc, à des courants pouvant entraîner leur cassure [VAS-09], [CEB-12].

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 [TOL-95].

10. Etude statistique des Défauts de la machine asynchrone

Plusieurs études statistiques ont été menées dans le but de quantifier l'impact de chaque type de défaut sur la fiabilité de la machine et leurs pourcentages ont été cités dans plusieurs publications.

La figure II.6 présente les phénomènes à l'origine des défauts dans la machine ; la principale source de défauts provient de la mécanique; la deuxième cause de défauts est la surchauffe du moteur qui accentue le vieillissement des composants; la troisième cause de défauts référencés est le claquage d'isolants conduisant à des courts-circuits.

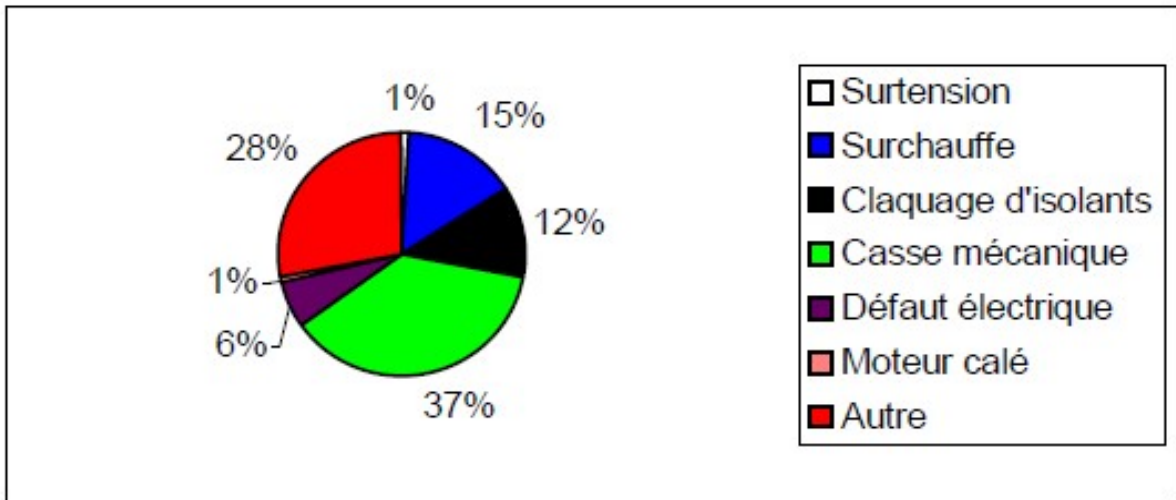


Figure II.6 Répartition des causes des défauts pour une machine asynchrone

La figure II.7 précise les conditions qui aggravent le défaut : la première source d'aggravation provient de l'usure des éléments avec l'âge et la durée de service. Cette usure est renforcée par les différentes conditions de fonctionnement (surchauffe, humidité, exposition,...).

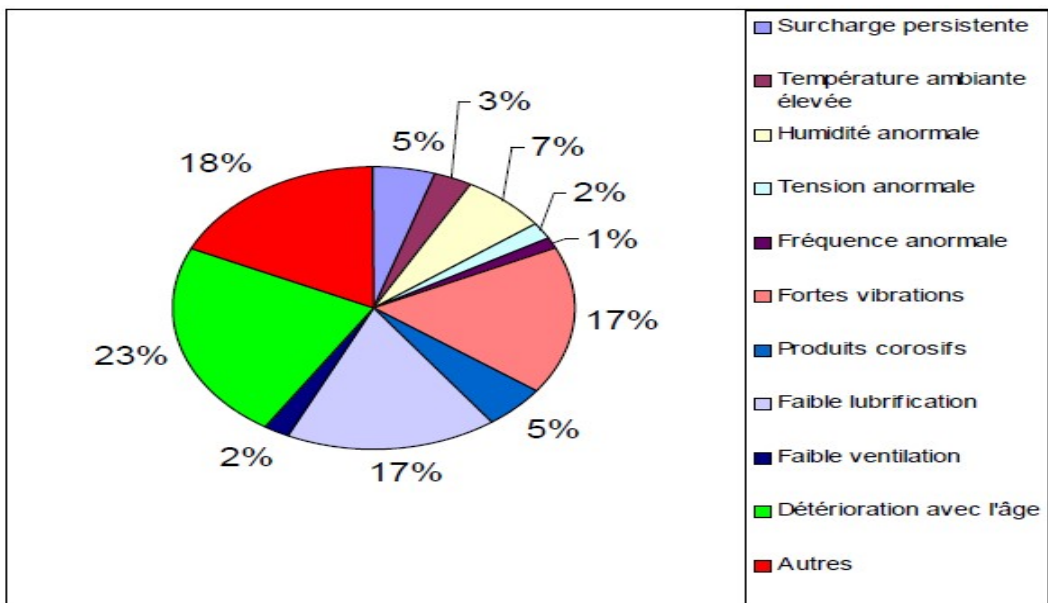


Figure II.7 Facteurs aggravants le défaut

Une étude conduite pour IEEE [IEE-85] a établi une statistique des différents défauts pouvant se produire sur une machine électrique (figure II.8).

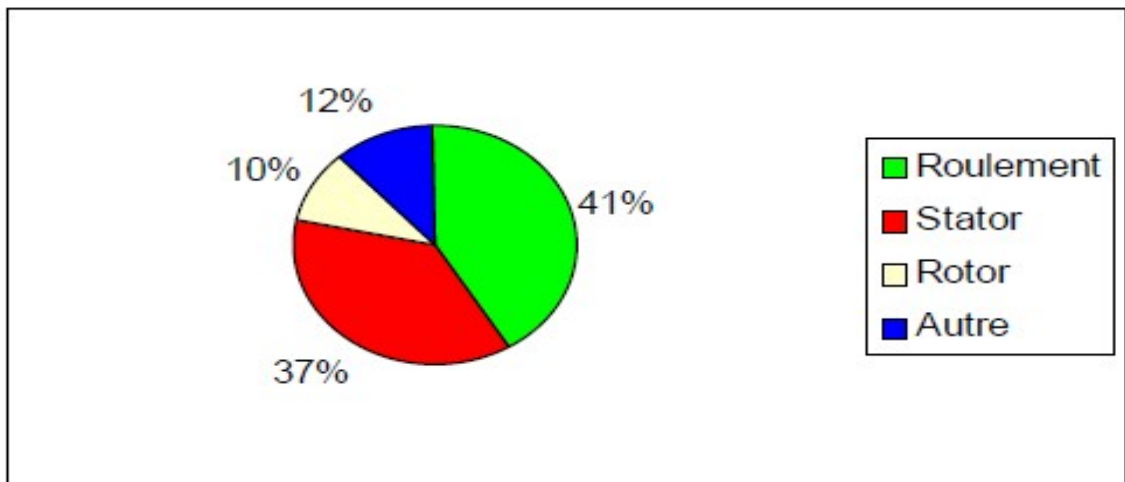


Figure II.8 Répartition des défauts [IEE-85]

10.1 Défauts statoriques

La majeure partie des défauts au stator des machines asynchrones est due à des défauts d'isolement (Figure II.9)

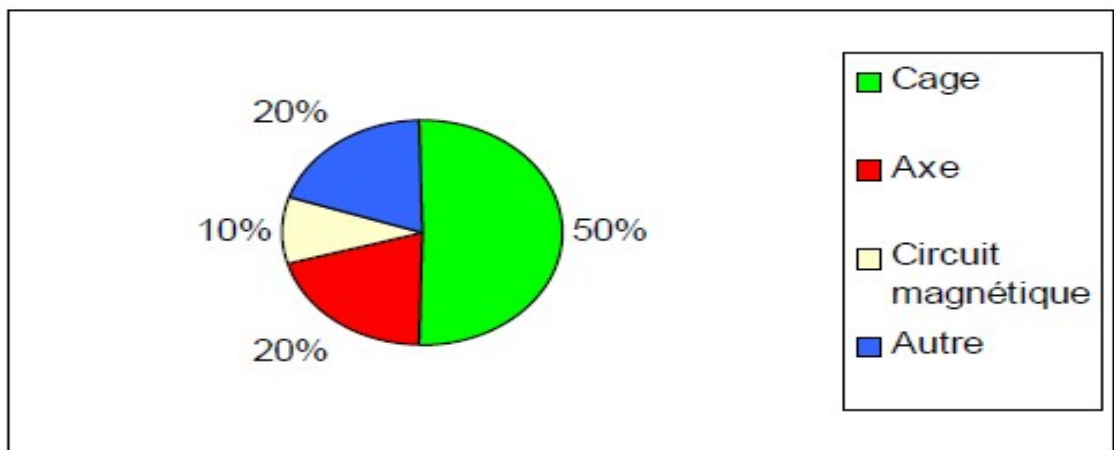


Figure II.9 Répartition des défauts statoriques

10.2 Défaits rotoriques

La majorité des défauts au rotor ont trait à la cage. La seconde source de défauts provient d'une déformation de l'axe du rotor (figure II.10).

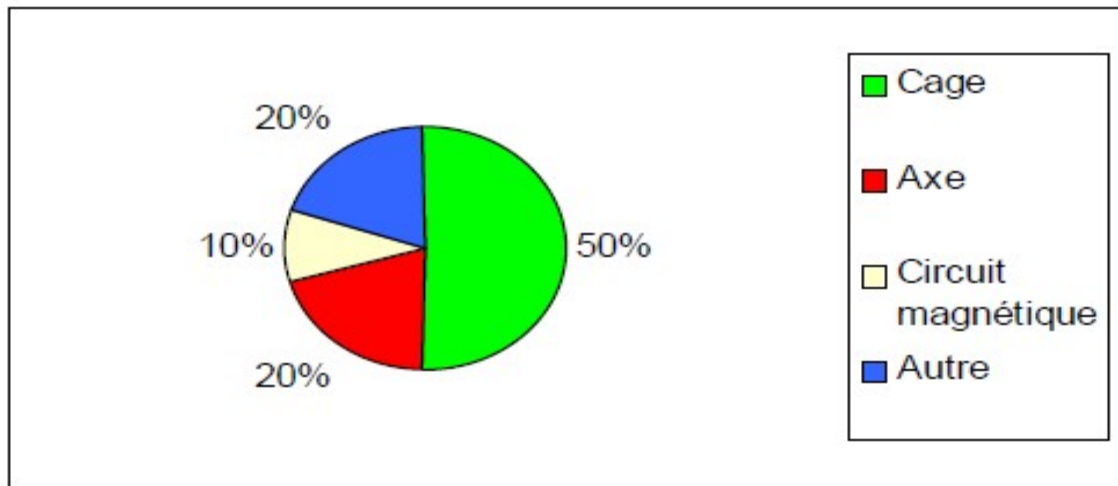


Figure II.10 Répartition des défauts rotoriques [BER-00]

Ces deux défauts ont pour origine des contraintes de fonctionnement trop fortes sur la cage qui provoquent sa déformation.

11 Recherche indispensable des symptômes

Lorsque plusieurs défauts présentent les mêmes symptômes, il devient indispensable, pour l'opérateur, de rechercher systématiquement l'existence des symptômes en plus. Il faut insister d'emblée sur le fait que certains de ces symptômes ne sont pas spécifiques à un défaut en particulier et c'est l'analyse minutieuse qui doit faire montrer cela. [CH-A17]

Le diagnostic est facile lorsqu'il est fait en temps réel et lorsque les symptômes sont clairs. Le tableau (Tab.II.1) indique quelques modes de pannes typiques observées sur le moteur.

