

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



Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued
Faculté de Technologie

Mémoire de Fin d'Étude
En vue de l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Commande Electrique

Thème

**Étude du modèle multi-enroulements de la
machine asynchrone en vue du diagnostic des
défauts statoriques**

Réalisé par :

Yasmina MENACEUR

Fatma CHOUIREF

Encadré par :

Dr. Noura HALEM

Soutenu le../05/2017. Devant le jury composé de :

Dr.BESSOUS Noureddine

Maitre de conférences Président

Dr. ALLAL Abderrahim

Maitre de conférences Rapporteur

Dr.HALEM Noura

Maitre de conférences Examineur

Soutenu en Mai 2017

Au nom de dieu clément et miséricordieux

Dédicace

Avant tout, je tien à remercies le bon Dieu, et l'unique qui m'offre le courage et la volonté nécessaire pour affronter les différentes de la vie, Je dédie ce modeste travail

A ma mère et à mon père.

A mes frères et mes sœurs et à mon fiancé.

A mes amis et mes collègues du promotion 2017 « Électrotechnique ».

A ma touts la famille. (chaque 'un à son nom).

Y. Menaceur

Je dédie ce modeste travail

A ma mère avec toute mon affectif et à mon père

A mes frères.

A ma famille.

A tous mes amis.

F.CHOUIREF

Remerciements

Nous rendons nos profondes gratitudee a Dieu qui nous a aide a réaliser ce modeste travail

Nous exprimons nos profondes gratitudee a nos famille pour leurs encouragements , leur soutiens et leur sacrifices qui l'ont enduré.

Nous remercions nos encadreuse pour les efforts qui l'on déployée ,pour nos aider

Nous remercions aussi tout le Corps enseignant et administratif qui ont contribué a notre formation universitaire

MENACEUR YASMINA

FATMA CHOUIREF

LISTE DES SYMBOLES

B_s :	Induction magnétique dans l'entrefer créée par le courant statorique.
B_k :	Induction magnétique dans l'entrefer produite par une maille rotoriques k.
i_{bk} :	Courant dans la barre k.
i_{rk} :	Courant dans la maille k.
i_e :	Courant dans l'anneau de court- circuit.
i_{ek} :	Courant dans une portion d'anneau.
i_a, i_b, i_c :	Courants statoriques.
v_a, v_b, v_c :	Tensions statoriques.
ϕ_s :	Flux magnétique par pole créé par le courant statorique.
ϕ_{rk} :	Flux principale créé par une maille rotoriques.
Ψ_{sa} :	Flux magnétique total créé par i_a et traversant l'enroulement de la phase "a".
F_m :	La force magnéto motrice de la phase "a".
μ_0 :	Perméabilité magnétique du vide (de l'air).
θ_r :	Position du rotor.
ω_s :	Pulsation statorique.
ω_r :	Vitesse électrique de rotation.
α :	Angle électrique entre deux barres toriques.
σ :	force radiale créée par le champ d'entrefer.
f_b :	fréquence caractéristique d'un défaut du bille du roulement.
$f_{b.int}$:	fréquence caractéristique d'un défaut du bague intérieure du roulement.
$f_{b.ext}$:	fréquence caractéristique d'un défaut du bague extérieure du roulement.

LISTE DES FIGURES

<i>figure</i>	<i>signification</i>	<i>page</i>
Fig. I.1	Durée de vie de la MAS en fonction de la température de fonctionnement	10
Fig. I.2	Proportion des défauts dans les machines asynchrones de moyenne puissance	12
Fig. II.1	Schéma du rotor représenté par des mailles électriques	19
Fig. II.2	Induction magnétique produite par une maille rotorique.	21
Fig. II.3	Flux mutuel-phase statorique-boucle rotorique	23
Fig. II.4	schéma électrique équivalent, à mailles, de la cage rotorique	26
Fig. III.1	représentation d'un court-circuit entre spires d'une bobine statorique	32
Fig.III.2	Les courants de phases pour un moteur chargé de 10 N.m avec défaut de court-circuit (1 spire en court-circuit)	33
Fig.III.3	Les courants de phases pour un moteur chargé de 10 N.m avec défaut de court-circuit (1 spire en court-circuit)-Zoom	34
Fig.III.4	Les courants de phases pour un moteur chargé de 10 N.m avec défaut de court-circuit (2 spires en court-circuit)	34
Fig.III.5	Les courants de phases pour un moteur chargé de 10 N.m avec défaut de court-circuit (2 spires en court-circuit)-Zoom	35
Fig.III.6	Les courants de phases pour un moteur chargé de 10 N.m avec défaut de court-circuit (3 spires en court-circuit)	35
Fig.III.7	Les courants de phases pour un moteur chargé de 10 N.m avec défaut de court-circuit (3 spires en court-circuit)-Zoom	36
Fig.III.8	Les courants de phases pour un moteur chargé de 20 N.m avec défaut de court-circuit (1 spire en court-circuit)	36
Fig.III.9	Les courants de phases pour un moteur chargé de 20 N.m avec défaut de court-circuit (1 spire en court-circuit)-Zoom	37
Fig.III.10	Les courants de phases pour un moteur chargé de 20 N.m avec défaut de court-circuit (2 spires en court-circuit)	37

Fig.III.11	Les courants de phases pour un moteur chargé de 20 N.m avec défaut de court-circuit (2 spires en court-circuit)-Zoom	38
Fig.III.12	Les courants de phases pour un moteur chargé de 20 N.m avec défaut de court-circuit (3 spires en court-circuit)	38
Fig.III.13	Les courants de phases pour un moteur chargé de 20 N.m avec défaut de court circuit (3 spires en court-circuit)-Zoom	39
Fig.III.14	Le couple électromagnétique pour un moteur chargé de 10 N.m avec défaut de court-circuit (1 spire en court-circuit)	40
Fig.III.15	Le couple électromagnétique pour un moteur chargé de 10 N.m avec défaut de court-circuit (2 spires en court-circuit)	40
Fig.III.16	: Le couple électromagnétique pour un moteur chargé de 10 N.m avec défaut de court-circuit (3 spires en court-circuit)	41
Fig. III.17	Le couple électromagnétique pour un moteur chargé de 20 N.m avec défaut de court-circuit (1 spire en court-circuit)	42
Fig III.18	Le couple électromagnétique pour un moteur chargé de 20 N.m avec défaut de court-circuit (2 spires en court-circuit)	42
Fig.III.19	Le couple électromagnétique pour un moteur chargé de 20 N.m avec défaut de court-circuit (3 spires en court-circuit)	44
Fig. III.20	La vitesse de rotation pour un moteur chargé de 10 N.m avec défaut de court-circuit (1 spire en court-circuit)	44
Fig.III.21	La vitesse de rotation pour un moteur chargé de 10 N.m avec défaut de court-circuit (2 spires en court-circuit)	45
Fig.III.22	La vitesse de rotation pour un moteur chargé de 10 N.m avec défaut de court-circuit (3 spires en court-circuit)	45
Fig.III.23	les ondulations de la vitesse de rotation pour un moteur chargé de 10 N.m avec défaut de court-circuit (2 spires en court-circuit)	46
Fig.III.24	les ondulations de la vitesse de rotation pour un moteur chargé de 10 N.m avec défaut de court-circuit (3 spires en court-circuit)	46
Fig.III.25	La vitesse de rotation pour un moteur chargé de 20 N.m avec défaut de court-circuit (1 spire en court-circuit)	47
Fig.III.26	La vitesse de rotation pour un moteur chargé de 20 N.m avec défaut de court-circuit (2 spires en court-circuit)	47
Fig. III.27	La vitesse de rotation pour un moteur chargé de 20 N.m avec défaut de court-circuit (3 spires en court-circuit)	48

Fig.III.28	les ondulations de la vitesse de rotation pour un moteur chargé de 20 N.m avec défaut de court-circuit (2 spires en court-circuit)	48
Fig.III.29	:: les ondulations de la vitesse de rotation pour un moteur chargé de 20 N.m avec défaut de court-circuit (3 spires en court-circuit)	49

INTRODUCTION

GÉNÉRALE

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Le cadre de ce travail, est le diagnostic de défaut de court circuit entre spires dans les moteurs asynchrones triphasés à cage d'écureuil. Le moteur asynchrone à cage est une composante clé de la plupart des équipements industriels, du fait de sa grande robustesse. Il est en effet, omniprésent dans les secteurs de pointes comme l'aéronautique, le nucléaire, la chimie.

une étude déjà faite sur les défauts de la machines asynchrones, a montrée que près de 40% sont liées aux roulements, 38% sont concentrées au niveau du stator et 10% au niveau du rotor, le reste (12%) touche d'autres parties de la machine[8]. Les ruptures des barres ou d'anneaux de court-circuit ont fait l'objet de nombreux travaux, à cause de l'inaccessibilité en fonctionnement de celui-ci.

L'objectif de ce travail c'est :

- *La modélisation de la machine asynchrone, pour la simulation de court circuit.*
- *L'étude de l'effet de défaut de court-circuit statorique d'une manière précoce et pour différentes charge.*

Pour cela, notre mémoire sera organisé comme suit :

Dans le premier chapitre, nous présenterons les principaux défauts pouvant modifier le bon fonctionnement de la machine asynchrone et leurs origines. Nous présenterons par la suite, les différentes techniques utilisées pour la détection des défauts, ainsi que les approches utilisées dans la modélisation de la machine asynchrone.

Le deuxième chapitre est consacré à la présentation et la formulation mathématique du modèle multi-enroulements de la machine asynchrone, afin de simuler le défaut de court-circuit statorique, ce qui représente l'objectif premier de notre travail.

Dans le troisième chapitre, nous présenterons les résultats de simulation du moteur asynchrone, dans les différentes conditions de fonctionnement, pour des différents degrés de défauts de court-circuit, ainsi que leurs conséquences sur les grandeurs électromécaniques de la machine.

Une conclusion générale s'impose à la fin de ce mémoire, pour résumer notre travail.

CHAPITRE I

CHAPITRE I

ÉTAT DE L'ART DE LA MAS

I.1 INTRODUCTION

La surveillance est un moyen de garantir le bon fonctionnement des systèmes. Le diagnostic est une partie de la surveillance, qui a pour objectif de trouver la cause des dysfonctionnements.

On désigne par défaillance dans les machines électriques tout incident donnant lieu à un comportement anormal de la machine et qui peut à court ou long terme provoquer son endommagement. Les défaillances peuvent être d'origines diverses, électriques, mécaniques ou bien encore magnétiques. Leurs causes sont multiples et peuvent être classées en trois groupes [1,2]:

- ❖ *les générateurs de pannes ou initiateurs de défauts* : surchauffe du moteur, défaut électrique (court-circuit), survoltage d'alimentation, problème d'isolation électrique, usure des éléments mécaniques (roulements à billes), rupture de fixations,
- ❖ *les amplificateurs de défauts* : surcharge fréquente, vibrations mécaniques, environnement humide, échauffement permanent, mauvais graissage, vieillissement,
- ❖ *les vices de fabrication et les erreurs humaines* : défauts de fabrication, composants défectueux, protections inadaptées, mauvais dimensionnement de la machine,

I.2 DIAGNOSTIC DE LA MACHINE ASYNCHRONE

I.2.1 Définitions

La sûreté de fonctionnement manipule un certain nombre de concepts que nous précisons dans cette partie en donnant des définitions précises.

- **Maintenance** : ensemble des activités destinées à maintenir ou à rétablir un bien dans un état ou dans des conditions données de sûreté de fonctionnement pour accomplir une fonction requise [2,3].
- **Maintenance préventive** : maintenance ayant pour objet de réduire la probabilité de défaillance ou de dégradation d'un bien ou d'un service rendu. Les activités correspondantes sont déclenchées selon un échéancier établi à partir d'un nombre

prédéterminé d'unités d'usages, et/ou des critères prédéterminés significatifs de l'état de dégradation du bien ou du service [4].

- **Maintenance corrective** : ensemble des activités réalisées après la défaillance d'un bien, ou la dégradation de sa fonction, pour lui permettre d'accomplir une fonction requise, au moins provisoirement. La maintenance corrective comprend en particulier : la localisation de la défaillance et son diagnostic, la remise en état avec ou sans modification, le contrôle du bon fonctionnement [3].
- **Maintenance curative** : activités de maintenance corrective ayant pour objet de rétablir un bien dans un état spécifié ou de lui permettre d'accomplir une fonction requise. Le résultat des activités réalisées doit présenter un caractère permanent. Ces activités peuvent être : des réparations, des modifications ou des améliorations ayant pour objet de supprimer la ou les défaillances [3].
- **Surveillance/détection de comportement** : actions réalisées manuellement ou automatiquement, destinées à observer l'état d'un bien ou d'un service et à détecter l'apparition d'une éventuelle défaillance. Les informations nécessaires à ces actions peuvent provenir de grandeurs physiques directement prélevées sur le système ou reconstituées à partir de mesures indirectes [5].
- **Diagnostic** : associé à l'origine aux Sciences de la Santé, le terme diagnostic désigne, dans le domaine des Sciences de l'Ingénieur, l'analyse des mauvais fonctionnements, défauts ou défaillances d'un système afin d'en déterminer la nature et la cause [5].

C'est aussi par extension l'action consistant à identifier la (ou les) cause(s) probable(s) de la (ou les) défaillance(s) ou de l'évolution d'un ou de plusieurs paramètres significatifs de dégradations à l'aide d'un raisonnement logique fondée sur un ensemble d'informations. Le diagnostic permet de confirmer, de compléter ou de modifier les hypothèses faites sur l'origine et la cause des défaillances, et de préciser les opérations nécessaires de maintenance corrective [5].

I.2.2 Constitution de la machine asynchrone

Cette machine est constituée d'un circuit magnétique (stator et rotor) et d'un circuit électrique (bobinage statorique).

Le circuit magnétique est réalisé par un empilement de tôles ferromagnétiques fines et découpées, faisant apparaître le stator, le rotor et les différentes encoches statoriques.

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

Dans le rotor à cage d'écureuil, les conducteurs sont des barres obtenues par injection d'un alliage d'aluminium ou préformées en cuivre et introduites 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 forte pour que les courants ne circulent pratiquement pas dans les tôles.

I.3 DÉFAILLANCES DANS LES MACHINE ASYNCHRONE TRIPHASÉE À CAGE

I.3.1 Défaillances au rotor

Pour le rotor, les défaillances sont essentiellement dues à un problème [1] :

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

Les défauts qui sont les plus récurrents, localisés au niveau du rotor, peuvent être

- Rupture de barres dans les machines asynchrones•
- Rupture d'une portion d'anneau de court-circuit dans les machines asynchrones
- Excentricité statique et dynamique
- Défauts de la cage rotorique

I.3.1.1 cassures de barres et de portions d'anneaux de cages

La détection de ces défaillances est rendue difficile par le fait que lors de leurs apparitions, la machine continue de fonctionner. Ces défauts ont par ailleurs un effet cumulatif. Le courant que conduisait une barre cassée, par exemple, se répartit sur les barres adjacentes. Ces barres sont alors surchargées, ce qui conduit à leurs ruptures, et ainsi de suite jusqu'à la rupture d'un nombre suffisamment important de barres pour provoquer l'arrêt de la machine. Elle provoque aussi une dissymétrie de répartition de courants au rotor et de couple, ceci va générer des vibrations et l'apparition de défauts mécaniques [1].

I.3.1.2 Dissymétrie du rotor

Celui-ci provoque la variation de l'entrefer dans le moteur, une répartition non homogène des courants dans le rotor et le déséquilibre des courants statoriques. Le déséquilibre des efforts sur les barres génère un couple global non constant.

Trois catégories d'excentricité sont généralement distinguées, [5] :

- ❖ **L'excentricité statique** : généralement due à un désalignement de l'axe de rotation du rotor par rapport à l'axe du stator. Elle résulte d'un défaut de centrage des flasques et se manifeste même dans des machines fabriquées récemment en raison des méthodes de fabrication et d'assemblage.
- ❖ **L'excentricité dynamique** : ce type d'excentricité est causé par une déformation du cylindre rotorique, une déformation du cylindre statorique ou la détérioration des roulements à billes. Elle correspond au décalage du centre de rotation du rotor par rapport au centre géométrique du stator, avec en plus, une rotation du centre du rotor autour du centre géométrique de ce stator [5].
- ❖ **L'excentricité mixte** : en réalité, les excentricités statiques et dynamiques ont tendance à coexister. Un niveau inhérent d'excentricité statique existe toujours, même dans des machines de fabrication récentes. Cela provoque des efforts réguliers d'attraction magnétiques non compensés dans une seule direction [5], et avec le temps cela peut conduire à la flexion d'un arbre et la dégradation de roulement ..., tout cela entamant une excentricité dynamique. Sans détection précoce, l'excentricité devient suffisamment grande pour développer des forces radiales déséquilibrées qui peuvent créer un frottement entre le stator et le rotor, ce qui mène à une panne très grave de la machine.

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 [1].

I.3.2 Défaillances des roulements mécaniques

Le roulement à billes est un organe de base dans la machine asynchrone qui joue le rôle d'interface mécanique entre le stator et le rotor. En plus, il représente l'élément de maintien de l'axe de la machine permettant de garantir une bonne rotation du rotor. La majorité des machines électriques utilisent les roulements à billes ou à rouleaux. Le roulement à billes est le plus utilisé dans le monde industriel parce qu'il a le meilleur rapport performance-prix [6].

Le roulement est composé des éléments suivants [6] :

- ❖ Deux bagues concentriques en acier, appelés bague intérieure et bague extérieure, comportant des chemins de roulement (surfaces sur lesquelles "roulent" les corps roulants).
- ❖ Des corps roulants, billes ou rouleaux généralement en acier, permettant le mouvement des deux bagues avec un frottement minimal.
- ❖ Une cage séparant et guidant les corps roulants (en polyamide, tôle acier, laiton ou résine).

