

Ordre...../F.S.S.A/UAMOB/2019

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE AKLI MOHAND OULHADJE-BOUIRA



Faculté des Sciences et des Sciences Appliquées
Département : Génie Electrique

Mémoire de fin d'étude

Présenté par :

MOUILID Houssam Eddine
SENOUSSAOUI Khaled

En vue de l'obtention du diplôme de **Master** en :

Filière : Electromécanique
Option : Electromécanique

Thème :

Diagnostic des défauts dans les machines électrique en utilisant l'analyse spectrale des grandeurs mesurables application : machine asynchrone à rotor bobiné

Devant le jury composé de :

Mr.A . FEKIK	MAB	UAMOB	Président
Mme N .YASSA	MCB	UAMOB	Encadreur
Mme BENSMAIL	MCB	UAMOB	Examinateur

Année Universitaire 2018/2019

Remerciement

On remercie dieu le tout puissant de nous avoir donné la santé et la volonté d'entamer et de terminer ce mémoire.

Tout d'abord, ce travail ne serait pas aussi riche et n'aurait pas pu avoir le jour sans l'aide et l'encadrement de **Mme N. Yassa** on la remercie pour la qualité de son encadrement exceptionnel, pour sa patience, sa rigueur et sa disponibilité durant notre préparation de ce mémoire.

Notre remerciement s'adresse également à tous nos professeurs pour leurs générosités et la grande patience dont ils ont su faire preuve malgré leurs charges académiques et professionnelles.

Nos profonds remerciements vont également à toutes les personnes qui nous ont aidés et soutenus de près ou de loin.

Mouilid Houssam Eddine

Senoussaoui Khaled

Dédicace

Je dédie ce projet à :

Ma mère et mon père.

A mes frères et mes sœurs.

A toute la famille MOUILID.

A tous mes amis.

MOUILID HOUSSAM EDDINE

Sommaire

Remerciements

Dédicaces

Liste des figures

Introduction général : 1

Chapitre I Généralité sur les défauts dans la machine asynchrone

I.1 Introduction..... 2

1.2 Machine asynchrone..... 2

I.3 Constitution de la machine asynchrone 2

I.3.1 Le Stator 3

I.3.2 Le Rotor..... 4

I.3.2.1 Rotors bobinés 4

I.3.2.2 Rotor à cage 5

I.3.3 Organes mécanique 6

I.4 Principe de fonctionnement de la machine asynchrone 6

I.4.1 Glissement d'une machine asynchrone 6

I.5 Classifications des machines électriques 7

I.5.1 Les machines génératrices 7

I.5.2 Les moteurs électriques 7

I.5.3 Les machines transformatrices 7

I.6 Étude statique des déficiences des machin asynchrone 7

I.7 Les défauts électriques 9

I.7.1 Défaillances au rotor 9

I.7.1.1 Ruptures de barres 10

I.7.1.2 Ruptures d'anneaux 10

I.7.1.3 Excentricité statique et dynamique 10

I.7.1.4 Défaut de roulements 12

I.7.2 Défaillances des circuits électriques statorique..... 12

I.7.2.1 Défauts d'isolant dans un enroulement 12

I.7.2.2 Court-circuit entre spires 13

Sommaire

I.7.2.3 Court-circuit entre phases	14
I.7.2.4 Défauts de circuit magnétique	15
I.8 Méthodes de diagnostic des défauts des machines électriques	15
I.8.1 Méthodes externes	16
I.8.1.1 Méthode d'analyse vibratoire	16
I.8.1.2 Méthode d'analyse des flux	17
I.8.1.3 Méthode d'analyse du couple électromagnétique.....	17
I.8.1.4 Analyse du vecteur de Park	18
I.8.1.5 Analyse des courants statoriques	18
I.9 Conclusion	22
Chapitre II Modélisation et simulation de la MAS à rotor bobiné en régime sain	
II.1 Introduction	23
II.2 Méthodes de modélisation des machines asynchrones.....	23
II.2.1 Modélisation par les équations magnétiquement couplées(CEMC).....	23
II.2.2 Méthode des réseaux de permeances (RNM)	24
II.2.3 Méthode des éléments finis (MEF).....	25
II.3 présentation de modèle	26
II.3.1 Equation électrique de la machine	26
II.3.2 Expression du flux	28
II.3.3 Expression du couple électromagnétique.....	29
II.3.4 Equation mécanique.....	30
II.3.5 Etablissement du modèle d'état	30
II.4 Résultats de simulation de la machine asynchrone en régime sain :	33
II.4.1 A vide.....	33
II.4.2 En charge :	35
II.5 Interprétation des résultats de simulation	36
II.6 Conclusion	37
Chapitre III Modélisation et simulation de MAS à rotor bobiné en présence du défaut	
III.1 Introduction :	39

Sommaire

III.2 Modèle de la machine asynchrone à rotor bobiné avec défaut de court- circuit.....	39
III.3 Modélisation dans le repère triphasé.....	40
III.4 Représentation d'état du modèle de défaut :	42
III.5 Résultats de simulation.....	43
III.6 Interprétation des résultats	52
III.7 Analyse fréquentielle.....	53
III.8 Conclusion.....	55
Conclusion générale	56

Bibliographie

Résumé

Liste des figures

Figure I.1. Les éléments de constitution d'une machine asynchrone	3
Figure I.2. Stator d'un moteur asynchrone triphasé.....	4
Figure I.3. Rotor bobiné d'un moteur asynchrone triphasé.....	4
Figure I.4. Rotor avec sa cage d'écureuil d'un moteur asynchrone.....	5
Figure I.5. Répartition des causes des défauts pour une machine asynchrone.....	8
Figure I.6. Facteurs aggravants le défaut.....	8
Figure I.7. Répartition des défauts.....	9
Figure I.8. Différents types d'excentricité dans les machines électriques	11
Figure I.9. Vue éclatée d'un roulement à billes.....	12
Figure I.10. Dégradation causée par une surtension.....	13
Figure I.11. Photos d'un dégât dus au défaut de court-circuit entre spire	14
Figure I.12. Court-circuit entre phase.....	15
Figure I.13. Modélisation schématique de l'excentricité statique et dynamique.....	19
Figure I.14. Vue en coupe de la partie supérieure d'un roulement à bille.....	21
Figure II.1. Schéma électrique équivalent à la cage rotorique.....	24
Figure II.2. Réseau de perméances élémentaire autour d'encoche statorique	25
Figure II.3. Présentation schématique de la MAS en régime sain.....	26
Figure II.4. Evolution de la vitesse de rotation.....	33
Figure II.5. Evolution de couple électromagnétique.....	33
Figure II.6. Courant dans les trois phases du stator.....	34
Figure II.7. Courant dans les trois phases du rotor.....	34
Figure II.8. Evolution de la vitesse de rotation.....	35
Figure II.9. Evolution de couple électromagnétique.....	35

Liste des figures

Figure II.10. Courant dans les trois phases du stator.....	36
Figure II.11. Courant dans les trois phases du rotor.....	36
Figure III.1. Court-circuit de la phase b du stator.....	39
Figure. III.2. schéma équivalent d'une MAS présentant un défaut inter spires	40
Figure III.3. Allure de vitesse de rotation en régime défectueux 10% 15% et 20%.....	43
Figure III.4. Allure de couple électromagnétique en régime défectueux 10% 15% et 20%...43	
Figure III.5. Courant dans les trois phases statoriques en régime défectueux de 10% de cc..44	
Figure III.6. Courant dans les trois phases statoriques en régime défectueux de 15% de cc..44	
Figure III.7. Courant dans les trois phases statoriques en régime défectueux de 20% de cc..44	
Figure III.8. Courant dans les trois phases srotoriques en régime défectueux de 10% de cc..45	
Figure III.9. Courant dans les trois phases srotoriques en régime défectueux de 15% de cc..45	
Figure III.10. Courant dans les trois phases srotoriques en régime défectueux de 20% de cc.....	45
Figure III.11. Allure de vitesse de rotation en régime défectueux 10% 15% et 20%.....	46
Figure III.12. Allure de couple électromagnétique en régime défectueux 10% 15% et 20%.46	
Figure III.13. Courant dans les trois phases statoriques en régime défectueux de 10% de cc	47
Figure III.14. Courant dans les trois phases statoriques en régime défectueux de 15% de cc	47
Figure III.15. Courant dans les trois phases statoriques en régime défectueux de 20% de cc.....	47
Figure III.16. Courant dans les trois phases rotoriques en régime défectueux de 10% de cc.....	48
Figure III.17. Courant dans les trois phases rotoriques en régime défectueux de 15% de cc	48

Liste des figures

Figure III.18. Courant dans les trois phases rotoriques en régime défectueux de 20% de cc	48
Figure III.19. Allure de vitesse de rotation en régime défectueux 10% 15% et 20%.....	49
Figure III.20. Allure de couple électromagnétique en régime défectueux 10% 15% et 20%.....	49
Figure III.21. Courant dans les trois phases statoriques en régime défectueux de 10% de cc	50
Figure III.22. Courant dans les trois phases statoriques en régime défectueux de 15% de cc	50
Figure III.23. Courant dans les trois phases statoriques en régime défectueux de 20% de cc	50
Figure III.24. Courant dans les trois phases rotoriques en régime défectueux de 10% de cc	51
Figure III.25. Courant dans les trois phases rotoriques en régime défectueux de 15% de cc	51
Figure III.26. Courant dans les trois phases rotoriques en régime défectueux de 20% de cc	51
Figure III.27. Analyse spectrale de courant I_{s1} pour 36 spires en cc dans la phase s_1 à faible charge.....	53
Figure III.28. Analyse spectrale de I_{s2} pour 36 spires en cc dans la phase s_1 à faible charge.....	53
Figure III.29. Analyse spectrale de I_{s1} pour 36 spires en cc dans la phase s_1 à demi-charge.....	53
Figure III.30. Analyse spectrale de I_{s1} pour 36 spires en cc dans la phase s_1 à demi-charge.....	54
Figure III.31. Analyse spectrale de I_{s2} pour 36 spires en cc dans la phase S_1 à demi-charge.....	54

Liste des figures

Figure III.32. Analyse spectrale de I_{s2} pour 36 spires en cc dans la phase s_1 à plein charge	54
--	----

Introduction générale

Introduction générale

L'industrie moderne s'appuie généralement sur des moyens technique et matériels les moins couteux et plus rentables, c'est pourquoi on trouve l'utilisation des machines asynchrones comme élément de base dans l'industrie, cette place prestigieuse qu'occupe ces machines, nécessite une mise en place de programme de maintenances préventifs et correctifs afin d'assurer une bonne continuité de leur fonctionnement. En effet, la fiabilité et la sureté de leur fonctionnement permettent en partie d'assurer la sécurité des personnes, la qualité du service et la rentabilité des installations.

Il existe plusieurs procédures de diagnostic [1]. Le choix d'une approche est lié à la connaissance que l'on souhaite acquérir sur le système, mais aussi à la complexité de ce système. Ainsi deux types de procédures sont utilisés dans le domaine du diagnostic : les méthodes de diagnostic à base de modèles analytiques et les méthodes sans modèle. Les méthodes à base de modèles analytiques reposent sur le suivi des paramètres et des grandeurs de la machine, au moyen d'algorithmes d'observation. Elles détectent les défaillances en comparant l'évolution de l'écart entre le modèle et le processus réel. Le principal avantage de ces méthodes réside dans l'intégration d'une connaissance a priori du système et donc une rage de l'information [2].

L'objectif principal de notre travail est l'élaboration de modèles de simulation de la machine asynchrone à rotor bobiné, cela en régime sain et en présence des défauts, en utilisant la méthode des Circuits Electriques Magnétiquement Couplés (CEMC). Cette dernière est basée sur la représentation des bobinages de la machine par des circuits électriques distribués sans utiliser aucune transformation [3][4]. Ce type d'approche offre un modèle de machine flexible, un temps de calcul raisonnable et ne nécessite aucun recours au calcul de champs. Les défauts étudiés sont le court -circuit inter-spires pour la machine asynchrone à rotor bobiné, Les différents modèles de la machine sont programmés et simulé sous logiciel MATLAB

Dans ce contexte, ce mémoire comporte trois chapitres dans le premier chapitre nous présentons la classification de la machine asynchrone ainsi que les déférant défaut pouvant survenir ensuite nous présentons les différentes méthodes de diagnostic

Dans le deuxième chapitre est consacré à la modélisation de la machine asynchrone à rotor bobiné, le modèle présenté est un modèle réel triphasé –triphase.

Le troisième chapitre nous présentons le modelé de la MAS eu présent le défaut de court-circuit inter spire

Chapitre I

Généralité sur les défauts dans la machine asynchrone

I.1 Introduction

L'étude des défauts dans les dispositifs électriques est un domaine qui a pris une place importante depuis que les exigences de fiabilité, de sûreté et de disponibilité sont devenues assez sévères dans les systèmes industriels. En effet, la continuité de service est une qualité importante et incontournable que doit avoir tout système de nos jours pour satisfaire les exigences de l'utilisateur.

En effet, l'apparition d'un défaut conduit le plus souvent à un arrêt irrémédiable des machines électrique entraînant, en conséquence, un coût de réparation non négligeable pour l'entreprise (cas des machines de forte puissance) sans oublier la perte de production occasionnée. Dans le domaine nucléaire, par exemple, il est indispensable d'assurer la sécurité des personnes et du matériel car aucun système, qu'il soit simple ou complexe, n'est à l'abri d'un dysfonctionnement.

I.2 Machine asynchrone

Le moteur asynchrone est la machine la plus utilisée dans le domaine des puissances supérieures à quelques kilowatts car il présente de nombreux avantages tels que sa puissance massique, sa robustesse, sa facilité de mise en œuvre, son faible coût, etc.... L'apparition dans les années 1980 des variateurs permettant de faire varier la fréquence de rotation dans une large gamme a grandement favorisé son développement. En effet, il entre dans la conception de nombreux procédés industriels associant des convertisseurs statiques et des machines électriques (traction électrique, laminoirs, levage, pompage, etc....)

Bien que la machine asynchrone ait la réputation d'être robuste, elle peut présenter comme toute autre machine électrique, des défaillances d'ordre électrique ou mécanique. Ainsi, en raison des conséquences importantes et coûteuses que peut engendrer l'apparition d'un défaut sur les processus industriels, le diagnostic des défauts fait l'objet d'un engouement prononcé depuis les deux dernières décennies. [5]

I.3 Constitution de la machine asynchrone

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



Figure I.2. Stator d'un moteur asynchrone triphasé.

I.3.2 Le Rotor

Partie tournante qui permet de mettre en rotation la charge mécanique, tout comme le stator, le circuit magnétique rotorique est constitué de tôles d'acier qui sont, en général, de même origine que celles utilisées pour la construction du stator. Les rotors de machines asynchrones peuvent être de deux types : bobinés ou à cage d'écureuil [8].

I.3.2.1 Rotors bobinés

Sont construits de la même manière que le bobinage statorique (insertion des enroulements dans les encoches rotoriques). Les phases rotoriques sont alors disponibles grâce à un système de bagues-balais positionné sur l'arbre de la machine.

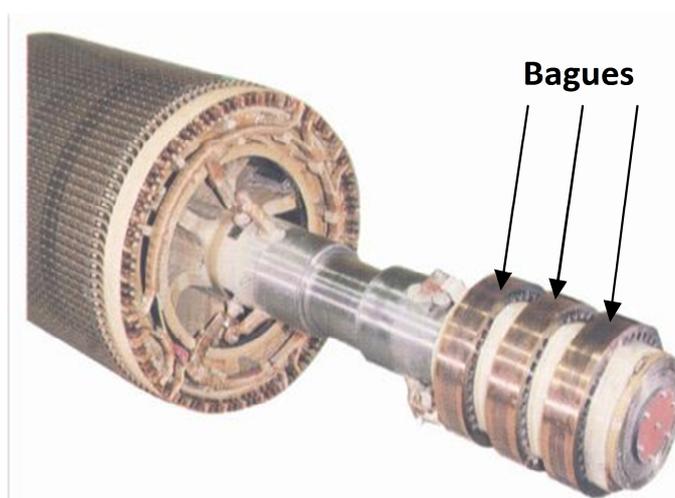


Figure I.3. Rotor bobiné d'un moteur asynchrone triphasé [8]

I.3.2.2 Rotor à cage

Il existe différentes structures de rotor à cage qui dépend principalement de la taille du moteur et de l'application qui lui est destinée.

Les enroulements de la cage d'écureuil sont constitués de barres de cuivre pour les gros moteurs ou d'aluminium pour les petits. Ces barres sont court-circuitées à chaque extrémité par deux anneaux dits «de court-circuit», eux aussi fabriqués en cuivre ou en aluminium (figure I.4).

Un autre procédé de fabrication consiste à mouler le circuit électrique rotorique en coulant de l'aluminium dans les encoches fermées aménagées dans le circuit magnétique. L'intérêt essentiel de ce procédé est la grande robustesse du rotor, une fabrication aisée et un faible coût de réalisation pour des machines sans pratiquement aucun entretien [6].

Très souvent, les barres rotoriques sont uniformément inclinées pour limiter les harmoniques d'encoches rotoriques et ainsi diminuer très fortement le bruit lors de l'accélération de la machine asynchrone (figure I.4). L'isolation des barres rotoriques avec les tôles magnétiques n'est en général pas nécessaire du fait de la faible tension induite aux bornes de chacune d'entre elles [9].

De plus, la résistivité de l'alliage utilisé pour la construction de cette cage est suffisamment faible pour que les courants ne circulent pas à travers les tôles magnétiques, sauf lorsque la cage rotorique présente une rupture de barre. Le rotor de la machine asynchrone est aussi pourvu d'ailettes de ventilation pour permettre un refroidissement de la cage le plus efficace possible.

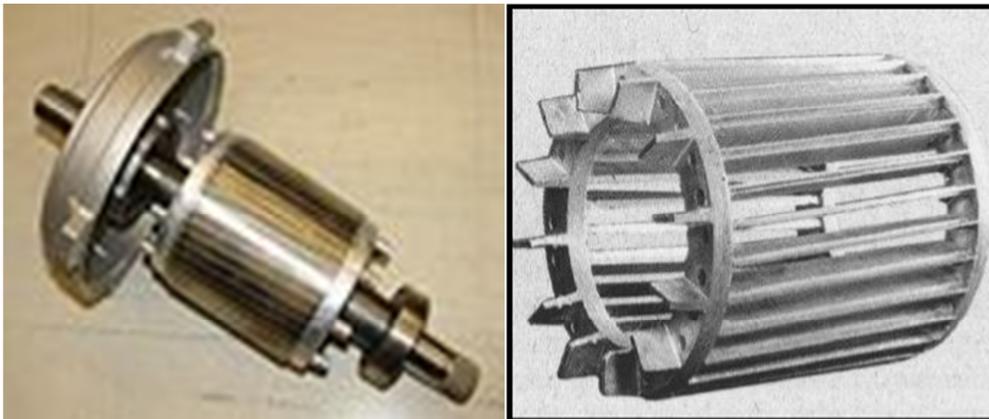


Figure I.4. Rotor avec sa cage d'écureuil d'un moteur asynchrone [9]

I.3.3 Organes mécanique

De chaque côté, un flasque est monté sur lequel le rotor sera positionné grâce à des roulements à billes ou à rouleaux, à cause de cette raison on dit que le stator est autoporteur. Pour assurer le refroidissement de la machine, un ventilateur est placé en bout d'arbre sur le rotor. Il peut être remplacé par une ventilation forcée motorisée pour le refroidissement aux vitesses lentes [10].

I.4 Principe de fonctionnement de la machine asynchrone

Les courants statorique créent un champ magnétique tournant dans le stator. La fréquence de rotation de ce champ est imposée par la fréquence des courants statorique, c'est-à-dire que sa vitesse de rotation est proportionnelle à la fréquence de l'alimentation électrique. La vitesse de ce champ tournant est appelée vitesse de synchronisme. L'enroulement au rotor est donc soumis à des variations de flux (du champ magnétique). Une force électromotrice induite apparaît qui crée des courants rotoriques. Ces courants sont responsables de l'apparition d'un couple qui tend à mettre le rotor en mouvement afin de s'opposer à la variation de flux : loi de Lenz. Le rotor se met donc à tourner pour tenter de suivre le champ statorique. La machine est dite asynchrone car elle est dans l'impossibilité, sans la présence d'un entraînement extérieur, d'atteindre la même vitesse que le champ statorique. En effet, dans ce cas, vu dans le référentiel du rotor, il n'y aurait pas de variation de champ magnétique ; les courants s'annuleraient, de même que le couple qu'ils produisent, et la machine ne serait plus entraînée. La différence de vitesse entre le rotor et le champ statorique est appelée vitesse de glissement [11].

I.4.1 Glissement d'une machine asynchrone

Le glissement est une grandeur qui rend compte de l'écart de vitesse de rotation d'une machine asynchrone par rapport à une machine synchrone hypothétique construite avec le même stator. Le glissement est toujours faible, de l'ordre de quelques pourcents : de 2 % pour les machines les plus grosses à 6 ou 7 % pour les petites machines triphasées, il peut atteindre 10 % pour les petites machines monophasées. Les pertes par effet Joule dans le rotor étant proportionnelles au glissement, une machine de qualité se doit de fonctionner avec un faible glissement.

$$g = \frac{N_s - N}{N_s}$$

g : Le glissement du moteur asynchrone en pourcentage [sans unités]

N_s : La fréquence de rotation du champ B ρ en tours par seconde [tr.s-1]

N : La fréquence de rotation du rotor en tours par seconde [tr.s-1]

I.5 Classifications des machines électriques

On peut, a priori, classer les machines électriques en trois catégories principales [22] :

I.5.1 Machines génératrices

Qui transforment l'énergie mécanique en énergie électrique. Leur fonctionnement est basé sur l'induction d'un courant électrique dans un circuit conducteur par déplacement relatif de celui-ci et d'un champ magnétique, à l'aide d'un engin d'entraînement mécanique.

