



Université Mohamed Khider de Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de génie électrique

MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies
Electrotechnique
Machines électriques

Réf. :

Présenté et soutenu par :
MESSAOUDI Mohamed Aziz

Le : lundi 25 juin 2018

Testes virtuels appliqués aux machines électriques

Jury :

M.	GOLEA Amar	Pr	Université de biskra	Président
M.	GHOOGAL Adel	MCA	Université de biskra	Rapporteur
M.	DERGHAL Hamid	MAA	Université de biskra	Examineur

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche scientifique



Université Mohamed Khider Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrique
Filière : Electrotechnique
Option : Machines électriques

Thème :

Testes virtuels appliqués aux machines électriques

Proposé par : MESSAOUDI Mohamed Aziz

Dirigé par : GHOGGAL Adel

Remerciements

*Je tiens à remercier tout d'abord Monsieur **GHOGGAL Adel** , Docteur à l'Université de Biskra , de m'avoir fait le grand honneur d'être mon encadreur.*

*Je remercie de même Monsieur **GOLEA Amar** , Professeur à l'Université de Biskra qui me fait l'honneur de présider le jury de soutenance de ce mémoire.*

*Je voudrais exprimer toute ma reconnaissance à Monsieur **DERGHAL Hamid** , Maître assistant de classe A à l'Université de Biskra pour m'avoir fait l'honneur d'être examinateur et membre du jury*

Je tiens à remercier aussi mes parents, mes frères et soeurs qui ont toujours été à coté de moi au besoin

Sommaire

Liste des symboles utilisés	
INTRODUCTION GENERALE.....	1
CHAPITRE I : Les Défaits de la machine asynchrone : Problématique...3	
I.1 INTRODUCTION.....	3
I.2 CONSTITUTION DE LA MACHINE ASYNCHRONE	3
I.2.1 Le stator	4
I.2.2 Le rotor à cage.....	5
I.3 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT D'UNE MACHINE ASYNCHRONE.....	6
I.4 INTERET DU DIAGNOSTIC	7
I.5 ETUDE DES DIFFERENTS DEFAUTS AFFECTANT LE MOTEUR	7
ASYNCHRONE.	
I.5.1 Défaits statorique	8
I.5.2 Défaits rotorique	9
I.5.2.1 Défaut de cassure des barres	9
I.5.2.2 Cassure d'une portion d'anneau de court-circuit	10
I.5.3 Défaits d'excentricité.....	10
I.5.4 Défaits de roulement	12
I.6 DIFFERENTS METHODES DE DIAGNOSTIC	12
I.6.1 Diagnostic par l'analyse des vibrations mécaniques	13
I.6.2 Diagnostic par l'analyse du flux magnétique axial de fuite.....	13
I.6.3 Diagnostic par mesure du courant statorique.....	13
I.6.4 Diagnostic par l'analyse du couple électromagnétique	14
I.6.5 Diagnostic chimiques.....	14
I.7 CONCLUSION.....	14

CHAPITRE II : MODELISATION DEDIEE AU DIAGNOSTIC DE LAMACHINE ...	15
ASYNCHRONE TRIPHASEE A CAGE	
II.1 INTRODUCTION.....	15
II.2 MODELE MULTI-ENROULEMENT	16
II.2.1 Equations des tensions	16
II.2.2 Equation mécanique	20
II.2.3 Système d'équations global	22
II.3 COUPLES PARASITES.....	22
II.3.1 Couples parasites asynchrones	22
II.3.2 Harmoniques de denture.....	24
II.3.3 Couples parasites synchrones	25
II.4 LA COMBINAISON DU NOMBRE D'ENCOCHE STATORIQUE ET NOMBRE DE BARRE ROTORIQUE	25
II.5 HARMONIQUES D'ENCOCHES ROTORIQUES.....	25
II.6 CONCLUSION.....	26
Chapitre III: Simulation Et Résultats.....	27
III.1 INTRODUCTION.....	27
III.2 TESTE VIRTUEL 1 (CARACTERISTIQUE ELECTROMECHANIQUE)	27
III.3 TESTE VIRTUELLE 2 (VISIBILITE DE PSH).....	34
III.3.1 Le cas système équilibré	35
III.3.2 Le cas système non équilibré.....	39
III.4 CONCLUSION.....	42
CONCLUSION GENERALE.....	43

Liste des symboles

Ω : Surface enfermée par un contour.

μ_0 : Perméabilité magnétique de l'air.

H : Champ magnétique.

B : Induction magnétique.

ϕ : Flux magnétique.

L_{BA} : Inductance mutuelle entre l'enroulement B et A.

L_b : Inductance de fuite d'une barre rotorique.

L_e : Inductance de fuite d'un segment d'anneau de court-circuit.

L_{mr} : Inductance de magnétisation d'une maille rotorique.

L_{Am} : Inductance de magnétisation d'une phase statorique.

L_{fA} : Flux de fuite d'une phase statorique.

ψ_{BA} : Flux mutuelle total entre deux enroulements A et B.

F : Force magnétomotrice.

F: Force mécanique

g: Glissement.

R_b : Résistance d'une barre rotorique.

R_e : Résistance d'un anneau de court-circuit.

r_s : Résistance d'une phase statorique.

$[R_s]$: Matrice des résistances statoriques.

$[R_r]$: Matrice des résistances rotoriques.

$[R]$: Matrice globale des résistances de la machine.

$[V_s]$: Matrice des tensions statoriques.

$[V_r]$: Matrice des tensions rotoriques.

$[I_s]$: Matrice des courants statoriques.

$[I_r]$: Matrice des courants rotoriques.

$[\Omega_r]$: Vitesse mécanique du rotor.

$[\omega_s]$: Pulsation statorique.

$[\theta_r]$: Position mécanique du rotor.

Liste des symboles

$[J]$: Densité de courant.

$[J_T]$: Moment d'inertie totale.

$[i]$: Courant électrique.

P : Nombre de paires de pôles.

N_s : Nombre de spires.

N_e : Nombre d'encoches statoriques.

N_b : Nombre de barres rotoriques.

n : Fonction de distribution.

n_{os} : Ordre des harmoniques de temps de la FMM.

n_d : Ordre de l'excentricité.

f_s : Fréquence d'alimentation.

f_{he} : Fréquence des harmoniques d'encoches rotoriques.

f_{ext} : Fréquence de défaut de bague extérieur.

f_b : Fréquence caractéristique du défaut de barres.

f_{mix} : Fréquence caractéristique du défaut d'excentricité mixte.

f_{st} : Fréquence caractéristique du défaut statorique.

PSH : Principals slots harmonics (Harmoniques d'encoches principales)

Liste de figures

Chapitre I : Les Défaits de la machine asynchrone : Problématique

Figure I.1 Eléments de constitution d'une machine asynchrone à cage d'écureuil	4
Figure I.2 vue schématique en perspective du stator (circuit magnétique, conducteurs d'encoches, tête de bobines). (enroulement statorique d'une machine a 4 pôles)	5
Figure I.3 vue schématique en perspective du rotor (tôles magnétiques, conductrices d'encoches (barres) et anneaux de court-circuit	6
Figure I.4 Proportion des défauts	7
Figure I.5 défauts dans le moteur asynchrone	8
Figure I.6 défauts statoriques	9
Figure I.7 cassure d'une portion d'anneau de court-circuit	10
Figure I.8 Modélisation schématique de l'excentricité statique et dynamique	11
Figure I.9 dimension du roulement à bille	12

CHAPITRE II : Modélisation dédiée au diagnostic de la machine asynchrone triphasée à cage

Figure II.1. Structure multi-enroulements du rotor.	16
Figure II.2. Circuit électrique équivalent de la cage rotorique.	17
Figure II.3. Schéma électrique équivalent de la machine asynchrone	24

Chapitre III: Simulation Et Résultats

Figure III.1 la vitesse de moteur dans état sain	27
Figure III.2 le couple électromagnétique de moteur dans état sain	28
Figure III.3 la caractéristique électromécanique pour Nb =28 sans inclinaison l'état sain	28
Figure III.4 la caractéristique électromécanique pour Nb =29 sans inclinaison l'état sain	29
Figure III.5 la caractéristique électromécanique pour Nb =29 sans inclinaison avec 2 barres cassé	29
Figure III.6 la caractéristique électromécanique pour Nb =28 avec inclinaison	30
Figure III.7 la caractéristique électromécanique pour Nb =27 avec inclinaison	30
Figure III.8 la caractéristique électromécanique pour Nb =29 avec inclinaison	31
Figure III.9 la caractéristique électromécanique pour Nb =30 avec inclinaison	31
Figure III.10 la caractéristique électromécanique pour Nb =28 avec inclinaison et 2 barres cassé	32
Figure III.11 la caractéristique électromécanique pour Nb =29 avec inclinaison	32

et 2 barres cassé

Figure III.12 la caractéristique électromécanique pour Nb =28 avec résistance rotorique modifié 33

Figure III.14 la caractéristique électromécanique pour Nb =30 avec résistance rotorique modifié 34

Le cas système équilibré :

Figure III.15 Spectre du courant de la phase A statorique pour Nb=28. état sain avec inclinaison 35

Figure III.16 Spectre du courant de la phase A statorique pour Nb=28. état sain sans inclinaison 35

Figure III.17 Spectre du courant de la phase A statorique pour Nb=29. État sain avec inclinaison 36

Figure III.18 Spectre du courant de la phase A statorique pour Nb=29. état sain sans Inclinaison 37

Figure III.19 Spectre du courant de la phase A statorique pour Nb=30. état sain avec Inclinaison 37

Figure III.20 Spectre du courant de la phase A statorique Nb=30. état sain sans inclinaison 38

Le cas système non équilibré :

Figure III.21 Spectre du courant de la phase A statorique pour Nb=28. état sain avec Inclinaison 39

Figure III.22 Spectre du courant de la phase A statorique pour Nb=28. état sain sans inclinaison 39

Figure III.23 Spectre du courant de la phase A statorique pour Nb=29 . état sain avec inclinaison 40

Figure III.24 Spectre du courant de la phase A statorique pour Nb=29 . état sain sans inclinaison 40

Figure III.25 Spectre du courant de la phase A statorique pour Nb =30. état sain avec inclinaison 41

Figure III.26 Spectre du courant de la phase A statorique pour Nb=30. état sain avec inclinaison 41

Introduction Générale

Dans de nombreux secteurs industriels, la sûreté de fonctionnement est un enjeu majeur pour assurer une continuité et une sûreté optimale de l'outil de production. Tout changement indésirable ou un arrêt inattendu provoqueront des pertes économiques considérables. Pour éviter ce genre de problèmes, les chaînes de production doivent être dotées par des systèmes de diagnostic fiables permettant de détecter n'importe quel défaut ou changements dans l'état de fonctionnement avant la défaillance totale

La machine asynchrone à cage d'écureuil est connue pour sa robustesse, sa simplicité de fonctionnement et ses faibles coûts d'achat et de maintenance. Il n'en reste pas moins que, comme toute machine soumise à des efforts mécaniques ou électrodynamiques, elle est sujette à défaillances. Toutefois, cette machine peut être affectée par des défauts potentiels qui se répercutent sur la sécurité de la production, la qualité du service et la rentabilité des installations. Par conséquent, il est très intéressant de développer des systèmes de diagnostic pour détecter de manière anticipée les défauts pouvant surgir dans ce type de machine [11].

La maintenance industrielle, qui a pour vocation d'assurer le bon fonctionnement des outils de production, est une fonction stratégique dans les entreprises. Intimement liée au remarquable développement technologique, à l'apparition de nouveaux modes de gestion, à la nécessité de réduire les coûts de production, elle est en constante évolution. Elle n'a plus aujourd'hui comme seul objectif de réparer l'outil de travail mais aussi de prévoir et éviter les dysfonctionnements [1].

Les tests et essais pratiques sur les machines asynchrones sont très importants afin de s'informer des performances de la machine de ses caractéristiques et de son comportement vis-à-vis des variations qu'elle peut subir en son état interne.

Ainsi, un défaut peut engendrer une altération des caractéristiques générales de la machine en même temps qu'un calcul énoncé pendant la conception de celle-ci et pour des fins particulièrement didactiques, ce mémoire tente de proposer quelques tests virtuels répondant à la problématique de créer à titre d'exemple la reproduction de caractéristique mécanique en incluant une fausse combinaison de nombre de barres rotoriques-nombre d'encoches statoriques peut bien informer virtuellement de la présence des couples parasites synchrones et asynchrones. La présente thèse est organisée en trois chapitres résumés comme suit:

Le premier chapitre, est consacré à l'état de l'art du diagnostic de défaut de la machine asynchrone. Une citation des divers défauts pouvant affecter le bon fonctionnement de la machine asynchrone ainsi que les différentes méthodes de détection et diagnostic de ces défauts sont représentés.

Un deuxième chapitre sera consacré à la formulation mathématique du modèle de la machine asynchrone triphasée à cage. Définition des couples parasite synchrone ou asynchrone, harmonique d'encoche rotorique et influence de la combinaison entre le nombre barre rotorique-nombre d'encoche statorique .

Enfin, Le troisième chapitre est dédié à la présentation des résultats de simulation concernant le diagnostic du fausse combinai on nombre de barres rotorique-nombre encoche statorique et l'effet de la résistance rotorique sur le couple de la machine asynchrone a cage et la visibilité de PSH

Chapitre I

Les Défaits de la machine asynchrone : Problématique

I.1 INTRODUCTION

. Le moteur asynchrone est de beaucoup le moteur le plus utilisé dans l'ensemble des applications industrielles, du fait de sa facilité de mise en œuvre, de son faible encombrement, de son bon rendement et de son excellente fiabilité

multiples défaillances peuvent apparaître dans la machine asynchrone. Elles peuvent être prévisibles, mécaniques, électriques ou magnétiques et leurs causes sont très variées. Pour cette raison les méthodes de diagnostic des machines électriques ont évolué. Le diagnostic est une partie de la surveillance vise permises objectifs de trouver la cause des dysfonctionnements.

Dans le premier chapitre on va essayer de mettre le doigt sur les différentes questions qui se posent vis-à-vis des défauts de la machine asynchrone, ce qui constitue en globalité la problématique du sujet.

I.2 CONSTITUTION DE LA MACHINE ASYNCHRONE

La machine asynchrone, souvent appelée moteur à induction comprend un stator et un rotor, constitués de tôles d'acier au silicium et comportant des encoches dans lesquelles on place les enroulements.

Le stator est fixe : on y trouve les enroulements reliés à la source. Le rotor est monté sur un axe de rotation. Selon que les enroulements du rotor sont accessibles de l'extérieure ou sont fermés sur eux mêmes en permanence,

On définit deux types de rotor : bobiné ou à cage d'écureuil. Toutefois, nous admettrons que sa structure est électriquement

Équivalente à celle d'un rotor bobiné dont les enroulements sont en court-circuit. Dans ce travail, nous nous intéressant à la machine asynchrone à cage [8].

Les éléments de constitution d'une machine asynchrone à cage d'écureuil sont illustrés dans la figure (I.1)

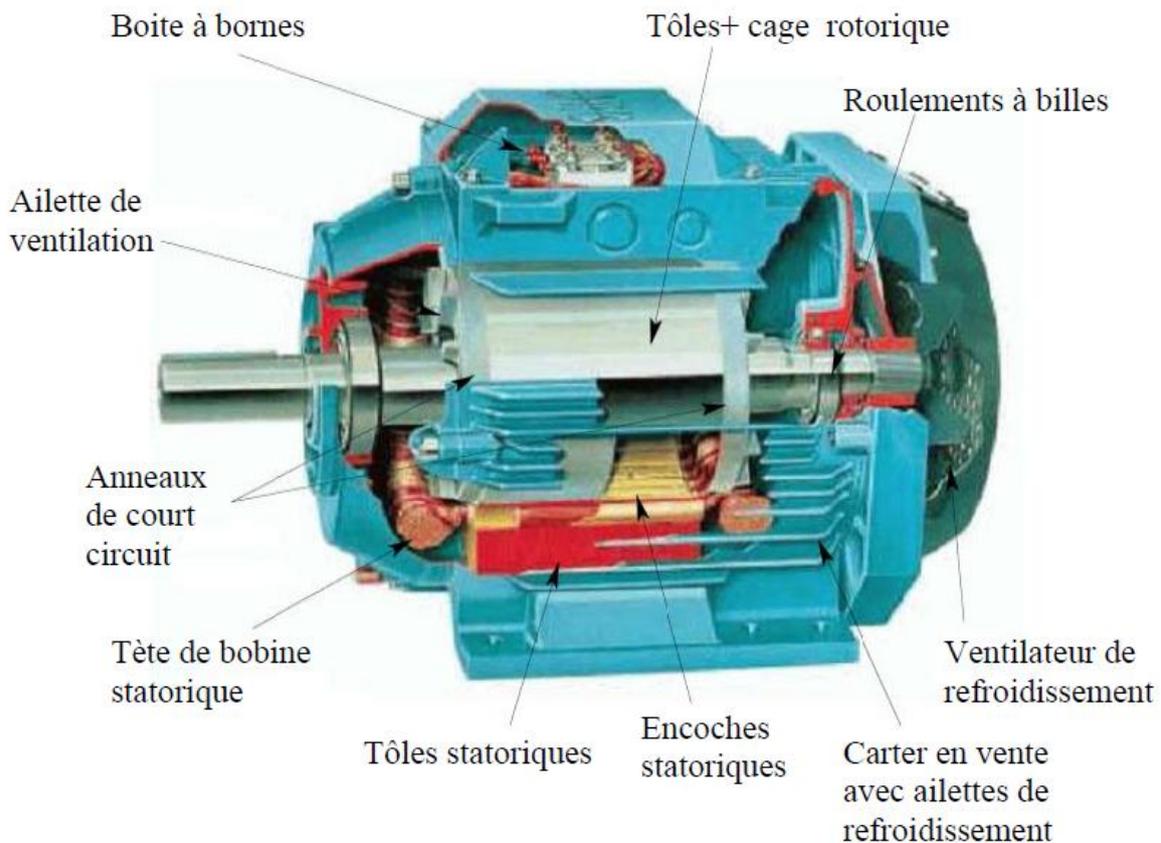


Figure I.1 Eléments de constitution d'une machine asynchrone à cage d'écurieil

I.2.1 Le stator

Il est constitué d'un enroulement bobiné réparti dans les encoches du circuit magnétique. ce circuit magnétique est constitué d'un empilage de tôles dans lesquelles sont découpées des encoches parallèles à l'axe de la machine figure (I.2). Le bobinage statorique peut se décomposer en deux parties : les conducteurs d'encoches et les têtes de bobines [10] [5].