Symptômes	Causes probables
-Intensité réduite, Vitesse élevée et Température réduite.	- Diminution de la charge.
-Température exagérée.	- Ventilation incorrecte.
-Intensité élevée, Vitesse réduite et Température élevée.	- Surcharge.
-Intensité exagérée, Vitesse très réduite et Température exagérée.	- Blocage de rotor ; - Mauvais branchement ; - Moteur chauffé.
- Vitesse réduite.	- Moteur faible.
- Intensité de l'une des phases est exagérée et Température exagérée ; ou - Intensité de deux phases est exagérée et Température exagérée ; ou - Intensité de l'une des phases est exagérée, Température exagérée et Vitesse réduite ; ou - Intensités de deux phases sont exagérées, Température exagérée et Vitesse réduite.	-Court-circuit entre spires.
- Intensité d'une phase est nulle.	- Rupture d'une phase du stator ; - Phase non alimentée.
- Intensités de deux phases sont nulles.	- les deux phases non alimentées.

Tab.II.1 Pannes types observées sur un moteur

Conclusion

Selon les études statistiques mentionnées dans ce chapitre, les défauts mécaniques sont les plus fréquents dans la machine asynchrone et peuvent être la cause directe de défauts dans d'autres parties de la machine et ainsi entraîner une défaillance plus grave à celle-ci.

Chapitre III

Les Méthodes De Diagnostic Dans La Machine Asynchrone

1 Introduction

Les moteurs asynchrones sont soumis pendant leur fonctionnement à plusieurs contraintes de différentes natures, l'accumulation de ces contraintes provoque des défauts dans les différentes parties du moteur.

Pour remédier au problème de détection des défauts, il existe une variété de techniques de diagnostic et de détection des défauts [PJ-BG86] [A-HB1]. Certaines d'entre elles sont basées sur l'observation et la mesure (mesure de champ magnétique, mesure de bruit) d'autres sont basées sur la surveillance et la comparaison des caractéristiques électromécaniques du moteur en défaut (courant statorique, couple et vitesse) (Figure III-1) [HR-GD].

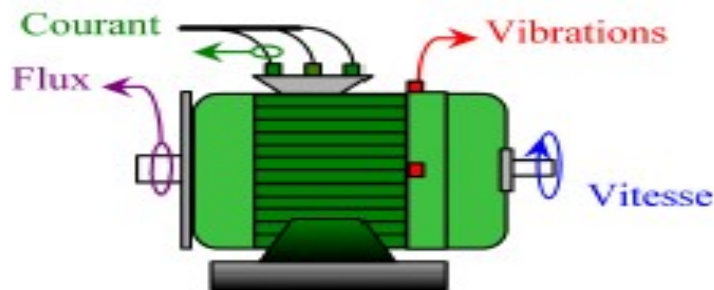


Figure III.1 : Les différentes grandeurs de diagnostic
Dans une machine.

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

2. Différentes méthodes de diagnostic

2.1. Techniques mécaniques : Parmi ces techniques, on trouve :

2.1.1 diagnostic par mesure de la température

Les températures des supports sont surveillées sur des bases de routine, et fournissent des informations utiles. Un volume de liquide refroidissant, débouché sur des températures, est aussi précieux pour l'indication des problèmes de refroidissement et pour le contrôle lorsqu'il est proposé de faire opérer la machine au-delà de sa puissance.

Les températures des bobines sont aussi impératives pour la détermination de la limite pour laquelle le moteur peut être chargé et pour l'estimation de la durée de vie résiduelle de l'isolation des enroulements. Elles sont rarement mesurées à cause des problèmes d'obtention de l'isolation électrique contre les conducteurs de haute tension, bien que les détecteurs de température soient parfois intercalés dans l'isolant renfermé sur le point surchauffé du conducteur, mais cela affaiblit l'intégrité de l'isolant.

Il demeure donc une nécessité pour le capteur de fortes températures lequel peut être monté sur les enroulements ou inséré dans l'isolant électriquement isolé par rapport à son instrument de mesure.

2.1.2 Diagnostic par mesure des vibrations

Le diagnostic vibratoire est une méthode très ancienne et très utilisée pour la détection des défauts dans les machines électriques.

Toutes les machines électriques produisent du bruit et des vibrations. Leur analyse peut être employée pour fournir des informations sur l'état de la machine.

Plus souvent, les mesures sont faites comme une procédure non fréquente ou lorsqu'un problème est suspecté, les mesures sont faites en utilisant des accéléromètres ou des capteurs de vitesse à boudins.

Des sondes de déphasage sont aussi employées pour le contrôle du mouvement de l'arbre. Le désalignement entre les centres des supports donnant naissance à un entrefer non uniforme produit la vibration à une fréquence double, tandis que le déséquilibre mécanique engendre la vibration à la vitesse angulaire, au moment où les deux dépendent de la réponse mécanique à cette fréquence.

Les signaux de vibrations détectés contiennent des informations essentielles sur l'état de la machine. L'analyse spectrale de ces signaux nous renseigne sur les différents défauts qui sont à l'origine de ces vibrations.

2.2. Diagnostic chimiques

Plusieurs moteurs sont refroidis par l'air ou à l'aide d'un circuit fermé avec un échangeur de chaleur hydro réfrigéré. La dégradation de l'isolation électrique dans le moteur produit le gaz d'oxyde de carbone qui apparaît dans le circuit de l'air refroidissant et qui peut être détecté par une technique d'absorption infrarouge.

L'air est tiré du moteur à travers le tube vers le détecteur infrarouge par une pompe auxiliaire. Seuls les moteurs en service sont échantillonnés et la forme de l'air de chaque moteur est analysée pendant deux minutes.

L'huile de roulement est aussi analysée régulièrement, et l'intervention est requise si les produits indiquant la dégradation sont présents [PJ-BG86]

A ce stade, on peut conclure que la plupart des techniques précitées exigent l'emploi des capteurs, qui doivent être placés au niveau de la machine. C'est pour cette raison elles peuvent être utilisées que pour les machines de grande puissance.

Ces techniques sont basées généralement sur l'utilisation des grandeurs mécaniques, afin que les ingénieurs mécaniciens puissent faire leur interprétation, bien que les machines soient des moteurs électriques. La présence des ingénieurs électriciens est nécessaire pour intervenir dans la partie électrique et pour cette raison, les techniques de diagnostics sont de plus en plus orientées vers l'emploi des grandeurs électriques vu leur accessibilité et la simplicité du capteur utilisé.

2.3 Techniques magnétiques et électriques

2.3.1 Diagnostique par mesure du flux magnétique axial de fuite

Le flux de fuite axial peut être détecté par une bobine (bobine exploratrice) enroulée autour de l'arbre de la

Machine (Figure III-2) et aussi par n'importe quel arrangement symétrique simple des bobines placées à l'extrémité de l'arbre de la machine ou par d'autres dispositifs sensibles tels que les sondes à effet hall.

Lorsque la bobine est enroulée autour de l'arbre d'une machine électrique, elle est le siège d'une force électromotrice (F_{em}) induite qui est liée aux flux de fuite axiaux.

Les flux de fuites sont présents dans toutes les machines électriques en raison des asymétries dans les circuits électriques et magnétiques qui sont dues aux fluctuations du réseau électrique et les tolérances pendant le processus de fabrication.

L'analyse spectrale de la tension induite peut être utilisée pour identifier les différentes asymétries et défauts. Le contenu d'harmoniques des flux de fuites axiaux du stator et du rotor est directement en relation avec les harmoniques contenus respectivement dans les courants du stator et du rotor.

La conséquence directe d'un défaut est l'augmentation du flux de fuite axial. Cette augmentation du flux est la condition nécessaire pour l'utilisation du flux de fuite axial comme une technique de diagnostic, c'est-à-dire ce dernier doit avoir une valeur importante.

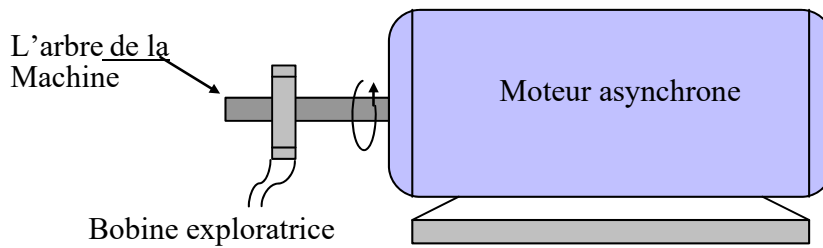


Figure III.2 : Bobine exploratrice pour la mesure du flux de fuite axial.

2.3.2 Diagnostique par l'analyse du courant statorique

Cette méthode est un outil puissant pour détecter la présence des défauts mécaniques et électriques. Elle présente plusieurs avantages par rapport aux autres méthodes, parce qu'elle ne demande ni l'introduction d'un capteur au niveau de la machine ni l'utilisation d'un équipement coûteux et encombrant mais seulement un capteur de courant (sonde à effet de hall ou transformateur de courant) qui donne une image sur le courant de phase statorique. C'est cette méthode de diagnostic qui sera utilisée comme outil de diagnostic dans la recherche des différents défauts dans ce travail.

C'est une méthode de surveillance, qui consiste à utiliser le spectre du courant statorique [DY-JP] [MD-NB-BK-AB-JAD]. Sachant que dans un spectre de courant d'un moteur sans défaut apparaît uniquement la composante du fondamental, pour une répartition sinusoïdale de la Fmm.

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

3. Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre les différentes méthodes de diagnostics. On a aussi fait l'objet de la présentation de la méthode de l'analyse spectrale du courant statorique qui fait l'objet de notre travail ; pour la détection des défauts dans les machines asynchrones. Son principe est basé sur l'emploi des grandeurs électriques faciles à manipuler.

Pour montrer l'effet des défauts sur le moteur, il est nécessaire d'avoir un modèle mathématique régissant le fonctionnement du moteur lors du défaut afin de simuler son comportement. Ceci fera l'objet du chapitre suivant.

Chapitre IV

Modélisation Et Simulation

1 Introduction

La modélisation et la simulation des machines électriques constituent une étape primordiale en matière de diagnostic. Elles permettent la compréhension du fonctionnement sain ou défectueux et la vérification des algorithmes de détection des défauts. Elles nous permettent aussi, de construire des bases de données sur les manifestations électriques et magnétiques de ces défauts. Il est important donc, de synthétiser un modèle adapté au problème à traiter, décrivant le comportement de la machine d'une façon la plus fine possible.

Donc la modélisation des machines électriques est une étape aussi bien pour le concepteur, elle permet l'observation et l'analyse des différentes évolutions de ces grandeurs électromagnétiques d'une part et d'autre part pour l'élaboration d'un diagnostic.

2 Modélisation de la machine asynchrone

L'étude du fonctionnement de la machine consiste classiquement à rechercher l'ensemble des équations reliant les variables internes aux grandeurs externes : tension aux bornes de la machine, courants consommés et couple disponible. Les différentes approches pour l'étude reposent sur la résolution des équations de l'électromagnétisme et de la mécanique.

Les différences proviennent des hypothèses simplificatrices qu'il est possible de faire, en fonction du domaine de fréquence concerné et de la topologie (structure physique) du système étudié, c'est-à-dire en fonction des objectifs de la modélisation.

La machine asynchrone, souvent appelée moteur à induction, est constituée :

- D'une armature statorique fixe comportant trois enroulements identiques à p paires de pôles et décalés d'un angle électrique de $\frac{2\pi}{3p}$. Ces derniers sont logés dans des encoches et reliés à la source d'alimentation. Ce dispositif crée un champ tournant de vitesse de synchronisme $\Omega_s = \frac{\omega_s}{p}$.
- D'une armature rotorique mobile dont la structure peut être constituée de trois enroulements triphasés (rotor bobiné) raccordés en étoile à trois bagues sur lesquelles frottent trois ballais fixes accessibles par la plaque à borne et mis en court-circuit pendant les régimes permanents. L'armature rotorique peut-être aussi (le plus souvent) un ensemble de conducteurs massifs intégrés aux tôles ferromagnétiques. Le rotor possède dans ce cas un certain nombre d'encoches contenant chacune une barre conductrice, en cuivre ou en aluminium. Les barres sont ensuite réunies entre elles aux deux extrémités par deux anneaux conducteurs.

