

REPUBLICQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou
Faculté de Génie Electrique et d'informatique
Département d'Electrotechnique



MEMOIRE

De fin d'étude
En vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur d'Etat en électrotechnique
Option : Machines électriques

Thème

Diagnostic des défauts de court circuit statorique d'une machine asynchrone

Proposé et dirigé par

- Mr HOUASSINE Hamza
- Mr HACHELAF Redouane

Réalisé par :

- NEZLIOUI Said
- YAKOUB Yazid

Promotion 2011/2012

Remerciements

Premièrement nous louangeons Dieu de nous avoir donné la force et le courage pour mener à terme ce présent travail.

Nos remerciements vont particulièrement à Mr HOUASSINE Hamza (enseignant à l'université de Media) et Mr HACHLAF Redouane (enseignant à l'université de Blida) d'avoir proposés ce sujet, ainsi pour leurs conseils judicieux.

Nos remerciements vont aussi :

Aux membres de jury qui feront l'honneur de Juger notre humble travail. Que tous les enseignants ayant contribué à notre formation trouvent ici notre profonde reconnaissance.

Enfin, nous tenons à exprimer toutes nos gratitude à toutes les personnes qui ont contribué à la réalisation de ce travail de prés ou de loin.



Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

A mes très chers aimés parents pour leurs encouragements et conseils et leurs sacrifices et patience depuis mon enfance.

A ma très chère sœur et son mari Samir, et mes chers frères Zahir et hassan et sa femme

A ma chère femme Dalila et sa famille.

A ma grand-mère et cousins

A mes chers amis (frères) Khettaoui Yassine, Kechad Mohammed, Kouadri younes, et mes chères amies (Sœurs) kecili Kahina, koucha Safia, salah Djamila. et fazia

A mon cher frère binôme Said et sa famille.

A toute la section d'électrotechnique.

YAKOUB Yazid

Je dédie ce modeste travail à :

Mes très chers parents. Que Dieu les protèges.

Ma très chère sœur et toute sa famille

La mémoire de ma grand-mère

Tous mes amis

NEZLIOUI Saïd

Table des matières

SOMMAIRE

• Introduction générale.....	1
• Chapitre I : Généralités sur les machines asynchrones	
I.1. INTRODUCTION	3
I.2. GENERALITES SUR LES MACHINES ELECTRIQUES ASYNCHRONE	3
I.2.1. Constitution de la machine asynchrone	3
I.2.1.1. Le stator	4
I.2.1.2. Le rotor	5
I.2.1.3. Les paliers	7
I.2.1.4. Les organes mécaniques	7
I.2.2. Principe de fonctionnement.....	8
I.2.3. Schéma électrique équivalent	9
I.3. ETUDE DES DIFFERENTS DEFAUTS DANS LES MACHINES ASYNCHRONE	10
I.3.1. Définitions et concepts.....	11
I.3.2. Causes des défauts	11
I.3.2.1. Cause des défauts au statorique	11
I.3.2.2. Cause des défauts au rotoriques.....	12
I.3.3. Etude Statistique.....	12
I.4. Les différents défauts de la machine asynchrone.....	14
I.4.1. Défauts statoriques.....	14
I.4.1.1. Défaut d'isolant dans un enroulement	16
I.4.1.2. Court-circuit entre spires	16
I.4.1.3. Court-circuit entre phases	17
I.4.2. Défauts rotoriques	17
I.4.2.1. Ruptures de barre	18
I.4.2.2. Ruptures d'anneaux	18
I.4.2.3. Excentricité statique, dynamique et mixte	18
I.4.2.4. Roulement à billes	19
I.4.3. Autres défaillances	20

SOMMAIRE

I.4.4. Défauts extérieurs (d'environnement)	21
I.5. Surveillance des machines électriques	21
I.5.1. Des grandeurs mesurables et des signaux de défaut	21
I.5.2. Approche signal	22
I.5.3. Analyse spectrale	23
I.6. MODELISATION DES DEFAUTS	24
I.6.1. Méthode des éléments finis	25
I.6.2. Méthode des réseaux de perméance	26
I.6.3. Méthode des circuits électriques	26
I.7. CONCLUSION	27

Chapitre II : Modélisation de la machine asynchrone

II.1. Introduction	28
II.1.1. Le stator.....	28
II.1.2. Le rotor.....	29
II.1.3. Les organes mécaniques.....	30
II.2. Modèle mathématique de la machine asynchrone triphasée à rotor bobiné	30
II.2.1. Hypothèses d'étude	30
II.2.2. Mise en équations de la machine	31
II.2.3. Equation mécanique.....	33
II.3. MODELE DU CIRCUIT ELECTRIQUE AVEC DEFAUT.....	34
II.3.1. Modèle du circuit électrique avec défaut statorique.....	37
II.4. CONCLUSION	38

SOMMAIRE

Chapitre III : Résultats des simulations

III.1. INTRODUCTION	39
III.2. Résultats de simulation d'un fonctionnement sain	39
III.2 .1 Simulation de la machine asynchrone triphasée à vide	39
III .5. Analyse spectrale du courant statorique	49
III.4.1. Effet du nombre de spires en court circuit sur les harmoniques.....	53
III.6. CONCLUSION	55
Conclusion générale	56
Bibliographie.....	58
Annexe.....	61

Introduction générale

INTRODUCTION GENERALE

Les machines asynchrones, de par leur robustesse et leur rapport poids/puissance, sont largement utilisées en milieu industriel. Assurer leur continuité de fonctionnement nécessite la mise en place de programmes de maintenances préventive et corrective. En effet, la fiabilité et la sûreté de leur fonctionnement permettent en partie d'assurer la sécurité des personnes, la qualité du service et la rentabilité des installations.

Certaines utilisations des machines asynchrones ne tolèrent pas les pannes intempestives. Ces pannes peuvent être dues aux machines et être d'origine mécanique (excentricité du rotor, défaut sur accouplement, usure des roulements, ...) ou électrique et magnétique (court-circuit du bobinage statorique, rupture de barre ou d'anneau, cassure de barre ou d'anneau, cassure de dents ...) les imperfections peuvent aussi être dues à d'autres éléments de l'entraînement, citons par exemple des défauts dans l'alimentation, dans la charge ou dans les réducteurs mécaniques.

La modélisation des défauts dans les systèmes industriels et particulièrement les défauts d'ordre électriques, est une première étape nécessaire pour prédire le comportement du système en présence d'un défaut ou dès son apparition.

Le travail proposé s'attarde sur le diagnostic des machines asynchrones triphasées à Rotor bobinée. La croissance de ce type de machine électrique, essentiellement due à sa simplicité de construction, son faible coût d'achat et de fabrication, sa robustesse mécanique ou encore sa quasi-absence d'entretien, est telle que nous la trouvons maintenant dans tous les domaines industriels et en particulier dans les secteurs de pointe comme l'aéronautique, le nucléaire, la chimie ou encore les transports ferroviaires. A titre d'exemple, aux Etats-Unis, 70 millions de moteurs asynchrones sont fabriqués chaque année pour une population d'environ 300 millions de personnes. Toute proportion gardée, il est clair que ces moteurs nous conduisent à porter une attention de plus en plus sérieuse quant-à leur fonctionnement et leur disponibilité.

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

La surveillance et le diagnostic des machines asynchrones a fait l'objet de nombreux travaux. L'analyse des signatures spectrales des courants de lignes en était la première tentative pour la détection des pannes dans les machines électrique, en se basant sur des logiciels de surveillance.

INTRODUCTION GENERALE

Ces derniers moins performants et moins précis ont été de nos jours améliorés dans un contexte industriel par mis en œuvre de différentes méthodes, par exemple l'analyse temps-fréquence et temps-échelle, diagnostic des défauts par estimation paramétrique, diagnostic des défauts par l'analyse du vecteur de Park, technique additionnelle et le diagnostic des défauts par le suivi des grandeurs mesurables. Nous basant particulièrement sur cette dernière méthode en utilisant la modélisation réelle triphasé-triphasé.

La première étape pour le diagnostic concerne la caractérisation du régime sain. Il s'agit de caractériser le système à travers de ces grandeurs accessibles (les courants d'alimentations, le couple électromagnétique et la vitesse de rotation), pour un fonctionnement à vide et un fonctionnement en charge. L'hypothèse fondamentale pour la surveillance d'un système par suivi des grandeurs mesurables est qu'un défaut se traduit par une déformation d'allure d'une ou plusieurs grandeurs du système. Diagnostiquer un défaut revient donc à réaliser un suivi des grandeurs d'un modèle de fonctionnement normal ou la simple déformation doit être une indication de la présence d'une défaillance.

Dans le premier chapitre, nous introduisons la machines asynchrone à rotor bobinée et rappelons les principaux défauts qui peuvent apparaître dans la machine asynchrone à rotor bobiné et leurs origines. Puis, nous présenterons les différentes techniques de surveillance des machines asynchrones.

Le deuxième chapitre est consacré à la modélisation de la machine asynchrone à rotor bobiné saine et en présence d'un défaut de court-circuit entre spires d'une phase statorique.

Dans le troisième chapitre, nous présenterons les résultats de simulation du moteur asynchrone triphasé dans les différentes conditions de fonctionnement, (avec et sans défaut). Nous monterons les effets du court-circuit entre spires sur les différentes grandeurs électriques et électromagnétiques de la machine. Finalement on applique la transformation de Fourier rapide(FFT) pour l'analyse spectrale des courants statorique.

Nous terminerons ce mémoire par une conclusion générale et des perspectives.

Chapitre I

*Généralités sur les machines
asynchrones*

I.1. Introduction :

La machine asynchrone, connue également sous le terme « anglo-saxon » de 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. 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.

La machine asynchrone a longtemps été fortement concurrencée par la machine synchrone dans les domaines de forte puissance, jusqu'à l'avènement de l'électronique de puissance. La machine asynchrone est utilisée aujourd'hui dans de nombreuses applications, notamment dans le transport (métro, trains, propulsion des navires, automobiles électriques), dans l'industrie (machines-outils), dans l'électroménager. Elle était à l'origine uniquement utilisée en moteur mais, toujours grâce à l'électronique de puissance, elle est de plus en plus souvent utilisée en génératrice. C'est par exemple le cas dans les éoliennes.

De nombreuses défaillances peuvent apparaître sur les machines asynchrones. Elles peuvent être électriques, mécaniques ou magnétiques. Leurs causes, très variées.

I.2. Généralités sur les machines électriques asynchrones

I.2.1. 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 d'écureuil. Toutefois, nous admettrons que sa structure est électriquement équivalente à celle d'un rotor bobiné dont les enroulements sont en court-circuit. (**Figure I.1**)

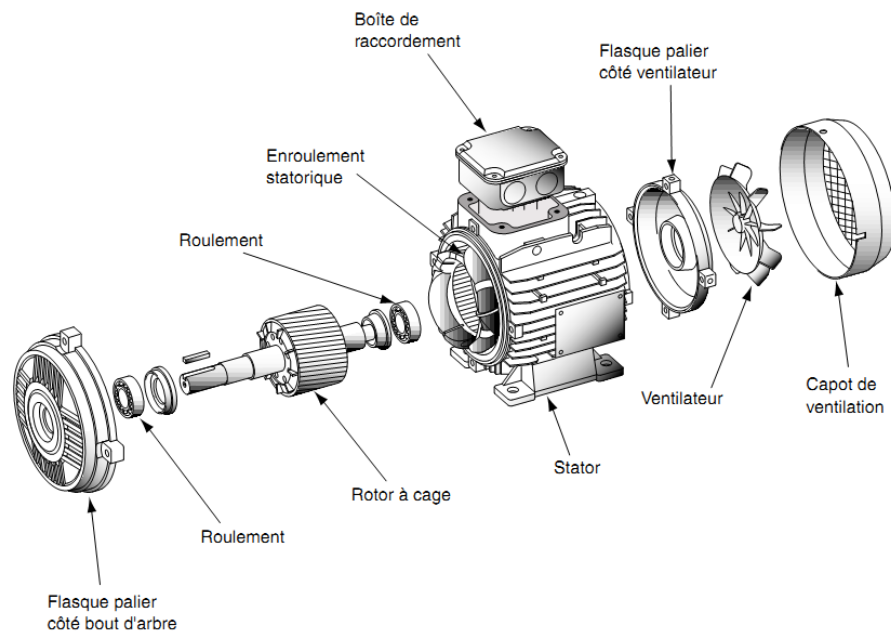


Figure I.1 : éclaté d'un moteur asynchrone triphasé à cage

On se propose, dans cette partie, de donner quelques précisions sur les éléments de constitution des machines asynchrones. Cette description va nous permettre de comprendre de quelle façon le système est réalisé physiquement. Les machines asynchrones triphasées peuvent se décomposer, du point de vue mécanique, en trois parties distinctes :

- Le stator, partie fixe de la machine où est connectée l'alimentation électrique.
- Le rotor, partie tournante qui permet de mettre en rotation la charge mécanique.
- Les paliers, partie mécanique qui permet la mise en rotation de l'arbre moteur.

I.2.1.1. Le stator :

Le stator de la machine asynchrone est constitué de tôles d'acier dans lesquelles sont placés les bobinages statoriques. Ces tôles sont, pour les petites machines, découpées en une seule pièce alors qu'elles sont, pour les machines de puissance plus importantes, découpées par sections. Elles sont habituellement recouvertes de vernis pour limiter l'effet des courants de Foucault. Au final, elles sont assemblées les unes aux autres à l'aide de boulons ou de soudures pour former le circuit magnétique statorique.

Une fois cette étape d'assemblage terminée, les enroulements statoriques sont placés dans les encoches prévues à cet effet. Ces enroulements peuvent être insérés de manière imbriqués, ondules ou encore concentriques. L'enroulement concentrique est très souvent utilisé lorsque le bobinage de la machine asynchrone est effectué mécaniquement. Pour les grosses machines, les enroulements sont faits de méplats de cuivre de différentes sections insérés directement dans les encoches. L'isolation entre les enroulements électriques et les tôles d'acier s'effectue à l'aide de matériaux isolants qui peuvent être de différents types suivant l'utilisation de la machine asynchrone.

Le stator d'une machine asynchrone est aussi pourvu d'une boîte à bornes à laquelle est reliée l'alimentation électrique. Nous représentons sur la **figure I.2** les différentes parties de constitution du stator d'une machine asynchrone. Nous pouvons visualiser la présence d'ailettes de ventilation assurant le refroidissement de la machine lorsque celle-ci fonctionne en charge.

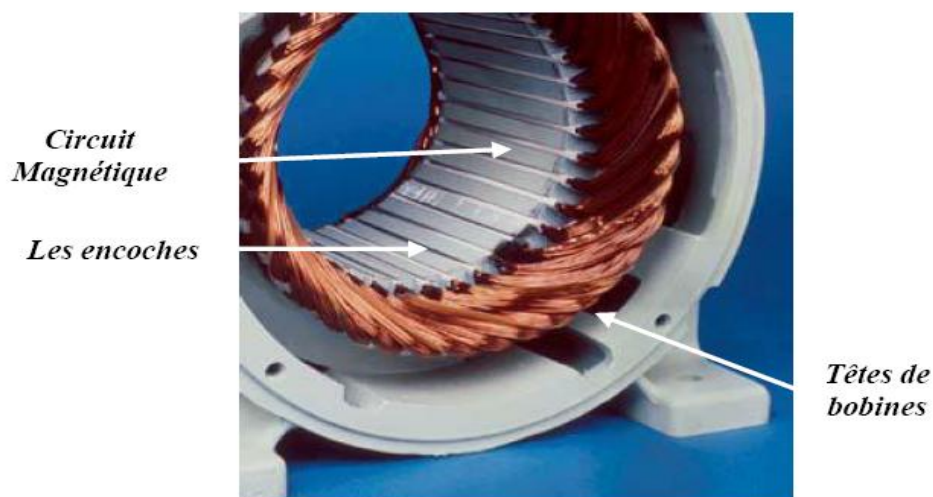


Figure I.2 : Photo du stator d'une machine asynchrone

I.2.1.2. Le rotor

Tout comme le stator, le circuit magnétique rotorique est constitué de tôles d'acier qui sont, en général, de même origine que celle utilisée pour la construction du stator. Les rotors des machines asynchrones peuvent être de deux types : bobinés ou à cage d'écureuil. (Voir la **figure I.3** et la **figure I.4**). Les 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. En ce qui concerne les rotors à cage d'écureuil, les enroulements 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 dit "de court-circuit", eux aussi fabriqués en cuivre ou en aluminium.

Il existe différentes structures de rotor à cage qui dépend principalement de la taille du moteur et de l'application qu'il en sera faite. Nous donnons à la *figure I.5* les différents éléments de constitution d'un rotor à cage d'écureuil. Nous pouvons visualiser l'arbre sur lequel les tôles sont empilées, les deux anneaux de court-circuit ainsi que les barres d'aluminium formant la cage d'écureuil. Très souvent, ces barres sont uniformément inclinées pour limiter les harmoniques et ainsi diminuer très fortement le bruit lors de l'accélération de la machine asynchrone. L'isolation des barres avec les tôles magnétiques n'est en général pas nécessaire du fait de la faible tension induite aux bornes de chacune d'entre elles. 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 comme le montre la *figure I.3*



Figure I.3 : Rotor à cage d'écureuil



Figure I.4 : Rotor bobiné

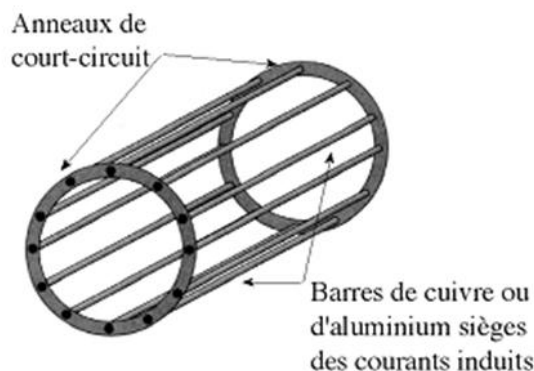


Figure I.5 : la cage d'écureuil

I.2.1.3. Les paliers

Les paliers, qui permettent de supporter et de mettre en rotation l'arbre rotorique, sont constitués de flasque et de roulements à billes insérés à chaud sur l'arbre. Les flasques, moulés en fonte, sont fixés sur le carter statorique grâce à des boulons ou des tiges de serrage. Les déplacements axiaux sont bloqués par un calage longitudinal sur l'un des paliers ; l'autre palier est libre pour assurer les dilatations thermiques de l'arbre. Lorsque les forces axiales exercées sur le rotor sont importantes, le calage longitudinal est assuré par une butée. Les dissymétries des reluctances du circuit magnétique engendrent des courants dans l'arbre qui sont éliminés par isolation électrique de l'un des paliers par une feuille isolante. On distingue deux types de paliers :

Palier lisses : ces paliers comportent deux parties principales, Corps de paliers et palier à pied: le corps de palier flasque est généralement fixé sur la carcasse. Le rotor est alors centré dans le stator au moment de la construction de la machine. Le palier à pieds utilisé pour les machines de grandes dimensions et de masse supérieure à 20 tonnes, il est désolidarisé de la carcasse.

Paliers à roulement : sont utilisés dans les petites et les moyennes machines, de masse inférieure à 20 tonnes, Leur encombrement est plus faible que celui des paliers lisses et les longueurs totales des machines sont donc réduites.

I.2.1.4. 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 reluctances du circuit magnétique. Ils

sont généralement à roulements pour les machines de petite et moyenne puissance.

I.2.2. Principe de fonctionnement:

Le stator est composé de $3p$ bobines alimentées par un système de tension triphasées de fréquence f . Ces $3p$ bobines créent un champ magnétique tournant à la pulsation de synchronisme Ω_s qui se répartit sinusoïdalement dans l'entrefer (espace entre le rotor et le stator) de la machine.