Suivant l'emplacement géométrique du défaut dans le roulement, nous pouvons distinguer les types de défauts suivants [5] :

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

D'après des études statistiques [7], les défauts de roulement représente à eux seuls entre 40% et 50% des défauts des machines asynchrones triphasées. Ils constituent donc les défauts les plus fréquents sur les machines asynchrones notamment les machines de fortes puissances. Les roulements peuvent être endommagés par les causes suivantes [5-7] :

- Contamination du roulement par des particules extérieures : poussière, grains de sable, etc.
- Corrosion engendrée par la pénétration d'eau, d'acides,
- Lubrification inadéquate qui peut causer un échauffement et l'usure du roulement.
- Mauvais alignement du rotor.
- Une température de fonctionnement élevée.

- Courant qui traverse le roulement et qui cause des arcs électriques.
- Installation inexacte du roulement ; en forçant incorrectement le roulement sur l'arbre du rotor ou dans les flasques (dû au désalignement), des entailles seront formées sur les chemins de roulement.

Par conséquence, le traitement de ce type de défaut prend une place prépondérante et constitue une piste privilégiée dans le domaine de diagnostic des défauts de la machine asynchrone.

I.3.3 Défaillances au stator

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

- **Thermique** : l'isolation est conçue pour avoir une certaine durée de vie à la température nominale. Toutefois, si la température augmente au-dessus de cette température de fonctionnement, la durée de vie raccourcit rapidement (Fig. I-1). 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 [1].
- **Électrique** : Une tension supérieure à la valeur nominale ou de hautes valeurs de dv/dt du 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) [1].
- **Mécanique** : les démarrages répétitifs de machine ont pour conséquence d'augmenter la température dans le cuivre (bobinage statorique et cage). Cet effet cyclique provoque des dilatations et contractions répétitives de l'isolant. Cela pourrait entraîner des fissures dans l'isolant qui peuvent se propager et provoquer un début de court-circuit interne. Les efforts mécaniques sur les tôles et les conducteurs ont des composantes alternatives qui provoquent des vibrations de la structure. Ces vibrations provoquent l'érosion et l'abrasion de l'isolant entraînant leur détérioration.

- **Environnemental** : La présence d'humidité ou de produits chimiques dans l'air ambiant peut détériorer la qualité de l'isolation et conduire à défaut d'enroulement. Le début de la dégradation entraîne des courants de fuites qui accélèrent la détérioration de l'isolant jusqu'au court-circuit franc. Une autre conséquence est la création de l'ozone et les oxydes d'azote qui peuvent se combiner avec l'humidité pour former de l'acide nitrique, qui détruit l'isolant. Les défauts qui sont les plus récurrents, localisés au niveau du stator, peuvent être définis comme suit : défaut d'isolant, court-circuit entre spires, court-circuit entre phases, court-circuit entre phase et bâti, déséquilibre d'alimentation, défaut de circuit magnétique [1,5].

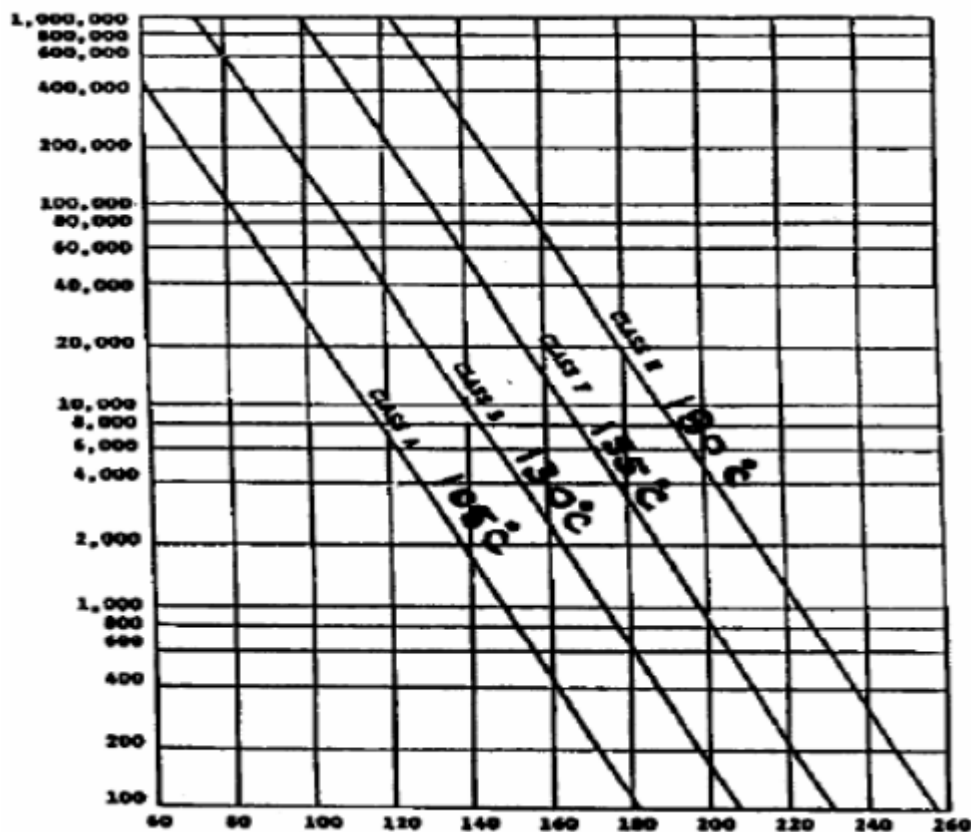


Fig. I.1 : Durée de vie de la MAS en fonction de la température de fonctionnement [1]

I.3.3.1 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. Les différentes causes pour ce type de défaut sont [1,3]:

- ❖ 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.3.3.2 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. 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 2^{ème} 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 [1].

I.3.3.3 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 [1,2].

I.4 ÉTUDES STATISTIQUES

Des études effectuées en 1988 par une compagnie d'assurance allemande de systèmes industriels [8] sur les pannes des machines asynchrones de moyenne puissance (de 50 kW à 200 kW) a donné les résultats suivants représentés à la figure I.2.

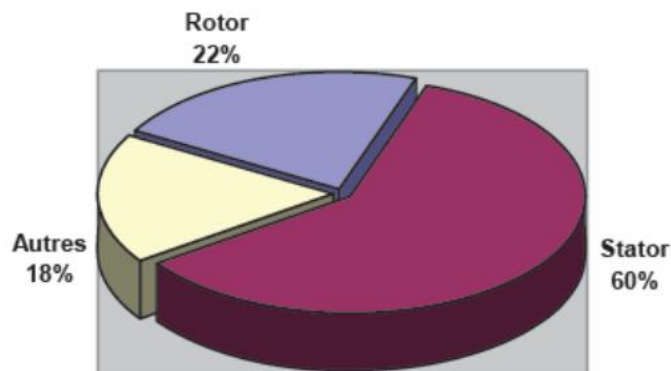


Fig. I.2 : Proportion des défauts dans les machines asynchrones de moyenne puissance [8]

D'autre part les mêmes études montrent qu'entre 1973 et 1988 les pannes au stator sont passées de 78% à 60% et au rotor 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 comme suit :

Enroulements stator :	51 %	Tôlerie stator :	9 %
-----------------------	------	------------------	-----

Défauts au rotor	:	22 %	Roulements	:	8 %
Autres	:	10 %			

Une autre étude statistique [7] faite sur des machines de grande puissance (de 100 kW à 1 MW) donne les résultats suivants :

Enroulements stator	:	13 %	Couplage mécanique	:	4 %
Défauts au rotor	:	8 %	Roulement	:	41 %
Autres	:	34 %			

I.5 MÉTHODES DE DIAGNOSTIC DE DÉFAUTS

I.5.1 MÉTHODES INTERNES

✓ Aspect modélisation

La modélisation et la simulation des machines constituent une étape primordiale en matière de diagnostic. Elles permettent la compréhension du fonctionnement défectueux, la vérification sur prototype virtuel de l'efficacité des algorithmes de détection de défauts et elles apportent également la possibilité des bases de données sur les manifestations électriques et magnétiques de ces défauts.

Plusieurs voies de modélisation existent, elles sont actuellement utilisées pour examiner des problèmes tels que la commande, la conception ou la surveillance. En ce qui nous concerne, nous nous intéressons aux modèles simulant le comportement électromagnétique de la machine asynchrone en vue de diagnostic. Parmi les approches de modélisation, nous citons :

✓ Approche analytique

Cette approche est la plus simple et la plus employée. Elle est basée sur la modélisation de moteur sous forme de circuits équivalents. Cette approche permet d'établir un schéma électrique équivalent de la machine et par conséquent de trouver les équations différentielles décrivant le fonctionnement de la machine. Dans ce cadre, plusieurs modèles mathématiques ont été développés avec degrés de complexités différents, depuis les modèles triphasés au stator et au rotor jusqu'aux modèles triphasés au stator et multi phases au rotor. Nous nous intéressons plus particulièrement à développer ce dernier type de modèle dans le chapitre II [9].

✓ **Méthode des schémas magnétiques équivalents**

Cette approche consiste à découper le circuit magnétique qui constitue la machine étudiée en tubes de flux, caractérisés chacun par sa réluctance ou sa perméance. Ces grandeurs, tout comme les inductances, peuvent être définies selon les valeurs de flux, prenant ainsi en considération la saturation magnétique. Le mouvement de rotation de la machine est pris en compte par l'intermédiaire de perméances d'entrefer variable selon la position du rotor. Les circuits électriques statoriques et rotoriques sont considérés grâce aux équations de couplage électrique/magnétique. Au rotor, les n phases sont constituées par les mailles électriques limitées par deux barres successives. Ce couplage est concrétisé au niveau de la mise en équation par le choix des inconnues du système qui seront simultanément les flux dans les différentes mailles du réseau magnétique ainsi que les courants statoriques et rotoriques. Pour la résolution des équations, un problème de non linéarité s'impose et nécessite l'utilisation d'une méthode itérative en pas à pas dans le temps [9].

✓ **Méthodes des éléments finis**

Il s'agit cette fois de découper le circuit magnétique de la machine en éléments de dimension suffisamment faible pour que le matériau magnétique puisse être considéré comme linéaire sur les surfaces correspondantes. A partir des formes locales des équations de Maxwell, il est possible d'exprimer le problème à résoudre. La résolution analytique est complexe et ne permet de traiter la saturation que de façon approchée. Les progrès des calculateurs ont permis d'envisager leur résolution numérique. De nombreux outils logiciels leur sont dédiés. Citons, entre autres, FLUX 2D, FLUX 3D et MAXWELL. Cependant, ces logiciels ont historiquement été conçus pour déterminer le champ électromagnétique, et dans l'objectif de l'optimisation du dimensionnement [9].

I.5.2 Méthodes externes

I.5.2.1 Méthodes basées sur l'analyse spectrale

Pour effectuer le diagnostic d'une installation industrielle, les opérateurs de la maintenance analysent un certain nombre de signaux issus de la machine. En effet, l'évolution temporelle et le contenu spectral de ces signaux, peuvent être exploités pour détecter et localiser les anomalies qui affectent le bon fonctionnement de cette installation. D'après la littérature, les principales techniques du diagnostic utilisées sont les suivantes :

I.5.2.2 Diagnostic par mesure des vibrations mécaniques

Le diagnostic des défauts en utilisant les vibrations mécaniques est la méthode la plus utilisée dans la pratique. Les forces radiales, créées par le champ d'entrefer, provoquent des vibrations dans la machine asynchrone. Ces forces sont proportionnelles au carré de l'induction magnétique [10].

$$\sigma(\theta, t) = \frac{B_s^2(\theta, t)}{2\mu_0} \quad (\text{I.1})$$

La distribution de l'induction magnétique dans l'entrefer, est le produit de la F.m.m (F_m) et de la perméance (P).

$$B_s = F_m \cdot P \quad (\text{I.2})$$

Les vibrations de la machine peuvent être captés par des accéléromètres. Les spectres des signaux de vibration, issus du moteur avec défaut, sont comparés avec ceux enregistrés lorsque le moteur est en bon état. Puisque la force magnéto motrice contient les effets des asymétries du stator ou du rotor et la perméance dépend de la variation de l'entrefer (à cause des ouvertures des encoches statoriques et rotoriques, l'excentricité), ceci permet la détection aussi bien des défauts électriques que mécaniques.

I.5.2.3 Diagnostic par mesure du flux magnétique axial de fuite

Dans la machine idéale et sans défauts, les courants et les tensions statoriques sont équilibrés, ce qui annule le flux de fuite axial. La présence d'un défaut quelconque, provoque un déséquilibre électrique et magnétique au niveau du stator ce qui donne naissance à des flux de fuite axial de valeurs dépendantes du degré de sévérité du défaut. Si on place une bobine autour de l'arbre de la machine, elle sera le siège d'une force électromotrice induite. Le contenu spectral de la tension induite dans cette bobine, peut être exploité pour détecter les différents défauts [10].

I.5.2.4 Diagnostic par l'analyse des tensions statoriques induites

Cette technique est basée sur l'exploitation du contenu fréquentielle de la tension induite par le flux rotorique dans les enroulements statoriques, pendant la déconnexion du moteur de réseau. La rupture d'une barre va affecter directement la tension induite dans les enroulements statoriques. En utilisant cette approche, les effets de non idéalité de la source (déséquilibres et présence des harmoniques) ainsi que la non linéarité des caractéristiques magnétiques de la machine peuvent être évités [10].

I.5.2.5 Diagnostic par mesure du couple électromagnétique

Le couple électromagnétique développé dans les machines électriques, provient de l'interaction entre le champ statorique et celui rotorique. Par conséquent, tout défaut, soit au niveau du stator ou au rotor, affecte directement le couple électromagnétique. L'analyse spectrale du signal du couple (mesuré ou estimé), donne des informations sur l'état de santé du moteur [10].

I.5.2.6 Diagnostic par mesure de la puissance instantanée

La puissance instantanée est la somme des produits des courants et des tensions dans les trois phases statoriques. Donc, le niveau d'informations apportées par cette grandeur, est plus grand que celui apportées par le courant d'une seule phase. Ceci présente l'avantage de cette méthode par rapport aux autres [10].

I.5.2.7 Diagnostic par mesure du courant statorique

Parmi tous les signaux utilisables, le courant statorique s'est avéré être l'un des plus intéressants, car il est très facile d'accès et nous permet de détecter aussi bien les défauts électriques que les défauts purement mécaniques. Cette technique est dénommée dans littérature "Motor Current Signature Analysis" (MCSA) [4, 5,9].

Les défauts de la machine asynchrone se traduisent dans le spectre du courant statorique soit par :

- ✓ L'apparition des raies spectrales dont les fréquences sont directement liées à la fréquence de rotation de la machine, aux fréquences des champs tournants et aux paramètres physiques de la machine (nombre d'encoche rotorique et nombre de paires de pôles).
- ✓ La modification de l'amplitude des raies spectrales, déjà présentés dans le spectre du courant.

La surveillance via le courant statorique nécessite une bonne connaissance des défauts et leurs signatures.

I.6 CONCLUSION

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

CHAPITRE II

CHAPITRE II

MODÉLISATION DE LA MACHINE ASYNCHRONE DÉDIÉE AU DIAGNOSTIC

II.1 INTRODUCTION

Les modèles analytiques doivent décrire le comportement de la machine asynchrone non pas d'une façon moyenne comme pour la commande, mais d'une façon plus exacte en intégrant certains paramètres pour le décrire le plus précisément possible. Car les méthodes classiques d'étude pour ce type de machines utilisent des modèles simples (modèle abc-dq) et négligent un certain nombre de phénomènes. Par suite ces modèles sont fréquemment affectés par les transformations et le changement d'axe de référence, ce qui conduit à des interprétations théoriques qui ne peuvent pas être utilisées pour analyser des effets localisés tels que les barres cassées dans le rotor de la machine en les distinguant des effets provenant d'autres incidents. D'autre part, ces modèles sont imprécis et ne décrivent qu'un fonctionnement sain de la machine.

Dans cette perspective, le modèle multi enroulements a été choisi. Le modèle développé est basé sur un circuit maillé représentant la cage rotorique. Il permet la représentation des ruptures de barres ainsi que leur simulation. Aussi il permet de restituer les phénomènes physiques dus à ces défauts.

II.2 MODÈLE MULTI-ENROULEMENT D'UNE MACHINE ASYNCHRONE À CAGE

La figure II.1 représente le rotor d'une machine asynchrone à cage assimilé à un enroulement polyphasé, chaque maille est constituée de deux barres adjacentes et de deux portions d'anneau de court-circuit. Le circuit statorique est composé d'un enroulement triphasé qui peut être placé dans les encoches statoriques selon différentes manières définissant ainsi le type de bobinage adopté.[11]

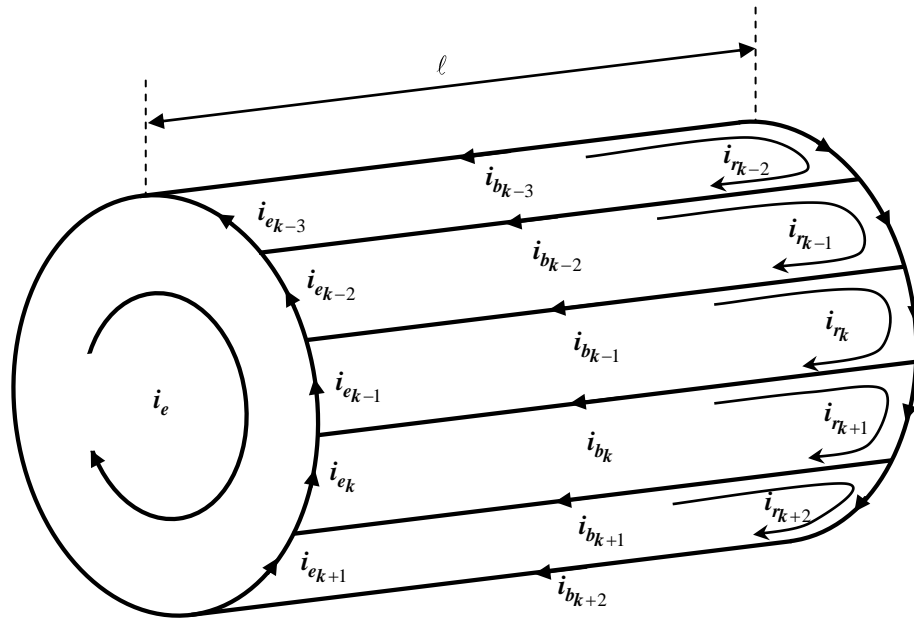


Fig. II.1 : Schéma du rotor représenté par des mailles électriques[9]

II.2.1 Hypothèses simplificatrices

Il est évident qu'un système électromagnétique nécessite des compétences tant dans l'approche des phénomènes physiques pour leur modélisation que dans le calcul numérique. D'où l'importance du choix des hypothèses d'étude et des objectifs du modèle, car ils conditionnent la complexité du travail à réaliser et l'utilisation d'outils appropriés. Pour cette raison nous avons été amenés à faire quelques hypothèses simplificatrices fortes mais généralement admises :

- Perméabilité relative du fer très grande ;
- Entrefer lisse et constant – effets d'excentricité négligeables – champ radial ;
- Distribution sinusoïdale de la force magnétomotrice statorique ;
- Pas de saturation – effets pelliculaires nuls – courants de Foucault négligeables hors des barres rotoriques.