Selon que le courant électrique induit est continu ou alternatif, la machine génératrice sera appelée dynamo ou alternateur.

I.5.2 Moteurs électriques

Leur fonctionnement est basé sur l'obtention d'un effort mécanique par action d'un champ magnétique sur un circuit électrique traversé par un courant fourni par une source extérieure, laquelle peut aussi produire éventuellement le champ magnétique. Selon que le courant électrique fourni par la source extérieure est continu ou alternatif, la machine sera appelée moteur à courant continu ou moteur à courant alternatif (synchrone ou asynchrone).

I.5.3 Machines transformatrices

La catégorie la plus importante est le transformateur qui modifie la grandeur des courants et tensions alternatifs. Son fonctionnement est basé sur l'induction d'un courant électrique dans un circuit conducteur fixe sous l'action d'un champ magnétique variable dans le temps mais fixe dans l'espace.

Les autres machines transformatrices (changeurs de fréquence, commutatrices transformant le courant alternatif en continu ou inversement) sont supplantées aujourd'hui par des systèmes statiques utilisant l'électronique de puissance.

I.6 Étude statique des déficiences des machines 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. Les résultats obtenus restent quand même assez différents d'une étude à l'autre. Cependant, toutes les études convergent pour classer les défauts de paliers comme étant les plus fréquents, suivis par les défauts statoriques et, en dernier, les défauts de cage rotorique [12].

La figure I.5 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.

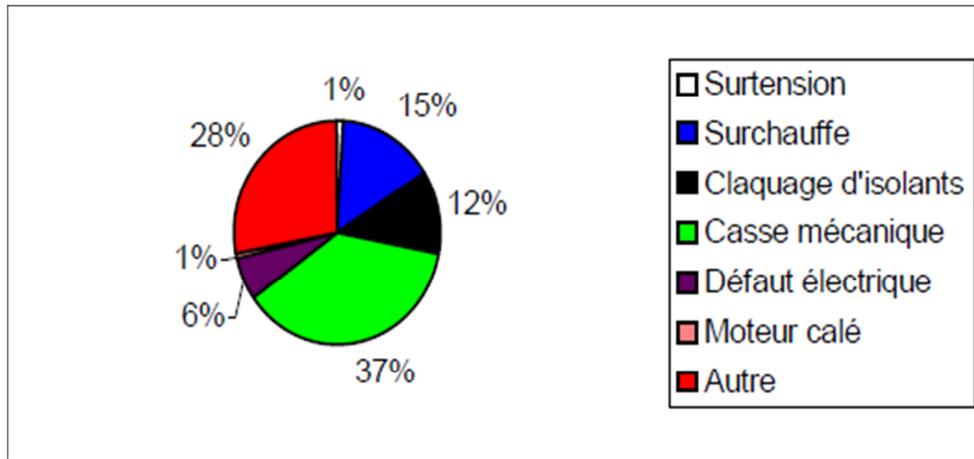


Figure I.5. Répartition des causes des défauts pour une machine asynchrone [12]

La figure I.6 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,...).

En règle générale, toute différence par rapport au point de fonctionnement nominal contribue à aggraver le défaut naissant voir à le faciliter.

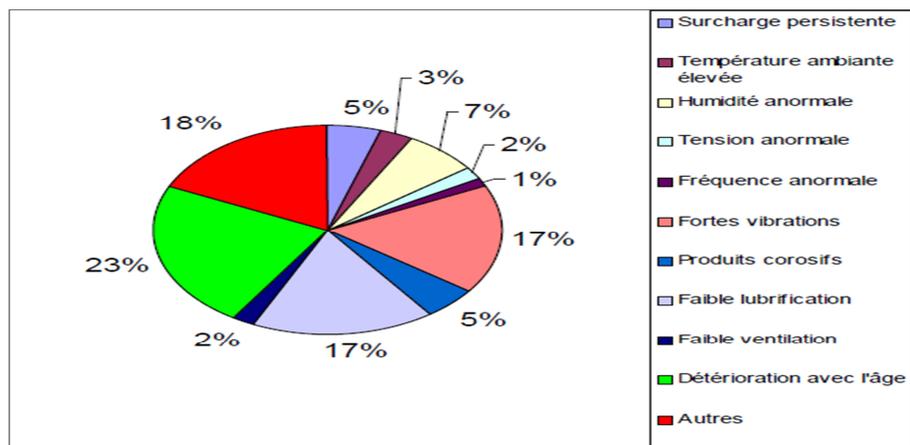


Figure I.6. Facteurs aggravants le défaut [12]

Une étude conduite pour a établi une statistique des différents défauts pouvant se produire sur une machine électrique (figure I.7).

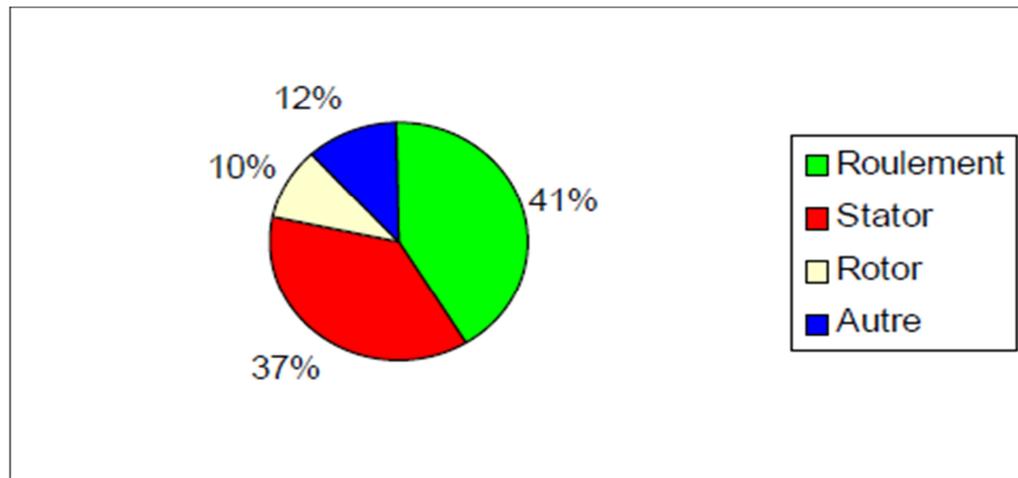


Figure I.7. Répartition des défauts [12]

I.7 Défauts électriques

Les défaillances d'origine électrique peuvent, dans certain cas, être la cause d'un arrêt de la machine au même titre que celles d'ordre mécanique. Ces défaillances se séparent en deux catégories bien distinctes. Nous pouvons citer les défaillances qui apparaissent au niveau des circuits électriques statoriques et celles qui apparaissent au niveau des circuits électriques rotorique [13].

I.7.1 Défaillances au rotor

Pour le rotor, les défaillances sont essentiellement dues à un problème,

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

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

- Rupture de barres
- Rupture d'une portion d'anneau de court-circuit

- Excentricité statique et dynamique
- Défaut de roulements

I.7.1.1 Ruptures de barres

La cassure ou rupture de barre est un des défauts les plus fréquents au rotor. Elle peut se situer soit au niveau de son encoche soit à l'extrémité qui la relie à l'anneau rotorique. La détérioration des barres réduit la valeur moyenne du couple électromagnétique et augmente l'amplitude des oscillations, qui elles-mêmes provoquent des oscillations de la vitesse de rotation, ce qui engendre des vibrations mécaniques et donc, un fonctionnement anormal de la machine. La grande amplitude de ces oscillations accélère la détérioration de la machine, ainsi, le couple diminue sensiblement avec le nombre de barres cassées induisant un effet cumulatif de la défaillance. L'effet d'une cassure de barre croît rapidement avec le nombre de barres cassées.

I.7.1.2 Ruptures d'anneaux

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

I.7.1.3 Excentricité statique et dynamique

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

Trois cas d'excentricité, sont généralement distingués :

- l'excentricité statique (**Figure I.8.a.**), le rotor est déplacé du centre de l'alésage stator mais tourne toujours autour de son axe.

- l'excentricité dynamique (**Figure I.8.b.**), le rotor est positionné au centre de l'alésage mais ne tourne plus autour de son axe.
- L'excentricité mixte (**Figure I.8.c.**) dans laquelle l'axe du rotor tourne autour d'un axe différent de celui du stator. Elle est donc la combinaison des excentricités statique et dynamique. Dans la plupart des machines tournantes, on observe cette dernière forme d'excentricité

Ce défaut modifie le comportement 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 le noyau 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 vibrations considérables dans les enroulements

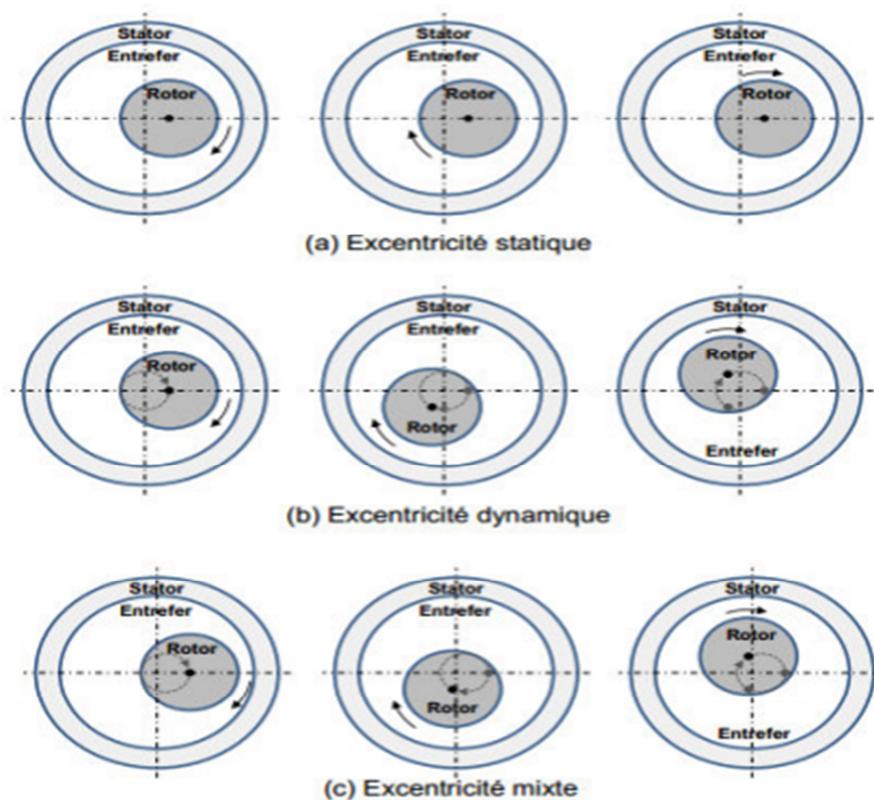


Figure I.8. Différents types d'excentricité dans les machines électriques [13]

I.7.1.4 Défaut de roulements

Les roulements dans les machines électriques sont, en général, composés d'une bague interne, d'une bague externe, d'un organe de roulement (constitué le plus souvent de billes maintenues dans une cage ou de rouleaux) ainsi que d'un dispositif de lubrification (**Figure I.9.**) Les défauts de roulement, qui représentent une part non négligeable des défauts survenant dans les machines électriques,

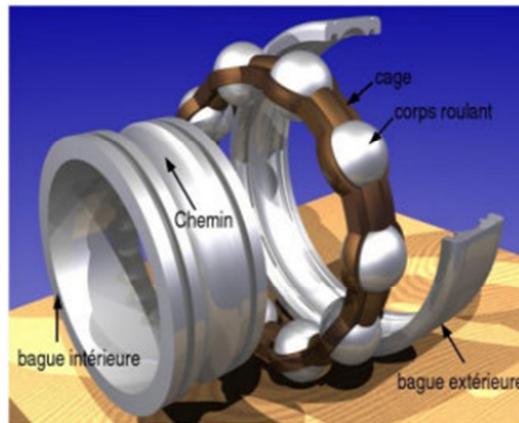


Figure I.9. Vue éclatée d'un roulement à billes [13]

I.7.2 Défaillances des circuits électriques statorique

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

- ✓ Défaut d'isolant
- ✓ court-circuit entre spires
- ✓ court-circuit entre phases
- ✓ Défaut de circuit magnétique

I.7.2.1 Défauts d'isolant dans un enroulement

La dégradation des isolants dans les enroulements peut provoquer des courts-circuits. En effet, les différentes pertes (Joule, fer, mécanique,...) engendrent des phénomènes thermiques se traduisant par une augmentation de la température des différents organes du moteur. Cependant, les matériaux d'isolation ont une limite de température, de tension et de mécanique. De ce fait, si l'environnement de travail d'un matériau d'isolation dépasse une de ces limites, ce matériau va se dégrader de manière prématurée ou accélérée et finira par ne plus assurer sa fonction. Dans ce cas, un court-circuit peut apparaître dans l'enroulement concerné.

Les différentes Causes pour ce type de défaut sont :

- ✓ La dégradation de l'isolant à la fabrication.
- ✓ La tension de l'enroulement supérieure à la limite du matériau d'isolation, (**Figure I.10.**)
- ✓ Le courant élevé dans l'enroulement dû à un court-circuit, un défaut du convertisseur, une surcharge. Ceci entraîne une élévation de la température dégradant prématurément le matériau d'isolation.
- ✓ Les vibrations mécaniques.
- ✓ Le vieillissement naturel des isolants. Tous les matériaux isolants ont une durée de vie limitée même pendant une utilisation 'normale', l'isolant finit naturellement par se dégrader
- ✓ Fonctionnement dans un environnement sévère [6]

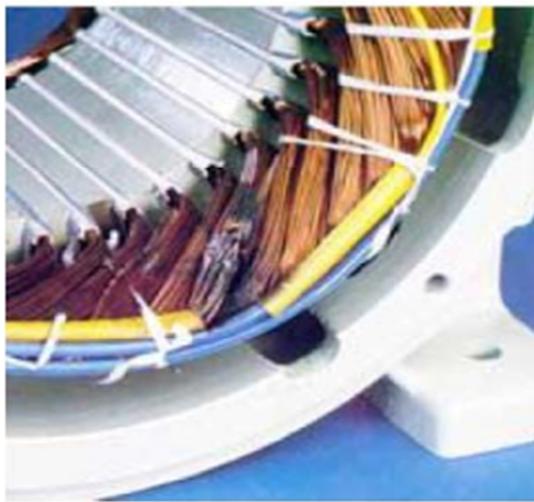


Figure I.10. Dégradation causée par une surtension [6]

I.7.2.2 Court-circuit entre spires

Un court-circuit entre spires d'une même phase est un défaut assez fréquent. Cette défaillance a pour origine un ou plusieurs défauts d'isolant dans l'enroulement concerné [2] [14]. Il entraîne une augmentation des courants statoriques dans la phase affectée. Une légère variation de l'amplitude sur les autres phases, modifie le facteur de puissance et amplifie les courants dans le circuit rotorique. Ceci a pour conséquence une augmentation de la température au niveau des enroulements et, de ce fait, une dégradation accélérée des isolants, pouvant provoquer ainsi, un défaut en chaîne (apparition d'un 2^{ème} court-circuit). Par contre, le couple électromagnétique moyen délivré par la machine reste sensiblement identique en dehors d'une augmentation des oscillations proportionnelles au défaut.

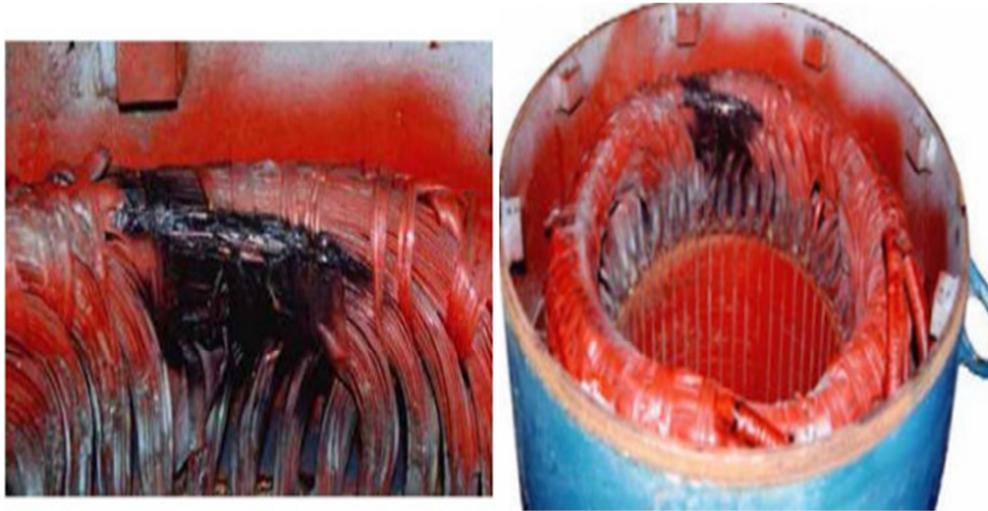


Figure I.11.Photos d'un dégât dus au défaut de court-circuit entre spire [2]

I.7.2.3 Court-circuit entre phases

Ce type de défaillance peut arriver en tout point du bobinage, cependant les répercussions ne seront pas les mêmes selon la localisation. Cette caractéristique rend difficile une analyse de l'incidence de ce défaut sur le système [6] [2].

L'apparition d'un court-circuit proche de l'alimentation entre phases, induirait des courants très élevés qui conduiraient à la fusion des conducteurs d'alimentation et/ou à la disjonction par les protections. D'autre part, un court-circuit proche du neutre entre deux phases engendre un déséquilibre sans provoquer la fusion des conducteurs.

Les courants statoriques sont totalement déséquilibrés et ce déséquilibre est proportionnel au défaut qui apparaît. Les courants dans les barres ainsi que dans les anneaux sont augmentés lors de l'apparition de ce défaut. La détection de ce type de défaut peut reposer sur le déséquilibre des courants de phases.



Figure 1.12. Court-circuit entre phase [6]

I.7.2.4 Défauts de circuit magnétique

Ces défauts aboutissent dans la plupart des cas à une dissymétrie au niveau du fonctionnement de la machine, qui à son tour peut accentuer le problème par des phénomènes de surchauffe, de surtension, d'élévation importante du courant [2][6], etc...

I.8 Méthodes de diagnostic des défauts des machines électriques

L'historique du diagnostic des défauts est aussi vieux que les machines électriques. En règle générale, la surveillance et le diagnostic exigent la détection et l'analyse des signaux contenant des informations spécifiques (symptômes) qui caractérisent la dégradation de la machine.

Il existe une variété de techniques de diagnostic et de détection de défauts. Certaines d'entre elles sont basées sur l'observation et la mesure, tel que la mesure du champ magnétique, du bruit, de la vibration...etc. d'autres sur la surveillance et la comparaison des caractéristiques électromécaniques du moteur défaillant avec celles du moteur sain (courant statorique, couple électromagnétique, vitesse mécanique et puissance).

Les techniques de diagnostic sont généralement liées aux types de défauts. Certaines techniques sont plus adaptées pour un type particulier de défaut, d'autre peuvent être utilisé pour n'importe quel type de défaut. L'intérêt de la technique réside dans l'instrumentation employée, la facilité de sa mise en œuvre ainsi que la richesse de l'information fournit sur l'existence ou non du défaut et de sa sévérité.

Dans cette partie, nous allons présenter les différentes méthodes de diagnostic. Ces méthodes

sont classées en deux grandes familles, analytique ou heuristique, en fonction de la forme prise par la connaissance du comportement du système, et par conséquent, de la méthode d'analyse qui en découle. La distinction est donc faite entre, les méthodes qui effectuent l'analyse des signaux d'acquisitions sans connaissance a priori, qualifiées de diagnostic externe et celles qui nécessitent la formulation d'un modèle mathématique du système, qualifiées de diagnostic interne[15].

Toutes ces méthodes permettent de générer une information pertinente (paramètres, vecteur forme, règles, etc...) pour l'élaboration des indicateurs de défauts du système. Le choix d'une méthode se fera en fonction de la nature de ces indicateurs de défauts.

I.8.1 Méthodes externes

Nous avons vu que la première famille de méthodes nécessite la connaissance du comportement dynamique de la machine. Dans cette deuxième partie, nous nous intéressons aux résultats obtenus à partir du suivi direct des grandeurs telles que les courants, le couple estimé ou mesuré, les flux ou encore les vibrations [15] [16].

Ces méthodes dites „sans modèles“ se basent sur l'analyse des signaux d'acquisitions. Elles ont l'avantage de l'indépendance de l'analyse par rapport aux fluctuations internes du système. D'autre part, l'information contenue dans les signaux, n'étant pas filtrée par la modélisation, reste intacte.

I.8.1.1 Méthode d'analyse vibratoire

L'analyse des défauts des moteurs électriques par les signaux vibratoires et acoustiques permet quasiment une détection de tous les défauts, notamment ceux mécaniques, pouvant se produire sur le processus. Cette analyse peut être réalisée à partir de capteurs, généralement des accéléromètres, placés sur les paliers dans les directions verticales, axiales et radiales [16].

Cependant, ces analyses vibratoires comportent certains inconvénients :

-Problème d'accessibilité.

