

République l'Algérienne Démocratique et Populaire

**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la
Recherche Scientifique**



CENTRE UNIVERSITAIRE D'EL-OUED

INSTITUT DES SCIENCES ET TECHNOLOGIE

Mémoire de fin d'étude

EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE

LICENCE ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologies

Spécialité : Génie électrique

Option : contrôle et diagnostic des systèmes électriques

Thème

**Synthèse bibliographique et méthodes de
diagnostic des défauts de court-circuit de
la machine asynchrone.**

Réalisé par :

bessous

nouredine

mohamed seghir hada

Mohcen Menacer

Encadré par :

ammari souheib

PROMOTION 2010

Sommaire

Dédicace

Remerciement

Introduction générale.....1

Chapitre I : Etude Bibliographique

I-1- Introduction..... 3

I-2- Définition de la machine asynchrone.....3

I -3-Structure de la machine asynchrone.....3

I.3.1. Le stator.....4

I.3.2. Le rotor.....4

I.3.2.1. Le rotor bobiné.....5

I.3.2.2 Le rotor en cage d'écureuil.....6

I.3.3.Les organes mécaniques.....6

I.4.Les causes des défauts de la MAS.....6

I.4.a. Les générateurs de pannes ou initiateur de défauts.....6

I.4.b .Les amplificateurs de défauts.....7

I.4.c. Les vices de fabrication et les erreurs humaines.....7

I.5.Les défaillances de la machine asynchrone.....7

I.5.1.Les défauts de statoriques.....8

I.5.1.1.Court-circuit entre spires.....8

I.5.1.2.Court-circuit entre phases.....8

I.5.1.3.Défaut phase-terre.....9

I.5.1.4.Défauts d'isolant dans un enroulement.....9

I.5.1.5.Défauts de circuit magnétique.....10

I.5.2.Les défauts rotoriques.....10

I.5.2.1.Défaut de la cassure de barre.....10

I.5.2.2.Défaut de la rupture des anneaux.....11

I.5.2.3.Défaut d'excentricité.....12

I.5.2.3.a. L'excentricité statique.....12

I.5.2.3.b .L'excentricité dynamique.....	12
I.5.2.3.c. l'excentricité mixte.....	12
I.5.3.Défaillances d'ordre mécanique.....	12
I.5.3.1.Défauts roulements.....	12
I.6.Les méthodes de diagnostic des défauts.....	13
I.6.1. Diagnostic par analyse de courant statoriques.....	13
I.6.2.Diagnostic par analyse des flux.....	14
I.6.3.Diagnostic par identification paramétrique.....	14
I.6.4.Diagnostic par analyse vecteur de park.....	14
I.6.5.Diagnostic par analyse le couple électromagnétique.....	14
I.7. Conclusion.....	15
Chapitre II: Modélisation de la machine asynchrone	
II.1.Introduction.....	17
II.2. Hypothèses simplificatrices.....	17
II. 3.Les tensions statoriques.....	18
II.3.1. Inductances mutuelles statorique et rotoriques.....	20
II.4. Modèle de Park.....	21
II.4.1. Présentation du modèle.....	21
II.4.2. Application du modèle à la machine asynchrone triphasée.....	21
II.5. Equations mécaniques.....	23
II.6. Equations rotoriques.....	23
II.7.Bloc de simulation.....	24
II.8.Résultats de simulation.....	25
II.9.Conclusion.....	28
Chapitre III: Application, résultats et discussions	
III.1.Introduction.....	30
III.2.Résultas de la simulation du défaut de court-circuit.....	31
III.2.1.Enroulement avec 2 spires court-circuitées ($T_r=1N.m$).....	31
III.2.2.Enroulement avec 2 spires court-circuitées ($T_r=3N.m$).....	32
III.2.3.Enroulement avec 20 spires court-circuitées ($T_r=3N.m$).....	32
III.3.Le déséquilibre.....	34

III.3.1.Etude du régime permanent alimenté par un système de tension triphasé équilibré.....	34
III.3.1.1.Expression des tensions.....	34
III.3.2.Etude du régime permanent alimenté par un système de tension triphasé déséquilibré.....	35
III.3.2.1.Expression des tensions.....	35
III.4.Conclusion.....	37
Conclusion Générale.....	38

INTRODUCTION GENERALE

Ce travail entre dans le cadre du diagnostic des défauts dans les machines électriques et spécialement le moteur asynchrone triphasé à cage d'écureuil. Le moteur asynchrone à cage est un composant clé de la plupart des équipements industriels, du fait de sa grande robustesse et son faible coût. Il est en effet, omniprésent dans les secteurs de pointes comme l'aéronautique, le nucléaire, la chimie,...

Malgré le fait que la machine asynchrone à cage soit réputée pour être la plus robuste des machines électriques, un certain nombre de contraintes de différentes natures (thermiques, électriques, mécaniques et d'environnement) peuvent affecter la durée de vie de celle-ci en faisant apparaître des pannes dans le stator et le rotor. Ces pannes occasionnent des pertes économiques considérables. Il est impératif donc de mettre en oeuvre des systèmes de surveillance adéquats afin d'éviter les arrêts imprévus. L'objectif principal de notre travail est l'étude des défauts statoriques tels que les Courts-circuits que leurs effets sur les grandeurs électriques et mécaniques du moteur asynchrone triphasé à cage.

Pour cela, notre mémoire sera organisé comme suit :

Dans un premier chapitre, nous rappelons le contexte sur l'étude bibliographique. Le deuxième chapitre est consacré à la présentation de la modélisation de la machine. Dans le troisième chapitre et afin d'expliquer les effets des cas déséquilibre et courts-circuits sur le couple, la vitesse et le courant statorique, une étude précise du défaut statorique, sera présentée. Nous montrerons aussi les résultats de simulation et d'expérimentation d'un moteur asynchrone de 3kW, dans les différentes conditions de fonctionnement, avec et sans défauts.

Enfin, on terminera ce mémoire par une conclusion générale

Chapitre 1:Etude *Bibliographique*

I.1. Introduction.

Nous allons nous intéresser exclusivement aux machines asynchrones triphasées. Les moteurs monophasés surtout utilisés pour les applications domestiques représentent peu d'intérêt pour le diagnostic.

Afin de synthétiser la problématique du diagnostic, nous présenterons d'abord, à travers ce qui suit, la construction du moteur asynchrone triphasé de manière succincte et l'état de l'art dans ce domaine avec en prime d'une part les méthodes qui permettraient d'affiner le traitement des informations contenues dans les grandeurs représentant le moteur et d'autre part de trouver de quelles manières les défauts seront diagnostiqués [BES07].

I.2. Définition de la machine asynchrone.

La machine asynchrone, connue également sous le terme « anglo-saxon », la machine à induction, est une machine électrique à courant alternatif sans connexion entre le stator et le rotor. Les machines possédant un rotor « en cage d'écureuil » sont aussi connues sous le nom de machines à cage ou machines à cage d'écureuil ou à rotor bobiné. Le terme asynchrone provient du fait que la vitesse de ces machines n'est pas forcément proportionnelle à la fréquence des courants qui les traversent.

I.3. Structure 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, et définit deux types de rotor : bobiné ou à cage d'écureuil.

I.3.1. Le stator.

Les différents types de moteurs asynchrones ne se distinguent que par le rotor ; dans tous les cas le stator reste, au moins dans son principe, le même. Il est constitué d'un enroulement bobiné réparti dans les encoches du circuit magnétique statorique. Ce circuit magnétique est constitué d'un empilage de tôles dans lesquelles sont découpées des encoches parallèles à l'axe de la machine.

Le biais d'un convertisseur d'énergie adapté pour permettre une variation de vitesse.

Les enroulements statoriques sont libres de couplage. Chacune est accessible par ses deux bornes de connexion.

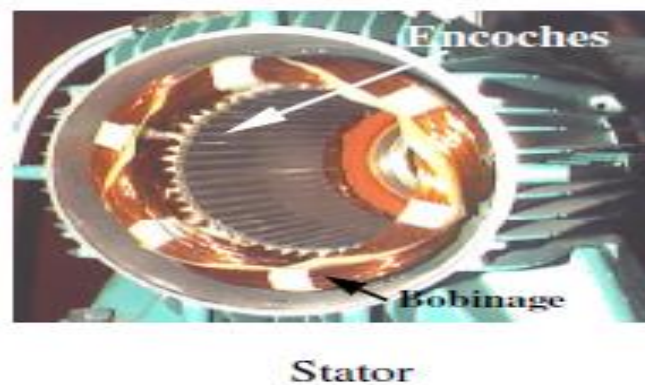


Figure I.1. Vue schématique en perspective du stator (circuit magnétique, conducteurs d'encoches, tête de bobines).

I.3.2. Le rotor.

Le rotor n'est liée électriquement à aucune source d'énergie ce qui simplifie beaucoup sa construction. Il est constitué comme le stator de tôles empilées et habituellement du même matériau.

Dans les petits moteurs, les tôles sont découpées dans une seule pièce et assemblées sur un arbre.

Dans les plus gros moteurs, chaque laminage est constitué de plusieurs sections montées sur un noyau. Les enroulements rotoriques sont toujours en court-circuit, et ces derniers sont trouvés en deux types, rotor à cage et rotor bobiné.

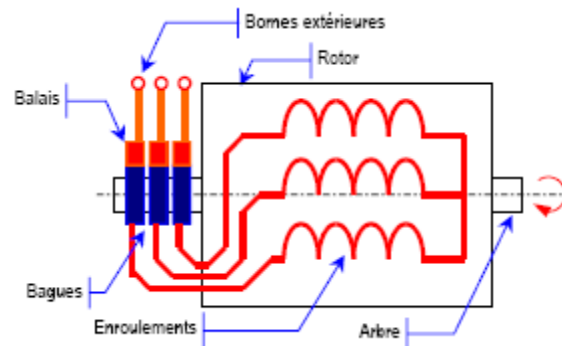


Figure I.2. Vue schématique en perspective du rotor.