Avec ces hypothèses, et en supposant un stator sain de constitution symétrique, les différents paramètres (inductances) du modèle ont été calculés [9].

II.2.2. Calcul des inductances

II.2.2.1 Inductance statorique

Nous supposons que l'enroulement statorique triphasé est à distribution idéale autour du périphérique de l'entrefer. Par conséquent, le champ résultant a une forme sinusoïdale.

L'expression de la *f.m.m* de la phase "a" est donnée par la relation suivante [10] :

$$F_m(\theta) = \frac{2N_s i_a}{p\pi} \cos(\theta) \quad (\text{II.1})$$

θ : est un angle électrique décrivant une position dans l'espace.

Et l'induction créée dans l'entrefer est :

$$B_s(\theta) = \frac{2\mu_0 N_s i_a}{ep\pi} \cos(\theta) \quad (\text{II.2})$$

Le flux magnétique dans l'entrefer, par pôles, est obtenu par intégration de l'expression (II.2) autour d'un intervalle polaire le long de la machine :

$$\varphi_s = \iint_s B_s \cdot dS = \int_0^\ell dz \int_{-\frac{\pi}{2p}}^{\frac{\pi}{2p}} B_s \cdot R d\theta \quad (\text{II.3})$$

On obtient :

$$\varphi_s = \frac{4\mu_0 N_s R \ell}{ep^2 \pi} i_a \quad (\text{II.4})$$

Et le flux magnétique total traversant l'enroulement de la phase "a" du au courant i_a est :

$$\psi_{sa} = N_s \varphi_s = N_s i_a \frac{2\mu_0 N_s R \ell}{ep^2 \pi} \int_{-\frac{\pi}{2p}}^{\frac{\pi}{2p}} \cos(\theta) d\theta = L_{sp} i_a \quad (\text{II.5})$$

L'induction principale (magnétisante) de la phase statorique "a" est donc donnée par :

$$L_{sp} = L_{ms} = \frac{4\mu_0 N_s^2 R \ell}{ep^2 \pi} \quad (\text{II.6})$$

L'inductance totale (propre) de la phase "a", est égale à la somme de l'inductance de magnétisation et de l'inductance de fuite :

$$L_{as} = L_{sp} + L_{sf} \quad (\text{II.7})$$

Puisque les enroulements statoriques sont symétriques, les inductances propres des trois phases sont égales : $L_{as} = L_{bs} = L_{cs} = L_s$. L'inductance mutuelle entre les phases statoriques est définie par la relation suivante :

$$M_{sab} = M_{sac} = M_{sbc} = M_s = -\frac{1}{2} L_{sp} \quad (\text{II.8})$$

II.2.2.2 Inductance rotorique

La figure II.1 illustre la modélisation du rotor par un schéma électrique équivalent.

Le rotor a été décomposé en circuits élémentaires (mailles) constitués de deux barres reliées à chaque extrémité par deux portions d'anneaux. Cette topologie des circuits rotoriques nous permettra d'envisager la rupture de n'importe quelle barre ou de portion d'anneaux.

Pour notre étude nous travaillons avec les courants de mailles avec i_{rk} le courant de la k^{eme} boucle rotorique et i_{bk} le courant de la k^{eme} barre, de sorte que :

$$i_{bk} = i_{rk} - i_{rk+1} \quad (\text{II.9})$$

La figure II.2 représente en fonction de θ , l'allure de l'induction magnétique, supposée radiale, produite par une maille rotorique dans l'entrefer.

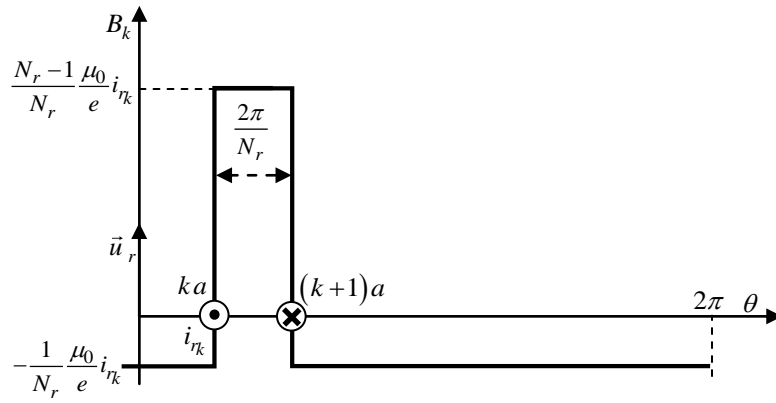


Fig. II.2 : Induction magnétique produite par une maille rotorique [9] .

Chaque maille rotorique, considérée comme une bobine à une seule spire, parcourue par un courant i_{rk} , est le siège d'un flux principal exprimé par :

$$\varphi_{rk} = \int_0^{\ell} dz \int_{ka}^{(k+1)a} \left(\frac{N_r - 1}{N_r} \frac{\mu_0}{e} R i_{rk} \right) d\theta = \frac{N_r - 1}{N_r^2} \mu_0 \frac{2\pi R \ell}{e} i_{rk} \quad (\text{II.10})$$

Et par la suite, l'inductance principale d'une maille rotorique est :

$$L_{rp} = \frac{N_r - 1}{N_r^2} \mu_0 \frac{2\pi}{e} R \ell \quad (\text{II.11})$$

L'inductance totale de la k^{ieme} maille rotorique est égale à la somme de son inductance principale, des inductances de fuite des deux barres et des inductances de fuite des deux portions d'anneaux de court circuit fermant la maille k. Donc l'expression est donnée par :

$$L_{rr} = L_{rp} + 2L_b + 2L_e \quad (\text{II.12})$$

Les mailles rotoriques sont magnétiquement couplées par l'intermédiaire du flux rotorique d'entrefer. Le flux traversant la $j^{\text{ème}}$ maille, produit par le courant i_{rk} circulant dans la maille k est donnée par :

$$\varphi_{rjrk} = \int_0^{\ell} dz \int_{j_a}^{(j+1)_a} \left(-\frac{1}{N_r} \frac{\mu_0}{e} R i_{rk} \right) d\theta \quad (\text{II.13})$$

Donc, l'inductance mutuelle entre mailles rotoriques non adjacentes, est exprimée par la relation suivante :

$$M_{rr} = -\frac{1}{N_r^2} \frac{2\pi\mu_0}{e} R \ell \quad (\text{II.14})$$

L'inductance mutuelle entre la $k^{\text{ième}}$ maille et les mailles adjacentes est donnée par :

$$M_{rk(k-1)} = M_{rk(k+1)} = M_{rr} - L_b \quad (\text{II.15})$$

II.2.2.3 Inductance mutuelle stator-rotor

La figure II.3 indique les bases géométriques de l'expression du flux mutuel entre l'enroulement d'une phase "n" au stator (représentée par une spire diamétrale) et un circuit élémentaire "k" au rotor [9].

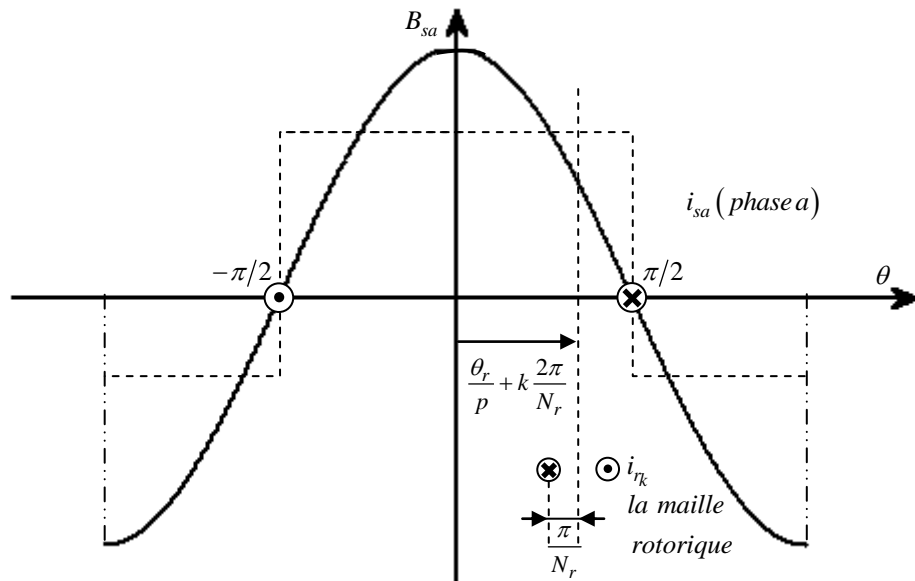


Fig. II.3 : Flux mutuel-phase statorique-boucle rotorique

Pour calculer le flux mutuel stator rotor, on prend comme référence d'angle pour le rotor, θ_r par rapport à la phase "a" du stator. Aussi on considère $\theta_r = 0$, le passage du milieu de la maille élémentaire $[b_0 - b_{(N_r-1)}]$ par rapport à la phase "a". Lorsque la maille élémentaire $[b_0 - b_{(N_r-1)}]$ se trouve dans une position quelconque θ_r , alors la position angulaire de la k^{eme} maille est :

$$\theta_r + k \frac{2\pi}{N_r} \quad (\text{II.16})$$

Comme :

$$B_{sn}(\theta_r) = \frac{2\mu_0 N_s i_{sn}}{ep\pi} \cos \left[\left(p\theta_r - n \frac{2\pi}{3} \right) \right] \quad (\text{II.17})$$

Avec : $n = 1, 2, 3$

alors le flux traversant la maille k , produit par le courant i_a , est donnée par :

$$\varphi_{snrk} = - \int_{\frac{\theta_r + k \frac{2\pi}{N_r} - \frac{\pi}{N_r}}{\frac{\theta_r + k \frac{2\pi}{N_r} + \frac{\pi}{N_r}}} B_s(\theta) R \ell d\theta \quad (\text{II.18})$$

L'intégrale de l'équation ci-dessus conduit à :

$$\varphi_{snrk} = - \frac{2}{\pi} \frac{\mu_0}{e \cdot p} N_s R \ell i_{sn} \frac{1}{p} \cdot \left[\sin \left(p\theta - n \frac{2\pi}{3} \right) \right]_{\frac{\theta_r + k \frac{2\pi}{N_r} - \frac{\pi}{N_r}}{\frac{\theta_r + k \frac{2\pi}{N_r} + \frac{\pi}{N_r}}} \quad (\text{II.19})$$

L'expression de l'inductance mutuelle stator-rotor tirée de celle du flux est donc donnée par :

$$M_{snrk} = -M_{sr} \cos \left(p\theta_r - n \frac{2\pi}{3} + ka \right) \quad (\text{II.20})$$

Avec :

$$M_{sr} = \frac{4\mu_0 N_s R \ell}{e p^2 \pi} \sin \left(\frac{a}{2} \right) \quad (\text{II.21})$$

$$\text{et } a = p \frac{2\pi}{N_r} \quad (\text{II.22})$$

est l'angle électrique entre deux mailles rotoriques.

Le tableau suivant, résume les expressions de toutes les inductances de la machine asynchrone à cage.

Tableau II.1 : Inductances de la machine asynchrone à cage

INDUCTANCES	EXPRESSIONS
L'inductance principale d'une phase statorique.	$L_{sp} = L_{ms} = \frac{4\mu_0 N_s^2 R \ell}{e \pi p^2}$
L'inductance mutuelle entre phases statoriques.	$M_s = -\frac{L_{sp}}{2}$
L'inductance totale d'une phase statorique.	$L_{as} = L_{bs} = L_{cs} = L_s = L_{sp} + L_{sf}$
L'inductance principale d'une maille rotorique	$L_{rp} = \frac{N_r - 1}{N_r^2} \mu_0 \frac{2\pi}{e} R \ell$
L'inductance mutuelle entre mailles rotoriques non adjacentes.	$M_{rr} = -\frac{1}{N_r^2} \mu_0 \frac{2\pi}{e} R \ell$
L'inductance mutuelle entre mailles rotoriques adjacentes.	$M_{r_{k(k-1)}} = M_{r_{k(k+1)}} = M_{rr} - L_b$
L'inductance mutuelle entre une maille rotorique et une phase statorique "a".	$M_{srk} = -M_{sr} \cos\left(p\theta_r - n\frac{2\pi}{3} + ka\right)$ <p>Avec $M_{sr} = \frac{4\mu_0 N_s R \ell}{ep^2 \pi} \sin\left(\frac{a}{2}\right)$</p>

II.3 MISE EN ÉQUATIONS

Le but de la mise en équation est d'effectuer une simulation numérique. Les équations devront donc être aussi simples que possible. Nous allons voir aussi qu'il est possible de prendre en compte des défauts sans que cela ne nécessite de reformuler systématiquement toute la mise en équation de la machine et de son environnement.

À partir de la topologie du circuit électrique, nous cherchons l'ensemble des équations différentielles indépendantes régissant l'évolution des courants, puis les mettre sous la forme classique où chaque matrice va être explicitée dans la suite.

$$[V] = [R][I] + [L] \frac{d[I]}{dt} + \frac{d[L]}{dt} [I] \quad (\text{II.23})$$

Aussi pour le défaut de rupture de barres, les inductances principales, mutuelles statoriques et mutuelles statoriques-rotoriques sont considérées identiques tandis que pour le défaut de court-

circuit les inductances des trois phases sont différentes et dépendent du nombre de spires court-circuitées.

II. 3.1 Equations de tensions au stator

$$[V_{abc}] = [R_s][i_{abc}] + \frac{d}{dt}[\varphi_{abc}] \quad (\text{II.24})$$

et

$$[\varphi_{abc}] = [L_s][i_{abc}] + [M_{sr}][i_{rk}] \quad (\text{II.25})$$

Avec :

$[v_{abc}] = [v_a \quad v_b \quad v_c]^T$, le vecteur des tensions statoriques.

$[i_{abc}] = [i_a \quad i_b \quad i_c]^T$, le vecteur des courants statoriques.

$[i_{rk}] = [i_{r0} \quad i_{r1} \cdots i_{rk} \cdots i_{r(N_r-1)}]^T$, le vecteur des courants dans les mailles rotoriques.

$[\varphi_{abc}] = [\varphi_a \quad \varphi_b \quad \varphi_c]^T$, le vecteur des flux statoriques.

- $[R_s]$: matrice des résistances statoriques.

$$[R_s] = \begin{bmatrix} R_{sa} & 0 & 0 \\ 0 & R_{sb} & 0 \\ 0 & 0 & R_{sc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.26})$$

- $[L_s]$: matrices des inductances statoriques.

$$[L_s] = \begin{bmatrix} L_{Sa} & M_{Sab} & M_{Sac} \\ M_{Sba} & L_{Sb} & M_{Sbc} \\ M_{Sca} & M_{Scb} & L_{Sc} \end{bmatrix}; \quad M_{Sab} = M_{Sba}; \quad M_{Sac} = M_{Sca}; \quad M_{Sbc} = M_{Scb} \quad (\text{II.27})$$

- $[M_{sr}]$: matrice des inductances mutuelles entre phases statoriques et mailles rotoriques.

$$[M_{sr}] = \begin{bmatrix} \cdots & M_{sra} \cos(\theta_r + ka) & \cdots \\ \cdots & M_{srb} \cos\left(\theta_r + ka - \frac{2\pi}{3}\right) & \cdots \\ \cdots & M_{src} \cos\left(\theta_r + ka - \frac{4\pi}{3}\right) & \cdots \end{bmatrix} \quad (\text{II.28})$$

où : $k = 0, 1, \dots, N_r - 1$

- $[M_{sr}]^T$: matrice transposée des inductances mutuelles entre phases statoriques et mailles rotoriques.

$$[M_{sr}]^T = \begin{bmatrix} \vdots & \vdots & \vdots \\ M_{sra} \cos(\theta_r + ka) & M_{srb} \cos\left(\theta_r + ka - \frac{2\pi}{3}\right) & M_{src} \cos\left(\theta_r + ka - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix} \quad (\text{II.29})$$

II.3.2 Equations de tensions au rotor

La figure (II.4), représente le schéma équivalent de la cage rotorique.

