

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
UNIVERSITE MOULOUD MAMMERRI DE TIZI-OUZOU



FACULTE DUGENIE ELECTRIQUE ET D'INFORMATIQUE
DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE

Mémoire de Fin d'Etudes de MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Génie Electrique

Spécialité : Machines électriques

Présenté par

SEDDIK KAHINA

IBERSIENE FADILA

Thème

Modélisation de la machine asynchrone pentaphasée en régime dégradé

Mémoire soutenu publiquement le : 17/09/2017 Devant le jury composé de :

M^r : Slimane REZGUI

Maitre-Assistant Classe A, UMMTO, Président

M^r : Arezki DICHE

Maitre-Assistant Classe A, UMMTO, rapporteur

M^r : Kaci GHEDAMSI

Professeur Univ. de Béjaïa Rapporteur

M^r : Farid NAMANI

Maitre-Assistant Classe A, UMMTO, Examineur

M^{me} : Ferroudja BOUALI-DJADEL

Maitre-Assistant Classe A, UMMTO, Examinatrice

Remerciements

Au terme de ce travail :

Nous tenons, en premier lieu à remercier le bon dieu pour le courage, la volonté et la patience qu'il nous a donné afin de mener ce travail à terme.

*Nos vifs remerciements à notre promoteur Monsieur **DICHE Arezki**, pour l'appui scientifique et pour sa disponibilité le long de notre travail, nous lui sommes infiniment reconnaissantes de la bienveillance dont il a fait preuve à notre égard, de ses encouragements incessants et de la confiance dont il nous a témoigné.*

*Nous remercions aussi Monsieur **Kaci GHEDAMSI**, professeur à université A. Mira de Bejaïa.*

Nous remercions vivement les membres de jury pour l'intérêt qu'ils ont manifesté, en acceptant de juger notre humble travail, et de l'enrichir par leurs propositions.

Nous remercions également à nos enseignants qui ont contribué à notre formation pendant tout le cursus universitaire.

Enfin, un grand merci à nos familles et tous nos amis, plus particulièrement à nos parents, pour nous avoir soutenus et aidés tout au long de nos études.



DEDICACES :

Je dédie ce modeste mémoire à :

Ma mère, qui a œuvré pour ma réussite, de par son amour, son soutien, tous les sacrifices consentis et ses précieux conseils, pour toute son assistance et sa présence dans ma vie, reçois à travers ce travail aussi modeste soit-il, l'expression de mes sentiments et de mon éternelle reconnaissance ;

Mon père, qui peut être fier et trouver ici le résultat de longues années de sacrifices et de privations pour m'aider à avancer dans la vie. Puisse Dieu faire en sorte que ce travail porte son fruit, merci beaucoup pour les valeurs nobles, l'éducation et le soutien permanent venu de toi mon cher papa ;

Mes frères Yacine et Mustapha, mes sœurs Fatiha, Zohra, Samia et Nadjate qui n'ont cessé d'être pour moi des exemples de persévérance, de réussite, de courage et de générosité ;

La mémoire de mes grands-parents décédés Mohammed, Saïd et Tassadit, que Dieu ait leurs âmes ;

Ma grand-mère Reziqa, mes beaux-frères Hacène, Ali et Arezki, mes nièces Cerine et Anaïs, que Dieu les bénisse ;

Mon promoteur, Monsieur DICHE Arezki, qui doit avoir dans ce travail la fierté d'un savoir bien acquis ;

Tous ceux qui m'ont toujours aidé et encouragé, qui sont toujours à mes côtés, et qui m'ont accompagné durant mes études supérieures, mes aimables amis et collègues d'étude, les familles SEDDIK et IBERSIENE.

Kahina SEDDIK,





A la femme la plus courageuse, sensible, généreuse, la plus belle à mes yeux, à celle qui a su me donner amour et joie de vivre, à celle qui a toujours montrée affection et compréhension à mon égard, ma mère que j'aime.

A l'homme de courage et de force à celui qui a toujours été présent, qui m'a appris les vraies valeurs de la vie à celui qui m'a soutenu en toutes circonstances, mon père que j'aime.

A ceux qui m'ont donné joie et bonheur, amour, mes frères : Hakim, Hamid, Halim, Hafid, Hocine, et ma sœur Fetta et son mari Samir et leurs adorables filles Sarah et Yanel.

A la mémoire de celui qui est parti très tôt, que je n'oublierai jamais, qu'il repose en paix et dieu l'accueille dans son vaste paradis mon frère HANDE.

A mon promoteur Monsieur DICHE Arezki.

A ceux que j'ai eu la chance de connaître, dans les meilleurs et pires moments de ma vie, à mes amis les plus fidèles et à mon binôme Kahina

A tous ceux que j'aime, à tous ceux qui m'aiment, à toute les familles IBERSIENE et SEDDIK je dédie ce modeste travail.

IBERSIENEfadila



SOMMAIRE

Introduction générale	1
Chapitre I : Généralités sur les machines asynchrones polyphasées	
I.1 Introduction.....	3
I.2. Définition du moteur asynchrone.....	3
I.2 .1. Symboles du moteur asynchrone.....	3
I.3. Principe de fonctionnement d'une machine asynchrone.....	4
I.3.1. Le glissement.....	4
I.3.2. La fréquence rotorique.....	4
I.4. Eléments constituant la machine asynchrone.....	5
I.4.1. Le stator.....	5
I.4.2. Le rotor.....	6
I.4.2.1. Le rotor à cage.....	6
I.4.2.2. Le rotor bobiné.....	7
I.5. Caractéristiques des machines multiphasées.....	8
I.5.1. Les machines polyphasées de « Type 1 ».....	8
I.5.2. Machines multiphasées de « Type 2 ».....	9
I.6. Applications des machines Multiphasées.....	10
I.7. Avantages des Machines Multiphasées.....	10
I.7.1. Segmentation de puissance.....	11
I.7.2. Fiabilité.....	11
I.7.3. Minimisation des ondulations du couple et des pertes rotoriques.....	11
I.8. Inconvénients des machines multiphasées.....	11
I.9. Conclusion.....	12

Chapitre II : Modélisation de la machine asynchrone pentaphasée en régime sain	
II.1 Introduction.....	13
II.2. Modèle de la machine asynchrone à cage en régime sain.....	13
II.3. Hypothèses simplificatrices du moteur à cage.....	13
II.4. Principe de fonctionnement du moteur à cage.....	14
II.4.1 Structure du stator.....	14
II.4.2 Structure du rotor.....	15
II.5. Mise en équations.....	16
II.5.1. Equations différentielles associées au stator.....	16
II.5.2. Equations différentielles associées au rotor.....	17
II.5.3. Equations d'état.....	19
II.6. Calcul des inductances et des mutuelles.....	20
II.6.1. Inductances statoriques.....	20
II.6.2. Inductances rotoriques.....	21
II.6.3. Inductances stator-rotor.....	22
II.7. Fonctionnement en régime sain.....	23
II.8. Conclusion.....	25
Chapitre III : Modélisation de la machine asynchrone pentaphasée à cage en régime des défauts	
III.1. Introduction.....	26
III.2. Etude des différents défauts affectant le moteur asynchrone.....	26
III.2.1. Causes et conséquences des défauts.....	26
III.2.1.1. Les contraintes électriques.....	26
III.2.1.2. Les contraintes dynamiques.....	26
III.2.1.3. Les contraintes magnétiques.....	26

III.2.1.4. Les contraintes d'environnement.....	26
III.2.1.5. Les contraintes mécaniques.....	26
III.2.1.6. Les contraintes thermiques.....	27
III.2.1.7. Les contraintes de démarrage.....	27
III.2.2. Les défauts statoriques.....	27
III.2.3. Défauts rotoriques.....	29
III.2.3.1. Défauts de rupture de barres et de segments cassés.....	29
III.2.3.2. Défauts de roulements.....	31
III.2.3.3. Défauts d'excentricité.....	33
III.2.3.4. Défauts de rupture de portions d'anneaux.....	34
III.3. Fonctionnement en régime dégradé.....	34
III.3.1. Ouverture d'une phase.....	34
III.3.2. Ouverture de deux phases adjacentes.....	37
III.3.3. Ouverture de deux phases non adjacentes.....	39
III.4. Interprétation des résultats.....	41
III.5. Conclusion.....	42
Conclusion générale	
Annexe	
Références bibliographiques	

Introduction générale

Les machines électriques sont l'élément le plus important dans l'industrie à savoir : la production et les entraînements électriques. La machine asynchrone triphasée est la plus simple à fabriquer, la moins coûteuse et la moins exigeante en termes d'entretien, elle présente un taux de défaillance très faible, elle est fabriquée en grande quantité et dans une très grande échelle des puissances.

Depuis la fin des années 1920, les machines à deux enroulements triphasés au stator avaient été introduites pour accroître la puissance des alternateurs synchrones de très forte puissance. Les machines multiphasées ont par la suite fait un intérêt important, en particulier la machine asynchrone pentaphasée, qui présente plusieurs avantages. En effet, les variateurs multiphasés présentent plusieurs avantages par rapport aux machines conventionnelles triphasées, tels que : segmentation de puissance, minimisation des ondulations du couple et des pertes rotoriques, réduction des courants harmoniques, grande fiabilité et forte puissance.

Certaines utilisations des moteurs asynchrones ne tolèrent pas les pannes intempestives. Ces pannes peuvent être dues aux moteurs et être d'origine mécanique (excentricité du rotor) ou électrique (court-circuit du bobinage statorique, rupture de barre ou l'anneau, cassure de dents...).

Depuis longtemps déjà, la rupture des barres dans les moteurs à fait l'objet de nombreux travaux. Les machines asynchrones sont largement utilisées en milieu industriel, assurer leur continuité de fonctionnement, 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.

Il existe plusieurs procédures de diagnostic. Le choix d'une approche est lié à la connaissance que l'on souhaite acquérir sur le système, mais aussi à la complexité de ce système. Ainsi deux grandes familles de procédure sont utilisées dans le domaine du diagnostic: les méthodes de diagnostic à base de modèles analytiques et les méthodes sans modèle. [5]

Les méthodes à base de modèle analytique reposent sur le suivi des paramètres et des grandeurs de la machine, au moyen d'algorithmes d'observation. Elles détectent les défaillances en comparant l'évolution de l'écart entre le modèle et le processus réel.

Les méthodes sans modèle sont basées sur l'extraction d'informations par le biais du traitement des signaux mesurés. Les signaux mesurables (les courants, les tensions, la tension du neutre, la vitesse, les vibrations, la puissance instantanée), peuvent fournir des informations significatives sur les défauts. [25]

Introduction générale

L'objectif principal de notre travail est l'élaboration de modèles de simulation de la machine asynchrone pentaphasée à cage d'écureuil, cela en régime sain et en présence de défauts, en utilisant la méthode des Circuits Electriques Magnétiquement Couplés (**CEMC**). Cette dernière est basée sur la représentation des bobinages de la machine par des circuits électriques distribués sans utiliser aucune transformation. [15] Ce type d'approche offre un modèle de machine flexible, un temps de calcul raisonnable et ne nécessite aucun recours au calcul de champs. Le modèle de la machine est programmé et simulé sous logiciel **MATLAB**.

Le présent mémoire est structuré de la manière suivante :

Le premier chapitre sera consacré à quelques généralités concernant les machines multiphasées, nous présenterons en premier temps la machine asynchrone : définition, principe de fonctionnement, constitution et différents types. Ainsi que les avantages et les inconvénients.

L'objectif du deuxième chapitre sera consacré à la formulation mathématique et la modélisation de la machine asynchrone pentaphasée à cage d'écureuil en absence de défauts en utilisant la méthode des Circuits Electriques Magnétiquement Couplés.

Dans un troisième chapitre, nous allons faire la modélisation et la simulation de la machine asynchrone à cage d'écureuil en régime dégradé, nous abordons la présence des défauts statoriques et rotoriques, et faire une interprétation aux résultats de la simulation sur **MATLAB**.

Nous terminons notre modeste travail par une conclusion générale et nous proposons des perspectives du travail.

I.1. Introduction

Les machines électriques tournantes occupent une place prépondérante dans tous les secteurs industriels. Les machines asynchrones triphasées à cage d'écureuil sont les plus fréquemment utilisées grâce à leur robustesse, leur simplicité de construction et leur bas coût, mais on s'intéresse depuis longtemps aux machines ayant plus de trois phases. Ces machines portent plusieurs appellations (machines à grand nombre de phases) ou (machines polyphasées). Ces machines sont présentes dans les domaines de grandes puissances tels que la marine, l'avionique ou encore l'automobile [1].

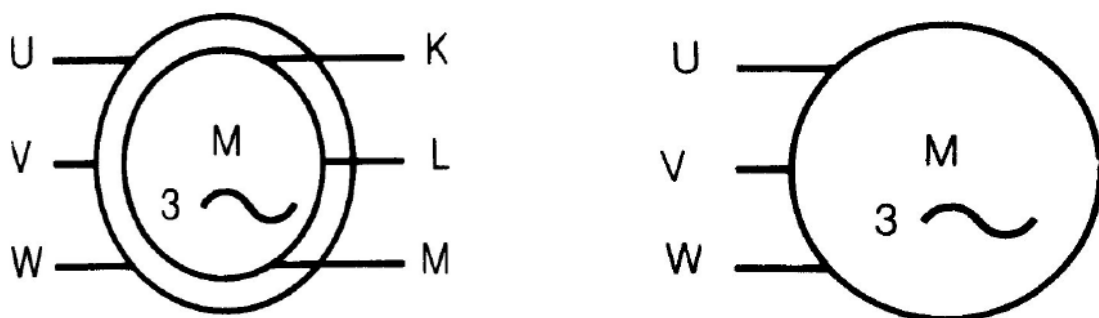
Pour caractériser, commander, surveiller et diagnostiquer une machine asynchrone, l'élaboration d'un modèle mathématique et son identification s'avèrent indispensables. Le premier chapitre a pour objectif de revenir rapidement sur la constitution des machines asynchrones, il apportera plus d'information sur les machines asynchrones polyphasées, afin de mieux comprendre leur fonctionnement.

I.2 Définition du moteur asynchrone

La machine asynchrone est une machine à courant alternatif, la vitesse du rotor et la vitesse du champ magnétique tournant ne sont pas égales à cause du glissement. Le rotor est toujours en retard par rapport au champ statorique, la machine asynchrone est dite (machine à induction) car l'énergie est transférée du stator au rotor ou inversement par induction électromagnétique [2].

I.2.1 Symboles du moteur asynchrone

Voici les différents symboles employés pour représenter le moteur asynchrone :



(a) symbole du moteur asynchrone à rotor bobiné

(b) symbole du moteur asynchrone à cage d'écureuil

FIG.I.1 Les différents symboles du moteur asynchrone

I.3 Principe de fonctionnement d'une machine asynchrone

Lors de l'alimentation des phases statoriques, les courants créent un champ magnétique tournant dans l'entrefer. La fréquence de rotation de ce champ est imposée par la fréquence de ces courants, c'est-à-dire que sa vitesse de rotation est proportionnelle à la fréquence de l'alimentation électrique. La vitesse du champ tournant est appelée «vitesse de synchronisme». L'enroulement au rotor est donc, soumis à des variations de flux. Par conséquent, une force électromotrice induite apparaît aux bornes de l'enroulement rotorique qui crée des courants rotoriques. Ces courants sont responsables de l'apparition d'un couple qui tend à mettre le rotor en mouvement afin de s'opposer à la variation de flux. Le rotor se met donc à tourner pour tenter de suivre le champ statorique à une vitesse de rotation N_r inférieur à celle de synchronisme N_s [3].