Ω_s est donnée par la relation : $\Omega_s = \frac{\omega}{p}$ Avec

$$\left[\begin{array}{l} \omega = 2\pi f \text{ en } [rad/s] \\ p : \text{nbre de paires de pôles} \\ \Omega_s : \text{vitesse angulaire en } [rad/s] \end{array} \right.$$

Le rotor du moteur asynchrone triphasé peut-être « à cage d'écureuil » ou bobiné. Le rotor ne possède aucune liaison électrique avec le stator. Le rotor constitue un circuit électrique fermé où se crée des courants induits qui entraînent la mise en rotation du rotor. Le rotor tourne à la vitesse de rotation Ω qui est inférieure à la vitesse synchrone.

Le branchement est réalisé à l'aide de trois fils qui amènent le courant de la ligne à l'enroulement du stator. Le rotor est en court circuit. Dès que le stator est alimenté par des courants triphasés, de pulsation ω , il se produit un champ tournant ; si le bobinage statorique comprend $2p$ pôles, ce champ tourne à la vitesse angulaire Ω_s , dite vitesse de synchronisme, qui peut être définie comme suit :

$$\Omega_s = \frac{\omega}{p} \quad (\text{I.1})$$

Ce champ balaie les conducteurs du rotor et y induit des forces électromotrices (f.é.m.). Le rotor étant en court-circuit, ces f.é.m. y produisent des courants induits. Ces courants, placés dans le champ tournant, sont soumis à des forces, forment un couple. Le rotor étant libre, ce couple le fait tourner dans le sens de rotation du champ tournant.

- Le champ magnétique tourne à la vitesse de synchronisme : Ω_s .
- Le rotor tourne à la vitesse : Ω en $[rad/s]$ ou bien n en $[tr/min]$

- Les f.é.m. induites dans le rotor dépendent de la vitesse relative des conducteurs du rotor par rapport au champ tournant, cette vitesse est dite vitesse de glissement : $\Omega_g = \Omega_s - \Omega$

Le glissement g d'un moteur asynchrone est défini par :

$$g = \frac{\Omega_s - \Omega}{\Omega_s} \quad \text{Ou} \quad g = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (\text{I.2})$$

(Sans unité ou en %).

On désigne par n_s la fréquence de synchronisme, c'est à dire la fréquence de rotation du champ statorique dans la machine. On désigne par n la fréquence de rotation de la machine.

$$n_s = \frac{f_s}{p} \text{ (tr/s)} \quad \text{Ou} \quad n_s = \frac{60f_s}{p} \text{ (tr/min)} \quad (\text{I.3})$$

À l'arrêt : $g = 1$ car $\Omega = 0$ ($n = 0$).

I.2.3. Schéma électrique équivalent:

On peut considérer la machine asynchrone comme un transformateur à champ tournant. En résumé, les grandeurs électriques relatives au primaire et au secondaire peuvent s'écrire toujours relativement à un enroulement [01].

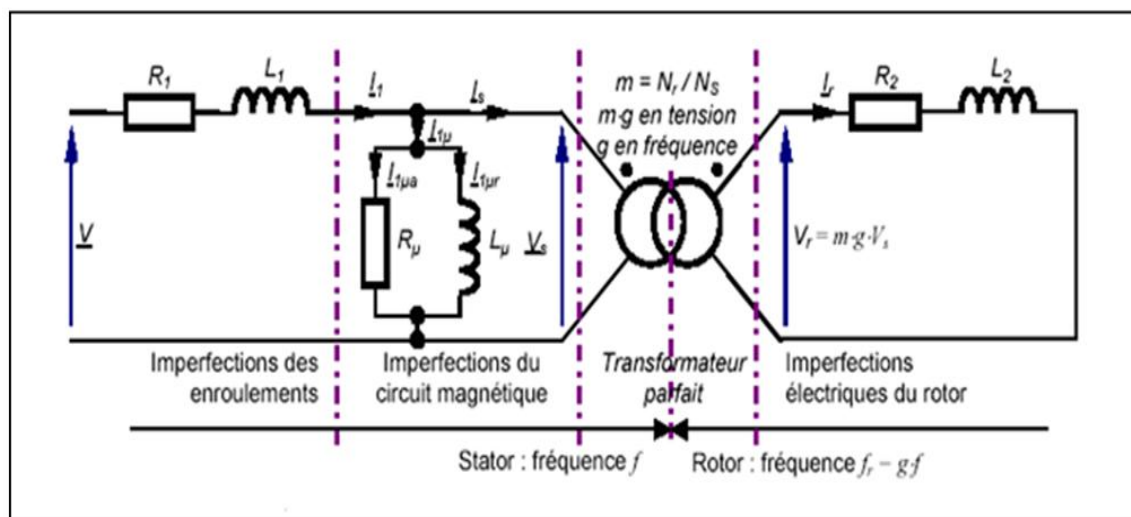


Figure I.7. : Schéma équivalent simplifié de la machine asynchrone [01]

I.3. Etude des différents défauts de la machine asynchrone

La machine asynchrone s'imposait par rapport à d'autre machine grâce à sa robustesse et son faible coût, elle peut parfois représenter différents types de défaillances, ces défaillances peuvent être soit d'origine électrique, soit d'origine mécanique pouvant touchés différents organes. Leurs causes sont très variées. Dans le but d'une présentation synthétique, ces défauts peuvent se classer en deux familles principales, les **figures (I.8) et (I.9)** regroupent ces causes [02].

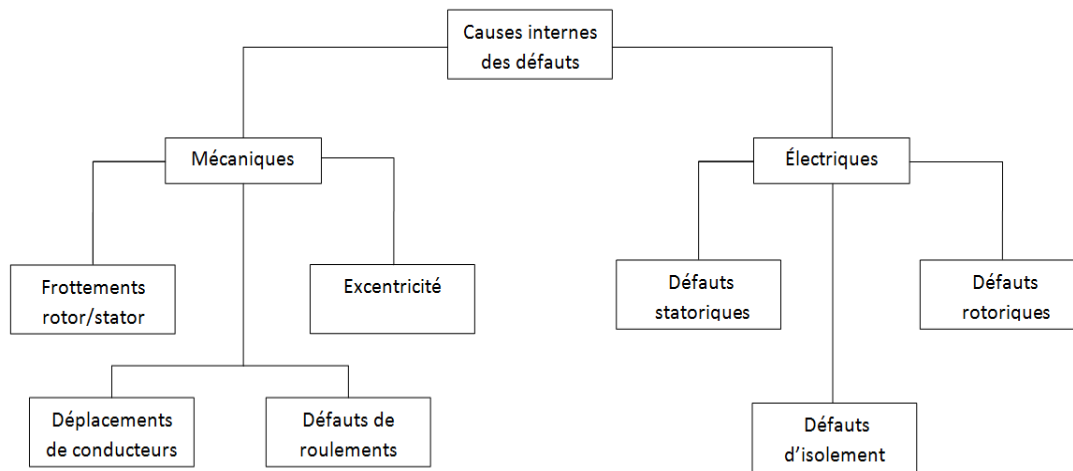


Figure I.8 : Causes internes de défauts de la machine asynchrone triphasée à cage.

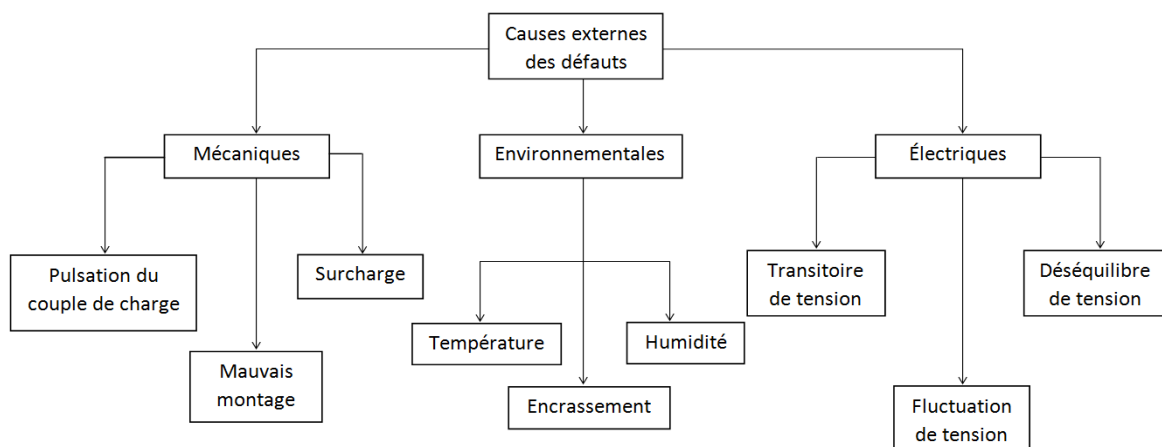


Figure I.9 : Causes externes de défauts de la machine asynchrone triphasée à cage.

I.3.1 Définitions et concepts :

- **Une défaillance** : est une anomalie de fonctionnement au sein d'un système physique.
- **Une panne** : est l'inaptitude d'un dispositif à accomplir une fonction requise. Une panne résulte toujours d'une défaillance.
- **Un défaut** : est une anomalie de comportement au sein du système. Ce concept est important dans les opérations de surveillance pour la conduite et la maintenance des processus industriels [03].
- **La cause** : Circonstances liées à la conception, à la fabrication, à l'installation, à l'utilisation et la maintenance qui ont conduit à la défaillance [04].

De multiples défaillances peuvent apparaître dans la machine asynchrone, elles peuvent être prévisibles ou intempestives, mécanique, électrique ou magnétique et leurs causes sont très variées [05].

I.3.2. Causes des défauts :

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

- ✓ Les générateurs de pannes ou initiateurs de défauts : surchauffe du moteur, défaut électrique (court-circuit), problème mécanique, rupture de fixation, problème d'isolation, survoltage d'alimentation...
- ✓ Les amplificateurs de défauts : surchauffe fréquente, vibrations mécaniques, environnement humide, alimentation perturbée (instabilité de la tension ou de la fréquence), échauffement permanent, mauvais graissage, vieillissement...
- ✓ Les vices de fabrication et les erreurs humaines : défauts de fabrication, défektivité des composants, protections inadaptées, mauvais dimensionnement de la machine...

I.3.2.1. Cause des défauts au statorique

Les défauts statoriques peuvent être dus à plusieurs raisons, parmi lesquelles :

- Un grand noyau du stator où la température d'enroulements est élevée ;
- Attachement lâche à la fin de l'enroulement ;
- Contamination due à l'huile, à la moisissure ou à la saleté ;

- Cycle de démarrage fréquent ;
- Surtension, décharges électriques, et fuites dans les systèmes de refroidissement. [12]
[13]

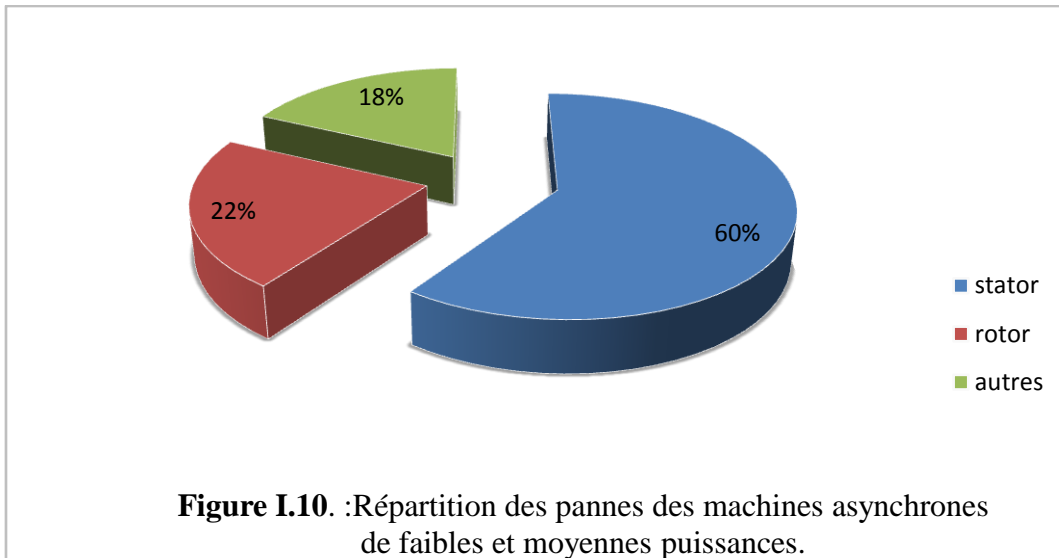
I.3.2.2. Cause des défauts au rotoriques

Comme pour le stator, les raisons pour les cassures des barres rotoriques et de rupture d'une portion de l'anneau de court circuit sont nombreuses :

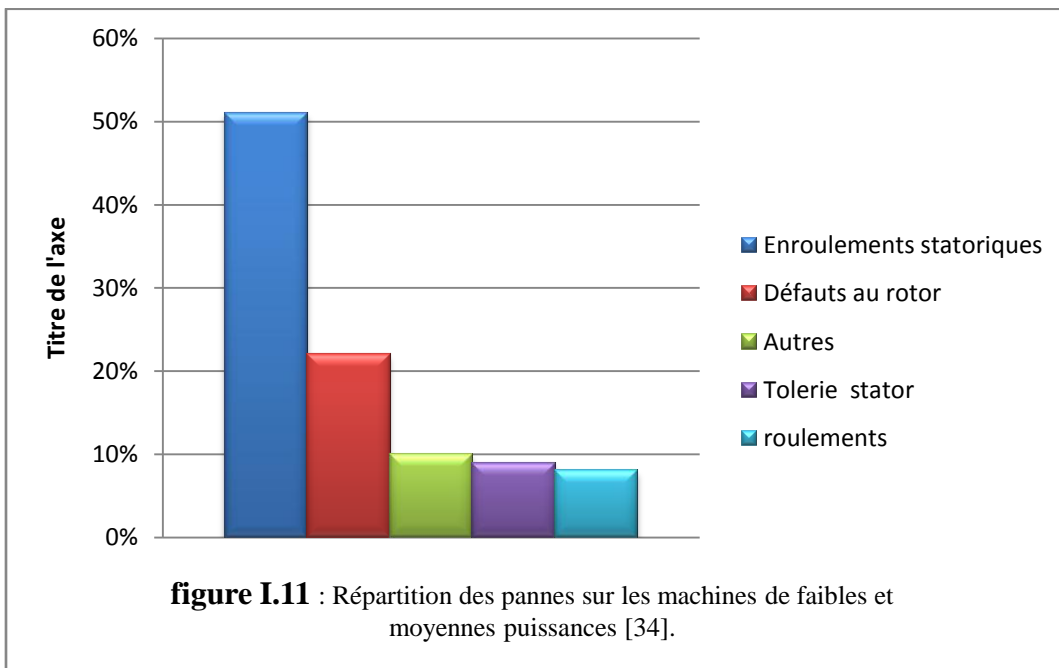
- Effort thermique dû à l'échauffement de l'anneau de court-circuit et à la différence de
- la température dans la barre pendant le démarrage (effet de peau) ;
- Effort magnétique causé par les forces électromagnétiques (flux de fuite d'encoche, excentricité de l'entrefer), bruits et vibrations électromagnétiques ;
- Effort dynamique dû au couple de charge, aux forces centrifuges ainsi qu'aux efforts cycliques ;
- Effort environnemental causé par la contamination, l'abrasion des matériels rotoriques due aux particules chimiques [12], [13]

I.3.3. Etude Statistique

Une étude statistique, effectuée en 1988 par une compagnie allemande de systèmes industriels [34] sur les pannes des machines asynchrones de faible et moyenne puissance (50KW à 200KW) a donné les résultats suivants

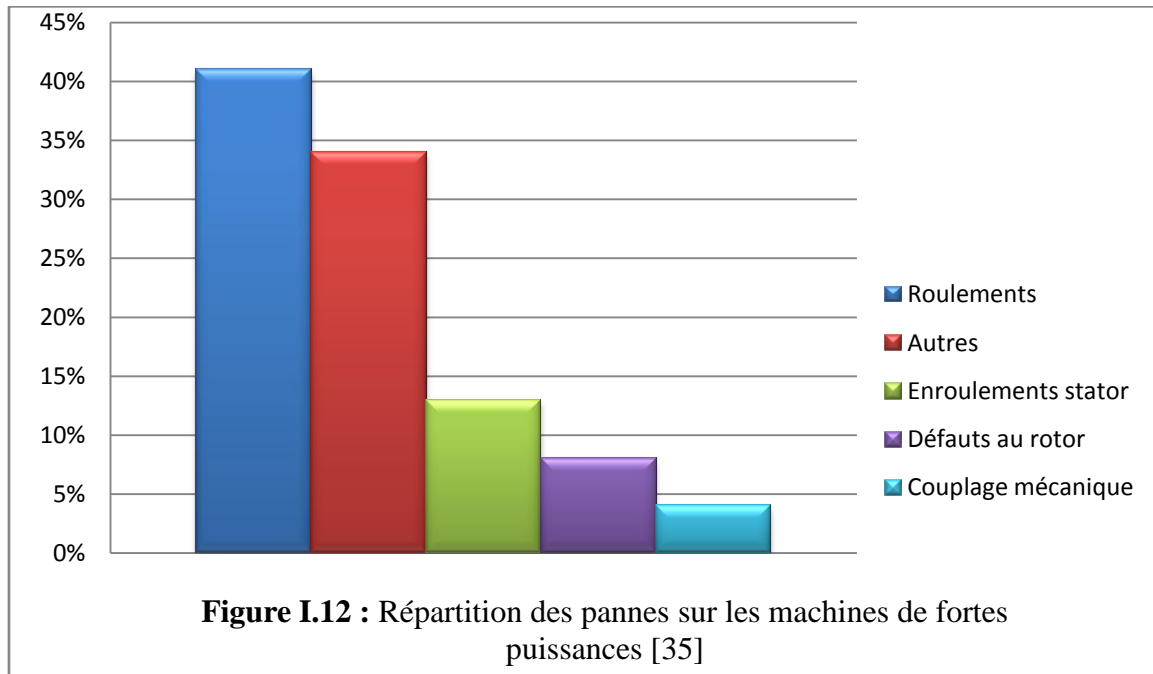


D'autre part, les mêmes études montrent qu'entre 1973 et 1988, les pannes au stator sont passées de 78% à 60% et les pannes au rotor sont passées de 12% à 22%. Ces variations sont dues à l'amélioration des isolants sur cette période. La répartition des pannes dans les différentes parties du moteur est donnée sur la **figure I.11**



Une autre étude statistique [35] faite sur des machines de grande puissance (de 100 kW à 1 MW) a montré que pour cette gamme de puissance, les pannes les plus fréquentes se situent sur les roulements. Le stator et le rotor sont le siège de 12% et 8% des pannes

respectivement (Figure I-3). Les contraintes mécaniques sont plus grandes pour ces types de machines ce qui explique le taux élevé des pannes dues aux roulements. Celles-ci exigent une maintenance mécanique accrue.



De ces exemples, nous constatons que les défauts dans le stator sont plus fréquents dans les machines de moyenne puissance. Les contraintes mécaniques sont plus grandes pour les machines de fortes puissances ce qui explique le taux élevé des pannes dues aux roulements. Celles-ci exigent une maintenance mécanique accrue [05].