-Difficultés rencontrées dans les connexions mécaniques des accéléromètres pour effectuer les mesures nécessaires au voisinage direct du défaut.

-De plus, le coût de ces capteurs reste relativement élevé par rapport aux autres capteurs. Ceci laisse cette technique employée uniquement pour les grandes machines.

-Pour s'affranchir de ces problèmes, les recherches focalisent leurs efforts pour détecter et localiser les défauts par l'analyse d'autres signaux.

I.8.1.2 Méthode d'analyse des flux

Un déséquilibre magnétique, mécanique, électrique ou bien encore électromagnétique, situé au rotor ou au stator, peut affecter la conversion électromécanique et la répartition de champ dans et en hors de la machine. Des études ont donc été menées pour extraire de la mesure des flux d'entrefer, axial ou de fuite des signatures caractéristiques de certains défauts [17]. Pour cela, des bobines exploratrices sont placées à l'intérieur de la machine sur les dents statoriques, à l'extérieur de la machine, parallèlement et perpendiculairement à l'axe du rotor. Dans l'auteur met en évidence les composantes fréquentielles du flux d'entrefer et le flux de fuite dans l'axe du rotor, respectivement, qui permettent de détecter et d'identifier des ruptures de barres rotorique et des courts-circuits dans les enroulements statoriques. Il en déduit les fréquences caractéristiques.[18],

Ces composantes, présentes dans le spectre du flux pour une machine saine, vont augmenter avec l'apparition d'un défaut. Certaines composantes du flux axial permettent de détecter d'éventuels défauts liés aux barres rotorique et aux paliers [18].

I.8.1.3 Méthode d'analyse du couple électromagnétique

Certains défauts mécaniques peuvent être détectés par la recherche d'harmoniques dans le spectre du couple électromagnétique mesuré, résultant d'une interaction entre le flux et le courant. Ce couple peut être reconstruit, soit à partir de deux des trois courants statoriques, soit en utilisant un modèle physique de la machine [15] [16].

L'utilisation de ce signal peut s'avérer un bon choix pour la détection des défauts de charge. En effet, les variations du couple de charge vont induire des variations du flux et du courant dans la machine. De même, la torsion de l'arbre entraîne l'apparition d'harmoniques dans le spectre du couple.

Les oscillations du couple, provoquées par certains défauts rotorique, peuvent servir à détecter ces derniers [16].

A partir d'un modèle de la machine, l'estimation des composantes du flux rotorique dans un repère d-q lié au stator peut se faire dans le but d'observer le couple électromagnétique. Il a été

constaté qu'une dissymétrie électrique du rotor fait apparaître des harmoniques de dentures rotorique, ce qui modifie le champ d'entrefer [17].

Le problème peut alors être détecté en analysant les fréquences d'encoches présentes dans le spectre du couple estimé.

Comme nous venons de le voir, les signaux évoqués précédemment permettent de détecter un grand nombre de défauts sur la machine. Cependant, ces signaux nécessitent la mise en place d'un grand nombre de capteurs (bobines exploratrices pour le flux, couple mètre, accéléromètres, transducteurs,...) souvent coûteux ou onéreux, sensibles et délicats à placer dans des environnements contraignants. Ceci limite l'application de ces techniques qui sont basées sur l'analyse de ces signaux malgré leurs avantages. D'autres techniques qui ne sont pas décrites si, sont bien utilisées pour des applications bien particulières telles que les techniques de mesure des décharges électriques, les techniques qui utilisent les signaux infrarouges, de radiofréquence (RF) ou les techniques chimiques et d'autres, qui trouvent dans certains cas leur emploi dans les grosses machines spécifiques à un certain type de défauts.

I.8.1.4 Analyse du vecteur de Park

Une représentation en deux dimensions peut être utilisée pour décrire le phénomène des moteurs synchrones triphasés. Une des plus connues et des plus appropriées repose sur le calcul des courants dits de Park. En fonction des courants de phases $i_{sa}(t)$, $i_{sb}(t)$, $i_{sc}(t)$ relation les courants de Park $i_d(t)$, $i_q(t)$ peuvent être calculés grâce aux relations suivantes [19] :

$$i_d(t) = \sqrt{\frac{2}{3}} i_{sa}(t) - \frac{1}{\sqrt{6}} i_{sb}(t) - \frac{1}{\sqrt{6}} i_{sc}(t) \quad (I.1)$$

$$i_q(t) = \frac{1}{\sqrt{2}} i_{sb}(t) - \frac{1}{\sqrt{2}} i_{sc}(t) \quad (I.2)$$

I.8.1.5 Analyse des courants statoriques

Les procédures de surveillance de fonctionnement sont généralement orientées vers des défaillances spécifiques intervenant sur l'une des trois parties de la machine : le stator, le rotor ou les paliers. Ces derniers supportent l'arbre moteur. Pour extraire de manière précise les informations relatives aux défauts les recherches ont été particulièrement dirigées vers le

spectre des courants statoriques pour deux raisons. Les courants sont faciles à mesurer, ils fournissent des informations sur de nombreux défauts. Mais la mesure des signaux puis leurs traitements dans le domaine spectral ne peuvent servir, en terme d'identification, que si les composantes fréquentielles définies pour chaque défaut sont connues. Cette méthode ne s'applique actuellement qu'en régime permanent [2].

- Excentricité

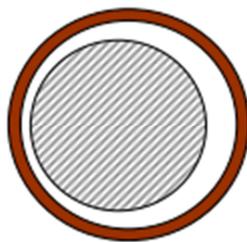
La variation de la longueur de l'entrefer entraîne des variations dans la densité du flux d'entrefer. Les enroulements statoriques sont électriquement affectés. On retrouve alors ces effets dans le spectre des courants :

$$f_{\text{exc}} = f_s \cdot \left[1 \pm n \frac{1-g}{p} \right] \quad (I.3)$$

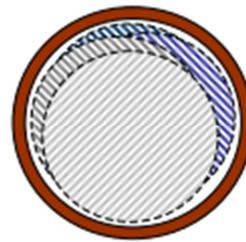
On distingue généralement trois cas d'excentricité :

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

On peut représenter l'excentricité statique et dynamique de la manière suivant :



Excentricité statique



Excentricité dynamique

(Plusieurs positions du rotor au cours de la rotation)

Figure 1.13. Modélisation schématique de l'excentricité statique et dynamique [22]

Les causes peuvent être le positionnement incorrect des paliers lors de l'assemblage, l'usure des paliers ou la torsion de l'arbre. Dans la référence les auteurs utilisent des méthodes d'intelligence artificielle pour le diagnostic du défaut. Mais le plus important est l'identification du type d'excentricité qui est possible par la visualisation, dans le spectre des courants de phase, des composantes fréquentielles suivantes :

Pour l'excentricité statique :

$$f_{exc} = f_s \cdot \left[1 \pm \frac{n \cdot N_r (1-g)}{p} \right] \quad (I.4)$$

Pour l'excentricité dynamique :

$$f_{exc} = f_s \cdot [1 \pm 2 \cdot n (1-g)] \quad (I.5)$$

Pour le désalignement :

$$f_{exc} = f_s \cdot \left[1 \pm \frac{n(1-g)}{p} \right] \quad (I.6)$$

L'origine du désalignement est introduite dans le paragraphe suivant.

-Défaillance des paliers

Lors de son installation, le palier est souvent appuyé sur l'arbre ou dans le carter. Il s'ensuit alors un possible désalignement qui peut apparaître de quatre manières différentes :

- le désalignement proprement dit où les deux paliers (supportant le même arbre) ne sont pas dans le même axe.
- la flexion de l'arbre
- l'inclinaison d'une bague extérieure de roulement
- l'inclinaison d'une bague intérieure de roulement

On peut retrouver les phénomènes vibratoires des paliers sur le spectre des courants statoriques en considérant que l'excentricité ou le désalignement du rotor conduit nécessairement à une variation de la densité de flux d'entrefer.

Etant donné que les paliers supportent le rotor, grâce aux roulements, un défaut de ceux-ci produira un mouvement radial entre le rotor et le stator. Les fréquences caractéristiques du défaut sont déduites des dimensions des paliers (DB et DP) et des roulements à billes, comme le montre la figure 1.14.

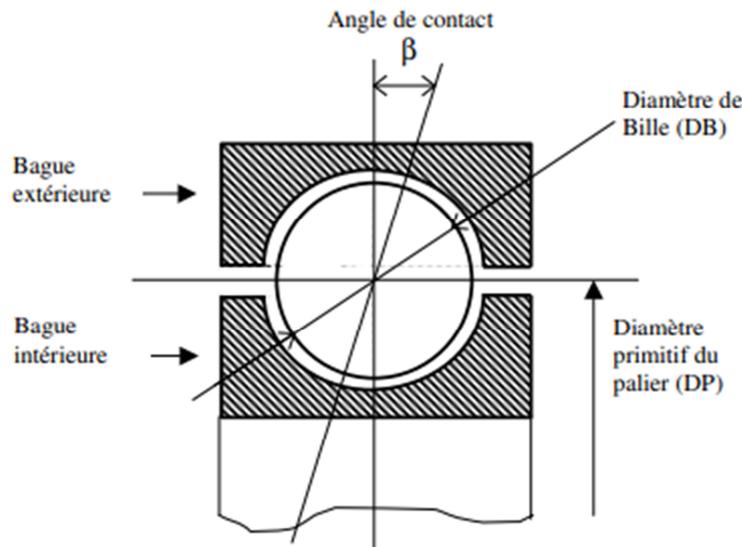


Figure 1.14. Vue en coupe de la partie supérieure d'un roulement à bille

En fonction du nombre de billes noté n_b , on définit les composantes fréquentielles spécifiques aux vibrations des paliers notées f_{pal} .

Ces composantes sont définies par la relation (I. 7)

$$f_{pal} = f_s \pm n \cdot f_{i,e} \quad (I.7)$$

$n = 1, 2, 3, \dots$ "i e" : interne, externe (bagues)

$$\text{Avec } f_{i,e} = \frac{n_b}{2} \cdot f_r \cdot \left[1 \pm \frac{DB}{DP} \cdot \cos \beta \right] \quad (I.8)$$

Où f_r est la fréquence de rotation du rotor.

De manière plus précise, on définit les fréquences des bagues internes et externes de roulement respectivement par les expressions (I. 9) et (I.10)

$$f_e = \frac{n_b}{2} \cdot f_r \cdot \left[1 - \frac{DB}{DP} \cdot \cos \beta \right] \quad (I.9)$$

$$f_i = \frac{n_b}{2} \cdot f_r \cdot \left[1 + \frac{DB}{DP} \cdot \cos \beta \right] \quad (I.10)$$

Comme nous l'avons précisé, ces informations sont fonction des données du constructeur. On peut toutefois approcher les expressions de f_e et f_i pour un nombre faible de billes dans les roulements par :

$$f_e = 0.4 \cdot n_b \cdot f_r \quad (I.11)$$

$$f_i = 0.6 \cdot n_b \cdot f_r \quad (I.12)$$

I.9 Conclusion

Ce chapitre a débuté par un rappel de la classification des machines électriques, suivi d'une liste non exhaustive des causes pouvant engendrer des défaillances mécaniques et électriques de ces machines. Puis, une classification des défaillances susceptibles d'affecter les différentes parties des machines asynchrones a été présentée.

Chapitre II

Modélisation et simulation de la MAS à rotor bobiné en régime sain

II.1 Introduction

La modélisation de la machine asynchrone peut être effectuée selon différentes méthodes en fonction des objectifs recherchés. Pour cela, citant trois modèles :

- les modèles en grandeurs de phases, découlant des équations différentielles à coefficients périodiques régissant le fonctionnement de la machine, ils sont utilisés essentiellement pour l'étude des régimes permanents.
- les modèles issus de la transformation de Park, utilisés couramment pour l'étude des régimes transitoires et pour la commande vectorielle des machines.
- Les modèles triphasés-triphasés.

Dans ce chapitre, nous présenterons la modélisation de la machine asynchrone à rotor bobiné, dont on a utilisé la méthode des circuits électrique magnétiquement couplés (CEMC),

II.2 Méthodes de modélisation des machines asynchrones

Nous exposons les principales méthodes de modélisation fine de la machine asynchrone à rotor bobiné défectueuse comme la méthode circuits internes équivalents, la méthode des circuits électriques magnétiquement couples, la méthode des réseaux de perméances ainsi que la méthode des éléments finis.

Nous allons, dans ce qui suit, commencer par décrire chacune des méthodes de modélisation fine de la machine asynchrone défectueuse.

II.2.1 Modélisation par les équations magnétiquement couples (CEMC)

Dans la modélisation par les équations des circuits électriques magnétiquement couplés (CEMC), les enroulements constituant le stator et rotor sont représentés par un circuit électrique équivalent, forme par une inductance en série avec une résistance. Par ailleurs, même si la méthode des CEMC ne permet pas la prise en compte de certains phénomènes complexes (saturation, effet de peau, etc.), il est possible de corriger le modèle par le biais de coefficients globaux pouvant renseigner sur leur influence sur les grandeurs globales.

Ainsi, malgré ses faiblesses, l'approche de modélisation par CEMC offre un bon compromis en termes de précision, de temps de calcul et d'adaptation à la modélisation de la plupart des défauts d'origine électromagnétique de la machine asynchrone.

Le rotor est représenté par un circuit électrique comportant des mailles magnétiquement couplées comme le montre la figure (II.1) [20].

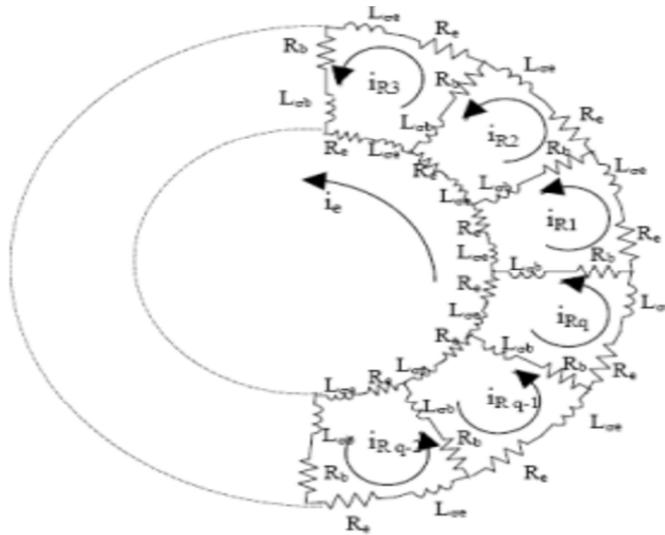


Figure II.1 Schéma électrique équivalent à la cage rotorique [20].

L'écriture du modèle triphasé de la machine asynchrone par l'approche des CEMC est basée sur un certain nombre d'hypothèses dont les principales sont les suivantes:

- le fer (les tôles) est de perméabilité infinie.
- les pertes par courants de Foucault sont négligeables.
- les courants inter-bars sont négligeables (tôles magnétiques rotoriques isolées des barres et des anneaux de la cage).

La première hypothèse peut cependant être partiellement contournée par l'introduction de l'onde fondamentale de sa turation dans l'expression de la perméances de l'entrefer permettant ainsi la prise en compte de la chute de tension magnétique (f.m.m.) dans le fer [2]. Quant à la troisième hypothèse, il faut dire qu'elle est partagée par toutes les méthodes de modélisation tant les courants inter-bars sont difficiles à prendre en compte de façon locale.

II.2.2 Méthode des réseaux de perméances (RNM)

La méthode des réseaux de perméances [14] est basée sur la décomposition du circuit magnétique étudié en tubes de flux, chaque tube étant caractérisé par sa perméance.

A partir de cette décomposition, on construit un réseau de perméances, similaire à un circuit électrique, où les grandeurs mises en jeu sont le flux et les différences de potentiels magnétiques. Les sources de forces magnétomotrices (f.m.m) sont obtenues par la modélisation des couplages avec les circuits électriques externes. Dans le cas particulier de la machine

asynchrone, les sources de f.m.m sont placées dans les dents statoriques et rotoriques et leurs valeurs dépendent directement du courant dans les bobinages concernés.

Ainsi, la machine asynchrone peut être décomposée en une association de circuits élémentaires, composés d'une dent, d'une encoche et de la portion de culasse concernée. Un circuit élémentaire est modélisé par trois perméances (perméance de dent, perméance de culasse et perméance de fuite de pied d'encoche) et une source de (f.m.m) (Fig. I.12).

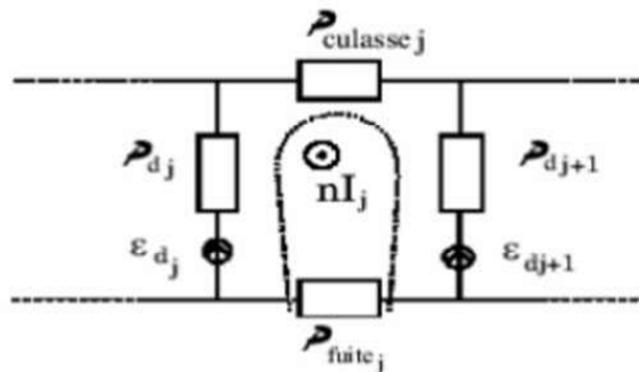


Figure II.2 Réseau de perméances élémentaire autour d'encoche statorique [14].

Toutes les valeurs de perméances sont calculées par le biais d'une simulation avec la méthode des éléments finis en magnétostatique et il est possible de prendre en compte la saturation magnétique. La mise en équations, l'obtention et la résolution du système d'équations différentielles non linéaires qui décrit le comportement électromagnétique et dynamique du système, ont déjà été présentées dans [15] ainsi que le logiciel de simulation par réseaux de perméances couplés électriquement (SiRe PCE) qui a été développé dans l'environnement MATLAB.

II.2.3 Méthode des éléments finis (MEF)

Si la méthode des réseaux de perméances permet d'introduire la saturation des matériaux magnétiques dans la modélisation de la machine asynchrone en présence de défauts augmentant du coup la précision du modèle par rapport à la méthode CEMC, la méthode des éléments finis, quant à elle, nous affranchit de la plupart des hypothèses simplificatrices habituelles lors de la modélisation des machines électriques tournantes.

Cependant, compte tenu de sa grande consommation en temps de calcul, la MEF, dans le domaine du diagnostic de la machine asynchrone, est souvent utilisée dans le but de comprendre

et de quantifier les conséquences locales d'un défaut sur les différents constituants de la machine [2], [16].

Ainsi et à titre d'exemple, la MEF est une méthode très bien adaptée à l'étude des effets locaux du défaut de rupture de barres de la cage rotorique. De même, la MEF sert à mieux appréhender les impacts magnétiques et thermique locaux du défaut de court-circuit inter-spires dans les phases statoriques.

II.3 présentation de modèle

La figure (II.3) montre la représentation spatiale d'une machine asynchrone comprenant un enroulement triphasé au stator (a_s, b_s, c_s) comme au rotor (a_r, b_r, c_r). Le système d'alimentation en tension est sinusoïdal.