2.1 Modèle triphasé

Avant d'établir le modèle de la machine asynchrone, nous rappelons brièvement les hypothèses simplificatrices, désormais classiques, retenues :

- Les circuits magnétiques sont non-saturés.
- Les pertes fer sont négligées.
- Il n'y a pas d'effet de peau.
- L'effet des encoches est négligé.
- La répartition de la force magnétomotrice est sinusoïdale.

Ce modèle permet de simuler des ensembles convertisseur-machine fonctionnant en vitesse variable.

La figure VI.1 présente la géométrie et la disposition des enroulements de la machine utilisée pour former les équations de la machine.

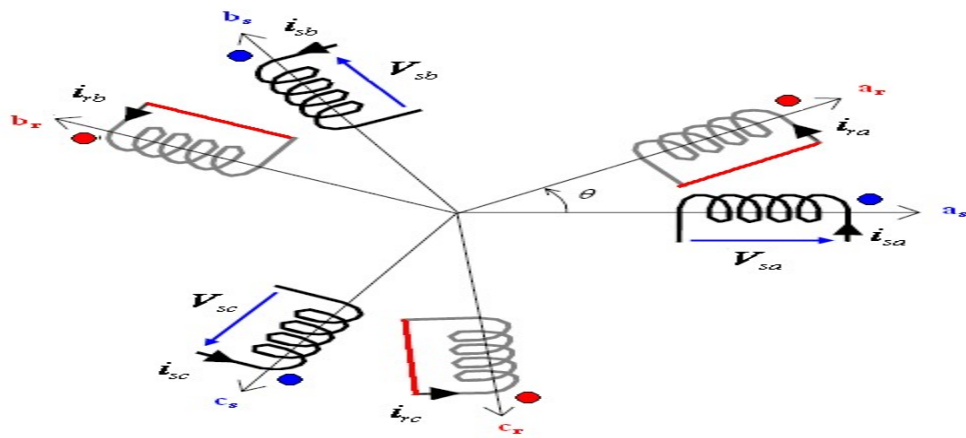


Figure VI.1 Schéma de principe de la machine asynchrone

3 Modélisation du stator

3.1 Structure 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 VI.2 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.

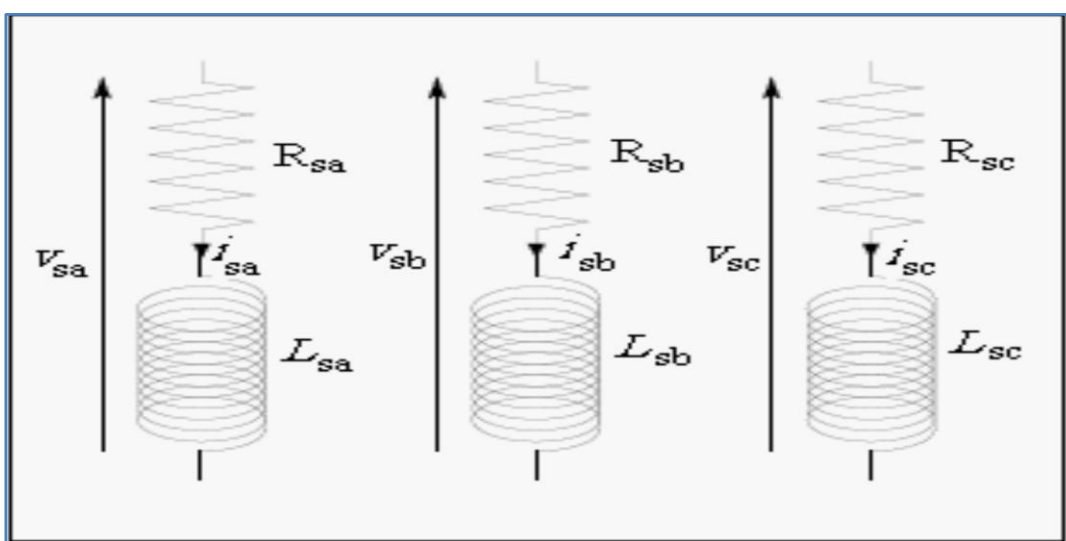


Figure VI.2 Circuits électriques adoptés pour la modélisation des trois phases statoriques

3.2 Les équations électriques statoriques

En utilisant les équations, on peut représenter la matrice des tensions statoriques :

$$[V_s] = [R_s][I_s] + \frac{d}{dt} [\Phi_s] \quad (\text{VI.1})$$

Où la matrice des flux statoriques est donnée par :

$$[\Phi_s] = [L_{ss}][I_s] + [L_{sr}][I_r] \quad (\text{VI.2})$$

Avec :

$[V_s]$: est le vecteur des tensions des phases statoriques de dimension m ,

$[I_s]$ et $[I_r]$: sont les vecteurs des courants des phases statoriques et rotoriques respectivement

$[R_s]$: est la matrice diagonale des résistances des phases du stator de dimensions (m,m) .

Et :

$$[V_s] = [v_{sa} v_{sb} v_{sc}]^T \quad (\text{VI.3})$$

$$[I_s] = [i_{sa} i_{sb} i_{sc}]^T \quad (\text{VI.4})$$

$$[I_r] = [i_{r1} i_{r2} i_{r3} \dots i_{rnb} i_{re}]^T \quad (\text{VI.5})$$

Le bobinage statorique ayant m phases, les vecteurs $[V_s]$, $[I_s]$ et $[\Phi_s]$ et la matrice des résistances $[R_s]$ s'écrivent de la façon suivante :

$$[V_s] = \begin{bmatrix} V_{S1} \\ V_{S2} \\ \dots \\ \dots \\ V_{Sm} \end{bmatrix}; [I_s] = \begin{bmatrix} i_{s1} \\ i_{s2} \\ \dots \\ \dots \\ i_{sm} \end{bmatrix}; [\Phi_s] = \begin{bmatrix} \Phi_{S1} \\ \Phi_{S2} \\ \dots \\ \dots \\ \Phi_{Sm} \end{bmatrix}; [R_s] = \begin{bmatrix} R_{S1} & 0 & \cdot & \cdot & 0 \\ 0 & R_{S2} & 0 & \cdot & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & 0 \\ 0 & \cdot & \cdot & 0 & R_{Sm} \end{bmatrix}$$

Le vecteur flux statorique $[\Phi_s]$ s'exprime en fonction des vecteurs courants statoriques et courants rotoriques de la manière suivante :

$$[\Phi_s] = [L_{ss}][I_s] + [L_{sr}][I_r] \quad (\text{VI.6})$$

Où les matrices $[L_{ss}]$ et $[L_{sr}]$ sont respectivement la matrice des inductances propres et mutuelles des enroulements statoriques et celle des inductances mutuelles entre les enroulements statoriques et ceux rotoriques. Ces deux matrices s'écrivent :

$$L_{SS}] = \begin{bmatrix} L_{SS11} + L_{S1} & L_{SS12} & \cdot & \cdot & \cdot & L_{SS1m} \\ L_{SS21} & L_{SS22} + L_{S2} & \cdot & \cdot & \cdot & L_{SS2m} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ L_{SSm1} & L_{SSm2} & \cdot & \cdot & \cdot & L_{SSmm} + L_{\sigma Sm} \end{bmatrix} \quad (VI.7)$$

$$L_{SR}] = \begin{bmatrix} L_{SR11} & L_{SR12} & \cdot & \cdot & \cdot & L_{SR1q} & L_{SR1q+1} \\ L_{SR21} & L_{SR22} & \cdot & \cdot & \cdot & L_{SR2q} & L_{SR2q+1} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ L_{SRm1} & L_{SRm2} & \cdot & \cdot & \cdot & L_{SRmq} & L_{SRmq+1} \end{bmatrix} \quad (VI.8)$$

On peut remarquer, à ce stade, que la matrice $[L_{SS}]$ est de dimensions (m, m) compte tenu du nombre de phases statoriques alors que la matrice $[L_{SR}]$ est de dimensions $(m, q+1)$ ce qui implique que le vecteur des courants rotoriques comportera $q+1$ éléments correspondants aux q mailles (q barres) de la cage plus la maille de l'anneau de court-circuit.

En remplaçant l'équation (VI.2) dans (VI.1), on obtient :

$$V_r] = [R_s][I_s] + [L_{SS}] \frac{d[I_s]}{dt} + [L_{sr}] \frac{d[I_r]}{dt} + \frac{d[L_{sr}]}{dt} [I_r] \quad (VI.9)$$

Le dernier terme de l'équation (VI.9) peut être écrit comme suit :

$$\frac{d[L_{sr}]}{dt} [I_r] = \frac{d[L_{sr}]}{d\theta_r} \frac{d[\theta_r]}{dt} [I_r] \quad (VI.10)$$

Où θ_r est l'angle qui définit la position du rotor par rapport au stator.

Avec :

$$\omega_r = \frac{d\theta_r}{dt} \quad (VI.11)$$

Où ω_r est la vitesse mécanique du rotor.

Par substitution (VI.10) et (VI.11) dans (VI.9), on obtient :

$$V_s] = [R_s][I_s] + [L_{SS}] \frac{d[I_s]}{dt} + [L_{sr}] \frac{d[I_s]}{dt} + \omega_r \frac{d[L_{sr}]}{d\theta_r} [I_r] \quad (VI.12)$$

4 Modélisation du rotor

4.1 Structure du rotor

Considérons une cage d'écureuil qui contient n_b barres et $2n_b$ sections d'anneau (figure VI.3). Les courants $I_{r1} \dots I_{rn}$ et I_e de $n_b + 1$ mailles du rotor sont considérés comme des inconnus, illustrés par la figure suivante :

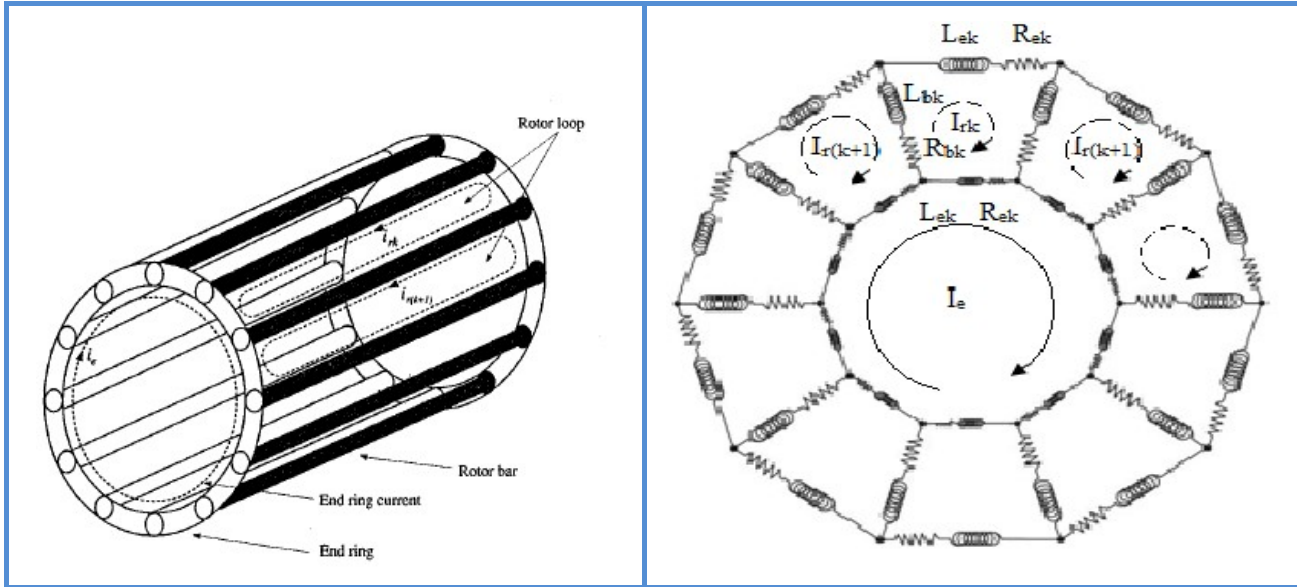


Figure VI.3 Circuit équivalent d'un rotor à cage sain

4.2 Equations des tensions rotoriques

La modélisation de la cage rotorique repose sur le schéma équivalent de la figure VI.3 où elle a été développée en forme circulaire. Chaque barre de la cage est représentée par une résistance de barre R_b en série avec une inductance de fuite de barre $L_{\sigma b}$. Les portions d'anneau de court-circuit entre deux barres consécutives sont elles aussi représentées par une résistance de portion d'anneau R_e en série avec une inductance de fuite de portion d'anneau $L_{\sigma e}$. Une maille de la cage est constituée par deux barres consécutives court-circuitées par deux portions d'anneau d'un côté et de l'autre de la machine.