Ces études montrent aussi que certains défauts sont plus fréquents que d'autres, parmi ces défauts :

I.4. Les différents défauts de la machine asynchrone

I.4.1. Défauts statoriques :

L'armature statorique, munie de son bobinage est une partie de la machine qui subit beaucoup de contraintes et dont les effets sont plus importants à cause de la complexité de la structure et la fragilité de certaines parties telles que les isolants. Pour le stator, les défaillances sont principalement dues à un problème [36] :

- **Thermique** : l'isolation est conçue pour avoir une certaine durée de vie à la température nominale. Toutefois, si la température augmente au-dessus de cette température de fonctionnement, la durée de vie raccourcit rapidement (Fig. I-4). Cette augmentation de la température peut être due à une variation de tension ou de déséquilibre, à la répétition des démarrages dans un court laps de temps, à des surcharges, à une mauvaise ventilation ou alors à une haute température ambiante [Bon 92].
- **Electrique** : Une tension supérieure à la valeur nominale ou de hautes valeurs de $\frac{dV}{dt}$ dû à l'ouverture et la fermeture des interrupteurs du convertisseur statique, vont conduire à la dégradation du diélectrique assurant l'isolation des bobines. La présence d'un fort champ électrique interne conduira à des décharges partielles dans les cavités de l'isolant. Il en résulte des spots carbonisés dans l'isolation. Ces spots causent des déformations du champ électrique (augmentation dans la région du défaut) [36].
- **Mécanique** : les démarrages répétitifs de machine ont pour conséquence d'augmenter la température dans le cuivre (bobinage statorique et cage). Cet effet cyclique provoque des dilatations et contractions répétitives de l'isolant. Cela pourrait entraîner des fissures dans l'isolant qui peuvent se propager et provoquer un début de court-circuit interne. Les efforts mécaniques sur les tôles et les conducteurs ont des composantes alternatives qui provoquent des vibrations de la structure [36], [37]. Ces vibrations provoquent l'érosion et l'abrasion de l'isolant entraînant leur détérioration.
- **Environnemental** : La présence d'humidité ou de produits chimiques dans l'air ambiant peut détériorer la qualité de l'isolation et conduire à défaut d'enroulement. Le début de la dégradation entraîne des courants de fuites qui accélèrent la détérioration de l'isolant jusqu'au court-circuit franc. Une autre conséquence est la création de l'ozone et les oxydes d'azote qui peuvent se combiner avec l'humidité pour former de l'acide nitrique, qui détruit l'isolant.

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

I.4.1.1. défauts d'isolant dans un enroulement:

La dégradation des isolants dans les enroulements peut provoquer des courts-circuits. En effet, les différentes pertes (Joule, fer, mécanique,...) engendrent une augmentation de la température des différents constituants du moteur. Or les matériaux d'isolation ont une limite de température, de tension et mécanique. Dans ce cas, un court-circuit peut apparaître dans l'enroulement concerné [36]. Les différentes causes pour ce type de défaut sont :

- ✓ Dégradation de l'isolant à la fabrication.
- ✓ Tension de l'enroulement supérieure à la limite du matériau d'isolation.
- ✓ Courant élevé dans l'enroulement dû à un court-circuit, un défaut du convertisseur, une surcharge.
- ✓ vibrations mécaniques.
- ✓ 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.

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

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

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

I.4.1.2. Court-circuit entre spires

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

le circuit rotorique dans le cas des machines asynchrones [06]. 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 (apparition d'un 2ème court-circuit). Par contre, le couple électromagnétique moyen délivré par la machine reste sensiblement identique hormis une augmentation des oscillations de couple liées au déséquilibre des courants de phases engendré par le défaut.

I.4.1.3. Court-circuit entre phases

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

L'apparition d'un court-circuit proche de l'alimentation entre phases, induirait des courants très élevés qui conduiraient à la fusion des conducteurs d'alimentation et/ou à la disjonction par les protections. D'autre part, un court-circuit proche du neutre entre deux phases a de moins graves conséquences ; il engendre un déséquilibre des courants de phases avec un risque moindre de la fusion des conducteurs.

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

I.4.2. Défaits rotoriques

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

Ces défaillances sont essentiellement dues à un problème [36], [38], [39]:

- thermique (surcharge,...)
- électromagnétique
- résiduel (déformation,...)
- dynamique (arbre de transmission,...)
- environnemental (agression,...)

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

I.4.2.1. Ruptures de barre

La cassure ou rupture de barre est un des défauts les plus fréquents au rotor. Elle peut se situer soit au niveau de son encoche soit à l'extrémité qui la relie à l'anneau rotorique. La détérioration des barres réduit la valeur moyenne du couple électromagnétique et augmente l'amplitude des oscillations, qui elles-mêmes provoquent des oscillations de la vitesse de rotation, ce qui engendre des vibrations mécaniques et donc, un fonctionnement anormal de la machine. La grande amplitude de ces oscillations accélère la détérioration de la machine. Ainsi, le couple diminue sensiblement avec le nombre de barres cassées induisant un effet cumulatif de la défaillance. L'effet d'une cassure de barre croît rapidement avec le nombre de barres cassées. [07]

I.4.2.2. Ruptures d'anneaux

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

La rupture d'une portion d'anneau déséquilibre la répartition des courants dans les barres rotoriques et de ce fait, engendre un effet de modulation d'amplitude sur les courants statoriques similaire à celui provoqué par la cassure de barres. [07]

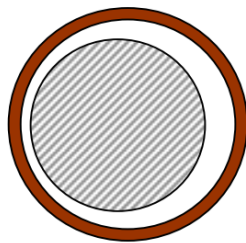
I.4.2.3. Excentricité statique, dynamique et mixte

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, **Figure I.13.**).

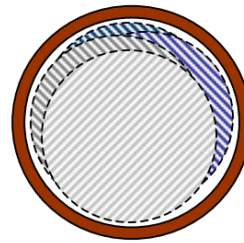
Ce phénomène est appelé excentricité (statique et dynamique) dont l'origine peut être liée à un positionnement incorrect des paliers lors de l'assemblage, à un défaut roulement (usure), à un défaut de charge, ou à un défaut de fabrication (usinage). [08]

Trois cas d'excentricité, sont généralement distingués :

- 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 'mixte', associant les deux cas précédemment cités



Excentricité statique



Excentricité dynamique

(plusieurs positions du rotor au cours de la rotation)

Figure I.13. Modélisation schématique de l'excentricité statique et dynamique

Ce défaut modifie les comportements magnétique et mécanique de la machine. En effet, l'augmentation de l'excentricité dans l'entrefer induit une augmentation des forces électromagnétiques qui agissent directement sur l'armature statorique ainsi que l'enroulement correspondant, ce qui engendre une dégradation de son isolation. D'autre part, cette augmentation peut avoir comme conséquence des frottements entre le stator et le rotor en raison des forces d'attraction magnétique qui déséquilibrent le système. Ceci donne naissance à des niveaux de vibration considérables dans les enroulements [40]

I.4.2.4. Roulement à billes

Les roulements à billes jouent un rôle très important dans le fonctionnement de tout type de machines électriques. Les défauts des roulements peuvent être causés par un mauvais choix de matériau à l'étape de fabrication. Les problèmes de rotation au sein de la culasse du roulement, causés par un roulement abimés, écaillé ou fissuré, peuvent créer des perturbations au sein de la machine. Nous savons que des courants électriques circulent au niveau des roulements d'une machine asynchrone ce qui, pour des vitesses importantes, peut provoquer

la détérioration de ces derniers. La graisse, qui permet la lubrification et la bonne rotation. L'analyse vibratoire de la machine ou l'analyse harmonique des courants statorique permet de détecter ce type de défaillances. [09]

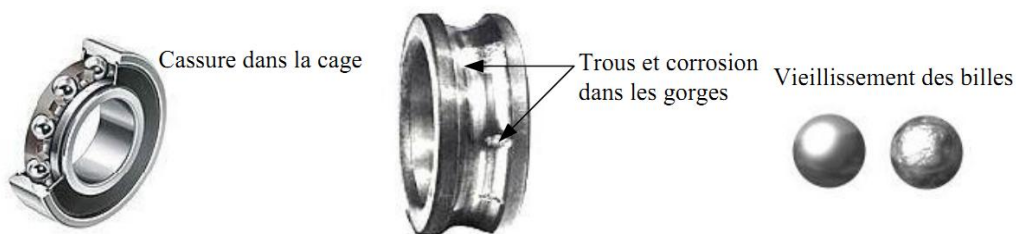


Figure I.14. Différentes défaillances des roulements à billes

Classiquement ce type de défaut est diagnostiqué à partir du spectre d'une mesure acoustique ou vibratoire [10], on distingue:

- Trous dans les gorges du roulement intérieurs et extérieures,
- Ondulation de la surface du roulement,
- Attaque des billes,
- Corrosion due à l'eau,
- Défaut de graissage, problème dû à la température,
- Décollement, effritement de surface, provoquée 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. Dans le cas le plus défavorable, la présence d'un roulement défectueux peut amener au blocage du moteur.

I.4.3. Autres défaillances

Au stator, il n'y a pas de pièces mobiles donc a priori pas de défaillances mécaniques. Cependant, il peut apparaître des phénomènes d'oxydation liés à l'environnement de la machine et plus précisément au taux de salinité qui influe sur l'étanchéité et les contacteurs.[07]

I.4.4. Défauts extérieurs (d'environnement) :

Ces effets sont principalement dus à un problème de nature [11]:

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

I.5. Surveillance des machines électriques

I.5.1. Des grandeurs mesurables et des signaux de défaut

La démarche la plus souvent utilisée pour le diagnostic de défauts sur les machines électriques, est l'analyse des grandeurs mesurables et les signaux de défaut. La **figure I.15** montre une représentation des mesures sur une machine électrique.

Les grandeurs et signaux de défauts les plus fréquemment utilisés sont :

- les courants statoriques ;
- le flux rayonnant de dispersion ;
- la tension d'alimentation ;
- la tension de neutre ;
- le couple électromagnétique ;
- la vitesse de rotation ;
- la puissance instantanée ;
- les courants dans le repère de Park id, iq
- la vibration mécanique.

Ces signaux donnent des informations qui peuvent être ou non redondantes. Cependant, l'équipement nécessaire pour l'acquisition des signaux reste encore coûteux. Le traitement des informations mesurées est un travail d'identification de la panne à travers sa signature [14].

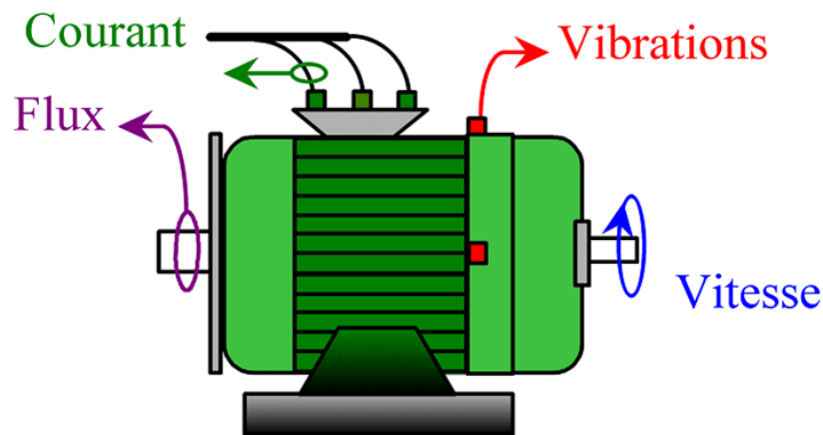


Figure I.15. : Représentation de quelques grandeurs mesurable sur une machine électrique [14].

I.5.2. Approche signal

Le principe des méthodes d'analyse de signal repose sur l'existence de caractéristiques fréquentielles propres au fonctionnement sain ou défaillant du procédé. La première étape dans cette approche concerne la modélisation des signaux en les caractérisant dans le domaine fréquentiel, en déterminant leur contenu spectral, leur variance, etc. [15]

L'apparition d'un défaut étant à l'origine de nombreux phénomènes tels que le bruit, l'échauffement, les vibrations, etc. Ces symptômes sont la manifestation flagrante d'une modification des caractéristiques temporelles et fréquentielles des grandeurs électriques et mécaniques. Dans la littérature, sont présentées plusieurs techniques de détection de défauts par traitement du signal [16], [17]. Le traitement du signal est utilisé depuis de nombreuses années pour détecter des défaillances dans les machines électriques, essentiellement les défauts rotoriques [18]. Le défaut étant traduit par l'apparition de fréquences directement liées à la vitesse de rotation, ces méthodes se trouvent bien adaptées à la détection de défauts. Exigeant uniquement un capteur de courant ou/et un capteur de vitesse, l'analyse spectrale est de loin la méthode de diagnostics la plus économique et la plus rapide, d'où son succès auprès des industriels. Cependant, cette méthode se prête uniquement au diagnostics à vitesse constante et principalement sur des machines alimentées par le réseau à fréquence constante.

Avec le développement des applications à vitesse variable, ces méthodes se trouvent inexploitable, principalement à cause de la non stationnarité des signaux et de l'effet de la modulation de largeur d'impulsion (MLI) qui parasite le traitement fréquentiel des données, rendant ainsi difficile la détection des fréquences de défaut.

I.5.3. Analyse spectrale

L'analyse spectrale est utilisée depuis de nombreuses années pour détecter des défaillances dans les machines électriques, essentiellement les ruptures de barres au rotor des machines asynchrones, la dégradation des roulements, les excentricités et les courts-circuits dans les bobinages. Ces cas se prêtent bien à cette approche dans la mesure où de nombreux phénomènes se traduisent par l'apparition de fréquences directement liées à la vitesse de rotation ou à des multiples de la fréquence d'alimentation.

La surveillance par analyse spectrale de la machine asynchrone consiste donc à effectuer une transformée de Fourier des grandeurs affectées par le défaut, et à visualiser les fréquences parasites constituant la signature d'un défaut dans la machine. Les grandeurs choisies sont soit électriques (plus particulièrement les courants de ligne) [16], [17], soit mécaniques (vibration, couple électromagnétique) [19]. Cette technique permet une surveillance rapide et peu onéreuse car elle exige un simple capteur de courant ou de vibration.

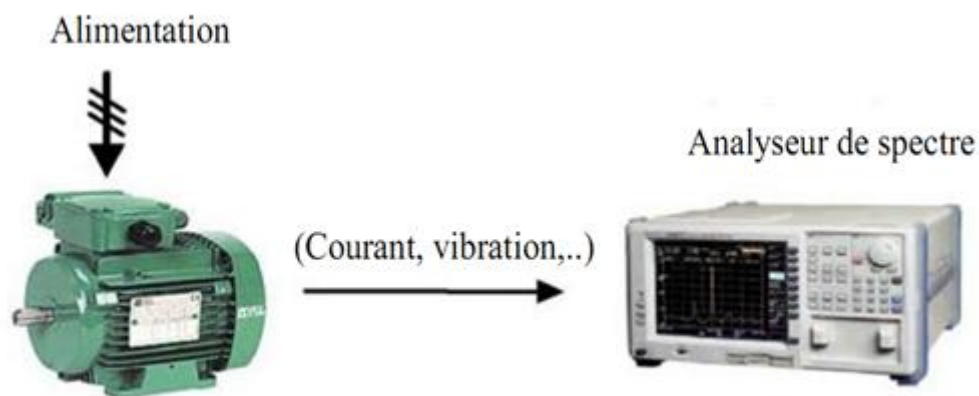


Figure I.16. Principe de la surveillance par analyse spectrale

I.6. MODELISATION DES DEFAUTS

La modélisation et l'identification des paramètres de la machine électrique avec défaut entre spires du bobinage stator sont des étapes importantes pour la détection de ce type de défaut et son diagnostics. Les modèles doivent présenter un compromis entre simplicité et précision. L'utilisation des modèles externes simplifiés de défaut peut s'avérer limitée, car il est difficile, même théoriquement, d'inclure toutes les imperfections qui existent dans la machine en présence d'un défaut. Toutefois, les modèles sont nécessaires pour étudier le comportement des différentes variables de la machine et d'en déduire des signatures caractéristiques d'un défaut quelconque. L'étude du comportement des machines électriques avec défaut grâce à ces modèles permet la prédiction des grandeurs externes qui peuvent être mesurées et exploité par des techniques de diagnostics.

En ce qui concerne les modèles physiques, ce sont les lois régissant l'électromagnétisme qui sont utilisées pour décrire l'évolution des variables internes le fonctionnement de la machine électrique. Ces modèles sont divers et peuvent varier en complexité et/ou en précision selon la méthode de modélisation utilisée. Nous citons les trois grandes familles de modèles pouvant être adaptés aux dispositifs électromagnétiques en général, et aux machines électriques en présence de défaut en particulier ; à savoir :

- Les modèles internes basés sur la résolution, analytique ou numérique, des équations de diffusion du champ électromagnétique;
- Les modèles de circuits magnétiques utilisant les réseaux de perméance;
- Les modèles de circuits électriques.

Nous introduisons alors une description rapide de ces différents types de modélisation pour permettre une compréhension adéquate des problèmes propres à chacun d'entre eux. Nous détaillerons ensuite la démarche utilisée pour la modélisation interne des machines en présence de défauts. Ces trois types de modèles peuvent être traités avec différentes approches qu'elles soient spatiales, temporelle ou fréquentielles. En général, les modèles internes sont mis en œuvre par des méthodes numériques de résolution des équations aux dérivées partielles telle que la méthode des éléments finis. Les modèles de circuits magnétiques ou circuits électriques sont plutôt mis en œuvre avec des méthodes de résolution d'équation différentielles ordinaires. Nous présentons un bref rappel des trois types de méthodes souvent utilisées dans ces cas :

I.6.1. Méthode des éléments finis

La modélisation des dispositifs électromagnétiques basée sur le calcul de la répartition du champ est la méthode dite « locale » de représentation des phénomènes. Elle peut être mise en œuvre avec un calcul analytique ou alors en utilisant les méthodes numériques bien développées de nos jours. La méthode des éléments finis (FEM) est la méthode la plus adéquate et la plus répandue pour le calcul de champs magnétiques statiques ou quasi-statiques ; elle permet de décrire fidèlement des géométries complexes et de tenir compte des non linéarités des propriétés physiques telle que la loi $\mathbf{b}(\mathbf{h})$ dans les matériaux magnétiques.

La modélisation des machines électriques a connu un développement remarquable ces dernières décennies grâce l'utilisation de la méthode des éléments finis. En effet, beaucoup de laboratoires et chercheurs se sont penchés sur différents aspects pour aboutir actuellement à des outils de calculs permettant de tenir compte de plusieurs phénomènes physiques jusque là négligés ou approchés par des modèles externes.

La méthode d'éléments finis est capable d'examiner l'effet de saturation et les effets d'harmoniques de l'espace et donne beaucoup d'informations précises sur le comportement des machines électriques mais elle requiert un temps de calcul important. Aujourd'hui, on peut effectuer les analyses en régimes transitoires pas à pas dans le temps de la machine électrique grâce à la disponibilité des ordinateurs puissants. Cette méthode a permis un apport significatif en termes d'identification des paramètres des modèles circuit alliant ainsi la rapidité des modèles circuits et la précision des modèles champ. L'utilisation de cette méthode pour la modélisation des défauts dans les machines électriques est une étape importante qu'ont franchi un certain nombre de chercheurs. Lorsqu'un défaut se produit dans la machine électrique, la répartition des courants dans les encoches et la distribution du champ sont plus ou moins modifiées en fonction de la gravité du défaut. La méthode d'éléments finis peut être utilisée pour le calcul de champs et l'identification précise des paramètres de la machine en présence de défaut.

L'avantage qu'apporte une méthode basée sur le calcul de champ réside dans le fait qu'elle décrit les phénomènes localement, en particulier un défaut, elle en donne ensuite une représentation globale vu du circuit électrique équivalent. Actuellement, on peut disposer d'un outil complet permettant la simulation d'une machine électrique en présence d'un défaut de court-circuit et connectée à son alimentation. C'est ce que nous allons présenter en détail dans

les chapitres suivants. Cependant, l'utilisation de tels outils nécessite un temps de calcul long et une modélisation pour chaque configuration de défaut. Bien que cette approche de modélisation décrive précisément le comportement des variables internes et externes de la machine, elle ne peut pas être adéquate pour le diagnostics des machines électriques.

La méthode d'éléments finis a été utilisée pour l'identification des paramètres des modèles circuits équivalents de machines électriques avec défaut. On peut citer pour le cas des machines synchrones à aimants permanents, pour le cas des machines asynchrones et pour les machines à réluctance variable.