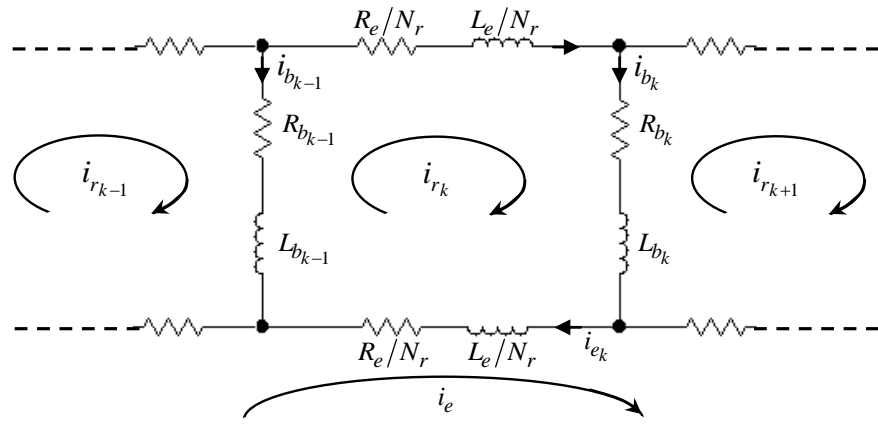


Fig. II.4 : schéma électrique équivalent, à mailles, de la cage rotorique

Sachant que :

$$i_{ek} = i_{rk} - i_e \quad (\text{II.30})$$

Et
$$i_{bk} = i_{rk} - i_{r(k+1)} \quad (\text{II.31})$$

L'équation de tension pour la maille "k" de la cage rotorique est donnée par :

$$-R_{b(k-1)} i_{r(k-1)} + \left(2 \frac{R_e}{N_r} + R_{b(k-1)} + R_{b_k} \right) i_{rk} - R_{b_k} i_{r(k+1)} - \frac{R_e}{N_r} i_e + \frac{d(\varphi_{rk})}{dt} = 0 \quad (\text{II.32})$$

Avec :

$$\begin{aligned} \varphi_{rk} = & \left(L_{rp} + 2L_b + 2 \frac{L_e}{N_r} \right) i_{rk} - L_b (i_{r(k-1)} + i_{r(k+1)}) - \frac{L_e}{N_r} i_e - M_{rr} \sum_{\substack{j=0 \\ j \neq k}}^{N_r-1} i_{rj} \\ & - M_{sr} \left[\cos(\theta_r + ka) \cos(\theta_r + ka - 2\pi/3) \cos(\theta_r + ka - 4\pi/3) \right] [i_{abc}] \end{aligned} \quad (\text{II.33})$$

Il faut compléter le système d'équations des circuits du rotor par celle de l'anneau de court-circuit, on a alors :

$$\frac{Re}{N_r} \sum_{k=0}^{N_r-1} i_{rk} + \frac{Le}{N_r} \sum_{k=0}^{N_r-1} \frac{di_{rk}}{dt} - R_e i_e - L_e \frac{di_e}{dt} = 0 \quad (\text{II.34})$$

II.3.3 Equation globale des tensions

On peut réunir l'ensemble des équations statoriques et rotoriques sous forme matricielle comme décrit dans l'équation (II.23).

$$[V] = [R][I] + [L] \frac{d[I]}{dt} + \frac{d[L]}{dt} [I]$$

Avec :

$[V] = [v_a \ v_b \ v_c \ ; \ 0 \ \dots \ 0 \ ; \ 0]^T$, vecteur des tensions de dimension $(N_r + 4, 1)$, contient les trois tensions statoriques, les N_r tensions des mailles rotoriques ainsi que la tension de l'anneau de court-circuit.

$[I] = [i_a \ i_b \ i_c \ ; \ i_{r_0} \ i_{r_1} \ \dots \ i_{r_k} \ \dots \ i_{r_{N_r-1}} \ ; \ i_e]^T$, vecteur des courants, aussi de dimension $(N_r + 4, 1)$, contient les trois courants statoriques, les N_r courants des mailles rotoriques ainsi que le courant de l'anneau de court-circuit.

$$[R] = \begin{bmatrix} [R_s] & \vdots & [0] \\ \dots & \vdots & \dots \\ [0] & \vdots & [R_r] \end{bmatrix}, \text{ la matrice augmentée des résistances.}$$

Avec :

R_r : la matrice des résistances rotoriques.

$$[R_r] = \begin{bmatrix} R_{b_{N_r-1}} + R_{b_0} + \frac{2R_e}{N_r} & -R_{b_0} & 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & -R_{b_{N_r-1}} & \vdots & -\frac{R_e}{N_r} \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & \dots & -R_{b_{k-1}} & R_{b_{k-1}} + R_{b_k} + \frac{2R_e}{N_r} & -R_{b_k} & 0 & \dots & 0 & \vdots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots & \vdots \\ -R_{b_{N_r-1}} & 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & -R_{b_{N_r-2}} & R_{b_{N_r-2}} + R_{b_{N_r-1}} + \frac{2R_e}{N_r} & \vdots & -\frac{R_e}{N_r} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \vdots & \vdots \\ -\frac{R_e}{N_r} & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & -\frac{R_e}{N_r} & \vdots & R_e \end{bmatrix} \quad (\text{II.35})$$

$$[L] = \begin{bmatrix} [L_s] & \vdots & [M_{sr}] \\ \dots & \vdots & \dots \\ [M_{sr}]^T & \vdots & [L_r] \end{bmatrix}, \text{ la matrice augmentée des inductances.}$$

Avec :

L_r : matrice des inductances rotoriques.

$$[L_r] = \begin{bmatrix} L_{rp} + 2L_b + 2\frac{L_e}{N_r} & M_{rr} - L_b & M_{rr} & \dots & M_{rr} - L_b & \vdots & -\frac{L_e}{N_r} \\ M_{rr} - L_b & L_{rp} + 2L_b + 2\frac{L_e}{N_r} & M_{rr} - L_b & M_{rr} & \dots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ M_{rr} - L_b & M_{rr} & \dots & M_{rr} - L_b & L_{rp} + 2L_b + 2\frac{L_e}{N_r} & \vdots & -\frac{L_e}{N_r} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \vdots & \dots \\ -\frac{L_e}{N_r} & \dots & \dots & \dots & -\frac{L_e}{N_r} & \vdots & L_e \end{bmatrix}$$

(II.36)

On remarque que la matrice $[M_{sr}]$ dépend du temps, ce qui nécessite, à chaque pas de calcul, l'inversion de la matrice inductance $[L]$, de dimension $(N_r+4) \times (N_r+4)$

$\frac{d[L]}{dt}$, la dérivée de la matrice augmentée des inductances

$$\frac{d[L]}{dt} = \begin{bmatrix} [0] & \vdots & \frac{d[M_{sr}]}{dt} \\ \dots & \vdots & \dots \\ \frac{d[M_{sr}]^T}{dt} & \vdots & [0] \end{bmatrix} \cdot \cdot$$

Avec :

$$\frac{d[M_{sr}]}{dt} = -\dot{\theta}_r \begin{bmatrix} \dots & M_{sra} \sin(\theta_r + ka) & \dots \\ \dots & M_{srb} \sin\left(\theta_r + ka - \frac{2\pi}{3}\right) & \dots \\ \dots & M_{src} \sin\left(\theta_r + ka - \frac{4\pi}{3}\right) & \dots \end{bmatrix} \quad (\text{II.37})$$

et

$$\frac{d[M_{sr}]^T}{dt} = -\dot{\theta}_r \begin{bmatrix} \vdots & \vdots & \vdots \\ M_{sra} \sin(\theta_r + ka) & M_{srb} \sin\left(\theta_r + ka - \frac{2\pi}{3}\right) & M_{src} \sin\left(\theta_r + ka - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix} \quad (\text{II.38})$$

Pour la simulation l'équation (II.23) est réarrangée comme :

$$\frac{dI}{dt} = -L^{-1} \cdot \left(R + \frac{dL}{dt} \right) \cdot I + L^{-1} \cdot V \quad (\text{II.39})$$

Soit sous la forme classique :

$$\frac{dI}{dt} = A \cdot I + B \cdot V \quad (\text{II.40})$$

Avec A et B valant respectivement :

$$A = -L^{-1} \cdot \left(R + \frac{dL}{dt} \right), \quad B = L^{-1} \quad (\text{II.41})$$

II.3.4 Equation mécanique

Aux équations précédentes on ajoute l'équation mécanique et l'équation du couple.

$$\frac{dw_m}{dt} = \frac{1}{J} (C_{em} - C_r - f \cdot w_m) \quad (\text{II.42})$$

II.3.5 Expression du couple

Pour le calcul du couple, on part de l'équation connue :

$$C_{em} = p \frac{1}{2} I^T \cdot \frac{dL}{d\theta_r} \cdot I \quad (\text{II.43})$$

Après un long calcul on aboutit à l'expression finale du couple :

$$C_{em} = M_{sra} \sum_{k=0}^{N_r-1} \left(\sin(\theta_r + ka) \cdot i_{rk} \right) \cdot i_a + M_{srb} \sum_{k=0}^{N_r-1} \left(\sin\left(\theta_r + ka - \frac{2\pi}{3}\right) \cdot i_{rk} \right) \cdot i_b + M_{src} \sum_{k=0}^{N_r-1} \left(\sin\left(\theta_r + ka - \frac{4\pi}{3}\right) \cdot i_{rk} \right) \cdot i_c \quad (\text{II.44})$$

II.4 CONCLUSION

Nous avons proposé un modèle multi enroulement de la machine asynchrone a cage qui tient compte de la structure du rotor, qui nous permis de voir l'évolution des grandeurs qui circulent dans la cage (courants, flux des barres).Ce modèle est pratique en ce sens que l'introduction du défaut se traduit à une simple augmentation de la résistance de spires on veut simuler le court-circuit.

CHAPITRE III

CHAPITRE III

SIMULATION DE LA MACHINE ASYNCHRONE AVEC DÉFAUT DE COURT-CIRCUIT STATORIQUE

III.1 INTRODUCTION

Après avoir défini le modèle de la machine asynchrone, nous avons utilisé le logiciel MATLAB pour résoudre les équations différentielles obtenues et pour l'exploitation des résultats.

Dans ce chapitre, on va présenter les courbes du courant statorique, le couple et la vitesse sous les différentes conditions de fonctionnement, à l'état sain et avec défaut de court circuit statorique.

À noter que l'objectif de ce travail est la détection précoce de défaut de court-circuit statorique, pour cela on va limiter la simulation du défaut à trois spires.

III.2 COURT-CIRCUIT ENTRE SPIRES STATORIQUES

Le court-circuit entre spires des enroulements statoriques est un défaut largement rencontré dans l'industrie. Il apparaît généralement à cause des mauvaises conditions de fonctionnement ou au vieillissement des isolants qui enrobent les conducteurs.

Suite à un court-circuit entre quelques spires d'une bobine statorique, il apparaît une maille supplémentaire constituée des spires court-circuitées, indépendante de la bobine d'origine (Figure III.1). Cette maille supplémentaire sera le siège d'une Fém (par conséquent un courant) créée par le champ dû à l'ensemble des enroulements statoriques et rotoriques qui l'entourent [4].

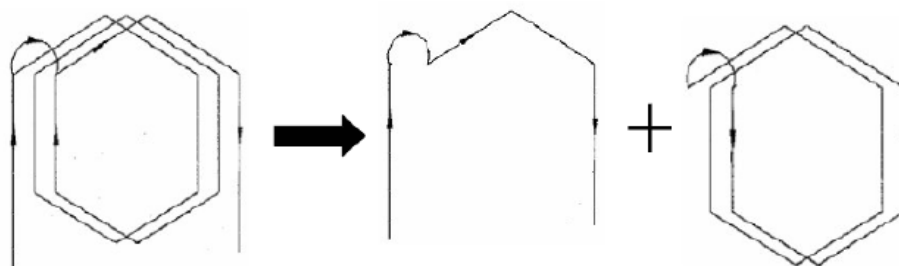


Fig. III.1 : représentation d'un court-circuit entre spires d'une bobine statorique [4]

Si on a un court-circuit entre spires d'une bobine de la phase A, le nombre de spires de la maille supplémentaire sera très petit par rapport à celui de l'enroulement A. Par conséquent, le courant induit $I_{cc}(t)$ de court-circuit aura une amplitude de grande valeur [4].

$$I_{cc}(t) = \hat{I}_{cc} \sin(\omega_s t) \quad (\text{III.1})$$

Ce courant est en opposition de phase par rapport à $i_A(t)$. En d'autre terme, ce défaut fait diminuer le nombre de tours de la phase concernée et par conséquent sa Fmm.

On commence par l'étude de l'effet d'une seule spire en court-circuit, puis 2 spires et 3 spires, la simulation a été effectuée pour un moteur chargé de 10 N.m.

Les figures III.2, III.3, III.4, III.5, III.6 et III.7 représentent respectivement les courants de phases pour ces trois cas de défaut.

En prenant le cas représenté sur la figure III.2, le moteur commence à fonctionner à l'état sain, à l'instant 1.7 s un défaut de court circuit d'une seule spire apparait, on peut clairement visualiser le déséquilibre engendré dans les trois courants, l'augmentation de l'amplitude du courant de phase a (phase où le défaut se manifeste) et diminution des amplitudes des courants des autres phases (figure III.3 éclaircisse la visualisation)

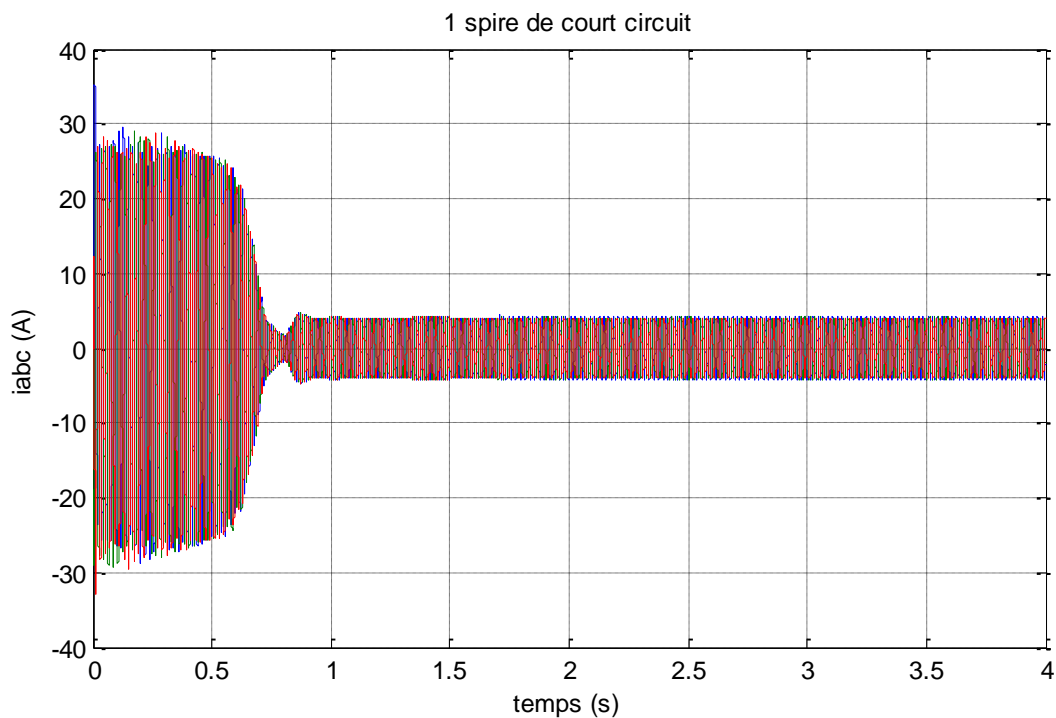


Fig. III.2 : courants de phases pour un moteur chargé de 10 N.m avec défaut de court-circuit (1 spire en court-circuit)

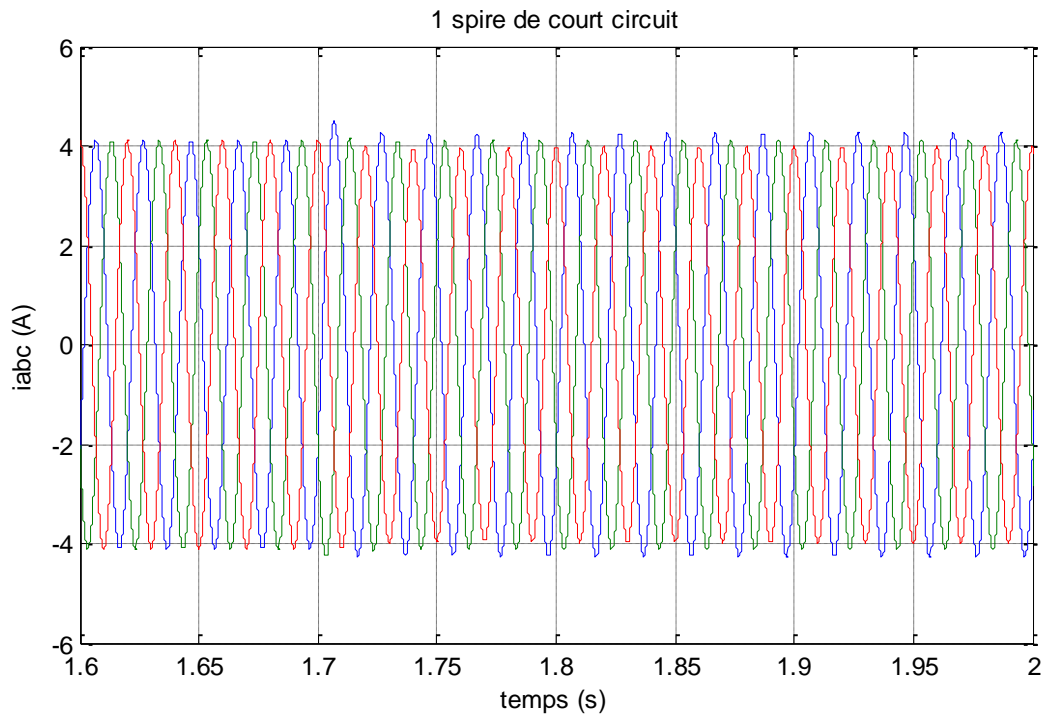


Fig. III.3 : courants de phases pour un moteur chargé de 10 N.m avec défaut de court-circuit (1 spire en court-circuit)-Zoom