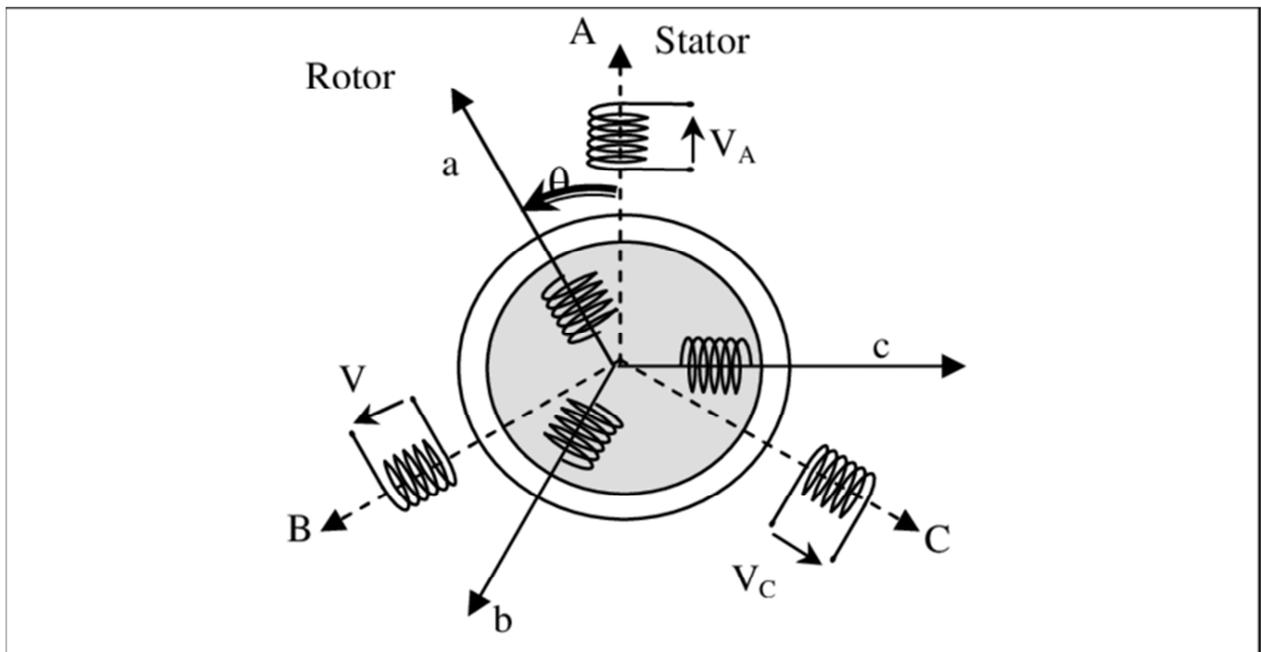


Figure II.3. Présentation schématique de la MAS en régime sain

II.3.1 Equation électrique de la machine

D'après la loi de Faraday on a :

$$V = RI + \frac{d\phi}{dt} \quad (\text{II.1})$$

Les phases statorique

$$V_{sa} = R_{sa} + \frac{d\varphi_{sa}}{dt} \quad (\text{II.2})$$

$$V_{sb} = R_{sb} + \frac{d\varphi_{sb}}{dt} \quad (\text{II.3})$$

$$V_{sc} = R_{sc} + \frac{d\varphi_{sc}}{dt} \quad (\text{II.4})$$

Donc les équations au stator sont données sous formes matricielles condensées suivantes :

$$[V_s] = [R_s][I_s] + \frac{d[\varphi_s]}{dt} \quad (\text{II.5})$$

Les phases rotoriques

$$V_{ra} = 0 = R_{ra}I_{ra} + \frac{d\varphi_{ra}}{dt} \quad (\text{II.6})$$

$$V_{rb} = 0 = R_{rb}I_{rb} + \frac{d\varphi_{rb}}{dt} \quad (\text{II.7})$$

$$V_{rc} = 0 = R_{rc}I_{rc} + \frac{d\varphi_{rc}}{dt} \quad (\text{II.8})$$

Donc les équations au rotor sont données sous formes matricielles condensées suivantes :

$$[V_r] = [0] = [R_r][I_r] + \frac{d[\varphi_r]}{dt} \quad (\text{II.9})$$

Avec :

$$\begin{aligned} [V_s] &= [V_{sa} \quad V_{sb} \quad V_{sc}]^T \\ [I_s] &= [I_{sa} \quad I_{sb} \quad I_{sc}]^T \\ [\varphi_s] &= [\varphi_{sa} \quad \varphi_{sb} \quad \varphi_{sc}]^T \end{aligned} \quad (\text{II.10})$$

$$\begin{aligned} [V_r] &= [V_{ra} \quad V_{rb} \quad V_{rc}]^T \\ [I_r] &= [I_{ra} \quad I_{rb} \quad I_{rc}]^T \\ [\varphi_r] &= [\varphi_{ra} \quad \varphi_{rb} \quad \varphi_{rc}]^T \end{aligned} \quad (\text{II.11})$$

$$[R_s] = \begin{bmatrix} R_{sa} & 0 & 0 \\ 0 & R_{sb} & 0 \\ 0 & 0 & R_{sc} \end{bmatrix} [R_r] = \begin{bmatrix} R_{ra} & 0 & 0 \\ 0 & R_{rb} & 0 \\ 0 & 0 & R_{rc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.12})$$

$[V_s]$ $[V_r]$ Des Vecteurs des tensions statatoriques et rotorique.

$[I_s]$ $[I_r]$ Des Vecteurs des courants statatoriques et rotorique.

$[\phi_s]$, $[\phi_r]$ Des Vecteurs des flux statatoriques et rotorique.

$[R_s]$, $[R_r]$ Les Matrices des résistances statatoriques et rotorique.

II.3.2 Expression du flux

On applique la loi de flux :

$$\varphi_k = L_k I_k + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^n M_{kj} I_j \quad (\text{II.13})$$

Les phases Statoriques

$$\begin{bmatrix} \varphi_{sa} \\ \varphi_{sb} \\ \varphi_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{sa} & M_{sab} & M_{sac} \\ M_{sab} & L_{sb} & M_{scb} \\ M_{sca} & M_{scb} & L_{sc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} M_{sara} & M_{sarb} & M_{sarc} \\ M_{sbra} & M_{sbrb} & M_{sbrc} \\ M_{scra} & M_{scrb} & M_{scrc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ra} \\ I_{rb} \\ I_{rc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.14})$$

Les flux s'expriment en fonction des courants de la manière suivante

$$[\varphi_s] = [L_{ss}] [I_s] + [M_{sr}] [I_r] \quad (\text{II.15})$$

Les phases rotoriques

$$\begin{bmatrix} \varphi_{ra} \\ \varphi_{rb} \\ \varphi_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{ra} & M_{rab} & M_{rac} \\ M_{rab} & L_{rb} & M_{rcb} \\ M_{rca} & M_{rcb} & L_{rc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ra} \\ I_{rb} \\ I_{rc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} M_{rasa} & M_{rasb} & M_{rasc} \\ M_{rbsa} & M_{rbsb} & M_{rbsc} \\ M_{rcsa} & M_{rcsb} & M_{rcsc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.16})$$

Les flux s'expriment en fonction des courants de la manière suivante

$$[\varphi_r] = [L_{rr}] [I_r] + [M_{rs}] [I_s] \quad (\text{II.17})$$

L'isotropie et la symétrie de la machine font que les inductances propres des phases statatoriques sont égales et de même pour celles du rotor

$$[L_{ss}] = \begin{bmatrix} L_s & M_s & M_s \\ M_s & L_s & M_s \\ M_s & M_s & L_s \end{bmatrix}, [L_{rr}] = \begin{bmatrix} L_r & M_r & M_r \\ M_r & L_r & M_r \\ M_r & M_r & L_r \end{bmatrix} \quad (\text{II.18})$$

La matrice des inductances mutuelles entre les phases du stator et du rotor dépend de la position angulaire θ entre l'axe du stator et celui du rotor est défini

$$[M_{sr}] = [M_{rs}]^T = M_{sr} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(\theta) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (\text{II.19})$$

II.3.3 Expression du couple électromagnétique

Le calcul de couple électromagnétique est déterminé par l'équation :

$$C_{em} = \frac{dW}{dt} \quad (\text{II.20})$$

Avec l'équation d'énergie :

$$W = \frac{P}{2} [I]^T [L] [I] \quad (\text{II.21})$$

En dérivant cette dernière par rapport à la position θ qui prend le rotor par rapport au stator.

L'expression du couple électromagnétique C_{em} peut être déterminée par la relation

$$C_{em} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} [I_s] \\ [I_r] \end{bmatrix}^T \frac{d}{d\theta} \begin{bmatrix} [L_s] & [M_{sr}] \\ [M_{rs}] & [L_r] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [I_s] \\ [I_r] \end{bmatrix} \quad (\text{II.22})$$

$$C_{em} = \frac{P}{2} [I]^T \frac{d[L]}{d\theta} [I] \quad (\text{II.23})$$

$[I] = [I_{sa} I_{sb} I_{sc} I_{ra} I_{rb} I_{rc}]$ Vecteur de courant

II.3.4 Equation mécanique

L'équation mécanique qui régit le fonctionnement de la machine peut se mettre sous la forme suivante

$$J \frac{d\omega_r}{dt} + f_r \omega_r = C_{em} - C_r \quad (\text{II.24})$$

$$\omega_r = \frac{d\theta}{dt} \quad (\text{II.25})$$

Avec

J : moment d'inertie

F : coefficient de frottement visqueux

C_r : couple résistant

II.3.5 Etablissement du modèle d'état

En remplaçant les équations II.15 et II.17 dans les équations électriques de la machine (II.5) et (II.9), nous obtenons

$$[V_s] = [R_s][I_s] + \frac{d}{dt} \{ [L_s][I_s] + [M_{sr}][I_r] \} \quad (\text{II.26})$$

$$[V_r] = [R_r][I_r] + \frac{d}{dt} \{ [L_r][I_r] + [M_{rs}][I_s] \} \quad (\text{II.27})$$

$$\text{Car : } \varphi = [L] \cdot [I]$$

En posant $[V] = [[V_s][V_r]]^T$ et en sachant que le vecteur $[V_r]$ est nul, nous obtenons

$$[V] = [R] \cdot [I] + \frac{d([L] \cdot [I])}{dt} \quad (\text{II.28})$$

$$[V] = [R] \cdot [I] + [I] \frac{d([L])}{dt} + [L] \cdot \frac{d[I]}{dt} \quad (\text{II.29})$$

$$[V] = [R] \cdot [I] + [I] \frac{d\theta}{dt} \cdot \frac{d([L])}{d\theta} + [L] \cdot \frac{d[I]}{dt} \quad (\text{II.30})$$

$$[V] = [R] \cdot [I] + [I] \omega_r \cdot \frac{d([L])}{d\theta} + [L] \cdot \frac{d[I]}{dt} \quad (\text{II.31})$$

En associant l'équation mécanique II.24, et celle du couple II .23 nous obtenons le modèle d'état suivant

$$\begin{bmatrix} [V] \\ -Cr \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left([R] + \Omega_r \frac{d[L]}{d\theta} \right) & 0 & 0 \\ -\frac{1}{2} \cdot [I]^T & f_v & 0 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [I] \\ \omega \\ \theta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} [L] & 0 & 0 \\ 0 & J_t & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I} \\ \dot{\omega} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} \quad (\text{II.32})$$

Une forme condensée est obtenue sous l'écriture suivante :

$$[U] = [B][X] + [A] \begin{bmatrix} \dot{X} \end{bmatrix} \quad (\text{II.33})$$

Le vecteur $\begin{bmatrix} \dot{X} \end{bmatrix}$ peut s'écrire

$$\begin{bmatrix} \dot{X} \end{bmatrix} = [A]^{-1} \cdot ([U] - [B] \cdot [X]) \quad (\text{II.34})$$

Où $[U]$ le vecteur de commande a pour expression :

$$[U] = ([V] \quad [C_r] \quad [0])^T \quad (\text{II.35})$$

Et le vecteur d'état $[X]$ est donné par

$$[U] = ([I] \quad [\omega] \quad [\theta])^T \quad (\text{II.36})$$

La matrice $[A]$ obtenue s'écrit sous la forme :

$$[A] = \begin{bmatrix} [L_{ss}] & [M_{sr}] & 0 & 0 \\ [M_{rs}] & [L_{rr}] & 0 & 0 \\ 0 & 0 & J_t & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{II.37})$$

La matrice $[A]$ est dépendante de l'angle rotorique et il nous faudra l'actualiser pour ensuite l'inverser à chaque pas de calcul lors de la simulation.

Les diverses matrices constituant la matrice $[A]$ sont définis précédemment

La matrice $[B]$ est donnée sous la forme :

$$[B] = \begin{bmatrix} [R_s] & \left[\omega \frac{dM_{sr}}{d\theta} \right] & 0 & 0 \\ \left[\omega \frac{dM_{rs}}{d\theta} \right] & [R_r] & 0 & 0 \\ C_{1\dots} & \dots C_6 & f_v & 0 \\ [0] & [0] & -1 & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{II.38})$$

Les éléments $C_{1\dots6}$ contenus dans la matrice B sont obtenus à partir de l'équation du couple et de l'équation mécanique

$$C_1 = 0.5 \cdot M_{sr} \cdot p \cdot (I_{as} h_1 + I_{bs} h_2 + I_{cs} h_3) \quad (\text{II.39})$$

$$C_2 = 0.5 \cdot M_{sr} \cdot p \cdot (I_{as} h_3 + I_{bs} h_1 + I_{cs} h_2) \quad (\text{II.40})$$

$$C_3 = 0.5 \cdot M_{sr} \cdot p \cdot (I_{as} h_2 + I_{bs} h_3 + I_{cs} h_1) \quad (\text{II.41})$$

$$C_4 = 0.5 \cdot M_{sr} \cdot p \cdot (I_{ar} h_1 + I_{br} h_3 + I_{cr} h_2) \quad (\text{II.42})$$

$$C_5 = 0.5 \cdot M_{sr} \cdot p \cdot (I_{ar} h_2 + I_{br} h_1 + I_{cr} h_3) \quad (\text{II.43})$$

$$C_6 = 0.5 \cdot M_{sr} \cdot p \cdot (I_{ar} h_3 + I_{br} h_2 + I_{cr} h_1) \quad (\text{II.44})$$