I.3.2.1. Le rotor bobiné.

Le rotor est bobiné de manière à obtenir aussi p pair de pôles. Mais à la différence du rotor à cage, le rotor est mis en court-circuit par l'extérieur à travers de trois bornes liées électriquement par des contacts glissants appelés bagues réalisées en laiton sur lesquelles s'appliquent des balais de graphite.

I.3.2.2 Le rotor en cage d'écureuil.

La partie électrique du rotor est constituée des barres conductrices en cuivre ou en aluminium placées dans les encoches rotoriques.

Elles sont mises en court circuit permanent par deux anneaux de court-circuit.

Dans le cas des rotors à cage d'écureuil, les encoches peuvent être semi-ouvertes ou fermées. Les enroulements sont constitués de barres court-circuitées par un anneau terminal placé à chaque extrémité du rotor. Les conducteurs sont généralement réalisés par coulage d'un alliage d'aluminium, ou par des barres massives de cuivre où, à l'occasion, en laiton préformées et frettées dans les tôles du rotor.

Il n'y a généralement pas, ou très peu, d'isolation entre les barres rotoriques et les tôles magnétiques. Leur résistance est suffisamment faible pour que les courants ne circulent pas dans les tôles, sauf lorsqu'il y a une rupture de barre [BAC02].

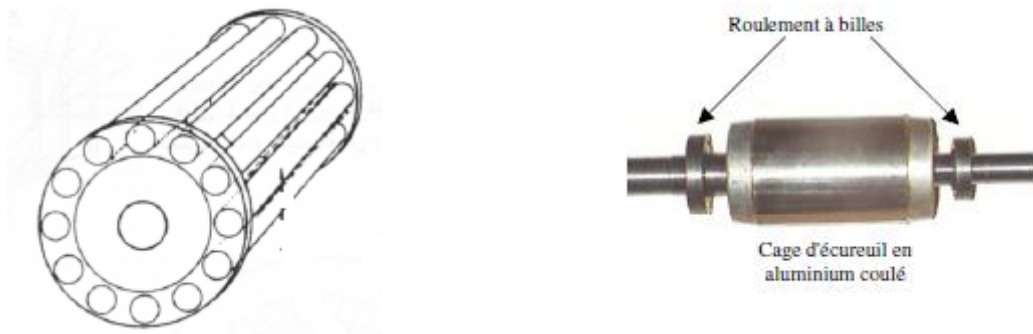


Figure I.3. Le rotor à cage d'écureuil.

I.3.3. Les organes mécaniques.

La carcasse sert de support, elle joue le rôle d'enveloppe et assure la protection contre l'environnement extérieur. L'arbre est un organe de transmission. Il comprend une partie centrale qui sert de support au corps du rotor et un bout d'arbre sur lequel est fixé un demi accouplement. Il est généralement constitué en acier moulé ou forgé, son dimensionnement est fonction des efforts de flexion (force centrifuge qui s'exerce sur lui, attraction magnétique radiale, etc...), des efforts radiaux et tangentiels dus aux forces centrifuges, des efforts de torsion (couple électromagnétique transmis en régime permanent, transitoire). Il est supporté par un ou plusieurs paliers.

Ces paliers soutiennent le rotor et assurent la libre rotation. Le second palier est libre pour assurer les dilatations thermiques de l'arbre.

Une isolation électrique de l'un des paliers assure l'élimination des courants dans l'arbre dû aux dissymétries des réluctances du circuit magnétique.

I.4. Les causes des défauts de la MAS.

Les causes des défauts sont multiples. Elles peuvent être classées en trois groupes :

I.4.a. Les générateurs de pannes ou initiateur de défauts.

Surchauffe de moteur, défaut électrique (court-circuit), problèmes mécaniques, rupture de fixations, problème d'isolation, survolage d'alimentation.....

I.4.b. Les amplificateurs de défauts.

Surcharge fréquente, vibrations mécaniques, environnement humide, alimentations perturbée
(instabilité de tension ou de la Fréquence),

échauffement permanent mauvais graissage, vieillissement

I.4.c. Les vices de fabrication et les erreurs humaines.

Défauts de fabrication, défektivité des composants, protections inadaptées, mauvais dimensionnement de la machine

Pour le stator, les effets sont principalement dus à un problème :

Thermique (surcharge,...), électrique (déséquilibre,...), mécanique (bobinage,...) et environnemental (agression, ...).

Pour le rotor, les effets sont essentiellement dus à un problème :

Thermique (surcharge,...), électromagnétique (Force,...), résiduel (déformation,...), dynamique (arbre de transmission,...), mécanique(roulement,...) et environnemental (agression,...).

I.5.Les défaillances de la machine asynchrone.

Bien que la machine asynchrone à cage d'écureuil ou rotor bobiné soit réputée robuste, elle peut parfois présenter différents types de défauts.

Ces défauts peuvent être soit d'origine électrique, soit d'origine mécanique. Un problème minime à l'étape de fabrication peut être à l'origine d'un défaut tout comme une utilisation non conforme de la machine.

Certaines fois, nous pouvons aussi incriminer le milieu dans lequel la machine est utilisée (milieux corrosifs et/ou chimiques hostiles).[2004 gaten].

L'apparition d'un défaut au niveau des circuits électriques statoriques ou rotoriques de la machine asynchrone peut avoir des origines diverses.

Nous pouvons citer, par exemple, les défauts de type courts-circuits entre-spires qui apparaissent à l'intérieur des encoches statoriques.

Ce type de défaut peut être causé par une dégradation des isolants des spires du bobinage statorique.

Le défaut le plus couramment rencontré reste encore la fusion d'un fusible de protection.

Ces défauts peuvent être détectés par une analyse harmonique des courants absorbés par la machine.

I.5.1.Les défauts de statoriques.

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

-  Un court-circuit entre spires.
-  Un court-circuit entre phases.
-  court-circuit phase- terre.
-  Défaut d'isolant.
-  Ouverture d'une phase.
-  Défauts de circuit magnétique.

I.5.1.1.Court-circuit entre spires.

Un court-circuit entre spires de la même phase est un défaut assez fréquent. Cette défaillance a pour origine un ou plusieurs défauts d'isolant dans l'enroulement concerné.

Il entraîne une augmentation des courants statorique 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 du bobinage et, de ce fait, une dégradation accélérée des isolants, pouvant provoquer ainsi, un défaut en chaîne. Par contre, le couple électromagnétique moyen délivré par la machine reste sensiblement identique hormis une augmentation des oscillations proportionnelle au défaut.

I.5.1.2.Court-circuit entre phases.

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

L'apparition d'un court-circuit proche de l'alimentation entre phases, induirait des courants très élevés qui conduiraient à la fusion des conducteurs d'alimentation et/ou à la disjonction par les protections.

D'autre part, un court-circuit proche du neutre entre deux phases engendre un déséquilibre sans provoquer la fusion des conducteurs.

Les courants statorique 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 [PEN94].

I.5.1.3.Défaut phase-terre.

Le défaut d'une phase à la terre a généralement un potentiel flottant, mais pour des raisons de liaisons mécaniques, Il est souvent relié à la masse. Si le potentiel est flottant, un court-circuit entre l'enroulement et le bâti n'a pas d'importance du point de vue matériel, excepté les effets capacitifs, le bâti prend alors le potentiel de l'enroulement à l'endroit du court-circuit.

Par contre, au niveau de la sécurité des personnes, ce type de défaut peut être très dangereux et il est alors nécessaire de mettre en place des dispositifs de protection (disjoncteurs différentiels).

En présence de ce type de défaillance, la tension de la phase concernée ne change pas. Cependant le courant circulant dans cette phase augmente avec la réduction de la résistance et de l'inductance. Cette augmentation du courant se traduit par une augmentation de la température pouvant entraîner des défauts d'isolant dans l'enroulement.

De plus, cette défaillance va générer une composante homopolaire entraînant l'apparition d'un couple pulsatoire. Une mesure du courant de fuite pourrait permettre de détecter ce type de défaut [BOU01].

I.5.1.4.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 constituants du moteur.

Or les matériaux d'isolation ont une limite de température, de tension et mécanique. De ce fait, si l'environnement de travail d'un matériau d'isolation dépasse une de ces limites, ce matériau se dégrade de manière prématurée ou accélérée, puis finit 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 [ABE02] dégradation de l'isolant à la fabrication tension de l'enroulement supérieure à la limite du matériau d'isolation. courant élevé dans l'enroulement dû à un court-circuit, un défaut du convertisseur, une surcharge. Ceci entraîne une élévation de la température dégradant prématurément le matériau d'isolation vibrations mécaniques. vieillissement naturel des isolants. Tous les matériaux isolants ont une durée de vie limitée. Même dans une utilisation 'normale', l'isolant finit naturellement par se dégrader. fonctionnement dans un environnement sévère.

I.5.1.5.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, etc.

I.5.2.Les défauts rotoriques.

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

-  Défaut de la cassure de barre:
-  Défaut de la rupture des anneaux:
-  Défaut d'excentricité:

I.5.2.1.Défaut de la cassure de barre.