Les conducteurs d'encoches permettent de créer dans l'entrefer le champ magnétique à l'origine de la conversion électromagnétique. les têtes de bobines permettent, quant à elles, la fermeture des courants en organisant la circulation judicieuse des courants d'un conducteur d'encoche à l'autre. L'objectif est d'obtenir à la surface de l'entrefer une distribution de courant la plus sinusoïdale possible, afin de limiter les ondulations du couple électromagnétique .

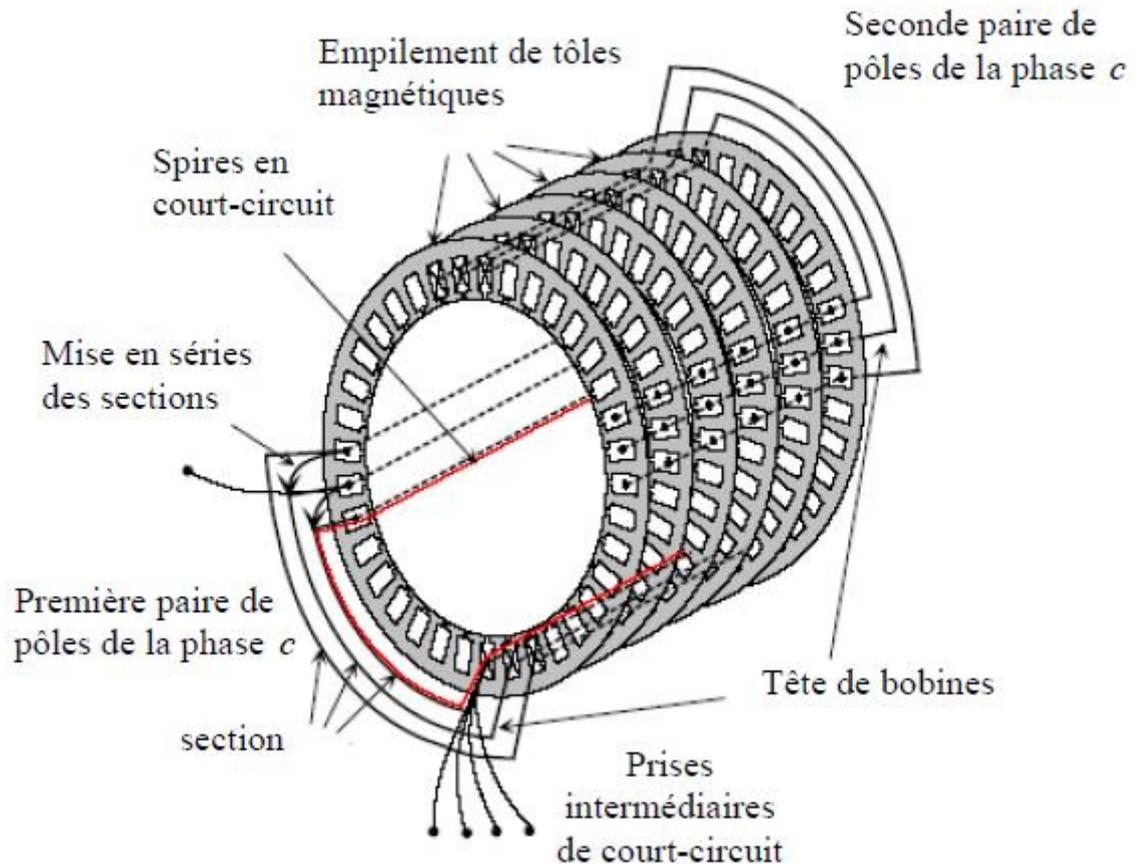


Figure I.2 vue schématique en perspective du stator (circuit magnétique, conducteurs d'encoches, tête de bobines). (enroulement statorique d'une machine à 4 pôles) [6]

I.2.2 Le rotor à cage

Dans le rotor à cage, les anneaux de court-circuit permettent la circulation des courants d'un conducteur d'encoche (barre 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 frettés 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 . 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 [3][5].

Son inconvénient majeur est qu'il a, au démarrage, de mauvaises performances (courant élevé et faible couple), c'est pour remédier à cette situation qu'ont été développés deux autres types de cages (rotor à double cage et rotor à encoches profondes).

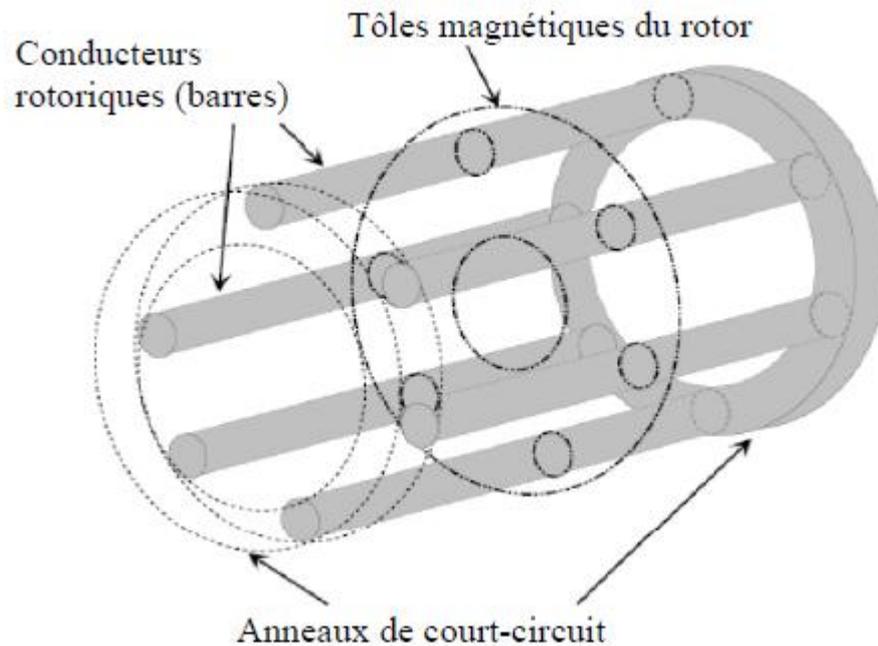


Figure I.3 vue schématique en perspective du rotor (tôles magnétiques, conductrices d'encoches (barres) et anneaux de court-circuit [6])

I.3 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT D'UNE MACHINE ASYNCHRONE

Le fonctionnement d'une machine 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.

De cette façon le fonctionnement d'une machine asynchrone est analogue à celui d'un transformateur : le stator étant comparable à l'enroulement primaire et le rotor à l'enroulement secondaire qui, dans le cas général, peut tourner à la vitesse de rotation donnée par le rapport suivant:

$$N_s = \frac{f}{p} \text{ tr/s} \quad \text{ou} \quad N_s = \frac{60f}{p} \text{ tr/min} \quad (\text{I.1})$$

L'interaction électromagnétique des deux parties d'une machine asynchrone (sans collecteur) n'est possible que lorsque la vitesse du champ tournant (N_s) diffère de celle du rotor (N_r), c'est-à-dire, lorsque $N_r \neq N_s$, car dans le cas contraire, c'est-à-dire lorsque $N_r = N_s$, le

champ serait immobile par rapport au rotor et aucun courant ne serait induit dans l'enroulement rotorique [3] [8] .

Le rapport $g = \frac{N_s - N_r}{N_s}$ est appelé glissement de la machine asynchrone.

I.4 INTERET DU DIAGNOSTIC

Pendant leurs fonctionnements, les moteurs peuvent être exposés à différents environnements hostiles ou avoir des défauts de fabrications. Les différents défauts internes du moteur (courts-circuits entre spires, roulements cassés, excentricité du rotor, ruptures de barres au rotor) et les différents défauts externes du moteur (coupure de phase, surcharge mécanique, rotor bloqué, surcharge électrique) peuvent se produire tôt ou tard.

Les statistiques des différents défauts dans les machines à asynchrone est illustré sur la figure (I.4)

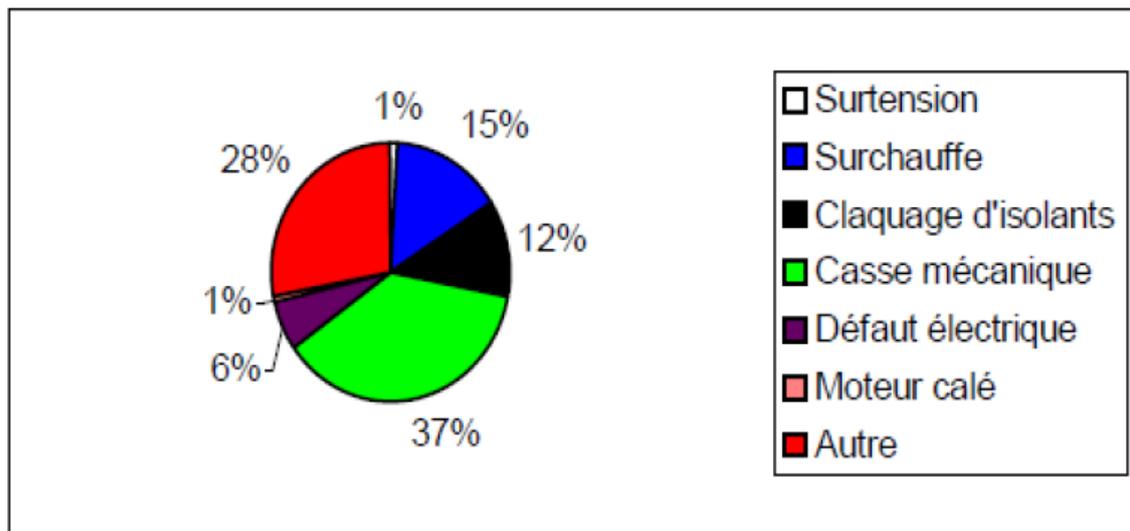


Figure I.4 Proportion des défauts [3].

I.5 ETUDE DES DIFFERENTS DEFAUTS AFFECTANT LE MOTEUR ASYNCHRONE

Bien que la machine asynchrone a la réputation d'être robuste, elle peut présenter comme tout autre machine électrique, des défaillances d'ordre électrique ou mécanique. Notre objectif est de détecter ces défauts en cours d'évolution ou en cours d'apparition. Parmi toutes les méthodes utilisées ou proposées, on se doit de prélever un ou plusieurs signaux pour :

- les traiter,
- les analyser,
- conclure à une défaillance ou non, avec certitude [2] [7] .

Les sources des défauts du moteur peuvent être internes, externes ou dues à l'environnement, comme présenté à la figure (I.5) . Les défauts internes peuvent être classifiés

selon leurs origines c'est-à-dire électriques et mécaniques. Habituellement, d'autres types de défauts de roulement et de refroidissement se rapportent aux défauts du rotor parce qu'ils appartiennent aux pièces mobiles.

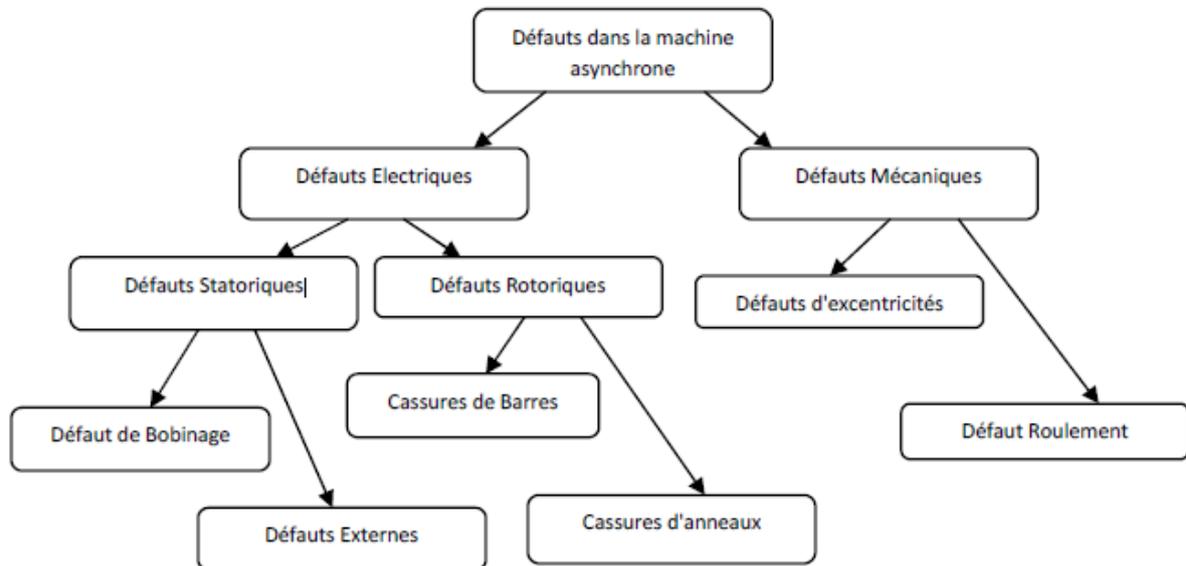


Figure I.5 défauts dans le moteur asynchrone

I.5.1 Défaits statorique

Ces défauts sont généralement liés à la dégradation de l'isolation électrique. Ils sont généralement connus comme des défauts de court-circuit d'une phase à la terre, court circuits entre spires de la même phase ou de court-circuit entre phases [4].

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. Les fréquences sont données par la relation :

$$f_{st} = fs \cdot \left(k \pm \frac{n \cdot (1 - g)}{p} \right) \quad (I.2)$$

$$n = 1.2.3.....(2p-1)$$

g : glissement

p : nombre de paire de pôles

fs : fréquence de l'alimentation

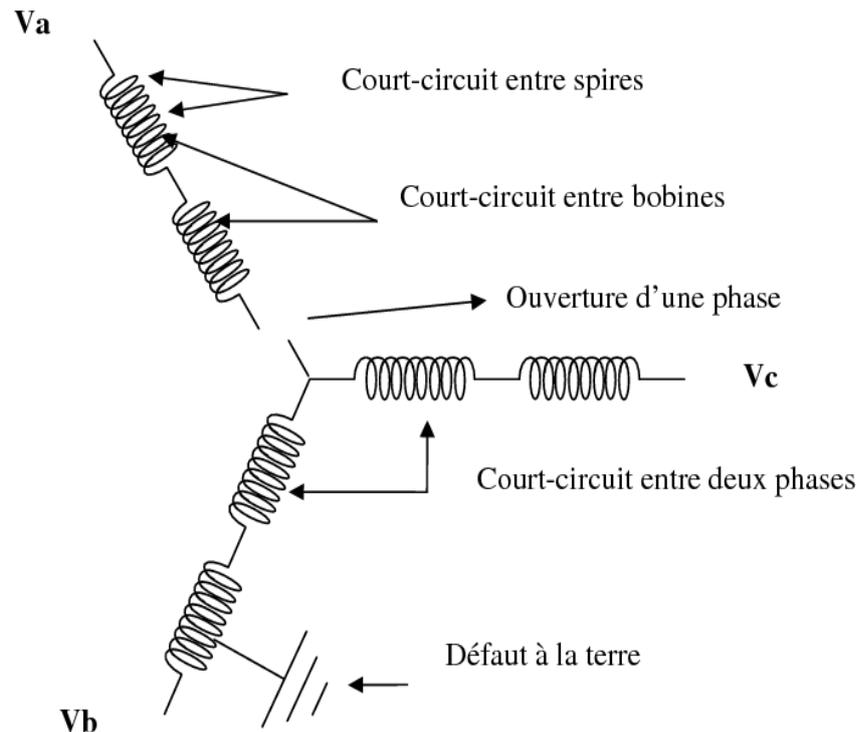


Figure I.6 défauts statoriques

I.5.2 Défaits rotorique

I.1.5.2.1 Défaut de cassure des barres

La rupture des barres d'une machine asynchrone est un défaut les plus couramment étudié en laboratoire en raison de sa simplicité de réalisation. La rupture de barre provoque une dissymétrie du rotor. Le résultat de la dissymétrie réside dans la création d'un champ tournant en sens opposé à celui généré par le stator et cela à la fréquence de glissement par conséquent, il y'aura création d'un courant supplémentaire dans le bobinage statorique [11].

Ce défaut induit des modifications dans les courants statorique et entraîne donc l'apparition d'harmoniques caractéristiques dans le spectre de ce signal. En effet, lors du défaut d'une rupture de barre, des harmoniques de flux sont produites et induisent des harmoniques de courant dans l'enroulement statorique aux fréquences autour de la fréquence fondamentales f_s telles que:

$$f_b = f_s \cdot (1 \pm 2k \cdot g) \quad , \quad k = 1, 2, 3 \quad (I.3)$$

g : glissement ,

f_s : fréquence d'alimentation statorique.

Ce défaut doit être détecté rapidement afin de garantir un fonctionnement fiable du moteur et donc de l'installation globale et d'éviter sa propagation sur les autres barres rotoriques.

I.5.2.2 Cassure d'une portion d'anneau de court-circuit

La cassure de portion d'anneau est un défaut qui apparaît aussi fréquemment que la cassure de barres. Ces cassures sont dues soit à des bulles de coulées ou aux dilatations différentielles entre les barres et les anneaux, d'autant que les portions d'anneaux de court-circuit véhiculent des courants plus importants que ceux des barres rotorique. Comme il est difficile de le détecter, ce défaut est généralement groupé, voir confondu, avec la rupture de barres dans les études statistiques. De ce fait, un mauvais dimensionnement des anneaux, une détérioration des conditions de fonctionnement (température, humidité,...) ou une surcharge de couple et donc de courants, peuvent entraîner leur cassures [11] [5] .