I.6.2. Méthode des réseaux de perméance

La méthode des réseaux de perméance est basée sur la décomposition du circuit magnétique de la machine électrique en tubes de flux élémentaires. Chaque tube ainsi obtenu, est caractérisé par sa perméance suivant qu'il se trouve dans le fer ou dans l'air. A partir de cette décomposition, on construit un réseau dit de perméance. Cette approche permet de prendre en compte les caractéristiques du fer utilisé pour la construction de la machine. En effet, le calcul des différentes perméances ne peut se faire qu'en fixant une valeur précise pour la perméabilité relative du fer (μ_r). Le mouvement de rotation de la machine est pris en compte par l'intermédiaire de perméance d'entrefer qui varie en fonction de la position du rotor de la machine.

I.6.3. Méthode des circuits électriques

Tout circuit magnétique, qu'il soit statique (transformateur) ou dynamique (machine tournante) peut être modélisé par un circuit électrique équivalent. Ce circuit fait intervenir des résistances, des inductances et des mutuelles dont les valeurs peuvent être déterminées de différentes manières. Dans les modèles circuits, la première étape consiste à représenter le dispositif par autant de circuits couplés qu'il en existe physiquement.

Les modèles circuits électriques sont rapides et prennent très peu de temps de calcul. Par contre, il est nécessaire de vérifier que les phénomènes physiques sont correctement représentés par ces modèles circuits électriques et de s'assurer de la pertinence des méthodes d'identification de leurs paramètres. Ces modèles circuits électriques nécessitent une bonne représentativité des phénomènes physiques par un circuit électrique simplifié et une bonne identification des paramètres de ce circuit équivalent avec une méthode quelconque.

I.7. Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons rappelés quelques définitions sur les différents éléments de constitution des machines asynchrones. En citant les différents défauts pouvant les affectés. Ce qui nous permet de comprendre la réalisation de ces systèmes ainsi que leur fonctionnement.

Chapitre II

*Modélisation de la machine
asynchrone*

II.1. INTRODUCTION

La modélisation et la simulation de la machine asynchrone ont comme pour objectif la commande et le dimensionnement de l'entraînement électrique. Modéliser un système cela signifie qu'il est possible de prédire son comportement quand il est soumis à une sollicitation connue.

Les modèles sont du type analytiques au numérique. Les progrès de l'informatique et du génie des logiciels permettent de réaliser des modélisations performantes et d'envisager l'optimisation des machines électriques.

La modélisation développée dans ce chapitre, a pour objet de simuler la machine asynchrone triphasée en mode sain et avec l'apparition d'un court-circuit. L'objectif est avant tout d'appliquer un modèle de la machine asynchrone qui met en évidence l'influence du défaut étudié dans notre cas qui est le court-circuit inter-spire sur les grandeurs mesurables de la machine (courants, vitesse, couple,...), afin d'étudier les phénomènes mis en jeu.

II.1.1. Le stator

Il est constitué d'un enroulement bobiné réparti dans les encoches du circuit magnétique. Ce circuit magnétique est constitué d'un empilage de tôles dans lesquelles sont découpées des encoches parallèles à l'axe de la machine (figure II.1).



Figure. II. 1. Stator de la machine asynchrone triphasée à cage.

Le bobinage statorique peut se décomposer en deux parties : les conducteurs d'encoches et les têtes de bobines.

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

L'objectif est d'obtenir à la surface de l'entrefer une distribution de courant la plus sinusoïdale possible, afin de limiter les ondulations du couple électromagnétique.

II.1.2. Le rotor

Dans le rotor à cage, les anneaux de court-circuit permettent la circulation des courants d'un conducteur d'encoche (barre rotorique) à l'autre. Ces barres conductrices sont régulièrement réparties, et constituent le circuit du rotor (*figure II.2*). Cette cage est insérée à l'intérieur d'un circuit magnétique constitué de disques en tôles empilés sur l'arbre de la machine analogue à celui du moteur à rotor bobiné.

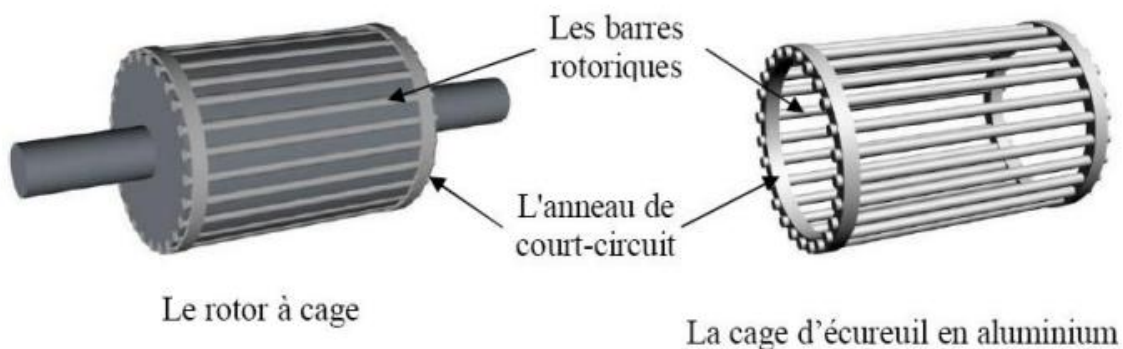


Figure. II. 2. Rotor de la machine asynchrone triphasée à cage.

Dans le cas de rotors à cage d'écoreuil, les conducteurs sont réalisés par coulage d'un alliage d'aluminium, ou par des barres massives de cuivre 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, mais leur résistance est suffisamment faible pour que les courants de fuite dans les tôles soient négligeables, sauf lorsqu'il y a une rupture de barre [9].

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

II.1.3. 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. Ils sont généralement à roulements pour les machines de petite et moyenne puissance [07].

Afin d'assurer la variation de vitesse des moteurs électriques mais aussi la conversion de l'énergie, de nombreuses machines se voient associer un convertisseur. Ainsi, de nos jours, on trouve dans un grand nombre de procédés industriels, des associations entre des convertisseurs statiques et des machines électriques (pompage, levage,...).

Cela permet de fournir aux moteurs des tensions et des courants de fréquence variable servant à commander la machine en couple ou en vitesse.

II.2. Modèle mathématique de la machine asynchrone triphasée

II.2.1. Hypothèses d'étude

On considère les matériaux magnétiques comme non saturés (linéaire), c'est à dire que la saturation et les effets d'hystérésis des circuits magnétiques sont négligés ainsi que les phénomènes provoquant des variations de résistance et d'inductance (température, fréquence).

Les pertes dans le fer ne sont pas prises en compte dans la mise en équation de la machine.

La force magnétomotrice d'entrefer produit par chaque enroulement est supposée à répartition spatiale sinusoïdale, ce qui revient à négliger les harmoniques d'espace.

L'effet d'ouverture des encoches est négligé, on suppose que l'entrefer est de largeur constante.

II.2.2. Mise en équations de la machine

Nous recherchons l'ensemble des équations différentielles indépendantes définissant le modèle de la machine. Le but de la mise en équations est d'effectuer une simulation numérique.

La figure (II.3) montre une schématisation simplifiée d'une machine asynchrone avec une représentation simplifiée des bobinages statoriques et rotoriques. Sur ce schéma, θ est un angle électrique désignant le décalage angulaire entre l'axe de symétrie de la première phase rotorique (l'axe ar) et l'axe de symétrie de la première phase statorique (l'axe as).

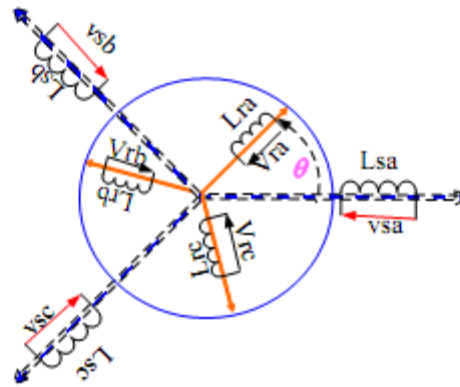


Figure. II. 3.Représentation schématique des bobinages rotorique et statorique (θ est un angle électrique désignant la position du rotor).

$$\begin{aligned}
 [V_{s,abc}] &= R_s [I_{s,abc}] + [L_{s,abc}] \frac{d}{dt} [I_{s,abc}] + \frac{d}{dt} ([M_{sr}] [I_{r,abc}]) \\
 [V_{r,abc}] &= R_r [I_{r,abc}] + [L_{r,abc}] \frac{d}{dt} [I_{r,abc}] + \frac{d}{dt} ([M_{sr}]^T \cdot [I_{r,abc}]) = [0]
 \end{aligned}
 \tag{II.1}$$

Ou :

$[V_{s,abc}] = [V_{sa} \ V_{sb} \ V_{sc}]^T$ Et $[I_{s,abc}] = [I_{sa} \ I_{sb} \ I_{sc}]^T$ Sont respectivement le vecteur tension et le vecteur courant statoriques.

$[V_{r,abc}] = [V_{ra} \ V_{rb} \ V_{rc}]^T$ et $[I_{r,abc}] = [I_{ra} \ I_{rb} \ I_{rc}]^T$ Sont respectivement le vecteur tension et les vecteurs courant rotoriques.

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

$$[R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \quad \text{Et} \quad [R_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \quad (\text{II.2})$$

$[L_{s,abc}]$ et $[L_{r,abc}]$: matrices des inductances statoriques et rotoriques.

$$[L_{ss}] = \begin{bmatrix} L_s & M_s & M_s \\ M_s & L_s & M_s \\ M_s & M_s & L_s \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad [L_{rr}] = \begin{bmatrix} L_r & M_r & M_r \\ M_r & L_r & M_r \\ M_r & M_r & L_r \end{bmatrix} \quad (\text{II.3})$$

$[M_{sr,abc}]$: Matrice des mutuelles inductances statoriques rotoriques qui est une matrice circulante.

$$[M_{sr,abc}] = M_{sr} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{\pi}{3}) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (\text{II.4})$$

R_s et R_r sont les résistances des bobines statoriques et des bobines équivalentes rotoriques.

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

$$R_s = r_{sa} = r_{sb} = r_{sc}, \quad R_r = r_{ra} = r_{rb} = r_{rc}$$

$$L_s = L_{sa} = L_{sb} = L_{sc}, \quad L_r = L_{ra} = L_{rb} = L_{rc}$$

$$M_s = M_{s,ab} = M_{s,ac} = M_{s,bc}, \quad M_r = M_{r,ab} = M_{r,ac} = M_{r,bc}$$

Où le système d'équation électrique global de la machine, peut s'écrire sous la forme suivante:

$$\begin{bmatrix} [V_{s,abc}] \\ [V_{r,abc}] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [R_s] & 0 \\ 0 & [R_s] \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} [L_{s,abc}] \\ [I_{r,abc}] \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} [L_{ss}] & [M_{sr}] \\ [M_{rs}] & [L_{rr}] \end{bmatrix} + w \frac{d}{d\theta} \begin{bmatrix} 0 & [M_{sr}] \\ [M_{rs}] & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [I_{s,abc}] \\ [I_{r,abc}] \end{bmatrix} \quad (\text{II.5})$$

Avec : $[L_{ss}]$ et $[L_{rr}]$ des constantes.

θ : est l'angle qui définit la position du rotor par rapport au stator.

$\frac{d\theta}{dt} = \omega_r$: Représente la vitesse mécanique du rotor.

II.2.3. Equation mécanique

Le couple électromécanique est déduit de la Coénergie W_{CO} à l'aide de l'équation suivante :

$$\omega_r = \frac{d\theta}{dt} \quad (II.6)$$

W_{CO} : L'énergie emmagasinée dans le circuit magnétique, par conséquent dans le cas du moteur à cage, elle peut être exprimée par la relation ci-dessous :

$$W_{CO} = \frac{1}{2} [I_s^t L_{ss} I_s + I_s^t L_{sr} I_r + I_r^t L_{rs} I_s + I_r^t L_{rr} I_r] \quad (II.7)$$

D'où :

$$C_{em} = \frac{1}{2} \left[I_s^t \frac{\partial L_{ss}}{\partial \theta_r} I_s + I_s^t \frac{\partial L_{sr}}{\partial \theta_r} I_r + I_r^t \frac{\partial L_{rs}}{\partial \theta_r} I_s + I_r^t \frac{\partial L_{rr}}{\partial \theta_r} I_r \right] \quad (II.8)$$

On considère que les matrices L_{ss} , L_{rr} sont des constantes on obtient :

$$C_{em} = \frac{1}{2} \left[I_s^t \frac{\partial L_{sr}}{\partial \theta_r} I_r + I_r^t \frac{\partial L_{rs}}{\partial \theta_r} I_s \right] \quad (II.9)$$

Puisque le transposé d'un scalaire est un scalaire donc le deuxième terme de (II.9) devient :

$$I_r^t \frac{\partial L_{rs}}{\partial \theta_r} I_s = \left(I_r^t \frac{\partial L_{sr}}{\partial \theta_r} I_s \right)^t \quad (II.10)$$

On utilise la transformation algébrique suivante :

$$\left(A^t . B^t . C \right)^t = C^t . B . A$$

On aura :

$$I_r^t \frac{\partial L_{sr}^t}{\partial \theta_r} I_s = I_s^t \frac{\partial L_{sr}^t}{\partial \theta_r} I_r \quad (II.11)$$

On obtient donc:

$$Cem = I_s^t \frac{\partial L_{sr}}{\partial \theta_r} I_r \quad (II.12)$$

L'équation mécanique de la rotation de la machine :

$$J \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} = Cem - f_v \frac{\partial \theta}{\partial t} - C_r \quad (II.13)$$

Avec, J : le moment d'inertie, f_v : coefficient de frottement visqueux et C_r : le couple résistant.

À partir de l'ensemble des équations précédentes on propose finalement la synthèse suivante de la MAS:

$$\left\{ \begin{array}{l} \blacktriangleright [V_s] = [R_s][I_s] + \frac{d[\Psi_s]}{dt} \\ \blacktriangleright [\Phi_s] = [L_s][I_s] + [M_r][I_r] \\ \blacktriangleright Cem = I_s^t \frac{\partial L_{sr}}{\partial \theta} I_r \\ \blacktriangleright J \frac{\partial \Omega}{\partial t} + f_v \Omega = Cem - C_r \quad \text{et} \quad \frac{d\theta}{dt} = \Omega \end{array} \right. \quad (II.14)$$

Le système d'équations natives est complètement déterminé et ce dernier pourrait alors être résolu numériquement dans le but d'observer l'évolution temporelle des différentes grandeurs.

II.3. MODELE DU CIRCUIT ELECTRIQUE AVEC DEF AUT [36]

Dans ce paragraphe, nous désignons par court-circuit entre-spices tout défaut d'isolation pouvant intervenir entre deux spires d'une même phase du stator. Le défaut n'est pas forcément franc et une résistance équivalente permet de modéliser ce qui reste de la résistance de l'isolant entre les spires court-circuitées. La valeur de la résistance indique la sévérité du défaut d'isolation. Un schéma simplifié de la situation est donné sur la (figure 2.4) montrant la résistance (r_f) du défaut. Le bobinage dans lequel survient le défaut est donc divisé en deux parties que l'on appellera (as2) pour la partie court-circuitée et (as1) pour la partie saine. En pratique la résistance (r_f) varie depuis une valeur infinie lorsque la machine est saine à zéro lorsque la machine est en présence d'un défaut franc de court-circuit entre-spices.

Dans la figure au-dessus le bobinage de la phase as est subdivisé en deux parties : la partie saine (as1) et la partie court-circuitée (as2). La résistance de défaut (rf) dont la valeur varie entre l'infini pour une machine saine et zéro pour un court-circuit franc, n'est qu'une représentation globale de phénomènes locaux qui peuvent être dispersés tout le long des bobines.

Nous avons défini le coefficient (μ) qui décrit le nombre relatif de spires court-circuitées. Nous avons donc :

$$N_f = N_{a2} = \mu (N_{a1} + N_{a2}) = \mu N_s$$

Où (N_s) est le nombre de spires par phase et (N_f) est le nombre de spires de la partie du bobinage concernée par le défaut (sous-bobine as2).

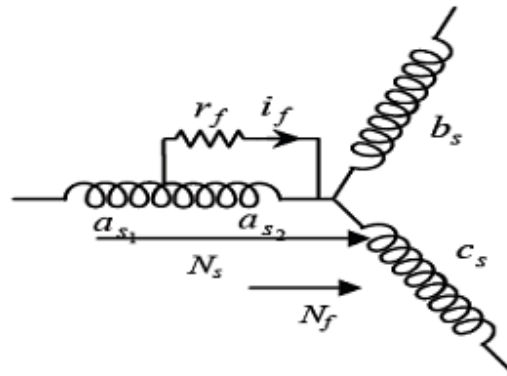


Figure. II. 4. Schéma de principe d'un défaut entre spires sur une phase statorique as.

Conformément au schéma de la (figure 2.4), l'équation du circuit de la phase as peut être écrite de la manière suivante :

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

$$\begin{aligned}
 [V_{sabc f}] &= R_{sf} [I_{sabc f}] + [L_{sabc f}] \frac{d}{dt} [I_{sabc f}] + \frac{d}{dt} ([M_{srf}] [I_{rabc}]) \\
 [V_{sabc f}] &= R_r [I_{rabc}] + [L_{rabc}] \frac{d}{dt} [I_{rabc}] + \frac{d}{dt} ([M_{srf}] [I_{rabc}]) = [0]
 \end{aligned}
 \tag{II.15}$$

Avec :

$$[V_{sabc f}] = [V_{sa1} \ V_{sb} \ V_{sc} \ V_{sa2}]^T \text{ et } [I_{sabc f}] = [I_{sa1} \ I_{sb} \ I_{sc} \ I_{sa2}]^T$$

La figure (II.5) donne une représentation schématique des différentes inductances et mutuelles des deux circuits.

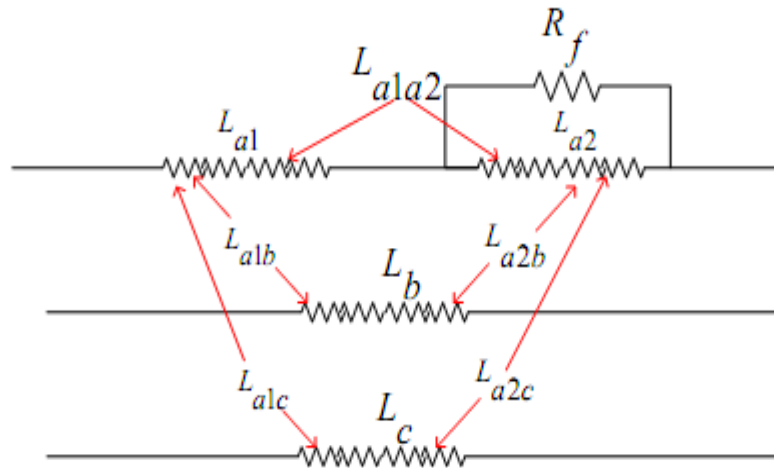


Figure. II. 5.Circuit du stator avec une schématisation d'un défaut dans la phase a_s .

Les résistances de la sous bobine saine (a_{s1}) et de la sous-bobine court-circuitée (a_{s2}) sont notées par (R_{as1}) et (R_{sa2}) respectivement ; elles sont proportionnelles au nombre de spires des parties concernées. Par conséquent, nous pouvons les exprimer en fonction de la résistance de phase (R_s) et le coefficient μ .