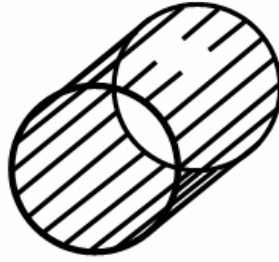
La rupture de barres d'une machine asynchrone est un des défauts le plus couramment étudié en laboratoire en raison à sa simplicité de réalisation mais non nécessairement le plus probable. Ce défaut induit des modifications dans les courants du stator et entraîne donc l'apparition d'harmoniques caractéristiques dans le spectre de ce signal En effet, lors de l'apparition d'une rupture de barre, des harmoniques de flux sont produits et induisent des harmoniques dans les courants des enroulements statoriques aux fréquences [OUM05],[BEN99]:

$$f_b = (1 \pm 2kg) f_s.$$

ou :

f_b : La fréquence supplémentaire dans le courant d'une phase statorique à cause de cassure de barre.

f_s : Fréquence fondamentale; g : le glissement; $k= 1.2...$

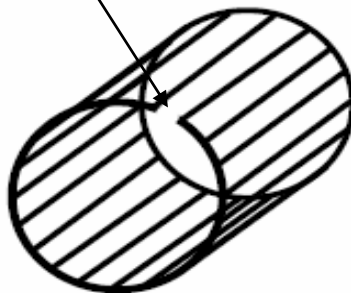


FigureI.4. Rotor à cage d'écureuil à deux barres cassées.

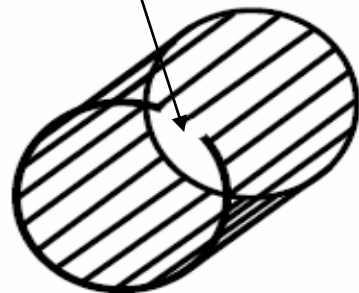
I.5.2.2.Défaut de la rupture des anneaux.

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. Ces portions d'anneaux de court-circuit véhiculent des courants plus importants que ceux des barres rotoriques. De ce fait, un mauvais dimensionnement des anneaux, une détérioration des conditions de fonctionnement (température, humidité,...) ou une surcharge de couple et donc de courants, peuvent entraîner leur cassure. La rupture d'une portion d'anneau déséquilibre la répartition des courants dans les barres rotoriques et de ce fait, engendre un effet de modulation d'amplitude sur les courants statoriques similaire à celui provoqué par la cassure de barres [TOL95].

Une portion d'anneau cassé



Deux portions d'anneaux cassés



FigureI.5. Illustration de la cassure d'anneau de court-circuit.

I.5.2.3.Défaut d'excentricité.

Parfois, la machine électrique peut être soumise à un décentrement du rotor, se traduisant par des oscillations de couple. Ce phénomène est appelé excentricité (statique et dynamique) dont l'origine peut être liée à un positionnement incorrect des paliers lors de l'assemblage, à un défaut roulement (usure), à un défaut de charge, ou à un défaut de fabrication (usinage) [BES07]. Trois cas d'excentricité sont généralement distingués [OND06]:

I.5.2.3.a. L'excentricité statique. Le rotor est déplacé du centre de l'alésage stator mais tourne toujours autour de son axe

I.5.2.3.b. L'excentricité dynamique. Le rotor est positionné au centre de l'alésage mais ne tourne plus autour de son axe;

I.5.2.3.c. l'excentricité mixte. Associant les deux cas précédemment cités. On peut représenter l'excentricité statique et dynamique de la manière suivante :



(a) Excentricité statique



(b) Excentricité dynamique
(Plusieurs positions du rotor au cours de la rotation)

Figure I.6. Les différents types d'excentration rotorique.

I.5.3. Défaillances d'ordre mécanique.

Les défaillances d'ordre mécaniques sont, en général, les plus rencontrées parmi tous les défauts que compte la machine asynchrone. Ces défauts peuvent apparaître au niveau des roulements à billes, des flasques ou encore de l'arbre du moteur.

I.5.3.1. Défauts roulements.

Les roulements à billes jouent le rôle d'interface électromécanique entre le stator et le rotor. En outre, ils représentent l'élément de maintien de l'axe de la machine permettant d'assurer une bonne rotation du rotor, ce type de défaut est le plus fréquent sur les machines de fortes puissances.

Il est généralement lié à l'usure du roulement et plus précisément une dégradation des billes, ou de la bande de roulement. Ses causes possibles sont :

- La température de fonctionnement élevée.
- La perte de lubrification;
- L'huile contaminée (par des paillettes métalliques issues de la dégradation des billes ou de la bande de roulement).
- Le défaut de montage
- Les courants d'arbres.

Les conséquences directes de cette défaillance sur les roulements sont .

- L'usure due au vieillissement.
- Des trous dans les gorges de roulement intérieures et extérieures.
- L'ondulation de leur surface de roulement.
- L'attaque des billes.
- La corrosion due à l'eau.
- Défaut de graissage, problème dû à la température.
- Décollement, effritement de surface provoqué par une surcharge.

Sur le système, ce type de défaut se traduit par des oscillations du couple de charge, une apparition de pertes supplémentaires et un jeu entre la bague interne et la bague externe du roulement entraînant des vibrations par les déplacements du rotor autour de l'axe longitudinale de la machine [SCH99]. Dans le cas le plus défavorable, la présence d'un roulement défectueux peut amener au blocage du moteur

I.6. Les méthodes de diagnostic des défauts.

I.6.1. Diagnostic par analyse de courant statoriques.

La mesure des signaux puis leur traitement dans le domaine fréquentiel ne peut servir, que si les composantes fréquentielles définies pour chaque défaut sont connues. Il y a plusieurs techniques pour effectuer l'analyse des courant.

La plus utilisée est de réaliser une analyse fréquentielles (FFT par exemple) (Motor Current Signature Analyse) directement sur les courants statorique i_{sa} , i_{sb} ou i_{sc} .

Cette méthode, connue sous le nom de MCSA, est largement employée depuis ces dernières années .Elle permette d'obtenir de bons résultats, elle consiste à affecter à chaque défaut une

signature spectrale le caractérisant, dans le même contexte, il a été démontré que la sévérité du défaut est fonction de l'amplitude des composantes fréquentielles qu'il génère et notamment, des raies déjà présentes dans le moteur sain [DID04].

I.6.2.Diagnostic par analyse des flux.

La conversion électromécanique de l'énergie est localisée dans l'entrefer. Cette conversion est donc affectée par tout déséquilibre magnétique, mécanique, électrique ou électromagnétique au rotor ou au stator. Le flux d'entrefer et par-là même l'induction magnétique dans cet entrefer, le flux embrassé dans les enroulements statoriques ou encore le flux de fuite dans l'axe du rotor sont des paramètres qui, à cause de leur sensibilité à tout déséquilibre de la machine, méritent d'être analysés [DID 04].

I.6.3.Diagnostic par identification paramétrique.

Le modèle de la machine est caractérisé par des paramètres électriques et mécaniques. A partir de l'acquisition des grandeurs électriques sur une machine asynchrone, l'identification de ces paramètres permet de construire un modèle fidèle à la machine réelle. En diagnostic, le suivi de ces paramètres permet de caractériser les défauts avec précision. Deux types de paramètres sont à identifier :

- les paramètres mécaniques
- les paramètres électriques

I.6.4.Diagnostic par analyse vecteur de park.

On va étudier la transformation de Park qui fait simplifier les tâches c'est à dire au lieu de 3 phases (ou 3 axes), on a 2 axes perpendiculaire l'un à l'autre , donc nous avons dans ce cas deux courants $I_{sd}(t)$ et $I_{sq}(t)$ cette dernière méthode est basée sur la représentation du courant $I_{sq}(t)$ en fonction $I_{sd}(t)$, avec l' information , ce que chaque défaut a un trajectoire déterminé.

I.6.5.Diagnostic par analyse le 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.

I.7. Conclusion.

Ce chapitre est un prétexte à la présentation des notions très importantes en diagnostic, tels que les défauts qui peuvent affecter la machine asynchrone, leurs causes et leurs signatures, ainsi que les techniques utilisées en diagnostic. Comme nous avons mentionné précédemment, notre travail est consacré à l'étude et à la détection de court-circuit statorique. Pour cela, il faut disposer d'un bon modèle mathématique, décrivant le comportement de la machine dans l'état sain et avec défaut. Ceci fait l'objet du chapitre suivant.

Chpitre2 : Modélisation de la machine asynchrone

II.1.Introduction.

La machine asynchrone, malgré ses qualités, peut présenter des défauts structurels parmi lesquels la rupture de barre ou d'anneaux – dans notre travail nous nous intéresserons aux courts-circuits statoriques. Pour ce fait, il convient de développer un modèle qui tient compte de la structure du rotor.

La modélisation décrite dans ce chapitre a pour objet de permettre la présentation d'une manière précise. Dans cette perspective, le développement du modèle est basé sur les circuits maillés ce qui facilitera la simulation.

II.2. Hypothèses simplificatrices.

Pour cette mise en équations, on considère que la machine est triphasée au stator et symétrique et on admet que le rotor à cage est formé de (N_b) barres.

la machine est supposée en régime linéaire (non saturé), sans perte fer ni effet de peau. Nous supposant que le bobinage est répartie de manière a donné une (fmm) sinusoïdale. s'il est alimenté par des courant sinusoïdaux.

Nous supposons aussi que nous travaillant en régime non saturé, nous négligeront le phénomène d'hystérésis, les courant de Foucault et l'effet de peau.

On considère chaque enroulement séparément ; et on traite le courant dans chaque barre de rotor comme variables indépendante. On néglige l'effet d'encoche.

On admettra de plus que la force électromotrice, engendrée par les enroulements statoriques et rotoriques, est a répartition sinusoïdale le long de l'entrefer. Cette hypothèse, jointe à la constance de la perméance de l'entrefer, conduit à des

expressions assez simples des valeurs des inductances de la machine en fonction des paramètres de celle-ci (longueur, rayon, etc.).

Enfin le régime homopolaire est nul puisque le neutre n'est pas relié.

II. 3. Les tensions statoriques.

La loi de Faraday permet d'écrire :

$$V = RI + d\Phi/dt \quad \dots\dots\dots (II.1)$$

Nous pouvons donc écrire les équations des tensions statorique sous la forme vectorielle suivante:

$$[V_{3s}] = [R_s] \cdot [i_{3s}] + \frac{d}{dt} [\Phi_{3s}] \quad \dots\dots\dots (II.2)$$

Ou:

$[R_s]$: représente la résistance statorique, les résistances statoriques sont les mêmes pour toutes les phases.