Par conséquent, la cage sera donc modélisée par q mailles situées à la périphérie du rotor plus une maille représentant l'un des deux anneaux de court-circuit. En effet, ayant q barres, la cage comporte donc $2q$ nœuds et $3q$ branches au sens de la théorie des circuits. Par conséquent, les courants indépendants dans la cage sont au nombre de : $3q - (2q - 1) = q + 1$.

La mise en équation de la maille rotorique k de la cage donne lieu à l'expression suivante :

$$-R_b i_{rk-1} + 2(R_b + R_e) \cdot i_{rk} - R_b i_{rk+1} - R_e i_e + \frac{d}{dt} \Phi_{Rk} + \frac{d}{dt} \Phi_{Sk} = 0 \quad (\text{VI13})$$

Où Φ_{Rk} et Φ_{Sk} sont respectivement le flux de la cage envoyé à travers la maille k , y compris le flux propre de la maille k , et le flux envoyé par les bobinages statoriques à travers la maille k . De la même façon pour le stator et en désignant par L_{RRkn} l'inductance mutuelle entre la maille k et la maille n d'un côté, et par L_{RSkn} l'inductance mutuelle entre la maille k et la phase statorique n de l'autre, les flux Φ_{Rk} et Φ_{Sk} s'écrivent en fonction des courants de mailles et de phases de la façon suivante :

$$\begin{aligned} \Phi_{Rk} = & (L_{RRkk-1} - L_{\sigma b}) \cdot i_{rk-1} + (L_{RRkk} + 2(L_{\sigma b} + L_{\sigma e})) \cdot i_{rk} + (L_{RRkk+1} - L_{\sigma b}) \cdot i_{rk+1} \\ & + \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq k-1 \\ n \neq k \\ n \neq k+1}}^q L_{RRkn} i_{rn} - L_{\sigma e} i_e \end{aligned}$$

$$\Phi_{Sk} = \sum_{n=1}^m L_{RSkn} i_{Sn} \quad (\text{VI14})$$

Les équations précédentes peuvent être généralisées à toutes les mailles de la cage. A cela, il faut ajouter l'équation d'un anneau de court-circuit en considérant qu'il n'y a pas de flux axial dans la machine :

$$qR_e i_e - \sum_{n=1}^m R_e i_{Rn} + \frac{d}{dt} (qL_e i_e - \sum_{n=1}^q L_e i_{Rn}) = 0 \quad (\text{VI15})$$

En regroupant les équations précédentes (III-14) (III-2) sous forme matricielle, on aboutit à l'équation du rotor : $[V_r] = 0$

$$[0] = [R_R][I_R] + \frac{d}{dt} [\Phi_R] \quad (\text{VI16})$$

Où :

$[I_R]$ est le vecteur des courants de mailles rotoriques, de dimension $q+1$,

$[\Phi_R]$ est le vecteur des flux traversant les mailles rotoriques, de dimension $q+1$,

$[R_R]$ est la matrice des résistances de la cage, de dimensions $(q+1, q+1)$.

Les formes des vecteurs, $[I_R]$ et $[\Phi_R]$ sont les suivantes :

$$[I_R]^t = [i_{R1} \ i_{R2} \ \dots \ i_{Rq+1}]^t \quad \text{et} \quad [\Phi_R]^t = [\Phi_{R1} \ \Phi_{R2} \ \dots \ \Phi_{Rq+1}]^t$$

Et la matrice des résistances :

$$[R_r] = \begin{bmatrix} 2(R_b + R_e) & -R_b & 0 & \dots & 0 & -R_b & -R_e \\ -R_b & 2(R_b + R_e) & -R_b & \dots & 0 & 0 & -R_e \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 2(R_b + R_e) & -R_b & -R_e \\ -R_b & 0 & 0 & \dots & -R_b & 2(R_b + R_e) & -R_e \\ -R_e & -R_e & -R_e & \dots & -R_e & -R_e & qR_e \end{bmatrix} \quad (\text{VI.17})$$

Où R_b et R_e sont respectivement la résistance d'une barre rotorique et celle d'un segment de l'anneau de court-circuit.

Le vecteur flux rotorique, $[\Phi_R]$ s'exprime en fonction des vecteurs courants rotoriques et statoriques de la manière suivante :

$$[\Phi_R] = [L_{RR}][I_R] + [L_{RS}][I_s] \quad (\text{VI.18})$$

Où les matrices, $[L_{RR}]$ et $[L_{RS}]$ sont respectivement la matrice des inductances propres et mutuelles des enroulements rotoriques et celle des inductances mutuelles entre les enroulements rotoriques et statoriques. $[L_{RR}]$ est de dimensions $(q+1, q+1)$ et $[L_{RS}]$ est de dimensions $(q+1, m)$. Ces deux matrices s'écrivent de la façon suivante :

$$L_{RS}] = \begin{bmatrix} L_{RS11} & L_{RS12} & \cdot & \cdot & \cdot & L_{RS1m-1} & L_{RS1m} \\ L_{RS21} & L_{RS22} & \cdot & \cdot & \cdot & L_{RS2m-1} & L_{RS2m} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ L_{RSq1} & L_{RSq2} & \cdot & \cdot & \cdot & L_{RSqm-1} & L_{RSqm} \\ L_{RSq+11} & L_{RSq+12} & \cdot & \cdot & \cdot & L_{RSq+1m-1} & L_{RSq+1m} \end{bmatrix} \quad (VI.19)$$

$$L_{RR}] = \begin{bmatrix} L_{RR11} + 2(L_{\sigma b} + L_{\sigma e}) & L_{RR12} - L_{\sigma b} & L_{RR13} & \dots & L_{RR1q} - L_{\sigma b} & -L_{\sigma e} \\ L_{RR21} - L_{\sigma b} & L_{RR22} + 2(L_{\sigma b} + L_{\sigma e}) & L_{RR23} - L_{\sigma b} & \dots & L_{RR2q} & -L_{\sigma e} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot & -L_{\sigma e} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot & \cdot \\ L_{RRq1} - L_{\sigma b} & \cdot & \cdot & \dots & L_{RRqq} + 2(L_{\sigma b} + L_{\sigma e}) & -L_{\sigma e} \\ -L_{\sigma e} & -L_{\sigma e} & \cdot & \dots & -L_{\sigma e} & qL_{\sigma e} \end{bmatrix}$$

L_{RR11} : Inductance de magnétisation d'une maille rotorique

$L_{\sigma b}$: Inductance de fuite d'une barre rotorique

$L_{\sigma e}$: Inductance de fuite d'un segment d'anneau de court-circuit

L_{rrij} : Inductance mutuelle entre l' $i^{\text{ème}}$ et la $j^{\text{ème}}$ maille rotorique

La matrice des inductances mutuelles entre les mailles rotoriques et les phases statoriques $[L_{RS}]$ est égale à la transposée de la matrice $[L_{SR}]$ dans le cas d'un moteur avec entrefer uniforme. $[L_{RS}] = [L_{SR}]^T$

5. Système d'équations global de la machine

Les deux équations matricielles (III-1) et (III-16) du stator et du rotor peuvent être regroupées dans une seule équation donnant lieu au système complet d'équations régissant le fonctionnement de la machine asynchrone à cage dans l'espace de phases :

$$V] = [R][I] + \frac{d}{dt} \{ [L] \cdot [I] \} \quad (VI21)$$

Ce qui peut se mettre encore sous la forme :

$$V] = [R][I] + \Omega \cdot \left\{ \frac{d}{d\theta_m} [L] \right\} \cdot [I] + [L] \left\{ \frac{d}{dt} [I] \right\} \quad (VI22)$$

Où : $[V] = \begin{bmatrix} [V_S] \\ [0] \end{bmatrix}$ et $[I] = \begin{bmatrix} [I_S] \\ [I_R] \end{bmatrix}$ de dimension $m+q+l$,

Ainsi que, $R = \begin{bmatrix} [R_S] & [0] \\ [0] & [R_R] \end{bmatrix}$ et $L = \begin{bmatrix} [L_{SS}] & [L_{SR}] \\ [L_{RS}] & [L_{RR}] \end{bmatrix}$ de dimension $(m+q+1, m+q+1)$

Et $\Omega = \frac{d\theta_m}{dt}$ est la vitesse mécanique de rotation du rotor.

6. Modèle de la machine asynchrone

6.1 Transformé de Park direct et inverse

Le régime dynamique de fonctionnement d'une machine asynchrone est décrit par les équations électromécaniques écrites dans le repère de PARK [YAY-91] comme l'indique la figure IV.4, où toutes les grandeurs étant ramenées à un référentiel statorique. Le choix judicieux du repère, permet une simplification remarquable des expressions des équations différentielles.

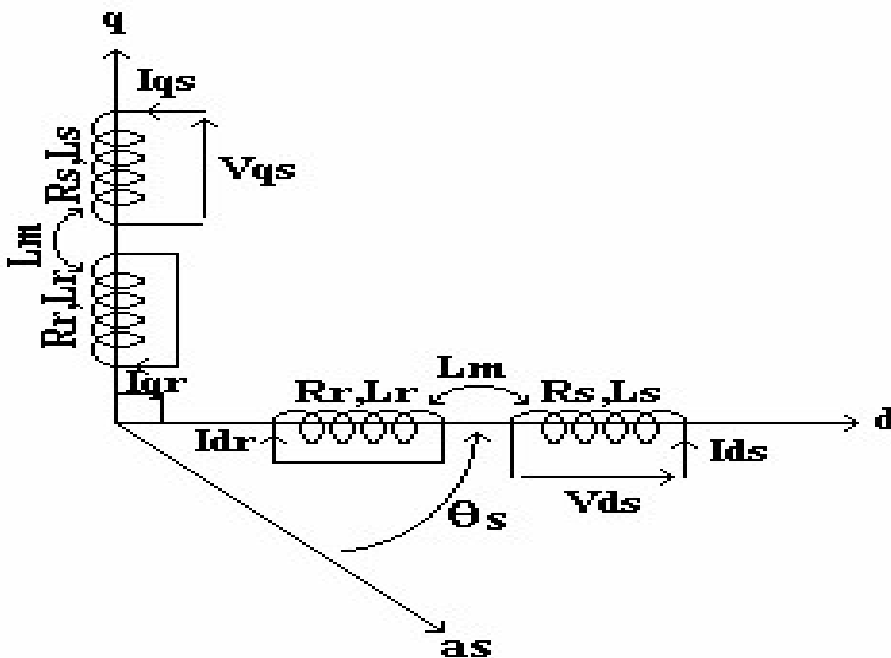


Figure : IV.4 Représentation physique de la transformation de PARK pour une machine asynchrone

6.2 Equations électriques

Dans un référentiel lié au stator, le modèle d'état de la machine asynchrone est défini par les équations suivantes :

$$\begin{aligned}
 V_{ds} &= (R_s + pL_s)i_{ds} + pL_m i_{dr} \\
 V_{qs} &= (R_s + pL_s)i_{qs} + pL_m i_{qr} \quad (\text{IV.23}) \\
 0 &= pL_m i_{ds} + w_r L_m i_{qs} + (R_r + pL_r)i_{dr} + w_r L_m i_{qr} \\
 0 &= -w_r L_m i_{ds} + pL_m i_{qs} - w_r L_m i_{dr} + (R_r + pL_r)i_{qr}
 \end{aligned}$$

La notation matricielle du modèle d'état est donnée par :

$$\dot{X}(t) = A(t)X(t) + Bu(t): \text{ On note } \dot{X}(t) = pX(t)$$

Le développement des calculs conduit à:

$$\begin{bmatrix} p i_{ds} \\ p i_{qs} \\ p i_{dr} \\ p i_{qr} \end{bmatrix} = \frac{1}{\sigma L_s L_r} \begin{bmatrix} -R_s L_r & L_m^2 \omega_r & L_m R_r & L_m L_r \omega_r \\ L_m^2 \omega_r & -R_s L_r & -L_m L_r \omega_r & L_m R_r \\ L_m R_s & -L_m L_s \omega_r & -R_r L_s & -L_s L_r \omega_r \\ L_m L_s \omega_r & L_m R_s & L_s L_r \omega_r & -R_r L_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} + \frac{1}{\sigma L_s L_r} \begin{bmatrix} L_r & 0 \\ 0 & L_r \\ -L_m & 0 \\ 0 & -L_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \end{bmatrix} \quad (\text{VI24})$$

Selon la définition du modèle de PARK, le vecteur d'entrée u est constitué des tensions statoriques V_{dset} V_{qset} . Nous avons choisi pour le vecteur d'état X , les deux courants statoriques i_{ds}, i_{qset} les deux courants srotoriques non accessibles à la mesure i_{dr}, i_{qr} .