Nous avons donc :

$$r_{as1} = (1 - \mu)r_{as} \tag{II.16}$$

$$r_{as2} = \mu r_{as}$$

L'étude des circuits élémentaires de la phase a_s donne les relations suivantes :

$$V_{as} = V_{as1} + V_{as2}, 0 = V_{as2} - r_f I_f$$

$$I_{as1} = I_{as}, I_{as2} = I_{as} - I_f \tag{II.17}$$

Les inductances propres et mutuelles inductances de la machine en défaut de court-circuit déterminées par des expressions très simples prennent uniquement en compte le pourcentage du nombre de spires en court-circuit (μ en %). Par exemples inductances des sous bobines résultant d'un court-circuit entre-spores d'une phase sot déterminées par les expressions suivantes à partir des paramètres de la machine saine.

II.3.1. Modèle du circuit électrique avec défaut statorique

$$L_{as1} = (1 - \mu)^2 L_{as}, L_{as2} = \mu^2 L_{as}, M_{a1a1} = \mu(1 - \mu) L_{as} \quad (II.18)$$

Donc :

$[R_s]$ et $[R_r]$: matrice des résistances statoriques et rotorique.

$$[R_s] = \begin{bmatrix} (1 - \mu)r_s & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & r_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r_s & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \mu r_s \end{bmatrix} \text{ et } [R_r] = \begin{bmatrix} r_r & 0 & 0 \\ 0 & r_r & 0 \\ 0 & 0 & r_r \end{bmatrix} \quad (II.19)$$

$[L_{ss}]$ et $[L_{rr}]$ sont les matrices d'inductances statorique et rotorique.

$$[L_{ss}] = \begin{bmatrix} (1 - \mu)^2 L_s & (1 - \mu)M_s & (1 - \mu)M_s & \mu(1 - \mu)M_s \\ (1 - \mu)M_s & L_s & M_s & \mu M_s \\ (1 - \mu)M_s & M_s & L_s & \mu M_s \\ \mu(1 - \mu)M_s & \mu M_s & \mu M_s & \mu^2 L_s \end{bmatrix} \quad (II.20)$$

$$[L_{rr}] = \begin{bmatrix} L_r & M_r & M_r \\ M_r & L_r & M_r \\ M_r & M_r & L_r \end{bmatrix}$$

$[Msr_{abc}]$ est la matrice des mutuelles inductances stator rotor qui est une matrice circulante

$$[Msr_{abc}] = \begin{bmatrix} (1 - \mu) \cos(\theta) & (1 - \mu) \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & (1 - \mu) \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(\theta) \\ \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \quad (II.21)$$

II.4. CONCLUSION

Nous avons présenté dans ce chapitre le modèle qui permet de prendre en compte un défaut statorique de court-circuit inter-spires d'une machine asynchrone.

Les équations de ce modèle comprennent celles relatives à la machine saine et des termes introduits par des défauts. Cette décomposition facilite la compréhension des effets induits dans les paramètres normaux de la machine suite au défaut.

Dans le chapitre suivant nous développons des simulations du modèle dans les cas sain et défaillant.

Chapitre III
Résultats des simulations

III.1. INTRODUCTION

Après avoir défini le modèle de la machine fonctionnant en modes asynchrone triphasée sans et avec défaut. Nous réalisons au cours de ce chapitre différentes simulations obtenus sous l'environnement MATLAB. L'accent sera mis sur l'impact des défauts dans le bobinage sur le comportement de la machine.

III.2 - Résultats de simulation d'un fonctionnement sain

Avant de procéder à la simulation, nous avons exploité les données fournis par [41] [42] dont les détails sont présentés dans l'annexe [A].

III.2 .1- Simulation de la machine asynchrone triphasée :

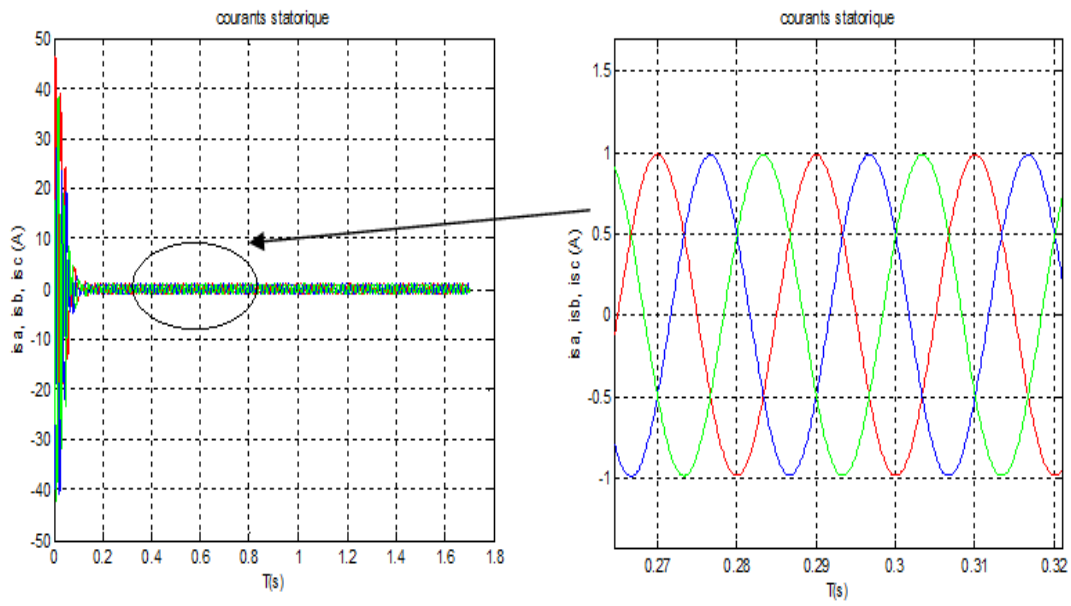
Nous avons tracé l'évolution de grandeurs temporelles telles que les courants, le couple et la vitesse de rotation lors de l'alimentation d'une seule étoile (MAS), le bobinage statorique est considéré sain.

La figure (III.1) montre l'évolution des courants de la machine, la vitesse de rotation, le couple électromagnétique et le flux statorique lors d'un démarrage à vide sous une tension nominale. La figure (III.2) concerne l'évolution des mêmes grandeurs de l'application d'une charge, le couple résistant est de 3 Nm.

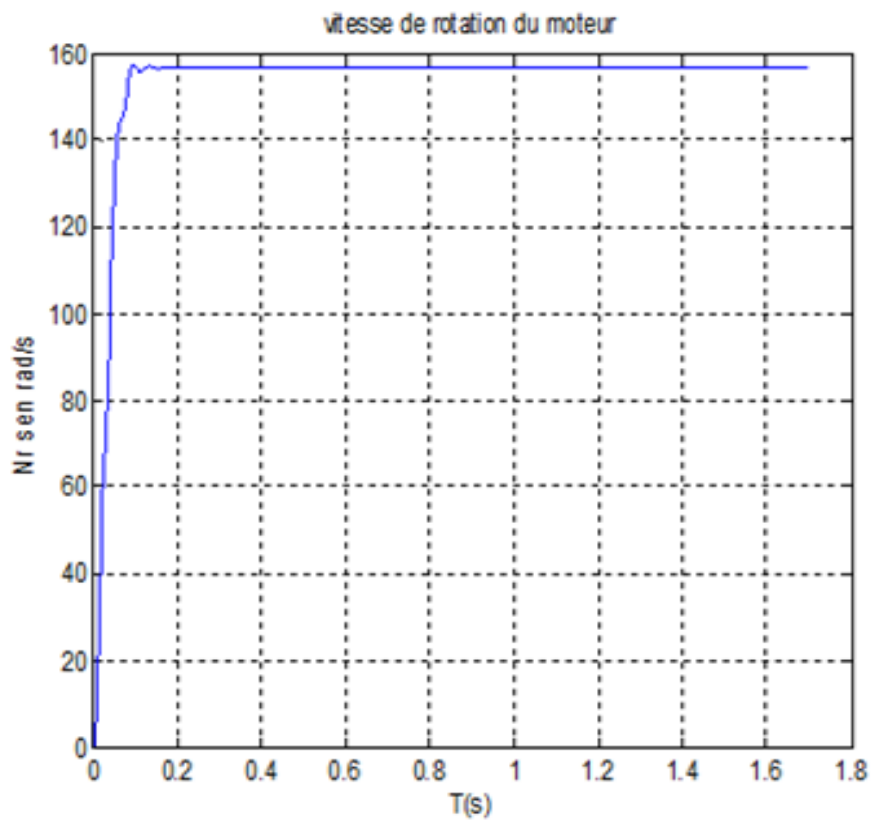
A partir de $t = 1s$, nous appliquons un échelon de couple résistant d'amplitude égale à 3 Nm. La figure (III.2.a) représente l'allure du courant de phase statorique, nous distinguons les phases de fonctionnement à savoir l'avant et l'après l'application du couple de charge.

Les figures (III.2.b), (III.2.c), (III.2.d) et (III.2.d) représentent les allures de la vitesse de rotation, du couple électromagnétique, des courants rotoriques et du flux statorique respectivement.

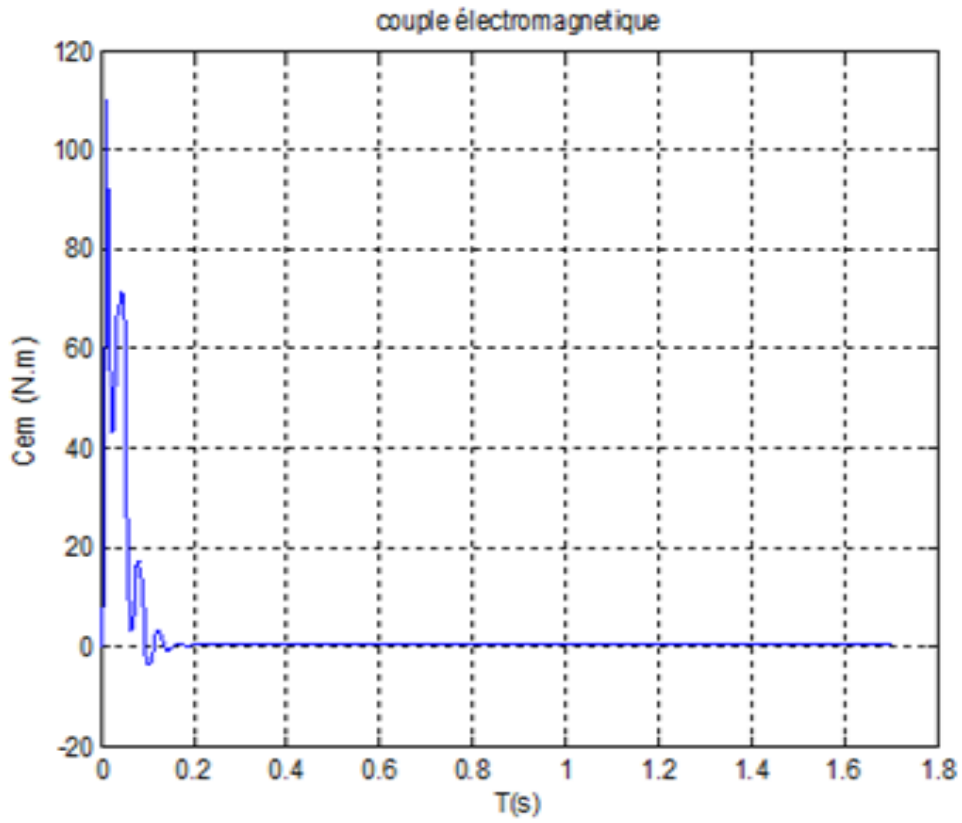
Nous constatons que la vitesse diminue pour atteindre la valeur nominale et le couple électromagnétique rejoint le couple résistant.



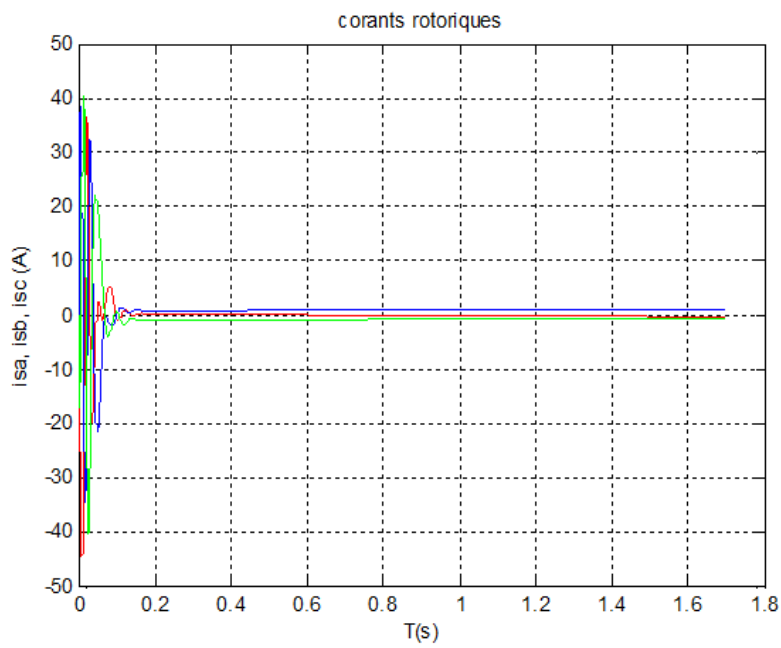
a. Courants de phase statorique



b. vitesse de rotation du moteur



c. couple électromagnétiques



d. Courants de phase rotorique

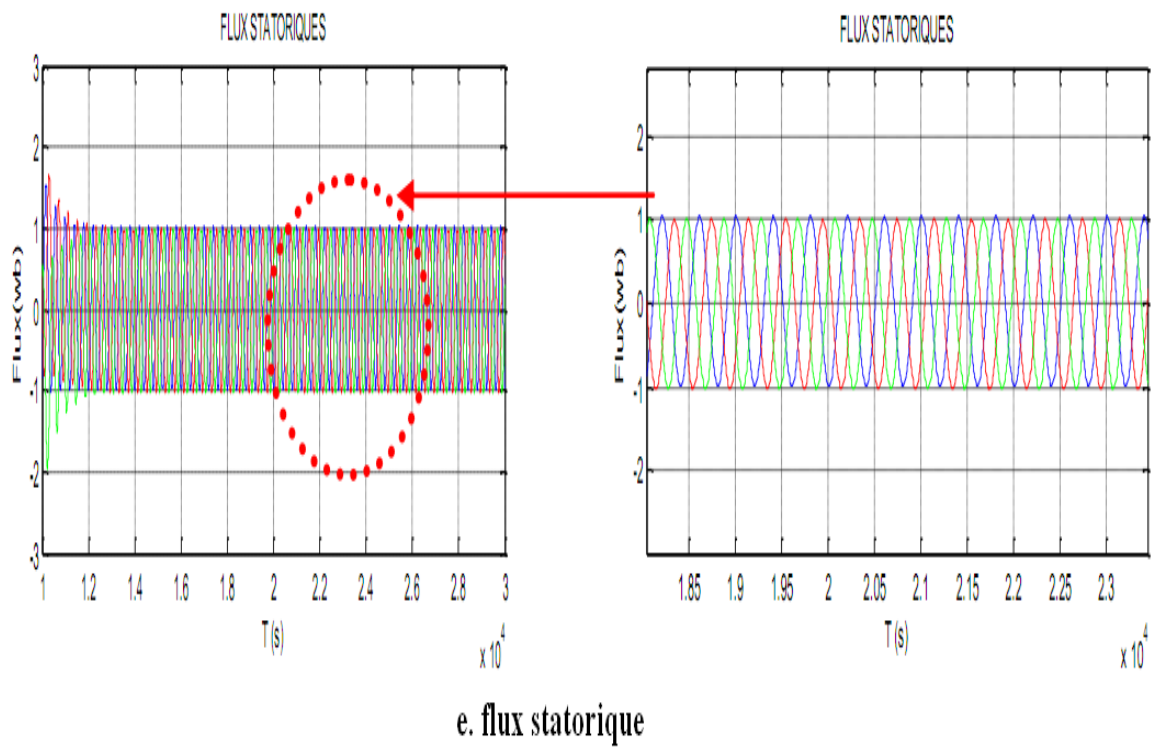
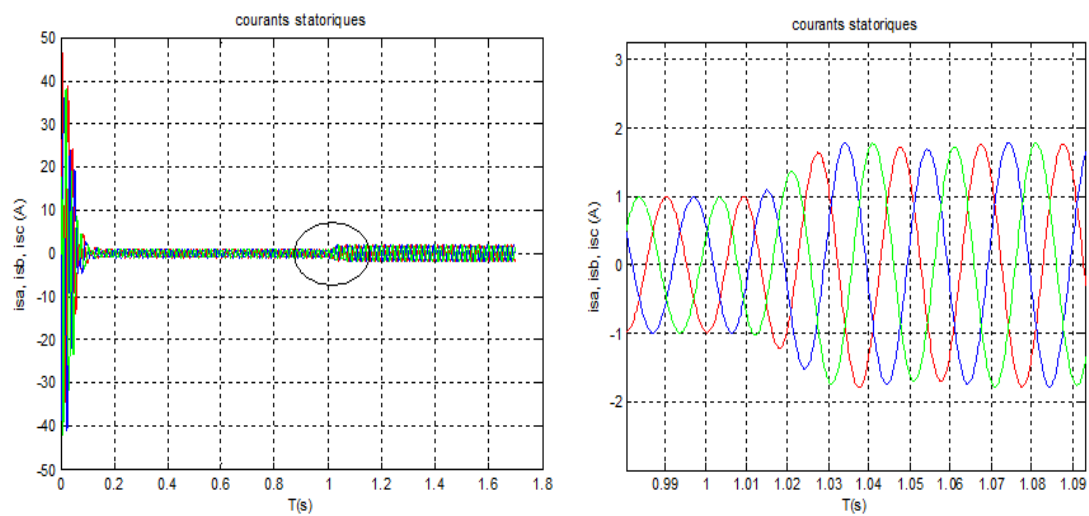


Fig. III.1 - Evolution des grandeurs électriques et électromécaniques à vide et sans défaut.