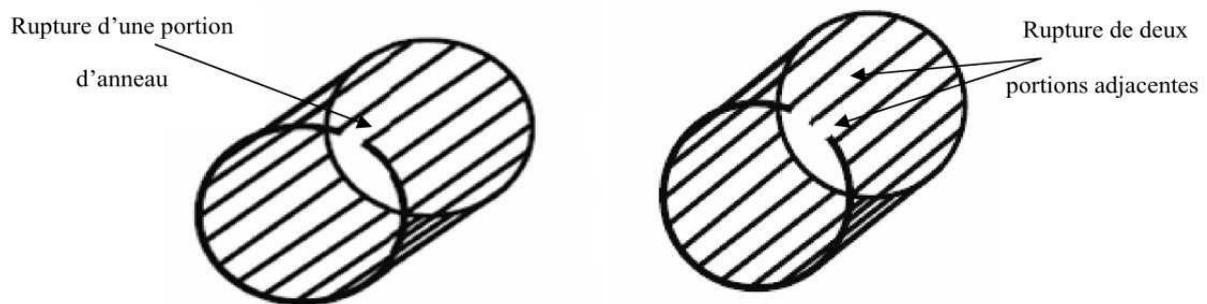
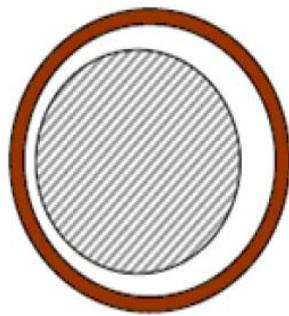


Figure I.7 cassure d'une portion d'anneau de court-circuit

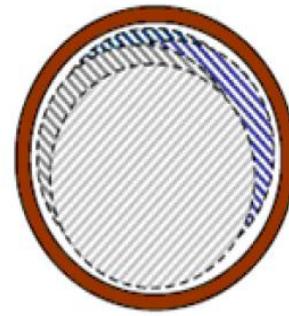
I.5.3 Défauts d'excentricité

Un défaut d'excentricité dans une machine électrique correspond à un décentrement du rotor par rapport au stator, entraînant une variation de l'entrefer. Il existe trois types de défaut d'excentricité [1]:

- l'excentricité statique correspondant au cas où l'axe de rotation du rotor reste fixe mais ne coïncide pas avec l'axe de symétrie du stator.
- l'excentricité dynamique correspondant au cas où l'axe de rotation du rotor n'est pas fixe mais tourne autour de l'axe de symétrie du stator.
- l'excentricité mixte qui est une combinaison d'excentricités statique et dynamique [9].



Excentricité statique



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

Figure I.8 Modélisation schématique de l'excentricité statique et dynamique

Les excentricités d'entrefer peuvent être détectées, en surveillant les raies latérales de la fréquence d'alimentation f_s .

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

avec : $k=1, 2, 3, \dots$, p : nombre de paires de pôles, g : glissement

La détection des excentricités est aussi possible en surveillant les harmoniques principales d'encoches du courant et certaines de leurs composantes spectrales. Cette méthode nécessite la connaissance du nombre d'encoches rotoriques N_e .

$$f_{enc+exc} = f_s \cdot \left[(k \cdot N_e \pm n_d) \cdot \frac{(1-g)}{p} \pm n_w \right] \quad \text{avec: } k = 1, 2, 3, \dots \quad (I.5)$$

$$n_w = 1, 3, 5, 7, \dots$$

N_e : nombre d'encoches rotoriques,

p : nombre de paires de pôles,

g : glissement,

$n_d = 0$, dans le cas d'une excentricité statique,

$n_d = 1$, dans le cas d'une excentricité dynamique.

La présence d'une excentricité statique, modifie l'amplitude des harmoniques principales d'encoches du courant statorique, tandis que celle d'une excentricité dynamique fait apparaître de nouvelles raies spectrales [9].

I.5.4 Défauts de roulement

Les roulements à billes jouent un rôle très important dans le fonctionnement de tout type de machines électriques, les défauts des roulements peuvent être causés par un mauvais choix de matériau à l'étape de fabrication, les problèmes de rotation au sein de la culasse de roulement causés par un enroulement abîmé [5][8], écaillé ou fissuré peuvent créer des perturbations au sein de la machine, nous savons que des courants électriques circulent au niveau des roulements d'une machine asynchrone ce qui pour des vitesses importantes peut provoquer la détérioration de ces derniers figure (I.9)

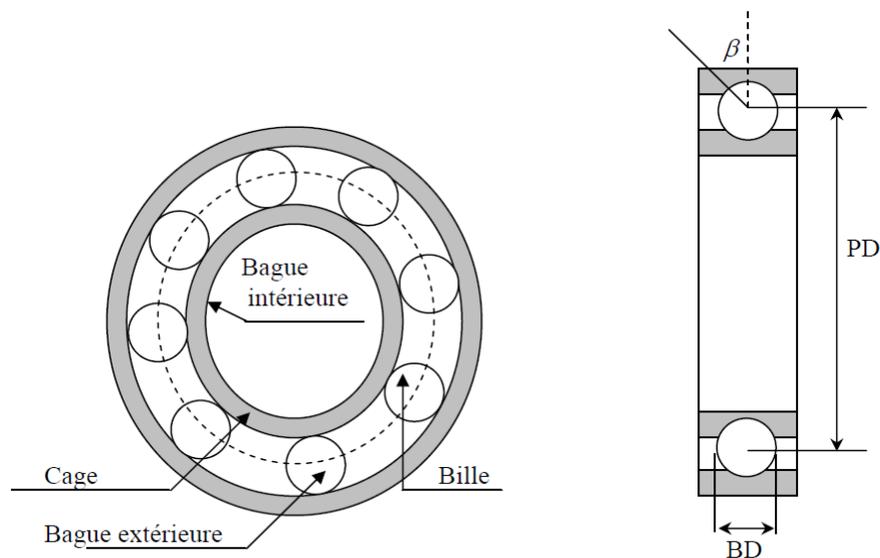


Figure I.9 dimension du roulement à bille

I.6 DIFFERENTS METHODES DE DIAGNOSTIC

Pratiquement, de multiples solutions permettent de capter le flux de fuite axial dans une machine électrique, tel que les sondes à effet Hall. Mais l'exemple de base consiste à enrouler une bobine autour de l'arbre de la machine, celle-ci sera le siège d'une FEM induite liée au flux de fuite axial. La réalité fait que les circuits électriques et magnétiques de la machine ne sont jamais parfaits à causes des tolérances et des défauts de fabrication parmi d'autres, et présentent souvent quelques degrés d'asymétrie permettant la génération des flux de fuite dont le contenu spectral est lié directement aux harmoniques contenus dans les courants statoriques et rotoriques [1] [12] .

I.6.1 Diagnostic par l'analyse des vibrations mécaniques

Le diagnostic des défauts par utilisation des 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 MAS. Ces forces sont proportionnelles au carré de l'induction magnétique [16] [13] .

$$\sigma(\theta.t) = \frac{B_s^2(\theta.t)}{2\mu_0} \quad (I.6)$$

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

$$B_s = Fmm.p \quad (I.7)$$

Les vibrations de la machine peuvent être captées par des accéléromètres placés sur les paliers selon les directions axiale, verticale et radiale. Les spectres des signaux de vibrations, issus du moteur avec défaut, sont comparés avec ceux de références enregistrées lorsque le moteur était en bon état. Cette méthode permet la détection aussi bien des défauts électriques que mécaniques, puisque la force magnétomotrice 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). Cependant, le coût des capteurs de vibration qui est relativement élevé, ainsi que les difficultés rencontrées dans la connexion de ces capteurs (problème d'accessibilité) représentent les limites et les inconvénients de cette méthode [16] .

I.6.2 Diagnostic par l'analyse du flux magnétique axial de fuite

Dans une machine idéale sans défauts, les courants et les tensions statorique 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 [16] [14] .

I.6.3 Diagnostic par mesure du courant statorique

L'analyse du courant statorique du moteur et l'une des techniques qui permet de détecter la présence des anomalies mécaniques et électriques, non seulement dans le moteur, mais également dans la charge. Des améliorations considérables sont apportées à cette technique qui est dénommée dans la littérature l'analyse des signatures du courant du moteur (ASCM). Des

composantes fréquentielles ont été déterminées pour chaque type de défaut. Il est important de noter, que l'amplitude de la composante fréquentielle augmente avec la sévérité du défaut [1] [15] .

I.6.4 Diagnostic par l'analyse du couple électromagnétique

Le couple électromagnétique développé dans les machines électriques, provient de l'interaction entre le champ statorique et 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 de la machine [16] [14] .

I.6.5 Diagnostic chimiques

La plupart des moteurs sont refroidis par l'air, ou le plus souvent à l'aide d'un circuit fermé avec un échangeur de chaleur refroidi à l'eau. La dégradation de l'isolation électrique dans le moteur produit le gaz d'oxyde de carbone qui apparaît dans le circuit de l'air de refroidissement et qui peut être détecté par une technique d'absorption infrarouge. Dans certains cas, l'huile de roulement est analysée régulièrement, et l'intervention est requise si les produits indiquant la dégradation sont présents [1] [17]

I.7 CONCLUSION

Nous avons présenté dans ce premier chapitre les différents défauts affectant les machines asynchrones et leurs méthodes de diagnostics. On a aussi présenté la méthode de l'analyse du couple électromagnétique qui fait l'objet de notre travail pour la détection des parasites de couple

Pour montrer l'effet des défauts sur le moteur, il est nécessaire d'avoir un modèle multi-enroulement régissant le fonctionnement du moteur lors du défaut afin de simuler son comportement. Ceci fera l'objet du deuxième chapitre suivant.

CHAPITRE II :
Modélisation dédiée au
diagnostic de la machine
asynchrone triphasée à cage

II.1 INTRODUCTION

Le modèle multi-enroulements, défini dans le but de mieux se rapprocher de la structure réelle du rotor à cage, suppose que celui-ci regroupe un nombre de mailles formant un enroulement polyphasé, chaque maille est constituée de deux barres adjacentes et les deux portions d'anneau de court-circuit qui les relient. Une telle structure a été utilisée avec profit dans le diagnostic de la machine asynchrone. Plusieurs démarches ont été menées dans cet axe, et ont permis de dévoiler quelques phénomènes découlant d'un défaut, tel que l'apparition des raies de fréquences supérieures ou inférieures à la fréquence statorique dans l'analyse spectrale des courants, couple, vitesse et puissance. Quelques-uns supposent une parfaite répartition de la FMM dans l'entrefer, d'autres adoptent des modèles tenant compte de la distribution réelle des différents enroulements en ne se limitant pas à la fondamentale de la série de Fourier relative à l'induction dans l'entrefer, notamment avec l'implication de l'approche de fonction d'enroulement, puis, la fonction d'enroulement modifiée, où il est possible de déceler les phénomènes accompagnant une probable excentricité. Puis l'ajout de la dimension axiale, permettant au modèle final de devenir apte à définir les inductances d'une machine en tenant compte de l'ouverture et /ou l'inclinaison des encoches, et qui peut être étendue à l'étude d'autres types d'asymétries axiales, à savoir, l'excentricité axiale. [1]

Ce chapitre exposera un premier modèle supposant une répartition sinusoïde des enroulements statoriques, et un second qui traitera le cas de la prise en compte de la disposition des bobines dans les encoches statoriques. Définition des couples parasite synchrone et les couple parasite asynchrone, harmonique d'encoche rotorique et influence de la combinaison entre le nombre barres rotoriques-nombre d'encoches statoriques.

II.2 MODELE MULTI-ENROULEMENT

Afin de représenter les barres du rotor, plusieurs méthodes dans notre travail , nous utilisons la méthode des circuits électriques magnétiquement couplés pour simuler le fonctionnement de la machine asynchrone. Le rotor est considéré comme un ensemble de mailles inter connectées entre elles, chacune formée par deux barres adjacentes et les portions d'anneaux qui les relient. 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.

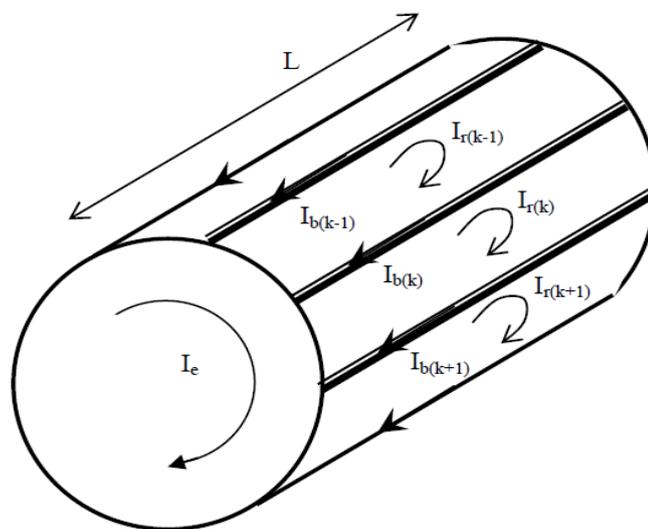


Figure II.1. Structure multi-enroulements du rotor.

Partant de cette représentation, il serait possible d'établir les équations générales régissant le fonctionnement en se basant sur des hypothèses simplificatrices dont les plus importantes sont:

- On suppose que le circuit magnétique est non saturé.
- Pas de phénomène de l'effet de peau.
- La perméabilité du fer est supposée infinie.
- L'hystérésis et les courants de Foucault sont négligeables.

II .2.1 Equations des tensions

La représentation d'une machine asynchrone à rotor à cage d'écureuil est identique à celle d'un rotor bobiné. Nous supposons que le rotor à cage peut être remplacé par un ensemble de mailles couplées magnétiquement figure (II.2)

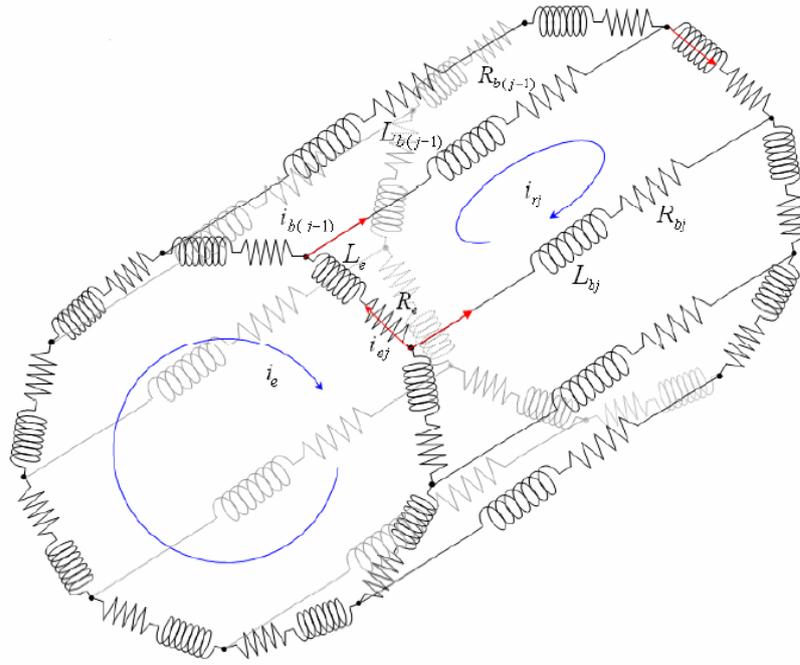


Figure II.2. Circuit électrique équivalent de la cage rotorique.

Nous relierons les tensions de chacune des boucles (mailles) rotoriques avec les courants et les flux grâce à l'équation:

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

$$[V_r] = [R_r][I_r] + \frac{d[\psi_r]}{dt} \quad (\text{II.2})$$

Où $[\psi_s]$ et $[\psi_r]$ représentent les vecteurs regroupant les flux totaux à travers les enroulements statoriques et rotoriques respectivement. $[I_s]$ et $[I_r]$ sont les courants correspondants, avec :

$$[\psi_s] = [L_{ss}][I_s] + [L_{sr}][I_r].$$

(II.3)

$$[\psi_r] = [L_{rs}][I_s] + [L_{rr}][I_r].$$

(II.4)

$$[V_s] = [V_{sA} \quad V_{sB} \quad V_{sC}]. \quad (\text{II.5})$$

$$[V_r] = [V_{r1} \quad V_{r2} \quad \dots \quad V_{rNb} \quad V_{re}]^T. \quad (\text{II.6})$$

$$[I_s] = [i_{sA} \quad i_{sB} \quad i_{sC}]^T. \quad (\text{II.7})$$

$$[I_r] = [i_{r1} \quad i_{r2} \quad \dots \quad i_{rNb} \quad i_{re}]^T. \quad (\text{II.8})$$

tel que i_{rj} et i_{re} sont respectivement les courants de la $j^{ème}$ maille rotorique et de l'anneau de court-circuit. V_{rj} et V_{re} sont les tensions correspondants avec, pour un rotor à cage (mailles court-circuitées), $V_{re} = 0$ et $V_{rj} = 0$; $j=1,2,\dots, N_b$.

Les matrices des résistances sont des matrices symétriques. $[R_s]$ est une matrice 3×3 , tandis que possède $[R_r]$ $(N_b + 1) \times (N_b + 1)$ éléments qu'on peut reconstituer à partir des lois relatives aux circuits électriques .Soit dans ce cas:

$$[R_s] = r_s \cdot [I]. \quad (II.9)$$

$$[R_r] = \begin{bmatrix} R_{r1} + R_{rN_b} + 2R_\epsilon & -R_{r1} & 0 & \dots & -R_{rN_b} & \vdots & -R_\epsilon \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & -R_{r(j-1)} & R_{rj} + R_{r(j-1)} + R_\epsilon & -R_{rj} & 0 & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -R_{rN_b} & 0 & \dots & \dots & R_{r(N_b-1)} + R_{rN_b} + 2R_\epsilon & \vdots & -R_\epsilon \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ -R_\epsilon & \dots & \dots & \dots & -R_\epsilon & \vdots & N_b R_\epsilon \end{bmatrix} \quad (II.10)$$

Avec : $[I]$ la matrice identité, r_s la résistance d'une phase statorique, R_{rj} la résistance de la $j^{ème}$ barre rotorique et la R_ϵ résistance d'un segment d'anneau de court-circuit.