Cette différence de vitesse de rotation du rotor par rapport à celle du champ tournant, nous ramène à définir un paramètre qui caractérise la machine asynchrone, qu'on appelle « Le glissement »

I.3.1. Le glissement

Le glissement qu'on note « g » est une grandeur qui rend compte de l'écart de vitesse de rotation d'une machine asynchrone par rapport à une machine synchrone construite avec le même stator. Il est exprimé en pourcentage, il est défini par la relation ci-dessous :

$$g = \frac{(ns - nr)}{ns} = \frac{\Omega_s - \Omega_r}{\Omega_s} \quad \text{I.1}$$

avec :

ns : vitesse de rotation de synchronisme (tr/mn)

nr : vitesse de rotation du rotor (tr/mn)

Ω_r : vitesse angulaire réelle de la machine (rd/s)

Ω_s : vitesse de synchronisme (rd/s)

I.3.2. La fréquence rotorique

Si le rotor tourne à la vitesse Ω , il est balayé par le flux entraîné à la vitesse $\Omega_s - \Omega$, donc les F.é.m. et les courants induits ont pour pulsation :

$$f_r = g \cdot f_s \quad \text{I.2}$$

Soit :

$$\omega_r = g \cdot \omega_s$$

I.4. Eléments constituant la machine asynchrone

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 deux parties distinctes:

- Le stator, partie fixe de la machine où est connectée l'alimentation électrique.
- Le rotor et les roulements, partie tournante qui permet de mettre en rotation la charge mécanique. [4]

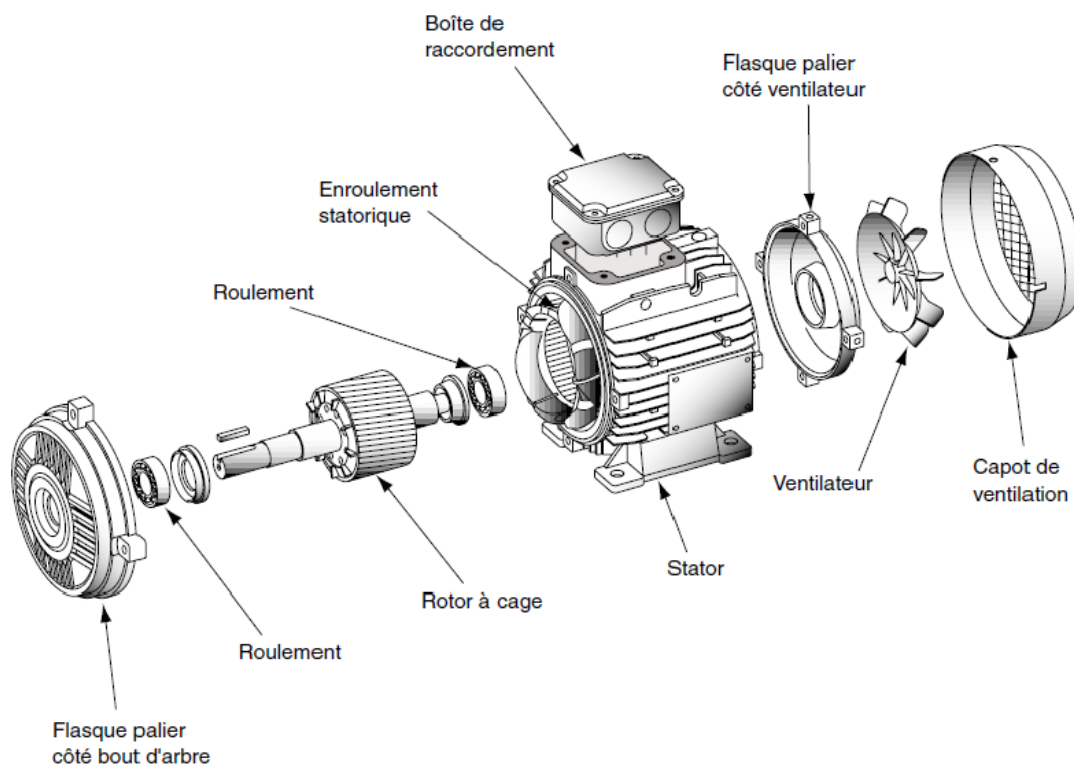


FIG I.2 Moteur asynchrone à cage d'écureuil

I.4.1. 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 importante, 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, ondulés 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. La figure I.2 représente la constitution du stator d'une machine asynchrone. [5]

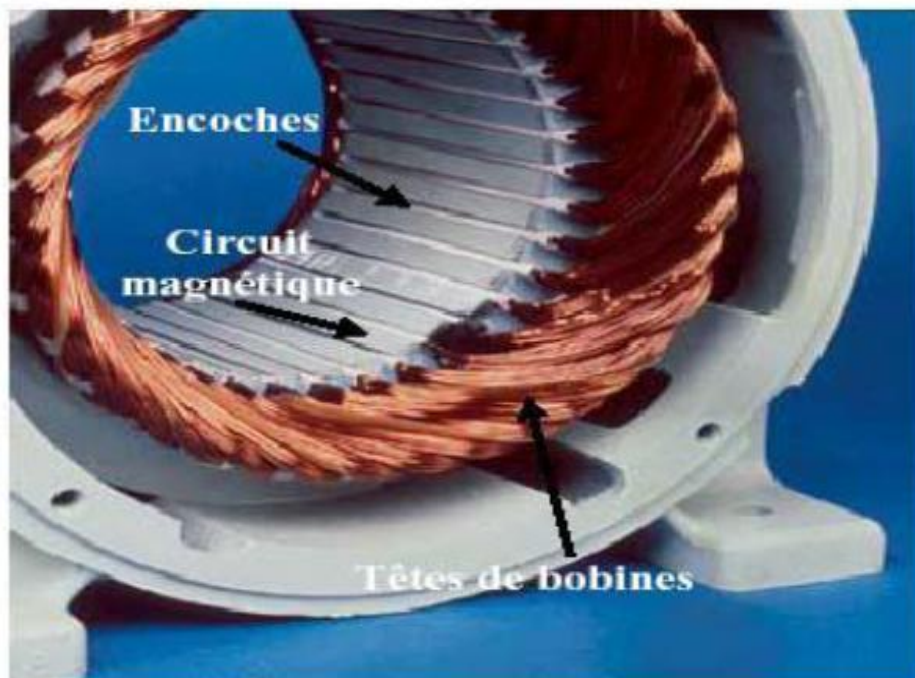


FIG.I.3 Stator d'une machine asynchrone

I.4.2. le Rotor

C'est l'élément mobile du moteur. Se compose d'un cylindre fait de tôles empilées. Des encoches sont percées à la périphérie extérieure destinées à recevoir des conducteurs.

Il est séparé du stator par un entrefer très court. On trouve deux types de rotor : bobiné ou à cage d'écureuil.

I.4.2.1. Le rotor à cage

Dans le rotor à cage, les anneaux de court-circuit permettent la circulation des courants d'un conducteur d'encoche (barres rotoriques) à l'autre. Ces barres conductrices sont

régulièrement réparties, et constituent le circuit du rotor (figure.I.3). 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. Dans le cas de rotors à cage d'écureuil, 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 [6], [7].

Le moteur à cage d'écureuil 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.

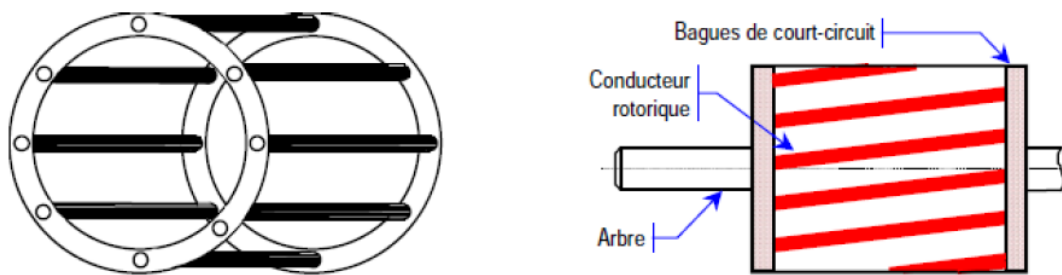


FIG.I.4 Rotor à cage (tôles magnétiques), conductrices d'encoches (barres) et anneaux (bagues de court-circuit).

I.4.2.2. Le rotor bobiné

Le rotor d'une machine bobiné est constitué de trois bobines (on parle aussi de rotor à bague). Chaque bobine est reliée à une bague. Les bagues permettent d'avoir une liaison électrique avec les bobines du rotor.

Le rotor est mis en court-circuit par l'extérieur au travers de trois bornes liées électriquement par des contacts glissants appelés bagues réalisées en laiton sur lesquelles s'appliquent des balais de graphite. Les trois enroulements rotoriques sont couplés en étoile à l'intérieur de la machine. [8]

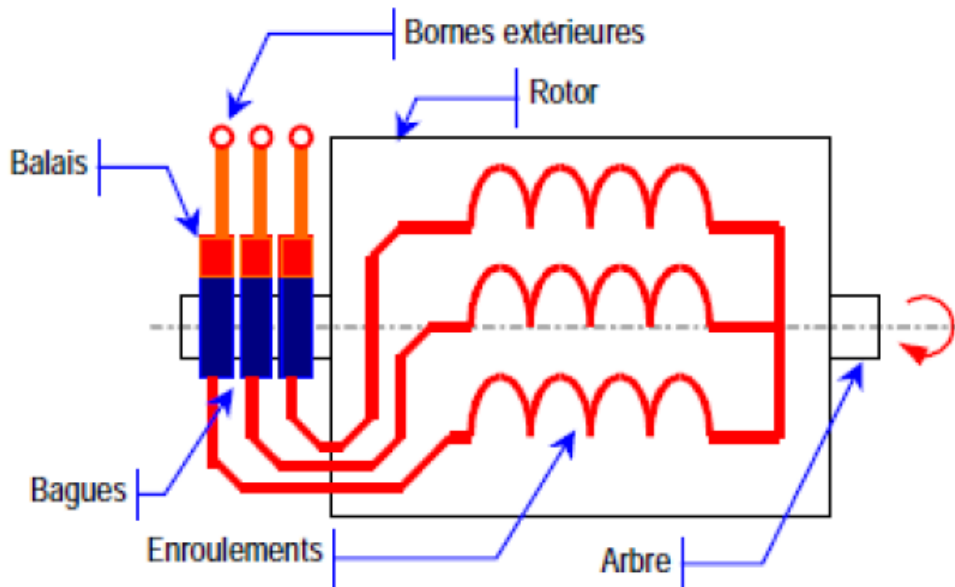


FIG.I.5 Constitution du rotor bobiné.

I.5. Caractéristiques des machines multiphasées

On distingue habituellement deux types de machines multiphasées, suivant le nombre de phases statoriques qui est ou non un multiple de trois [9][10]. On peut ainsi les classer en deux groupes, que l'on nommera « machines multiphasées de type I » et « machines multiphasées de type II ». De plus, on considère rarement les cas où le nombre de phases est un nombre pair, sauf si celui-ci est un multiple de trois.

I.5.1. Les machines polyphasées de « Type 1 »

Si le nombre de phase n est multiple de trois, la configuration est généralement réalisée différemment, où la machine est représentée comme plusieurs groupes d'enroulements triphasés, communément intitulés multi-étoiles. Dans ce cas l'angle de déphasage entre chaque groupe triphasé est généralement de $\beta = \pi/n$, ce qui crée une configuration asymétrique. Généralement, les neutres de chacun de ces groupes sont isolés [11]. Bien que ce soit peu utilisé, il est également possible avec l'approche multi-étoiles d'effectuer une distribution symétrique des enroulements, avec $\alpha = 2\pi/n$. Le tableau (I.1) donne des détails sur quelques exemples de machines multi-étoiles [12].

Nombre de phases (q)	Nombre équivalent de phases (q_α)	Décalage angulaire (α)	Représentation schématique, position des bobines
3	3	$\pi/3$	
6	3	$\pi/3$	
6	6	$\pi/6$	
9	9	$\pi/9$	
18	9	$\pi/9$	

Tableau I.1 Machines multiphasées dont le nombre de phases statoriques est un multiple de trois (machines multiphasées de type 1) [12]

I.5.2. Machines multiphasées de « Type 2 » :

Si le nombre de phase n est un nombre non multiple de trois, l'angle de déplacement entre chaque phase du stator doit rester symétrique afin de conserver une distribution de flux uniforme .Ceci représente un angle de $\alpha = 2\pi/n$.Comme exemple, on peut citer les machines pentaphasée, heptaphasé, ... Le tableau (I.2) présente quelques exemples de machines multiphasées de type 2.

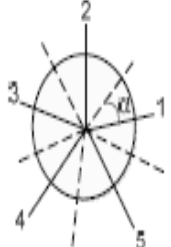


Nombre de phases (q)	Nombre équivalent de phases (q_α)	Décalage angulaire (α)	Représentation schématique, position des bobines
5	5	$\pi/5$	
7	7	$\pi/7$	
9	9	$\pi/9$	

Tableau I.2 Machines multiphasées dont le nombre de phases statoriques est un nombre impair (machines multiphasées de type 2) [12]

I.5. Applications des Machines Multiphasées

Les machines multiphasées sont utilisées beaucoup plus dans les applications de puissances élevées. Parmi ces applications on cite les pompes, les ventilateurs, les compresseurs, les moulins des compresseurs, les moulins du ciment, etc. [13]

Une autre application concerne l'utilisation des machines multiphasées dans les systèmes de production de l'énergie éolienne : la machine double étoile génère de l'énergie à travers deux systèmes triphasés connectés à un transformateur pour adapter les tensions des six phases aux tensions des réseaux.

I.6. Avantages des Machines Multiphasées

Les machines polyphasées sont plus avantageuses que les machines conventionnelles. Parmi ces avantages, on peut citer :

I.6.1. Segmentation de puissance

Par l'augmentation du nombre de phases, la puissance est automatiquement augmentée. L'une des solutions pour réduire les courants de phases sans réduire les tensions d'alimentations, est d'augmenter le nombre de phases statoriques. La puissance totale demandée par une machine est alors réduite dans chaque phase. Avec cette puissance, on peut alimenter la machine par un onduleur dont les composants semi-conducteurs de calibre inférieur peuvent fonctionner à des fréquences de commutation plus élevées. Cela permet de minimiser les ondulations des courants et du couple.

La segmentation de puissance est l'avantage principal des machines multiphasées, que l'on met le plus en avant de nos jours. [13]

I.6.2. Fiabilité

Le régime dégradé (par la perte de l'une des phases par la défection des éléments de semi-conducteurs dont est constitué l'onduleur alimentant la machine) engendre une perte de contrôle de la machine, ainsi que des ondulations du couple de fortes amplitudes. L'une des solutions pour pouvoir commander la machine dans ce régime consiste à relier le neutre de la machine au point milieu de la source de tension continue.

Dans les machines multiphasées, cette contrainte peut être évitée tant qu'au moins trois phases restent actives, on peut avoir jusqu'à $(n_{ph} - 3)$ phases ouvertes sans que la solution concerne la connexion du neutre au point milieu de la source de tension continue.

Plus le nombre de phases augmente, plus on a de degrés de liberté pour commander la machine.

I.6.3. Minimisation des ondulations du couple et des pertes rotoriques

Les machines polyphasées permettent la réduction des ondulations de couple (période et amplitude) parce que les harmoniques cinq et sept sont naturellement minimisés dans ces machines [13].

Pratiquement, une machine multiphasées a des pertes rotoriques moindre qu'une machine triphasée.

I.7. Inconvénients des machines multiphasées

Le coût : le nombre d'éléments semi-conducteurs dont est constitué le convertisseur statique augmente avec l'augmentation du nombre de phases statoriques de la machine, ce qui augmente le coût de l'ensemble convertisseur-machine [13].

De plus, certains harmoniques des courants statoriques ne contribuent pas à la création d'onde de la force magnétomotrice. Ces harmoniques ne circulent donc qu'au stator. Dans le cas d'une alimentation par onduleur de tension, l'impédance vue par ces harmoniques peut donc être faible, ce qui provoque des harmoniques de courants d'amplitude importante. Cette apparition de courants harmoniques de circulation constitue l'inconvénient majeur des machines multi-phases.

Remarque

Il est nécessaire de développer des techniques de commande rapprochée pour les convertisseurs statiques spécifiés et adapté pour les machines multiphasées de type 2, puisque les méthodes élaborées pour les systèmes triphasés ne peuvent pas directement être appliquées aux systèmes à nombre de phases impaires tel que (5 phases, 7 phases, etc).

I.8.Conclusion

Dans ce présent chapitre, nous avons donné quelques rappels sur la constitution des machines asynchrones et leur fonctionnement.

Ensuite, nous avons parlé sur leur classification selon le nombre de phases statoriques, les machines dont le nombre de phases est multiple de trois sont moins compliquées pour la modélisation puisqu'elles peuvent être représentées par un ensemble des machines triphasées.

Finalement, nous avons cité quelques avantages et inconvénients des machines asynchrones et leurs applications.

Le chapitre suivant, consiste à modéliser la machine pentaphasée à cage d'écureuil en régime sain, en utilisant des modèles généralisés pour les systèmes polyphasés.

II.1 Introduction

Les machines multiphasées sont de plus en plus utilisées pour des raisons de fiabilités et de segmentation de puissance. Nous nous proposons d'en étudier un exemple courant qui est la machine asynchrone pentaphasée.

Ce chapitre est consacré à la modélisation de la machine asynchrone pentaphasée à cage d'écureuil en régime sain. L'objectif de cette étude consiste à utiliser la méthode des Circuits Electriques Magnétiquement Couplés ou la méthode des mailles [14] [15]. Ce type de modélisation offre un bon compromis en terme de précision et de temps de calcul.