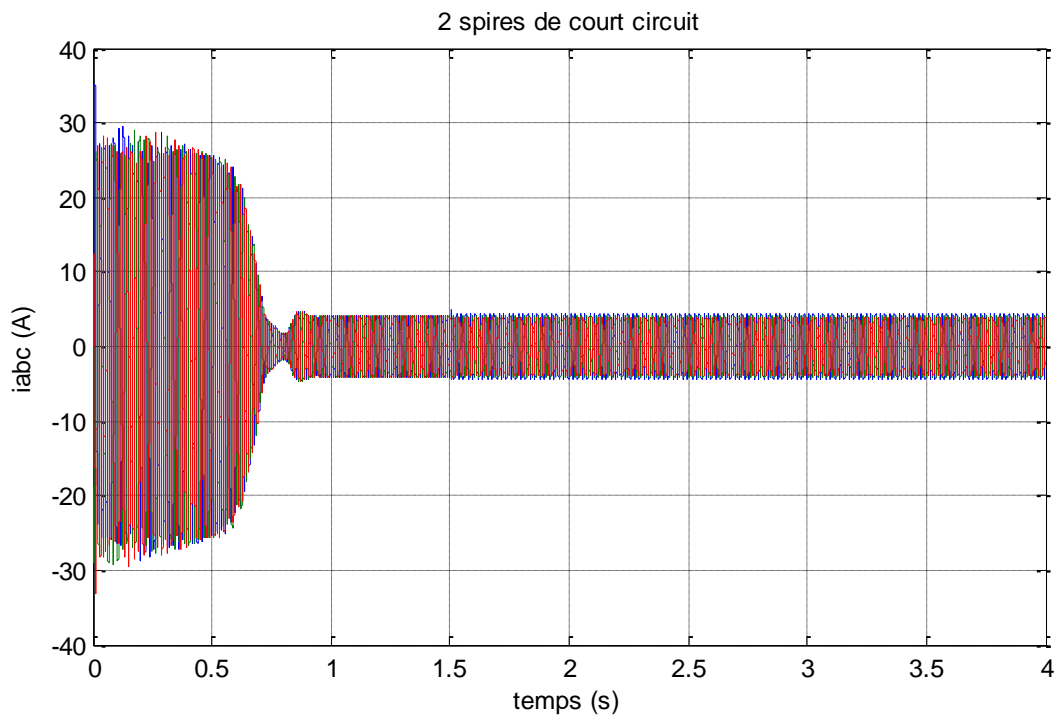


Fig. III.4 : courants de phases pour un moteur chargé de 10 N.m avec défaut de court-circuit (2 spires en court-circuit)



Fig. III.5 : courants de phases pour un moteur chargé de 10 N.m avec défaut de court-circuit (2 spires en court-circuit)-Zoom

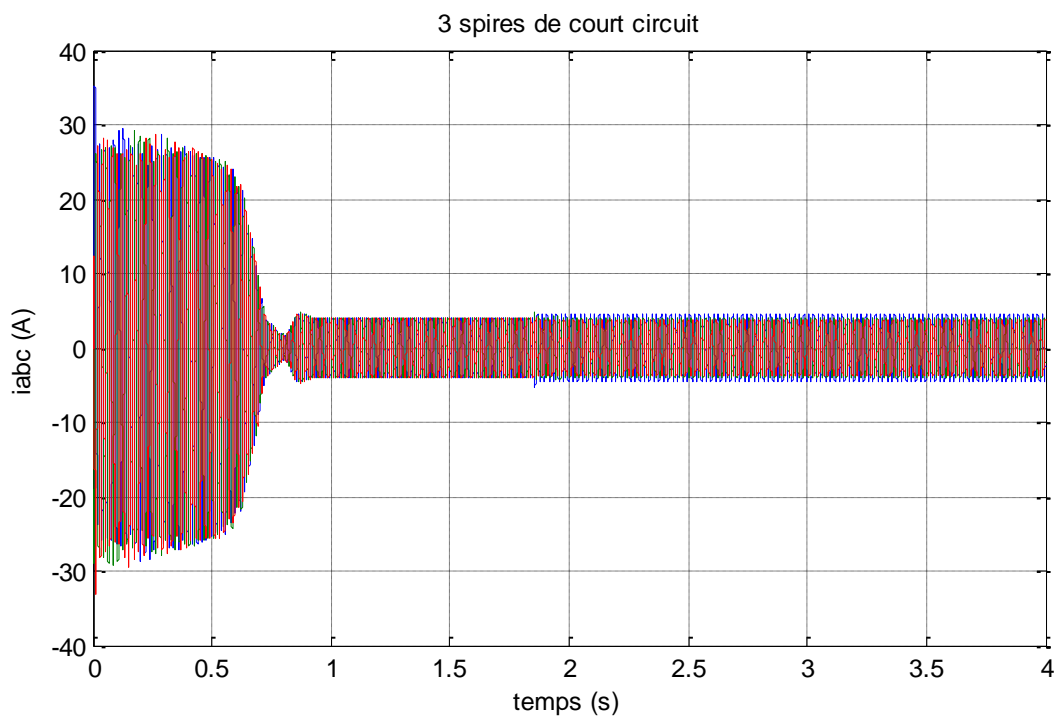


Fig. III.6 : courants de phases pour un moteur chargé de 10 N.m avec défaut de court-circuit (3 spires en court-circuit)

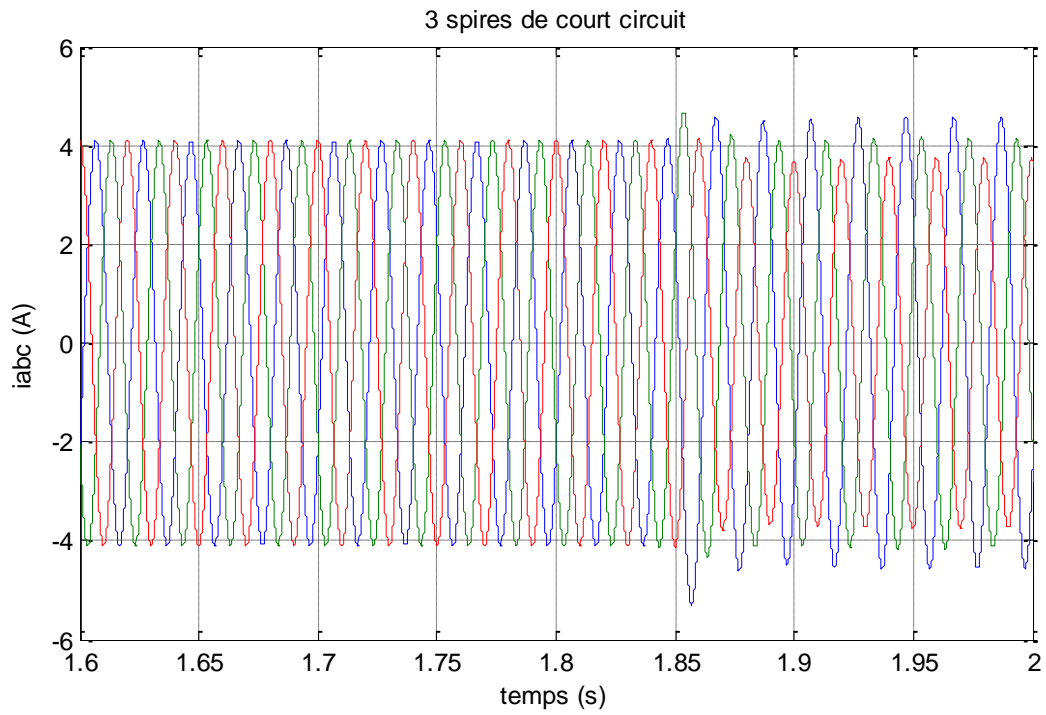


Fig. III.7 : courants de phases pour un moteur chargé de 10 N.m avec défaut de court-circuit (3 spires en court-circuit)-Zoom

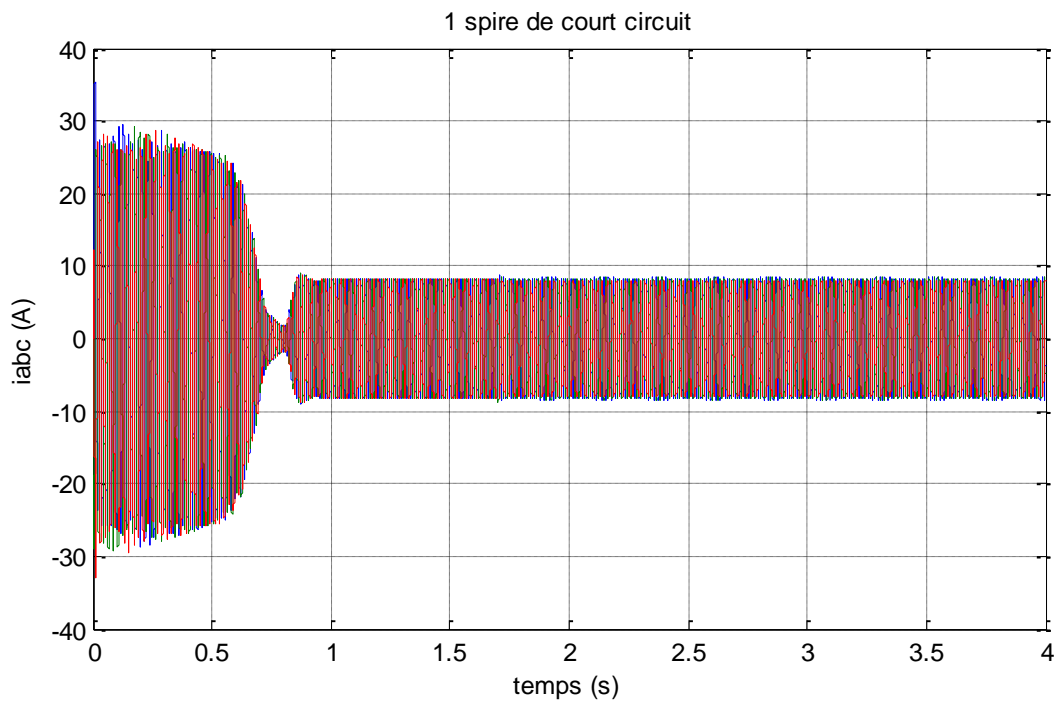


Fig. III.8 : courants de phases pour un moteur chargé de 20 N.m avec défaut de court-circuit (1 spire en court-circuit)

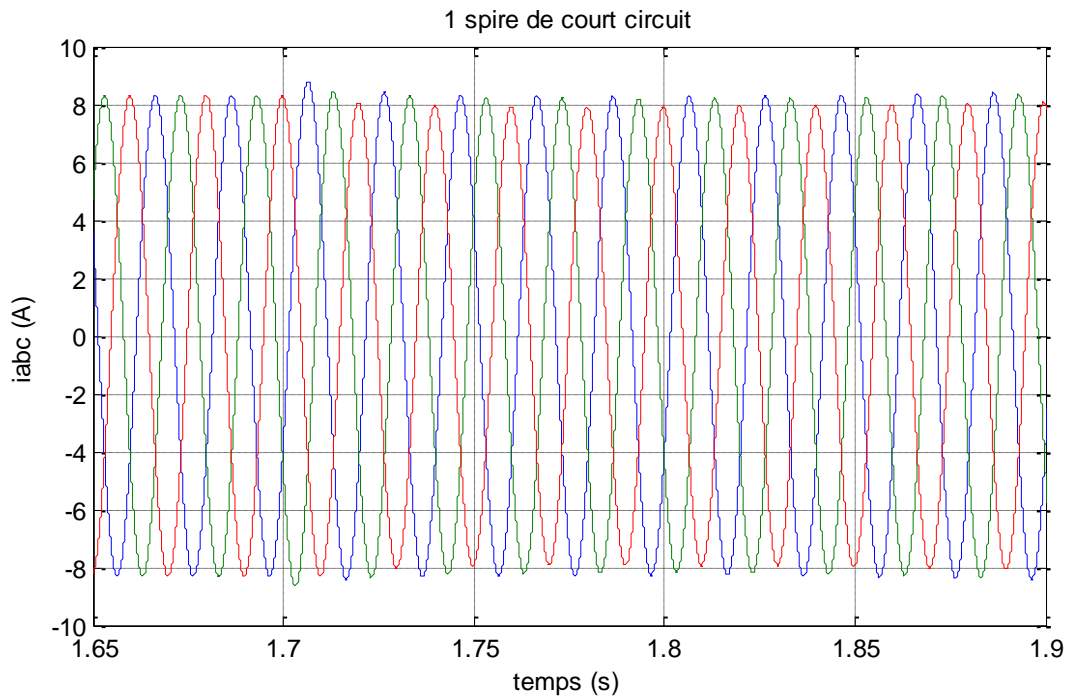


Fig. III.9 : courants de phases pour un moteur chargé de 20 N.m avec défaut de court-circuit (1 spire en court-circuit)-Zoom

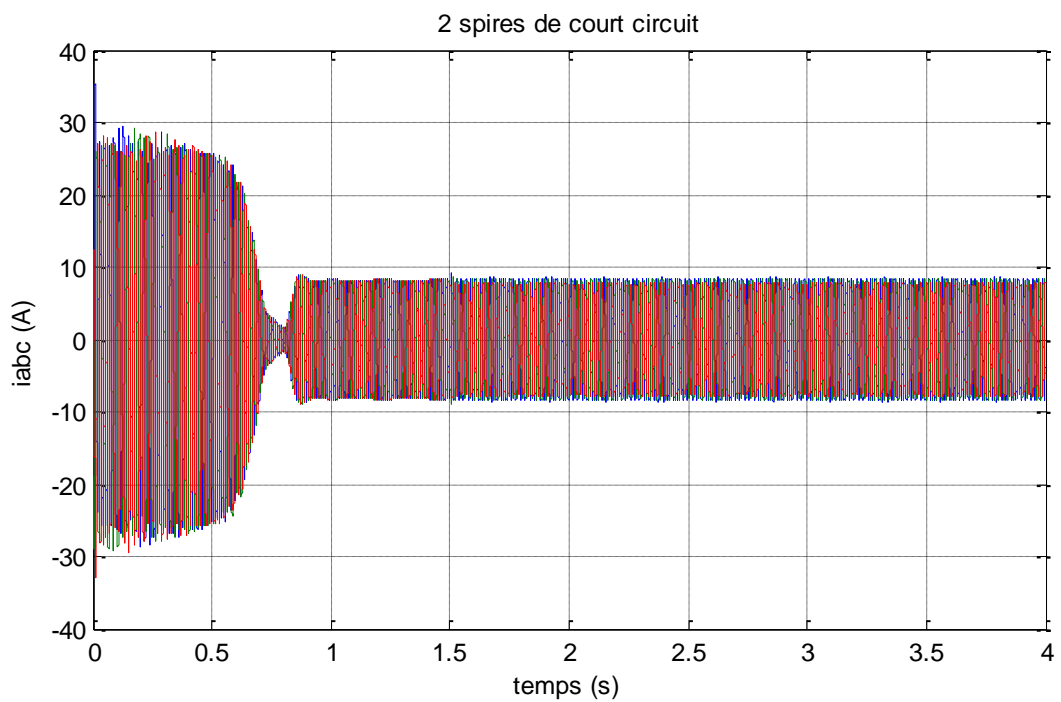


Fig. III.10 : courants de phases pour un moteur chargé de 20 N.m avec défaut de court-circuit (2 spires en court-circuit)

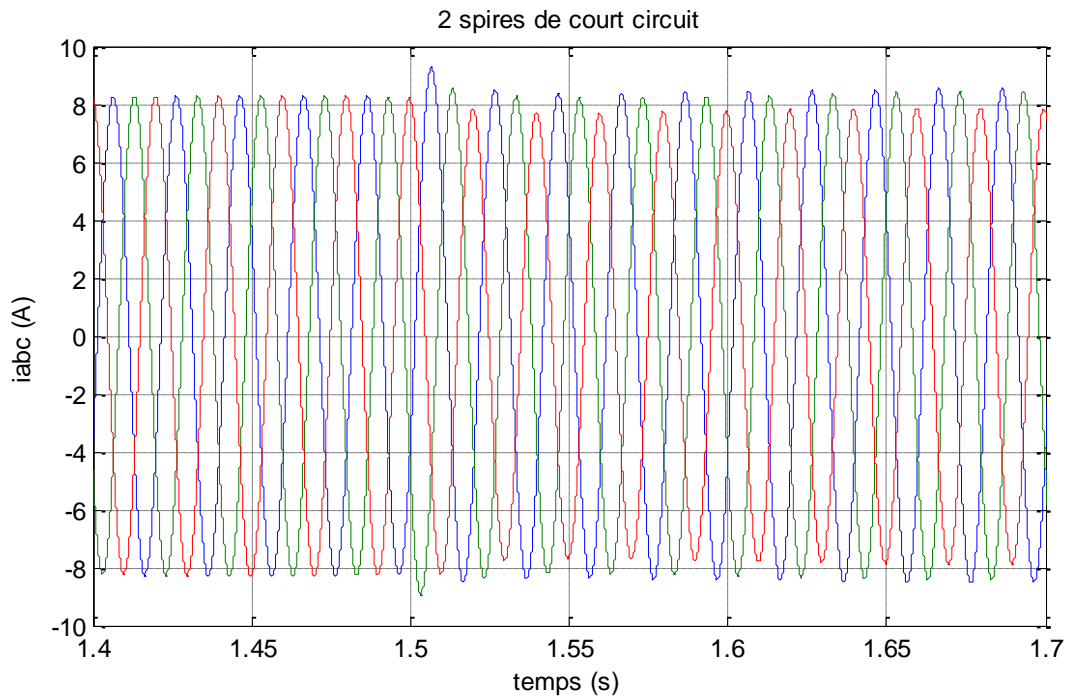


Fig. III.11 : courants de phases pour un moteur chargé de 20 N.m avec défaut de court-circuit (2 spires en court-circuit)-Zoom