$$h_1 = \sin(p \cdot \theta) \quad (\text{II.45})$$

$$h_2 = \sin\left(p \cdot \theta + \frac{2\pi}{3}\right) \quad (\text{II.46})$$

$$h_3 = \sin\left(p \cdot \theta + \frac{4\pi}{3}\right) \quad (\text{II.47})$$

II.4 Résultats de simulation de la machine asynchrone en régime sain

II.4.1 A vide

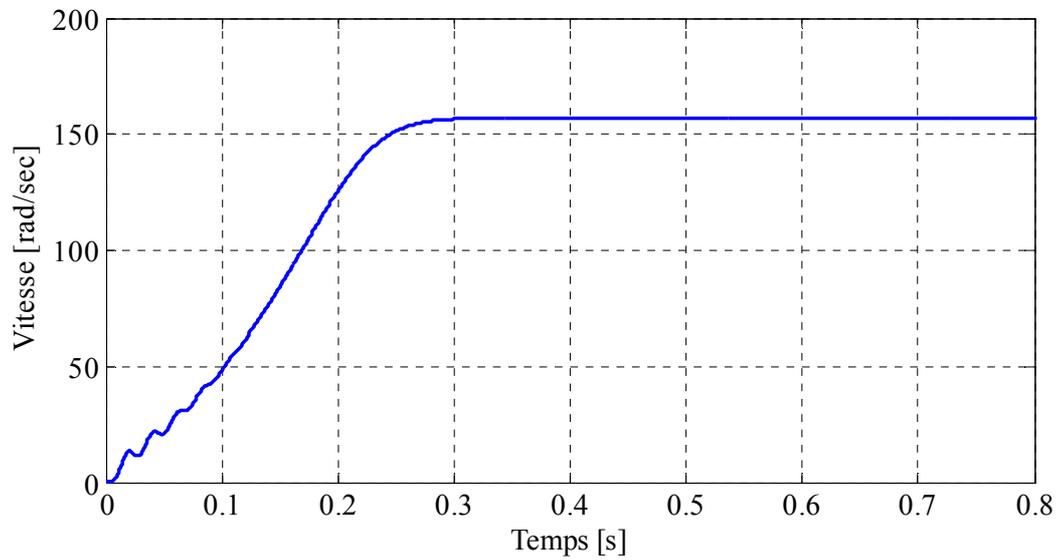


Figure II.4. Evolution de la vitesse de rotation

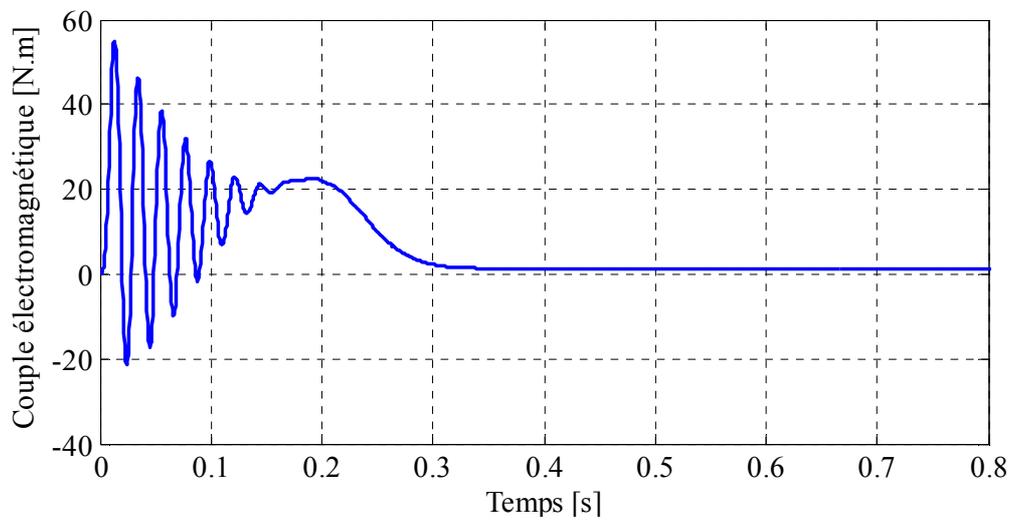


Figure II.5. Evolution de couple électromagnétique

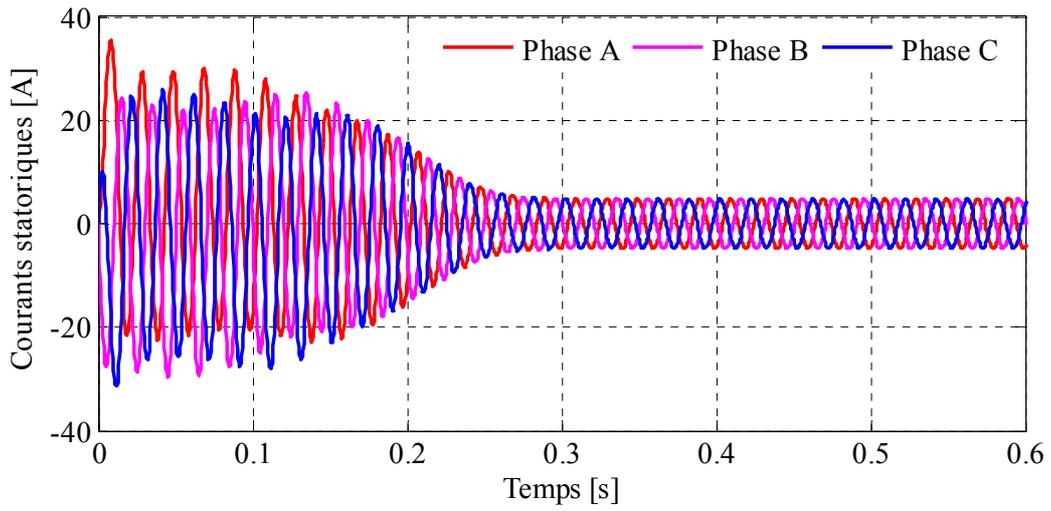


Figure II.6. Courant dans les trois phases du stator

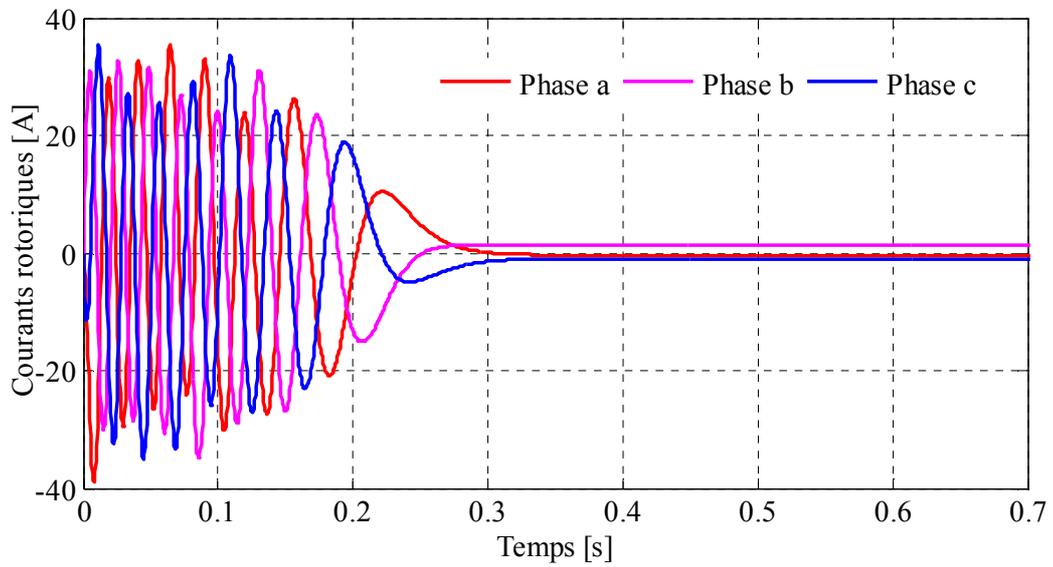


Figure II.7. Courant dans les trois phases du rotor

II.4.2 En charge

On applique un couple résistant $C_r=10\text{N.m}$ à $t=0.5\text{ s}$

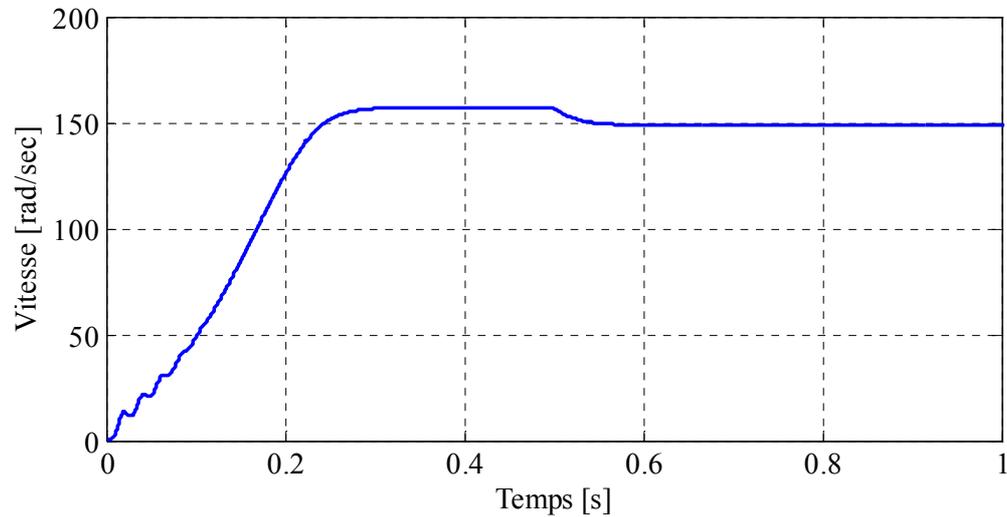


Figure II.8. Evolution de la vitesse de rotation

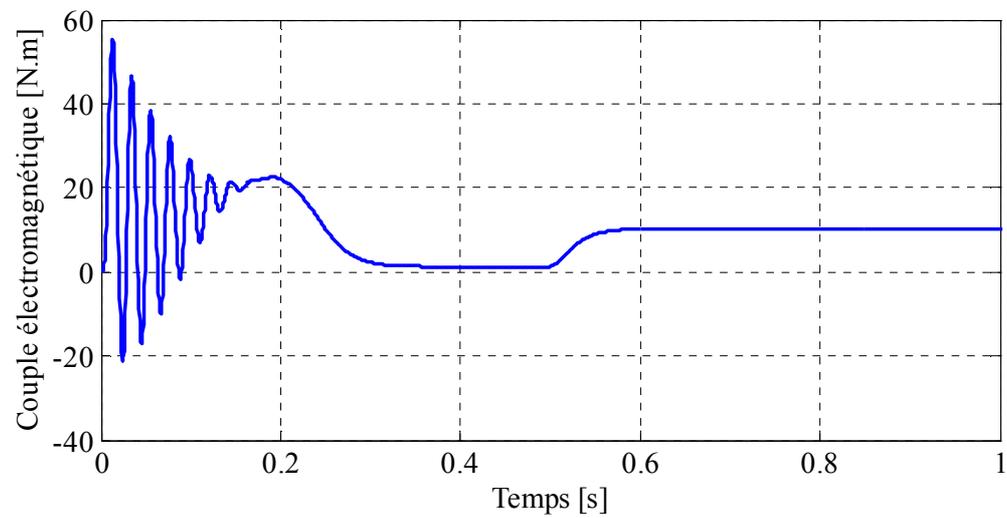


Figure II.9. Evolution de couple électromagnétique

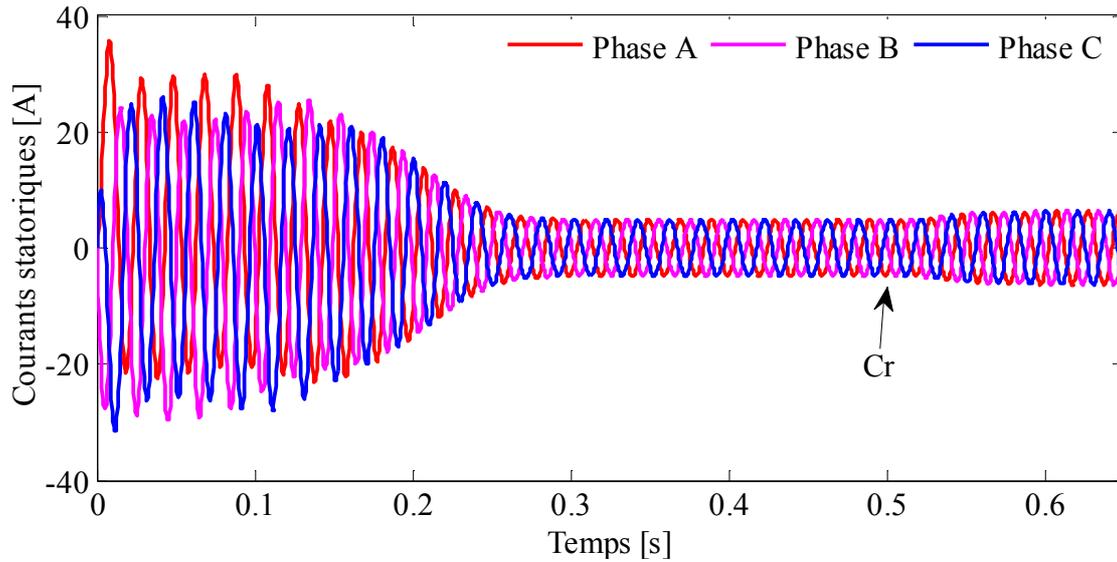


Figure II.10. Courant dans les trois phases du stator

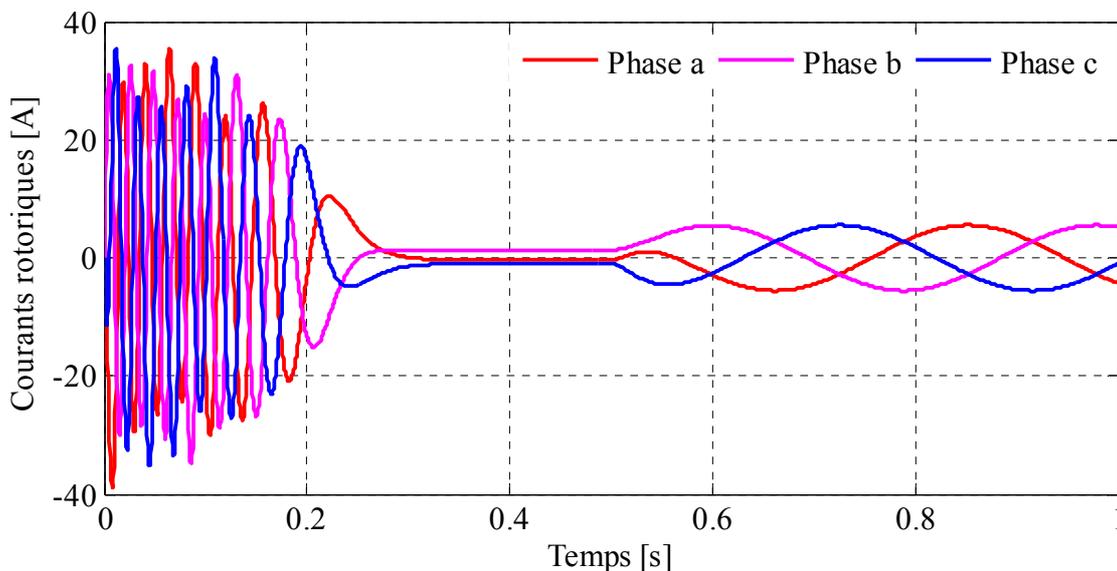


Figure II.11. Courant dans les trois phases du rotor

II.5 Interprétation des résultats de simulation

La simulation de la résultat précidoont permet de voire le comportement de la machine asynchrone à rotor bobinépar l'observation de l'évolution de courant, de vitesse et de couple electromagnetique.

Les figures (II.4.II.8) représente l'évolution de la vitesse de rotation de la machine. Nous remarquons que la montée en vitesse est linéaire au début du démarrage, qui, en régime permanent, se stabilise à 157 rad/sec, puisque la machine possède une paire de pôles.

Après l'application du couple résistant $C_r=10$ [N.m] à l'instant $t=0.5$ seconde, la vitesse décroît puisqu'elle est inversement proportionnelle à la charge, puis elle se stabilise à une certaine valeur inférieure à la vitesse de synchronisme (148 rad/sec).

Le couple électromagnétique est représenté par la figure.II.5. Au démarrage, le couple est fortement pulsatoire, il atteint une valeur maximale de 55 N.m, ceci explique le bruit engendré par la partie mécanique. Après disparition du régime transitoire, le couple tend vers une valeur de 1.29 N.m, cette valeur représente le couple de frottement. Dans la figure II.9, on a appliqué un couple résistive de 10N.m à l'instant $t=0.5s$, la machine développe un couple électromagnétique qui augmente brusquement pour atteindre la valeur de couple résistive.

La figure II.7 représente l'évolution des courants rotoriques. Nous remarquons qu'au démarrage, les courants oscillent autour d'une valeur de 30A, ce qui illustre le régime transitoire. En régime permanent, les courants chutent vers une valeur presque nulle, cela est dû au fait que la vitesse du rotor s'approche de celle du champ tournant statorique (vitesse de synchronisme). Dans la figure II.11, lors de l'application du couple résistant, des ondulations sont apparues et oscillent autour d'une valeur efficace de 5.54A.

L'évolution des courants statoriques absorbés par les trois phases du stator est illustré dans la figure II.6, en régime transitoire, les courants oscillent autour de l'axe zéro avec une amplitude de 29 A, puis ils se stabilisent à une valeur efficace de 4.5A en régime permanent. Dans la figure II.10, après l'application du couple résistant à l'instant $t=0.5s$, les courants augmentent pour atteindre une valeur maximale de 6.3A et cela est dû au fait que la machine fait appel à un surplus de courant pour faire face à ce couple résistant.

II.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté un modèle externe de simulation de la machine asynchrone à rotor bobiné en régime sain, dit modèle triphasé-triphasé. Ce modèle consiste à modéliser les trois phases statoriques ce qui permet de différencier le comportement de chaque phase. Les enroulements rotoriques sont représentés par trois phases également. Cette modélisation consiste à la résolution numérique du système d'équation différentielle, en utilisant la méthode Rung –Kutta d'ordre quatre. Un programme écrit sous logiciel Matlab nous a permis d'analyser le comportement de la machine en régime sain. La particularité de ce modèle réside dans l'utilisation des paramètres réels de la machine sans passer par la transformation de Park ce qui permet de discriminer un comportement défectueux d'un comportement dû à un fonctionnement normal de la machine. Les résultats de simulation

obtenus traduisent bien le comportement connu du fonctionnement de la machine. La modélisation de la machine en présence de défaut de court-circuit inter-spires fera l'objet du chapitre suivant.

Chapitre III

Modélisation et simulation de la MAS à rotor bobiné en régime défectueux

III.1 Introduction

La modélisation et la simulation des machines électriques constituent une étape primordiale en matière de diagnostic. Elle permet l'observation et l'analyse des différentes évolutions de ses grandeurs électromécaniques d'une part et d'autre part pour compréhension du fonctionnement défectueux et la vérification des algorithmes de détection des défauts.

Un modèle basé sur les équations électriques et mécaniques des circuits est en générale suffisant pour faire la synthèse du diagnostic.

L'objectif de ce chapitre est la présentation d'un modèle de simulation de la machine asynchrone à rotor bobiné en présence de défaut de court-circuit entre-spires, et l'étude de l'influence de ce défaut sur les grandeurs temporelles de la machine. Ce modèle est exprimé dans le repère triphasé a, b, c paramétré par les composants,

III.2 Modèle de la machine asynchrone à rotor bobiné avec défaut de court-circuit

Le stator et le rotor sont toujours constitués de trois phases identiques parcourues par des courants triphasés.

Pour prendre en compte l'existence de spires en court-circuit au stator de la machine asynchrone, on introduit une bobine supplémentaire dite de court-circuit dont le nombre de spires N_{cc} est égale au nombre de spires en défaut dans la machine. Ainsi, en présence d'un déséquilibre statorique, la machine comporte, en plus des bobinages triphasés statoriques d'axes a_s, b_s, c_s et rotorique d'axes a_r, b_r, c_r , un bobinage court-circuité b_{cc} parcouru par un courant de court-circuit à l'origine du champ stationnaire h_{cc} par rapport au stator, créé en situation de défaut. (FIG.III.1) [21].

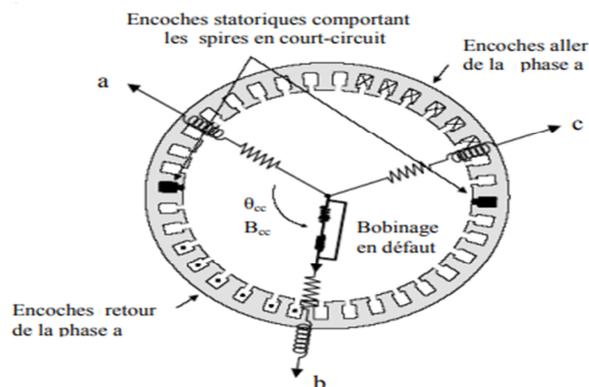


Figure III.1. Court-circuit de la phase b du stator

On constate que le défaut fait apparaître dans la machine un nouveau bobinage B_{cc} . Afin de définir ce défaut, il est nécessaire d'introduire deux paramètres :

- L'angle électrique, noté θ_{cc} , repérant le bobinage en court-circuit par rapport à l'axe de référence de la phase A_s . Ce paramètre permet la localisation du bobinage en défaut et ne peut prendre que les trois valeurs

$$\theta_{cc} = \begin{cases} 0 & \text{phase..a} \\ \frac{2\pi}{3} & \text{phase..b} \\ -\frac{2\pi}{3} & \text{phase..c} \end{cases} \quad (\text{III.1})$$

- Le rapport de court-circuit noté η_{cc} égal au rapport du nombre de spires en court-circuit sur le nombre total de spires dans une phase statorique sans défaut.

$$\eta_{cc} = \frac{\eta_c}{\eta} \quad (\text{III.2})$$

III.3 Modélisation dans le repère triphasé

Les équations de tension et de flux de la machine asynchrone en défaut de court-circuit s'écrivent alors

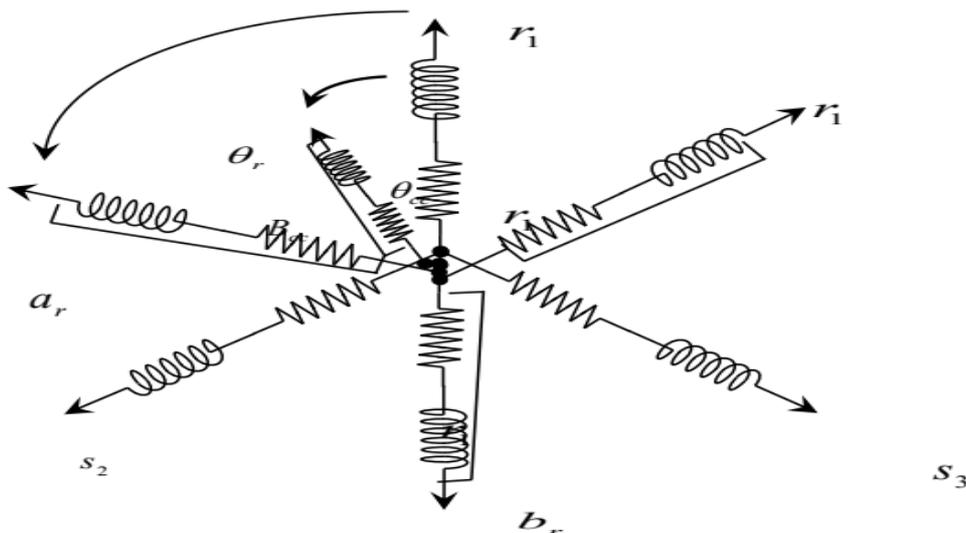


Figure. III.2.schéma équivalent d' une MAS présentant un défaut inter spires

$$[V_s] = R_s [I_s] + \frac{d}{dt} [\varphi_s] \quad (\text{III.3})$$

$$[V_r] = 0 = R_r [I_r] + \frac{d}{dt} [\varphi_r] \quad (\text{III.4})$$

$$V_{cc} = 0 = R_{cc} I_{cc} + \frac{d}{dt} \varphi_{cc} \quad (\text{III.5})$$

$$[\varphi_s] = [L_s][I_s] + [M_{sr}][I_r] + [M_{scc}][I_{cc}] \quad (\text{III.6})$$

$$[\varphi_r] = [L_r][I_r] + [M_{rs}][I_s] + [M_{rcc}][I_{cc}] \quad (\text{III.7})$$

Les matrices $[L_{ss}]$, $[L_{rr}]$ et $[M_{sr}]$ sont définies dans le chapitre précédent

La résistance $[R_s]$ est proportionnelle au nombre de spires, la résistance R_{cc} de bobinage B_{cc} est donnée en fonction de la résistance R_s des trois phases statoriques sans défaillance

$$R_{cc} = \eta_{cc} R_s \quad (\text{III.8})$$

Le circuit magnétique emprunté par les lignes de champ coupant la bobine B_{cc} en court-circuit identique à celui emprunté par les lignes de champ coupant la phase statorique en défaut. Les différentes inductances de la bobine B_{cc} par rapport aux phases statoriques et rotoriques de la machine sont données par les relations suivantes :

$$[M_{scc}] = \eta_{cc} L_s \begin{bmatrix} \cos(\theta_{cc}) & \cos(\theta_{cc} - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_{cc} + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (\text{III.9})$$

$$[M_{rcc}] = \eta_{cc} L_s \begin{bmatrix} \cos(\theta_{cc} - \theta) & \cos(\theta_{cc} - \theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_{cc} - \theta + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (\text{III.10})$$

$$[M_{ccr}] = \eta_{cc} L_s \omega_r P \begin{pmatrix} \cos(\theta_{cc} - \theta) & \cos(\theta_{cc} - \theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_{cc} - \theta + \frac{2\pi}{3}) \end{pmatrix} \quad (\text{III.11})$$

$$[MM_{ccr}] = [MM_{rcc}]^T \quad (\text{III.12})$$

$$[M_{scc}] = [M_{ccs}]^T \quad (\text{III.13})$$

$$[M_{rcc}] = [M_{ccr}]^T \quad (\text{III.14})$$

$[M_{scc}]$ (respectivement $[M_{rcc}]$) : inductances mutuelles statorique (respectivement rotorique), de bobinage en court-circuit.

III.4 Représentation d'état du modèle de défaut :

Dans le cas où la machine présente un défaut de court-circuit entre-spires, le système donné par l'équation suivante :

$$\begin{bmatrix} V_s \\ V_r \\ U_{cc} \\ -C_r \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [L_s] & [M_{sr}] & [M_{ccs}] & 0 & 0 \\ [M_{sr}] & [L_r] & [M_{ccr}] & 0 & 0 \\ [M_{scc}] & [M_{rcc}] & L_{cc} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & J_t & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_s \\ \dot{I}_r \\ \dot{I}_{cc} \\ \dot{\omega} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} [R_s] & \left[\omega \frac{dM_{sr}}{dt} \right] & 0 & 0 & 0 \\ \left[\omega \frac{dM_{rs}}{dt} \right] & [R_r] & MM_{cc} & 0 & 0 \\ 0 & MM_{ccr} & R_{cc} & 0 & 0 \\ C_1 \dots\dots\dots & C_6 & 0 & f_v & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_s \\ I_r \\ I_{cc} \\ \omega \\ \theta \end{bmatrix}$$

Les matrices $[R_s]$ $[R_r]$ $[L_s]$ $[L_r]$ et $[M_{sr}]$ sont définies au chapitre II

Le modèle de la machine asynchrone à rotor bobiné en présence de défaut de court-circuit au stator étant maintenant connu, nous pouvons étudier l'évolution des grandeurs temporelles tels que les courants, le couple ou encore la vitesse rotorique.

III.5 Résultats de simulation

A vide :

En applique le défaut dans la phase a

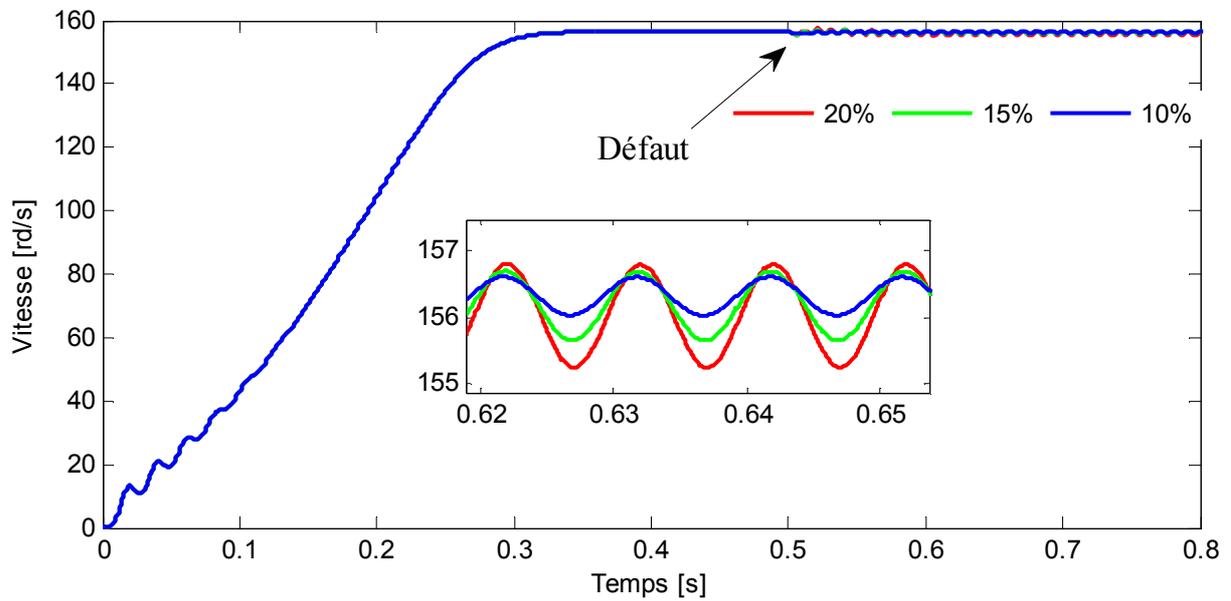


Figure III.3. Allure de vitesse de rotation en régime défectueux 10% 15% et 20%

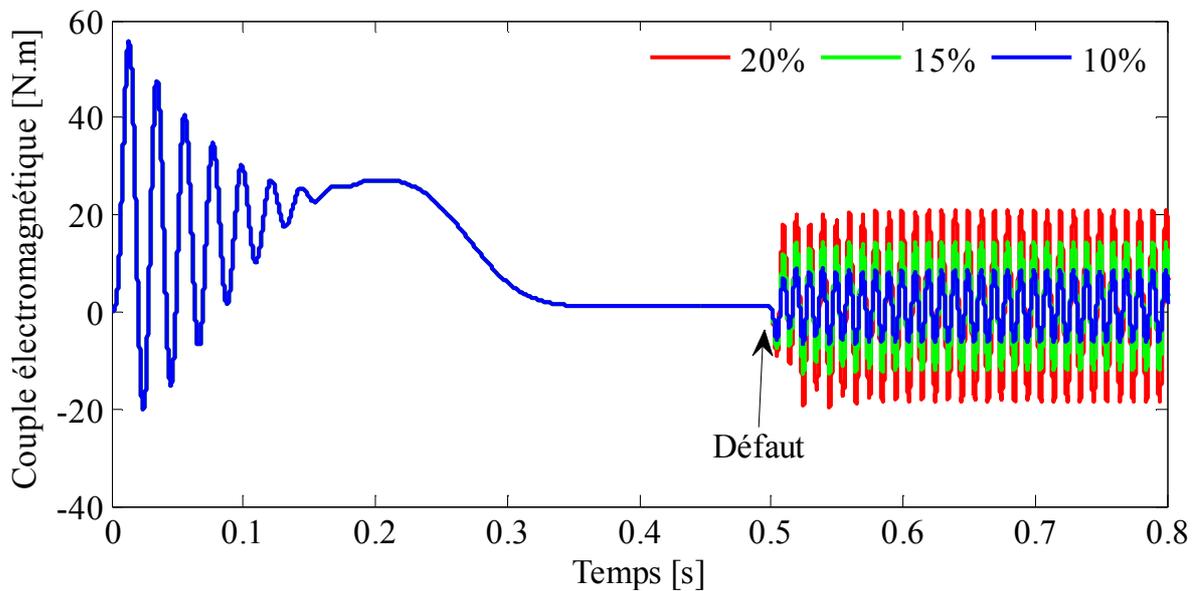


Figure III.4. Allure de couple électromagnétique en régime défectueux 10% 15% et 20%