De plus, elle permet de prendre en compte un certain nombre de défauts d'origine électromagnétiques tel que les défauts de court-circuit entre spires statoriques, et les défauts de type rupture de barre rotoriques [16] [17].

Dans cette partie, nous présentons en premier lieu les différentes équations électriques, magnétiques et mécaniques caractérisant le modèle de la machine.

II.2 Modèle de la machine asynchrone à cage en régime sain

Plusieurs méthodes sont utilisées pour modéliser la machine asynchrone à cage d'écureuil. Notre étude consiste à utiliser la méthode des circuits électriques magnétiquement couplés Ou la méthode des mailles [18] [19].

Dans cette approche de modélisation, les inductances propres et mutuelles entre le stator et le rotor de la machine prennent une place importante dans cette méthode de modélisation car elles contiennent la signature des différents phénomènes pouvant apparaître au sein de la machine asynchrone. Ces inductances sont calculées par le biais de l'induction d'entrefer, ce dernier étant l'endroit par excellence de la conversion d'énergie électromagnétique [20] [21].

Ce type de modélisation offre un bon compromis en terme de précision de modèle et de temps de calcul. De plus, il permet de prendre en compte un certain nombre de défauts d'origine électromagnétique tels que les défauts de court-circuit entre spires statoriques et défauts de type rupture de barre rotorique. Tout type de modélisation ne peut se faire sans effectuer quelques hypothèses dans le but de faciliter la mise en équations des circuits électriques de la machine.

II.3 Hypothèses simplificatrices

- Pour pouvoir élaborer le modèle électrique équivalent de la machine, il est indispensable de considérer certaines hypothèses simplificatrices, et qui ont pour but de faciliter la mise en équations des circuits électriques de la machine, dont on peut citer :
- Le circuit magnétique est parfaitement feuilleté au stator et au rotor.

- La densité de courant peut être considérée comme uniforme dans la section des conducteurs.
- Distribution spatiale sinusoïdale des forces magnétomotrices.
- L'entrefer étant considéré constant, les inductances propres sont constantes, et les inductances mutuelles entre les enroulements sont des fonctions sinusoïdales de l'angle entre leurs axes magnétiques.

II.4. Principe de fonctionnement du moteur à cage

Le fonctionnement du moteur asynchrone est basé sur le principe de l'interaction électromagnétique du champ tournant, créé par le courant triphasé fourni à l'enroulement statorique par le réseau, et des courants induits dans l'enroulement rotorique lorsque les conducteurs de ce dernier sont coupés par le champ tournant (Loi de Lenz). Cette interaction électromagnétique des deux parties de la machine n'est possible que lorsque la vitesse du champ tournant diffère de celle du rotor.

II.4.1. Structure du stator

Le stator de la machine étudiée est un stator triphasé de m encoches statoriques, une phase statorique est composée de plusieurs bobines logées dans les encoches du stator. Ces bobines statorique sont placées de telle sorte à obtenir une distribution de la force magnétomotrice la plus sinusoïdale possible le long de l'entrefer. La figure (II.1) donne une représentation de la modélisation choisie pour les trois phases statoriques de la machine asynchrone.

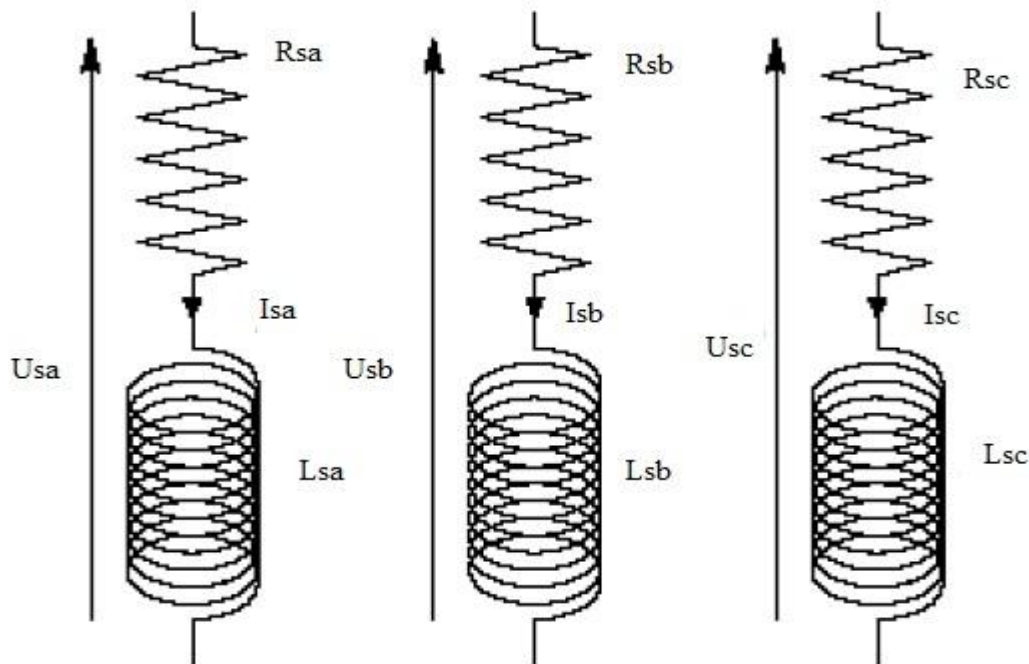


FIG.II.1. Circuits électriques adoptés pour la modélisation des trois phases statoriques [22]

II.4.2 Structure du rotor

La cage rotorique de la machine se compose de N_r encoches rotoriques qui peuvent être soit ouvertes soit fermées sur l'entrefer. La cage rotorique peut se décomposer en (N_r+1) circuits électriques rotoriques indépendants. En effet, si nous considérons deux barres rotoriques adjacentes ainsi que les segments d'anneaux de court-circuit les reliant, nous obtenons une boucle rotorique fermée qui peut être étudiée sous forme de circuit électrique. Un des anneaux de court-circuit crée par conséquent une boucle supplémentaire, ce qui porte le nombre de boucles totales à (N_r+1) . Nous associons à chacune de ces boucles un courant, ce qui nous amène à calculer (N_r+1) courants rotoriques [23] [24] chaque barre rotorique est modélisée par une inductance en série avec une résistance, tout comme chaque segment d'anneau de court-circuit. La figure (II.2) nous donne la forme des circuits électrique adoptés pour la modélisation de la cage d'écureuil rotorique.

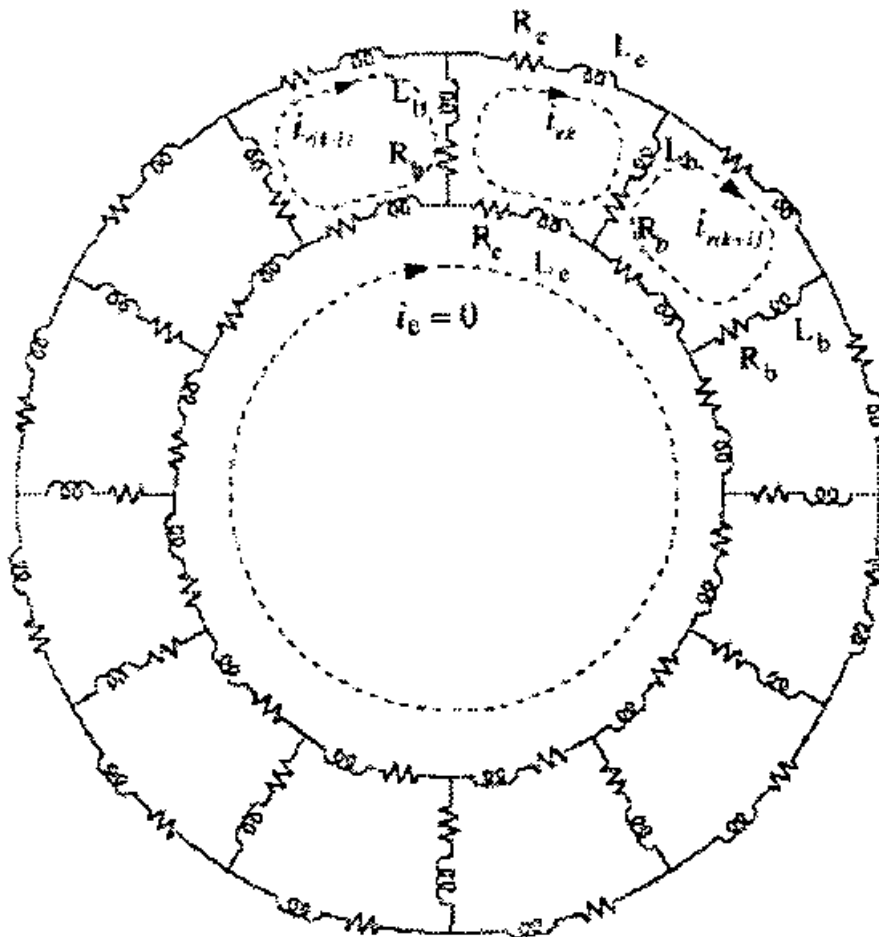


FIG.II.2.Circuits électriques adoptés pour la modélisation du rotor [21]

II.5 Mise en équations

II.5.1. Equations différentielles associées au stator

Les équations natives des circuits électriques statoriques peuvent se mettre sous la forme matricielle suivante :

$$[V_s] = [R_s]. [I_s] + \frac{d[\varphi_s]}{dt} \quad \text{II.1}$$

Avec :

$$[V_s] = \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \\ V_{sd} \\ V_{se} \end{bmatrix} \quad [I_s] = \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \\ I_{sd} \\ I_{se} \end{bmatrix} \quad [\varphi_s] = \begin{bmatrix} \varphi_{sa} \\ \varphi_{sb} \\ \varphi_{sc} \\ \varphi_{sd} \\ \varphi_{se} \end{bmatrix}$$

$[V_s]$, $[I_s]$, $[\varphi_s]$ sont respectivement, le vecteur tension statorique, le vecteur courant statorique et le vecteur flux statorique.

$$[R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_s \end{bmatrix}$$

$[R_s]$ est la matrice résistance statorique, elle a des éléments diagonaux égaux, car les phases de la machine sont identiques.

Les cinq phases statoriques sont non seulement magnétiquement couplées entre elles mais également avec les circuits rotoriques .Par conséquent, les courants de boucles rotoriques interviennent dans les équations des cinq flux statoriques.

$$[\varphi_s] = [L_s]. [I_s] + [M_{sr}]. [I_r] \quad \text{II.2}$$

Le vecteur $[I_r]$ regroupe les (N_r+1) courants de boucles rotoriques.

$$[I_r] = [I_{r1} \ I_{r2} \ I_{r3} \ \dots \ I_{rk} \ \dots \ I_{rNr} \ I_e]$$

La matrice des inductances mutuelles $[M_{sr}]$ entre les trois phases statoriques et les $(N_r + 1)$ boucles rotoriques se met sous la forme suivante :

$$[M_{sr}] = M_{sr} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta + a) & \dots & \cos(\theta + (N_r + 1).a) \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{5}\right) & \cos\left(\theta + a - \frac{2\pi}{5}\right) & \dots & \cos\left(\theta + (N_r + 1).a - \frac{2\pi}{5}\right) \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{5}\right) & \cos\left(\theta + a + \frac{2\pi}{5}\right) & \dots & \cos\left(\theta + (N_r + 1).a + \frac{2\pi}{5}\right) \\ \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{5}\right) & \cos\left(\theta + a - \frac{4\pi}{5}\right) & \dots & \cos\left(\theta + (N_r + 1).a - \frac{4\pi}{5}\right) \\ \cos\left(\theta + \frac{4\pi}{5}\right) & \cos\left(\theta + a + \frac{4\pi}{5}\right) & \dots & \cos\left(\theta + (N_r + 1).a + \frac{4\pi}{5}\right) \end{bmatrix} \quad II.3$$

II.5.2. Equations différentielles associées au rotor

Les équations natives des circuits électriques rotoriques peuvent se mettre sous la forme matricielle suivante :

$$0 = [V_r] = [R_r][I_r] + \frac{d[\varphi_r]}{dt} \quad II.4$$

$$[\varphi_r] = [L_r][I_r] + [M_{rs}][I_s] \quad II.5$$

$$[V_r] = [V_{r1} \ V_{r2} \ V_{r3} \ \dots \ V_k \ \dots \ V_{rNr} \ V_{rcc}]^T \quad II.6$$

$$[\varphi_r] = [\varphi_{r1} \ \varphi_{r2} \ \varphi_{r3} \ \dots \ \varphi_{rk} \ \dots \ \varphi_{rNr} \ \varphi_{rcc}]^T \quad II.7$$

$$[M_{rs}] = [M_{sr}]^T \quad II.8$$

Le rotor à cage est représenté par la figure (II.3)

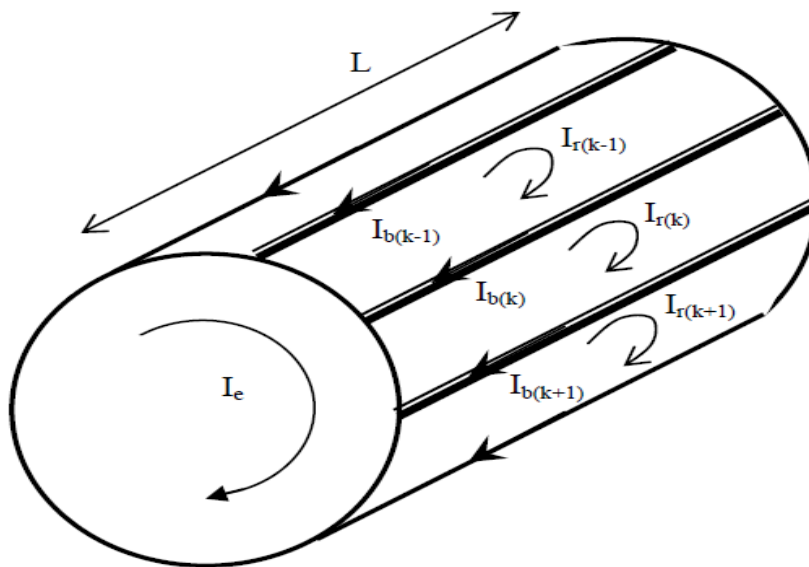


FIG.II.3 Le rotor à cage

Si nous prenons les circuits électriques rotoriques présentés par la figure (II.3), nous pouvons écrire les équations relatives aux mailles (K-1), (k+1) :

$$0 = \frac{R_e}{N_r} \cdot I_{r(k-1)} - R_{b(k-2)} I_{b(k-2)} + \frac{R_e}{N_r} (I_{r(k-1)} - I_e) + R_{b(k-1)} \cdot I_{b(k-1)} + \frac{d\varphi_{r(k-1)}}{dt} \quad \text{II.9}$$

$$0 = \frac{R_e}{N_r} \cdot I_{rk} - R_{b(k-1)} I_{b(k-1)} + \frac{R_e}{N_r} (I_{rk} - I_e) + R_{bk} \cdot I_{bk} + \frac{d\varphi_{rk}}{dt} \quad \text{II.10}$$

$$0 = \frac{R_e}{N_r} \cdot I_{r(k+1)} - R_{bk} \cdot I_{bk} + \frac{R_e}{N_r} (I_{r(k+1)} - I_e) + R_{b(k+1)} \cdot I_{b(k+1)} + \frac{d\varphi_{r(k+1)}}{dt} \quad \text{II.11}$$

L'équation de la maille d'anneau s'écrit :

$$0 = N_r \cdot R_e \cdot I_e - \sum_{k=1}^N R_e \cdot I_{rk} + \frac{d\varphi_e}{dt} \quad \text{II.12}$$

D'où l'équation II.4 devient :

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2(R_b + R_e) & -R_b & 0 & 0 & \dots & -R_b & -R_b & -R_e \\ -R_b & 2(R_b + R_e) & -R_b & 0 & \dots & -R_b & 0 & -R_e \\ -R_b & 0 & 0 & 0 & \dots & -R_b & 0 & -R_e \\ -R_b & 0 & 0 & 0 & \dots & -R_b & 0 & -R_e \\ -R_b & 0 & 0 & 0 & \dots & -R_b & 0 & -R_e \\ -R_b & 0 & 0 & 0 & \dots & -R_b & 0 & -R_e \\ -R_b & 0 & 0 & 0 & \dots & -R_b & 2(R_b + R_e) & -R_e \\ -R_e & -R_e & 0 & 0 & \dots & 0 & -R_e & N_r R_e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{r1} \\ I_{r2} \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ I_{Nr} \\ I_e \end{bmatrix} + \frac{d[\varphi_r]}{dt} \quad \text{II.13}$$

R_b résistance d'une barre rotorique.

R_e résistance de l'anneau de court-circuit.