6.3 Equations mécaniques

Les équations mécaniques liants la vitesse au couple sont données par :

$$\begin{cases} C_e = \frac{3}{2} n p L_m (i_{dr} i_{qs} - i_{qr} i_{ds}) \\ J \frac{d\Omega_r}{dt} + f \Omega_r = C_e - C_r \end{cases} \quad (\text{VI25})$$

Transformé de Park direct et inverse

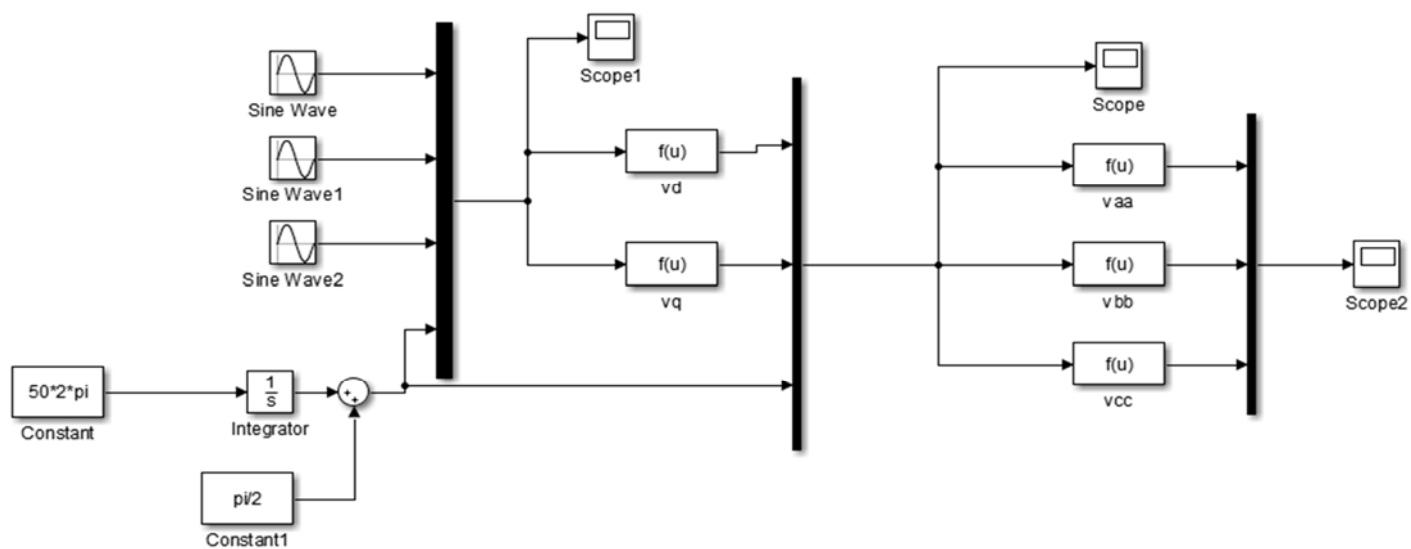


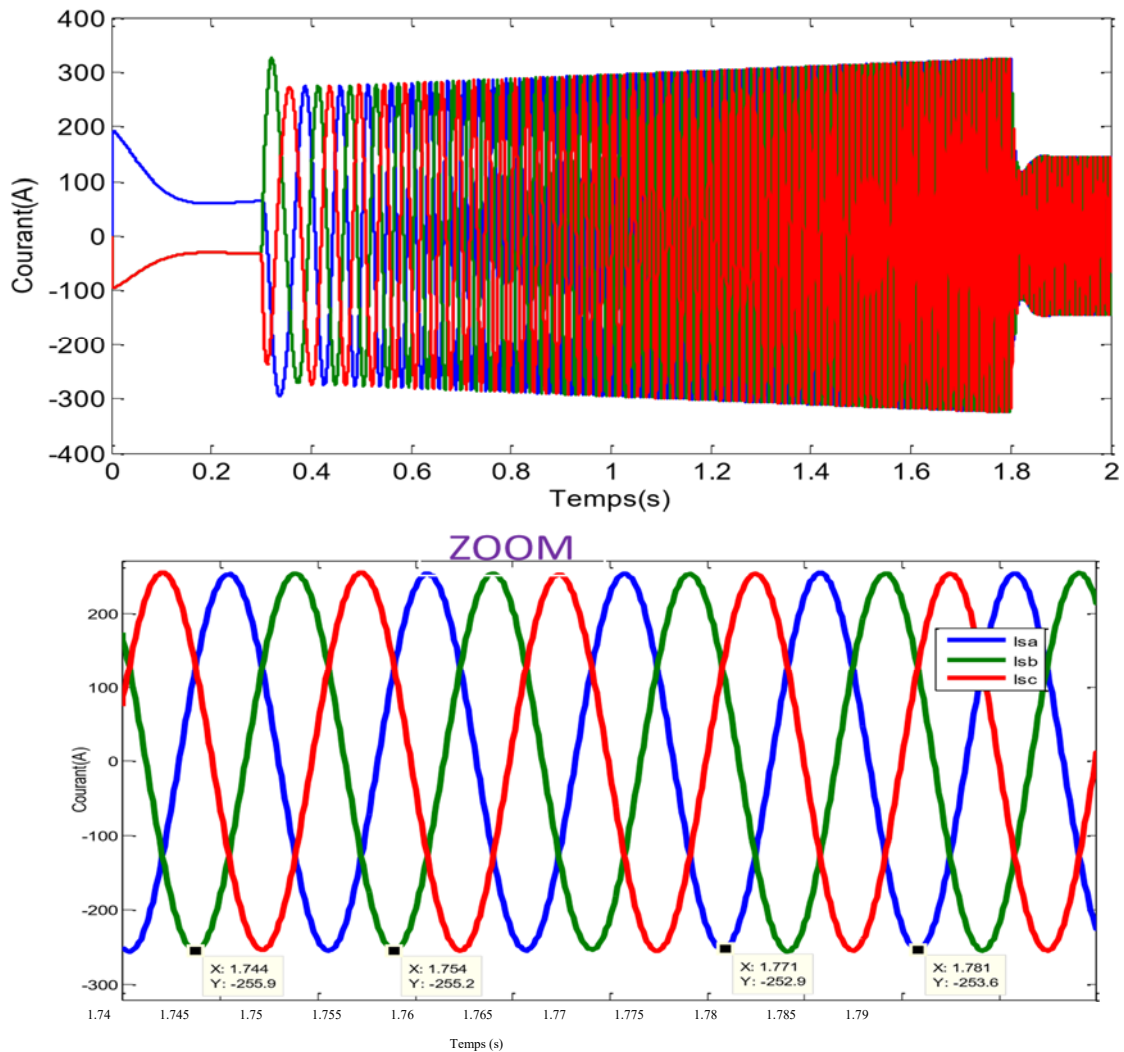
Figure VI.5 Transformé de Park direct et inverse

6.5 Résultats de simulation

6.6 Machine saine

Le moteur a été démarré en se basant sur la commande en vitesse et en flux et par la tension statorique, qui sont engendrées par le convertisseur coté machine, et cela à partir des états électriques et mécaniques initialement nulle (machine à l'arrêt). Aucune procédure de démarrage traditionnel n'a été utilisée.

Notre démarche dans cette partie de simulation est de voir le comportement de la machine asynchrone en mode sain et avec défaut électrique (stator, rotor) dans le régime transitoire et permanent. La figure VI.6 illustre les courants statoriques des phases (a,b,c) la vitesse et le couple électromagnétique.



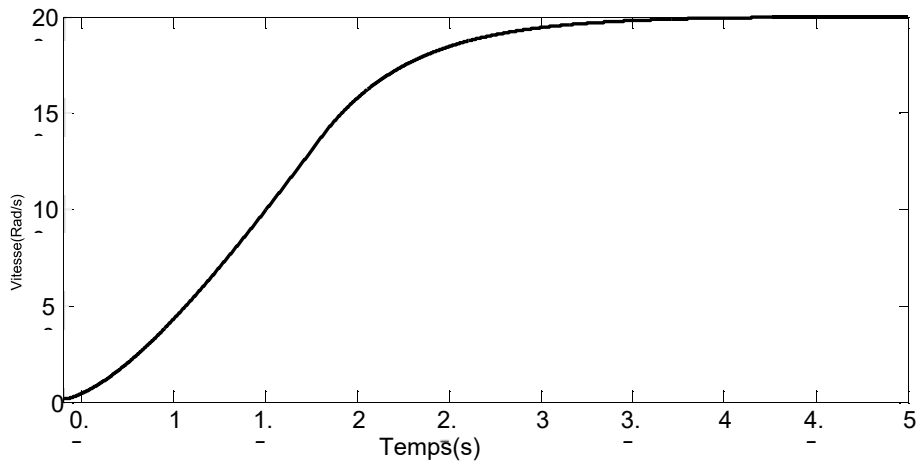


Figure VI.8 La vitesse de la machine sain

La figure suivante présente l'évolution du couple produit par la machine asynchrone. On trouve la phase d'accélération (avec un dépassement lié à la commande en vitesse) et la phase de stabilisation de la vitesse et donc du couple.

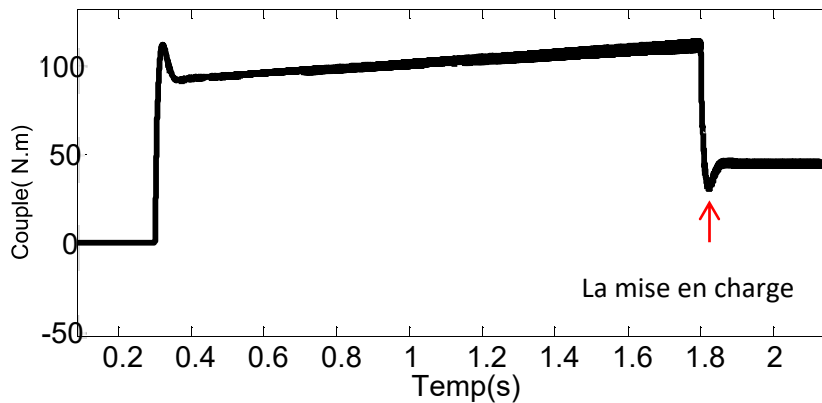


Figure VI.9 Le couple électromagnétique (machine sain)

6.7 La signature spectrale du courant statorique de la machine saine

Le but de la caractérisation fréquentielle des défauts consiste, en fonction du défaut considéré, à déterminer la (ou les) fréquence (s) liée (s) au défaut et à discriminer la variable (mesurée ou calculée) la plus pertinente dans laquelle cette fréquence peut être isolée.