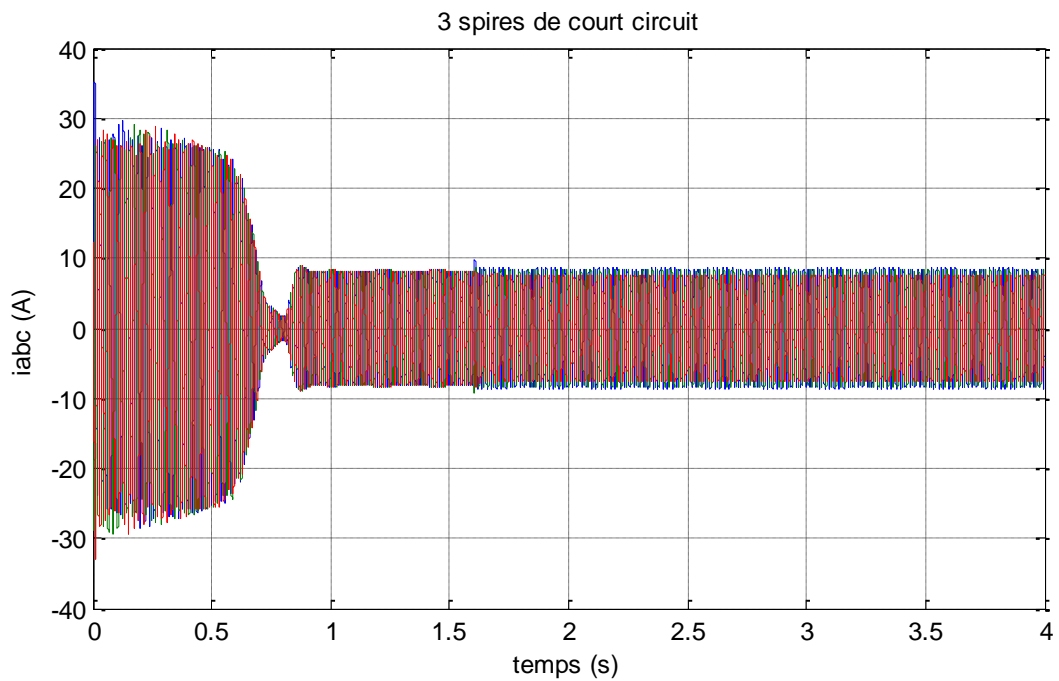


Fig. III.12 : courants de phases pour un moteur chargé de 20 N.m avec défaut de court-circuit (3 spires en court-circuit)

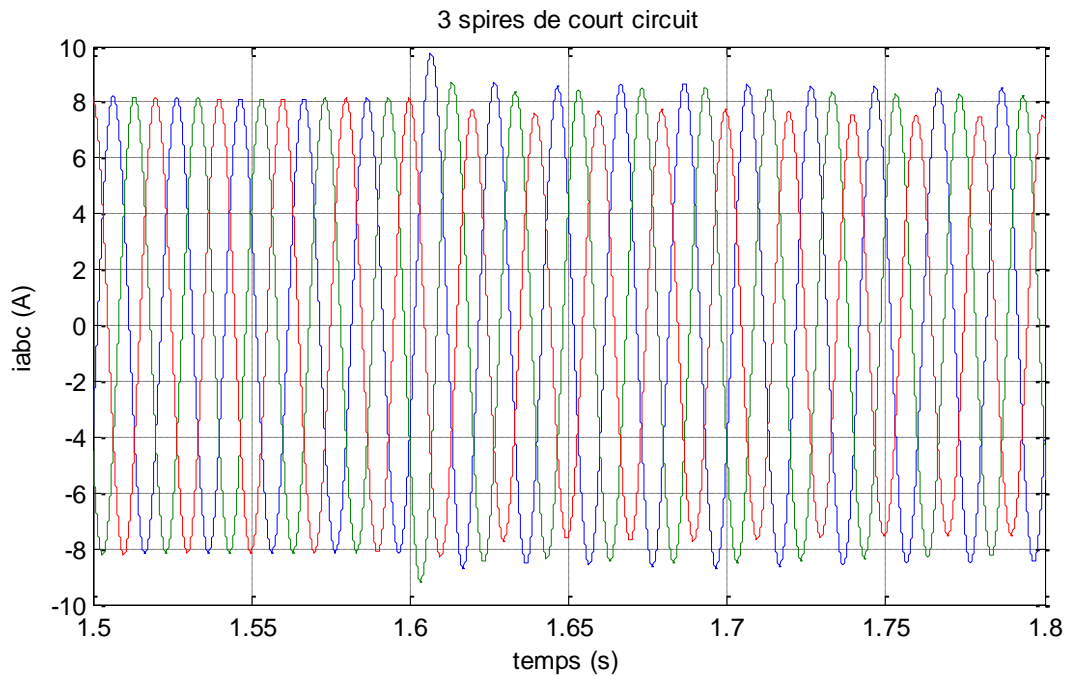


Fig. III.13 : courants de phases pour un moteur chargé de 20 N.m avec défaut de court-circuit (3 spires en court-circuit)-Zoom

III.2.1 ETUDE DE L'EFFET MÉCANIQUE DE DÉFAUT DE COURT-CIRCUIT ENTRE SPIRES

Comme tous les défauts dans les moteurs asynchrones, le court-circuit entre spires statoriques a un effet mécanique (oscillations dans le couple). Donc, on doit aussi étudier cet effet afin de vérifier les allures du couple et de la vitesse [4,5].

III.2.1.1 Le couple électromagnétique

Lors de l'apparition du défaut de court circuit statorique, le couple électromagnétique total sera constitué d'une composante constante et une autre oscillatoire de pulsation $2\omega_s$. On remarque bien que les champs inverses créés par le défaut de court-circuit sont à l'origine de la composante oscillatoire du couple [4].

Les figures III.14, III.15 et III.16, montrent les allures du couple électromagnétique pour une machine chargée de 10 N.m.

Dans la figure III.14 le défaut de court circuit d'une seule spire est apparu à l'instant 1.6 s, on peut bien observer les oscillations dans le couple électromagnétique, l'amplitude de ces oscillations augmente pour un défaut de court circuit de 2 spires (figure III.15), bien que

l'amplitude des oscillations est fortement augmentée pour un défaut de court circuit de 3 spires (figure III.16), alors on peut ici visualiser l'effet de la sévérité du défaut de court circuit.

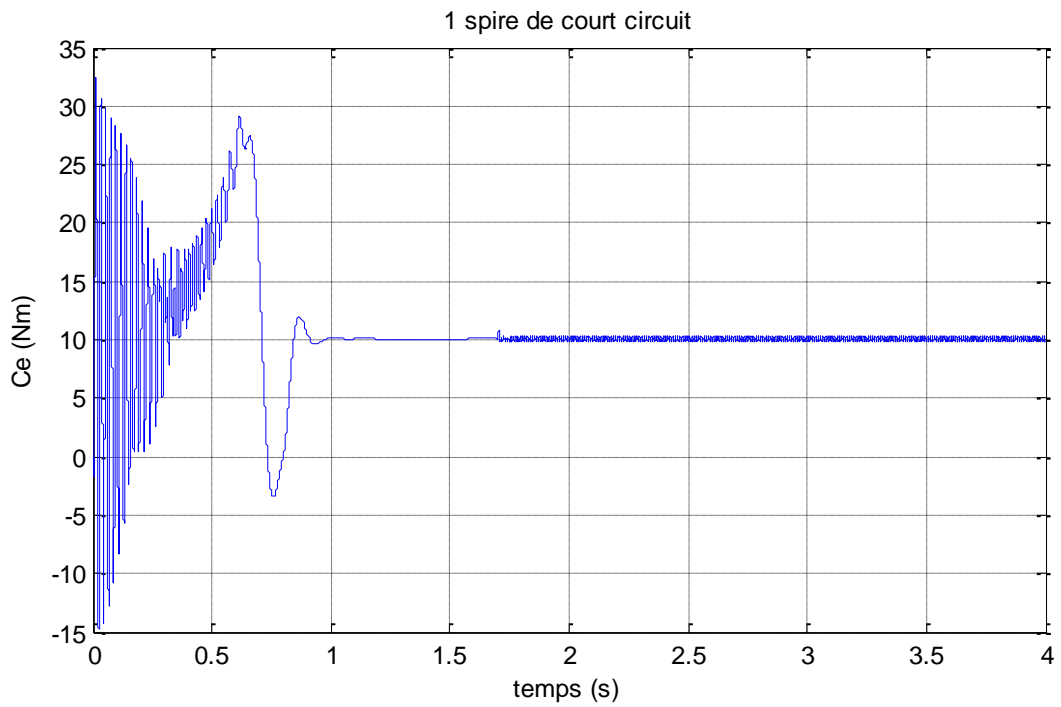


Fig. III.14 : couple électromagnétique pour un moteur chargé de 10 N.m avec défaut de court-circuit (1 spire en court-circuit)

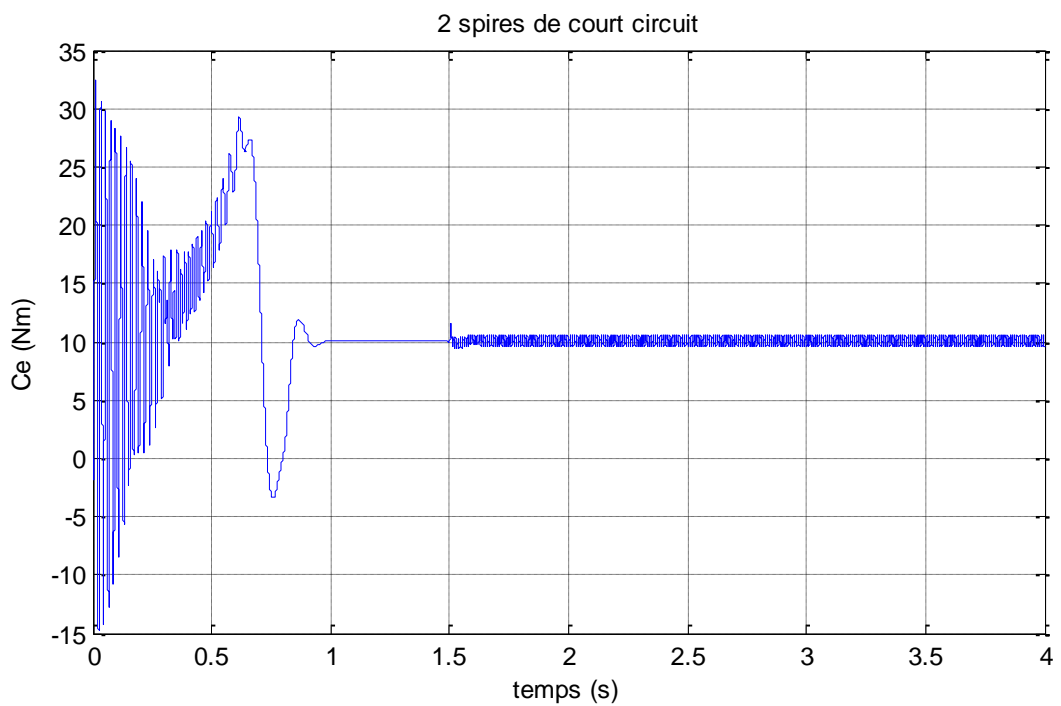


Fig. III.15 : couple électromagnétique pour un moteur chargé de 10 N.m avec défaut de court-circuit (2 spires en court-circuit)

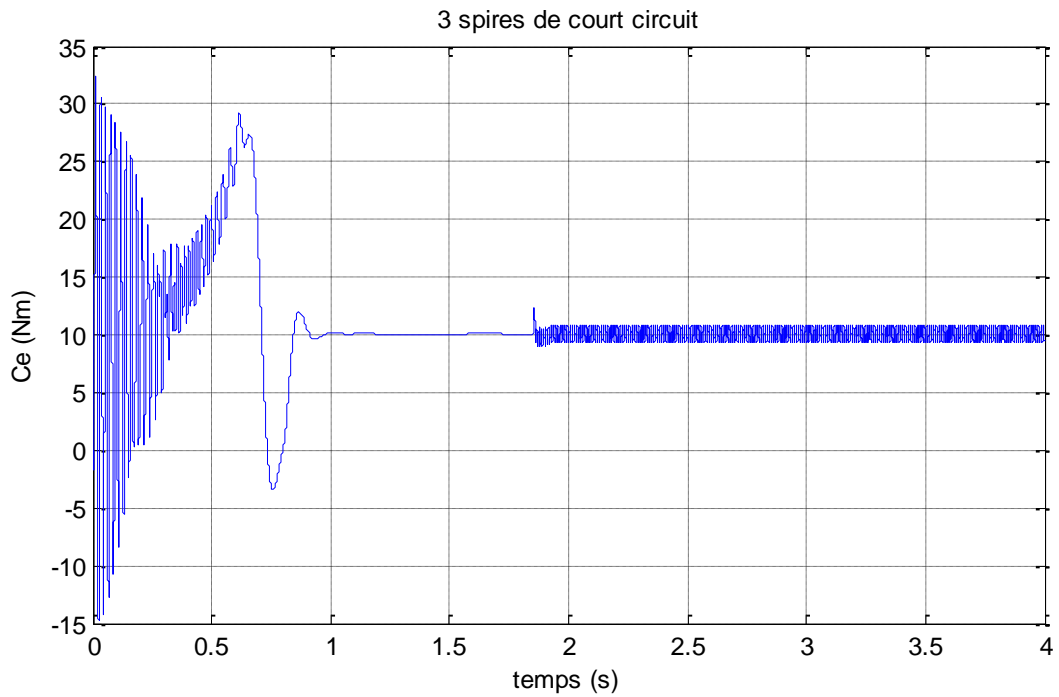


Fig. III.16 : couple électromagnétique pour un moteur chargé de 10 N.m avec défaut de court-circuit (3 spires en court-circuit)

Les figures III.17, III.18 et III.19, montrent respectivement le couple électromagnétique d'un moteur asynchrone triphasé chargé de 20 N.m avec un défaut de court-circuit d'une seule spire, 2 spires et 3 spires. On peut facilement donner les mêmes interprétations pour un moteur défaillant et chargé de 10 N.m. Mais ici, on peut clairement constater que la valeur de la charge utilisée a un grand impact sur les conséquences de défaut, les oscillations dans le couple sont fortement agrandis pour une charge de 20 N.m, notamment pour le dernier cas représenté dans la figure III.19.

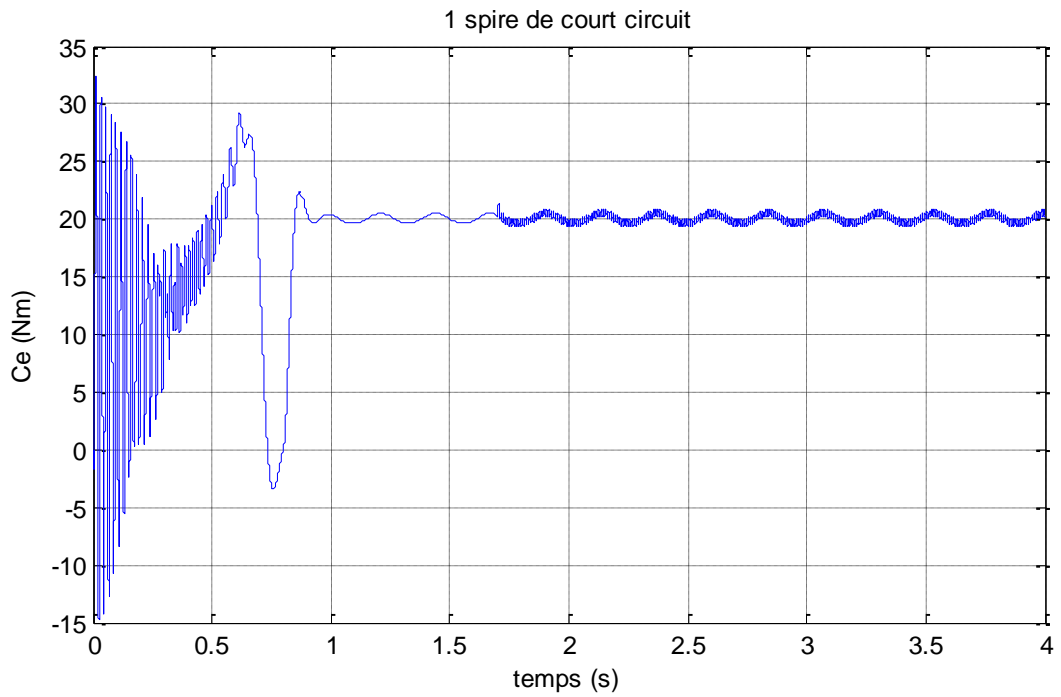


Fig. III.17 : couple électromagnétique pour un moteur chargé de 20 N.m avec défaut de court-circuit (1 spire en court-circuit)

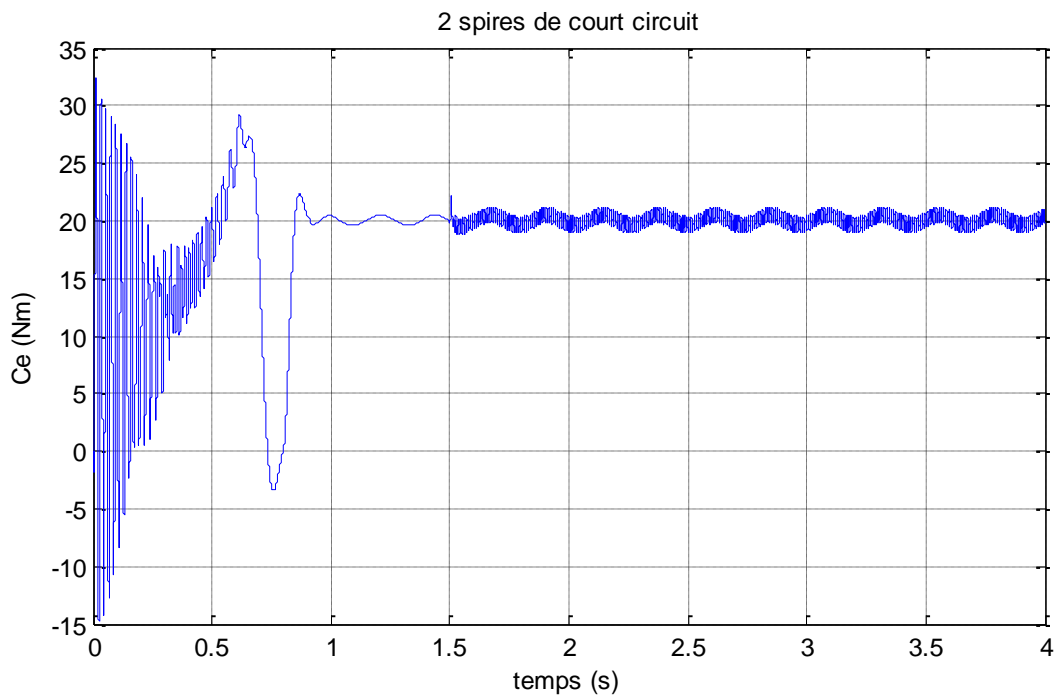


Fig. III.18 : couple électromagnétique pour un moteur chargé de 20 N.m avec défaut de court-circuit (2 spires en court-circuit)