Le flux rotorique total est :

$$[\varphi_r] = [\varphi_{rk r}] + [M_{sr}] \cdot [I_s] \quad \text{II.14}$$

Le flux dû aux courants rotoriques est exprimé par la relation matricielle suivante :

$$[\varphi_{rk r}] = [\varphi_{r1r} \ \varphi_{r2r} \ \dots \ \varphi_{rk r} \ \dots \ \varphi_{rcc}] = [L_r] \cdot [I_r] \quad \text{II.15}$$

Le flux dans la $k^{\text{ème}}$ maille du rotor dû aux courants rotoriques est exprimé par la relation :

$$\varphi_{rkr} = L_{r1} I_{r1} + L_{kNr} I_{rNr} + 2(L_e + L_b) I_{rk} + L_b (I_{r(k-1)} + I_{r(k+1)}) \quad \text{II.16}$$

La matrice $[L_r]$ se compose des inductances propres, de magnétisation de fuites et mutuelles de chaque boucle rotorique.

$$[\varphi_r] = \begin{bmatrix} L_{rp} + 2(L_b + L_{\sigma e}) & M_{rr} - L_{\sigma b} & M_{rr} & \dots & \dots & M_{rr} - L_{\sigma b} & -L_{\sigma e} \\ M_{rr} - L_{\sigma b} & L_{rp} + 2(L_b + L_{\sigma e}) & M_{rr} - L_{\sigma b} & \dots & \dots & M_{rr} & -L_{\sigma e} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \dots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \dots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \dots & \vdots & \vdots \\ M_{rr} - L_{\sigma b} & \vdots & \vdots & \dots & L_{rp} + 2(L_b + L_{\sigma e}) & -L_{\sigma e} & \vdots \\ -L_{\sigma e} & -L_{\sigma e} & -L_{\sigma e} & \dots & \dots & -L_{\sigma e} & N_r L_{\sigma e} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{r1} \\ I_{r2} \\ I_{r3} \\ \vdots \\ \vdots \\ I_{rNr} \\ I_e \end{bmatrix} + [M_{sr}][I_s]$$

II.17

L_{rp} : inductance principale d'une maille rotorique.

L_b : inductance d'une barre rotorique.

$L_{\sigma e}$: inductance totale de l'anneau de court-circuit.

M_{rr} : inductance mutuelle entre deux mailles rotoriques.

II.5.3 Equation d'état

$$\begin{bmatrix} [V_s] \\ [V_r] \\ -C_r \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [L_s] & [M_{sr}] & [S_o] & [S_o] \\ [M_{rs}] & [L_r] & [S_o] & [S_o] \\ [S_o]^T & [S_o]^{ST} & J_t & 0 \\ [S_o]^T & [S_o]^T & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [i_s] \\ [i_r] \\ \dot{\Omega}_r \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} [R_s] & \left[\Omega_r \cdot \frac{dM_{sr}}{d\theta} \right] & [S_o]^T & [S_o]^T \\ \left[\Omega_r \cdot \frac{dM_{sr}}{d\theta} \right] & [R_r] & [S_o]^T & [S_o]^T \\ C_{stator} & C_{rotor} & f_{\theta} & 0 \\ [S_o] & [S_o] & -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [I_s] \\ [I_r] \\ \Omega_r \\ \theta \end{bmatrix} \quad \text{II.18}$$

Avec :

$$[S_o] = [0 \ 0 \ 0 \ \dots \ 0] \text{ Vecteur nul de dimension } (N_r + 1) \quad \text{II.19}$$

$$\left[\Omega_r \cdot \frac{dM_{sr}}{d\theta} \right] = -M_{sr} \begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} & \dots & g_{1Nr+1} \\ g_{21} & g_{22} & \dots & g_{2Nr+1} \\ g_{31} & g_{32} & \dots & g_{3Nr+1} \end{bmatrix} \quad \text{II.20}$$

$$= -M_{sr} \begin{bmatrix} \Omega_r \cdot p \sin(\theta) & \Omega_r \cdot p \sin(p \cdot \theta + a) & \dots & \Omega_r \cdot P \cdot \sin(p\theta + (N_r + 1) \cdot a) \\ \Omega_r \cdot p \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{5}\right) & \Omega_r \cdot p \sin\left(p \cdot \theta + a - \frac{2\pi}{5}\right) & \dots & \Omega_r \cdot P \cdot \sin\left(p\theta - \frac{2\pi}{5}(N_r + 1) \cdot a\right) \\ \Omega_r \cdot p \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{5}\right) & \Omega_r \cdot p \sin\left(p \cdot \theta + a + \frac{2\pi}{5}\right) & \dots & \Omega_r \cdot P \cdot \sin\left(p\theta + \frac{2\pi}{5}(N_r + 1) \cdot a\right) \\ \Omega_r \cdot p \sin\left(\theta - \frac{4\pi}{5}\right) & \Omega_r \cdot p \sin\left(p \cdot \theta + a - \frac{4\pi}{5}\right) & \dots & \Omega_r \cdot P \cdot \sin\left(p\theta - \frac{4\pi}{5}(N_r + 1) \cdot a\right) \\ \Omega_r \cdot p \sin\left(\theta + \frac{4\pi}{5}\right) & \Omega_r \cdot p \sin\left(p \cdot \theta + a + \frac{4\pi}{5}\right) & \dots & \Omega_r \cdot P \cdot \sin\left(p\theta + \frac{4\pi}{5}(N_r + 1) \cdot a\right) \end{bmatrix} \quad \text{II.21}$$

Les constantes C_{stator} , C_{rotor} sont définies comme suit :

$$C_{stator} = 0,5 \cdot p \cdot [I_r][H]^T \quad \text{II.22}$$

$$C_{rotor} = 0,5 \cdot p \cdot [I_r][H]^T \quad \text{II.23}$$

$$[H] = M_{sr} \begin{bmatrix} \sin(\theta) & \sin(p \cdot \theta + a) & \dots & \sin(p\theta + (N_r + 1) \cdot a) \\ \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{5}\right) & \sin\left(p \cdot \theta + a - \frac{2\pi}{5}\right) & \dots & \sin\left(p\theta - \frac{2\pi}{5}(N_r + 1) \cdot a\right) \\ \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{5}\right) & \sin\left(p \cdot \theta + a + \frac{2\pi}{5}\right) & \dots & \sin\left(p\theta + \frac{2\pi}{5}(N_r + 1) \cdot a\right) \\ \sin\left(\theta - \frac{4\pi}{5}\right) & \sin\left(p \cdot \theta + a - \frac{4\pi}{5}\right) & \dots & \sin\left(p\theta - \frac{4\pi}{5}(N_r + 1) \cdot a\right) \\ \sin\left(\theta + \frac{4\pi}{5}\right) & \sin\left(p \cdot \theta + a + \frac{4\pi}{5}\right) & \dots & \sin\left(p\theta + \frac{4\pi}{5}(N_r + 1) \cdot a\right) \end{bmatrix} \quad \text{II.24}$$

II.4 Calcul des inductances et des mutuelles

II.4.1 Inductances statoriques

Nous avons dans le stator de la machine trois bobines identiques, l'angle mécanique entre elle est $\frac{2\pi}{5}$, l'intensité de champ magnétique H produite par une bobine statorique dans le fer est très faible par rapport à sa valeur dans l'entrefer [18].

La décomposition en série de Fourier de l'expression de l'induction dans l'entrefer fournit le fondamentale :

$$B_{sm}(\theta) = \frac{2}{\pi} \mu_0 \frac{N_s}{e \cdot p} I_{sm} \cos\left(p\theta - m \frac{2\pi}{5}\right) \quad \text{II.25}$$

m= 1, 2, 3, 4,5 (a, b, c, d, e)

L'expression d'induction maximal dans l'entrefer est donné par :

$$B_{max} = \frac{\mu_0 \cdot N_s I_{sm}}{pe} \quad \text{II.26}$$

L'expression du flux principal d'un enroulement statorique est :

$$\varphi_{psm} = \frac{4}{\pi} \mu_0 \cdot \frac{4\mu_0 N_s^2}{e \cdot p^2} \cdot R \cdot L \cdot I_{sm} \quad \text{II.27}$$

D'après l'équation du flux, l'expression de l'induction principale d'un enroulement statorique est donnée :

$$L_{sp} = \frac{\varphi_{sp}}{I_{sn}} = \frac{4\mu_0 N_s^2}{ep^2\pi} R \cdot L \quad \text{II.28}$$

Les termes R, L, e, L_s représentent le rayon au milieu de l'entrefer, la longueur active du circuit magnétique, l'épaisseur de l'entrefer et le nombre d'encoches statorique.

Les hypothèses du système à trois axes et de répartition sinusoïdale de la force magnétomotrice permettent de passer directement aux expressions des inductances mutuelles entre bobinages statoriques M_s et l'inductance cylindrique cyclique L_{sc} .

II.29

$$M_{S(ab)} = M_{S(ac)} = M_{S(ad)} = M_{S(ae)} = M_{S(bc)} = M_{S(bd)} = M_{S(be)} = \\ M_{S(cd)} = M_{S(ce)} = M_{S(ed)} = \\ L_{sp} \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{5}\right)$$

$$L_{sc} = \frac{4\mu_0 N_s^2}{p^2 e \pi} \cdot RL + L_{sf} \quad \text{II.30}$$

L_{sc} est l'inductance de fuite stator

II.4.2. Inductances rotoriques

La figure (II.4) montre l'allure de l'induction magnétique, en fonction de θ , produite par une maille rotorique dans l'entrefer.

A partir de cette répartition, on calcule l'induction principale ainsi que la mutuelle entre deux mailles rotoriques.

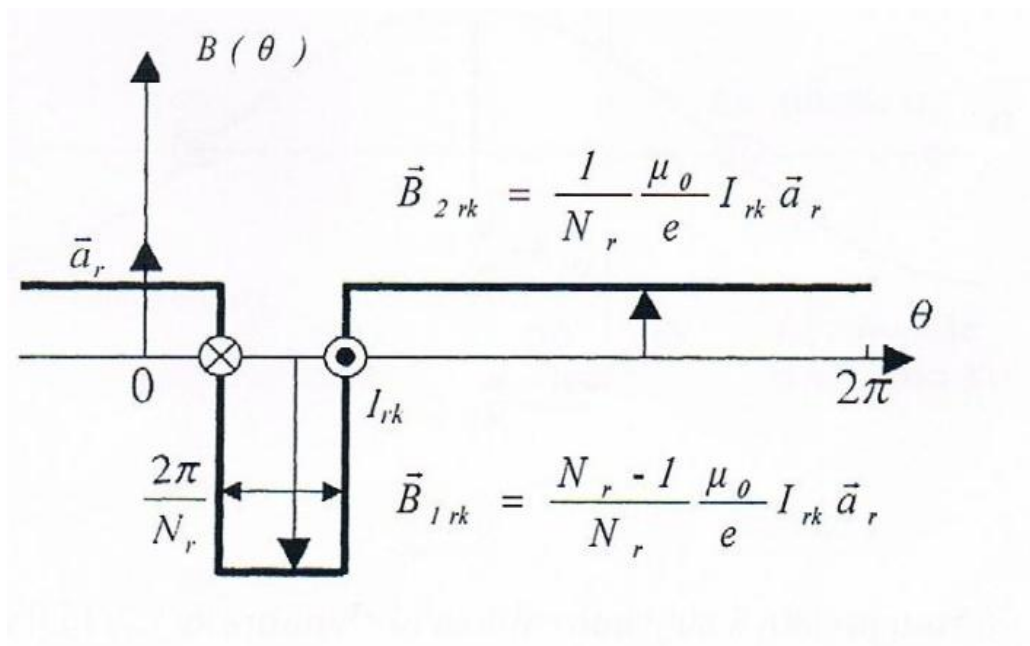


FIG.II.4 : induction produite par une maille

$$B_{prk} = I_{rk} \left(\frac{N_r - 1}{N_r} \right) \frac{\mu_0}{e} \quad \text{II.31}$$

$$B_{mrk} = I_{rk} \left(\frac{1}{N_r} \right) \frac{\mu_0}{e} \quad \text{II.32}$$

L'inductance principale d'une maille rotorique:

$$L_{rp} = \frac{N_r - 1}{N_r^2} \cdot \frac{\mu_0}{e} \cdot 2\pi \cdot L \cdot R \quad \text{II.33}$$

L'inductance mutuelle entre deux mailles k et j:

$$M_{rr} = -\frac{1}{N_r^2} \cdot \frac{\mu_0}{e} \cdot 2\pi \cdot L \cdot R \quad \text{II.34}$$

II.4.3 Inductances mutuelle stator-rotor

L'inductance produite par la bobine statorique de la phase en induit dans la maille k le flux.

$$\varphi_{smrk} = \int_{Srk} \vec{B} \cdot d\vec{S}_{sk} = - \int_{\frac{\theta}{p} + k \frac{2\pi}{N_r} - \frac{\pi}{N_r}}^{\frac{\theta}{p} + k \frac{2\pi}{N_r} + \frac{\pi}{N_r}} B_{sm}(\theta') \cdot L \cdot R \cdot d\theta' \quad \text{I.35}$$

$$\varphi_{smrk} = -\frac{2}{\pi} \cdot \frac{\mu_0}{e \cdot P} \cdot N_s \cdot I_{sm} \cdot L \cdot R \cdot \frac{1}{p} \left[\sin \left(p\theta' - m \frac{2\pi}{5} \right) \right]_{\frac{\theta}{p} + k \frac{2\pi}{N_r} - \frac{\pi}{N_r}}^{\frac{\theta}{p} + k \frac{2\pi}{N_r} + \frac{\pi}{N_r}} \quad \text{II.36}$$

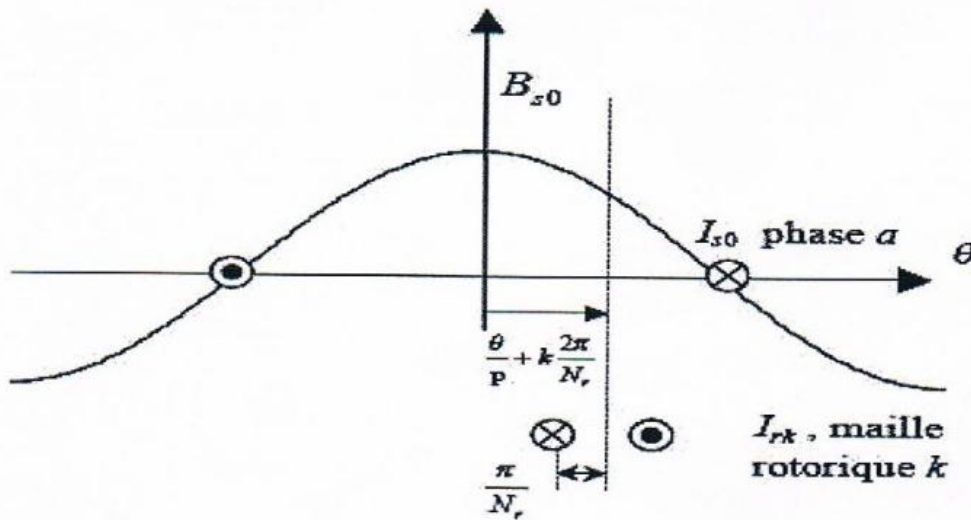


FIG.II.5 : position de la maille rotorique k par rapport à une phase statorique

La mutuelle stator-rotor entre la phase m et la maille rotorique k.

$$M_{smrk} = -M_{sr} \cdot \cos \left(\theta - m \frac{2\pi}{3} + k \cdot a \right) \quad \text{II.37}$$

$$M_{sr} = \frac{4}{\pi} \frac{\mu_0}{e \cdot p^2} \cdot N_s \cdot L \cdot R \cdot \sin\left(\frac{a}{2}\right) \quad \text{II.38}$$

$a = p \cdot \frac{2\pi}{N_r}$ est l'angle électrique entre deux mailles rotoriques.

II.7. Fonctionnement en régime sain

On se propose dans un premier temps de simuler le fonctionnement de la machine en régime sain, en vue de voir les perturbations générées lors d'un dysfonctionnement de la machine, c'est-à-dire en cas d'un défaut qui survient.

On applique un couple résistant de 13.5 N.m à l'instant de temps 1.5 s.