Comme le montrent les expressions (II.11) et (II.12), les matrices des inductances statoriques et rotoriques sont des matrices 3×3 et $(N_b + 1) \times (N_b + 1)$ respectivement, exprimées en diagonale par les inductances propres de chaque enroulement, et dans le reste, par les inductances mutuelles entre enroulements (phases statoriques ou mailles rotoriques). les expressions détaillées des éléments de chaque matrice seront exposées par la suite :

$$[L_{ss}] = \begin{bmatrix} L_A & L_{AB} & L_{AC} \\ L_{BA} & L_B & L_{BC} \\ L_{CA} & L_{CB} & L_C \end{bmatrix}. \quad (II.11)$$

$$[L_{rr}] = \begin{bmatrix} L_{mr} + 2(L_b + L_\epsilon) & L_{r1r2} - L_b & \dots & L_{r1r(N_b-1)} & L_{r1rN_b} - L_b & \vdots & -L_\epsilon \\ L_{r1r2} - L_b & L_{mr} + 2(L_b + L_\epsilon) & \dots & L_{r2r(N_b-1)} & L_{r2rN_b} & \vdots & -L_\epsilon \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ L_{r(N_b-1)r1} & L_{r(N_b-1)r2} & \dots & L_{mr} + 2(L_b + L_\epsilon) & L_{rN_b r(N_b-1)} - L_b & \vdots & -L_\epsilon \\ L_{rN_b r1} - L_b & L_{rN_b r2} & \dots & L_{rN_b r(N_b-1)} - L_b & L_{mr} + 2(L_b + L_\epsilon) & \vdots & -L_\epsilon \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ -L_\epsilon & -L_\epsilon & -L_\epsilon & -L_\epsilon & -L_\epsilon & \vdots & N_b L_\epsilon \end{bmatrix} \quad (II.12)$$

Quant à $[L_{sr}]$, elle comporte $3 \times (N_b + 1)$ éléments qui constituent les inductances mutuelles entre les phases statoriques et les mailles rotoriques. Et elle est donnée par :

$$[L_{sr}] = \begin{bmatrix} L_{Ar1} & L_{Ar2} & \dots & L_{Ar(N_b-1)} & L_{ArN_b} & 0 \\ L_{Br1} & L_{Br2} & \dots & L_{Br(N_b-1)} & L_{BrN_b} & 0 \\ L_{Cr1} & L_{Cr2} & \dots & L_{Cr(N_b-1)} & L_{CrN_b} & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{II.13})$$

Là où L_{Aj} représente l'inductance mutuelle entre la phase statorique A et la $j^{\text{ème}}$ maille rotorique. Pour ce qui est de $[L_{rs}]$, elle est une matrice $(N_b + 1) \times 3$ qu'on obtient de la même façon en posant à la place des L_{Arj} les inductances mutuelles L_{rjA} . De même pour les phases B et C . L'inductance mutuelle entre chaque phase statorique et l'anneau de court-circuit est négligée du fait qu'ils peuvent être assimilés à des bobines à axes perpendiculaires. En regroupant les équations (II.1) et (II.2) dans une même équation matricielle, nous aboutissons à :

$$[V] = [R][I] + \frac{d([L][I])}{dt} \quad (\text{II.14})$$

ce qui donne :

$$[V] = [R][I] + [I] \frac{d\theta_r}{dt} \cdot \frac{d[L]}{d\theta_r} + [L] \frac{d[I]}{dt} \quad (\text{II.15})$$

$$[V] = [R][I] + [I] \Omega_r \cdot \frac{d[L]}{d\theta_r} + [L] \frac{d[I]}{dt} \quad (\text{II.16})$$

tel que :

$$[V] = \begin{bmatrix} [V_s] \\ [V_r] \end{bmatrix} \quad , \quad [I] = \begin{bmatrix} [I_s] \\ [I_r] \end{bmatrix} \quad , \quad (\text{II.17})$$

$$[R] = \begin{bmatrix} [R_s] & 0 \\ 0 & [R_r] \end{bmatrix} \quad (\text{II.18})$$

$$[L] = \begin{bmatrix} [L_{ss}] & [L_{sr}] \\ [L_{rs}] & [L_{rr}] \end{bmatrix} \quad (\text{II.19})$$

$$\Omega_r = \frac{d\theta_r}{dt} \quad (\text{II.20})$$

θ_r est la position angulaire du rotor mesurée par rapport à une référence de phase fixe par rapport au stator, elle est appelée aussi angle mécanique. Tandis que Ω_r représente la vitesse mécanique de l'arbre de la machine.

II.2.2 Equation mécanique

Selon l'application à laquelle est désigné le moteur, il est possible de définir l'équation mécanique du mouvement associé.

$$J_T \cdot \frac{d\Omega_r}{dt} + f_v \Omega_r = C_e - C_r \quad (\text{II.21})$$

C_e est le couple électromagnétique, C_r le couple résistant, f_v le coefficient de frottement visqueux et J_T le moment d'inertie total des parties tournantes. Pour un circuit magnétique linéaire, la co-énergie est égale à l'énergie emmagasinée. De ce fait vient :

$$C_e = \left[\frac{\partial W_{co}}{\partial \theta_r} \right]_{(I_s, I_r, \text{constant})} \quad (\text{II.22})$$

Avec :

$$W_{co} = \frac{1}{2} \cdot [I]^T \cdot [L] \cdot [I] \quad (\text{II.23})$$

ce qui donne finalement l'expression du couple électromagnétique.

$$C_e = \frac{1}{2} \cdot [I]^T \cdot \frac{d[L]}{d\theta_r} \cdot [I] \quad (\text{II.24})$$

Si $[L_{ss}]$ et $[L_{rr}]$ sont constantes, et $[L_{sr}] = [L_{rs}]$, on obtient l'équation suivante du couple :

$$[C_e] = \frac{1}{2} [I_s]^T \cdot \frac{d[L_{sr}]}{d\theta_r} \cdot [I_r] \quad (\text{II.25})$$

II.2.3 Système d'équations global

Nous pouvons regrouper ces équations dans une représentation matricielle unique pour aboutir à :

$$\begin{bmatrix} [V] \\ -C_r \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left([R] + \Omega_r \frac{d[L]}{d\theta_r} \right) & 0 & 0 \\ -\frac{1}{2} [I]^T \frac{d[L]}{d\theta_r} & f_v & 0 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} [I] \\ \Omega_r \\ \theta_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} [L] & 0 & 0 \\ 0 & J_T & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{[I]} \\ \dot{\Omega}_r \\ \dot{\theta}_r \end{bmatrix} ; \quad (\text{II.26})$$

et une forme condensée :

$$[U] = [B][X] + [A] \left[\dot{X} \right]. \quad (\text{II.27})$$

où le vecteur $\left[\dot{X} \right]$ peut être écrit comme suit :

$$\left[\dot{X} \right] = [A]^{-1} \cdot [U] - [A]^{-1} \cdot [B][X]. \quad (\text{II.28})$$

Nous faisons, ainsi, apparaître le vecteur d'état $[X]$ et le vecteur $[U]$ contenant les grandeurs externes à la machine tel que :

$$[U] = \begin{bmatrix} [V] \\ -C_r \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (\text{II.29})$$

$$[X] = \begin{bmatrix} [I] \\ \Omega_r \\ \theta_r \end{bmatrix}. \quad (\text{II.30})$$

Avec la définition des matrices A et B donnée par:

$$[A] = \begin{bmatrix} \left([R] + \Omega_r \frac{d[L]}{d\theta_r} \right) & 0 & 0 \\ -\frac{1}{2} [I]^T \frac{d[L]}{d\theta_r} & f_v & 0 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix}. \quad (\text{II.31})$$

$$[B] = \begin{bmatrix} [L] & 0 & 0 \\ 0 & J_T & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (\text{II.32})$$

On se retrouve ainsi face à un système d'équations différentielles régissant le fonctionnement de la machine. Pour parvenir à la solution, une méthode numérique doit être mise en oeuvre, la méthode explicite de Runge Kutta s'avère la plus utilisée dans ces cas. Bien avant ça, nous devons définir les matrices A et B de manière à traduire l'état interne de la machine, à savoir, état sain ou état de défaut.

II.3 COUPLES PARASITES

Le couple principal est créé par les fondamentaux du flux et du courant rotorique. Cependant, il existe des couples parasites dans les machines asynchrones [22] qui peuvent perturber le fonctionnement du moteur.

II.3.1 Couples parasites asynchrones

Les harmoniques d'espace de la force magnétomotrice F. M.M. en interaction avec la perméance totale, créent des flux magnétiques tournants qui induisent des courants secondaires et produisent des couples additionnels. Ces harmoniques de couples sont similaires au fondamental, mais ils sont développés à des vitesses de synchronisme plus basses que celle du fondamental [19].

Kostenko [21] généralise la notion d'interaction des forces magnétomotrices du stator et du rotor aux ordres des forces magnétomotrices d'un ordre quelconque. En effet, si le premier harmonique du stator tourne à la vitesse N , l'harmonique du h -ième ordre de force magnétomotrice, du stator tourne à la vitesse $N_{1h} = \pm \frac{N_1}{h}$. Le signe (+) correspond aux forces magnétomotrices qui tournent dans le même sens que l'harmonique principal, elles sont appelées directes. Le signe (-) correspond aux forces magnétomotrices qui tournent dans le sens inverse, appelées inverses. Le glissement d'ordre h est

$$g_h = \frac{\pm N_{1h} - N}{\pm N_{1h}} = 1 \pm \frac{N_1 - (N_1 - N)}{N_1 / h} = 1 \pm (1 - g)h \quad (\text{II.33})$$

Où

g : est le glissement du rotor par rapport à l'harmonique fondamental.

La fréquence du courant induit dans le rotor par le flux du h -ième harmonique de la force magnétomotrice du stator est

$$f_2 = f_1 s_h = f_1 [1 \pm (1 - g)h] \quad (\text{II.34})$$

Le h -ième harmonique de la force magnétomotrice du rotor tourne par rapport à celui-ci à la

vitesse :

$$N_{2h} = \pm \frac{N_1}{h} - N \quad (\text{II.35})$$

La vitesse de rotation dans l'espace sera :

$$N_2 + N = \pm \frac{N_1}{h} - N + N = \pm \frac{N_1}{h} \quad (\text{II.36})$$

et ce résultat n'est que la vitesse de rotation du $h^{-\text{ième}}$ harmonique de la force magnétomotrice du stator. L'action des couples parasites asynchrones dépend, selon [21], du sens de rotation de l'harmonique de la force magnétomotrice. Dans la référence [21] Kostenko commence par examiner d'abord l'action du $h^{-\text{ième}}$ harmonique direct de la force magnétomotrice. La vitesse de rotation au synchronisme d'un tel harmonique est $N_{1h} = \pm \frac{N_1}{h}$

avec un glissement de :

$$g = \pm \frac{N_1 - \frac{N_1}{h}}{N_1} = 1 - \frac{1}{h} \quad (\text{II.37})$$

Dans les limites de variation du glissement de $g = 1$ jusque $g = 1 - \frac{1}{h}$, le rotor tourne à une vitesse inférieure à celle de l'harmonique. Celui-ci crée donc un couple moteur qui s'ajoute au couple principal. Dans les limites comprises entre $g = 1 - \frac{1}{h}$ et $g = 0$, il tourne à une vitesse supérieure à celle de l'harmonique, le couple créé dans cette zone est un couple générateur, qui se retranche du couple principal

Pour tous les glissements entre $g = 0$ et $g = 1$ les harmoniques inverses créent donc des couples résistants. Mais si le rotor tourne dans le sens opposé au sens de rotation à la force magnétomotrice principale, ou dans le même sens que l'harmonique inverse, le glissement $g = 1 + \frac{1}{h}$ qui correspond à la rotation synchrone du rotor dans le flux de cet harmonique, son couple passera par zéro et ensuite pour $g > 1 + \frac{1}{h}$ il aura des valeurs positives .

Les déformations les plus importantes s'observent dans la zone de faibles vitesses de rotation où les couples asynchrones complémentaires liés aux harmoniques supérieurs prennent leurs valeurs maximales. L'évaluation quantitative du couple asynchrone

complémentaire dû à l'harmonique spatial d'ordre h du champ peut être effectuée à l'aide du schéma électrique équivalent de la figure II.3.

Le schéma équivalent pour l'harmonique spatial d'ordre h du champ est construit par analogie avec le schéma équivalent du fondamental. La vitesse angulaire Ω du rotor et le glissement pour l'harmonique d'ordre h sont donnés par :

$$g_h = \frac{\Omega_h - \Omega}{\Omega_h} \tag{II.38}$$

Où $\Omega_h = \pm \frac{\Omega_1}{h}$ (II.39)

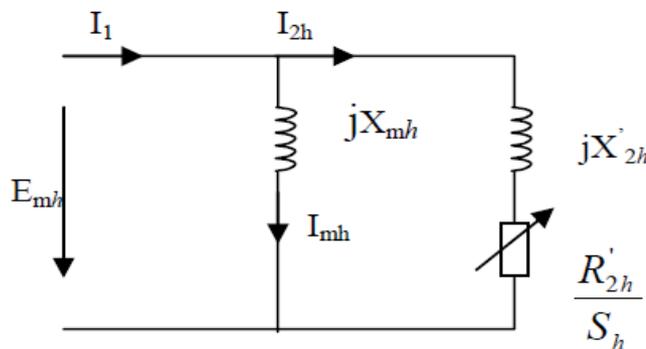


Figure II.3. Schéma électrique équivalent de la machine asynchrone

X'_{2h} : La réactance de fuite du rotor ramenée pour l'harmonique h du champ.

R'_{2h} : La résistance du rotor ramenée pour l'harmonique h du champ.

X_{mh} : est la réactance d'induction mutuelle de l'enroulement statorique liée à l'harmonique h de champ .

Le couple asynchrone complémentaire dû à l'harmonique h du champ du stator peut être calculé en utilisant la relation suivante :

$$C_h = \frac{m_1 R'_{2h} (I_{2h}')^2}{g_h \cdot \Omega_h} \tag{II.40}$$

II.3.2 Harmoniques de denture

Les harmoniques de denture dans la machine créent eux aussi des couples asynchrones de l'ordre $h_{d1} = k \frac{Z_1}{p} \pm 1$, avec k entier positif. . L'harmonique de denture pour $k = 1$ est considéré comme l'harmonique fondamental et les autres sont considérés comme des

harmoniques supérieurs [19] .

II.3.3 Couples parasites synchrones

Il s'agit cette fois ci du couple prenant naissance suite à l'interaction des harmoniques du même ordre du stator et du rotor pour une vitesse de ce dernier telle que ces harmoniques tournent à leur vitesse de synchronisme. Par exemple, lors de l'existence des harmoniques de dentures stator et rotor de même ordre, un couple synchrone apparaît pour une certaine vitesse du rotor tournant à la vitesse de synchronisme de ces harmoniques [23] .

II.4 LA COMBINAISON DU NOMBRE D'ENCOCHE STATORIQUE ET NOMBRE DE BARRE ROTORIQUE

Dans le cas du rotor à cage d'écureuil, l'effet est également compensé par une inclinaison du rotor égale à celle d'un pas de 3/4 ou d'un pas de stator complet. L'effet d'exploration asynchrone et synchrone est réduit par une conception appropriée de sorte que les problèmes de démarrage sont évités [18].

Combinaisons appropriées d'encoches de stator et les barres de rotor qui fonctionneront comme suit. Pour les moteurs asynchrones à cage d'écureuil :

cage du rotor: inclinée

- Pour 4 pôles: les encoches statorique / les barres rotorique :
36/28; 48/57; 24/34; 36/45; 48/140; 60/76 ;48/36 60/48; 72/60; 60/38; 48/135; 48/38;
36/44
- Pour 6 pôles: les encoches statorique / les barres rotorique:
36/48 ; 36/57; 36/45; 72/193; 72/82; 54/39
- Pour 8 pôles: les encoches statorique / les barres rotorique:
72/144 ; 72/55; 96/72
- Pour 2 pôles: les encoches statorique / les barres rotorique:
24/33 ; 36/27 [18].

II.5 HARMONIQUES D'ENCOCHES ROTORIQUES

En réalité, l'induction magnétique dans l'entrefer n'est pas sinusoïdale, elle est fonction de différents paramètres, tel que la disposition du bobinage statorique et de la structure de la cage rotorique dans le cas des moteurs à cage. A cause de cette structure, Il a été démontré qu'en plus de l'harmonique fondamental, apparaissent dans le spectre du courant statorique des harmoniques dite d'encoches rotoriques ayant pour fréquences [20] [1] .

$$f_{he} = \left[\frac{kN_b}{p} (1 - g) \pm n_{os} \right] \cdot f_s \quad (\text{II.41})$$

Avec ($n_{os} = \pm 1, \pm 3, \pm 5, \dots$), p le nombre de paires de pôles, N_b le nombre de barres rotoriques, n_{os} l'ordre des harmoniques de temps de la FMM, et k un entier positif. Pour $k=1$ et $n_{os}=1$ on définit ce qui sont appelés 'harmoniques d'encoches principales' (PSH) [1] .

II.6 CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons présenté le modèle multi-enroulements qui tient en compte de la structure du rotor. Le choix d'un tel modèle nous est imposé par l'objectif de pouvoir simuler les couples parasites. Le modèle est pratique dans le sens que l'étude se réduit à la variation du nombre des barres rotoriques tout en découvrant la meilleure combinaison de ces deux éléments (Nb/Ne)

Chapitre III:
Simulation Et Résultats

III.1 INTRODUCTION

Dans le chapitre précédent, nous avons présenté l'influence de la combinaison du nombre d'encoche statorique et nombre de barre rotorique et l'effet d'inclinaison de barres rotorique. nous allons présenter ici l'effet de la résistance rotorique sur le couple de la machine asynchrone a cage et la visibilité de PSH , nous avons réalisées en simulation puis présenter les résultats de simulation obtenus.