Et le flux au stator est donné par :

$$[\Phi_{3s}] = [L_s] \cdot [i_{3s}] + [M_{sr}] \cdot [I_{3r}] \quad \dots\dots\dots (II.3)$$

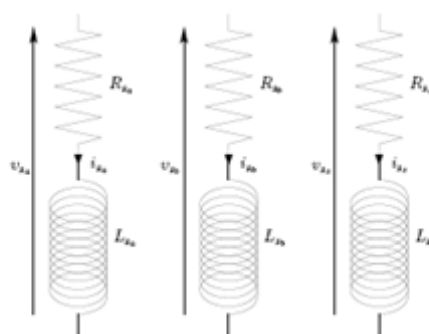


Figure II.1. circuit équivalent du stator.

Le couplage entre le rotor et le stator intervient dans les équations des flux, en effet chaque flux comporte une interaction avec les courants de toutes les phases y compris la sienne.

Avec : $[I_{3r}] = [I_{ra} \ I_{rb} \ I_{rc}]^t$

I_{ij} : représente le courant circulant dans les enroulements rotoriques.

Et :

$$L_s = \begin{bmatrix} L_s & M_s & M_s \\ M_s & L_s & M_s \\ M_s & M_s & L_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{aa} & m_{ab} & m_{ac} \\ m_{ba} & L_{bb} & m_{bc} \\ m_{ca} & m_{cb} & L_{cc} \end{bmatrix}$$

$[L_s]$: est la matrice des inductances propres statorique de dimensions (3.3) dont les paramètres sont les inductances propres de chaque phase ($L_{ii}=L_s$) et les mutuelles entre phases statoriques ($m_{ij}=M_s$)

Ou :

$$L_s = l_{sp} + l_s = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{\mu_0}{e} \cdot \frac{N_s^2}{p^2} \cdot L \cdot R + l_s \quad \dots\dots\dots (II.4)$$

$$M_s = -\frac{l_{sp}}{2} \quad \dots\dots\dots (II.5)$$

Avec :

l_{sp} : inductance propre statorique (inductance principale d'une phase statorique).

l_s : inductance de fuite statorique ; correspondant aux flux des harmoniques d'espace dans l'entrefer, flux de fuite d'encoches, flux de fuite de têtes de bobines.

e : longueur de l'entrefer.

L : longueur utile du stator.

R : rayon d'alésage du stator.

p : nombre de paire de pôles.

Les vecteurs $[V_{3s}]$, $[i_{3s}]$ et $[\Phi_{3s}]$ représentent respectivement les vecteurs tensions simples, Courants de ligne et flux statorique.

$$L_{aa}=L_{sp}+L_{fs} \dots\dots\dots (II.6)$$

Les enroulements statoriques étant décalés d'un angle électrique ($2\pi/3$), d'où on obtient les inductances mutuelles entre enroulements statorique par les expressions suivantes :

$$m_{ab}= L_a \cos (2\pi/3) = - L_a/2 \dots\dots\dots (II.7.1)$$

$$m_{ac}= L_a \cos (2\pi/3) = - L_a/2 \dots\dots\dots (II.7.2)$$

$$m_{bc}= L_a \cos (2\pi/3) = - L_a/2 \dots\dots\dots (II.7.3)$$

II.3.1. Inductances mutuelles statorique et rotoriques.

L'inductance mutuelle entre l'enroulement statorique et les mailles rotoriques est une matrice de 3×3 , en fonction de (θ) : l'écart angulaire entre l'axe du rotor et l'axe de référence du stator.

$$[M_{sr}] = M_{sr} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta + \alpha) & \dots & \cos(\theta + k\alpha) & \dots \\ \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta + \alpha - 2\pi/3) & \dots & \cos(\theta + k\alpha - 2\pi/3) & \dots \\ \cos(\theta + 2\pi/3) & \cos(\theta + \alpha + 2\pi/3) & \dots & \cos(\theta + k\alpha + 2\pi/3) & \dots \end{bmatrix} \dots\dots\dots (II.8)$$

M_{sr} : c'est la valeur maximale de la mutuelle inductance stator- rotor elle est donnée par :

$$M_{sr} = \frac{4 \cdot \mu_0 \cdot N_s \cdot r \cdot l}{\pi \cdot e \cdot p^2} \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot p}{n}\right) \dots\dots\dots (II.9)$$

Ou la matrice $[M_{rs}]$ est la transposée de $[M_{sr}]$

II.4. Modèle de Park.

II.4.1. Présentation du modèle.

La représentation de Park. Ou représentation vectorielle qui est ancienne (1929), représente la projection des trois phases de la machine sur un repère biphasé orthogonal, l'équation de cette transformation est sous la forme suivante :

$$[X_{sodq}] = [X_{so} \quad X_{sd} \quad X_{sq}]^t = [P_3(\theta_s)] \cdot [X_{3s}]$$

Ce passage est réalisé en utilisant la matrice de transformation $[P_3(\theta_s)]$ de Park. Représentée ci dessous qui repose sur la conservation des forces magnétomotrices :

$$P_3(\theta_s) = \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \cos(\theta_s) & -\sin(\theta_s) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \cos(\theta_s - 2\pi/3) & -\sin(\theta_s - 2\pi/3) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \cos(\theta_s + 2\pi/3) & -\sin(\theta_s + 2\pi/3) \end{pmatrix} \dots\dots\dots (II.10)$$

θ_s : est l'angle électrique entre la référence de park et la première phase du stator

Cette transformation est orthonormée, ce qui implique que son inverse est égale à sa transposée, elle conserve la puissance instantanée

La composante homopolaire s'annule si la machine est supposée équilibrée ou si le couplage est en étoile sans neutre relié.

II.4.2. Application du modèle à la machine asynchrone triphasée.

La mise en équation des machines à induction triphasées a aboutit à des équations différentielles à coefficients variables. L'étude analytique du comportement de la machine est alors relativement laborieuse, vu le grand nombre de variables. On utilise alors la transformation de Park qui permet de décrire le comportement de la machine à l'aide d'équations différentielles à coefficient constants et ce en éliminant l'angle (θ) des flux statoriques (ou rotoriques) et par la même exprimé ceux-ci en fonction de leurs propres courants statoriques (ou rotoriques) respectivement.

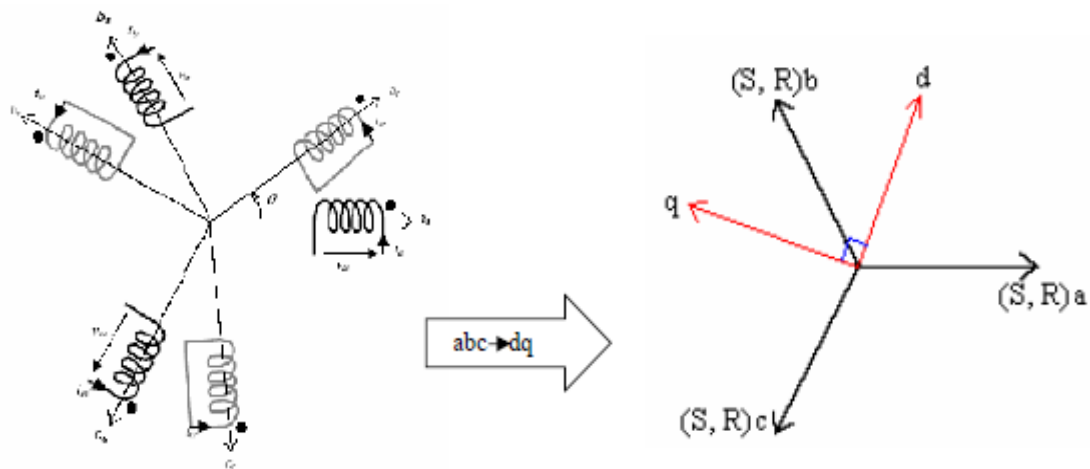


Figure II.2. les repères de la transformation de Park.

Le choix des angles de transformation pour chaque ensemble de grandeurs (statoriques et rotoriques) .si l'on note par θ_s (par θ_r) l'angle de la transformation de park des grandeurs statorique (rotorique) il existe une relation qui les lie et qui simplifie les équations et par la même le modèle final. Les repères de la transformation de park des grandeurs statoriques et celle des grandeurs rotoriques doivent coïncider pour simplifier ces équations .ceci se fait en liant les angles θ_s et θ_r par la relation :

$$\theta_s = \theta + \theta_r$$

Donc à partir de l'équation des tensions et on utilisant la transformation de park on obtient :

$$[P_3(\theta_s)] \cdot [V_{sodq}] = [R_s] \cdot [P_3(\theta_s)] \cdot [i_{sodq}] + \frac{d}{dt} ([P_3(\theta_s)] \cdot [\psi_{sodq}]) \quad \dots\dots\dots (II.11)$$

Ainsi :

$$[V_{sodq}] = [R_s] \cdot [i_{sodq}] + \frac{d}{dt} [\psi_{sodq}] + \frac{d\theta_s}{dt} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot [\psi_{sodq}] \quad \dots\dots\dots (II.12)$$

L'interprétation de la transformation de Park devient simple .si on laisse de coté la composante homopolaire étant donné que la somme des composantes (odq) est nulle, d'où la troisième équation, toujours vérifiée car identiquement nulle, devient inutile.

II.5. Equations mécaniques.

L'équation mécanique du mouvement dépend des caractéristiques de la charge qui peut différer largement d'une application a une autre .nous supposons ici pour simplifier, que le couple qui s'oppose a celui produit par la machine consiste seulement en un couple dû a l'inertie du rotor et un couple externe de charge qui est connu explicitement dans le cas de l'équation mécanique du mouvement.