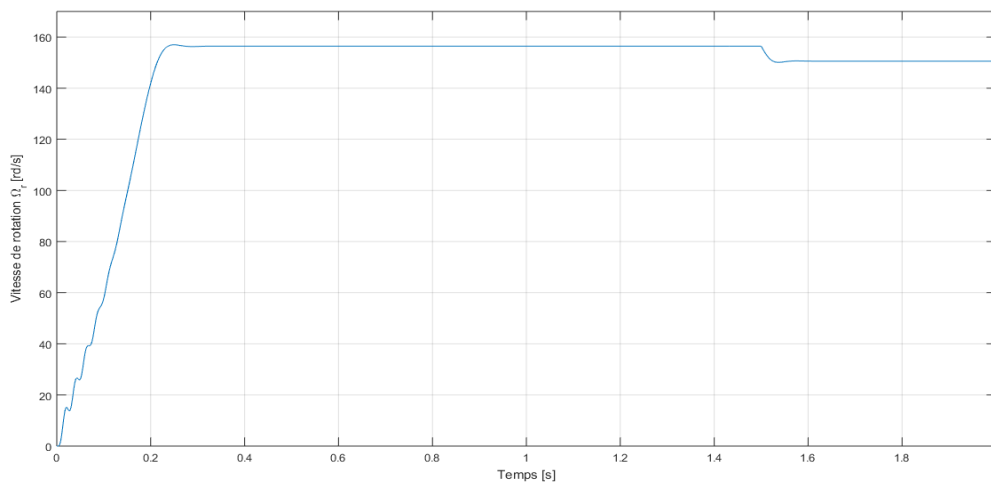


Figure II.6 : Vitesse de rotation de la machine en régime sain avec application d'un couple résistant de 13.5 N.m à l'instant de temps : 1.5 s.

La figure (II.6) montre l'évolution de la vitesse de moteur, on remarque une augmentation progressive de la vitesse en fonction de temps durant le régime transitoire. A partir de $t=0.3s$ la vitesse se stabilise à la valeur de 157rd/s durant le régime permanent. Lors de l'application d'un couple de charge à $t=1.5s$ une diminution permanente de la vitesse apparaît.

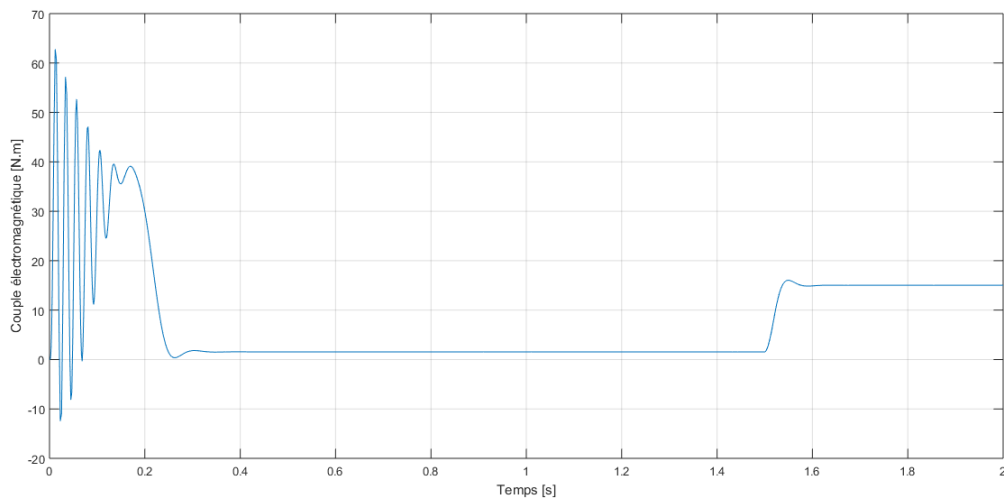


Figure II.7 : Couple électromagnétique développé par la machine en régime sain.

L'allure du couple électromagnétique est donnée dans la figure (II.7). Au démarrage, le couple oscille autour d'une valeur de 60N.m. Cette période représente le régime transitoire. À partir de l'instant $t=0.02s$ le couple chute brusquement jusqu'à atteindre une valeur très faible. Après l'application d'un couple résistant le couple augmente, pour compenser le couple de charge appliqué.

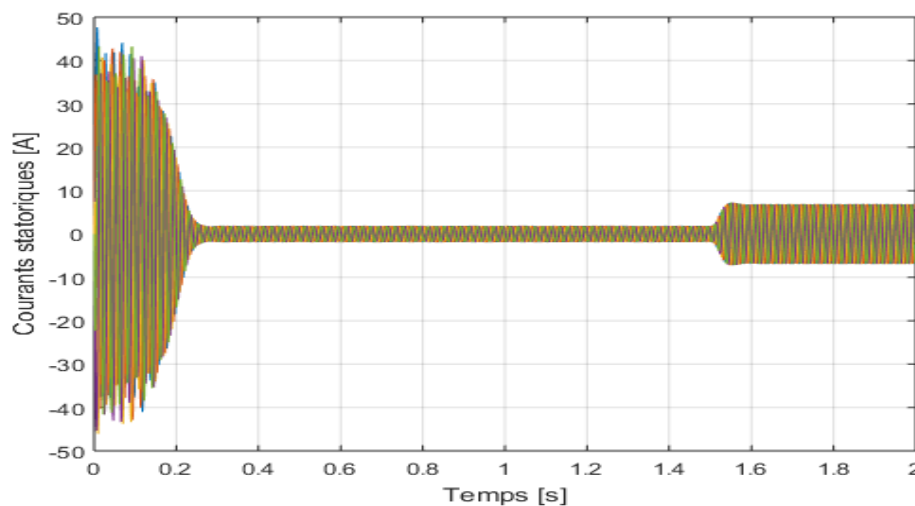


Figure II.8 : Courants statoriques en régime sain.

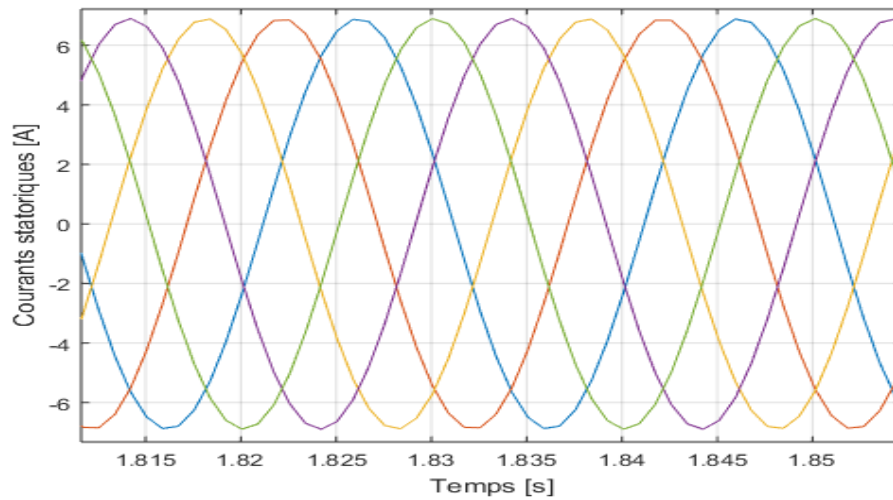


Figure II.9 : Zoom des courants statoriques.

L'allure des courants statoriques est représentée dans la figure (II.8). Des oscillations sont apparues pendant le démarrage avec une valeur efficace de 40A et cette grande valeur s'explique par la forte demande de la machine au courant. A partir de $t=0,3s$ le courant se stabilise autour de 5A. A l'instant 1,5s la machine a été soumise à un couple résistant nominal $C_r = 13,5 N$.

II.8. Conclusion

Dans ce chapitre est faite la modélisation de la machine asynchrone pentaphasée à cage d'écureuil, en utilisant la méthode des circuits magnétiquement couplés. Tel qu'on a rappelé les différentes équations, électriques, mécaniques et magnétiques. En effet, le modèle développé faisant intervenir les résistances et les différentes inductances propre et mutuelles.

III.1. Introduction

La machine asynchrone occupe un domaine très important dans l'industrie et les transports. Elle est appréciée pour sa robustesse, son faible coût d'achat et d'entretien et ne nécessite qu'une seule source d'alimentation.

Malgré ces qualités évoquées il n'est pas rare que ces moteurs présentent quelques défaillances émanant d'un vieillissement prématuré. Comme ces machines sont soumises pendant leur fonctionnement à plusieurs contraintes électrique, magnétique, mécanique. Ces dernières provoquent des défauts dans les différentes parties du moteur, ce qui engendre des arrêts conduisant à des pertes de production et à des réparations coûteuses.

III.2. Etude des différents défauts affectant le moteur asynchrone

III.2.1. Causes et conséquences des défauts

III.2.1.1 Les contraintes électriques

Elles ont des effets directs sur la partie isolante du bobinage, ce qui crée des problèmes diélectriques pouvant entraîner la rupture des isolants.

III.2.1.2 Les contraintes dynamiques

Elles ont pour conséquence des dépassements dynamiques d'origine externe et apparaissant sous forme de couples pulsatoires, vibrations, forces centrifuges, augmentation de vitesse et contraintes périodiques, pouvant provoquer le décalage de la masse rotorique, le gauchissement de l'arbre et des déflexions au niveau des barres rotoriques.

III.2.1.3 Les contraintes magnétiques

Parmi les effets de ces contraintes, on distingue :

- des effets électromagnétiques,
- une sollicitation magnétique déséquilibrée,
- des parasites et des vibrations électromagnétiques.

III.2.1.4 Les contraintes d'environnement

Un moteur doit toujours être placé dans un droit propre et sec car sa durée de vie et sa bonne tenue dépendent de l'environnement dans lequel il fonctionne. La présence de l'humidité et de la poussière qui contient des particules métalliques engendre de graves endommagements au niveau de la surface rotorique du moteur et détériore l'isolant ce qui provoque des court-circuits dans ses enroulements.

III.2.1.5 Les contraintes mécaniques

Elles se présentent sous les formes suivantes :

- mouvement des bobinages,
- déflexion de l'arbre.

III.2.1.6 Les contraintes thermiques

L'excès de température provoque essentiellement la dégradation des isolants des enroulements et contribue à leur vieillissement, engendrant des courts-circuits de différents types. Les dépassements thermiques sont dus :

- à des variations de tensions,
- au déséquilibre des tensions d'alimentation,
- au démarrage du moteur,
- à la surcharge du moteur.

III.2.1.7 Les contraintes de démarrage

Le démarrage est la période la plus dangereuse pour la tenue de l'enroulement rotorique d'un moteur, durant laquelle tous les phénomènes sont aggravés par suite de l'appel important du courant. Si on prend par exemple le rotor à cage, trois principaux éléments peuvent contribuer à la rupture de sa cage durant cette période de fonctionnement :

- les conditions de démarrage,
- les contraintes permanentes,
- les contraintes vibratoires.

Ces défauts se répartissent selon la figure suivante :

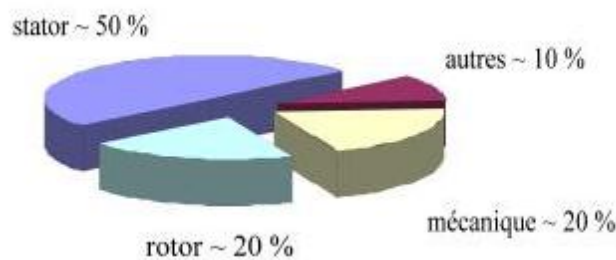


FIG.III.1 la répartition des pannes.

III.2.2. Les défauts statoriques

Ces défauts apparaissent souvent au niveau des enroulements statoriques figure (III.1) et sont dus à des dépassements de différentes [26] natures. On distingue :

- Court-circuit dans les spires d'une même phase ;
- Court-circuit entre phases ou entre bobines ;
- Coupure d'une phase ;
- Défaut du circuit magnétique (rupture de tôles) ;

- Défauts de l'isolation masse.

A partir des études théoriques, il a été montré que le courant statorique avait un spectre enrichi par la création d'un court-circuit au stator [27]. Les fréquences sont données par la relation :

$$f_{cc} = [(n/p) \cdot (1 - g) \pm K] \cdot f \quad (\text{Hz}) \quad \text{III.1}$$

Où :

- f_{cc} : fréquence de « court-circuit » ;
- f : fréquence d'alimentation ;
- $n = 1, 2, 3, \dots, n \in \mathbb{N}$;
- p = nombre de pair de pôles ;
- g : glissement ;
- $K = 1, 2, 3, \dots, K \in \mathbb{N}$.
-

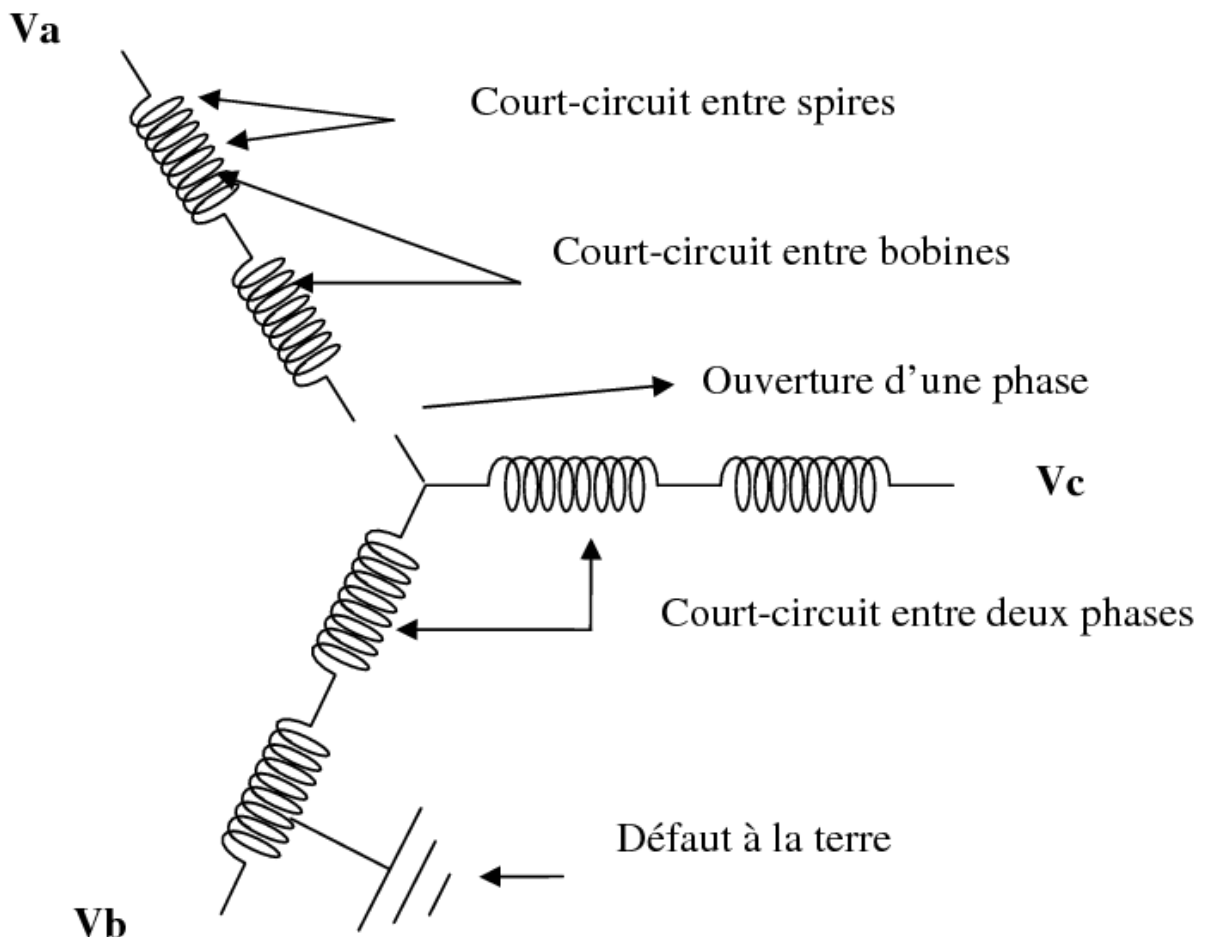


FIG. (III.2) : Défauts statoriques [28]

III.2.3. Défauts rotoriques

Les différents éléments pouvant être défectueux se répartissent en 3 catégories. Celles-ci sont [17] :

- portion d'anneau ou de barre au rotor,
- roulement à billes,
- excentricité statique, dynamique, mixte.

Il est important de souligner que les défauts rotoriques peuvent être la cause de défauts dans les autres parties de la machine, et entraîner ainsi un dysfonctionnement plus grave.

III.2.3.1. Défaut de rupture de barres et de segments cassés :

Un des défauts les plus difficiles à détecter concerne les ruptures de barres qui sont les pannes majeures pour les rotors à cage. Ces défauts représentent la particularité d'être progressives et partielles. Il s'agit d'un phénomène à évolution lente ce qui permet de poursuivre l'exploitation de la machine sans arrêt.

Les ruptures de barres (figure. III.3) sont essentiellement liées à des erreurs d'exploitation (démarrage très lent non détecté, non-respect du délai de refroidissement entre démarrages successifs), ou à des défauts de fabrication (mauvaise coulée) [27].