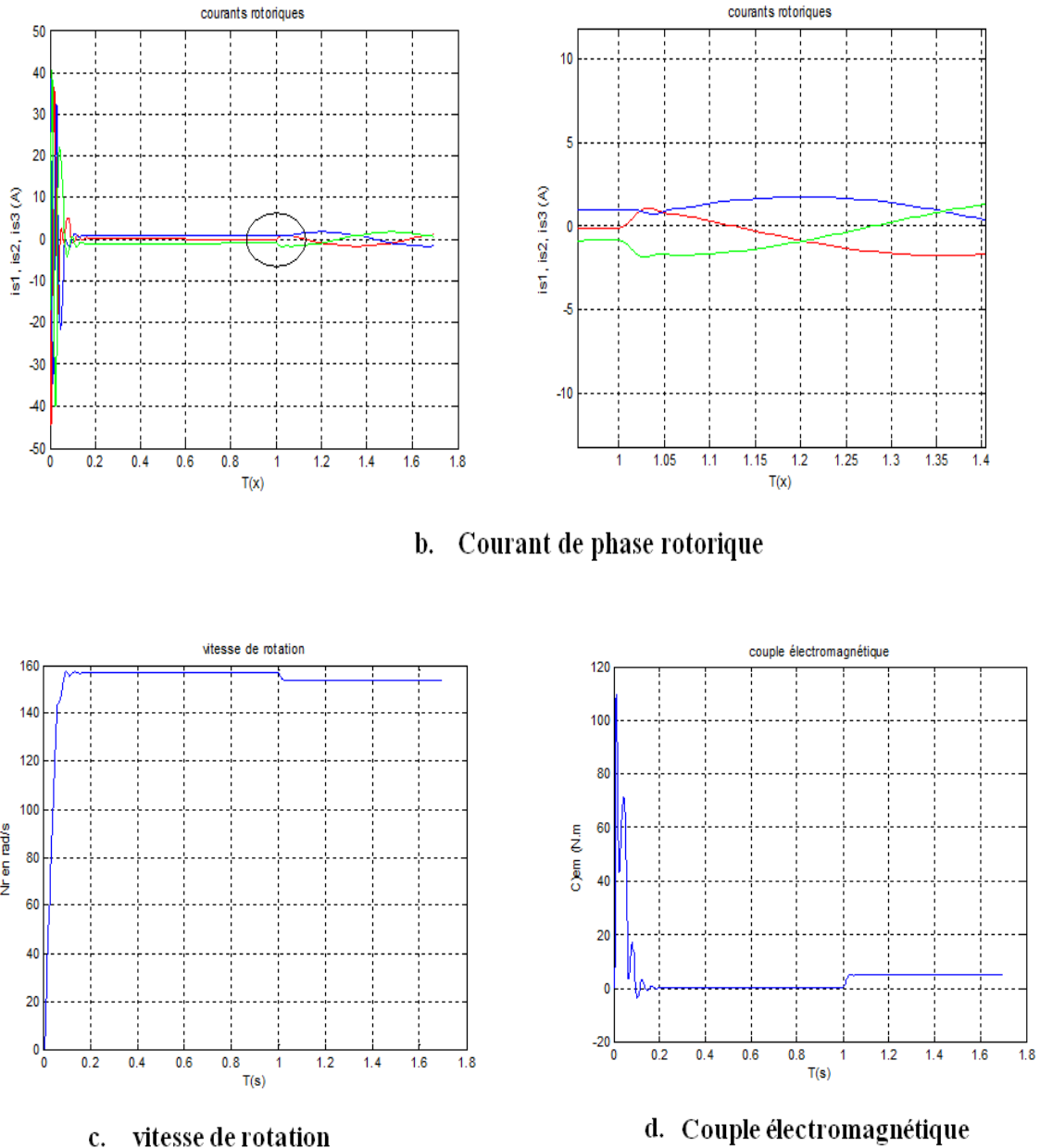
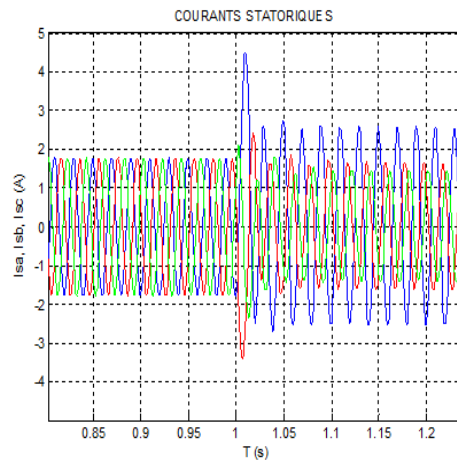
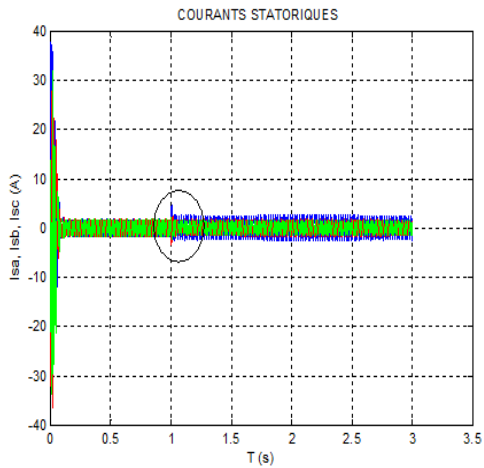


Fig. III.2 - Evolution des grandeurs électromécaniques sans défaut, le couple résistant nominal est de 3 Nm à partir de $t=1$ s.

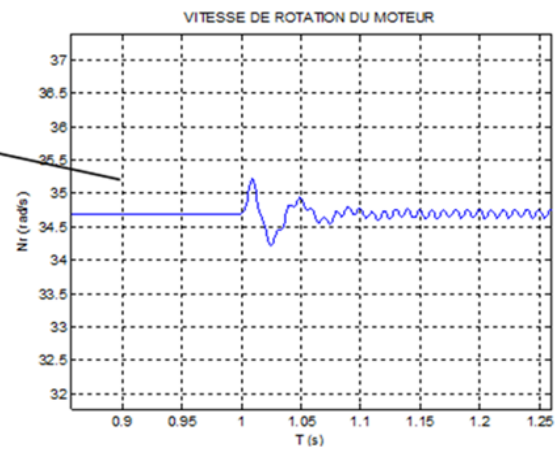
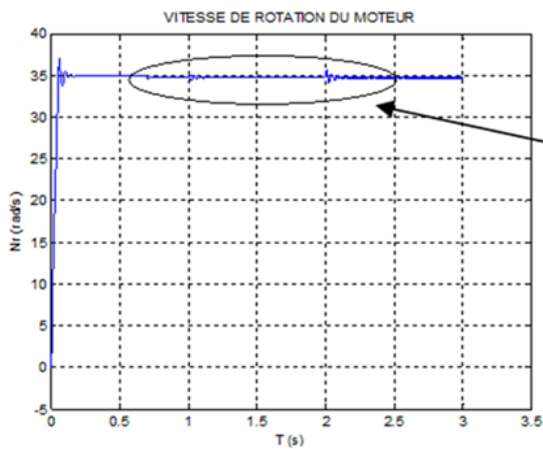
On remarque une diminution de la vitesse de rotation et une augmentation du courant statorique et du courant rotorique à l'instant de l'application du couple résistant.

III.3. Résultats de simulation lors d'un fonctionnement avec défaut statorique

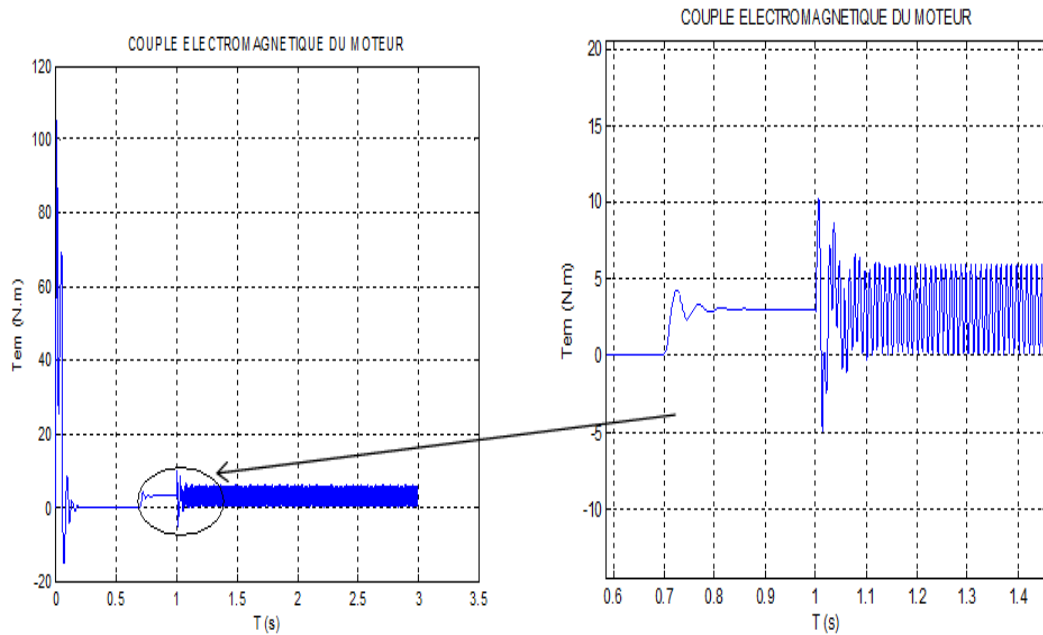
Afin d'étudier le défaut entre-spires, des simulations ont été effectués. Des courts circuits ont été pratiqués uniquement sur le bobinage d'une phase, le nombre de spires court-circuité varie de 5 à 10% du nombre totale de spires appartenant à la même phase.



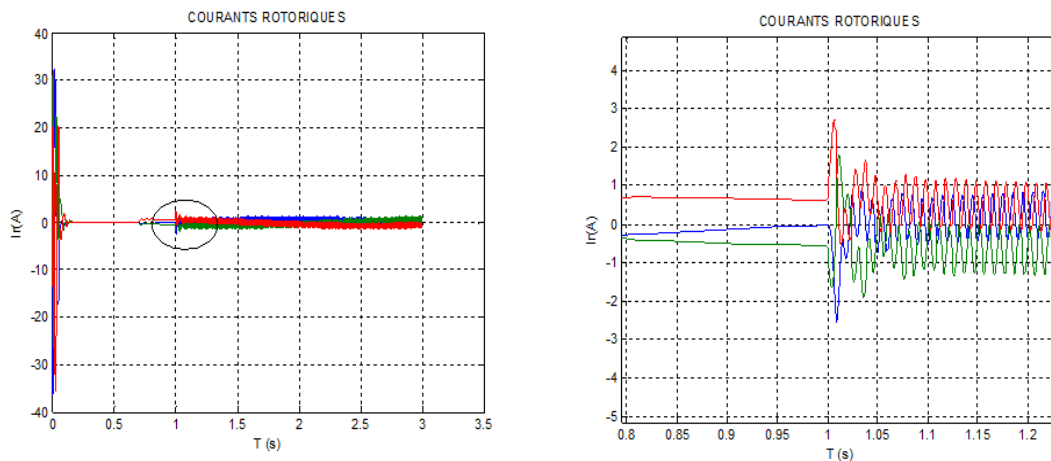
a. Courant statoriques avec 5% de spire en court circuit



b. comportement de la vitesse à 5% de spire en court circuit

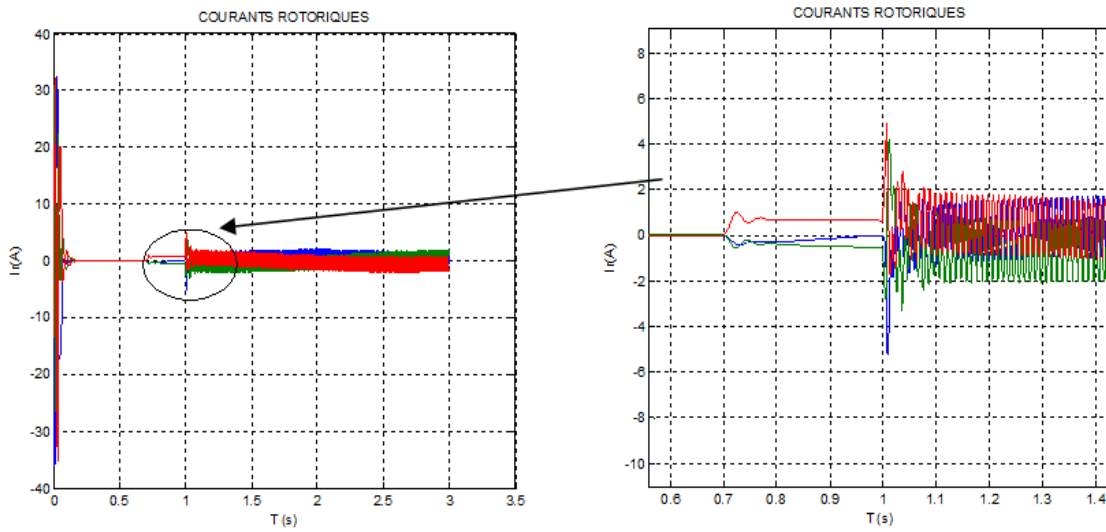


c. le couple électromagnétique avec 5% de spire en court circuit

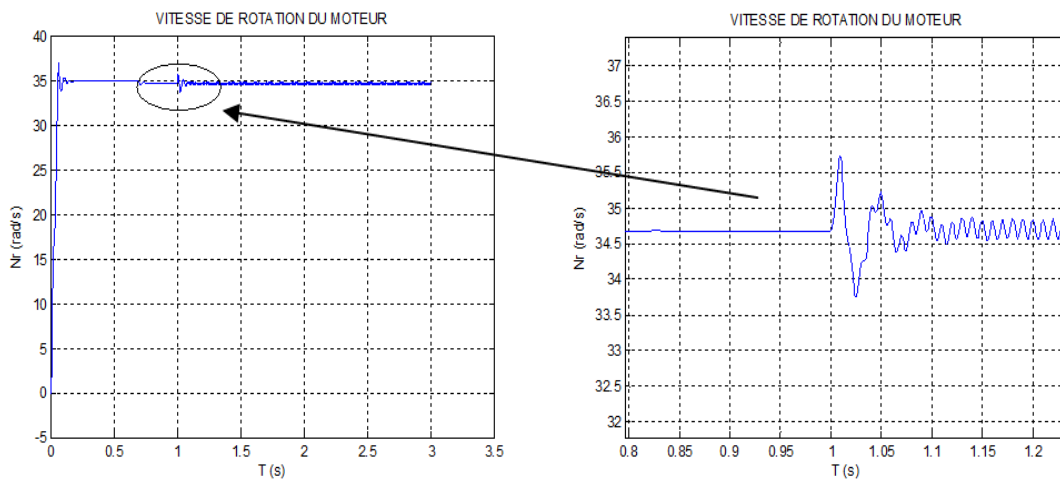


d. Courant Rotoriques avec 5% de spire en court circuit

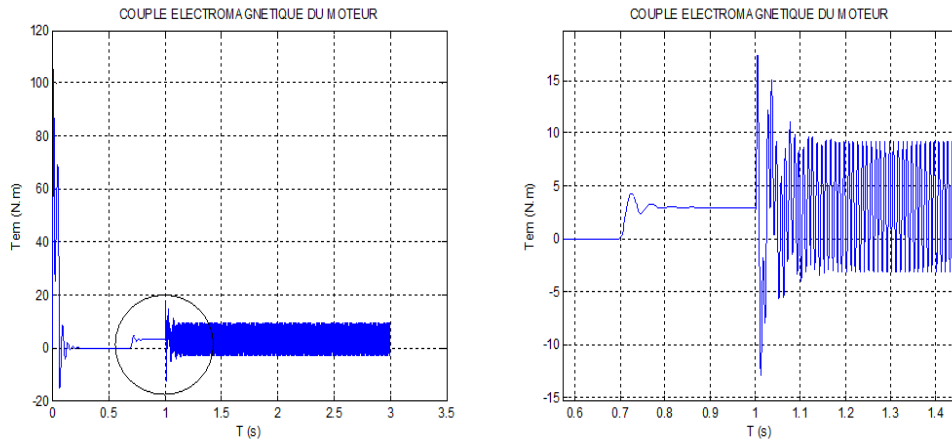
Fig. III.5- Evolution des grandeurs électriques et électromécaniques avec 5% de spire en court-circuit



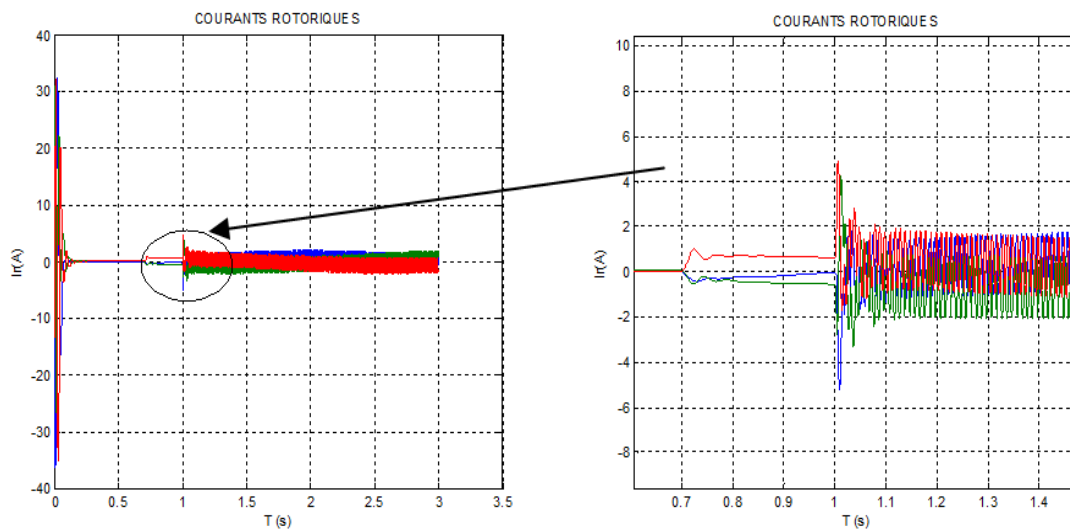
a. Courant statoriques avec 10% de spire en court circuit



b. Vitesse de rotation avec 10% de spire en court circuit



c. Couple électromagnétique avec 10% de spire en court circuit



d. Courant Rotoriques avec 10% de spire en court circuit

Fig. III.6. Evolution des grandeurs électriques et électromécaniques avec 10% de spire en court-circuit

Nous constatons que l'amplitude du courant dans la phase présentant un c-circuit est supérieure aux courants des autres phases. Toutefois, les courants qui parcourent ces phases sont amplifiés par rapport au cas du moteur sain. Cette amplification est fonction du nombre de spires en court-circuit.

Nous constatons une augmentation proportionnelle au défaut des amplitudes des courants rotoriques par rapport au cas sain.

D'autre part, le facteur de puissance global décroît avec l'augmentation du nombre de spires en court-circuit. Ceci peut être interprété par la modification de la distribution du bobinage, qui introduit une variation de l'inductance propre de la phase concernée par le défaut et affecte les autres phases par couplage magnétique.

Concernant les oscillations de la vitesse de rotation, elles augmentent avec le nombre de spires en court-circuit.

Lors de l'application d'un défaut de court-circuit, le couple électromagnétique possède une valeur moyenne à peu près égale au couple développé par la machine saine mais en présentant des bruits qui prennent de l'importance au fur et à mesure que le court-circuit devient important.

Les résultats nous montrent clairement que l'analyse directe du courant s'avère très difficile puisque, comme nous voyons, la modulation de l'amplitude est très faible à observer clairement et par conséquent il donne un diagnostic faible.

La pauvreté du signal temporel du courant, en renseignements nécessaires pour détecter les défauts en questions, nous amène au signal fréquentiel qui offre des informations précieuses sur sa composition.

Lors de l'application d'un défaut de court-circuit, le couple électromagnétique possède une valeur moyenne à peu près égale au couple développé par la machine saine mais en présentant des bruits qui prennent de l'importance au fur et à mesure que le court-circuit devient important.

L'analyse directe des grandeurs électriques et électromécaniques reste imprécise pour l'étude des défauts. Dans ce qui suit nous utilisons la transformée de Fourier Rapide (FFT) pour mieux quantifier les anomalies introduites par les défauts en analysant particulièrement les raies de fréquences à proximité du fondamental.

III .4. Analyse spectrale du courant statorique

Il est parfois difficile de se contenter uniquement sur les résultats obtenus précédemment pour détecter un défaut.

Des méthodes basées sur l'analyse spectrale des signaux constituent meilleur outil permettant d'appréhender les défauts.

L'analyse spectrale est utilisée pour détecter des défaillances dans les machines électriques, essentiellement les ruptures de barres au rotor des machines asynchrones, la dégradation des roulements, les excentricités et les courts-circuits dans les bobinages.

Dans ce travail nous avons choisis l'analyse de courant statorique en régime permanent par l'analyse de Fourier(FFT) car le spectre rend compte sur l'existence des défauts dans une machine électrique.

Les figures ci-dessus représentent respectivement les spectres relatifs aux couple, vitesse et courants statoriques en régime permanent, avec et sans court-circuit inter-spire.