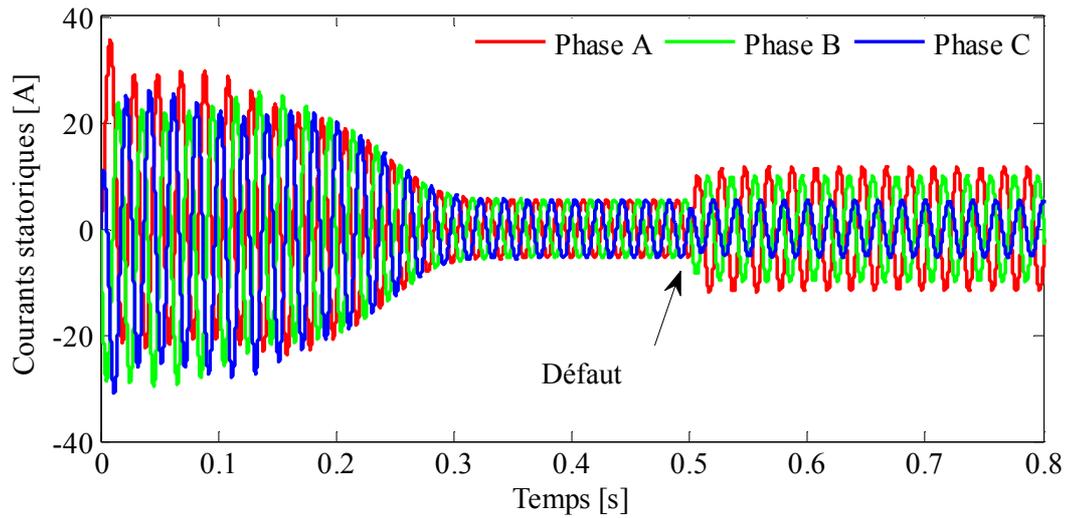


Figure III.5. Courant dans les trois phases statoriques en régime défautueux de 10% de cc

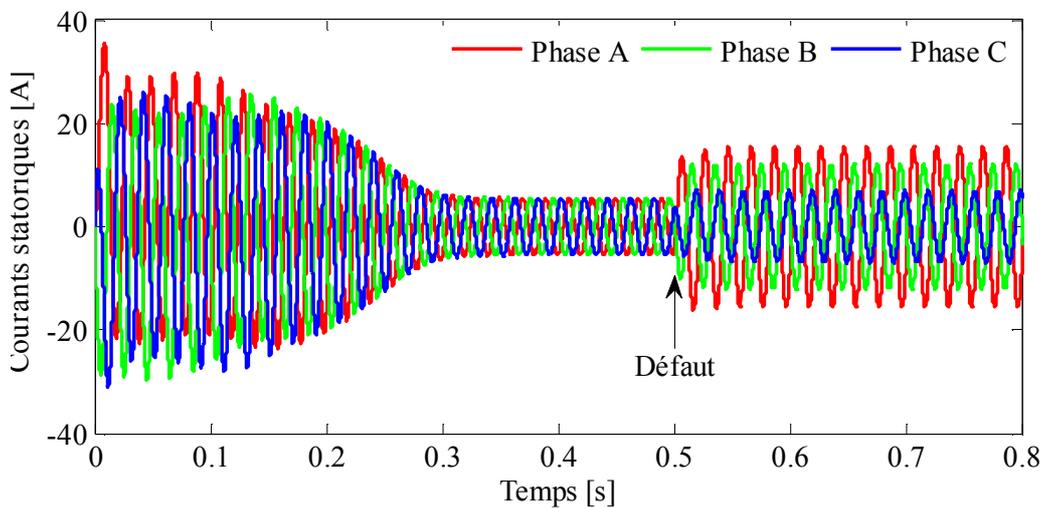


Figure III.6. Courant dans les trois phases statoriques en régime défautueux de 15% de cc

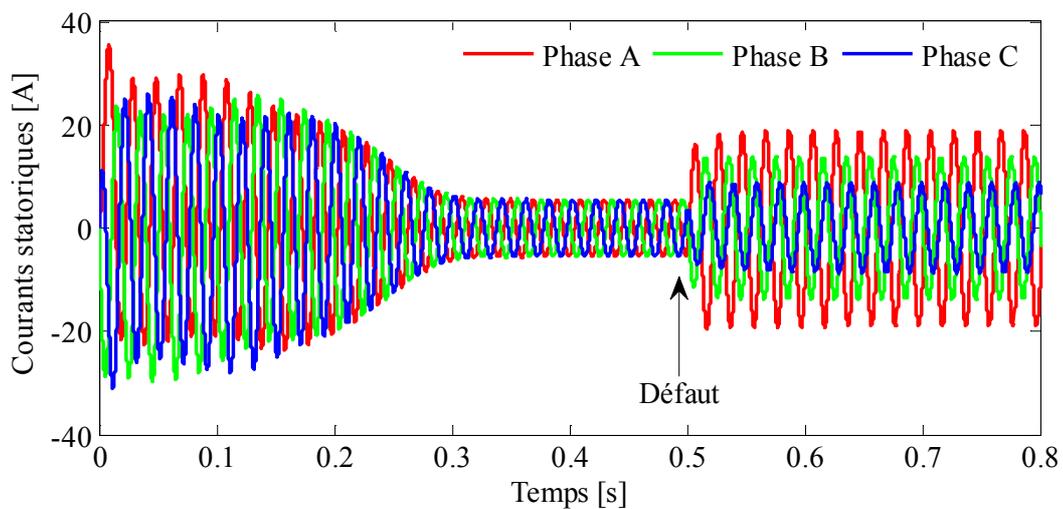


Figure III.7. Courant dans les trois phases statoriques en régime défautueux de 20% de cc

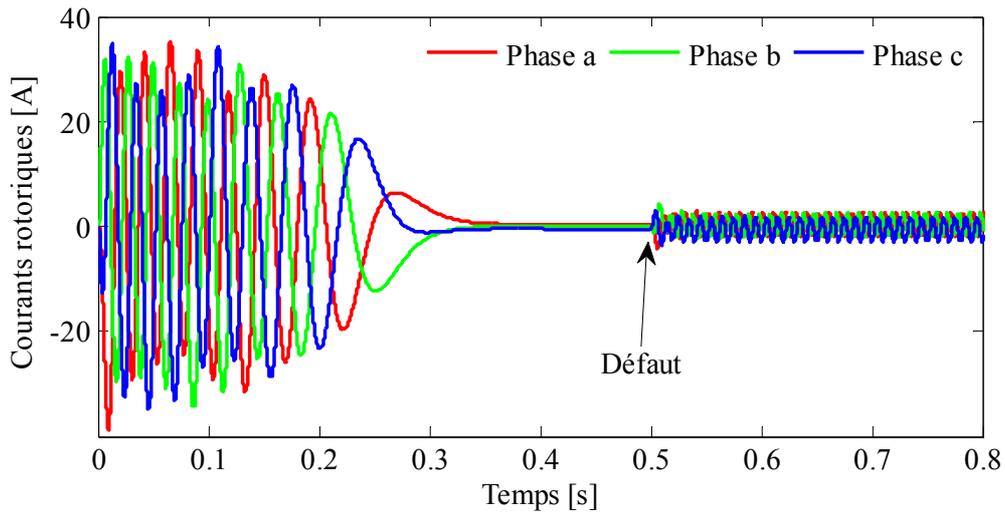


Figure III.8. Courant dans les trois phases rotoriques en régime défautueux de 10% de cc

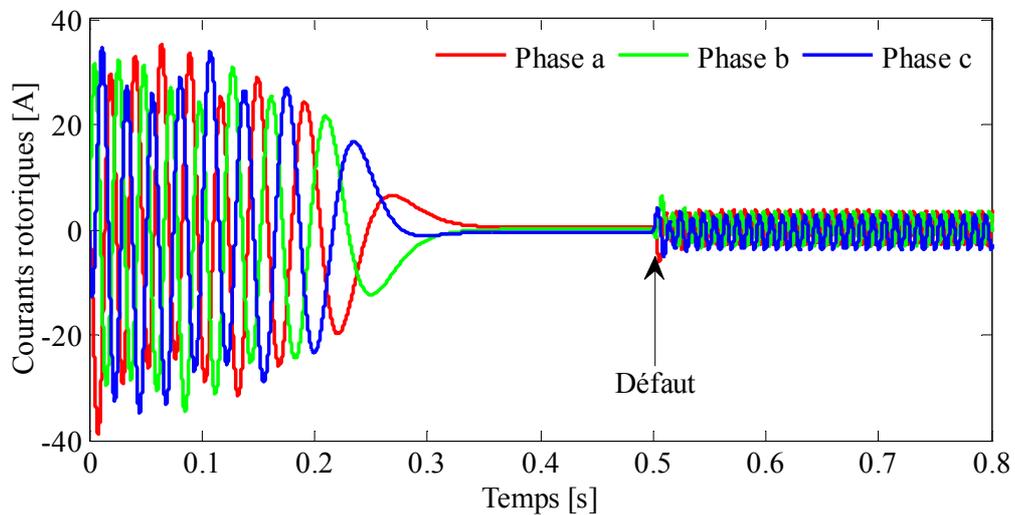


Figure III.9. Courant dans les trois phases rotoriques en régime défautueux de 15% de cc

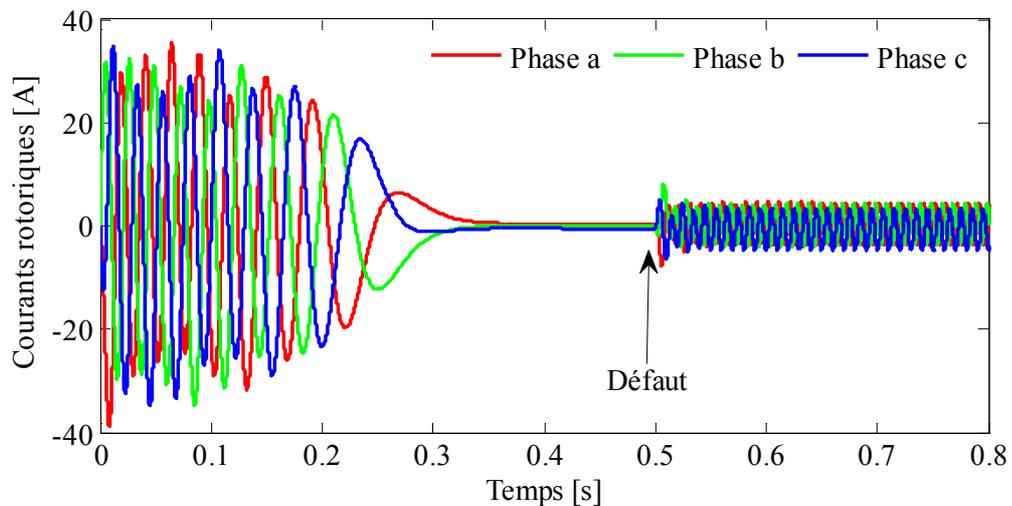


Figure III.10. Courant dans les trois phases rotoriques en régime défautueux de 20% de cc

En charge : maintenant on applique le défaut dans la phase b avec différentes valeurs 10% 15% et 20% avec un couple résistant $C_r=5$ N.m

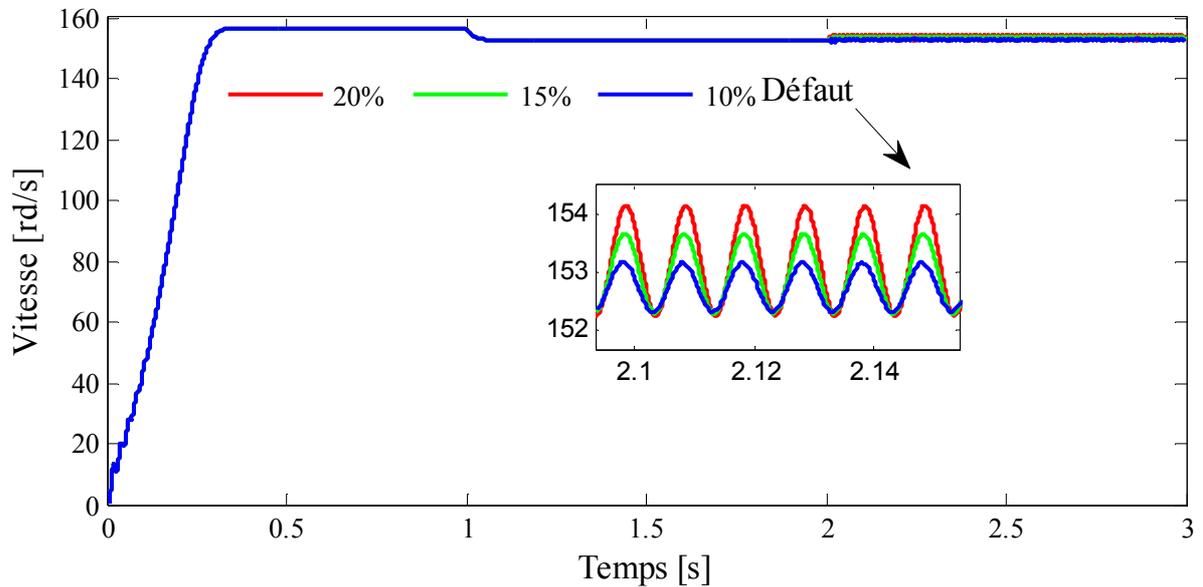


Figure III.11. Allure de vitesse de rotation en régime défectueux 10% 15% et 20%

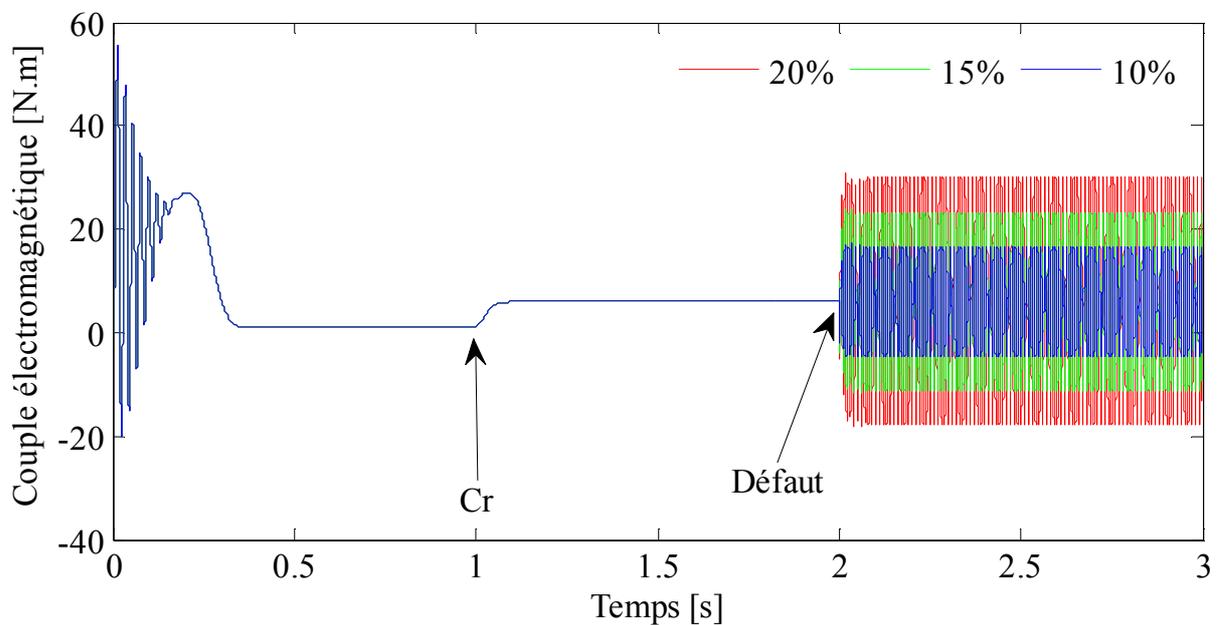


Figure III.12. Allure de couple électromagnétique en régime défectueux 10% 15% et 20%

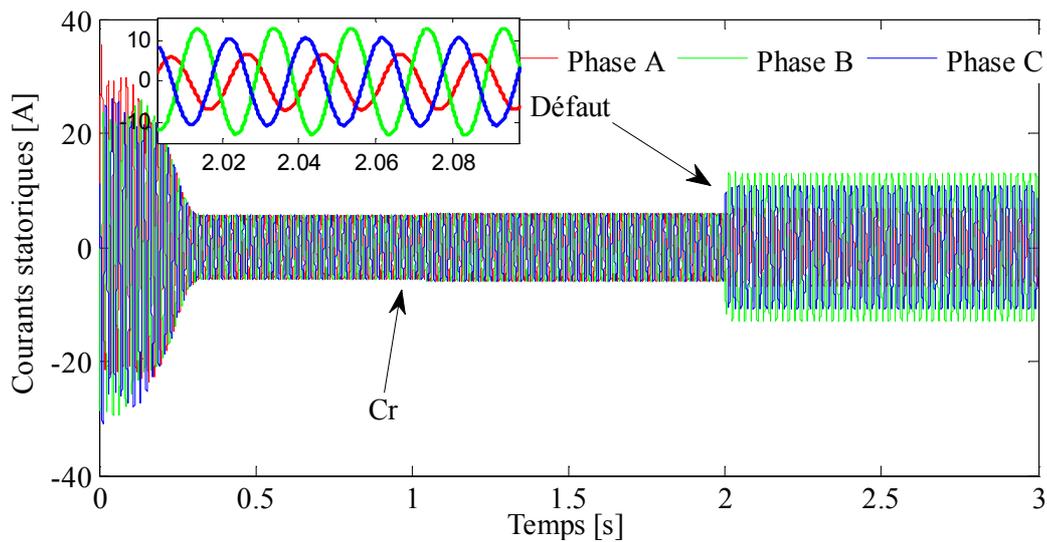


Figure III.13. Courant dans les trois phases statoriques en régime défectueux de 10% de cc

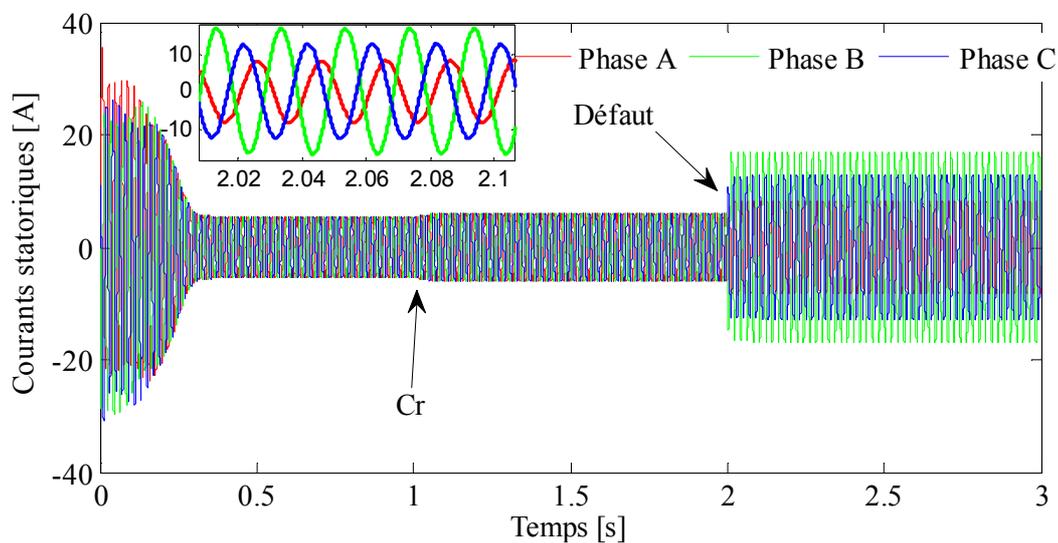


Figure III.14. Courant dans les trois phases statoriques en régime défectueux de 15% de cc