Les conséquences de ce type de défaut ne sont pas anodines car elles induisent :

- Un vieillissement mécanique de la ligne d'arbre à cause des fluctuations de couple,
- Une rupture des autres barres du fait des courants plus importants qui les parcourent et des efforts électrodynamiques,
- Une influence sur les formes d'ondes des signaux d'alimentation de la machine.

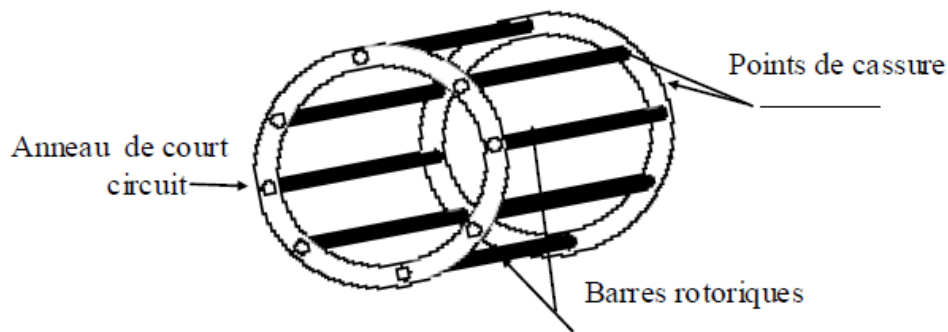


FIG.III.3 : Points sensible à la rupture dans la cage rotorique du moteur à cage d'écureuil

Le rotor avec ce défaut crée, en plus du champ rotorique direct qui tourne à la vitesse $g\omega_s$ par rapport au rotor (g le glissement de la machine), un champ inverse qui, lui tourne à une vitesse $-g\omega_s$. L'interaction de ces champs avec celui issu du bobinage statorique donne naissance des composantes de fréquence $2g\omega$ dans le couple électromagnétique. Ces composantes seront la cause d'oscillations de la vitesse. Cette dernière donne naissance à des

F.é.m. aux pulsations ω_s , $(1 - 2g)\omega_s$, $(1 + 2g)\omega_s$ et $(1 - 4g)\omega_s$ qui créent à leur tour des courants aux mêmes pulsations [16]. Les champs créés par ces courants vont à leur tour induire au rotor des courants directs et inverses. Ainsi par un processus identique, on retrouve dans le courant statorique des composantes de fréquences [29] :

$$f_b = (1 \pm K.g).f \quad \text{III.2}$$

Où :

- K : un entier positif ;
- g : le glissement ;
- f : la fréquence d'alimentation.

Le schéma de la figure (III.4) permet une meilleure compréhension du fonctionnement du moteur avec un rotor sain alors que celui de la figure (III.5) décrit le phénomène dû à l'apparition du défaut rotorique sachant que :

$$\omega_s = \frac{2\pi f}{p} \quad \text{III.3}$$

- ω_s : représente la vitesse de synchronisme ;
- p : le nombre de paires de pôles de la machine.

$$\omega_r = (1 - S)\omega_s : \text{ la vitesse de rotation ;} \quad \text{III.4}$$

$$\omega = \omega_s - \omega_r : \text{ la vitesse de glissement ;} \quad \text{III.5}$$

$$g = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s} : \text{ le glissement.} \quad \text{III.6}$$

Alors :

$$\omega_{défauts} = \omega_s - \omega_r = (1 - g)\omega_s - S\omega_s \quad \text{III.7}$$

$$\omega_{défauts} = (1 - 2g)\omega_s \quad \text{III.8}$$

D'où la fréquence du défaut :

$$f_b = (1 - g)f - gf = (1 - 2g)f$$

III.9

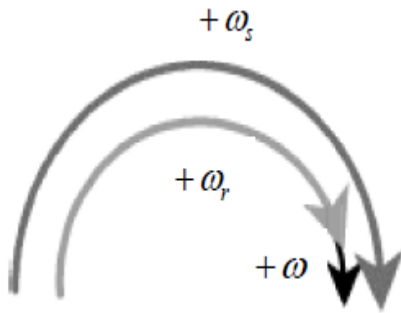


FIG.III.4 : Schéma de fonctionnement du moteur sain

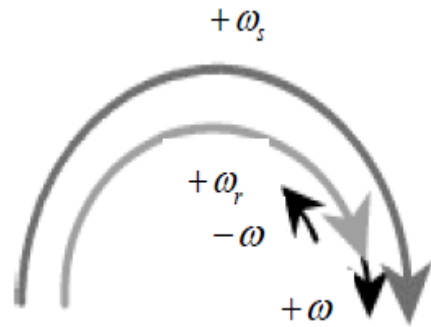


FIG.III.5 : Schéma de fonctionnement d'un moteur défaillant

III.2.3.2. Défaut de roulements

Les études permettent de classer le défaut de roulement à bille comme suivant [26] :

- Trous dans les gorges de roulement intérieures et extérieures.
- Ondulation de leur surface de roulement.
- Attaque des billes.
- Corrosion due à l'eau.
- Défaut de graissage, problème dû à la température.
- Découlement, effritement de surface, provoqués par une surcharge.

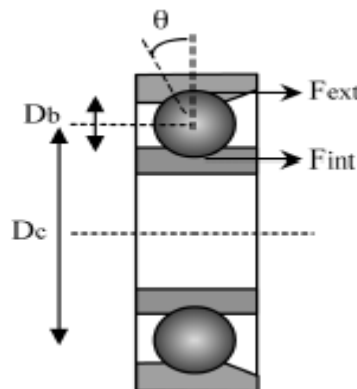


FIG.III.6 : les roulements à billes

La relation entre les vibrations des roulements à billes et le spectre du courant statorique est basée sur le fait que toutes les excentricités interfèrent sur le champ dans l'entrefer de la

machine asynchrone. Un défaut de roulement à billes se manifeste par la répétition continue du contact défectueux avec la cage de roulement extérieure comme intérieure [17].

La fréquence de répétition sera pour la cage intérieure et extérieure :

$$f_{int} = \frac{n_B}{2} f_r \left[1 - \frac{D_B}{D_C} \cos \theta \right] \quad \text{III.10}$$

$$f_{ext} = \frac{n_B}{2} f_r \left[1 + \frac{D_B}{D_C} \cos \theta \right] \quad \text{III.11}$$

Le spectre en courant est alors décrit par :

$$f_{int,ext} = f \pm n \frac{n_B}{2} f_r \left[1 \pm \frac{D_B}{D_C} \cos \theta \right] \quad \text{III.12}$$

Cette expression contient des données spécifiques au roulement à billes

- f = fréquence d'alimentation ;
- f_r = fréquence de rotation mécanique ;
- $n = 1, 2, 3, \dots, n \in \mathbb{N}$;
- n_B = nombre de billes ;
- D_B = diamètre des billes ;
- D_C = La distance entre les centres des billes diamétralement opposées;
- θ = l'angle de contact de la bille avec la cage.

En considérant que le nombre de billes est compris entre 6 et 12 habituellement, deux relations couramment rencontrées sont :

$$f_{ext} = 0,4N_r f_r \quad \text{III.13}$$

$$f_{int} = 0,4N_r f_r \quad \text{III.14}$$

Donc le spectre en courant sera enrichi :

$$f_{int,ext} = f \pm n f_{(ext,int)} \quad \text{III.15}$$

III.2.3.3. Défauts d'excentricité

L'excentricité est un phénomène qui fait l'objet de nombreuses publications, car elle est responsable de multiples dommages sur les machines électriques, surtout lorsqu'il s'agit de la machine asynchrone où l'entrefer est volontairement d'épaisseur très faible.

L'excentricité est le résultat de la non uniformité de ce dernier, ce qui signifie l'existence de longueurs radiales différentes entre le stator et le rotor, donc une asymétrie d'entrefer. Cette asymétrie faite, va décaler les axes des deux armatures l'un par rapport à l'autre d'une épaisseur qui dépend du degré d'excentricité et de la longueur moyenne de l'entrefer figure (III.7). Les causes d'une excentricité sont multiples : elle peut être due à la flexion de l'arbre à un phénomène d'usure ou au désalignement des roulements, à un positionnement incorrect du rotor ou du stator au moment de l'assemblage, à l'ovalité du rotor ou de la partie intérieure du stator ou à un fonctionnement du moteur au-delà d'une vitesse limite qui provoque des résonances [30].

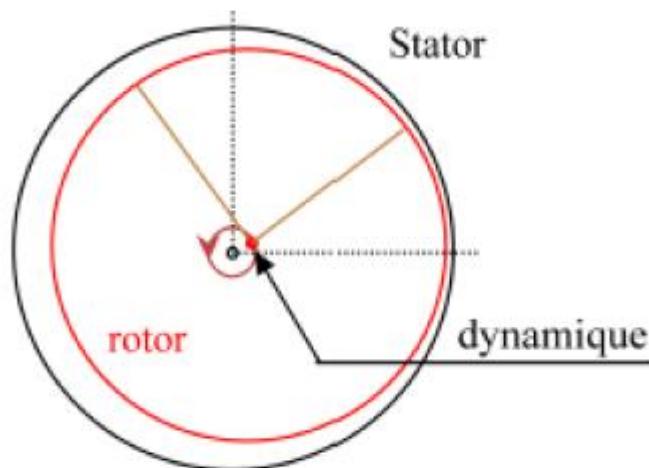


FIG.III.7 : Moteur asynchrone avec rotor excentrique

La présence de l'excentricité se manifeste par la création d'harmoniques dans le spectre du courant statorique à des fréquences (f_d) données par l'expression ci-dessous [30] [31]

$$f_d = f \left[\frac{(k_{nd})}{p} (1 - g) \pm v \right] \quad \text{III.16}$$

Où :

- N_r : le nombre de barres rotoriques,

- n_d : le nombre d'ordre d'excentricité : $n_d=0$ pour l'excentricité statique et $n_d=1, 2, 3, \dots$ pour l'excentricité dynamique,
- p : le nombre de paires de pôles,
- v : l'ordre des harmoniques de temps de la F.m.m ($v = \pm 1, \pm 3, \pm 5, \pm 7, \dots$ etc.)

La présence de l'excentricité mixte crée des harmoniques de basses fréquences données par la relation :

$$f_m = |f \pm k f_r| \quad \text{III.17}$$

Où :

$$f_r = f (1 - g)/p \quad \text{III.18}$$

Et : $k= 1, 2, 3, \dots$

Ces défauts engendrent les problèmes suivants :

- déséquilibre des tensions et courants de ligne ;
- augmentation des pulsations de couple ;
- réduction du couple moyen ;
- échauffement excessif ;
- augmentation des pertes et réduction du rendement.

III.2.3.4. Défaut de rupture de portions d'anneaux :

Les défauts qui peuvent apparaître au niveau des portions d'anneaux de court-circuit ont souvent les mêmes origines que celles présentées pour la cassure d'une barre de la cage rotorique. La méthodologie adoptée pour la prise en compte de ce type de défaut dans le modèle est aussi identique à l'approche utilisée pour la simulation d'une rupture de barre rotorique. La simulation d'une rupture d'une portion d'anneau de court-circuit s'effectue en augmentant la valeur de sa résistance de telle sorte que le courant qui le traverse soit le plus proche possible de zéro au régime permanent.

III.3. Fonctionnement en régime dégradé

III.3.1. Ouverture d'une phase

Dans ce qui suit nous simulons le cas d'ouverture d'une phase de la machine. Nous considérons le cas de l'ouverture de la phase « e ».

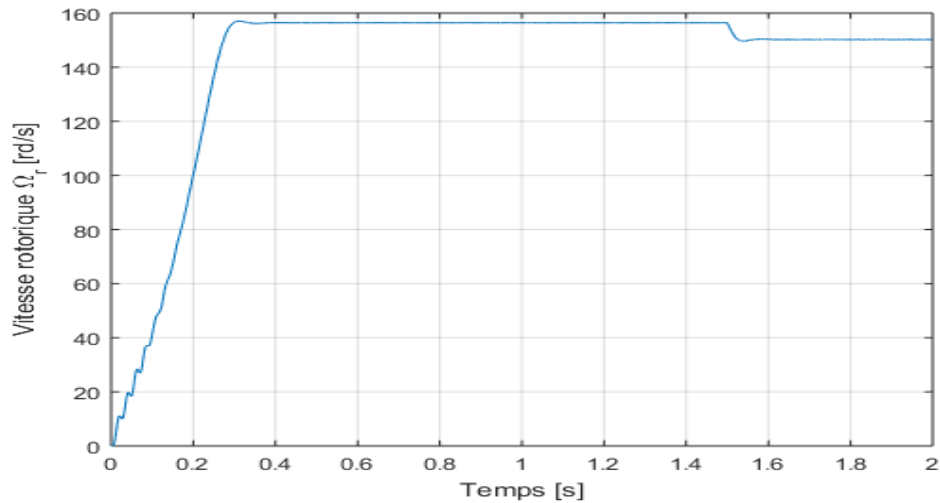


Figure III.8 : Vitesse de rotation de la machine en régime dégradé avec application d'un couple résistant de 13.5 N.m à l'instant de temps : 1.5 s.

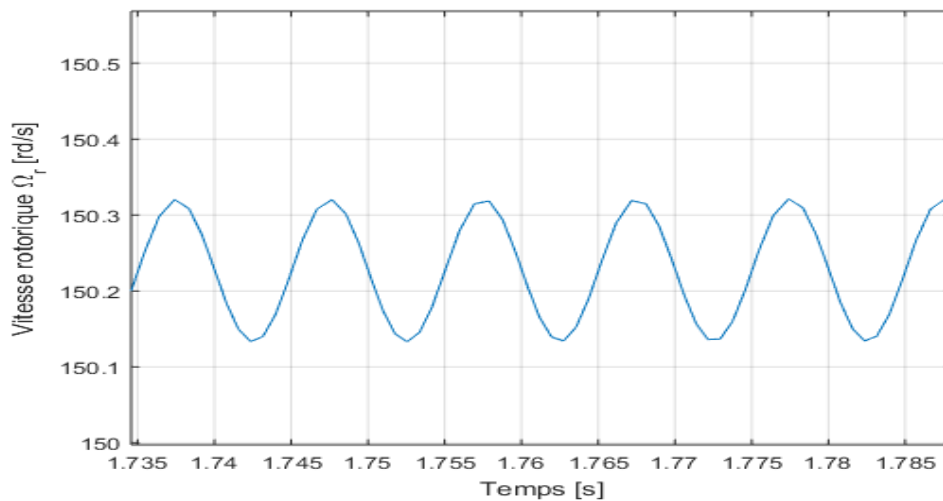


Figure III.9 : Zoom de la vitesse de rotation de la machine en régime dégradé.

La figure (III.8) représente l'évolution de la vitesse de rotation de la machine, nous remarquons une légère ondulation lors de l'ouverture d'une phase statorique.

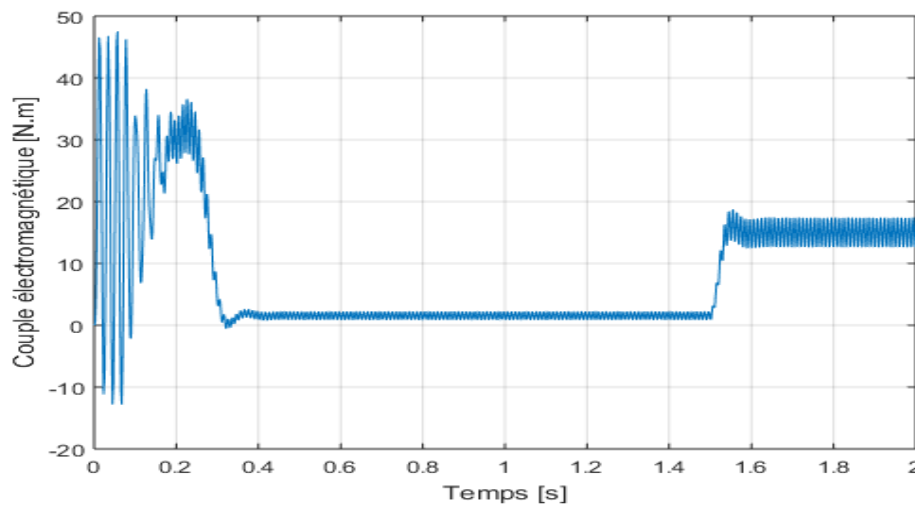


Figure III.10 : Couple électromagnétique développé en régime dégradé.