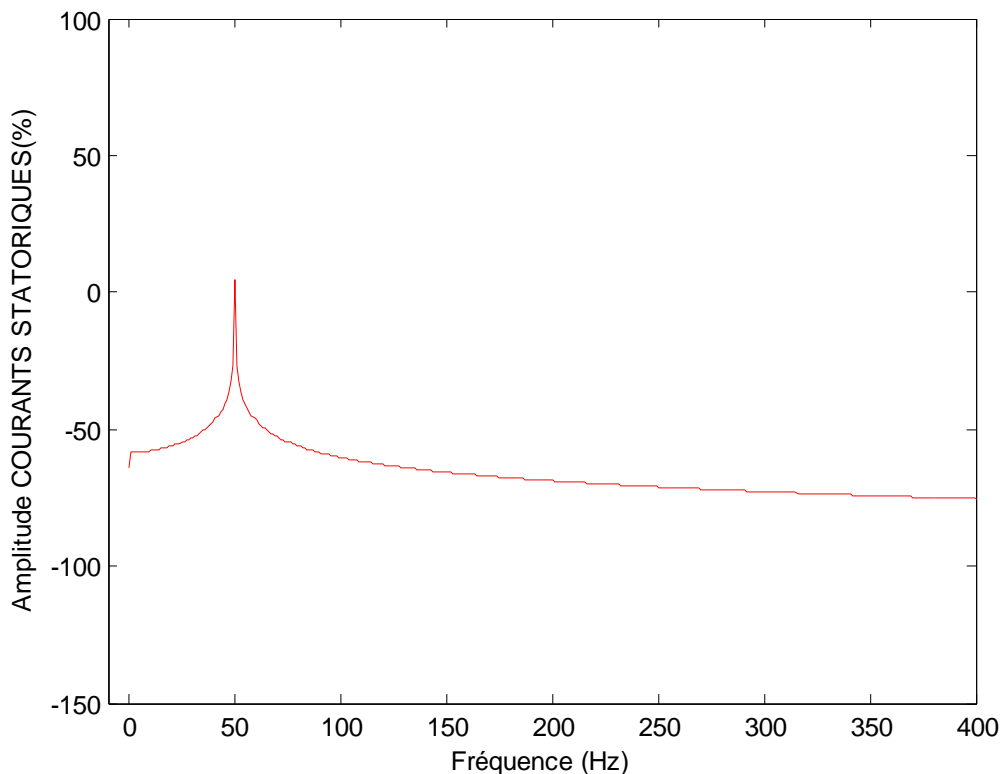


Figure.III.5. Spectre du courant statorique (machine saine)

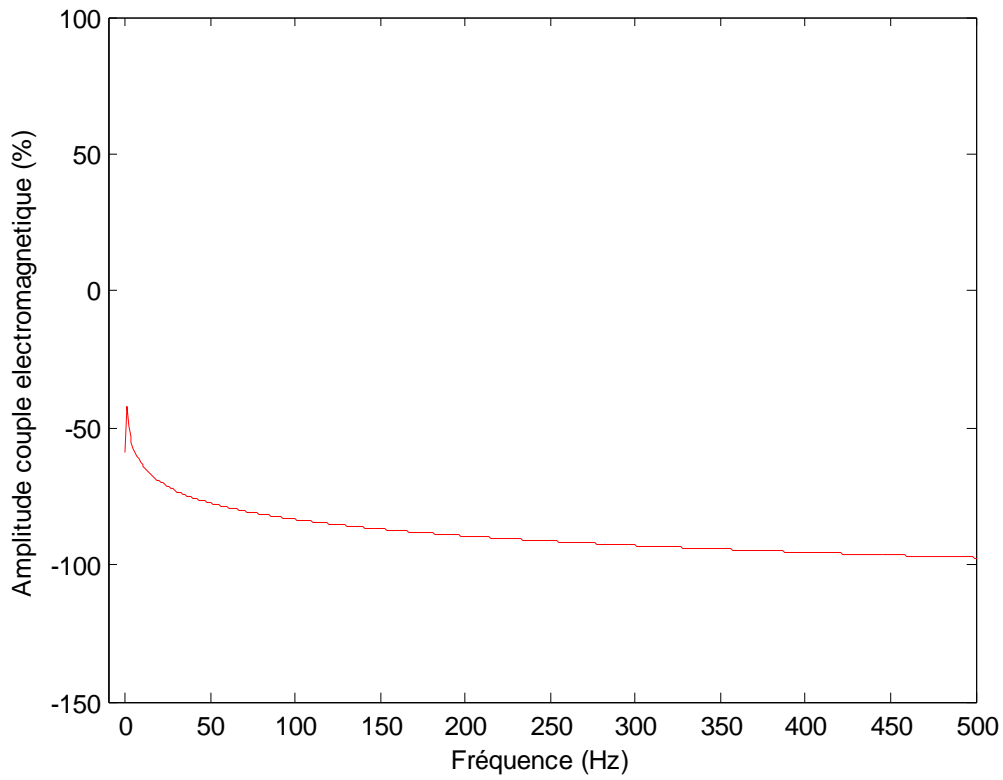


Figure.III.6. Spectre du couple électromagnétique (machine saine)

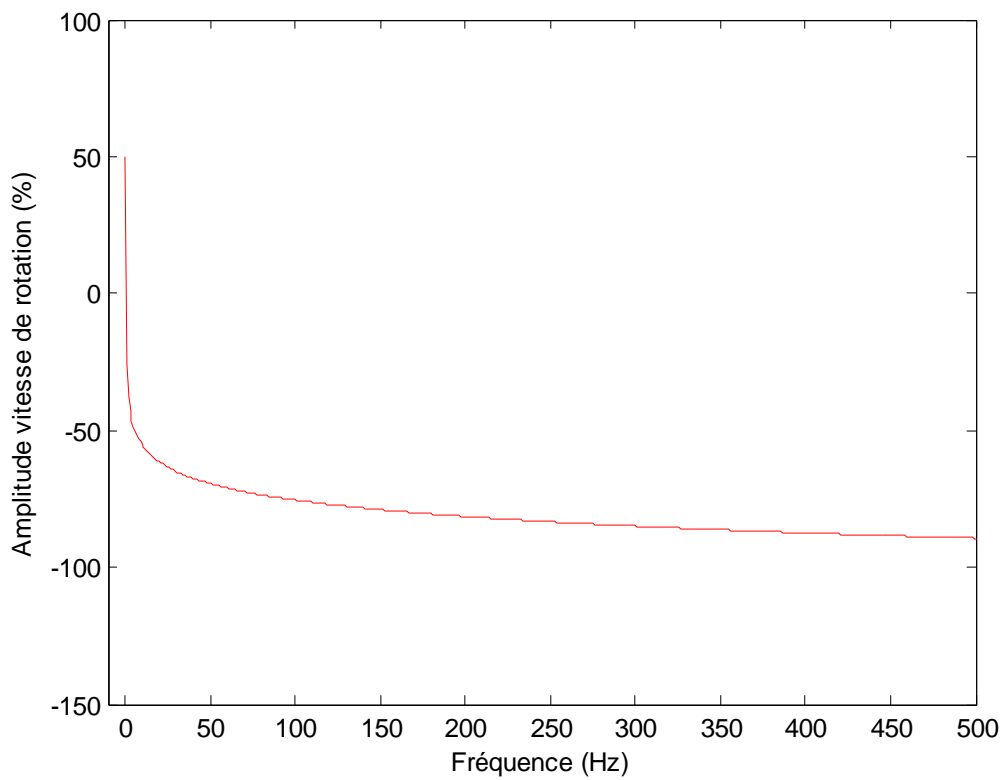


Figure.III.7. Spectre de vitesse (machine saine)

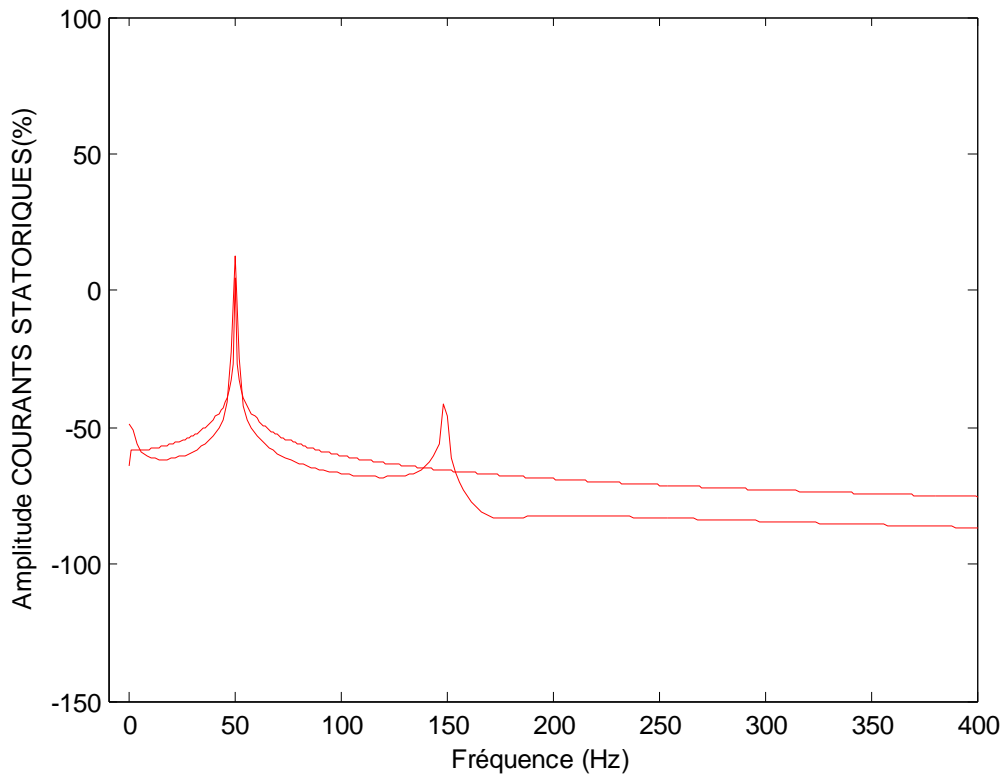


Figure.III.8. Spectre du courant statorique (machine défaillante)

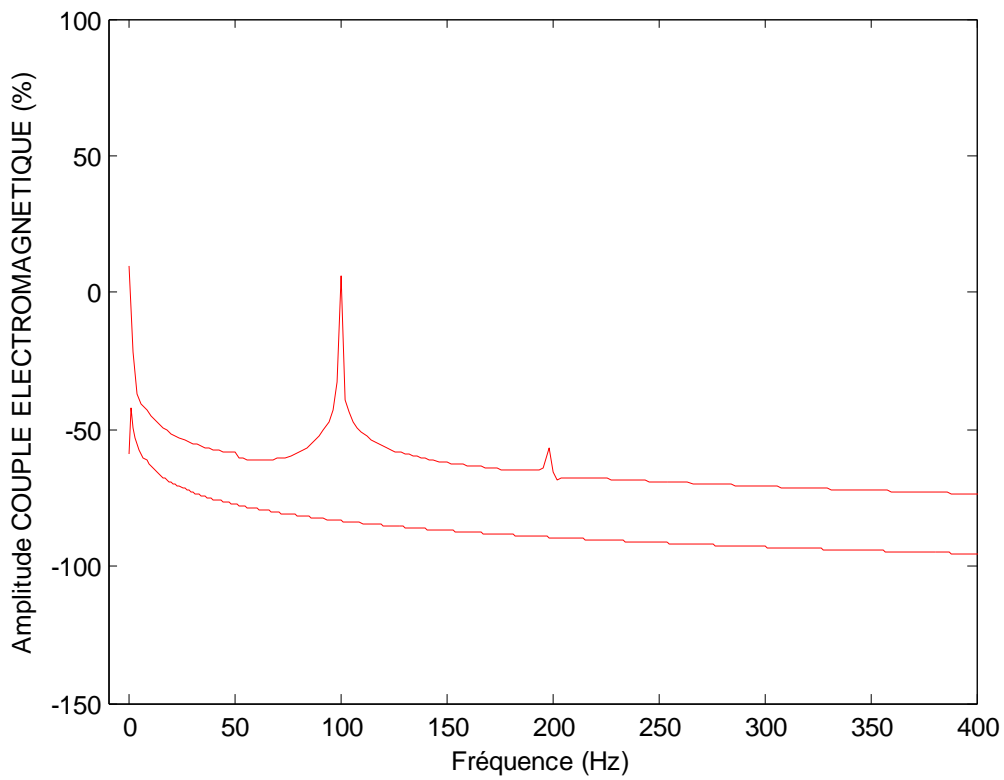


Figure.III.9. Spectre du couple électromagnétique (machine défaillante)

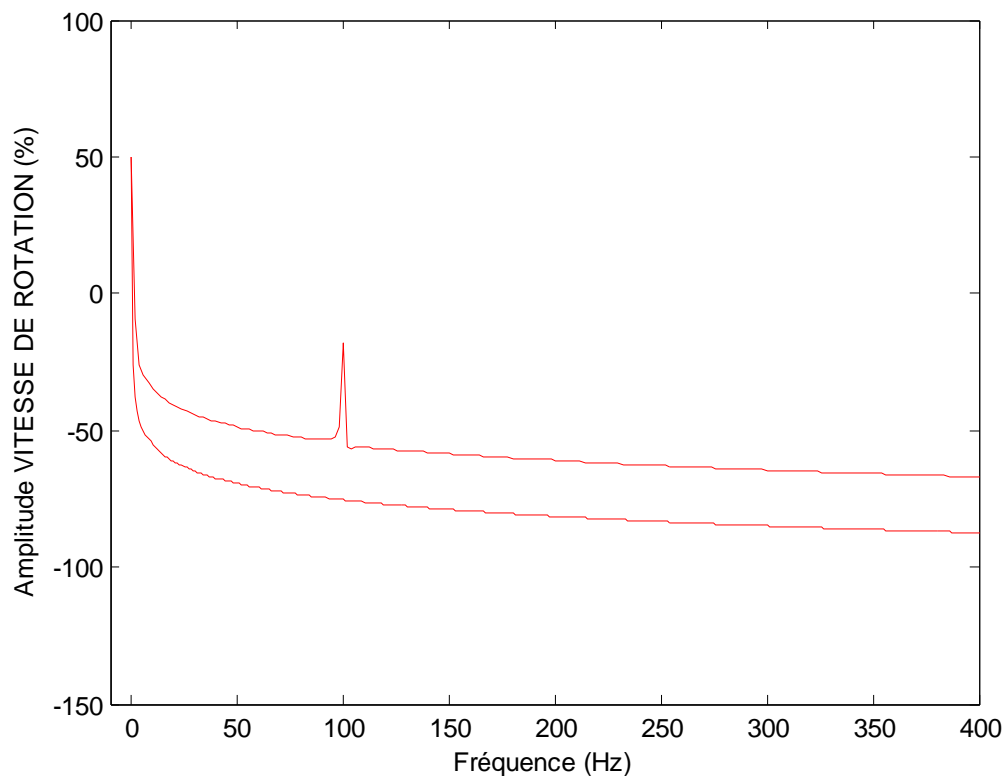


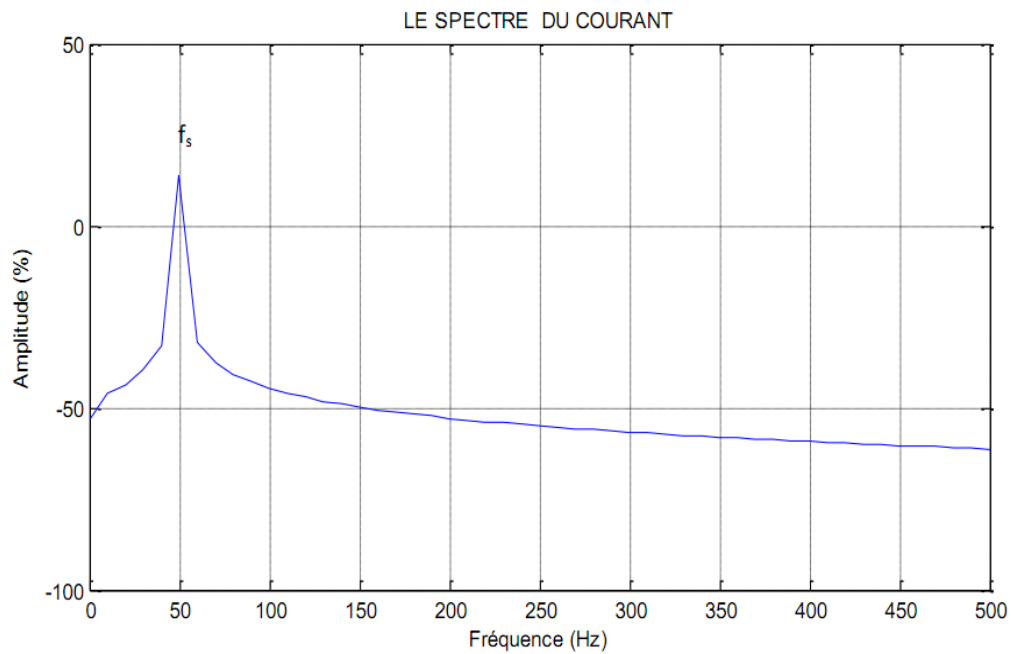
Figure.III.10. Spectre de vitesse (machine défaillante)

Nous relevons l'apparition des raies de fréquences introduits par le court-circuit inter spire aux niveaux de la vitesse et du couple, malheureusement l'étude de ces grandeurs nécessite l'utilisation des capteurs mécaniques, ceci constitue un handicap quand à l'exploitation de ces techniques. L'étude du courant statorique est intéressante compte de son accessibilité.

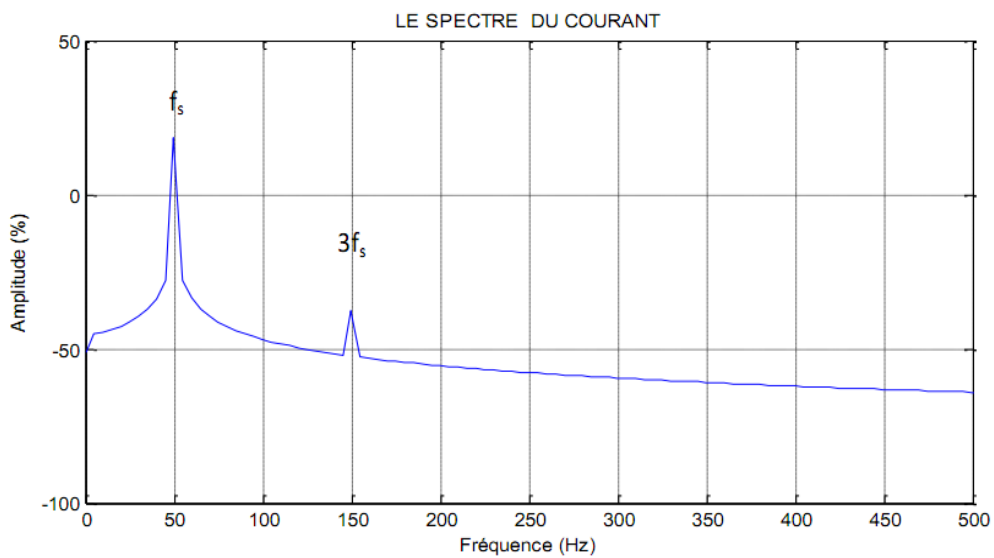
Une analyse spectrale du courant statorique d'un moteur sain fait apparaître un pic dont la fréquence est égal à la fréquence fondamentale 50Hz. (voir **figure.III.5**).

Par contre, une analyse spectrale du courant statorique d'un moteur défaillant fait apparaître deux pics, le premier correspond à la fréquence fondamentale 50Hz et l'autre à 150Hz qui signifie la fréquence de court-circuit. Tel que $f_{cc} = 150\text{Hz}$.