III.2 TESTE VIRTUEL 1 (CARACTERISTIQUE ELECTROMECHANIQUE)

Le démarrage s'effectue à vide sous tension nominale avec une alimentation triphasée sinusoïdale équilibrée, à l'instant $t = 0.7$ (s) la machine est soumise à un couple résistance $C_r = 2$ Nm et après chaque 0,7 secondes Le couple résistance augmente de 2 Nm jusqu'à le décrochage du moteur , le couple électromagnétique vient équilibrer le couple résistance, la vitesse chute a chaque augmentation de couple résistant Jusqu'à nul , Nous avons simulé plusieurs fois et chaque fois que nous changeons le nombre des barres rotorique , et dans le cas de simulation de barre cassé après $t = 1$ (s) de démarrage, nous cassons 2 barres , pour savoir l'effet de la résistance rotorique sur les couples parasites, nous avons simulé à chaque fois changeons la valeurs de la résistance rotorique, nous avons obtenu les résultats suivants :

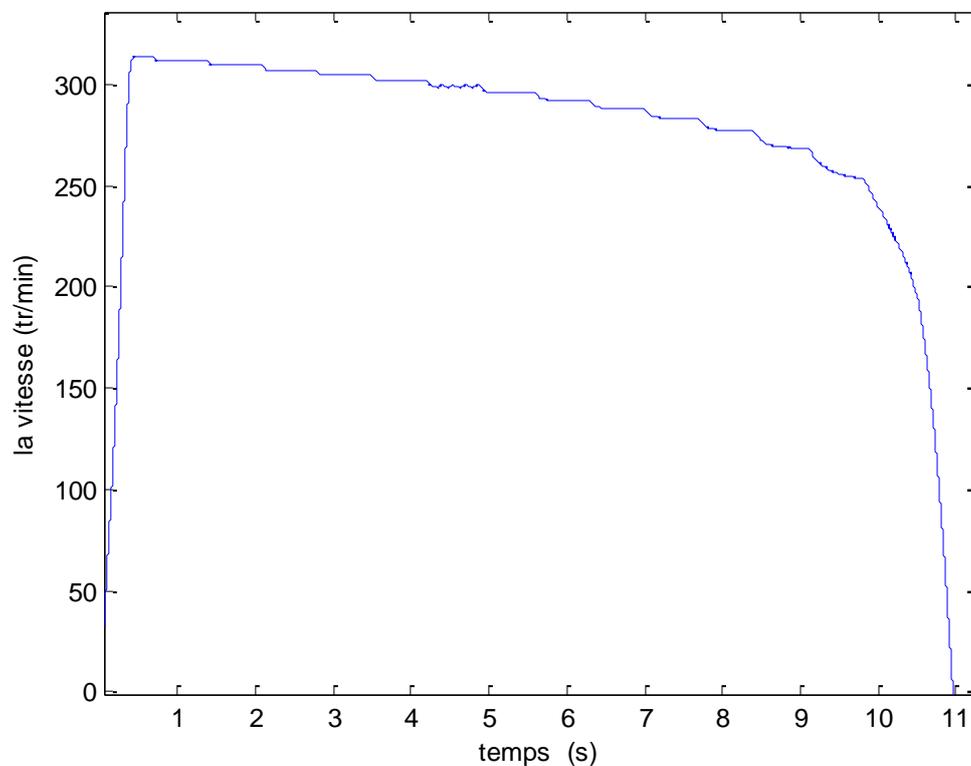


Figure III.1 la vitesse de moteur dans état sain

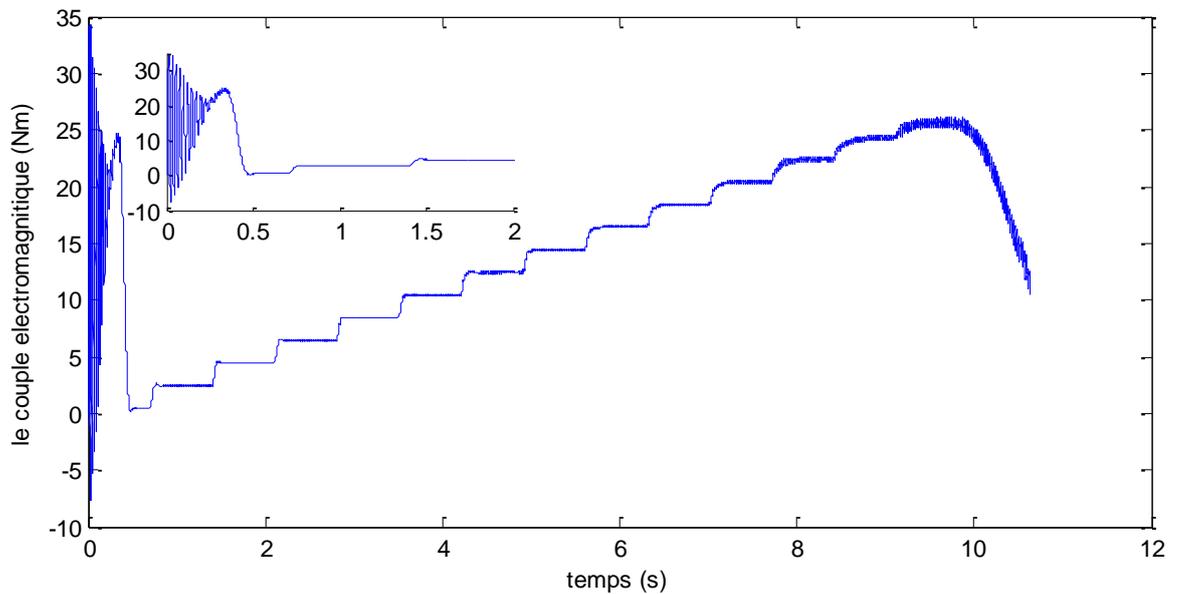


Figure III.2 le couple électromagnétique de moteur dans état sain

Les figures (III,1) et (III,2) montrent l'évolution du le couple électromagnétique et la vitesse , dans la figure (III,2) le couple électromagnétique compatible avec le couple résistant jusqu'à le décrochage et dans la figure (III,1) la chute de la vitesse a chaque augmentation de couple résistant Jusqu'à nul .

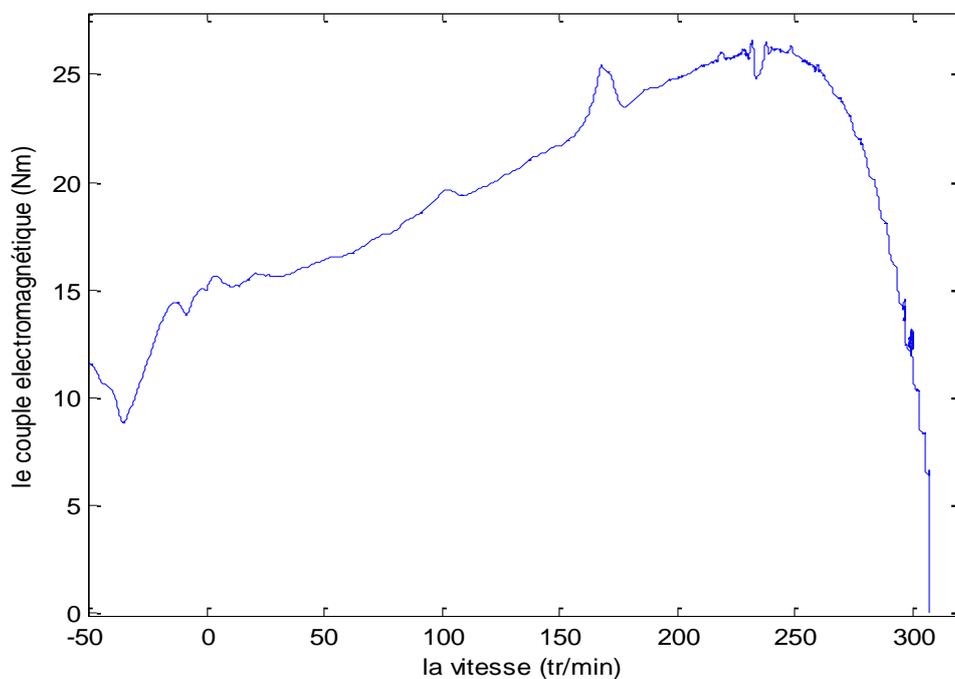


Figure III.3 la caractéristique électromécanique pour Nb =28 sans inclinaison l'état sain

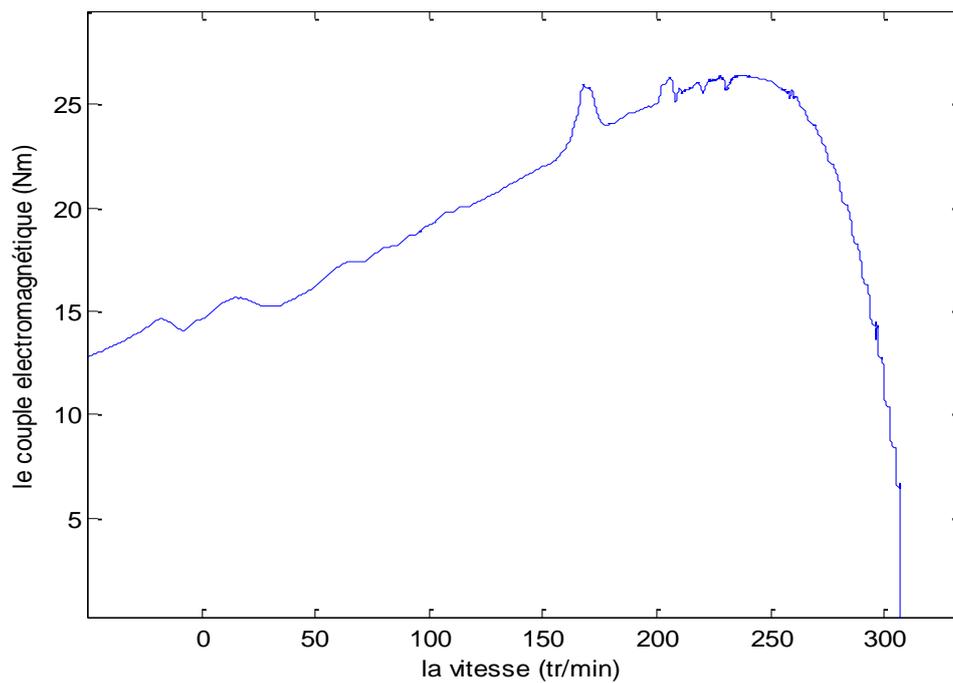


Figure III.4 la caractéristique électromécanique pour Nb =29 sans inclinaison l'état sain

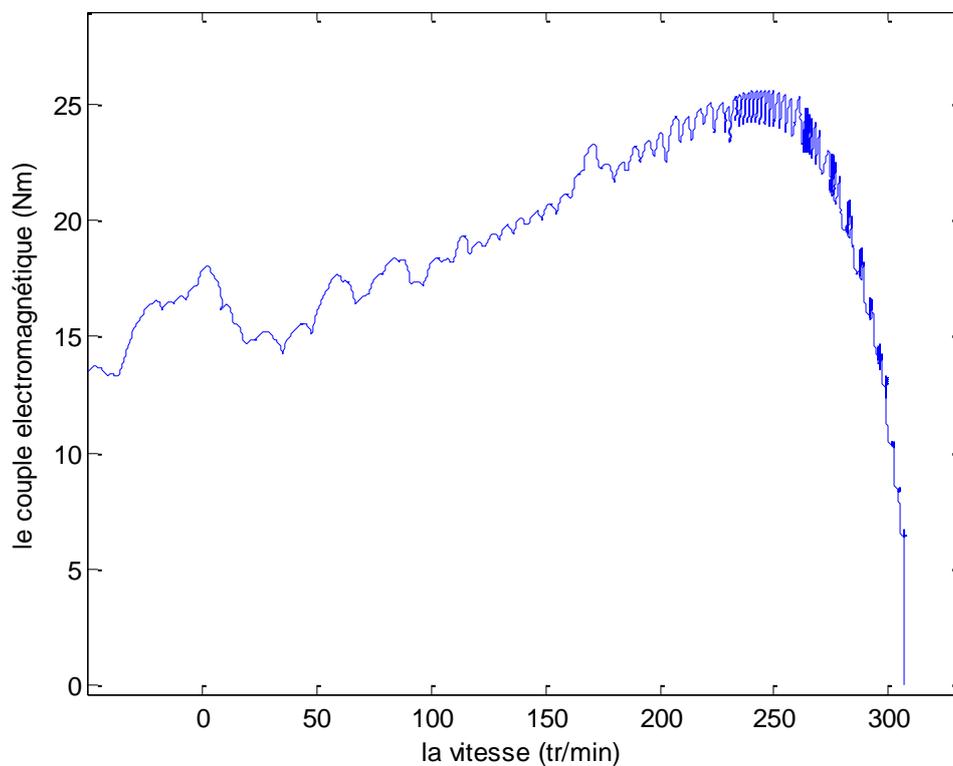


Figure III.5 la caractéristique électromécanique pour Nb =29 sans inclinaison avec 2 barres cassé

Les figures (III.3), (III.4) et (III.5), la caractéristique électromécanique du moteur asynchrone avec barres non inclinées, la caractéristique électromécanique qui montre beaucoup des parasite inconnus résultant l'absence de l'inclinaison des barres rotorique .

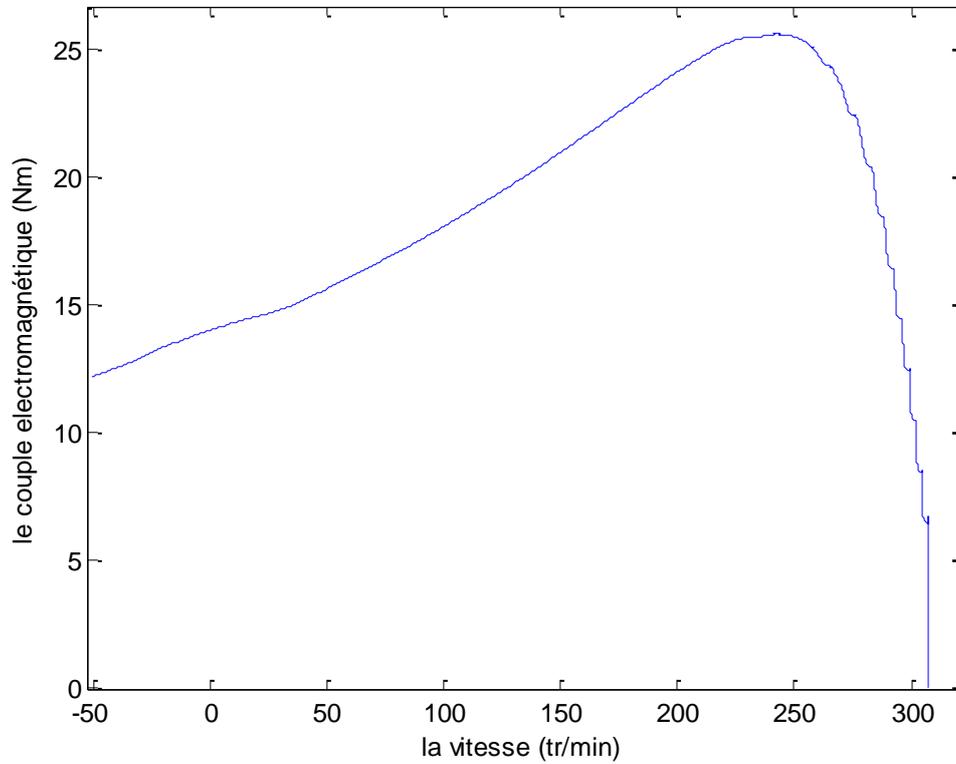


Figure III.6 la caractéristique électromécanique pour $N_b = 28$ avec inclinaison

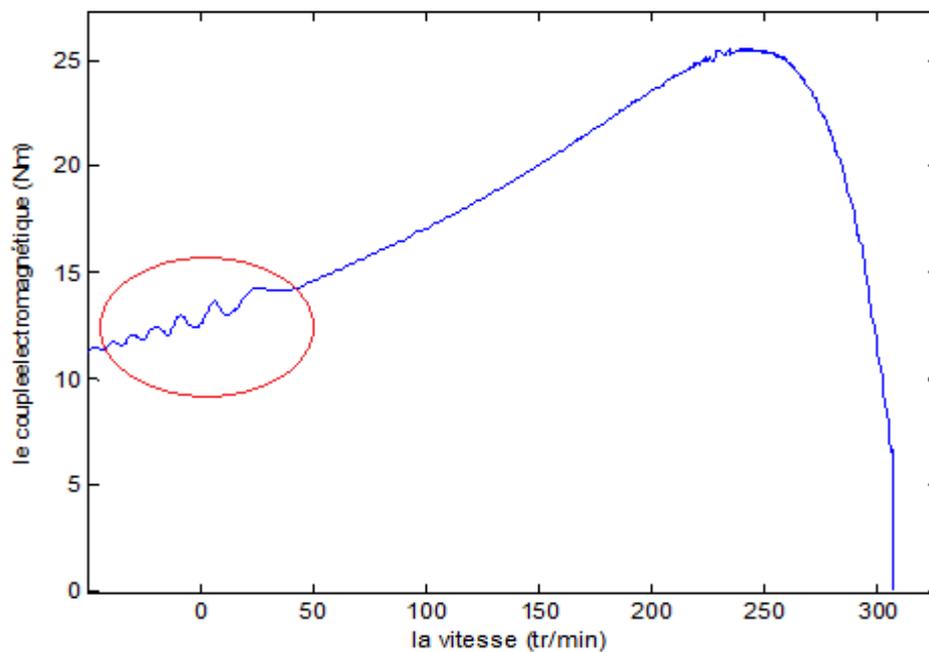


Figure III.7 la caractéristique électromécanique pour $N_b = 27$ avec inclinaison