La figure VI.9 montre la fréquence électrique $f_e = 100\text{Hz}$ du spectre du courant statorique (I_{sa}) de la phase a de la machine asynchrone sans court-circuit.

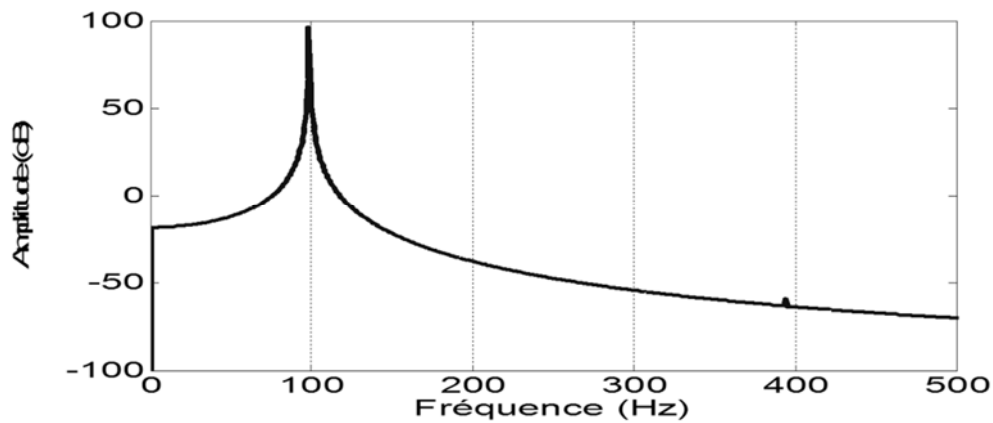


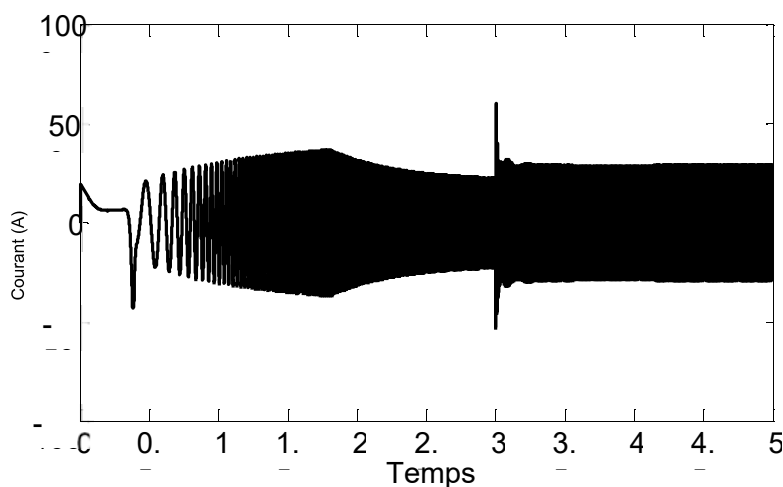
Figure VI.10 Spectre du courant statorique de la phase a

6.8 Défaut au stator de la machine

Le défaut considéré consiste en une suppression des bobinages d'une phase du stator. Ce défaut se caractérise par l'apparition d'une raie au triple de la fréquence électrique [FRA91, SCH-94] dans le spectre du courant de la machine quelle que soit la phase considérée comme indiqué sur la figure VI.10. Nous n'avons présenté que le spectre du courant car les évolutions de l'allure du courant ne sont pas significatives.

Par ailleurs, dans le cas du système bouclé, la commande va corriger l'éventuelle baisse d'amplitude. On retrouvera alors cette information caractéristique du défaut dans les sorties de la commande vectorielle mais au double de la fréquence électrique (pour la grandeur exprimée dans le référentiel de Park), le rapport entre l'amplitude de la raie associée au défaut et celle du fondamental où la grandeur continue dépend de la variable choisie (courant ou grandeur de commande) et des fréquences de fonctionnement.

La figure VI.10 montre la fréquence électrique $f_e=100\text{Hz}$ du spectre du courant statorique (I_{sa}) de la phase a de la machine asynchrone sans court-circuit. Le défaut au stator de la machine est engendré par court-circuit au niveau des bobinages statorique. Il est simulé en agissant sur le modèle du stator que nous avons donné dans 6.2.



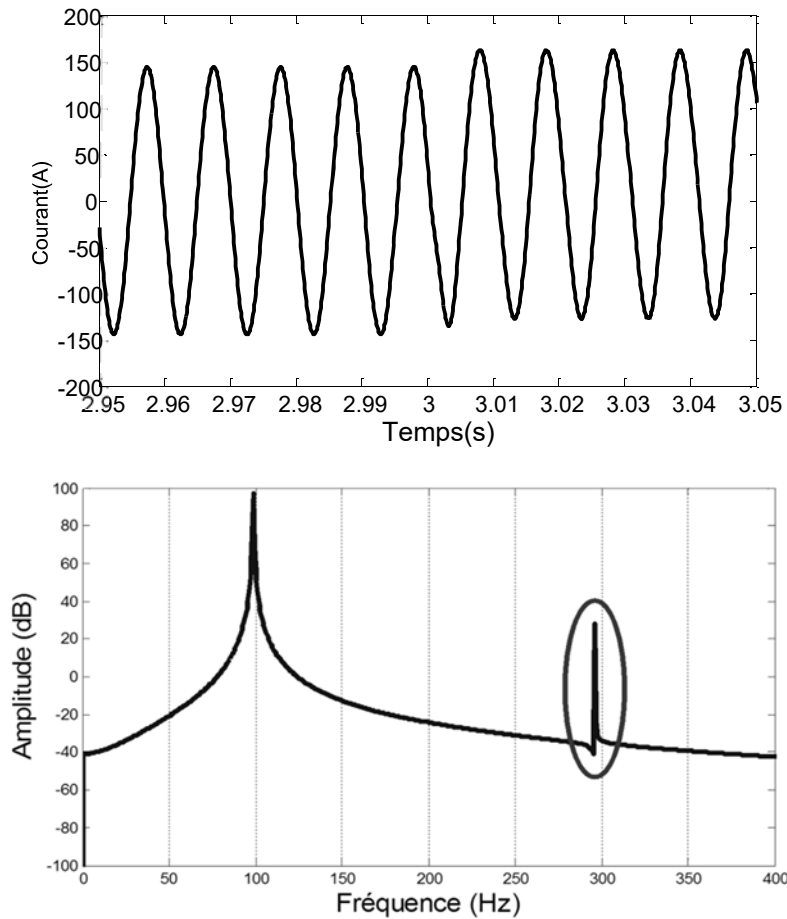
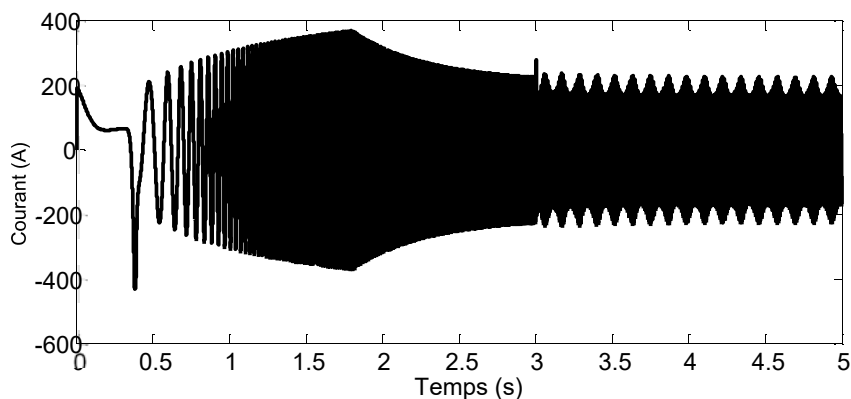


Figure VI.11 L'allure du courant et le spectre du courant statorique avec défaut sur une phase au stator

6.9 Défaut au rotor

Pour un défaut au rotor, il apparaît aussi de nouvelles fréquences dans le spectre du courant stator comme le montre la figure VI.11. Dans les simulations on fait agir sur le modèle que l'on avait présenté précédemment pour simuler le court-circuit rotorique sont engendrés bien par les facteurs environnementaux (chaleur, vibration, vieillissement machine).



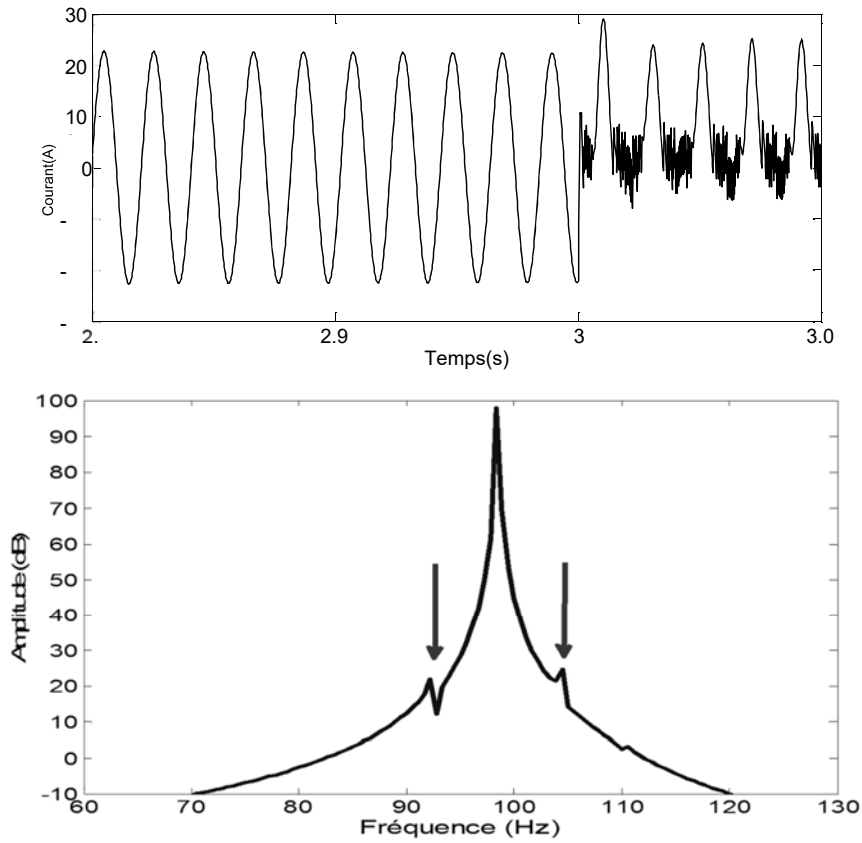


Figure VI.12 L'allure du courant et le spectre du courant statorique avec défaut sur une phase au rotor

La figure VI.11 présente l'allure du courant statorique on note l'apparition des raies dans le spectre du courant. Le défaut au rotor se caractérise par l'apparition de deux fréquences ($1 \pm 2g$) ou g représente le glissement (92,2Hz et 107Hz) au tour de la fréquence électrique f_e (100Hz). Remarquons que ce défaut sera très difficile à détecter dans le spectre du courant car l'amplitude de la raie à la fréquence fondamentale est très importante par rapport à celle de la raie recherchée.

7 Partie mécanique

7.1 Modèles utilisés

Afin de bien représenter la partie mécanique de l'entraînement électrique, nous avons schématisé la transmission par un arbre flexible avec réducteur. Elle contient des roulements qui assurent le parfait alignement des axes des pièces tournantes. Nous avons considéré qu'ils n'intervenaient pas dans les équations mécaniques du système lorsqu'ils sont sains.

En revanche, lorsqu'un défaut se produit sur ces éléments, nous les prenons en compte par la génération d'un couple de perturbation. [CH-A17]

7.2 Modèle de la transmission

Le couple moteur transmis à la roue par le biais d'un réducteur à double train épicycloïdal. Nous avons présenté un modèle permettant de représenter les deux phénomènes les plus importants : la transmission et l'irrégularité du couple transmis due aux dents de l'engrènement et l'élasticité comme le montre la figure VI.12.