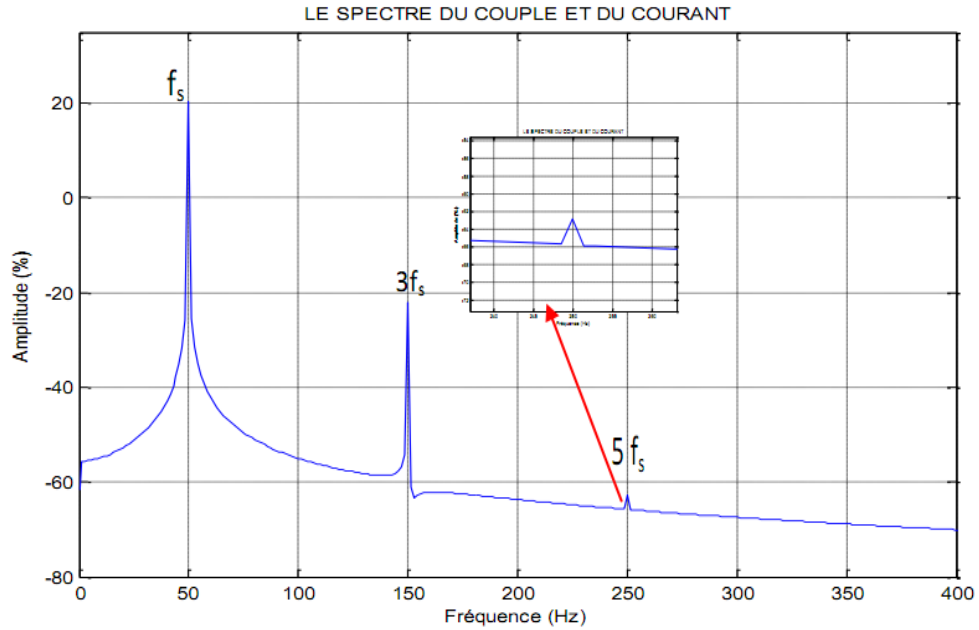
III.4.1. Effet du nombre de spires en court circuit sur les harmoniques



a .Spectre du courant statorique dans le cas sain



b .Spectre du courant statorique dans le cas défaillant, 5% des spires dans une phase sont en court-circuit



c. Spectre du courant statorique dans le cas défaillant, 10% des spires dans une phase sont en court-circuit

Fig. III.10. L'analyse spectrale du courant statorique en régime permanent avec différent nombre de spire en court-circuit

L'analyse des figures (III.10. a, b, c) montre l'amplitude de la fréquence du fondamental augmente avec le nombre des spires en court-circuit, idem pour le reste des harmonique. On peut ainsi conclure que les défauts de court-circuit entre spires définissent par une forte augmentation des valeurs de l'harmonique des courants de rais ($k \cdot f_s$) avec k : nombre impaire.

Le (tableau.3.1.) récapitule l'effet du nombre des spires en court-circuit sur les harmoniques.

Etat de la machine	Spires en court-circuit	fréquences		
		$f_s = 50Hz$	$3f = 150Hz$	$5f_s = 250Hz$
Amplitude (dB) Machine saine	0%	12.5%	/	/
Amplitude (dB) Machine saine	5%	17.22	-38.35	/
	10%	20.46	-22.10	-62.85

Tableau 3.1. Amplitude des harmoniques pour différents nombre de spire en court-circuit.

III.5. CONCLUSION :

Dans ce chapitre nous avons simulé la machine asynchrone pour les deux cas sain et avec défaut de court-circuit de spire au niveau du stator puis au niveau du rotor. Les résultats obtenus démontrent la justesse du modèle développé.

L'étude analytique a montré que le défaut modifie les allures des courbes tracées.

L'analyse des courants statoriques dans le domaine fréquentiel est souvent utilisée car le spectre résultant contient des informations relatives aux défauts électriques et magnétiques.

L'évaluation des harmoniques ont montré clairement que les amplitudes de ces dernières sont très influencées.

Finalement une analyse spectrale des courants statorique montre que L'analyse spectrale des signaux nous donne des renseignements, qui ne sont pas détectable sur la simulation temporelle.

Conclusion générale

Conclusion générale

L'évolution croissante des machines asynchrones dans les secteurs industriels oblige certains utilisateurs à se prémunir contre l'apparition d'un défaut provoquant le plus souvent un arrêt intempestif de la machine. Le travail présenté traite donc du diagnostic de défauts statoriques (plus précisément des courts circuits inter-spères au niveau du stator) d'une machine asynchrone à rotor bobiné. En effet, le défaut a modifié les allures des variables tracées.

La validation de la machine asynchrone triphasée est faite, en développant un modèle sur la base de la combinaison directe des différentes équations de cette machine.

Dans le premier chapitre, nous avons rappelé les éléments de constitution de la machine asynchrone afin de préciser les différents défauts pouvant survenir sur ceux-ci, aussi que leurs causes. Ensuite, nous avons présenté les différents types de diagnostic et les méthodes de diagnostic des défauts.

Dans le deuxième chapitre nous avons développé un modèle triphasé pour l'étude de la machine asynchrone, qui permet de simuler le comportement de cette dernière.

Ensuite, Nous avons construit un programme de simulation à l'aide du **MATLAB R2009a**. Ceci nous a permis de visualiser les performances de la machine, en considérant les différentes conditions de fonctionnement de la machine asynchrone à rotor bobiné sans et avec défauts (en charge et à vide).

Nous avons fait la simulation des performances de la machine (le couple, la vitesse de rotation, le courant statorique...) à l'état sain puis avec défaut de court-circuit statorique

Le troisième chapitre a été consacré à la présentation et l'analyse des différents résultats de la simulation en s'appuyant sur l'analyse spectrale du courant

A fin de limiter l'apparition de ces défaillances dans les machines asynchrones et de minimiser de leur effets ; nous proposons de faire un bon dimensionnement de la machine, une bonne application des cotes fonctionnelles de fabrication. Aussi éviter son exposition à des grandes températures qui avancent la détérioration des isolants et le choix de l'emplacement en assurant la ventilation de système, éviter les surcharges, appliquer une alimentation stable en tension et en fréquence. En plus, il faut une maintenance régulière, un

Conclusion générale

bon nettoyage des enroulements à billes à fin de limiter leur usures et de les graissés et de bien faire le couplage du moteur avec la charge pour avoir l'homogénéité de système couplé.

Ce travail non exhaustif évidemment, pourrait donner lieu à des études complémentaires dans la direction suivante :

Les signaux issus de la machine, sont analysés par la maintenance, en effectuant l'évolution temporelle et fréquentielles de ces signaux qui peuvent être exploité pour détecter les anomalies qui affectent le bon fonctionnement de la machine, c'est l'analyse spectrale.

Bibliographie

BIBLIOGRAPHIE

- [01] Bahoura. B et Bouhadda. M «Etude, modélisation et simulation d'un variateur de vitesse en vue de commande un moteur asynchrone triphasé à cage». Mémoire d'ingénieur, centre Universitaire de BBA 2008.
- [02] G. Barakat « Synthèse de plusieurs méthodes de modélisation et de diagnostic de la machine asynchrone à cage en présence de défauts ». Article de synthèse des travaux de huit laboratoires dans l'opération " Détection de Défauts et Diagnostic des Actionneurs" du thème "Sûreté - Fiabilité", Revue Internationale de Génie Electrique(RIGE), 2005.
- [03] Laleg Taous Meriem «Contribution aux Méthodes de Diagnostic à Base d'Observateurs et à la Commande Tolérante aux Défauts Application à la Machine Asynchrone et au Robot SCARA » Mémoire d'ingénieur, Laboratoire de Commande des Processus Ecole Nationale Polytechnique. Algérie, juin 2004.
- [04] François Monchy «maintenance » méthode et argonisations DUNOD.
- [05] Boumegoura Tarek «Recherche de signature électromagnétique des défauts dans une machine asynchrone et synthèse d'observateurs en vue du diagnostic » thèse de doctorat préparée au sein de l'école électronique, électrotechnique, automatique de Lyon, 2001.
- [06] A. H. Bonnett, G. C. Soukup, "Cause and analysis of stator and rotor failures in three phase squirrel cage induction motors" IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.28 no.4, pp 921-937, Aug 1992.
- [07] O. Ondel « Diagnostic par reconnaissance des formes : application à un ensemble convertisseur machine asynchrone ». Thèse de doctorat, Ecole centrale de Lyon, 2006.
- [08] R. N. Andriamalala, H.Razik, L. Baghli, F-M. Sargos, "Eccentricity Fault Diagnosis of a Dual-Stator Winding Induction Machine Drive Considering the Slotting Effects", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Volume 55, Issue 12, , pp. 4238 – 4251, Dec. 2008.
- [09] G. DEDIER «Modélisation et diagnostic de la machine asynchrone en présence de défaillances ». Thèse de doctorat, Université de Henri Poincaré, Nancy-I, 2004.
- [10] H. Razik, G. Didier « notes de cours sur le diagnostic de la machine asynchrone ». Notes de cours, I.U.F.M. de Lorraine, Maxeville, 7 janvier 2003.
- [11] H. Razik « le contenu spectral du courant absorbe par la machine asynchrone en cas de défaillance ». p 48-52, 29-juin 2002.
- [12] M. OUADAH. "Modélisation et Diagnostic des Défauts des Machines Asynchrones à Cage D'écureuil par L'approche des Circuits Multiples Couplés Magnétiquement en Tenant Compte des Harmoniques D'espace ",Thèse de magister,Ecole nationale polytechnique d'Alger,Décembre 2008.
- [13] A. H. Bonnett, "Root Cause AC Motor Failure Analysis with a Focus on Shaft Failures", IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 36, no. 5, September/October 2000.
- [14] H. Razik, « La machine asynchrone à vitesse variable: capteurs, modèles, contrôle et diagnostic », Editeur Hermes Science, 2006.
- [15] R. Casimir, E. Bouteleux, H. Yahoui, G. Clerc, H. Henao, C. Delmotte, G.-A. Capolino, G. Houdouin, G. Barakat, B. Dakyo, G. Didier, H. Razik, E. Foulon, L. Loron, S. Bachir, S. Tnani, G. Champenois, J.-C. Trigeassou, V. Devanneaux, B. Dagues, J. Faucher, G. Rostaing and J.-P. Rognon, "Synthèse de plusieurs méthodes de modélisation et de diagnostic de la machine asynchrone à cage en présence de défauts", Journal RIGE, vol. 8, no 2/2005, pp. 287-300, 2005.
- [16] A. Bellini, F. Filippetti, G. Franceschini & C. Tassoni, "Towards a correct quantification of induction machines broken bars through input electric signals", ICEM'00, Finland, pp. 781-785, 28-30, aug. 2000.

BIBLIOGRAPHIE

- [17] B. Raison, "Détection et localisation de défaillances sur un entraînement électrique" Thèse de doctorat de l'Institut National Polytechnique de Grenoble, Septembre 2000.
- [18] G. Didier, E. Ternisien, O. Caspary, H. Razik, "A new approach to detect broken rotor bars in induction machines by current spectrum analysis", *Journal of Mechanical Systems and Signal Processing (MSP)*, vol. 21, n° 2, pp. 1127-1142, Feb.07.
- [19] L. Baghli, L. Hein, H. Razik & A. Rezzoug, "Modelling rotor cage induction motors for default detection", *IEEE International SDEMPED'97*, France, pp. 41-47, Sep. 1997.
- [20] B. Vaseghi, N. Takorabet, and F. Meibody-Tabar, "TRANSIENT FINITE ELEMENT ANALYSIS OF INDUCTION MACHINES WITH STATOR WINDING TURN FAULT" *Progress In Electromagnetics Research, PIER 95*, 118, 2009
- [21] HAMMACHE Hakim "Etude et réalisation d'une machine asynchrone Double Etoile : conception, alimentation et commande" Thèse de Magister, école militaire polytechnique, 2007
- [22] HAMDUCHE Tarek "Evaluation Des Pertes Magnétiques Dans Une Machine Asynchrone Double Etoile Alimentée Par Onduleur De Tension" Thèse de Magister, école militaire polytechnique, 2009.
- [23] X. Luo, Y. Liao, H.A. Toliyat, A. El-Antably, and T.A. Lipo, "Multiple coupled circuit modeling of induction machines," *IEEE Trans. Industry Applications*, vol. 31, no. 2, March/April 1995, pp. 311-318.
- [24] M. H. Benbouzid, M. Vieira, C. Theys, "Induction motors faults detection and localization using stator current advanced signal processing techniques," *IEEE Trans. On Industrial Electronics*, vol. 14, no. 1, January 1999, pp. 14-22.
- [25] A. Abed, "Contribution à l'Etude et au Diagnostic de la Machine Asynchrone," Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy-1, France, mars 2002.
- [26] A. Abed, L. Baghli, H. Razik, A. Rezzoug, "Modelling Induction motors for diagnostic purposes," *EPE'99*, 7-9 September 1999, 233.pdf, Lausanne, Suisse, pp. 1-9.
- [27] P. Vas, F. Filippetti, G. Franceschini, C. Tassonic, "Transient modelling oriented to diagnostics of induction machines with rotor asymmetries," in *Proceeding of ICEM, C.3 Monitoring and Diagnostics*, vol.2, Paris, France, 1994, pp. 62-67.
- [28] H. A Toliyat, T.A Lipo, "Transient analyse of induction machines under stator, rotor bar and end ring faults," *IEEE Trans. Energy Conversion*, vol. 10, no. 2, June 1995, pp. 241-247.
- [29] M. G. Joksimovic, D. M. Durovic and A. B. Obradovic, "Skew and linear rise of MMF across slot modeling-Winding function approach," *IEEE Trans. Energy Conversion*, vol. 14, no. 3, September 1999, pp. 315-320.
- [30] 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, no. 2, June 1998, pp. 156-162.
- [31] G. Bossio, C.D. Angelo, J. Solsona, G. García and M.I. Valla, "A 2-D Model of the induction machine : Extension of the modified winding function approach," *IEEE Trans. Energy Conversion*, vol. 19, no. 1, March 2004, pp. 144-150.
- [32] H.R. Fudeh, C.M. Ong, "Modeling and analysis of induction machines containing space harmonics," *IEEE Trans. PAS, Part I*, vol. PAS-102, no. 8, August 1983.
- [33] E. Ritchie, X. Deng, "Dynamic model of three-phase squirrel cage induction motors with rotor faults," in *Proceeding of ICEM94, B.6 Modelling and Simulation*, Paris, France, 1994.
- [34] Allianz, "Présentation des avaries. Machines électriques tournantes", cahier des préventions. CP2, 1988.

BIBLIOGRAPHIE

- [35] O.V. Thorsen, M. Dalva, "A survey of fault on induction motors in offshore oil industry, petrochemical industry, gas terminals, and oil refineries", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.31, no.5, pp.1186-1196, September 1995
- [36] A. H. Bonnett, G. C. Soukup, "Cause and analysis of stator and rotor failures in three-phase squirrel cage induction motors" IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.28 no.4, pp 921-937, Aug 1992.
- [37] V. Kogan & B. Nindra. "Investigation of high voltage stator winding vibrations in full-scale slot model". In Electrical Insulation Conference, pages 155-166, Sept.1997.
- [38] S. Nandi, H. A. Toliyat, "Condition monitoring and fault diagnosis of electrical machines – a review" IEEE Industry Applications Conference.Thirty-Fourth IAS Annual Meeting, Vol.1, pp.197-204, Phoenix, USA, 1999.
- [39] B. Raison, "Détection et localisation de défaillances sur un entraînement électrique" Thèse de doctorat de l'Institut National Polytechnique de Grenoble, Septembre 2000.
- [40] R. N. Andriamalala, H.Razik, L. Baghli, F-M. Sargos ,"Eccentricity Fault Diagnosis of a Dual-Stator Winding Induction Machine Drive Considering the Slotting Effects", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Volume 55, Issue 12, , pp. 4238 – 4251, Dec. 2008.
- [41] HAMMACHE Hakim "Etude et réalisation d'une machine asynchrone Double Etoile : conception, alimentation et commande " Thèse de Magister, école militaire polytechnique, 2007
- [42] HAMDUCHE Tarek "Evaluation Des Pertes Magnétiques Dans Une Machine Asynchrone Double Etoile Alimentée Par Onduleur De Tension " Thèse de Magister, école militaire polytechnique, 2009

Annexe

Caractéristiques de la machine asynchrone triphasée

Puissance nominale	$P_n = 3,7 \text{ kW}$
Tension nominale	$V_n = 220 \text{ V}$
Courant nominale	$I_n = 6 \text{ A}$
Fréquence nominale	$f = 50 \text{ Hz}$
Vitesse nominale	$N_n = 1000 \text{ tr/min}$
Inductance principale statorique	$L_{sp} = 0.397 \text{ H}$
Inductance principale rotorique	$L_{rp} = 0.397 \text{ H}$
Inductance de fuite statorique	$L_{sl} = 0,009594 \text{ H}$
Inductance de fuite rotorique	$L_{rl} = 0.009594 \text{ H}$
Inductance mutuelle stator-rotor:	$M_{sr} = 0.3953 \text{ H}$
Inductance cyclique stator	$L_{sc} = 1.5 * L_{sp} + L_{sl}$
Inductance cyclique rotor	$L_{rc} = 1.5 * L_{rp} + L_{rl}$
Nombre de paire de pôle	$P = 1$
Moment d'inertie de la machine	$J_t = 0.023976 \text{ Kg.m}^2$
Résistance statorique	$R_s = 2.86 \text{ } \Omega$
Résistance rotorique	$R_r = 2.756 \text{ } \Omega$
Frottement visqueux	$f_v = 0.0014439 \text{ Nm/rad/s}$

Résumé

La modélisation des défauts dans les systèmes industriels et particulièrement les défauts d'ordre électriques, est une première étape nécessaire pour prédire le comportement du système en présence d'un défaut ou dès son apparition.

Le travail proposé s'attarde sur le diagnostic des machines asynchrones triphasées à Rotor bobiné. La croissance de ce type de machine électrique, essentiellement due à sa simplicité de construction, son faible coût d'achat et de fabrication, sa robustesse mécanique ou encore sa quasi-absence d'entretien, est telle que nous la trouvons maintenant dans tous les domaines industriels et en particulier dans les secteurs de pointe comme l'aéronautique, le nucléaire, la chimie ou encore les transports ferroviaires. A titre d'exemple, aux Etats-Unis, 70 millions de moteurs asynchrones sont fabriqués chaque année pour une population d'environ 300 millions de personnes. Toute proportion gardée, il est clair que ces moteurs nous conduisent à porter une attention de plus en plus sérieuse quant-à leur fonctionnement et leur disponibilité.

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

La surveillance et le diagnostic des machines asynchrones à fait l'objet de nombreux travaux. L'analyse des signatures spectrales des courants de lignes en était la première tentative pour la détection des pannes dans les machines électrique, en se basant sur des logiciels de surveillance.

Ces derniers moins performants et moins précis ont été de nos jours améliorés dans un contexte industriel par mis en œuvre de différentes méthodes, par exemple l'analyse temps-fréquence et temps-échelle, diagnostic des défauts par estimation paramétrique, diagnostic des défauts par l'analyse du vecteur de Park, technique additionnelle et le diagnostic des défauts par le suivi des grandeurs mesurables. Nous basant particulièrement sur cette dernière méthode en utilisant la modélisation réelle triphasé-triphasé.

Dans le premier chapitre, nous avons rappelé les éléments de constitution de la machine asynchrone afin de préciser les différents défauts pouvant survenir sur ceux-ci, aussi que leurs causes. Ensuite, nous avons présenté les différents types de diagnostic et les méthodes de diagnostic des défauts.

Résumé

Dans le deuxième chapitre nous avons développé un modèle triphasé pour l'étude de la machine asynchrone, qui permet de simuler le comportement de cette dernière.

Ensuite, Nous avons construit un programme de simulation à l'aide du *MATLAB R2009a*. Ceci nous a permis de visualiser les performances de la machine, en considérant les différentes conditions de fonctionnement de la machine asynchrone à rotor bobiné sans et avec défauts (en charge et à vide).

Nous avons fait la simulation des performances de la machine (le couple, la vitesse de rotation, le courant statorique ...) à l'état sain puis avec défaut de court-circuit statorique.

Le troisième chapitre a été consacré à la présentation et l'analyse des différents résultats de la simulation en s'appuyant sur l'analyse spectrale du courant