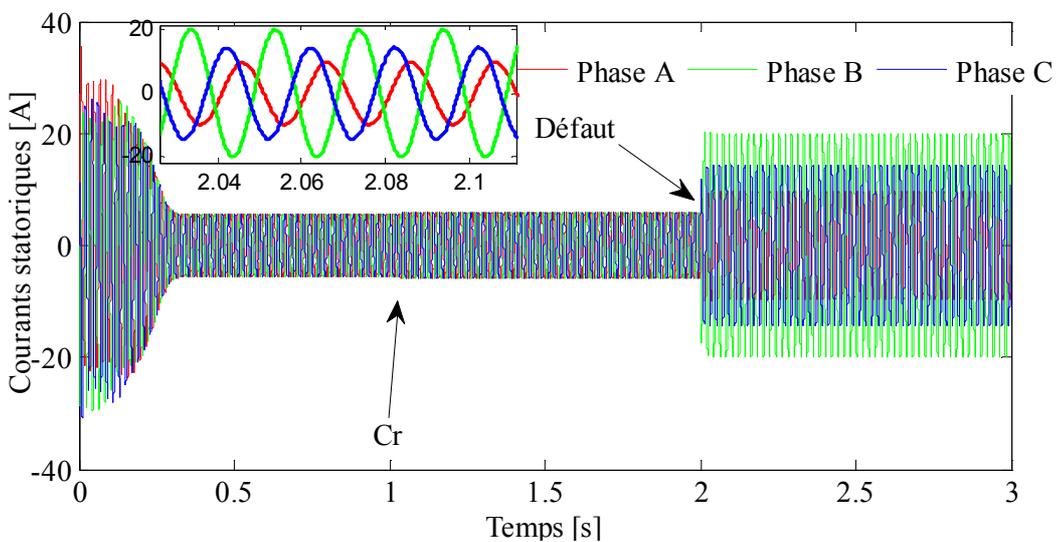


Figure III.15. Courant dans les trois phases statoriques en régime défectueux de 20% de cc

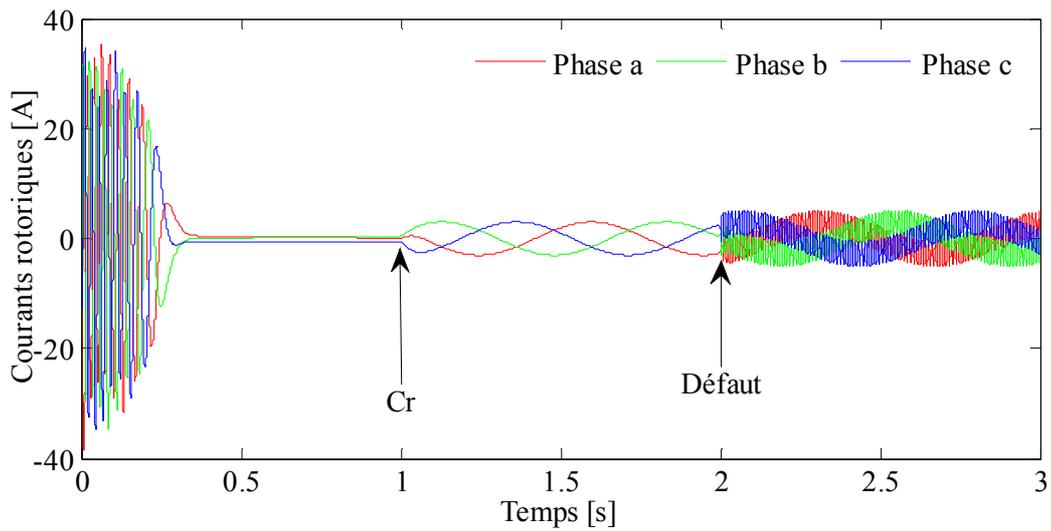


Figure III.16. Courant dans les trois phases rotoriques en régime défautueux de 10% de cc

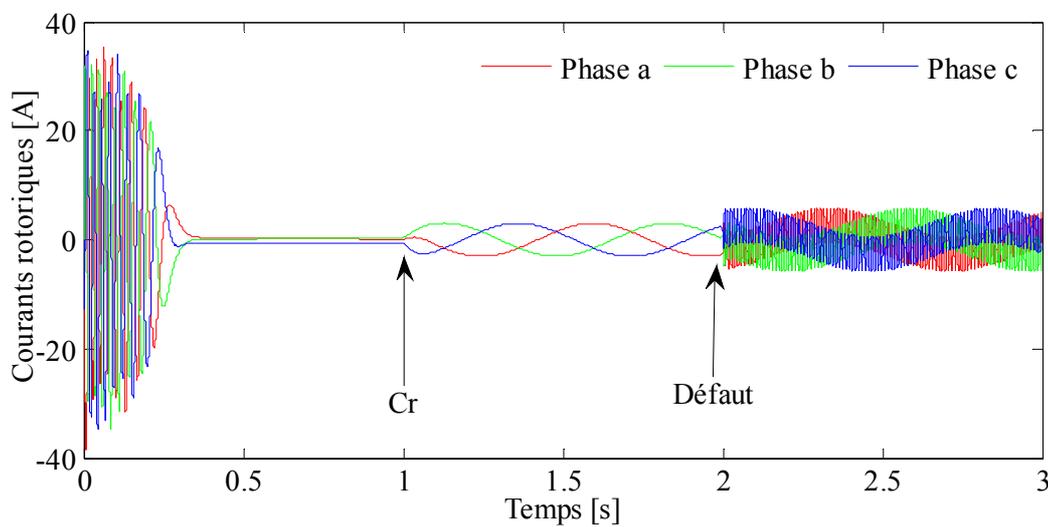


Figure III.17. Courant dans les trois phases rotoriques en régime défautueux de 15% de cc

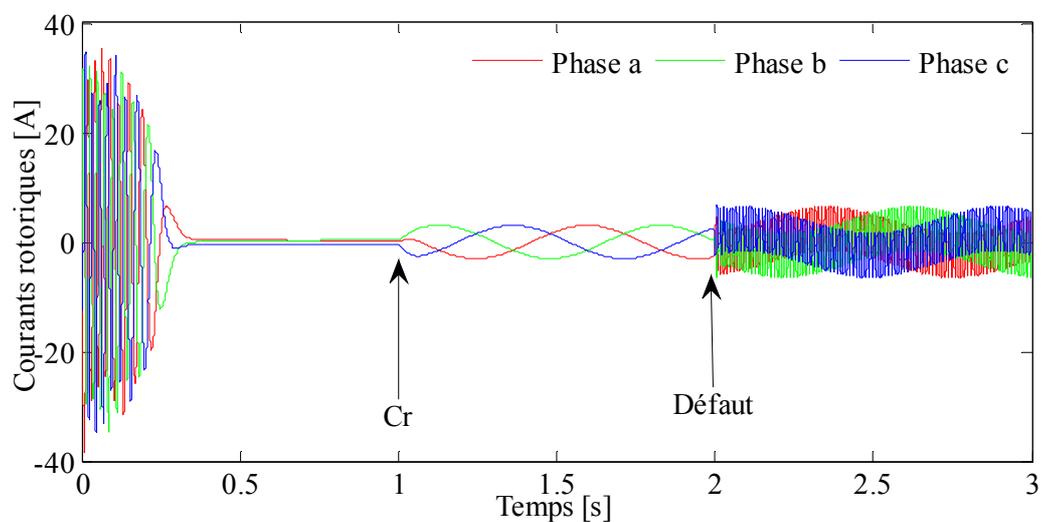


Figure III.18. Courant dans les trois phases rotoriques en régime défautueux de 20% de cc

On prend le défaut dans la phase c avec un couple résistant $C_r=10$ N.m

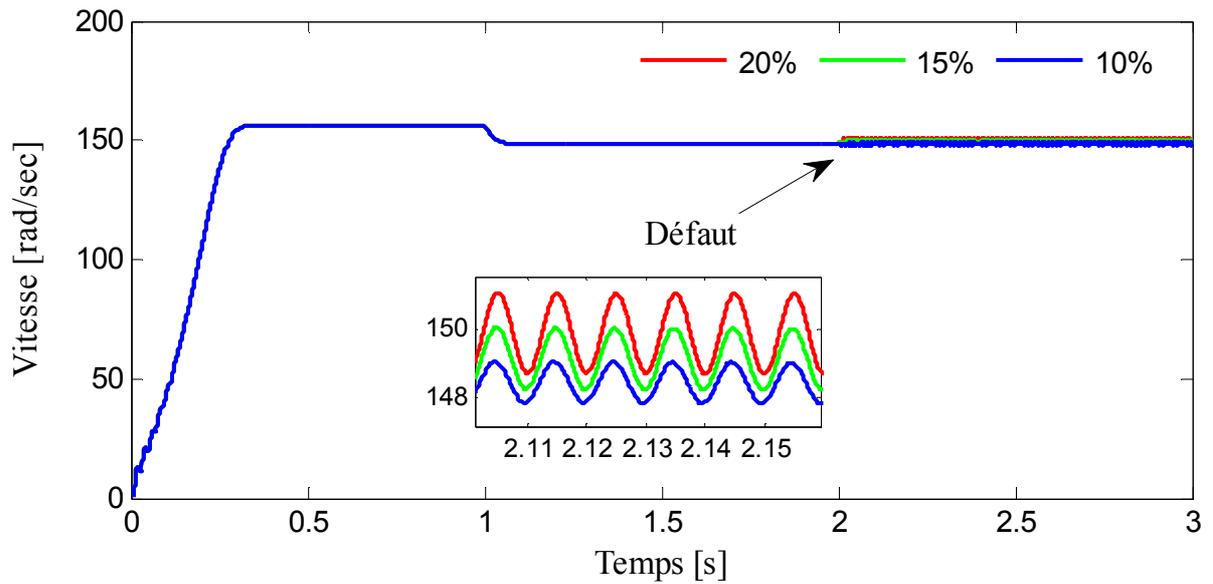


Figure III.19. Allure de vitesse de rotation en régime défectueux 10% 15% et 20%

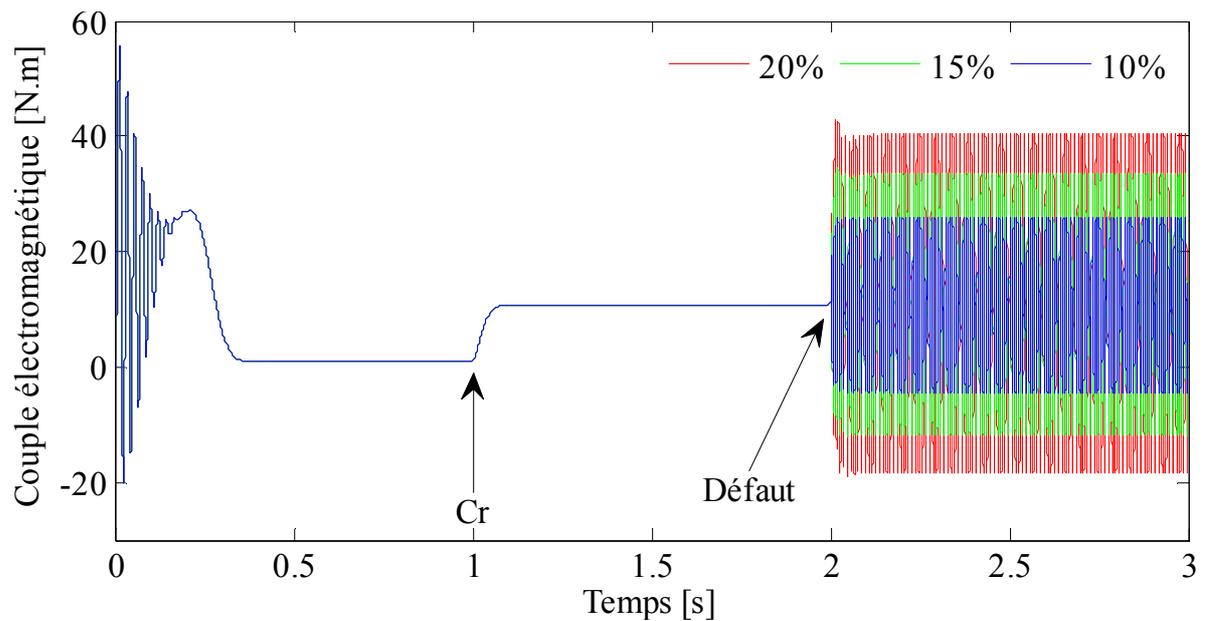


Figure III.20. Allure de couple électromagnétique en régime défectueux 10% 15% et 20%

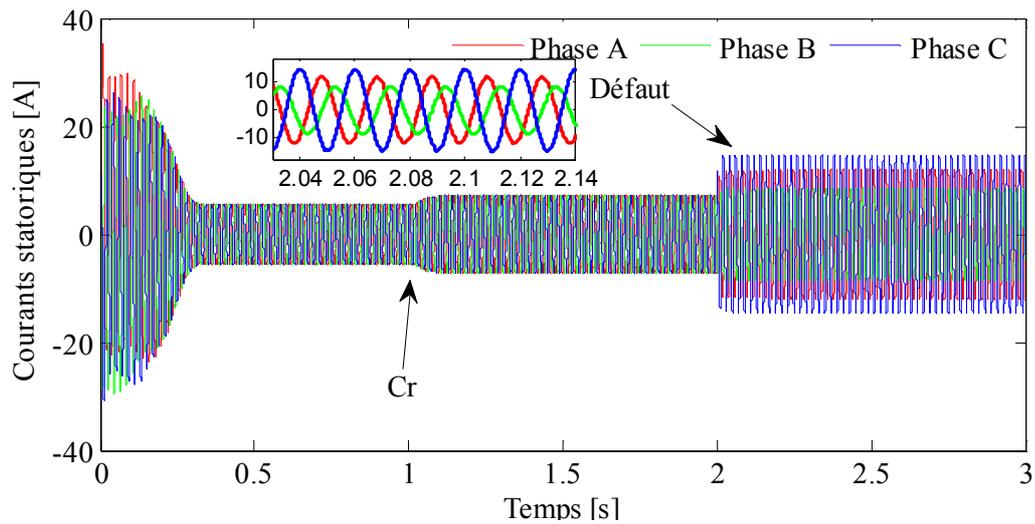


Figure III.21. Courant dans les trois phases statoriques en régime défectueux de 10% de cc

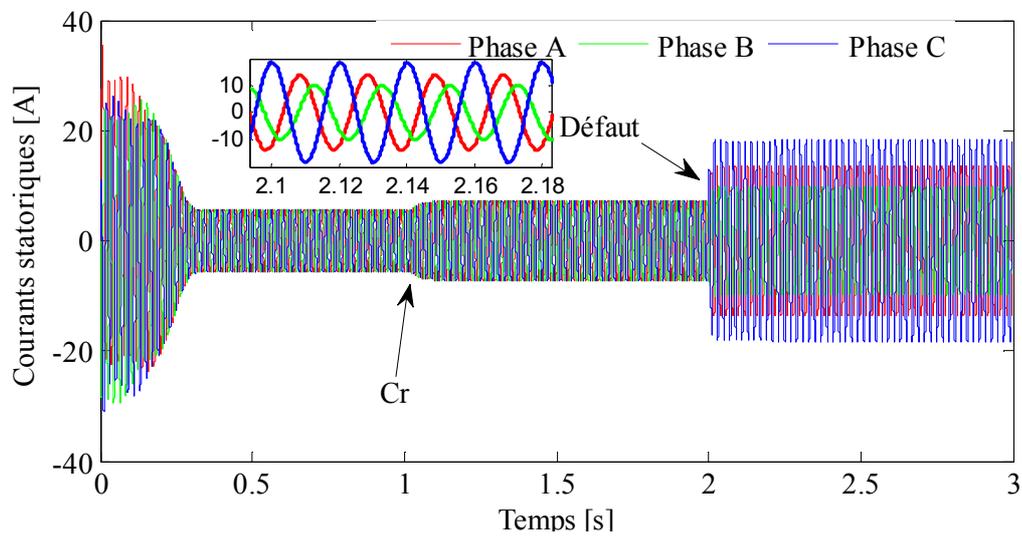


Figure III.22. Courant dans les trois phases statoriques en régime défectueux de 15% de cc

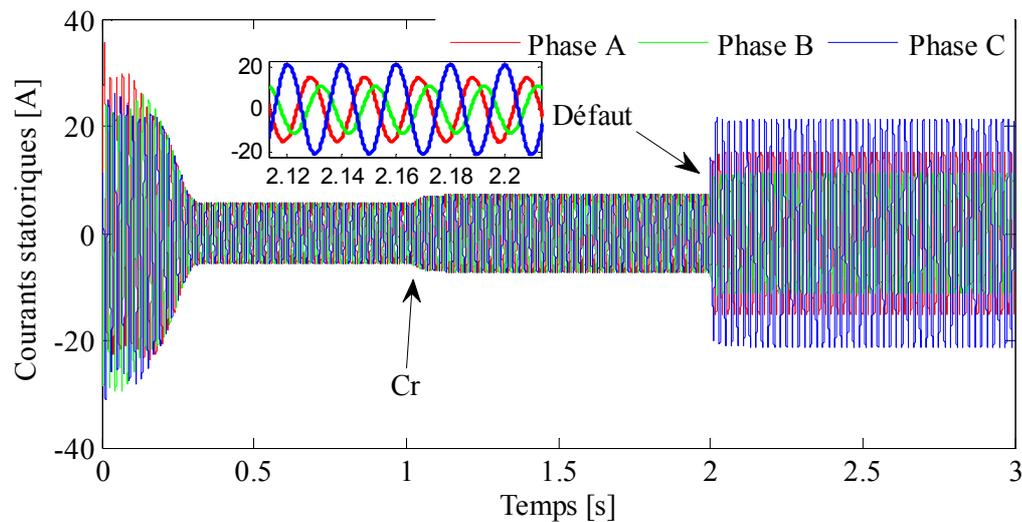


Figure III.23. Courant dans les trois phases statoriques en régime défectueux de 20% de cc

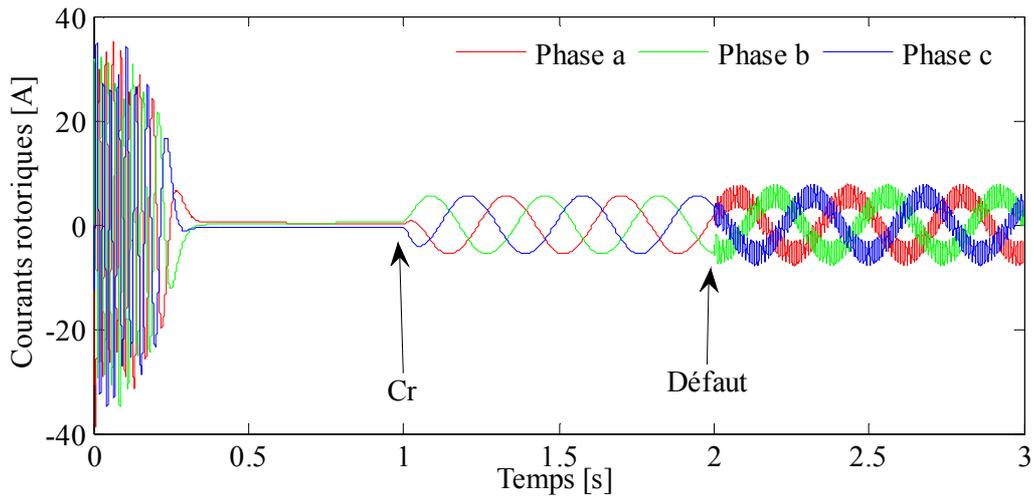


Figure III.24. Courant dans les trois phases rotoriques en régime défautueux de 10% de cc

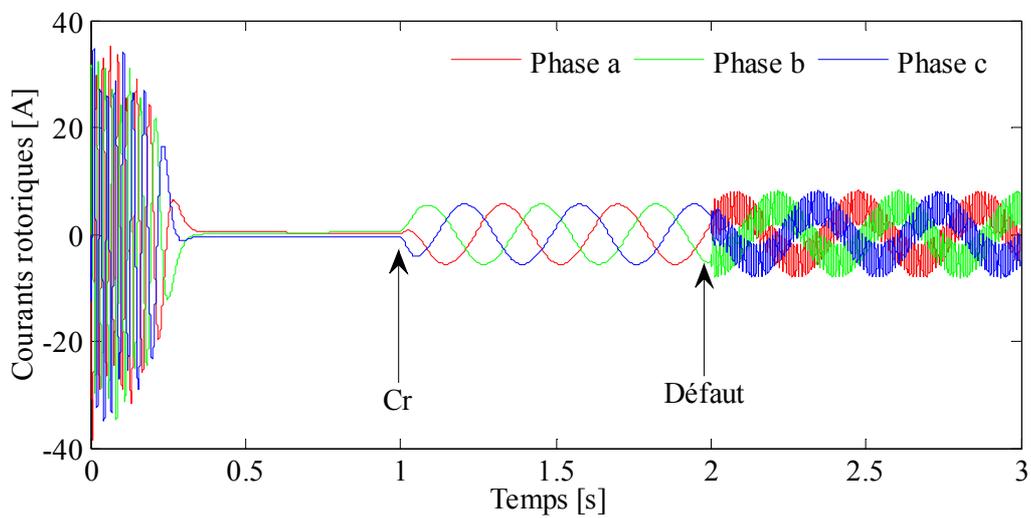


Figure III.25. Courant dans les trois phases rotoriques en régime défautueux de 15% de cc

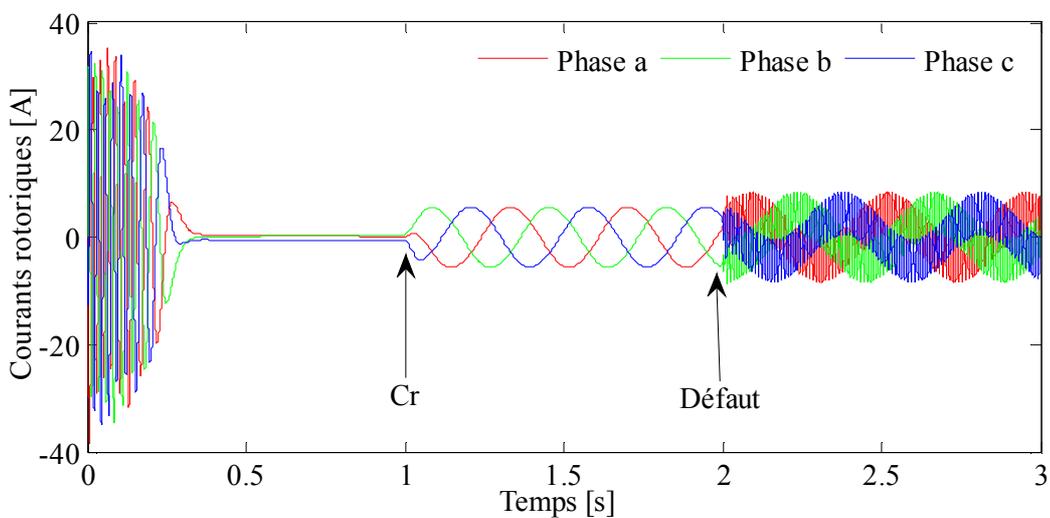


Figure III.26. Courant dans les trois phases rotoriques en régime défautueux de 20% de cc

III.6 Interprétation des résultats

Les figures (III.4/12/20) représente le comportement du couple électromagnétique, on remarque que l'allure du couple augmente à chaque reprise qu'on rajoute un pourcentage de défaut provoquer par l'effet de court –circuit inter spires (les trois pourcentages de défaut 10% 15% 20%). Dans ce contexte, on a pour un défaut de court-circuit

- 10%, à l'instant de $t=0.52s$ $C_{em}= 8.3N.m$ dans la phase A.
- 15%, à l'instant de $t=2.5s$ $C_{em}= 23.29N.m$ dans la phase B.
- 20%, à l'instant de $t=2.5s$ $C_{em}= 40.3N.m$ dans la phase C.