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

$$\text{et } \frac{d\theta_r}{dt} = \omega_r$$

Où θ_r l'angle de déplacement du rotor. J représente le moment d'inertie de la machine étudiée, ω_r sa vitesse rotorique, C_{em} son couple électromagnétique, f son frottement visqueux et C_r son couple de charge.

Le couple électromagnétique est déduit de la co-énergie magnétique W_{co} à l'aide de l'équation suivante:

$$C_{em} = \left[\frac{\partial W_{co}}{\partial \theta_r} \right]_{(I_s, I_r \text{ constants})} \quad (II,14)$$

II.6. Equations rotoriques.

Pour le rotor et de même manière que le stator, on écrit :

$$[V_r] = 0 = [R_r][I_r] + \frac{d}{dt}[\Phi_r] \dots \dots \dots (II.15)$$

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s I_{sd} + \frac{d}{dt} \Phi_{sd} - \omega_s \Phi_{sq} \\ V_{sq} = R_s I_{sq} + \frac{d}{dt} \Phi_{sq} + \omega_s \Phi_{sd} \\ 0 = R_r I_{rd} + \frac{d}{dt} \Phi_{rd} - (\omega_s - \omega) \Phi_{rq} \\ 0 = R_r I_{rq} + \frac{d}{dt} \Phi_{rq} + (\omega_s - \omega) \Phi_{rd} \end{cases} \dots \dots \dots (II.16)$$

II.7. Bloc de simulation.

Pour réaliser cette simulation nous traduisons le modèle représenté par les équations précédentes sous forme de structure en schéma-bloc que nous présentons par la figure (2.6)

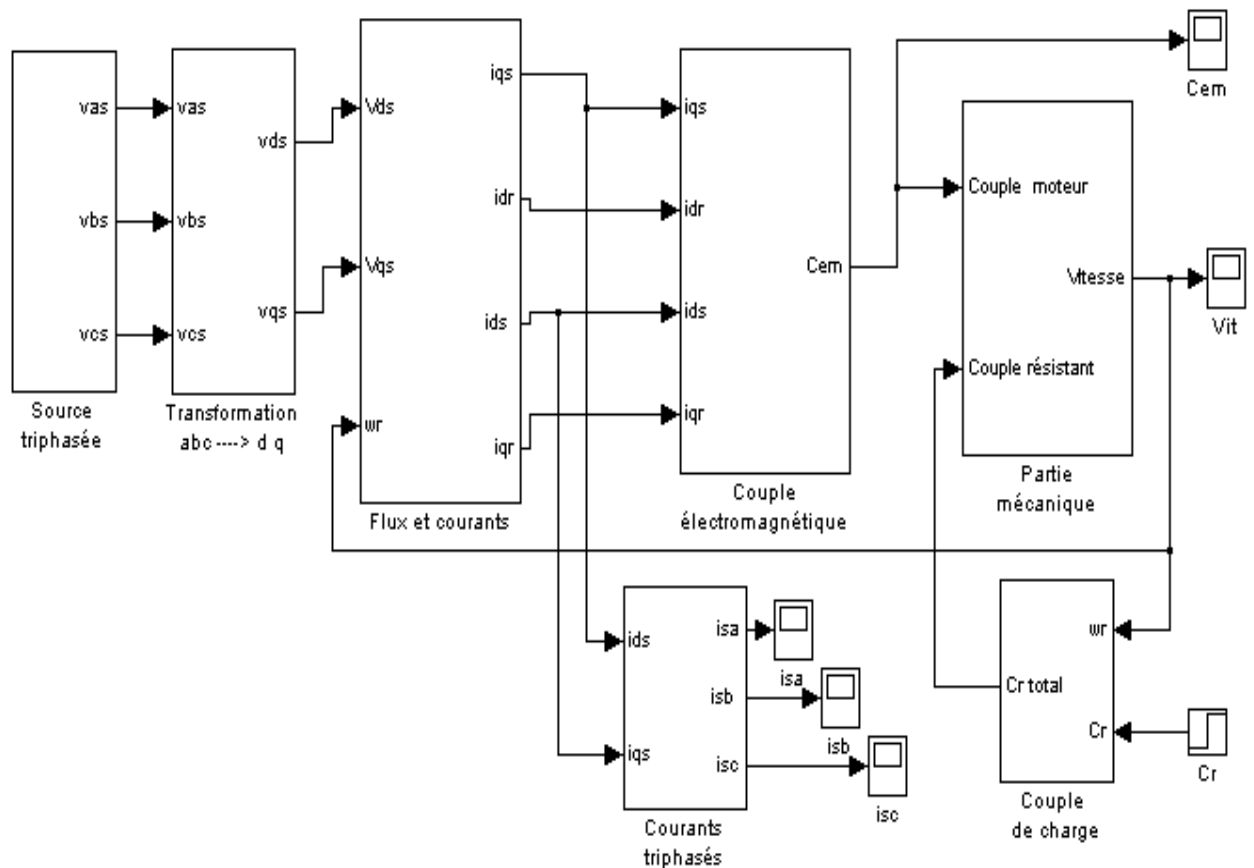
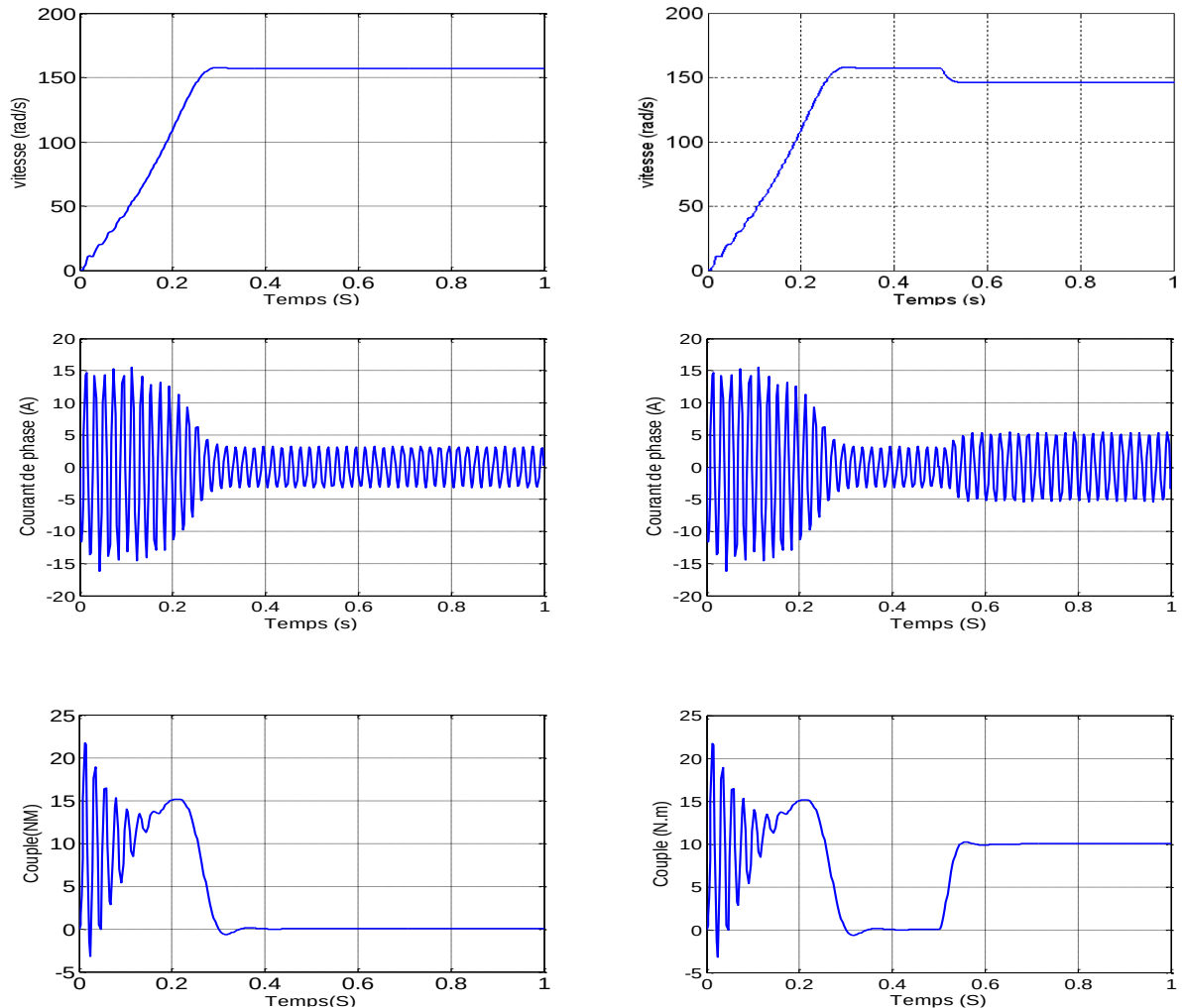


Figure II.3. Modèle SIMULINK d'un moteur asynchrone.

II.8. Résultats de simulation.

Les figures suivantes illustrent les simulations effectuées sur une MAS dont les paramètres sont donnés en annexe. Ces figures présentent les principales caractéristiques de la MAS pour un fonctionnement à vide, puis en charge.

Démarrage à vide $C_r = 0 \text{ N.m}$ Démarrage en charge $C_r = 5 \text{ N.m}$ **Figure II.4.** Fonctionnement à vide et en charge de la MAS.

La figure (II.4) présente les résultats de simulation de la machine asynchrone alimentée directement par le réseau standard « 220/380V ,50HZ ». Dans un premier lieu sans l'application de perturbation et un autre essai avec l'application de la perturbation.

L'examen des courbes permet de constater que le démarrage à vide avec une tension nominale nous donne :

L'allure de la caractéristique de vitesse présente des oscillations dans le premier instant de démarrage avec un accroissement presque linéaire, puis se stabilise à la valeur désirée. Après un temps d'environ 0.6 s la vitesse de rotation s'établit à une valeur proche de la vitesse de synchronisme.