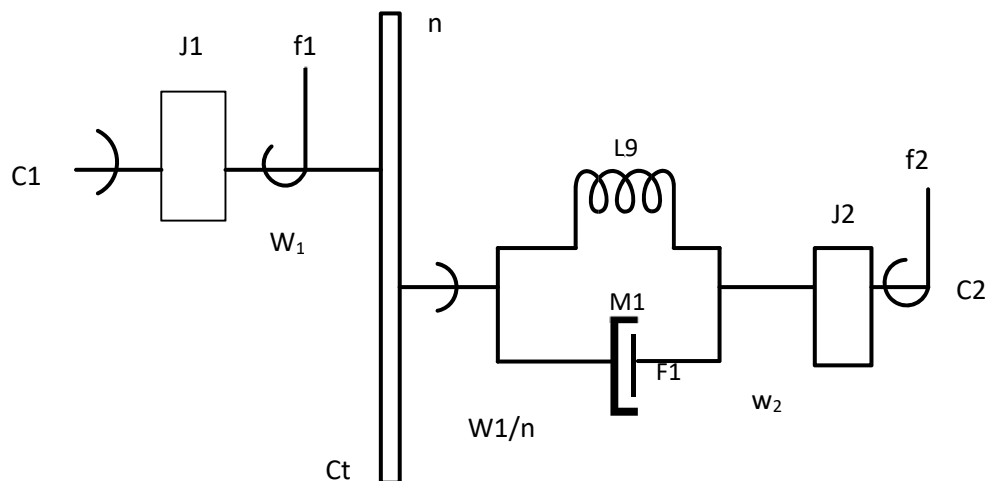


Figure VI.13 Modèle d'une transmission flexible [MAR-93]

Les équations de cette transmission sont les suivantes :

$$\begin{aligned}
 C_1 &= J_1 \frac{d\omega_1}{dt} + f_1 \omega_1 + \frac{C_t}{n} \\
 C_t &= J_2 \frac{d\omega_2}{dt} + f_2 \omega_2 + C_2 \\
 C_t &= k \left(\frac{\theta_1}{n} - \theta_2 \right) + d \left(\frac{\omega_1}{n} - \omega_2 \right)
 \end{aligned}
 \tag{III.23}$$

7.3 Les roulements

La défaillance d'un roulement se manifeste par des ondulations de surface des billes, par des fissures dans les deux bagues « interne et externe » ou par la détérioration de la cage. La détection de ces défauts a été largement étudiée à l'aide de la technique vibratoire [REZ-06]. Malheureusement, la fiabilité des résultats est fortement liée à la position des accéléromètres sur les paliers. En revanche, l'analyse des courants statoriques s'est avérée être très intéressante, car elle permet de diagnostiquer aussi bien les défauts Électriques que mécaniques [BOU-07]. De plus, la mesure du courant peut être prise à n'importe quelle position entre le moteur et le poste d'alimentation. Par ailleurs, Schoen et ses coauteurs [BOU-07], ont démontré qu'une défaillance des roulements se manifeste dans le spectre du courant statorique sous la forme d'harmoniques définis par l'expression suivante:

$$f_{roul}(HZ) = |f_a \pm k f_{bague.ext}| \quad (III.24)$$

Où f_a est la fréquence d'alimentation, $k = 1, 2, 3, \dots$ et $f_{bague.ext}$ est la fréquence caractéristique des vibrations induites par le défaut de la bague externe. Plusieurs études [TOL-12] ont démontré que cette fréquence caractéristique du défaut de la bague externe est définie comme suite:

$$f_{bague,ext} = \frac{N_b}{2} f_r \left(1 - \frac{D_b}{D_c} \cos \beta \right) \quad (III.25)$$

Où f_r est la fréquence de rotation du moteur et d'après la figure VI.11 qui représente la géométrie du roulement, N_b est le nombre de billes, D_b et D_c sont respectivement le diamètre de la bille et de la cage, β étant l'angle de contact (Fig. VI.13).

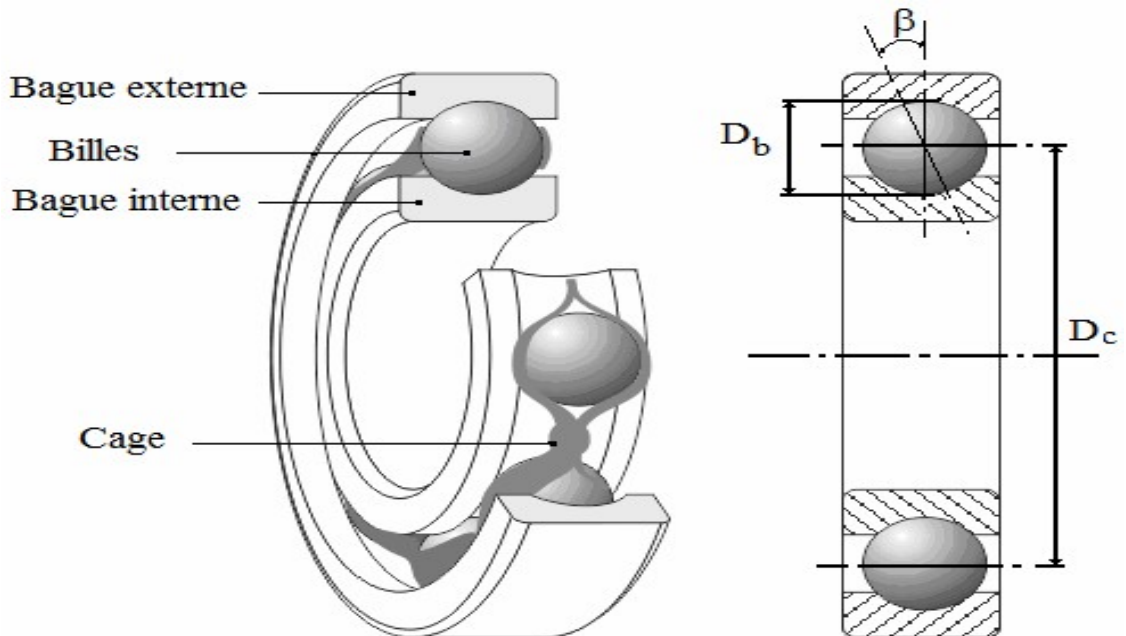


Figure VI.14 Géométrie du roulement à billes

Nous présentons ici les résultats de simulations avec les modèles de roulements défaillants introduits dans ce chapitre VI. Les simulations ont été effectuées pour une vitesse de 200 rad/s (soit une fréquence mécanique de 23.9 Hz).

Les figures suivantes présentent les spectres de la référence de couple (sortie du correcteur de vitesse) pour les différents défauts roulement considérés.

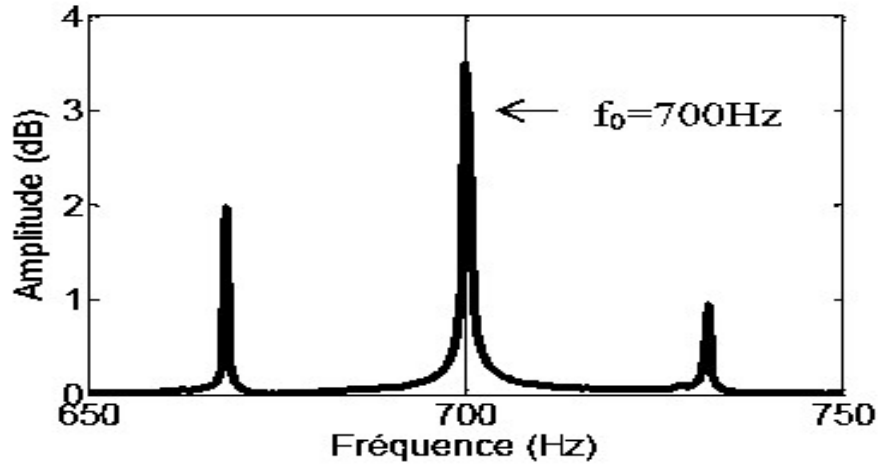


Figure VI.15 Spectre de la référence de couple pour un défaut sur la bague externe

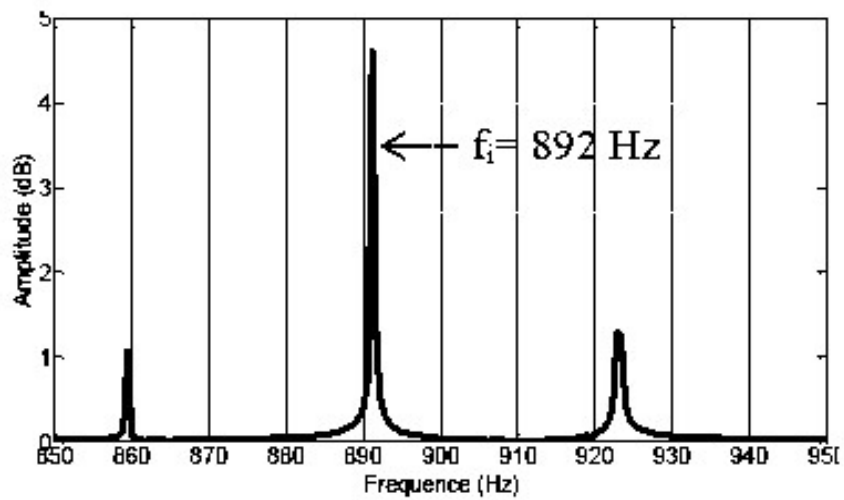


Figure VI.16 Spectre de la référence de couple pour un défaut sur la bague interne

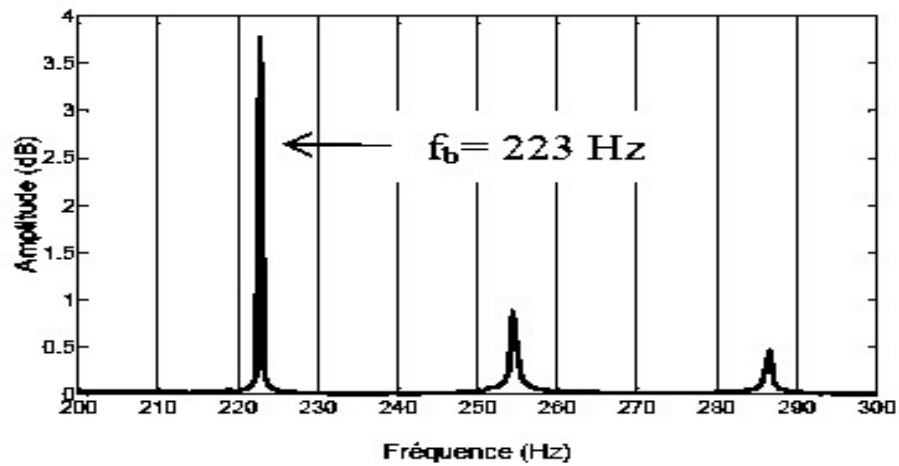


Figure VI.17 Spectre de la référence de couple pour un défaut sur la bille

Remarquons que les fréquences caractéristiques des défauts sont en fonction de la vitesse de rotation. Il faudra donc connaître auparavant ces données afin de pouvoir les utiliser pour la détection du défaut éventuel. Ces résultats ont été essentiellement dédiés à la mise en évidence des influences détectables sur la machine asynchrone. Nous avons étudié successivement :

- La signature spectrale du courant statorique de la machine saine,
- Défaut au stator de la machine,
- Défaut au rotor de la machine,
- Comportement défaillant de l'onduleur, Effet d'un défaut sur le capteur de vitesse, Les défauts de roulement.