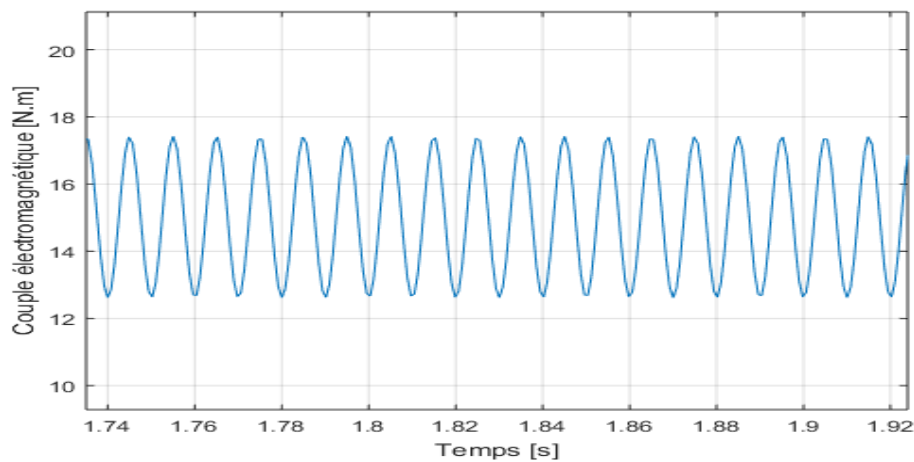


Figure III.11 : Zoom du couple électromagnétique développé en régime dégradé.

A partir de la figure (III.10), l'analyse du couple électromagnétique montre une légère modulation vient perturber l'évolution du couple lors de l'ouverture d'une phase statorique.

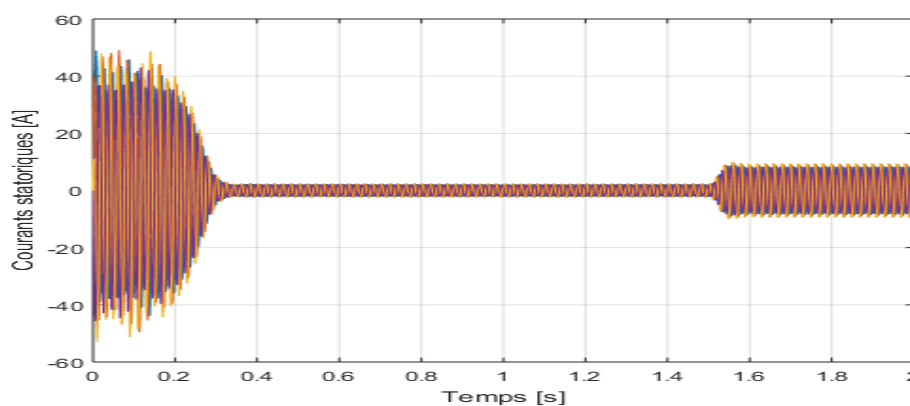


Figure III.12 : Courants statoriques en régime dégradé.

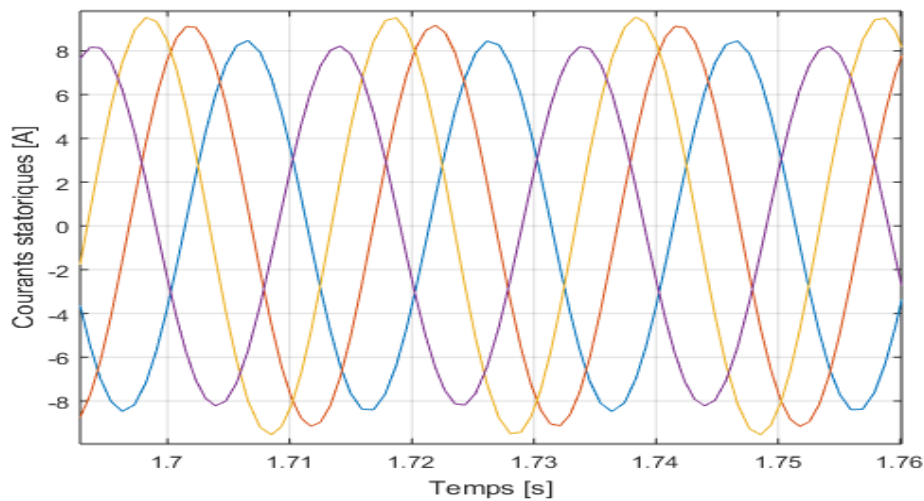


Figure III.13 : Zoom des courants statoriques en régime dégradé.

L'allure (III.12) représente l'évolution du courant statorique, l'ouverture d'une phase statorique à provoquer un déséquilibre dans les performances de la machine.

III.3.2. Ouverture de deux phases adjacentes

Dans le présent cas nous simulons l'ouverture de deux phases adjacentes (phases « d » et « e »).

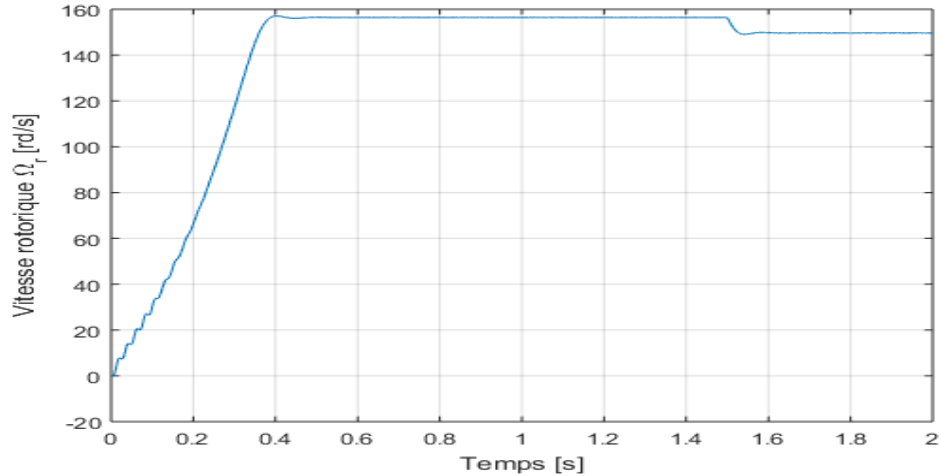


Figure III.14 : Vitesse rotorique dans le cas de l'ouverture de deux phases adjacentes.

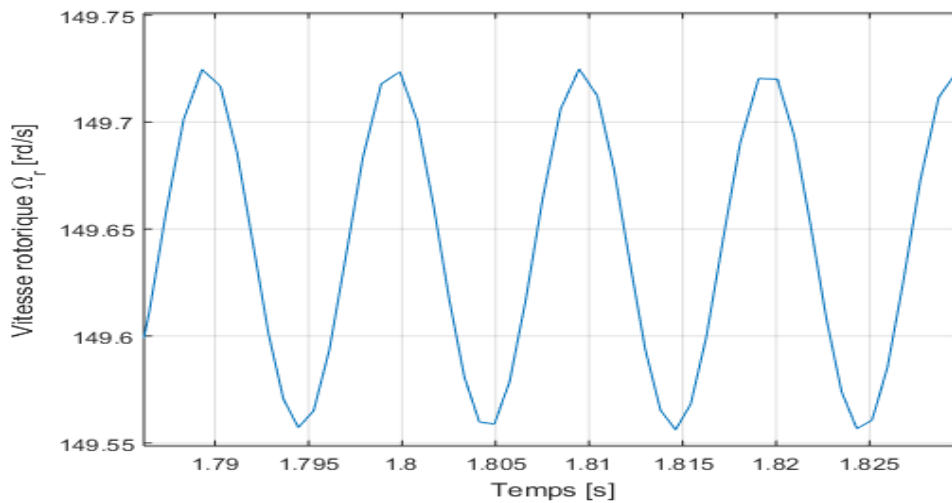


Figure III.15 : Zoom de la vitesse rotorique dans le cas de l'ouverture de deux phases adjacentes.

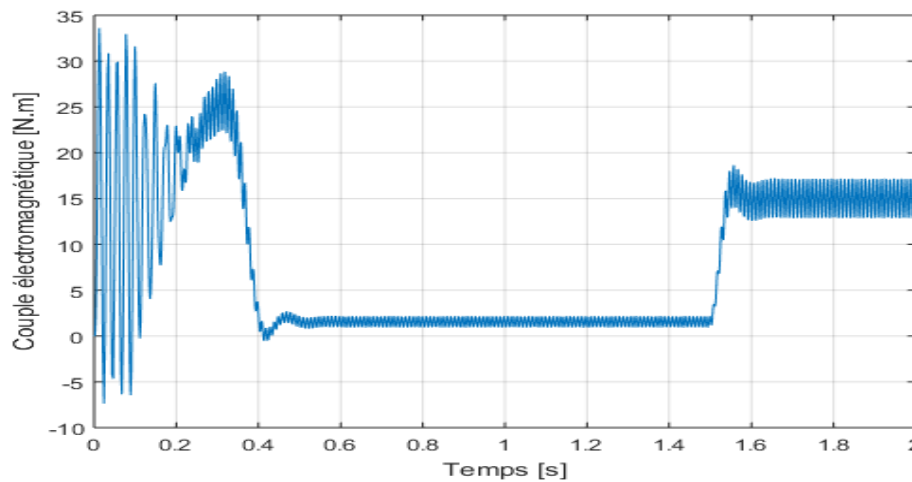


Figure III.16 : Couple électromagnétique développé dans le cas de l'ouverture de deux phases adjacentes.

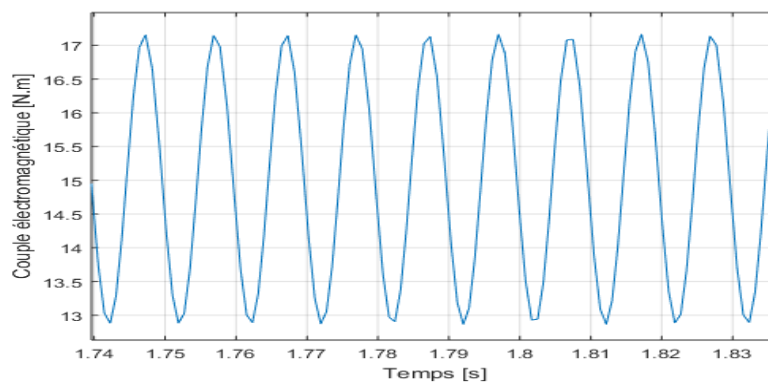


Figure III.17 : Zoom du couple électromagnétique développé dans le cas de l'ouverture de deux phases adjacentes.

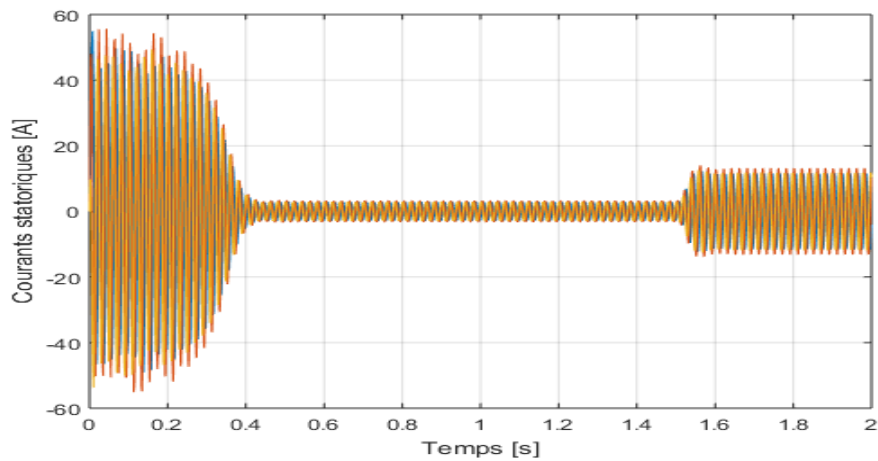


Figure III.18 : Courants statoriques dans le cas de l'ouverture de deux phases adjacentes.

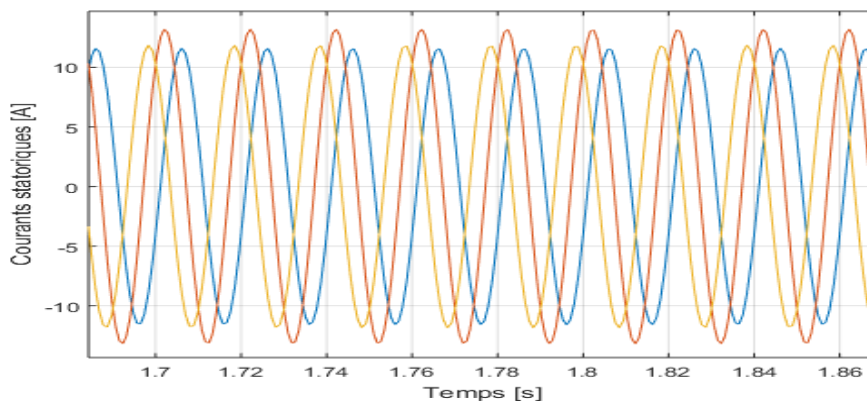


Figure III.19 : Zoom des courants statoriques dans le cas de l'ouverture de deux phases adjacentes.

III.3.3. Ouverture de deux phases non adjacentes

Dans le présent cas nous simulons l'ouverture de deux phases adjacentes (phases « c » et « e »).

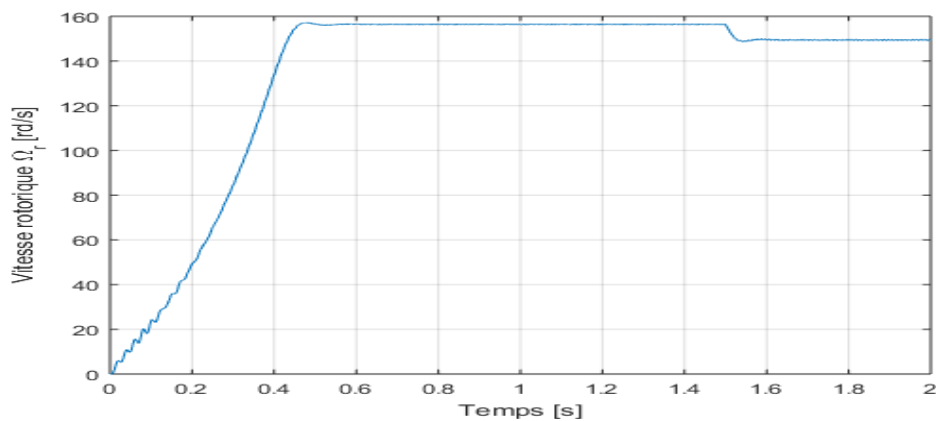


Figure III.20 : Vitesse rotorique dans le cas de l'ouverture de deux phases non adjacentes.

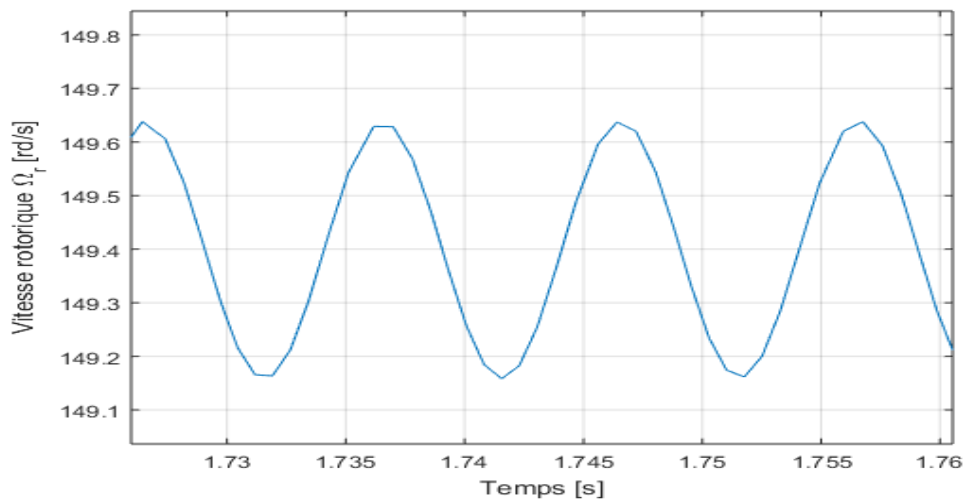


Figure III.21 : Zoom de la vitesse rotorique dans le cas de l'ouverture de deux phases non adjacentes.