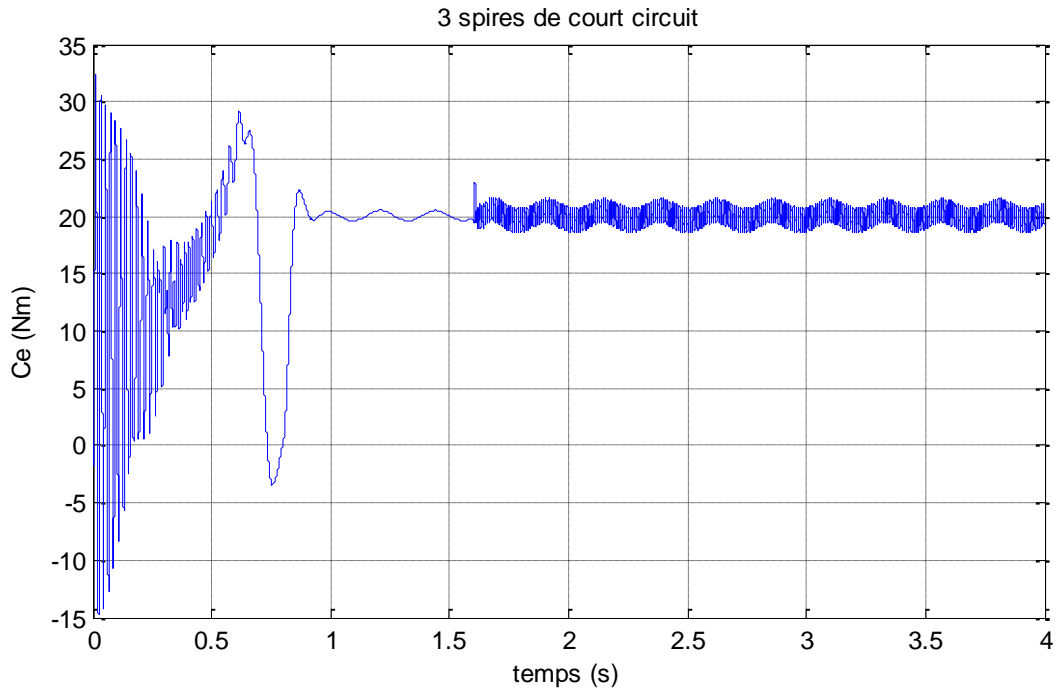


Fig. III.19 : couple électromagnétique pour un moteur chargé de 20 N.m avec défaut de court-circuit (3 spires en court-circuit)

III.2.1.2 La vitesse de rotation

Dans une machine asynchrone, la relation fondamentale de la dynamique impose [4]:

$$J \frac{d\Omega_r}{dt} = C_{e_{TOT}} - C_r = C_{e_{const}} + C_{e_{osc}} - C_r \quad (\text{III.2})$$

Où C_r représente le couple résistant (de charge). En admettant qu'en régime permanent, le couple résistant soit égal au couple $C_{e_{const}}$, nous obtenons pour l'équation de vitesse [4]:

$$J \frac{d\Omega_r}{dt} = C_{e_{osc}} \quad (\text{III.3})$$

Ce qui donne :

$$\Omega_r(t) = \frac{1}{J} \int C_{e_{osc}} dt + \Omega_{r0} \quad (\text{III.4})$$

$$\text{Avec : } \Omega_{r0} = \frac{(1-s)}{p} \omega_s,$$

L'expression de la vitesse angulaire du rotor :

$$\Omega_r(t) = \frac{(1-s)}{p} \omega_s + \frac{1}{J} \hat{C}_{e_{cc}} \sin(2\omega_s t - \varphi_{cc}) \quad (\text{III.5})$$

Ou sous une autre forme plus condensée :

$$\Omega_r(t) = \Omega_{r0} + \hat{A}_\Omega \cdot \sin(2\omega_s t - \varphi_{cc}) \quad (\text{III.6})$$

On constate que la vitesse est affectée par la composante oscillatoire du couple et présente également une composante oscillatoire de pulsation $2\omega_s$ en régime permanent [4].

Les figures III.20, III.21 et III.22, montrent respectivement la vitesse de rotation d'un moteur asynchrone triphasé chargé de 10 N.m avec un défaut de court-circuit d'une seule spire, 2 spires et 3 spires.

D'après les figures III.23 et III.24 on peut bien confirmer l'existence des ondulations dans la vitesse de rotation, les amplitudes de ces ondulation augmentent parallèlement avec l'augmentation de nombre de spires court-circuitées.

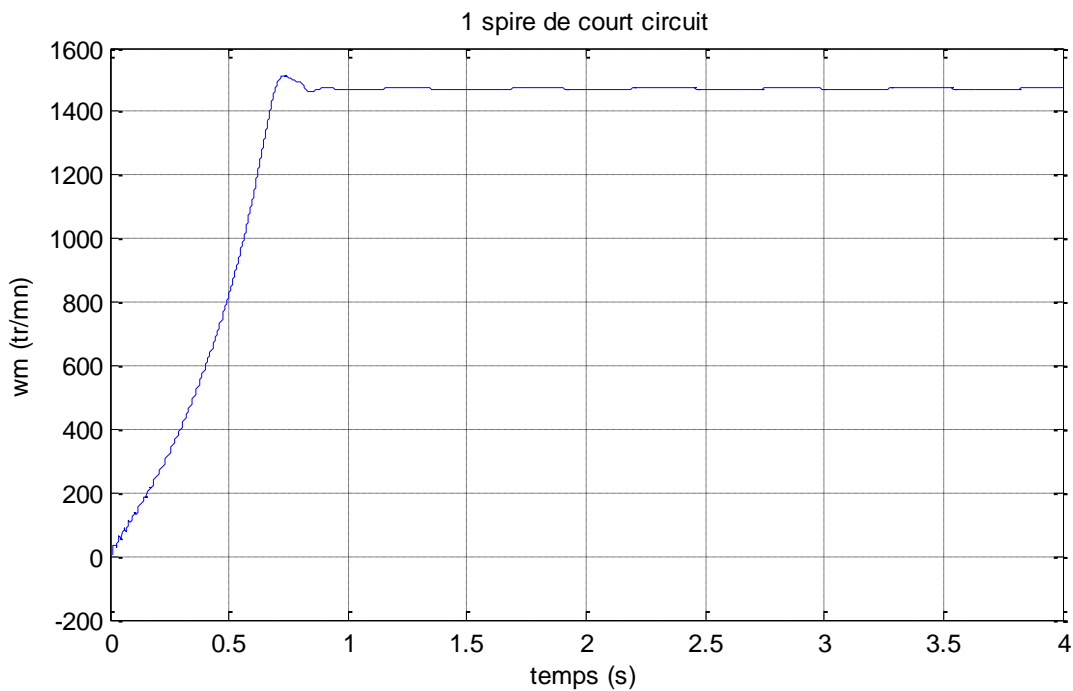


Fig. III.20 : vitesse de rotation pour un moteur chargé de 10 N.m avec défaut de court-circuit (1 spire en court-circuit)

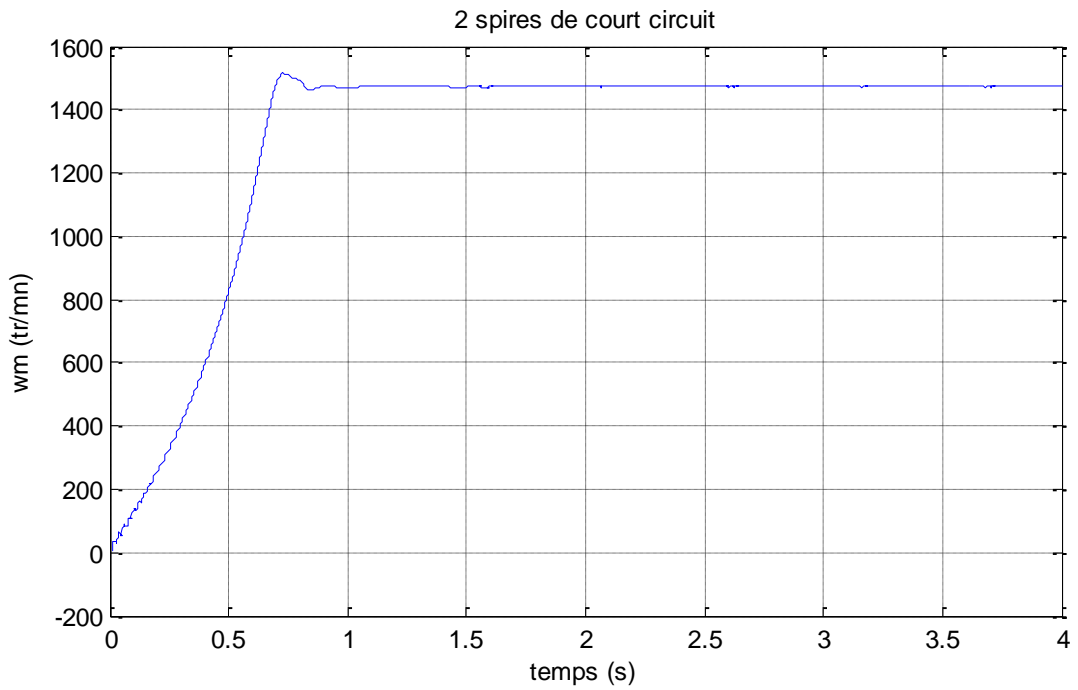


Fig. III.21 : vitesse de rotation pour un moteur chargé de 10 N.m avec défaut de court-circuit (2 spires en court-circuit)

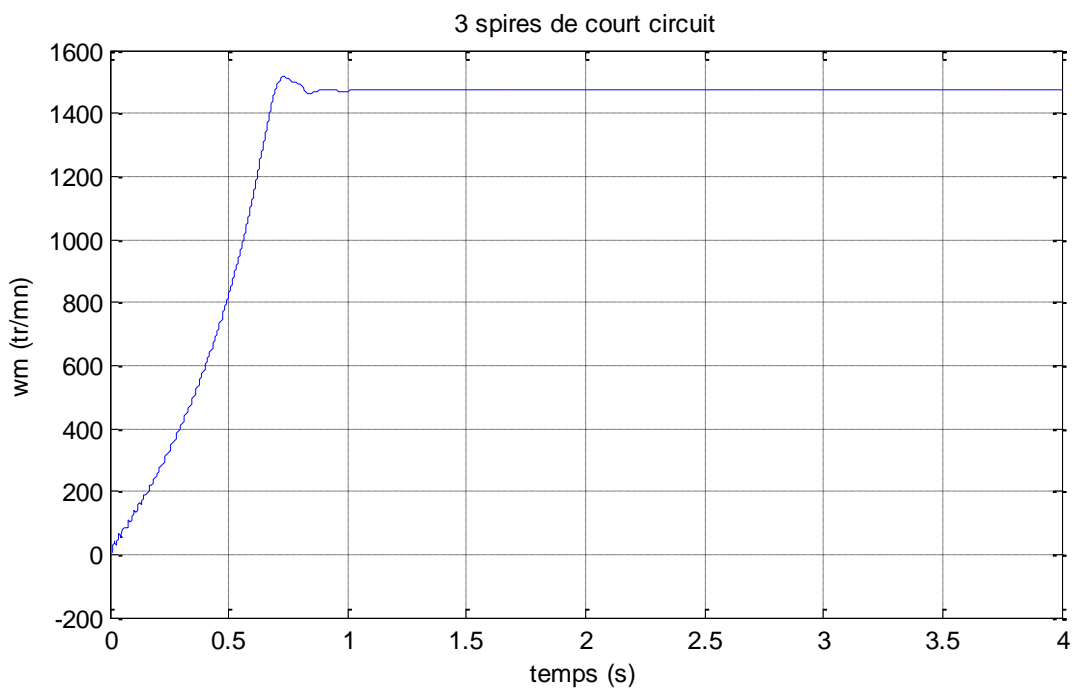


Fig. III.22 : vitesse de rotation pour un moteur chargé de 10 N.m avec défaut de court-circuit (3 spires en court-circuit)

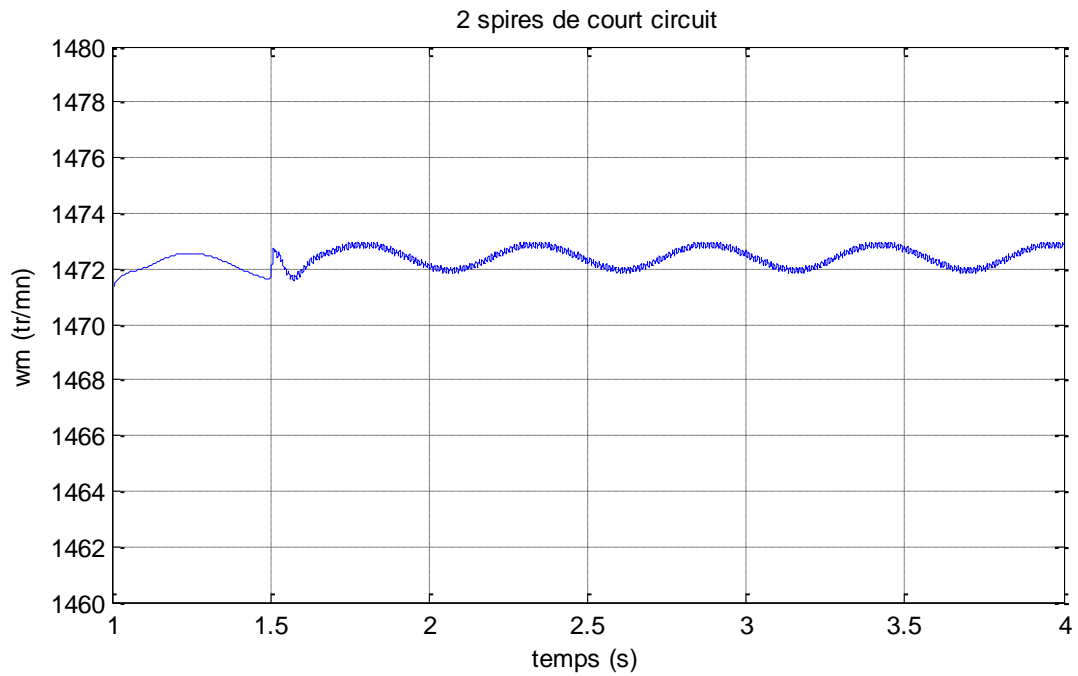


Fig. III.23 : ondulations de la vitesse de rotation pour un moteur chargé de 10 N.m avec défaut de court-circuit (2 spires en court-circuit)

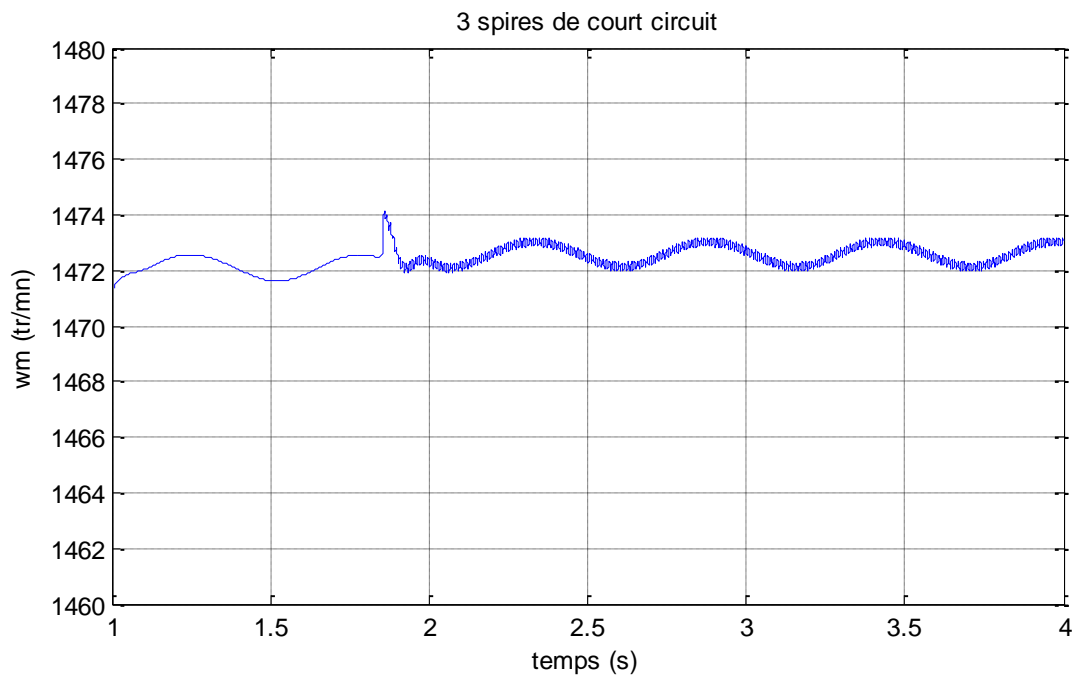


Fig. III.24 : ondulations de la vitesse de rotation pour un moteur chargé de 10 N.m avec défaut de court-circuit (3 spires en court-circuit)

Les figures III.25, III.26 et III.27, montrent respectivement la vitesse de rotation d'un moteur asynchrone triphasé chargé de 20 N.m avec un défaut de court-circuit d'une seule spire, 2 spires et 3 spires.