Il est bien évident que, dans la pratique, il ne sera pas question de mesurer les courants que dans les barres rotoriques. Les paramètres sur lesquels les mesures peuvent être faites d'une façon assez pratique, c'est les courants de phase statorique. La simulation, dont nous avons présenté a permis de mettre en évidence : l'apparition d'harmoniques supplémentaires (le double de la fréquence électrique sur le capteur de courant, kf_e sur l'onduleur, $(1 \pm 2g)$ sur le rotor et $3f_e$ sur le stator). Cette approche peut alors être utilisée dans un premier temps pour établir un premier diagnostic, et être complétée ensuite par l'approche modèle pour avoir une vision plus fine des défauts. [CH-A17]

8. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons représenté un modèle mathématique d'un moteur asynchrone afin d'étudier son fonctionnement sans et avec défauts. Le choix d'un tel modèle est imposé par l'objectif de pouvoir simuler les défauts. La caractérisation des défauts a montré l'existence de fréquences caractéristiques des défauts. Ces fréquences peuvent être fixes, variable (fonctions de la vitesse ou de la fréquence fondamentale des courants) sur certaines grandeurs (mesures, sorties du contrôle). L'approche signal, présente un avantage pratique très intéressant, plusieurs techniques ont été abordées pour répondre aux contraintes de fiabilité du diagnostic et de rapidité du traitement. Nous avons, dans un premier temps, présenté les techniques de la phase du spectre. Celle-ci permet de mettre en évidence les composantes de défauts à basses fréquences, quoi qu'elle souffre d'incertitude dans le cas où le signal est pollué d'harmoniques.

9. Conclusion générale

Ce travail a porté sur le diagnostic et la détection de défauts de la machine asynchrone. Trois types de défauts ont été traités à savoir le défaut statorique, le défaut rotorique et le défaut de roulement. Nous avons dressé une liste non exhaustive de nombreuses défaillances à travers le descriptif de l'état de la machine tournante à des fins de diagnostic.

10. Bibliographie

[A-HB] Austin H. Bonnett, "Safety consideration for the application installation, operation, and maintenance of industrial AC induction motors", IEEE Trans. Ind. Appl.; vol 25, September / October 1989.

[BON-93] A. H. Bonnett

`` Cause and Analysis of Anti-Friction Bearing Failures in AC Induction Motors ``

[BOU-13] M. Bouzid, G. Champenois

`` An Efficient, Simplified Multiple-Coupled Circuit Model of the Induction Motor Aimed to Simulate Different Types of Stator Faults ``

Elsevier, Journal of Mathematics and Computers in Simulation, Vol. 90, PP 98-

[BON-92] A. H. Bonnett, G.C. Soukup

`` Cause and Analysis of Stator and Rotor Failures in Three-Phase Squirrel-Cage Induction Motors ``

[BOU-07] A.H Boudinar, A. Bendiabdellah., N. Bennouza, N. Boughanemi

`` Three Phase Induction Motor Incipient Rotor's Faults Detection Based on Improved Root-MUSIC Approach ``

International Review of Electrical Engineering, vol. 2 n. 3, pp. 406-413, 2007

[CEB-12] A. Ceban,

`` Méthode Globale de Diagnostic des Machines Electriques ``

Thèse de Doctorat, Université d'Artois, Laboratoire Systèmes Électrotechniques et Environnement, France, 2012

[CH-A17] Chahmi Abdelghani `` Identification paramétrique des MAS dédiée en diagnostic ``

Thèse de doctorat, Université Oran, 2017

[DID 04] Didier G.

`` Modélisation et diagnostic de la machine asynchrone en présence de défaillances ``

Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy-I, France, 2004

[DY-JP] D. Yang and J. Penman, "Intelligent detection of induction motor bearing faults using current and vibration monitoring", Proceeding of COMADEM 2000, 3-8 December 2000, pages 461-470.

[ESF-14] E. T. Esfahani, S. Wang, V. Sundararajan

`` Multisensor Wireless System for Eccentricity and Bearing Fault Detection in induction Motors ``

[FRA-91] G. Franceschini, C. Tasoni, F. Filippetti, M. Martelli, G. Gentile, N. Rotondale

`` Diagnostic indexes for knowledge based representation of induction machine Stator short-circuits ``

[HR-GD] Hubert Razik et Gaëtan Didier, "Notes de cours sur le diagnostic de la machine asynchrone", Notes de cours, I.U.F.M. de Lorraine, Maxéville, 7 janvier 2003.

[KHA-08] A.Khatir `` Contribution au diagnostic de la machine asynchrone commande en vue de minimiser les efforts radiaux``

Mémoire de magister, université Ferhat Abbas-Sétif ,2008

[LA-S20] Lachter salah `` Etude comparative des modèles des MAS utilisé en diagnostic des pannes``

Thèse de doctorat, Université Biskra, 2020

[MD-NB-BK-AB-JAD] M.Drif, N.Benouzza, B.Kraloua, A.Bendiabdellah and J.A.Dente, “Induction motor load effect diagnostic by instantaneous power spectrum”, Proceeding of ACEMP 2001, June 27-29, 2001, Kujadasi, Turkey.

[MD-NB-BK-AB-JAD] M.Drif, N.Benouzza, B.Kraloua, A.Bendiabdellah and J.A.Dente, “Squirrel cage rotor faults detection by instantaneous power spectrum approach”, Proceeding of IEEE SDEMPED 01, Sep. 1-3, 2001, Gorizia, Italy.

[MAR-93] A. Martinez

`` Élément de diagnostic et d'optimisation du fonctionnement d'un entraînement
Electrique dans son environnement applicatif ``

Thèse de doctorat de l'Institut National Polytechnique de Grenoble, 1993

[Nan, T.h99] NANDI S, Toliyat H.A. `` Fault diagnosis of electrical machines-a review, Electric machines and Drives `` International Conference IEMD99 USA

[OND-06] Ondel O.

`` Diagnostic par reconnaissance des formes : Application a un ensemble convertisseur – machine
Asynchrone`` Thèse de Doctorat, Ecole centrale de Lyon, France, 2006

[P.J-BG86]P.J. Travner, B.G. Gaydon and D.M. Ward, “Monitoring generator and large motors”,
IEE Proceeding May 1986

[R-CAS03] Ronald. Casimir,

`` Diagnostic des défauts des machines asynchrones par reconnaissance des formes``

Thèse de Doctorat, Université de Lyon, France, 2003

[SCH-99] E. Schaeffer,

`` Diagnostic des machines asynchrones : modèles et outils paramétriques dédiés à la simulation et à la
Détection des défauts `` Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Nantes, 1999

[S.AIS et B.CH] Saad A et Boudoukhana Ch ``Surveillance et diagnostique des défauts dans la MAS``
Mémoire ingénieur d'état

[SCH-94] R.R. Schoen, T.G. Habetler

`` A new method of current- based condition monitoring in induction machines
Operating under arbitrary load conditions ``
ICEM 94 Proceedings, pp. 282-287, 1994

[TOL95] Toliyat, H.A.; Lipo, TA "Transient analysis of cage induction machines under stator, rotor bar and
end ring faults". Energy Conversion, IEEE Transactions on, Volume: 10, Issue:
2 June 1995 Pages: 241 - 247.

[IBR-09] A. Ibrahim,

`` Contribution au Diagnostic de Machines Electromécaniques: Exploitation des
Signaux Electriques et de la Vitesse Instantanée ``
Thèse de Doctorat, Université de Saint Etienne, France, 2009

[IEE-85] IEEE Motor reliability working group

`` Report on large motor reliability survey of industrial and commercial Installations

[SAH-10] M. Sahraoui,

`` Etude Comparative des Méthodes de Diagnostic des Machines Asynchrones ``
Thèse de Doctorat, Université de Biskra, Algérie, 2010

[VAS-09] B. Vaseghi

`` Contribution à l'Etude des Machines Electriques en Présence de Défaut Entre-
Spires Modélisation-Réduction du Courant de Défaut ``
Thèse de Doctorat, Université de Nancy, France, 2009

54

[WER-12] U. Werner

`` FE-Analysis of a Soft-Mounted Two-Pole Induction Motor Regarding Relative
Shaft Vibration Caused by Static Rotor Eccentricity ``
IEEE Conference Publications, International Symposium on Power Electronics,
Electrical Drives

11. Annexe

Paramètres de la simulation

- Temps machine = 20 s ;
- $T_0 = 0,0$ s ;
- Temps final = 5,0 s ;
- Temps echantionnage = 0,0001s ;
- Vitesse de référence = 200 Rad/s;

Paramètre de la machine

- Résistance statorique $R_s = 0,0142 \Omega$;
- Inductance statorique $L_s = 0,001314$ H;
- Résistance rotorique $R_r = 0,0126 \Omega$;
- Inductance rotorique $L_r = 0,001286$ H ;
- Inductance mutuelle $L_m = 0,00123$ H;
- Paire de pôle $p = 3$;

Etat initiaux pour le système d'état de la machine

$I_{a0} = 0$ A; courant stator

$I_{b0} = 0$ A;

$F_{ra0} = 0$ w; flux au rotor

$F_{rb0} = 0$ w;

Paramètres de l'accouplement souple

Coté machine ; $J_1 = 0,5$, $f_1 = 0,01$

Coté charge ; $J_2 = 0,01$, $f_2 = 0,001$

Rapport de réduction $n_{red} = 1$;

Coefficient de torsion $k = 5000$;

Coefficient d'amortissement $d = 2$;

Etats initiaux

$Vit_m0 = 0,0$ Rad/s ; $Vit_c0 = 0,0$ Rad/s ; $Pos_m0 = 0,0$; $pos_c0 = 0,0$

Paramètre des roulements

$n_billes = 50$; $BD = 0,03$; $PD = 0,2$; $\beta = 0,5$; $amp_0 = 30$; $t_roul = 3$ s ;
 $t_engre = 10,0$ s;

Control Vectoriel

Coef_Park = sqrt (2/3) ; Sigma = 1-Lm x Lm/Lr/Ls ; tau_s = Ls / Rs ; Rr_com = 0,0126 Ω ;

Lr_com = 0,001286 H; Ls_com = 0,001314 H; Lm_com = 0,00123 H;

Onduleur

G_ond = 1 ; Vmax = 350/2 ;

Contrôle de la vitesse

puls_nat_vit = 100 ; amort_vit = 0,7 ; Cmax = 150 N.m ;

Engrenages amp_eng = 10 ; k_eng = 2 ; Nm_eng = 200 ;

Rapport de réduction

N1 = 100, N2 = 150

Notations

Nom	Symbole	Unité
Courant statorique de la phase a	i_{sa}	A
Le flux à travers un enroulement statorique	φ_{sa}	Wb
Résistance statorique	R_s	Ω
Tension statorique de la phase a	V_{sa}	V
Coefficient d'inductance propre d'un enroulement du stator	L_s	H
Coefficient d'inductance mutuelle entre deux enroulements du stator	M_S	-
Fréquence d'alimentation	f	Hz
Glissement d'une machine asynchrone	g	-
Coefficient de torsion	k	-
Coefficient d'amortissement	d	-
Rapports de réduction	$N1, N2$	-
Pulsation statorique	ω_s	-
Moment d'inertie de la machine	$J1, j2$	-
Couple électromagnétique	C_{em}	N.m
Indice pour les trois phases du stator et rotor	a, b, c	-
Vitesse de rotation du rotor	ω_r	Tr/min
Amplitude de signal	A	dB
temps de défaut	t	S
Axe biphasés de Concordia	α, β	-
Axe biphasés de Park	d, q	-
Rapport de réduction	n_{red}	-
Diamètre de la bille de roulement	BD	-
Angle de contact des billes	β	-
Matrice des résistances statoriques	$[R_s]$	-
Matrice des résistances rotoriques	$[R_r]$	-
Matrice des inductances statoriques	$[L_s]$	-
Matrice des inductances rotoriques	$[L_r]$	-
Couple transmis	C_t	-
Vitesse de rotation mécanique	ω_r	Tr/min
l'angle qui définit la position du rotor par rapport au stator	θ_r	-
Inductance de fuite d'une barre rotorique	L_b	H
Inductance de fuite d'un segment d'anneau de court-circuit	L_e	H
Inductance mutuelle entre l'ième et la jème maille rotorique	L_{rirj}	H