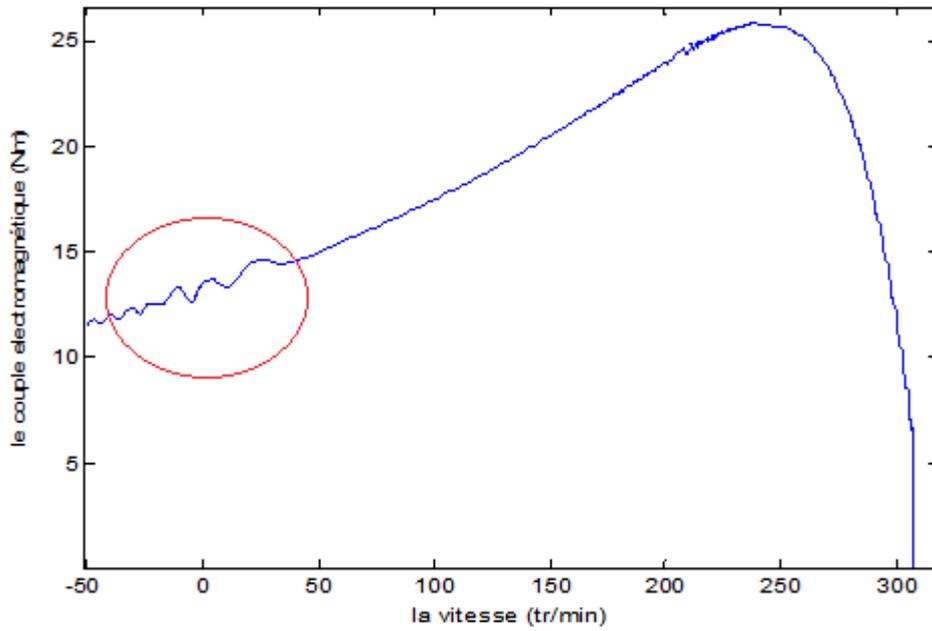


Figure III.8 la caractéristique électromécanique pour Nb =29 avec inclinaison

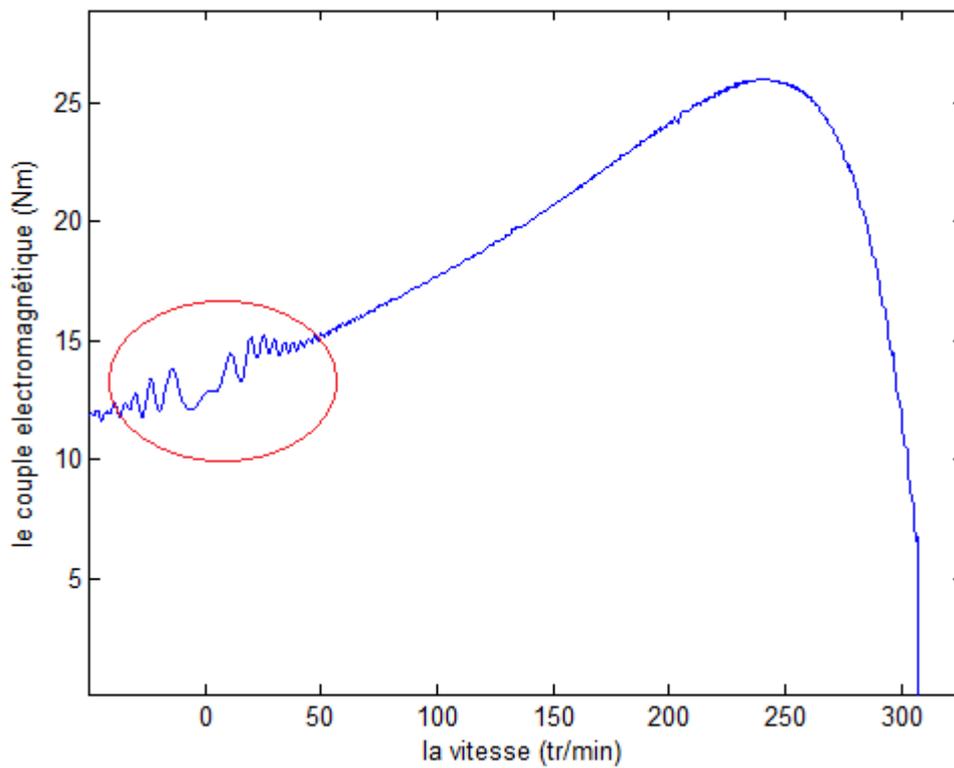


Figure III.9 la caractéristique électromécanique pour Nb =30 avec inclinaison

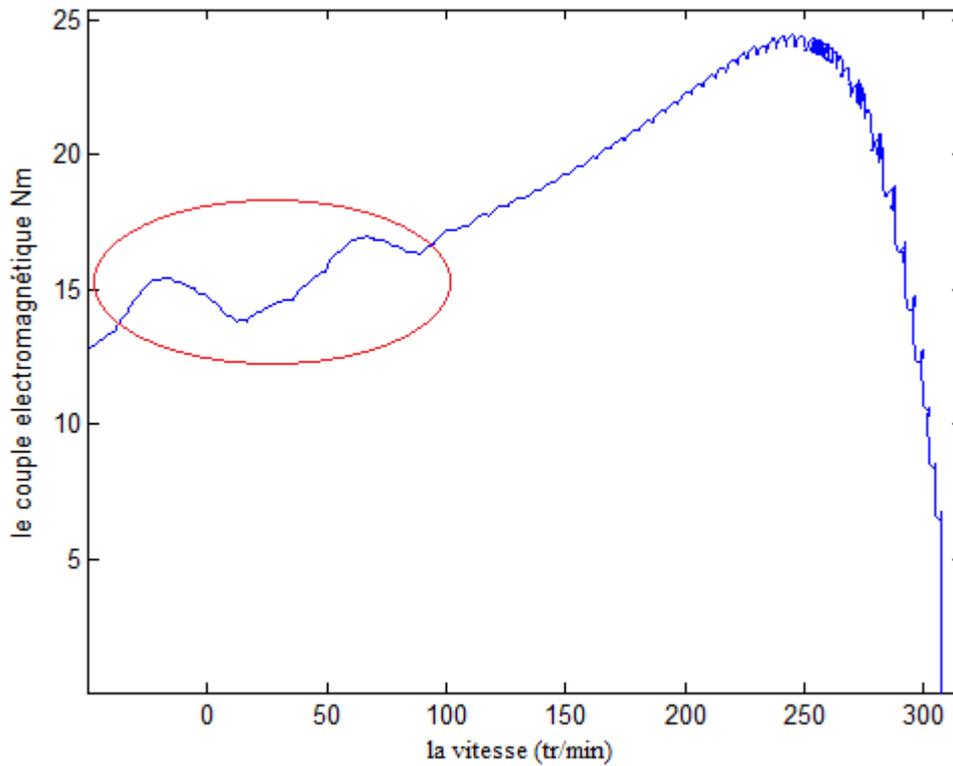


Figure III.10 la caractéristique électromécanique pour Nb =28 avec inclinaison et 2 barres cassé

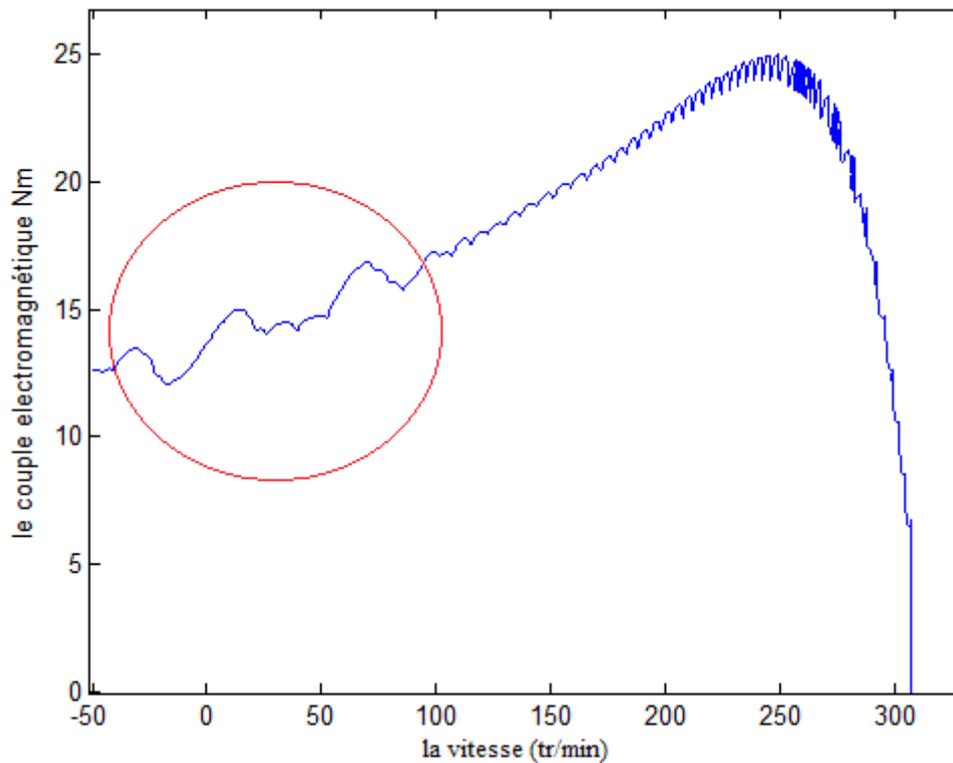


Figure III.11 la caractéristique électromécanique pour Nb =29 avec inclinaison et 2 barres cassé

Les figures (III.6), (III.7), (III.8),(III.9),(III.10)et(III.11), la caractéristique électromécanique et moteur asynchrone avec barres inclinées ,la caractéristique électromécanique qui montrer la disparaissant des parasite inconnu sauf les parasite de couple de démarrage causé par l'incompatibilité dans la combinaison entre le nombre des barres rotorique – nombre d'encoches statorique , dans la figure (III.6) le moteur aux 28 barres ne présent pas de couple parasites, d'un autre coté dans les figures (III.7), (III.8), (III.9),(III.10) et (III.11) est montre l'apparaissent des couple parasites pour les valeur de Nb différent de 28

Influence de la résistance rotorique

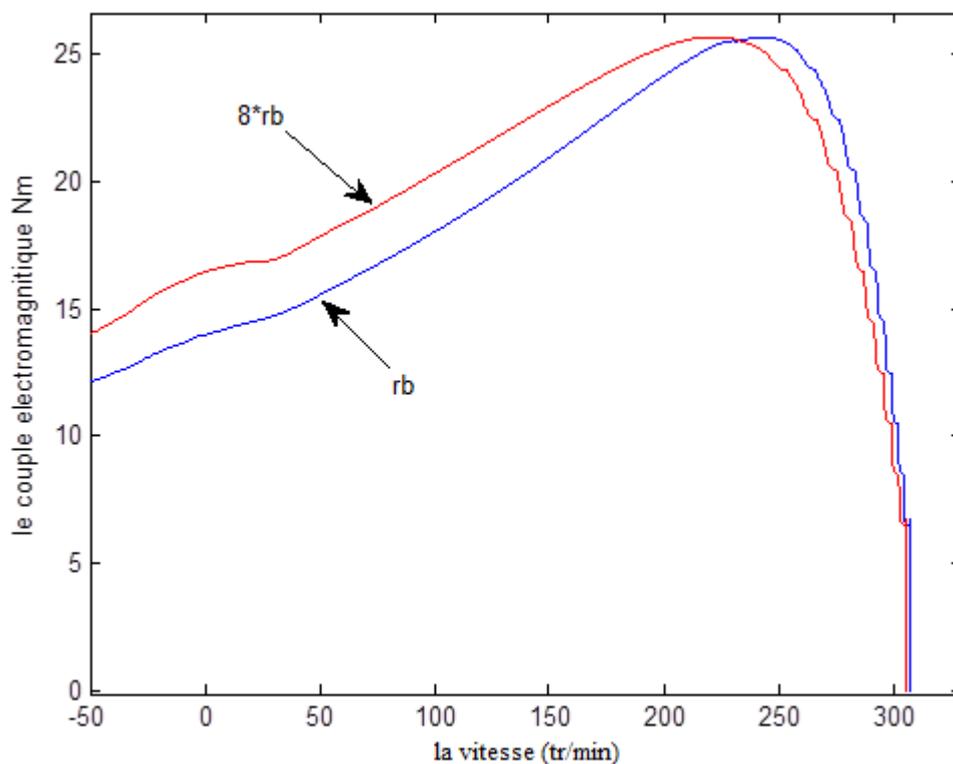


Figure III.12 la caractéristique électromécanique pour Nb =28 avec résistance rotorique modifié

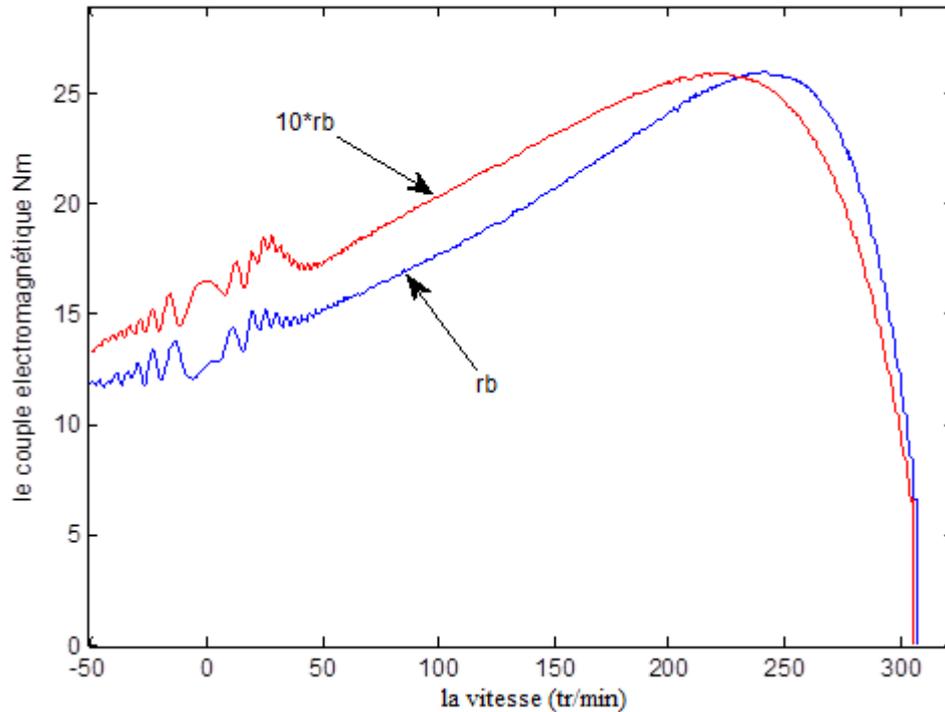


Figure III.14 la caractéristique électromécanique pour $N_b = 30$ avec résistance rotorique modifié

Les figures (III.13), (III.14), montrent que le changement de résistance rotorique n'affecte pas sur le couple maximale et le couple parasites mais a un effet sur le couple de démarrage .

III.3 TESTE VIRTUELLE 2 (VISIBILITE DE PSH)

Sans parler de l'évolution temporelle des différentes grandeurs électromagnétiques, les principaux harmoniques qu'on doit vérifier dans un spectre de courant à l'état sain sont les harmoniques d'encoches principales et éventuellement, les autres harmoniques d'espace. Les PSHs ne peuvent être générés qu'à des combinaisons particulières liant le nombre de barres de la machine au nombre de paires de pôles. la relation que doit vérifier le nombre des barres est :

$$N_b = 2p\{3.(m \pm q) \pm r\} \quad (m \pm q) = 0,1,2,3,.. \quad \text{et } r = 0 \text{ ou } 1$$

Ci-dessous les résultats de simulation du démarrage d'un moteur (1) pour N_b nombre de barres rotoriques est variable et $N_e = 36$ le nombre d'encoches statoriques .

Nous pouvons vérifier sur les spectres de courant la fréquence de la fondamentale et des premiers harmoniques d'encoches dits « PSH » de fréquences obéissant à la loi (II.41)

III.3.1 Le cas système équilibre

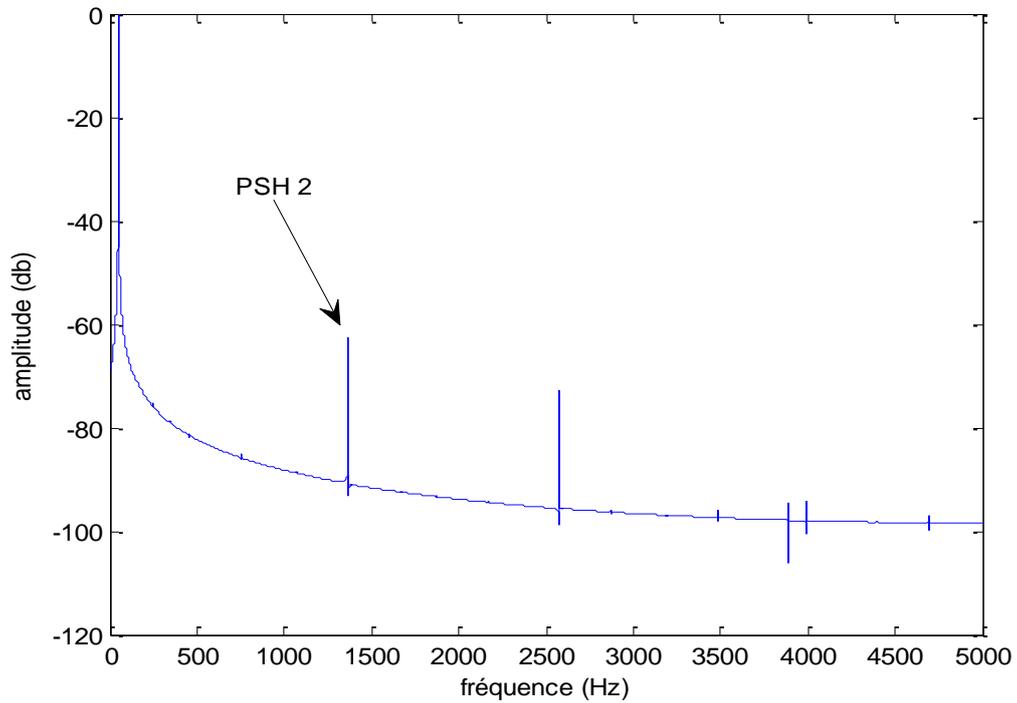


Figure III.15 Spectre du courant de la phase A statorique pour Nb=28. état sain avec inclinaison

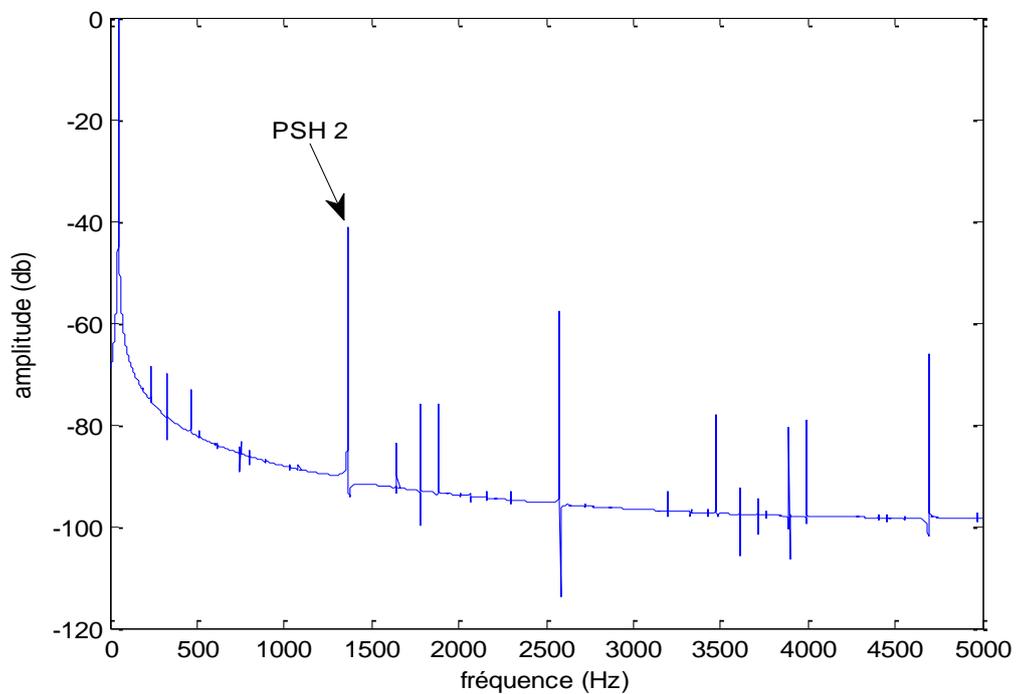


Figure III.16 Spectre du courant de la phase A statorique pour Nb=28. état sain sans inclinaison

Associant à $(m \pm q)$ la valeur 5 et r la valeur 1, on parvient ainsi à justifier l'existence des PSHs pour le cas du moteur (1) de l'Annexe. Cependant, le premier PSH possède un ordre multiple de trois ou autrement, elle n'appartient pas au fameux ensemble $(6.k \pm 1)$ et ne peut donc apparaître [24].