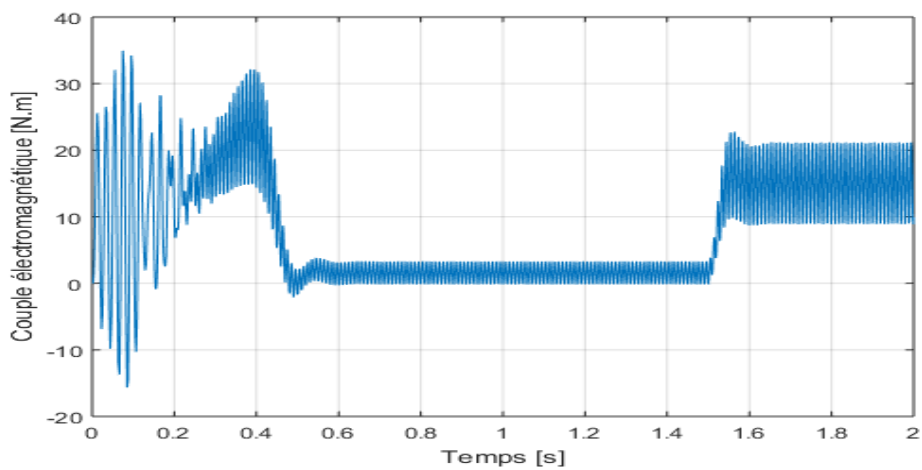


Figure III.22 : Couple électromagnétique le cas de l'ouverture de deux phases non adjacentes.

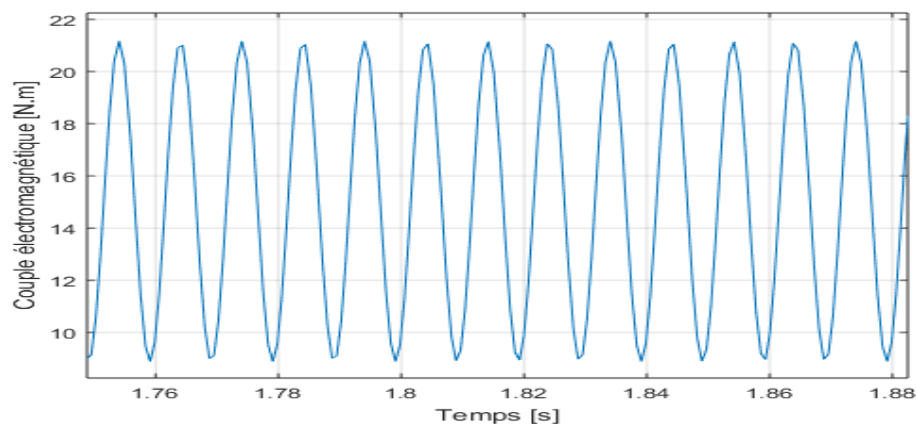


Figure III.23 : Zoom du couple électromagnétique dans le cas de l'ouverture de deux phases non adjacentes.

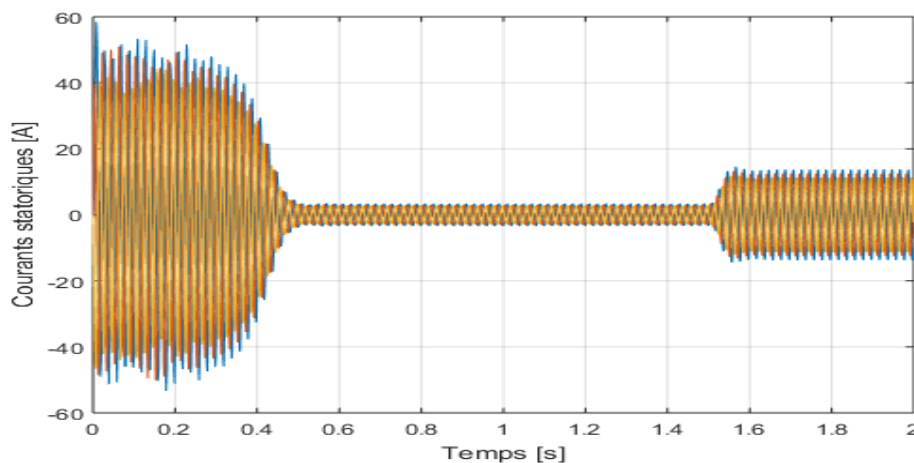


Figure III.24 : Courants statoriques dans le cas de l'ouverture de deux phases non adjacentes.

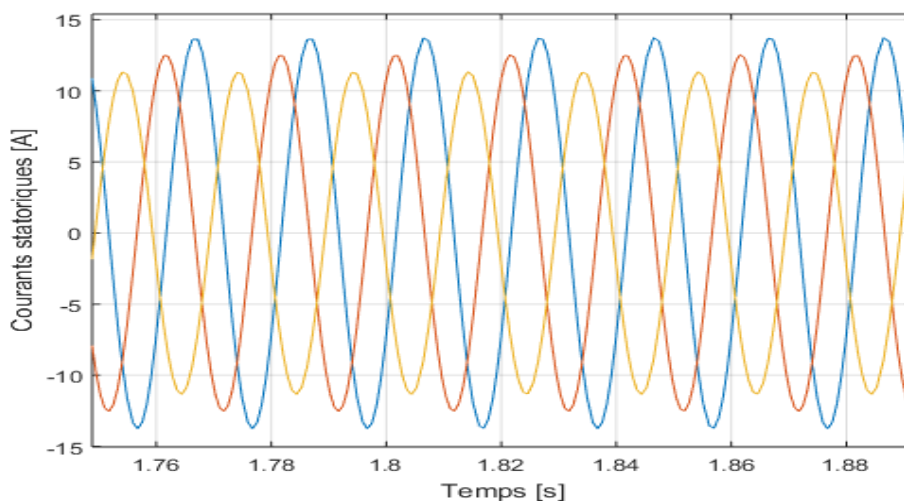


Figure III.25 : Zoom des courants statoriques dans le cas de l'ouverture de deux phases non adjacentes.

III.4. Interprétation des résultats

Dans ces essais, ouverture de deux phases statoriques adjacentes et non adjacentes, on constate un déséquilibre très important dans le fonctionnement de la machine lors de l'ouverture de deux phases non adjacentes par rapport à deux phases adjacentes, la simulation a montré que le moteur reste fonctionnel avec une vitesse légèrement chutée. Le couple est un peu pulsatoire mais suit toujours le couple résistant.

Conclusion

Dans ce chapitre est faite la validation du modèle de machine asynchrone à cage d'écureuil en présence de défaillances. Ces derniers qui peuvent être un court-circuit entre les spires d'une même phase et le court-circuit entre phase ou entre bobines, et la coupure d'une phase qui tient compte du déséquilibre de la matrice de résistances et d'inductances rotoriques en situation de défaillances. En effet, ces défauts nous permettent d'analyser et d'expliquer leur influence sur les grandeurs de la machine tels les courants, le couple et la vitesse. Ainsi les résultats obtenus sont en très bonne conformité avec les observations et les résultats qualitatifs donnés par d'autres travaux ; montrant aussi la validation et l'efficacité du modèle complet.

Conclusion générale

La machine asynchrone tient une place très importante dans le monde industriel d'aujourd'hui grâce à sa robustesse et à sa simplicité de construction. Actuellement, la structure polyphasée intéresse aussi le monde de la recherche que celui de l'industrie car, bien que plus coûteuse que la structure triphasée, elle présente plus de fiabilité et offre plus d'options pour la réalisation d'une commande tolérante aux défauts d'ordre électrique (au niveau du moteur ou de l'onduleur de tension).

Dans les applications industrielles, les machines asynchrones nécessitent une détection rapide et précoce de ses défaillances à cause de leurs utilisations fréquentes et grandissantes en diverses applications. Car l'apparition d'un défaut mène souvent à son arrêt. Le travail présenté dans ce mémoire à traiter d'une part la modélisation de la machine asynchrone pentaphasée à cage d'écureuil en régime sain, d'autre part en présence des défauts statoriques et rotoriques pouvant survenir au sein des machines asynchrones.

Nous avons exposé, dans un premier chapitre, une introduction qui a pour but de présenter en premier temps les éléments de construction de la machine asynchrone polyphasée. Dans un deuxième temps, l'initiation aux différents types de machine multiphasées. Nous avons en suite, montré les domaines d'applications et présenter les avantages de ces dites machines. D'autres parts, nous avons présenté les inconvénients que posent ces machines.

En second chapitre, nous avons évoqué la modélisation de la machine asynchrone à cage d'écureuil, en utilisant la méthode des Circuits Electriques Magnétiquement Couplés ou bien la méthode des mailles. En effet, une méthodologie permettant d'aboutir à la formulation des différentes équations régissant le modèle est faite, ainsi que le calcul des différentes inductances et mutuelles inductances est nécessaires dans le but de les utilisées pour la validation de ce modèle. Aussi la simulation de la machine en régime sain et en situation de défauts est faite.

Dans le troisième chapitre, nous nous sommes intéressé a l'apparition des défauts au stator, en suite nous avons pu établir un modèle réel de la machine asynchrone à cage en développant les différentes équations régissant le fonctionnement de la machine.

Les résultats de la simulation des deux cas sont convaincants parce qu'ils concordent avec ceux publiés dans plusieurs travaux.

En conclusion, ce travail pourrait donner lieu à des études complémentaires tels que :

- Approfondir l'étude des défauts dans la machine, en particulier les défauts mécaniques et magnétiques.
- Les méthodes de diagnostic doivent être améliorées, c'est-à-dire que des essais complémentaires sur des moteurs de différentes puissances doivent être effectués pour les rendre plus fiables et plus sûres.

A. Paramètre de la machine asynchrone à cage d'écureuil

La machine asynchrone à cage utilisée, est une machine de 3.2kW, de deux paires de pôles. Le stator de cette machine se compose de 160 encoches alors que la cage se compose de 16 barres. La longueur active du rotor est de 65 m, l'épaisseur d'entrefer est de 0,00025m, et le rayon de la machine au milieu de l'entrefer 0,03575m.

A.1 Caractéristique nominales :

Puissances nominale	$P_n = 3.2 \text{ Kw}$
Tension nominale	220V/380V
Courant nominal	$I_n = 4,5/2,6 \text{ A}$
Vitesse nominale	$\Omega_n = 1500 \text{ tr /min}$
Nombre pairs de pôles	$p = 2$

A.2 Paramètre de la machine :

Inductance de fuite statorique	$L_{fs} = 0,0018 \text{ [H]}$
Résistance d'une barre rotorique sain	$R_b = 1.8 \text{ [\Omega]}$
Inductance d'une barre rotorique	$L_b = 10^{-7} \text{ [H]}$
Résistance totale de l'anneau de court-circuit	$R_e = 72.10^{-6} \text{ [\Omega]}$
Inductance principale statorique	$L_s = 0.018 \text{ [H]}$
Moment d'inertie	$J = 0.0085 \text{ [kg.m}^2\text{]}$
Coefficient de frottement visqueux	$f = 0.005 \text{ [N.s/m]}$
Inductance totale de l'anneau de court-circuit	$L_e = 10^{-7} \text{ [H]}$

- [1] : K.Iffouzar, « Etude et Contrôle des Machines Asynchrones Polyphasées en Modes Normal et Dégradé. Application dans un Système Embarqué » Thèse de Doctorat, Université de Bejaïa., 2016.
- [2] : A.Abderrahmane, « La Commande par DTC-SVM d'une machine asynchrone triphasé à cage » Université M'hamed Bougara De Boumerdes ,2012.
- [3] : S.Haremim, Cours 4^{ème} année électrotechnique .UMMTO.
- [4] : R.Lakhdar, « Modélisation, identification expérimentale et commande vectorielle d'un moteur asynchrone triphasé à cage », Mémoire de Master, Université d'Ouargla, 2015
- [5] :R.Bousseksou, « Modélisation analytique des machines Asynchrone application au diagnostic » Mémoire de Magister, Université de Constantine, 2007
- [6] : A.Bouguerne, « Diagnostic automatique des défauts des moteurs asynchrones », Mémoire de Magister, Université de Constantine, 2009.
- [7] : L.Kerszenbaum et C. F. Landy, « The existence of large inter bar currents in the three phase squirrel cage motors with rotor-bar and en-ring faults » IEEE Transactions on Power Apparatus Systems, Vol. PAS-103, n°7, pp.1854- 1862, July 1984.
- [8] :Z.Ahmed, « Diagnostic des défauts de cassure de barresrotoriques dans la machine asynchrone triphasée » Mémoire de Master, 2013, Université Mohamed Khider Biskra
- [9] :E.A. Klingshirn, « High phase order induction motors- Part I- Description an tehorycal consideration and Part 2 – Experimental results », IEEE Transaction On Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-102, No 1, 1983.
- [10] : H.A.Tolyat, T.A. Lipo, W. Coleman, « Analysis of a concentratedwinding induction machine for adjustable speed drive application. Part 1 (motor design an performance) », IEEE Trans.Energ. Conv., Vol 6, No. 4, pp. 684-692, 1991.
- [11] : J.F.Doyon, « Etude et simulation des groupes convertisseurs-machines synchrones à six phases », Thèse de Magister, Ecole De Technologie Supérieure.Université de QUEBEC, Septembre 2011
- [12] : D.Hadiouche, « Contribution à l'étude de la machine asynchrone double étoile : modélisation, alimentation et structure », Thèse de Doctorat de l'Université de Henri Poincaré, France, 2001.
- [13] : E Merabet, «Commande floue adaptative d'une machine Asynchrone double étoile», Thèse de Magister de l'Université de Batna, 04 /06 / 2008.
- [14] :A.Khezzar, M.E.K. Oumaamar, A. Lebaroud and M.Boucherma, « novel stydy of induction motors withbroken bar fault. »ElectricalLaboratory of Constantine, Algeria, 2004.
- [15] : B.Liang, B.S.Payne and A.D. Iwniski, « Simulation and faults detection of three-phase induction motors. » Elsevier Mathematics and Computers in Simulation N°.61, PP.1-15,2002.

- [16] : G.Didier et H.Razik, « Sur la détection d'un défaut au rotor des moteurs asynchrones. » Publié dans la revue 3EI, N°.27, Décembre 2001.
- [17] : H.Razik, G.Didier, « Notes de cours sur la diagnostic de la machine asynchrone. » Chercheur de GREEN. Groupe de Recherche en Electrotechnique et Electronique de Nancy. Université Henri Poincaré-Nancy, Janvier 2003.
- [18] : L.Baghli, « contribution à la commande de la machine asynchrone, utilisation de la logique floue, des réseaux de neurones et des algorithmes génériques. »Thèse de Doctorat, Université de Nancy 1, Janvier 1999.
- [19] : M.Bouharkat, « Etude de l'évolution des courants rotoriques d'une machine asynchrone à cage en régime dynamique. »Thèse de Doctorat, Université de Batna, 2006.
- [20] : R.Casimir, « Diagnostic des défauts des machines asynchrones par reconnaissances des formes. »Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Lyon, 2003.
- [21] : V.Devanneaux, B.Dagues, J.Faucher and G.Barakat, « An accurate model of squirrel cage induction machines under stator faults. »Elsevier Mathematics and Computers in simulation N°.63, PP.377-391, 2003.
- [22] : T.Abdeljoud et B.Lamoudi et B.Mouhd « Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation » Mémoire License en Electrotechnique, Université de Kasdi Merbah Ouargla, 2013/2014.
- [23] : A.Menacer, M.Naitsaid ,H.Benakcha and S.Drid, « Stator current analysis of incipient fault in to asynchron motors rotor bars using Fourier fasttrans form. » Journal Of Electrical Enginnering.Vol, 55 N°,5-6, 2004.
- [24] : G.Didier, « Modélisation et diagnostic de la machine asynchrone en présence des défaillances. »Thèse de doctorat, Université de Henry Poincaré, Nancy-I, 2004.
- [25] : N.Yassa, « Modélisation des machines asynchrones dédiée au diagnostic des défauts de court-circuit inter-spires et des cassures de barres et d'anneaux. » Mémoire de magister, Université U.M.M.T.O, 2009.
- [26] : A.H.Bonnett and G.C.Soukup, « Cause and analysis of stator and rotor failures in three-phasesquirrel-cage induction motors », IEEE Trans. onIndustry Applications, vol. 28, no. 4, July/August 1992, pp. 921-937.
- [27] : H .Razik, « Le contenu spectral du courant absorbé par la machine asynchrone en cas de défaillance, un état de l'art », Green-UHP.Faculté des Sciences. Revue 3EI n°29-Juin 2002 page 48-52.
- [28] : H.Miloud « Etude des Défauts dans la Machine Asynchrone à Cage d'Ecureuil par l'emploi de la Fonction d'Enroulement Modifiée », Mémoire de Magister, Université d'Oran, 2009.
- [29] : A.Bendi abdellah, N.Benouzza, D.Toumi, « Cage motorfaultsdetection algorithm using speed estimation and current analysis », Acta Electrotechnica et Informatica No. 2, Vol. 7, 2007.

[30] : D.Malika, « Diagnostic des Défaits dans les Machines Electriques et leur Surveillance par emploi de l'Intelligence Artificielle », Thèse Magister 2004.USTMBO.

[31] : P.Vas, « Parameter Estimation, Condition Monitoring, and Diagnosis of Electrical Machines »,ClarendronPress, Oxford, 1993. IEEE Trans.Ind.Apll.vol.28 N°4, July/August 1992.