Cela confirme que d'ondulation augmente avec la croissance du taux du court-circuit.

Les figures de la vitesse (III.3/11/19) montrent que la période transitoire dure 0.3s, puis le système atteint sa vitesse nominale. A l'instant $t=2s$ nous remarquons les ondulations de l'allure provoquée par le court-circuit inter spire. Noter bien que le taux de défaut est inséré à trois niveau 10% et 15% et 20%. On peut constater clairement que chaque fois qu'on augmente le pourcentage de défaut, l'allure d'ondulation augmente.

Les figures (III.8/9/10/16/17/18/24/25/26) représentent l'évolution des courants rotoriques dans les trois phases du rotor à l'instant d'apparition de défaut de 10%, 15% et 20% respectivement, nous constatons une déformation de la forme des courants, et cela est due au champ stationnaire crée par les spires en court-circuit qui s'ajoute au champ tournant crée par les trois phases statorique.

Les figures (III.5/6/7/13/14/15/21/22/23) donnent l'évolution des courants statoriques dans les trois phases lors d'un défaut de 10%, 15% et 20% de court-circuit respectivement, nous constatons que lors de l'apparition de défaut de 10% de court-circuit dans la phase A, le courant croit brusquement et oscille autour de l'axe de zéros avec des ondulations d'amplitude égale à 11.57A. Pour les phases B et C, on remarque des ondulations d'amplitude égale à 9.44A et 5.14A respectivement, ce qui est dû au couplage magnétique des trois phases statorique.

III.7 Analyse fréquentielle

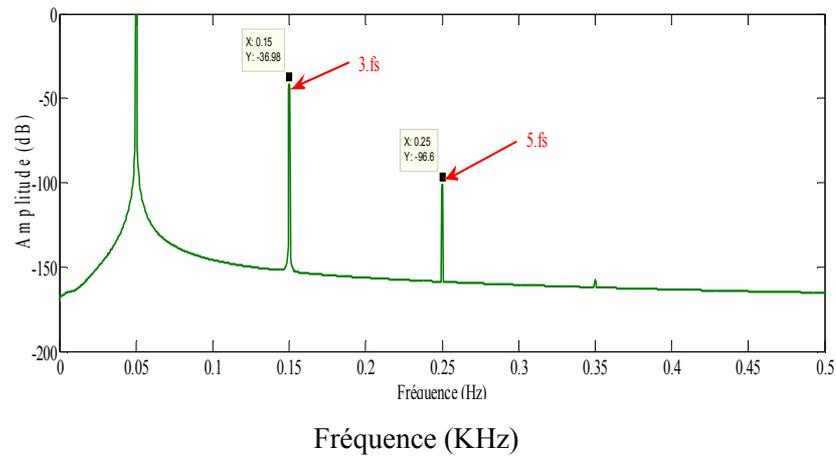


Figure III.27. Analyse spectrale de courant I_{s1} pour 36 spires en cc dans la phase s_1 à faible charge.

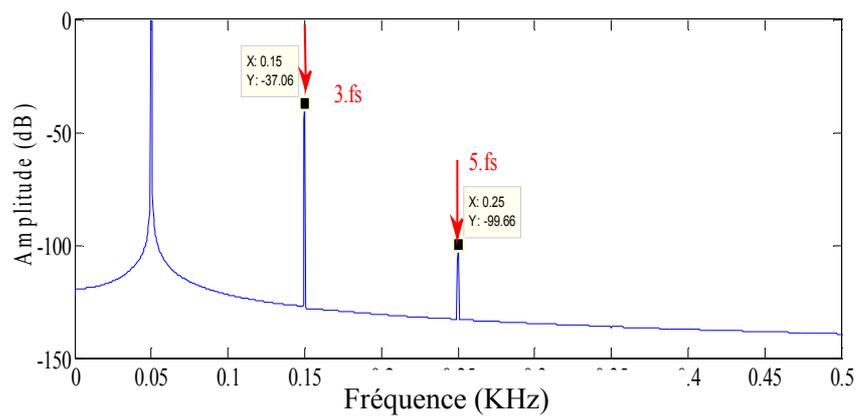


Figure III.28. Analyse spectrale de deI_{s2} pour 36 spires en cc dans la phase s_1 à faible charge.

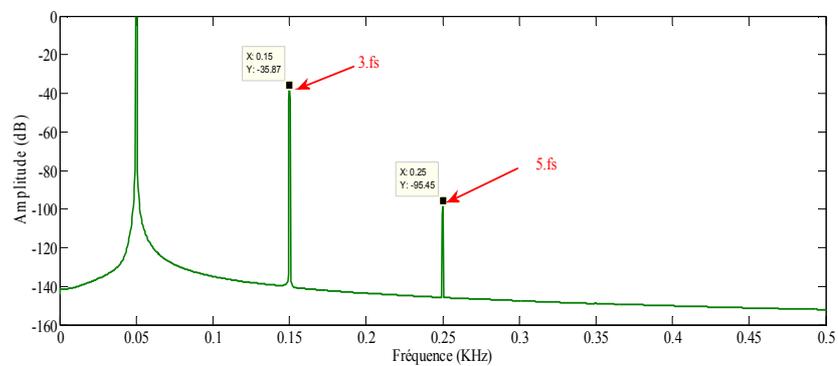


Figure III.29. Analyse spectrale de I_{s1} pour 36 spires en cc dans la phase s_1 à demi-charge.

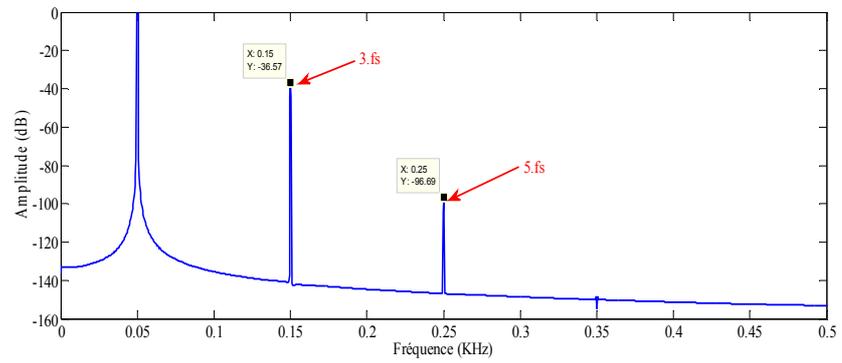


Figure III.30. Analyse spectrale de I_{s1} pour 36 spires en cc dans la phase s_1 à demi- charge.

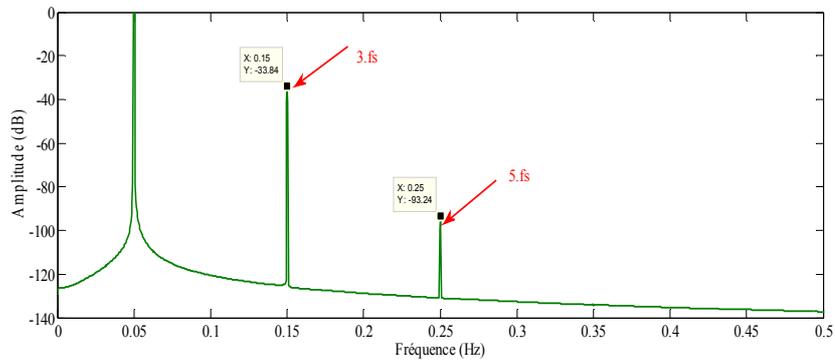


Figure III.31. Analyse spectrale de I_{s2} pour 36 spires en cc dans la phase S_1 à demi-charge.

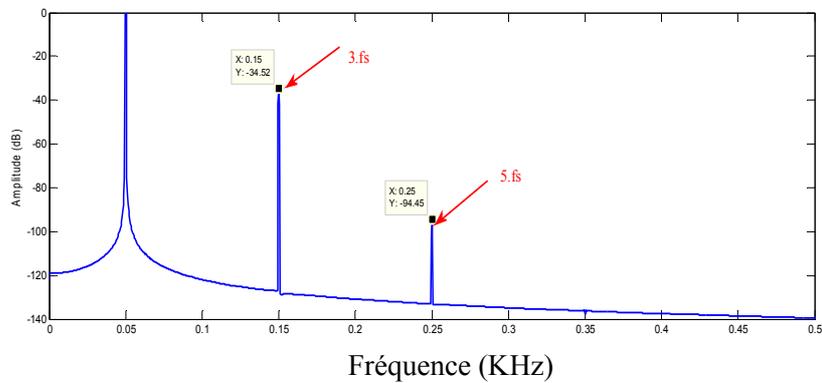


Figure III.32. Analyse spectrale de I_{s2} pour 36 spires en cc dans la phase s_1 à plein charge

Les figures (III.27/28/28/30/31/32) montrent l'analyse spectrale du courant statorique dans le cas d'un court-circuit entre spires. La DSP (Densité spectrale de puissance) montre clairement l'apparition de la composante $3.k.f_s$ dans les cas correspondants aux machines défectueuses, l'amplitude de ces composantes augmentent légèrement avec l'augmentation de la charge.

L'apparition de ces composantes peut être considérée un résultat d'asymétrie dans l'enroulement statorique.

III.8 Conclusion

Dans ce chapitre, on a focalisé à l'étude la machine asynchrone à rotor bobiné sujet à des défauts de différents pourcentages, avec la charge et sans charge. Pour cela, nous avons utilisé le model d'état pour obtenir la matrice finale avec le défaut de court-circuit de type inter spire. La validation de cette étude est faite via une compilation numérique en Matlab. Cette simulation nous a permet de comprendre le comportement de la machine en modes sain et en présence de défauts. Nous avons complété notre travail par une analyse spectrale des courants statoriques

Conclusion générale

Conclusion générale

Les machines électriques asynchrones nécessitent une détection rapide et précoce de leurs défaillances, à cause de leurs utilisations fréquentes dans diverses applications. Le travail présent dans ce mémoire s'inscrit dans le cadre du diagnostic des défauts statoriques dans le moteur asynchrone à rotor bobiné dont les courts circuits sont plus spécifiquement l'objet de notre travail.

L'étude est basée sur deux objectifs principaux, la proposition un modèle multi-enroulement de la machine basée sur la méthode des Circuits Électriques Magnétiquement Couplés (CEMC). Ce modèle permet d'étudier l'influence d'un défaut de court-circuit sur le comportement général du moteur asynchrone. Cette approche offre un bon compromis en termes de précision du modèle et de temps de calcul. De plus, ce type de modélisation nous permet de prendre en compte un certain nombre de défauts d'ordre mécanique.

Ainsi, nous avons détaillé dans ce mémoire la modélisation de la machine asynchrone à rotor bobiné en régime sain (sans défaut) par la méthode de circuit couplé dont on a pris les mutuelles statorique et rotorique avec les mutuelles stator-rotor pour obtenir un système matriciel. Ensuite, une simulation via MATLAB nous a permis une visualisation des courants statorique et rotorique ainsi que le couple électromagnétique avec la vitesse de rotation.

En outre, nous avons enrichi la méthodologie de cette modélisation multi-enroulement, pour prendre en considération la présence de défaut. Le défaut qu'on a introduit dans ce modèle est un défaut de court-circuit inter spires au sein de différente phase dont on a montré comment prendre en compte cette altération topologie normale de la machine plus des interconnexions dues aux défauts de court-circuit statoriques comme pour le cas de la machine saine.

Perspective :

Nous proposons à travailler prochainement sur l'étude de plusieurs défauts simultanés comme excentricité des roulements court-circuit de phase et les défauts rotoriques. Nous suggérons d'introduire les techniques intelligentes dans les processus de diagnostic des machines.

Bibliographique

- [1] G.Zwingelstein, Diagnostic des défaillances Théorie et pratique pour les systèmes industriels, Paris. Hermes, 1995. 601 p.
- [2] C.Roland, Diagnostic des défauts des machines asynchrones par reconnaissances des formes. Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Lyon 2003.
- [3] A. khezzar, M.E.K.Oumaamar, A.Lebaroud and M.Boucherma, novel study of induction motors with broken bar faults. Electrical Laboratory of Constantine “LEC”, Department of Electrical Engineering, Mentouri University, 25000, Constantine, Algeria, 2004.
- [4] G.houdouin , G. Barakat, B.Dakyo, E.Destobbeleer and C.Nichita , A coupled magnetic circuit based global method for the simulation of cage induction machines under rotor and stator faults. Electrimacs 2002, August 18-21
- [5] Y.TAMER, Détection de Défauts de la Génératrice Asynchrone a Double Alimentation, (DFIG).Mémoire en vue de l’obtention de diplôme de Magister Université des Sciences et de la Technologie d’Oran Mohamed BOUDIAF/2011.
- [6] G.Didier, Modélisation et diagnostic de la machine asynchrone en présence de défaillances`` Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy-I, France, 2004.
- [7] Schaeffer Emmanuel, Diagnostic des Machines Asynchrones : Modèles Et Outils Paramétriques Dédiés à La simulation et à La Détection De Défauts, Thèse de doctorat, 1999, L’École Centrale de Nantes, France.
- [8] A.Boudinar, Etude et développement d’un turbo identificateur à haute résolution. Application au diagnostic des machines asynchrones à cage d’écureuil, Thèse doctorat 2007, Université des Sciences et de Technologie d’Oran, Algérie
- [9] N.A. Al-Nuaim and H.A. Toliyat, A novel method for modeling dynamic air gap eccentricity in synchronous machines based on modified winding function theory, IEEE Trans. Energy Conversion, vol. 13, n° 2, June 1998, pp.156-162.
- [10] B.Chermat, Diagnostic des défauts de MAS par les méthodes paramétriques de traitement du signal, thèse de master, Université de Mohammed Khaidher Biskra 2012).
- [11] W.BOUDJTAT, A.HIMOURA,Etude Et Simulation D’une Machine Asynchrone Alimentée Par Un Onduleur De Tension A Commande Mli, Memoire De Master

Bibliographique

- [12] A.Chahmi, Identification paramétrique De la machine asynchrone dédiée au diagnostic. Energie électrique. Université des sciences et technologie d'Oran -MB 2017. Français.tel-01658902
- [13] M.A.MEZROUA, Présentation Des Différentes Défaillances Du Moteur Asynchrone a Cage, Publié le 26/08/2009 à 00 :07 par mezrouamedali.
- [14] Razik H., Notes de cours sur le diagnostic de la machine asynchrone, Groupe de Recherches en Electrotechnique et Electronique, Université de Henri Poincaré Nancy, France, 2003.
- [15]O.Ondeldaigntic, par reconnaissance des formes application à un ensemble convertisseur-machine asynchrone, Thèse doctorat, Lyon, Octobre2006.
- [16] J.A.Farooq, Etude du problème inverse en électromagnétisme en vue de la localisation des défauts de désaimantation dans les actionneurs à aimants permanent, Thèse de doctorat.
- [17]S. Nandi, T. C. Ilamparithi, L. Sang Bin, and H. Doosoo, Detection of Eccentricity Faults in Induction Machines Based on Nameplate Parameters, IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 58, pp. 1673-1683, May2011.
- [18] B. V.Phuong, Diagnostic des machines électriques par l'analyse du champ magnétique de fuite. Application à l'identification de défauts rotoriques d'un alternateur à vide, Thèse de doctorat, Grenoble,2007.
- [19] N.YASSA, Modélisation des machines asynchrones dédiée au diagnostic des défauts de court-circuit inter- spires et des cassures de barres et d'anneaux, UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU 09 Mai 2009.
- [20] A.BELAIDE, diagnostic de la machine asynchrone par la méthode d'identification paramétrique, Université de M'silla ; diplôme d'ingénieur d'état ; Année 2012.
- [21] A.CEBAN, Méthode globale de diagnostic des machines électriques, Thèse de doctorat, Université Lille (Nord), France, 2 février 2012.
- [22], LES MACHINES ELECTRIQUES GENERALITES, Laboratoire du cours ELEC-H-300 – Electricité Appliquée

Résumé

Dans ce travail la modélisation des machines asynchrones a été présentée en s'appuyant sur une approche Circuits Electriques Magnétiquement Couplés (CEMC). Cette dernière est basée sur la représentation des bobinages de la machine par des circuits électriques distribués sans utiliser aucune transformation. Ce type d'approche offre un modèle de machine flexible, un temps de calcul raisonnable et ne nécessite aucun recours au calcul de champs.

En second lieu, nous avons utilisé une méthode de traitement de signal de courant statorique à base de la FFT pour détection des défauts statoriques et rotoriques, l'analyse des signatures des courants du moteur" (MCSA). Cette méthode consiste à détecter les défauts par l'étude de certains composants fréquentiels ou par la vérification de la variation de certains des composants déjà existant. Cette méthode est très utilisée car elle est simple, peu coûteuse et la partie expérimentale est facile à exécuter. Elle est très populaire dans la détection des défauts statoriques et plus particulièrement des défauts de court-circuit entre spires de l'enroulement statorique.

Mots clés: diagnostic, défauts, analyse spectrale, méthodes des circuits couplés (CEMC), court-circuit

Abstract

In this work, the modeling of asynchronous machines was presented using a Magnetically Coupled Electrical Circuits approach (CEMC). This last one is based on the representation of the windings of the machine by distributed electrical circuits without using any transformation. This type of approach offers a flexible machine model, a reasonable calculation time and does not require any recourse to the calculation of fields.

Secondly, we used a FFT-based stator current signal processing method for detecting stator and rotor defects, Motor Current Signals Analysis (MCSA). This method consists in detecting defects. by studying certain frequency components or by checking the variation of some of the already existing components, this method is widely used because it is simple, inexpensive and the experimental part is easy to perform and is very popular in detection stator faults and more particularly short circuit faults between turns of the stator winding.

Key words: diagnosis, defects, spectral analysis, coupled circuit methods (CEMC), short circuit

ملخص

في هذا العمل ، تم تقديم نماذج للآلات غير المتزامنة باستخدام نهج الدوائر الكهربائية المزدوجة مغناطيسيا ويستند هذا الأسلوب الأخير على تمثيل لفات الآلة بواسطة الدوائر الكهربائية الموزعة دون استخدام أي تحويل. يقدم هذا النوع من الأساليب نموذجًا مرناً للآلة، ووقت حساب معقول ولا يتطلب أي لجوء إلى حساب الحقول

ثانياً ، استخدمنا طريقة معالجة إشارات التيار الثابت القائم على نظام للكشف عن عيوب الجزء الثابت والدوار ، تحليل إشارات التيار الحركي وتتألف هذه الطريقة من اكتشاف العيوب. من خلال دراسة مكونات تردد معينة أو عن طريق التحقق من تباين بعض المكونات الموجودة بالفعل ، يتم استخدام هذه الطريقة على نطاق واسع لأنها بسيطة وغير مكلفة والجزء التجريبي سهل الأداء وهو شائع جداً في الكشف أعطال الجزء الثابت وأخطاء الدائرة القصيرة بشكل خاص بين لفات لف الجزء الثابت.

الكلمات المفتاحية:

التشخيص ، العيوب ، التحليل الطيفي ، طرق الدائرة المزدوجة ، الدارة القصيرة