Dans la figure (III.15) le cas avec inclinaison pour $N_b = 28$, Tel que k est un entier positif, en posant $k=1$ on obtient la fréquence 1364 Hz relative aux PSH. On remarque dans la figure (III.16) le cas sans inclinaison que plusieurs fréquences d'harmoniques par contre autre cas et les amplitudes des harmoniques supérieures dans le cas avec inclinaison.

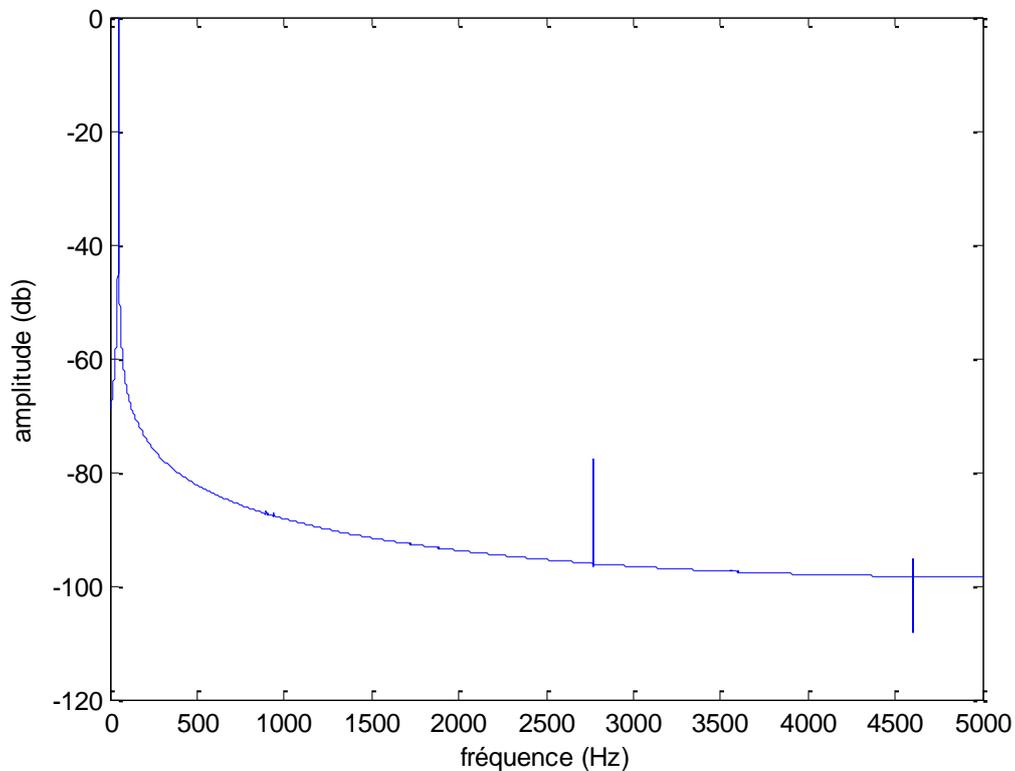


Figure III.17 Spectre du courant de la phase A statorique pour $N_b=29$. État sain avec inclinaison

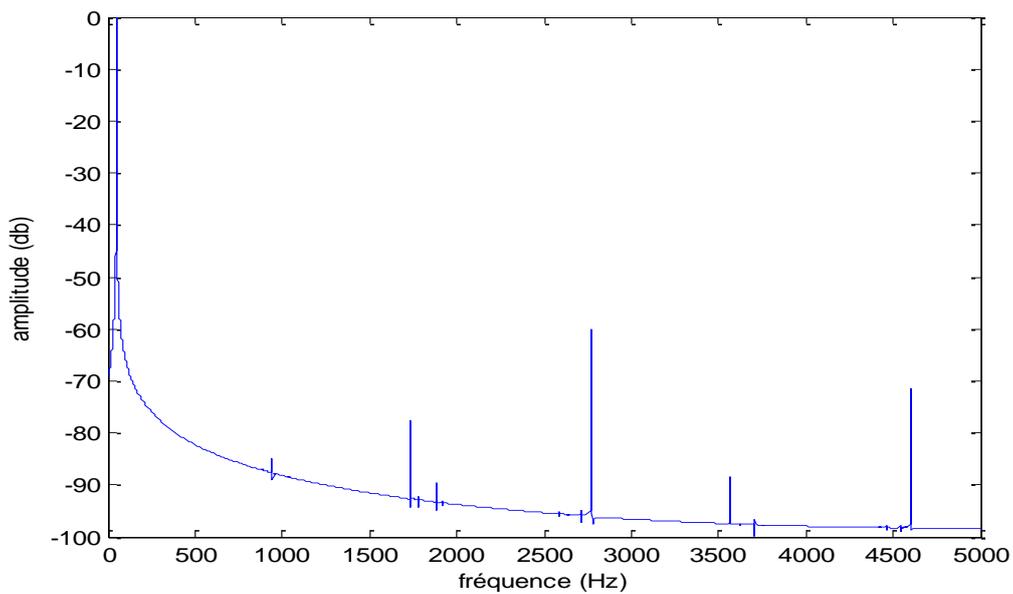


Figure III.18 Spectre du courant de la phase A statorique pour Nb=29. état sain sans inclinaison

Dans les figures(III.17), (III.18) pour Nb= 29 n'a pas apparu fréquence relative aux PSH soit le cas avec inclinaison ou non

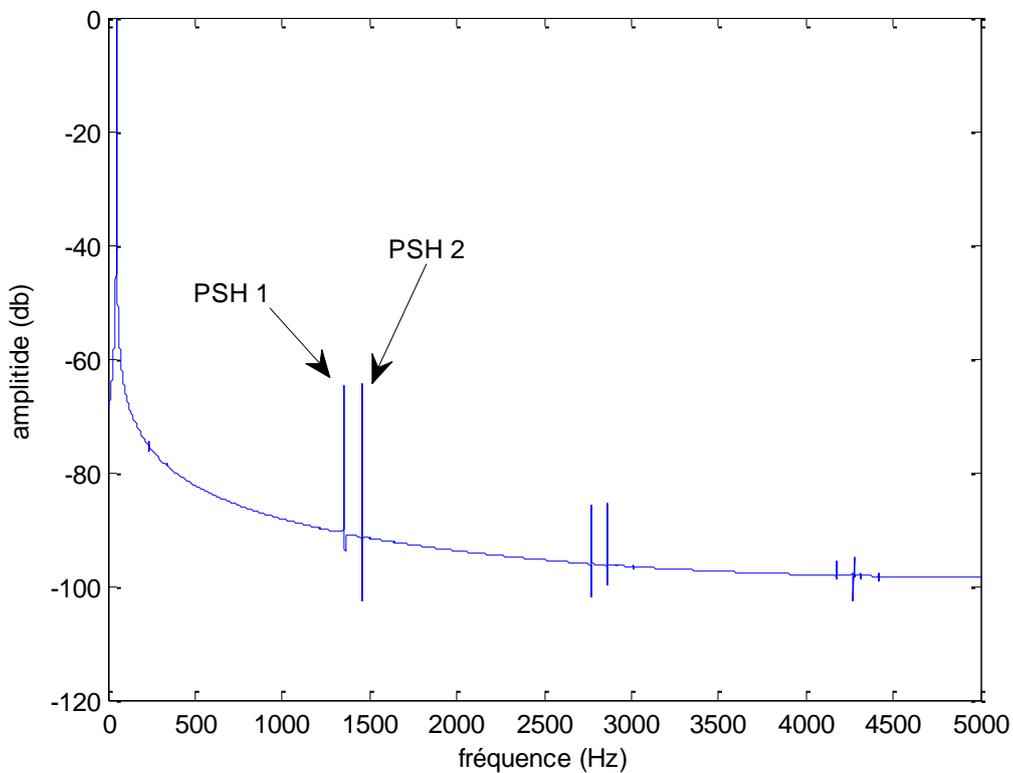


Figure III.19 Spectre du courant de la phase A statorique pour Nb=30. état sain avec inclinaison

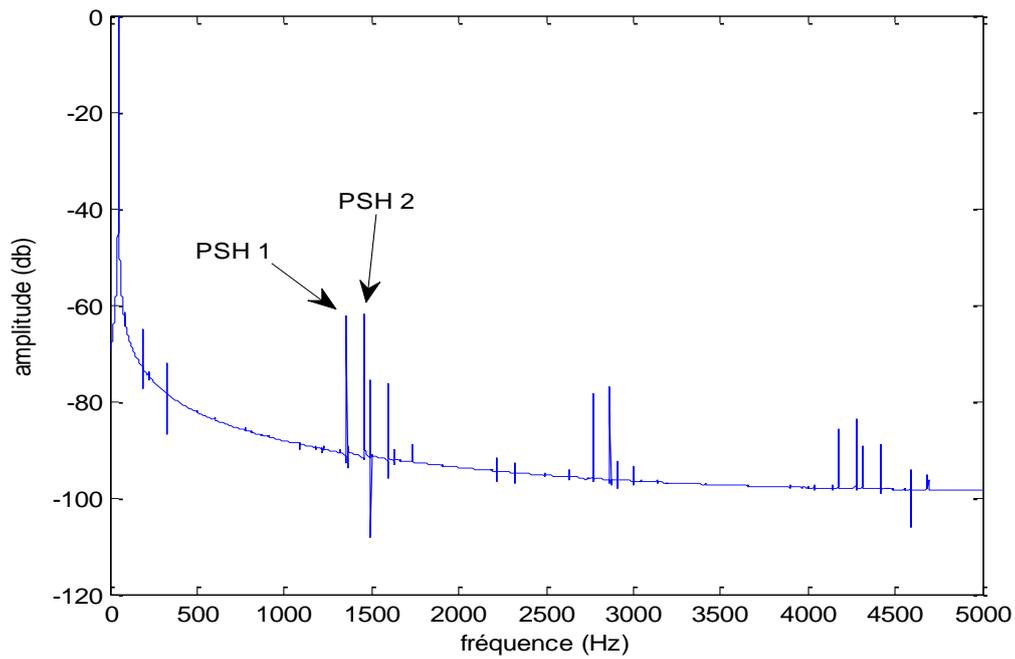


Figure III.20 Spectre du courant de la phase A statorique Nb=30. état sain sans inclinaison

Dans le figure (III.19) le cas avec inclinaison pour Nb = 30 obtient les deux premiers fréquences d'harmoniques de PSH possède un ordre non multiple de trois ou autrement 1387 Hz et 1487 Hz . le même chose dans le cas sans inclinaison la figure (III.20) avec de plus grand amplitude de harmonique par port le cas avec barres inclinés.

III.3.2 Le cas système non équilibré

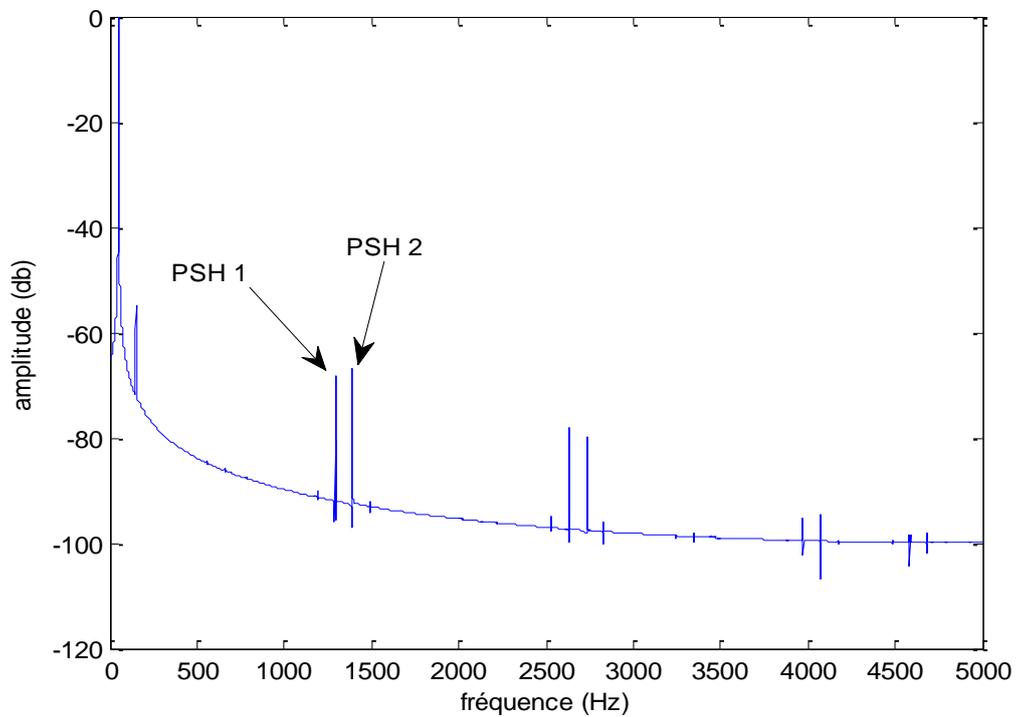


Figure III.21 Spectre du courant de la phase A statorique pour Nb=28. état sain avec inclinaison

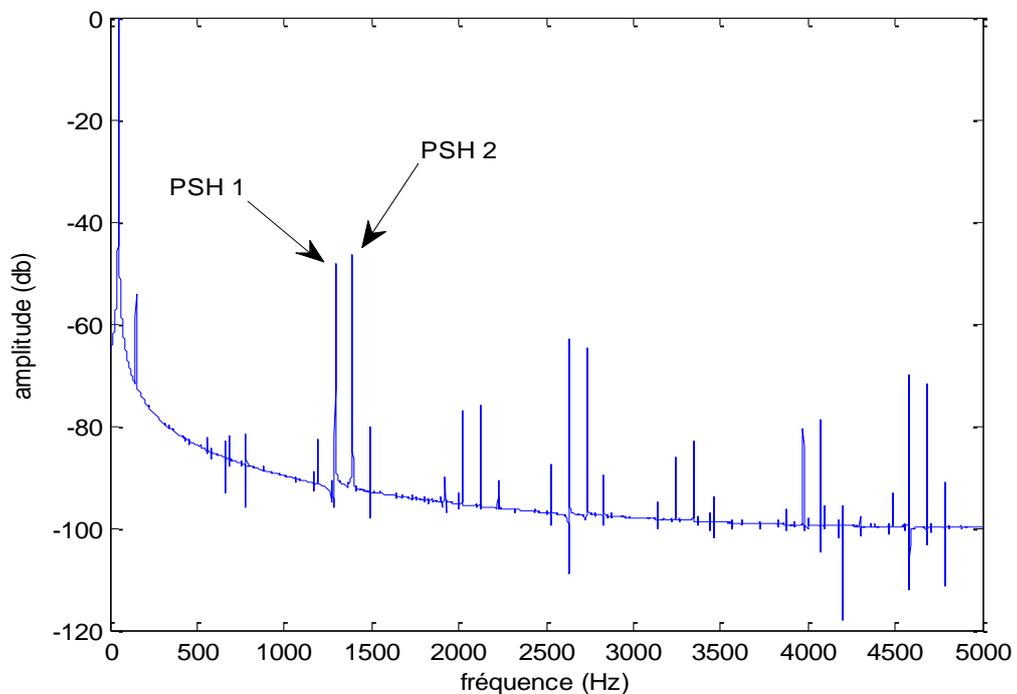


Figure III.22 Spectre du courant de la phase A statorique pour Nb=28. état sain sans inclinaison

Dans le figure (III.21) le cas avec inclinaison pour $N_b = 28$ obtient les deux premiers fréquences d'harmoniques 1292 Hz et 1392 Hz relatives aux PSH. Le même chose dans le cas sans inclinaison la figure (III.22) de plus d'harmoniques est supérieure et grand amplitude para port le cas avec inclinaison