Pendant le régime transitoire, le couple est fortement pulsatif, présent au premier instant de démarrage, des battements importants suivi d'un nombre d'oscillations avant de se stabiliser à zéro.

Les courants statoriques présentent des oscillations successives autour de zéro avec une amplitude maximale de (12A) jusqu'à 0.6 s. Après ce temps l'amplitude de ces oscillations est diminuée jusqu'à 3A.

Pour, une perturbation de couple ($C_r=5\text{N.m}$) appliquée à l'arbre du moteur, les résultats de simulation correspondants sont regroupées également dans la même figure (II.4)

Lors de l'application de charge, le couple électromagnétique rejoint sa valeur de référence pour compenser cette sollicitation avec une réponse quasiment instantanée. Avant de se stabiliser à la valeur du couple résistant nominal.

On constate une décroissance de vitesse rotorique qui se traduit par un glissement. Ce qu'est un résultat évident (la vitesse augmente pour les sous charge et diminue pour les sur charge en fonctionnement en BO)

Les courants statoriques évoluent selon la charge appliquée à l'arbre du moteur.

II.9.Conclusion.

Dans ce chapitre, on a introduit les hypothèses de travail et la transformation de Park. Ce qui nous a permis de donner le modèle de la machine asynchrone disponible dans la littérature.

C'est le modèle électrique basé sur le circuit électrique équivalent de la machine asynchrone.

Ce chapitre nous a permis aussi de valider le modèle établi et de vérifier que les simulations effectuées par le logiciel MATLAB sont valables.

Toutefois, la machine seule ne répond pas toujours aux exigences des systèmes de maintenance. Afin d'avoir comment réagit notre système sous un défaut de court-circuit, l'application de ce dernier est l'objet du troisième chapitre.

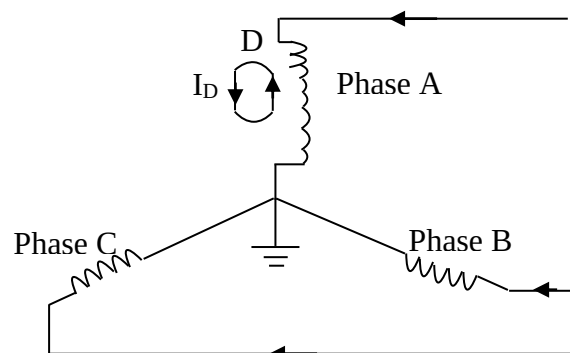
Chapitre 3: Application, résultats et discussions

III.1.Introduction.

Lorsqu'un court-circuit est produit dans une phase statorique, cette dernière sera décomposée en deux circuits indépendants, un premier nommé « sain » représentant les conducteurs non court-circuités de la phase, et un deuxième représentant les conducteurs court-circuités, tel que le courant parcourant le deuxième circuit va produire une FMM dans le sens opposé. Finalement le court-circuit entre les spires diminue la FMM de la phase touchée, et les inductances mutuelles entre la phase « touchée » et les autres phases saines changent également. [BAB05].

Remarque : les résultats à discuter a été trouvé par le mémoire de référence [BAB05].

Le nouveau circuit de court-circuit sera introduit dans le système d'équation, avec une tension nulle.



FigureIII.1. Configuration des enroulements statoriques avec un court-circuit dans la phase « a ».

III.2. Résultats de la simulation du défaut de court-circuit.

III.2.1. Enroulement avec 2 spires court-circuitées ($T_r=1N.m$).

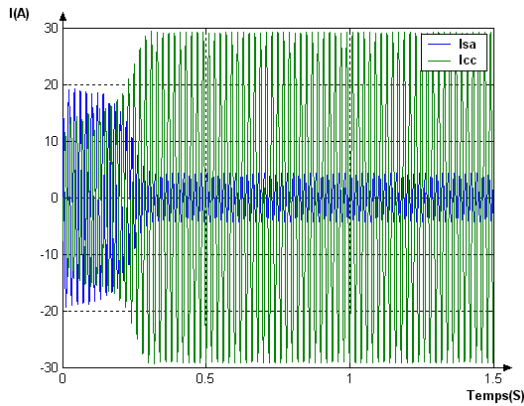


Figure III.2. Variation des courants.

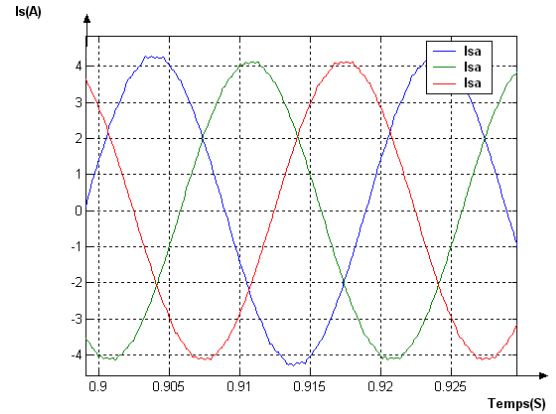


Figure III.3. Variation des courants.

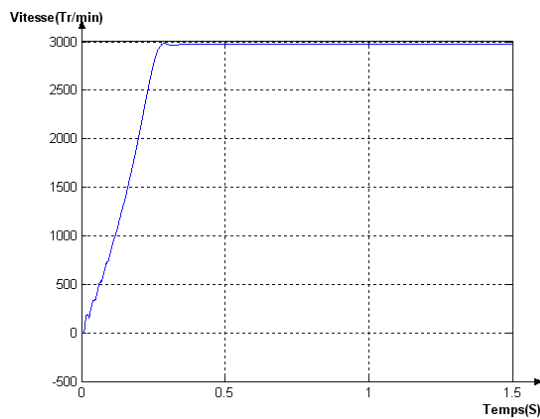


Figure III.4. Variation de la vitesse.

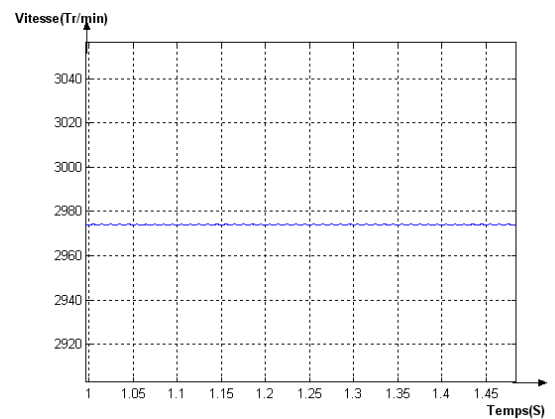


Figure III.5. Le zoom de la vitesse.

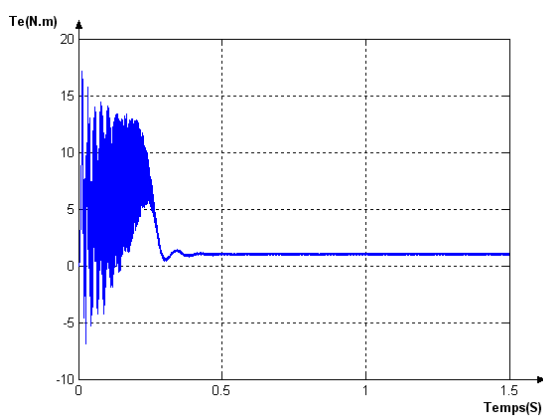


Figure III.6. Variation du couple.

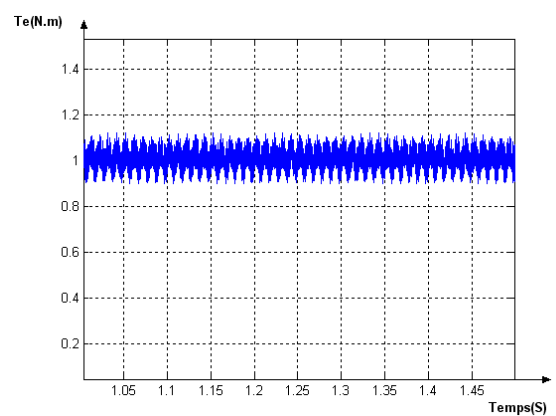


Figure III.7. Variation du couple.

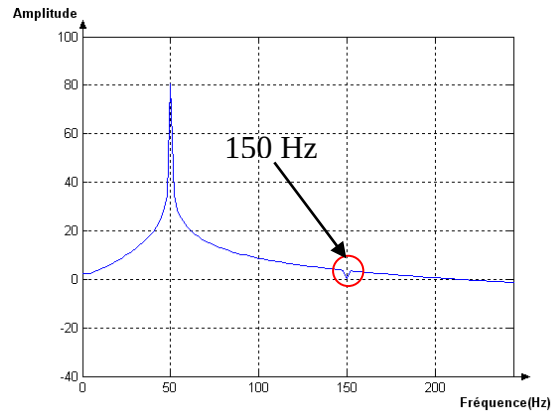


Figure III.8. Zoom du spectre du courant statorique ($T_r=3\text{N.m}$).

Apparition de l'harmonique « 3 » : $f_{eh}=150\text{Hz}$.

III.2.2. Enroulement avec 2 spires court-circuitées ($T_r=3\text{N.m}$).

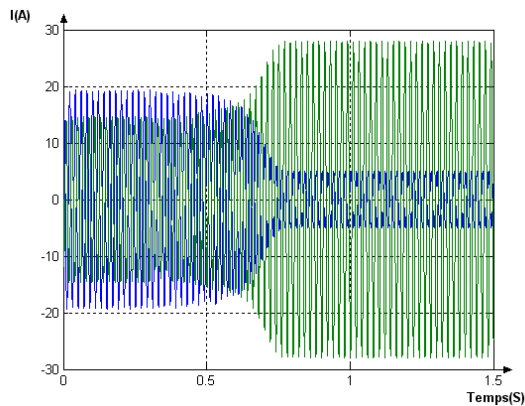


Figure III.9. Variation des courants.