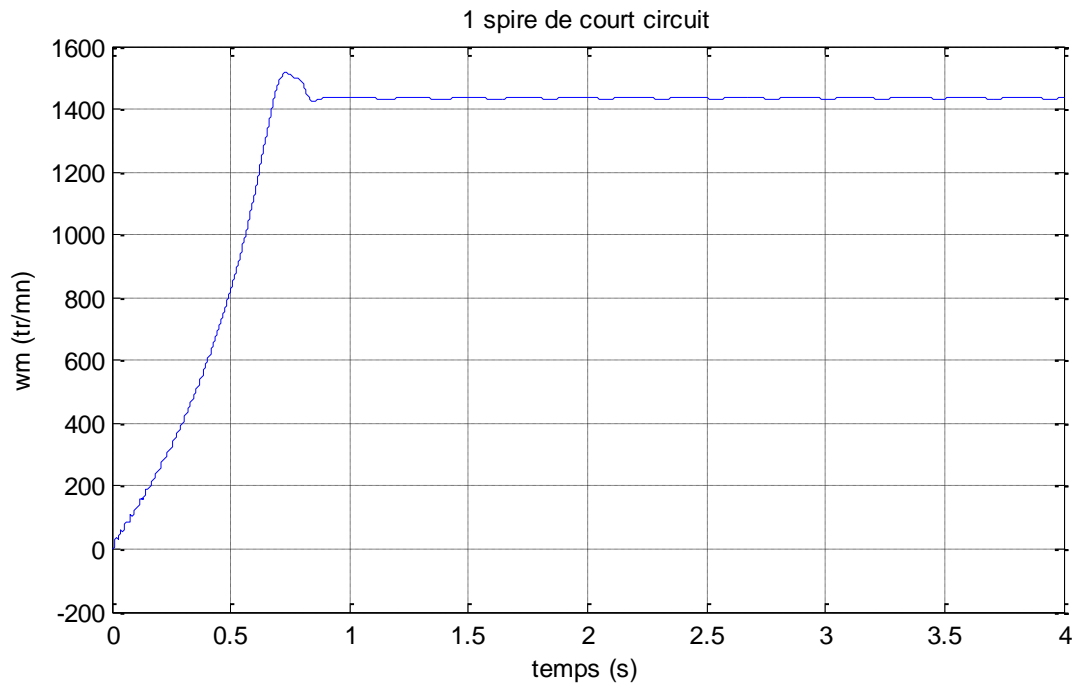


Fig. III.25 : vitesse de rotation pour un moteur chargé de 20 N.m avec défaut de court-circuit (1 spire en court-circuit)

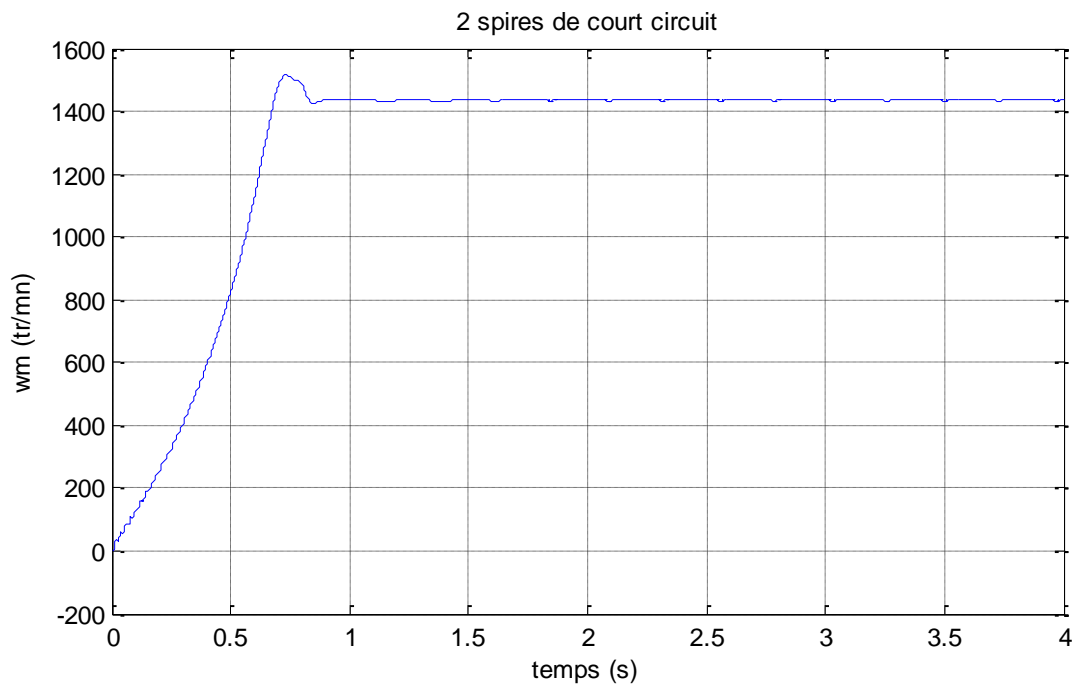


Fig. III.26 : vitesse de rotation pour un moteur chargé de 20 N.m avec défaut de court-circuit (2 spires en court-circuit)

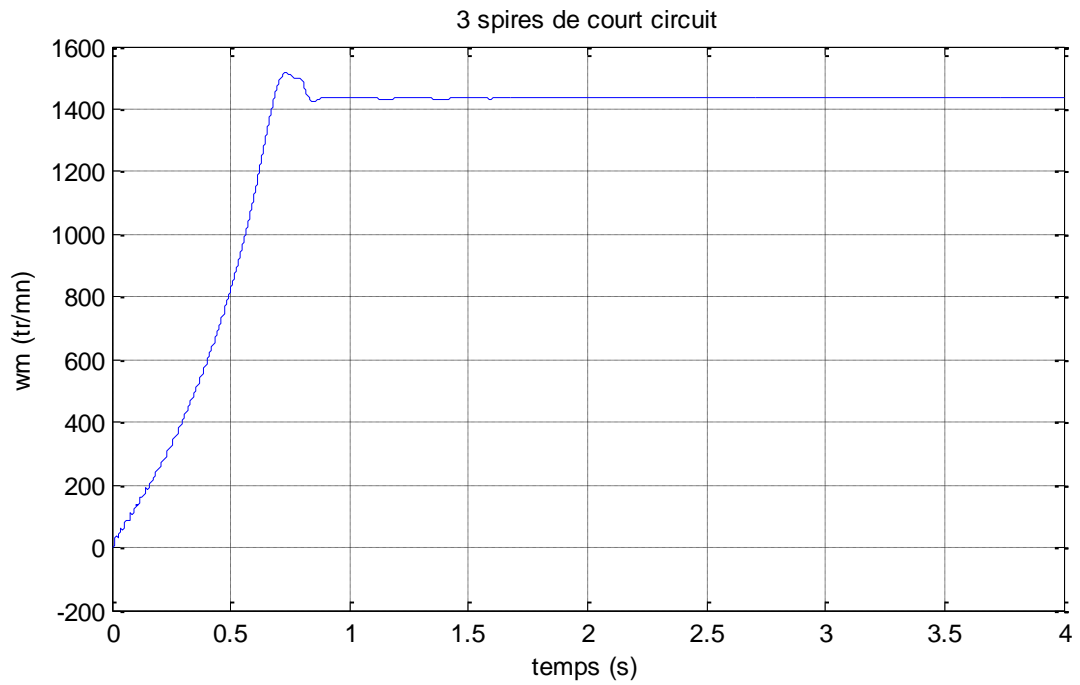


Fig. III.27 : vitesse de rotation pour un moteur chargé de 20 N.m avec défaut de court-circuit (3 spires en court-circuit)

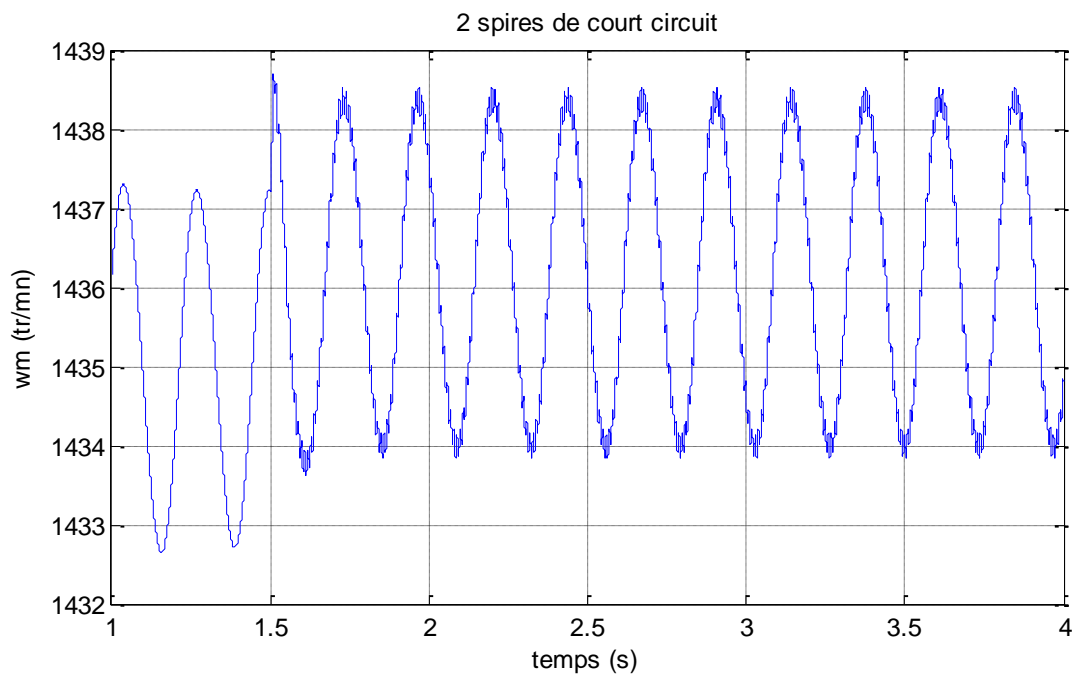


Fig. III.28 : ondulations de la vitesse de rotation pour un moteur chargé de 20 N.m avec défaut de court-circuit (2 spires en court-circuit)

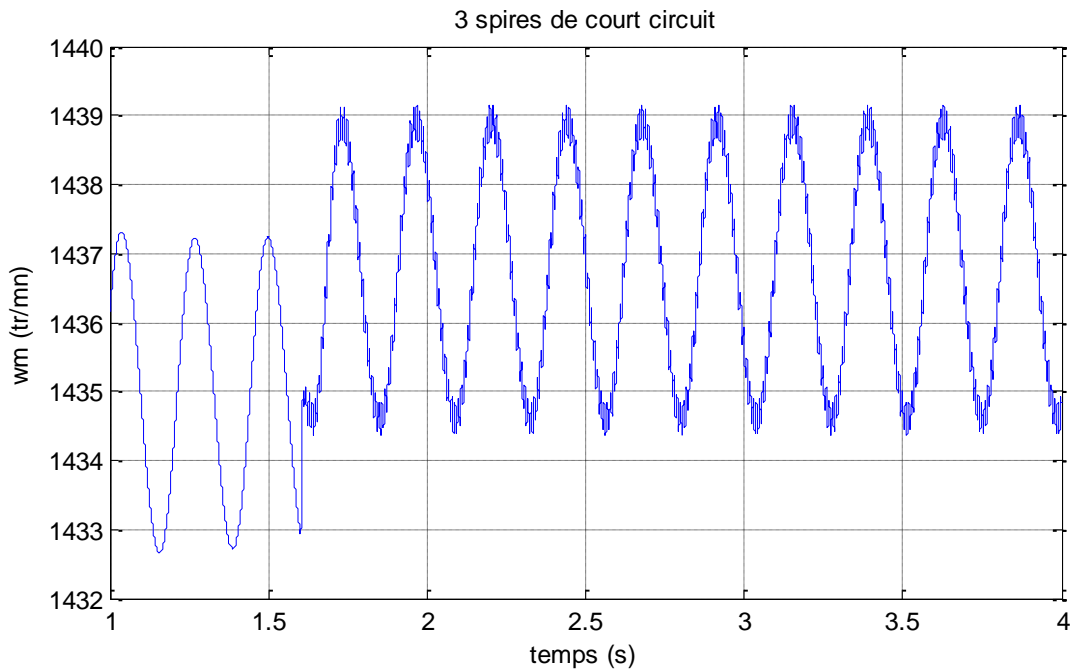


Fig. III.29 : ondulations de la vitesse de rotation pour un moteur chargé de 20 N.m avec défaut de court-circuit (3 spires en court-circuit)

Les figures III.28 et III.29 montrent les ondulations dans la vitesse de rotation pour un moteur chargé de 20 N.m et avec un défaut 2 spires en court-circuit puis 3 spires en court-circuit, les amplitudes de ces ondulation s'augmentent avec l'augmentation de nombre de spires court-circuitées et aussi avec l'augmentation de la charge.

III.3 CONCLUSION

Dans ce chapitre nous avons simulé le moteur asynchrone triphasé à cage en présence d'un défaut de court-circuit entre spires du bobinage statorique, pour différent degré de défaut et ainsi pour différentes charges en gardant toujours comme objectif ; la détection précoce de défaut.

Comme déjà prévu, on a détecté des perturbations au niveau des valeurs des courants statoriques, la gravité de ces perturbation est liée fortement à la fois à la sévérité du défaut et à la valeur de la charge utilisée.

Cette étude nous a permis de détecter des oscillations au niveau de couple électromagnétique et la vitesse de rotation, l'amplitude de ces oscillations augmente avec l'augmentation du nombre de spires court-circuitées et ainsi avec l'augmentation de la charge couplée.

CONCLUSION

GÉNÉRALE

CONCLUSION GÉNÉRALE

Le travail qui a été présenté dans ce mémoire s'inscrit dans le cadre du diagnostic des défauts statoriques dans les moteurs asynchrones triphasés à cage d'écureuil. Le défaut de court circuit entre spire dans le stator a été spécifiquement l'objet de notre étude.

Au début de ce travail, nous avons rappelé les différents défauts qui peuvent affectés le bon fonctionnement de la machine asynchrone, ainsi que les méthodes du diagnostic et les approches utilisés pour la modélisation sont aussi présentés.

Afin de représenter le comportement de la machine lors d'un fonctionnement normal (sans défaut) et dégradé (avec défaut), nous avons développé un modèle mathématique multi-enroulements pour la cage rotorique. Ensuite, nous avons construit un programme de simulation à l'aide du MATLAB. Ceci, nous a permis de visualiser le courant statorique, le couple, la vitesse, pendant les différentes conditions de fonctionnement de la machine (sans ou avec défaut).

Cette étude nous a permis de détecter des oscillations au niveau de couple électromagnétique et la vitesse de rotation, l'amplitude de ces oscillations augmente avec l'augmentation du nombre de spires court-circuitées et ainsi avec l'augmentation de la charge couplée.

En plus on a simulé le défaut de court-circuit à l'état précoce ; court-circuit entre une seule spire, court-circuit entre 2 spires et court-circuit entre 3 spires, on peut constater que le modèle utilisé est très sensible et très efficace pour la détection de ce défaut, la tâche de diagnostic est successivement réalisée.

RÉFÉRENCES

RÉFÉRENCES

- [1] B. Vaseghi, "*Contribution à l'Étude des Machines Électriques en Présence de Défaut Entre-Spires Modélisation-Réduction du Courant de Défaut*", Thèse de Doctorat, Université de Nancy, France, 2009.
- [2] N. Halem, "*Étude et Simulation du Modèle Multi-Enroulements de la Machine Asynchrone*", Mémoire d'Ingénieur, Université de Biskra, Algérie, Juin 2007.
- [3] M. Khov, "*Surveillance et Diagnostic des Machines Synchrones à Aimants Permanents : Détection des Courts-Circuits par Suivi Paramétrique*", Thèse de Doctorat, Université de Toulouse, France, 2009.
- [4] M. Sahraoui, "*Étude Comparative des Méthodes de Diagnostic des Machines Asynchrones*", Thèse de Doctorat, Université de Biskra, Algérie, 2010.
- [5] N. Halem, "*Modélisation des Machines Asynchrones Triphasées à Cage en Vue du Diagnostic par la Méthode des Éléments Finis*", Thèse de Doctorat, Université de Biskra, Algérie, 2015.
- [6] A. Ibrahim, "*Contribution au Diagnostic de Machines Électromécaniques : Exploitation des Signaux Électriques et de la Vitesse Instantanée*", Thèse de Doctorat, Université de Saint Etienne, France, 2009.
- [7] 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, N°5, PP. 1186-1196, September 1995.
- [8] Allianz, "*Présentation des Avaries. Machines Électriques Tournantes*", Cahier des préventions, CP2, 1988.
- [9] A. Abed, "*Contribution à l'Étude et au Diagnostic de la Machine Asynchrone*", Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy-1, France, Mars 2002.
- [10] M. Sahraoui, "*Contribution au Diagnostic d'une Machine Asynchrone Triphasée à Cage*", Mémoire de Magistère, Université de Biskra, Algérie, 2003.
- [11] M. Chekima, " Simulation du Fonctionnement du Moteur Asynchrone avec Asymétrie Rotorique "

Annexe 1 : Paramètres du moteur utilisé

$u_0 = 4 \cdot \pi \cdot 1e-7;$
 $N_s = 200;$
 $N_r = 28;$
 $r_s = 3\Omega$
 $L_{sf} = 9.74 \cdot 1e-3 \text{mH};$
 $R_b = 1 \cdot 6.45 \cdot 1e-5 \mu\Omega ;$
 $R_{an} = 2.78 \cdot 1e-5 \mu\Omega$
 $R_e = R_{an};$
 $L_b = 6.854 \cdot 1e-7 \mu \text{H};$
 $L_e = 1 \cdot L_b \mu \text{H};$
 $R = 0.04496\Omega;$
 $L = 0.1325 \text{mm};$
 $g = 0.0587 \text{Nm};$
 $k_0 = 3.746 \cdot 1e-4 \text{Nms};$
 $J = 0.00684 \text{Nms}^2;$
 $P = 2;$
 $F = 50 \text{Hz};$
 $T_e = 1e-5;$
 $e = 0.000327 \text{m};$