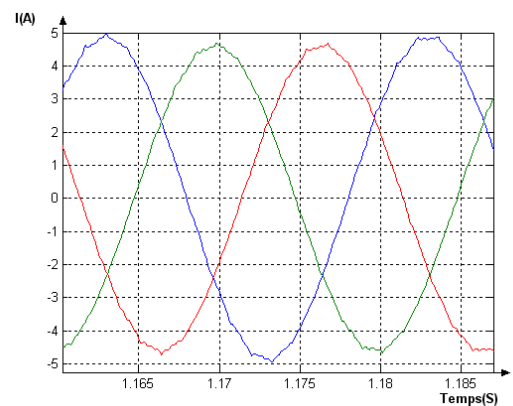
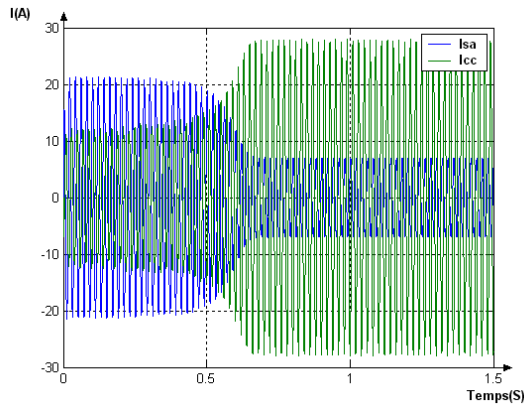


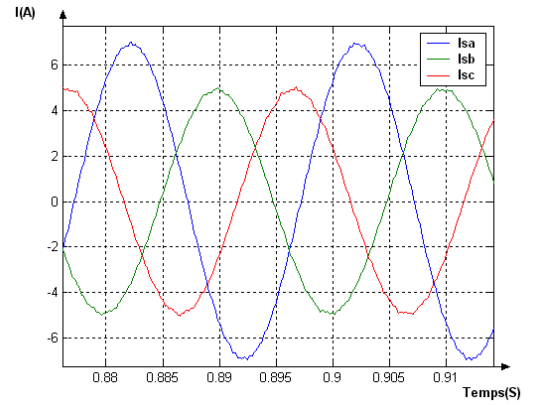
Figure III.10. Variation des courants.

Apparition de l'harmonique « 3 » : $f_{eh}=150\text{Hz}$.

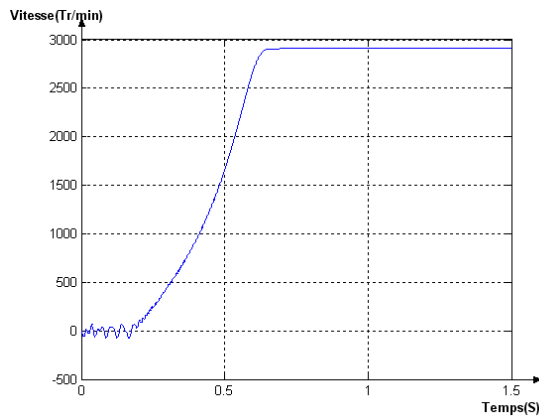
III.2.3. Enroulement avec 20 spires court-circuitées ($T_r=3\text{N.m}$).



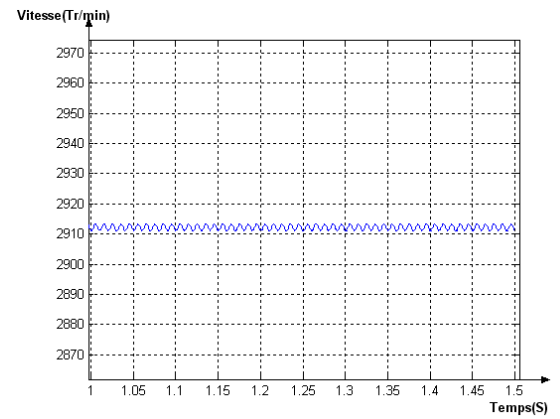
FigureIII.11.Variation des courants.



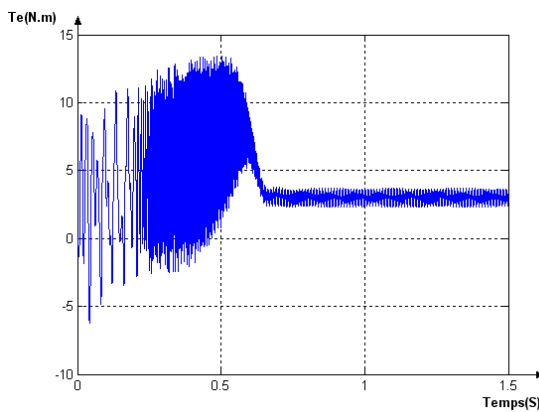
FigureIII.12.Variation des courants.



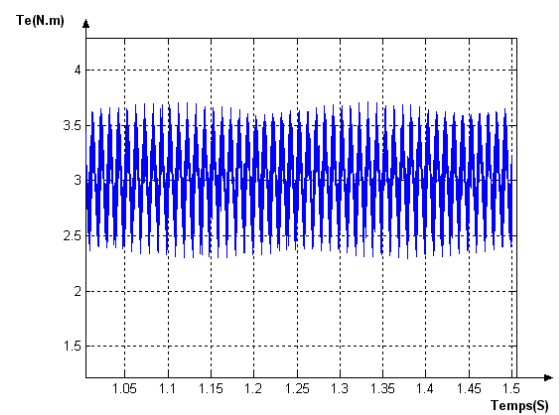
FigureIII.13.Variation de la vitesse



FigureIII.14.Variation de la vitesse



FigureIII.15.Variation du couple.



FigureIII.16.Variation du couple.

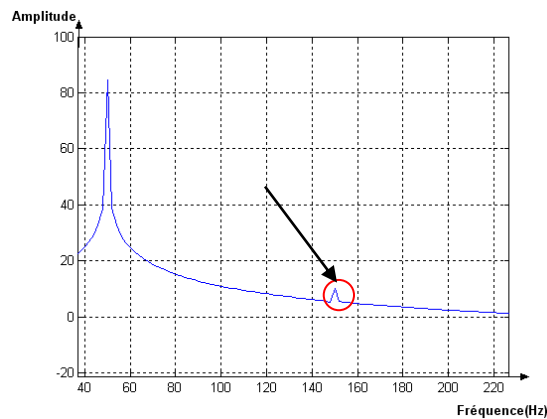


Figure III.17. Zoom du spectre du
courant statorique.

Apparition de l'harmonique « 3 » : $f_{eh}=150\text{Hz}$.

III.3. Le déséquilibre.

L'apparition d'harmoniques additionnelles dues au déséquilibre d'alimentation ou encore au court-circuit entre spires, citée au niveau de la littérature, implique la nécessité d'accompagner notre travail par une étude analytique du courant statorique en régime permanent. En effet, la ressemblance des signatures des défauts statoriques suppose tout d'abord de comprendre la provenance de ces harmoniques additionnels ainsi que la connaissance des différents paramètres qui influent sur ces harmoniques.

III.3.1. Etude du régime permanent alimenté par un système de tension triphasé équilibré.

On part des équations de la machine correspondant à un système d'axes de références fictifs de Park liés au stator (chapitre 2).

III.3.1.1. Expression des tensions.

En considérant que le moteur asynchrone est alimenté par des tensions équilibrées sinusoïdales suivantes :

$$\begin{cases} v_{sa} = V_s \sqrt{2} \cos(\omega t) \\ v_{sb} = V_s \sqrt{2} \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \\ v_{sc} = V_s \sqrt{2} \cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \end{cases} \quad (4-5)$$

Le courant de la phase "a" statorique est présenté comme suit :

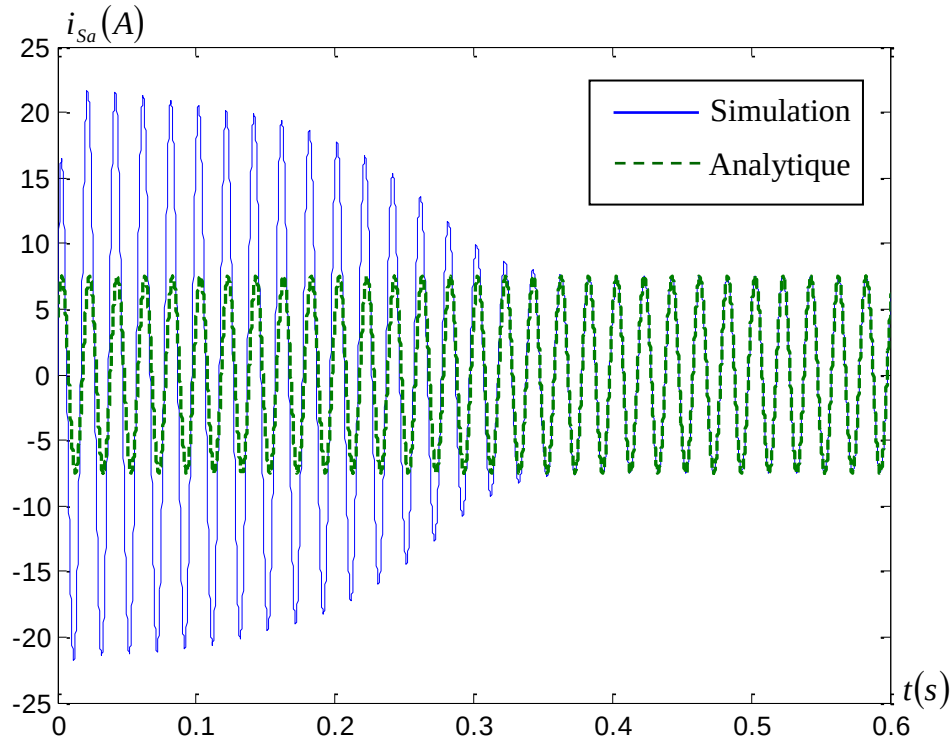


Figure III.18. Courant statorique de la phase a.

III.3.2. Etude du régime permanent alimenté par un système de tension triphasé déséquilibré.

III.3.2.1. Expression des tensions.

Le déséquilibre d'alimentation sera représenté comme la somme de deux systèmes de tensions soit un système direct et un autre inverse.

L'influence du défaut de court-circuit de 50% est illustrée par la figure 4-8.

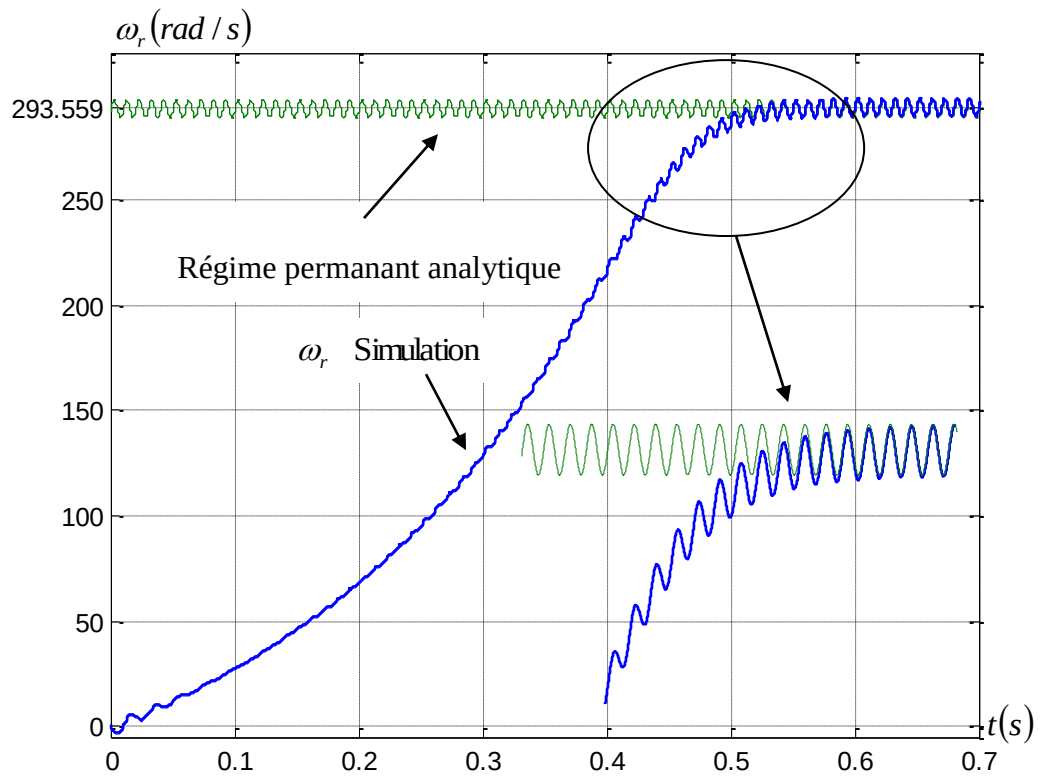


Figure 4.19. Vitesse en présence d'un défaut de 50%.

On voit en régime permanent des ondulations à cause de défaut appliqué.

La figure (III.20) montre qu'un défaut de court-circuit ne donne aucune harmonique supplémentaire par la comparaison avec le déséquilibre, sauf au niveau d'amplitude.

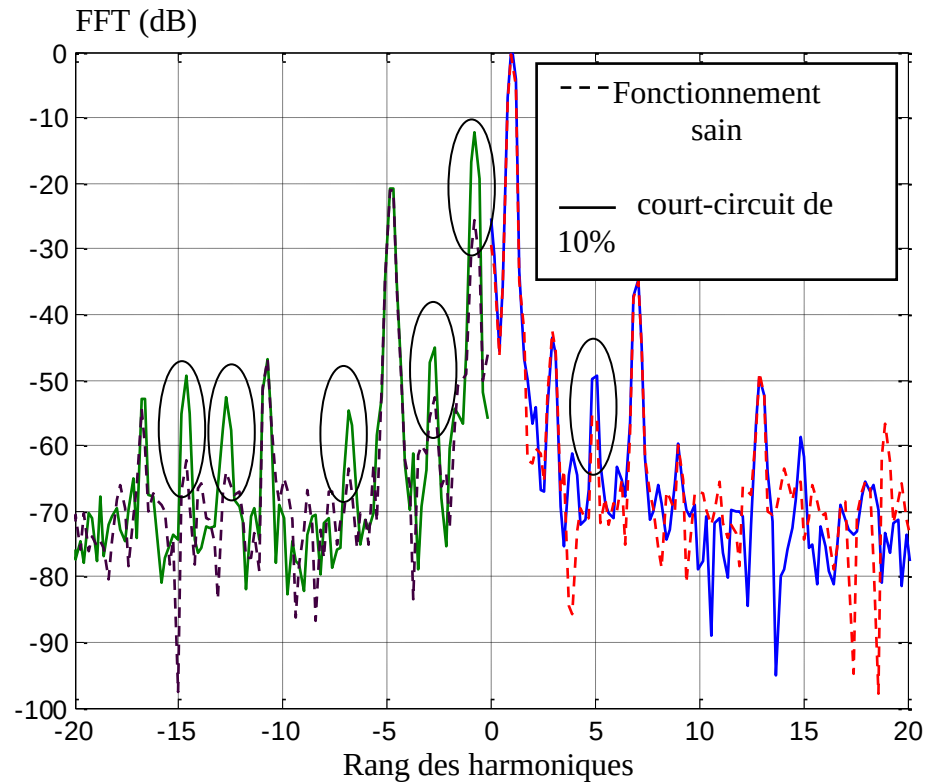


Figure III.20. Spectre fréquentiel du vecteur de Park des courants statoriques expérimentaux

Comparaison entre un fonctionnement sain (avec un déséquilibre) et un fonctionnement défectueux

III.4.Conclusion.

Dans ce chapitre, nous avons développé représentation en régime permanent du court-circuit et du déséquilibre d'alimentation. Cette étude nous a permis de comprendre le mécanisme de la création ainsi que l'identification des différents harmoniques engendrés par le court-circuit et le déséquilibre.

Cette étude nous a permis de dire que en plus de l'harmonique 3, il y a l'apparition d'autres harmoniques 5, 7, 9,

Conclusion Générale

L'intérêt grandissant des industriels pour la maintenance des entraînements électriques justifie l'accent mis par la recherche sur le diagnostic des machines asynchrones, mais la complexité des systèmes mis en jeu et compte tenu de la fréquence d'utilisation des machines asynchrones dans l'industrie, la détection précoce des défauts dans ces machines est devenue un enjeu économique important. La fondamentale approche sous l'angle nouveau du diagnostic nécessitent aujourd'hui un travail préalable de modélisation et de simulation des défauts de la machine.

C'est aussi dans cet esprit que nous avons entrepris notre travail, qui s'articule autour de la modélisation : modélisation fine pour la simulation des défauts de la machine.

Le travail présenté dans ce mémoire expose deux principaux points qui sont, l'apport d'un modèle dédié au diagnostic des défauts des machines asynchrones et une étude comparative entre l'effet du déséquilibre d'alimentation et de court circuit, qui nous conduit à une confusion au niveau de détection l'un de phénomène.

Bibliographie

- [BES07]: Bessous Noureddine, "contribution au diagnostic des machines asynchrones
Thèse de Magister , Université Mentouri de Constantine, 2007.
- [BAC02]: Smail BACHIR , "contribution au diagnostic des machines asynchrones par
estimation paramétrique", Thèse Présentée à l'université Pour l'obtention du
grade de Docteur de l'université de poitiers.
- [PEN94]: J. Penman, J. Sedding, H.G. Loyed, B.A. Fink, "Detection and localisation
of interturn short circuits in the stator winding of operating motors," IEEE
Trans. on Energy Conversion, vol. 9, no. 4, December 1994, pp. 652-658.
- [BOU01]. Boumegoura. T, " Recherche de signature électromagnétique des défauts
dans une machine asynchrone et synthèse d'observateurs en vue de
diagnostic ". Thèse Doctorat, Ecole centrale de Lyon, Mars 2001.
- [ABE02]: M.A. Abed, "Contribution à L'étude et au Diagnostic de la Machine
Asynchrone", Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy-I, mars
2002.
- [OUM05]: M. E. K. Oumaamar, F. Babaa, A. Khezzar, M. Boucherma, F. Meibody-
Tabar, "Novel method of broken rotor bars diagnosis in induction
machine by D.C supply", 6th international symposium on advanced
electro mechanical motion systems electromotion, Sept 2005.
- [BEN99]: Benbouzid.M, Vieira.M, and Theys.C, "Induction motors' faults detection
and localization using stator current advanced signal processing
techniques". IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 14, n° 1,
pp.14-22, January 1999.
- [TOL95]: Hamid A. Toliyat, Mohammed S. Arefeen, et Alenxender G. Parlos. "A
Method for Dynamic Simulation of Air-Gap Eccentricity in Induction
Machines". IEEE Transactions on Industry Applications, 32(4) :910–917,
July-August 1996.
- [OND06]: O. Ondel, "Diagnostic par Reconnaissance des Formes: Application a un
Ensemble Convertisseur-Machine ", Thèse de Doctorat, L'Ecole
Centrale de Lyon, October 2006.
- [SCH99]: E. Schaeffer, "Diagnostic des machines asynchrones : modèles et outils
paramétriques dédiés à la simulation et à la détection des défauts",
Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Nantes, 1999.
- [DID04]: G. Didier, " Modélisation et Diagnostic de la Machine Asynchrone en
Présence de Défaillances " Thèse de doctorat, Université de Henri
Poincaré, Nancy-I, Octobre 2004.