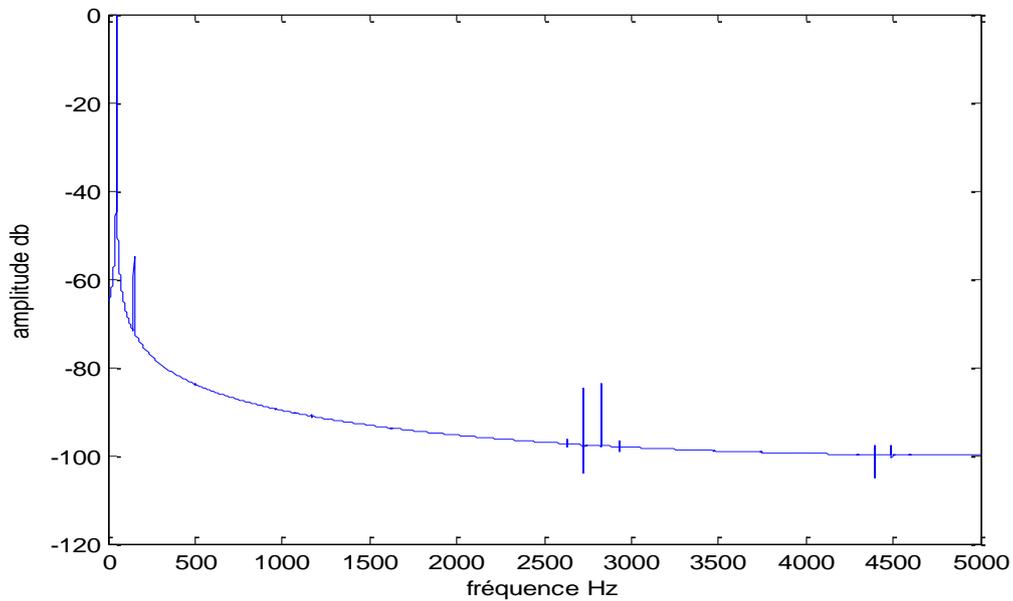


Figure III.23 Spectre du courant de la phase A statorique pour $N_b=29$. état sain avec inclinaison

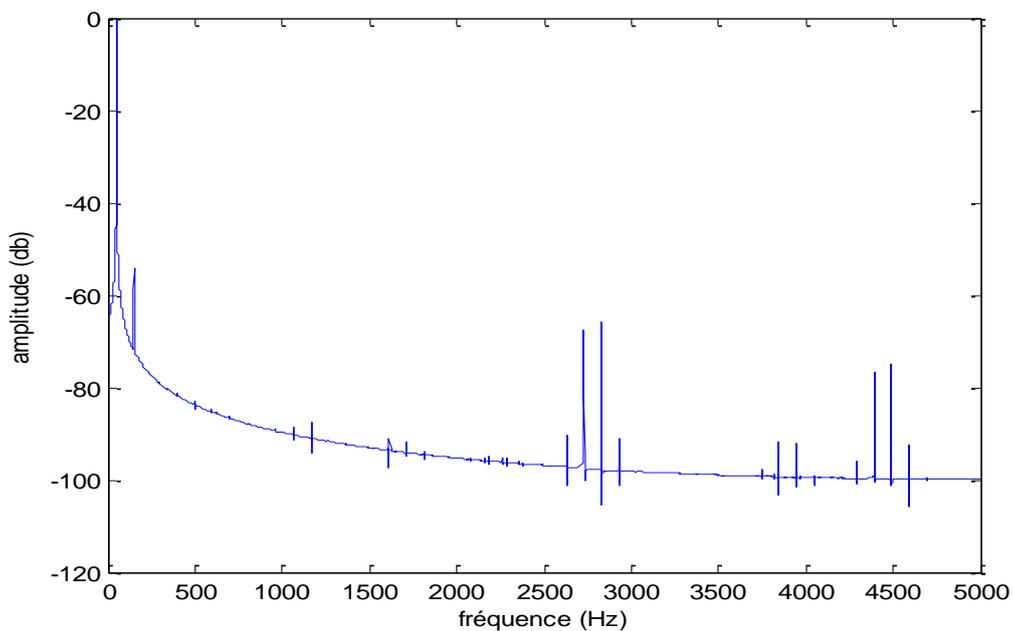


Figure III.24 Spectre du courant de la phase A statorique pour $N_b=29$. état sain sans inclinaison

Dans les figures (III.23), (III.24) pour $N_b=29$ n'a pas apparu fréquence relative aux PSH soit le cas avec inclinaison ou non

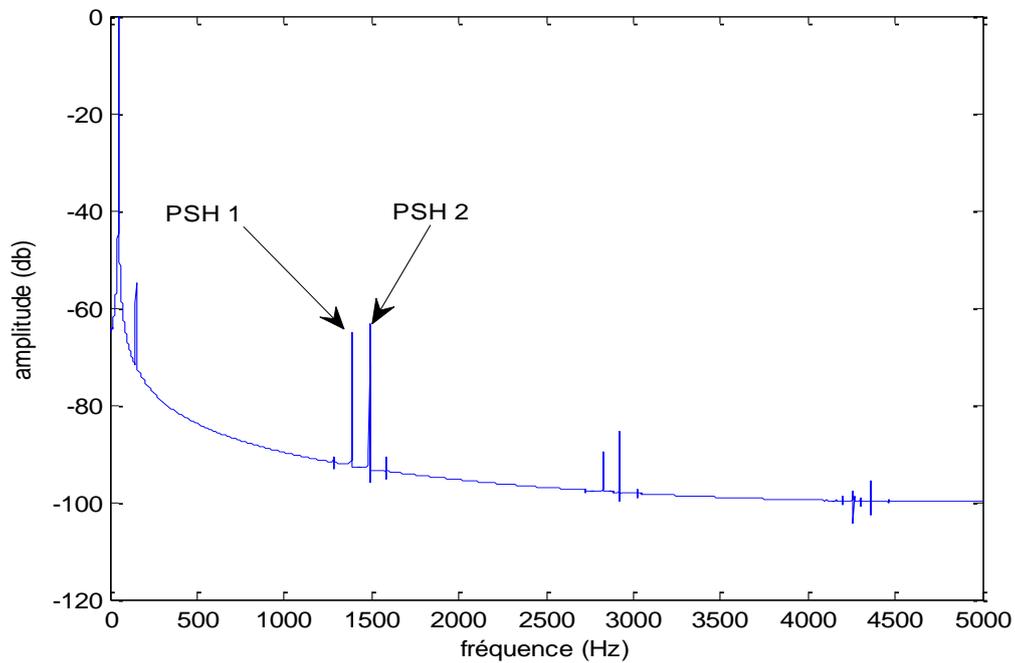


Figure III.25 Spectre du courant de la phase A statorique pour $N_b=30$. état sain avec inclinaison

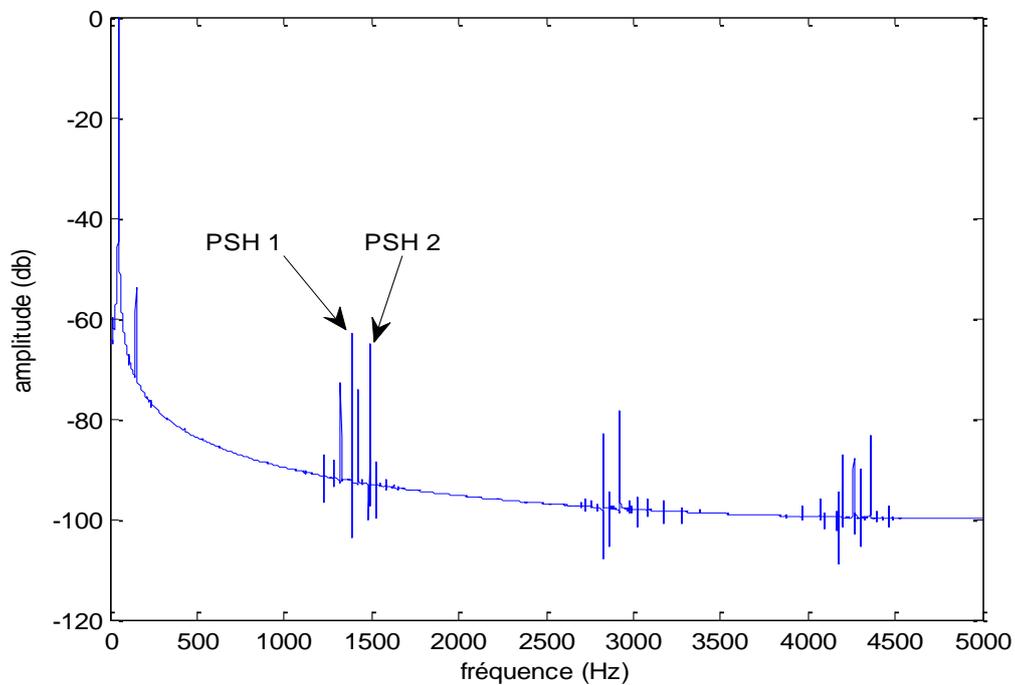


Figure III.26 Spectre du courant de la phase A statorique pour $N_b=30$. état sain avec inclinaison

Dans le figure (III.25) le cas avec inclinaison pour $N_b = 30$ obtient les deux premiers fréquences d'harmoniques 1387 Hz et 1487 Hz relatives aux PSH. Le même chose dans le cas sans inclinaison la figure (III.26) de plus d'harmoniques est supérieure.

On remarque dans les figures (III.21),(III.22),(III.25),(III.26) le cas système non équilibré apparaît toujours les deux premiers fréquences d'harmoniques relatives aux PSH

III.4 CONCLUSION

Dans ce chapitre nous avons montré avec les simulations que suite a une mauvaise du sélection de le nombre de barres rotorique et de number d'encoche statorique résultent des couples parasites et nous avons montré que le changement de résistance rotorique n'affecte pas sur le couple maximale et le couple parasites mais a un effet sur le couple de démarrage, et nous avons étudié également la visibilité des PSH .

Conclusion Générale

Le travail présenté dans ce mémoire s'inscrit dans le cadre du diagnostic des défauts dans les moteurs asynchrones triphasés. Nous avons focalisé l'étude sur les moteurs à cage.

Le début de ce mémoire a été marqué par un rappel des différents défauts qui peuvent affectés le bon fonctionnement des machines asynchrones triphasées à cage, ainsi que leurs causes .

Selon la littérature et la brève présentation des diverses méthodes du diagnostic. nous avons développé un modèle multi-enroulements qui tient en compte de la structure du rotor et nous mettons une explication détaillée sur les parasites de couples , Nous avons également parlé harmoniques d'encoche rotoriques.

Nous avons testé l'efficacité de l'influence de La combinaison du nombre d'encoche statorique et nombre de barre rotorique et l'effet d'inclinaison de barres rotorique et l'effet de la résistance rotorique

Bibliographie

- [1] A. Ghoggal ,’’ Diagnostic de la machine asynchrone triphasée- Modèle dédié à la détection des défauts ’’, memoire de magistere de l’université de Batna, 05/2005.
- [2] M. Harir, ’’ Etude des Défauts dans La Machine Asynchrone à Cage d'Ecureuil par l'Emploi de la Fonction d'Enroulement Modifiée’’, memoire de magistere de l’université d’Oran 2009
- [3] A. Chahmi ,’’ Intitulé Identification paramétrique de la machine asynchrone dédiée au diagnostic’’, memoire de doctorat de l’université d’Oran 02/2017
- [4] W.T. Thomson,’’On-line MCSA to diagnostise shorted turns in low voltage statorwindings of 3-phase induction motors prior to failure,’’ in Proceeding of IEMDC 2001.
- [5] A. Bouguerne ,’’ Diagnostic automatique des défauts des moteurs asynchrones ’’, memoire de magistere de l’université de Constantine 2009
- [6] E. Schaeffer, ’’Diagnostic des machines asynchrones : modèles et outils paramétriques dédiés à la simulation et à la détection des défauts’’, Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Nantes, 1999
- [7] Hubert Razik et Gaëtan Didier, ’’Notes de cours sur le diagnostic de la machine asynchrone’’, Notes de cours, I.U.F.M. de Lorraine, Maxeville, 7 janvier 2003.
- [8] R. Bousseksou, ’’ Modélisation analytique des machines Asynchrone application au diagnostic’’, memoire de magistere l’université de Constantine 2007
- [9] T. J. Sobczyk, A. Izworski, "Recognition of rotor eccentricity of induction motor based on the fourier spectra of phase currents" Proc. ICEM'98, pp. 408 – 413 , Vol 1, septembre 2 - 4 1998 Istanbul Turkey
- [10] O. Ondel ,’’Diagnostic par reconnaissance des formes : Application a un ensemble convertisseur – machine asynchrone’’,Thèse de Doctorat, Ecole centrale de Lyon, France, 2006
- [11] B. Bessam ,’’analyse et détection des défauts dans la machine asynchrone a base des techniques inetelligentes’’, Thèse de Doctorat de l’université de Biskra 06/2016

- [12] J. Penman, J. Sedding, H.G. Lloyd, B.A. Fink ,’’Detection and localisation of interturn short circuits in the stator winding of operating motors’’, IEEE Trans. on Energy Conversion, vol. 9, no. 4, December 1994, pp. 652-658 .
- [13] H. Henao, and al. ’’A frequency-domain detection of stator winding faults in induction machines using an external flux sensor’’, IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 39, No. 5, pp. 1272–1279, Sep./Oct. 2003.
- [14] M. Sahraoui, ’’Contribution aux diagnostics des machines asynchrones triphasées à cage’’, mémoire de magistère Université Mohamed Khider, Biskra, Décembre 2003.
- [15] M. Sahraoui, S. E. Zouzou, A. Aboubou, A. Ghoggal, ’’Etude comparative entre deux méthodes du diagnostic des cassures de barres dans les moteurs à induction,’’ in Proceeding of the 3rd Conference on Engineering, Batna, Algeria, October, 2004.
- [16] H. Cherif ,’’ Détection des défauts statorique et rotorique dans la machine asynchrone en utilisant l’analyse par FFT et ondelettes,’’ Mémoire de Magistère de l’université de Biskra 09/2014
- [17] D. Toumi, "Détection des défauts rotoriques dans la machine asynchrone (cassure des barres et excentricité)," Mémoire de Magistère, Université Mohamed Boudiaf, Oran, Avril 2002.
- [18] M. V. Deshpande , ’’ Design And Testing Of Electrical Machines,’’ book , PHI Learning Pvt. Ltd., 2010.
- [19] N. Kecili ,’’ Etude Des Pertes Et Couples Pulsatoires Dans Les Machines Asynchrones Alimentees Par Des Convertisseurs,’’ MEMOIRE DE MAGISTER de l’université de Tizi-Ouzou
- [20] A. Barbour, W.T. Thomson, "An industrial case of on-line current monitoring and finite element analysis to diagnose air-gap eccentricity problems in large high voltage 3-phase induction motors," in Proceeding of IEE, Ninth International Conference on Electrical Machines and drives, Conference publication, no. 468, 1999, pp. 242-246.
- [21] M. LIWSHITZ-GARIK M, ’’Computation of skin effect in bars of squirrel cage rotors,’’ Trans.AIEE, Vol.74,pp.768-771, 1955
- [22] G. Desbiens, ’’ MACHINES À INDUCTION BOBINÉES SUR DENTS,’’ Thèse de Doctorat de Laboratoire d’ Electrotechnique de Grenoble 10/2003
- [23] M. KOSTENKO, L. PIOTROVSKI, ’’ Machines électriques ’’tome II, Editions Mir, 1969
- [24] A. Ghoggal, ’’ Contribution à la Modélisation de la Machine Asynchrone Triphasée Dédiée au Diagnostic,’’ Thèse de Doctorat de l’université de Biskra 2010

PARAMETRES DU MOTEUR (1) UTILISE

$$N_e = 36$$

$$N_b = 28$$

$$N_s = 80.52$$

$$r = 0.0516m$$

$$l = 0.125m$$

$$g = 0.000172m$$

$$L_a = 0.009594H$$

$$r_b = 2.856 \cdot 10^{-5}$$

$$L_b = 1.27 \cdot 10^{-6} H$$

$$r_s = 2.86\Omega$$

$$r_e = 1.8560 \cdot 10^{-5} \Omega$$

$$L_e = 4.5357 \cdot 10^{-8} H$$

$$\mu = 1.256610^{-6}$$

$$p=1$$

$$f=50 \text{ Hz}$$

$$V_e = 230V$$

$$j_i = 0.023976 \text{ kgm}^2$$

VERIFICATION LE NOMBRE DES BARRES ROTORIQUES

$$N_b = 2p\{3.(m \pm q) \pm r\} \quad (m \pm q) = 0,1,2,3,.. \quad \text{et } r = 0 \text{ ou } 1$$

$$\text{Pour } N_b=28 \left\{ \begin{array}{l} r=1 \Rightarrow \begin{cases} 28 = 6k + 2 \Rightarrow k = 4.33 \Rightarrow \text{impossible} \\ 28 = 6k - 2 \Rightarrow k = 5 \Rightarrow \text{correct} \end{cases} \\ r=0 \Rightarrow 28 = 6k \Rightarrow k = 4.66 \Rightarrow \text{impossible} \end{array} \right.$$

Donc existe PSH

$$\text{Pour } N_b=29 \left\{ \begin{array}{l} r=1 \Rightarrow \begin{cases} 29 = 6k + 2 \Rightarrow k = 4.5 \Rightarrow \text{impossible} \\ 29 = 6k - 2 \Rightarrow k = 5.1 \Rightarrow \text{impossible} \end{cases} \\ r=0 \Rightarrow 29 = 6k \Rightarrow k = 4.83 \Rightarrow \text{impossible} \end{array} \right.$$

Donc n'existe pas PSH

$$\text{Pour Nb}=30 \left\{ \begin{array}{l} r = 1 \Rightarrow \begin{cases} 30 = 6k + 2 \Rightarrow k = 4.66 \Rightarrow \textit{impossible} \\ 30 = 6k - 2 \Rightarrow k = 5.33 \Rightarrow \textit{impossible} \end{cases} \\ r = 0 \Rightarrow 30 = 6k \Rightarrow k = 5 \Rightarrow \textit{correct} \end{array} \right.$$

Donc existe PSH

VERIFICATION L'ORDRE D'HARMONIQUE DE PSH

$$h_{PSH} = \left[\frac{N_b}{p} \pm 1 \right]$$

$$\text{Pour Nb}=28 : h_{PSH} = \begin{cases} [28 + 1] = 29 \Rightarrow \text{non multiple de trois} \\ [28 - 1] = 27 \Rightarrow \text{multiple de trois} \end{cases}$$

donc l'ordre multiple de trois

$$\text{Pour Nb}=30 : h_{PSH} = \begin{cases} [30 + 1] = 31 \Rightarrow \text{non multiple de trois} \\ [30 - 1] = 29 \Rightarrow \text{non multiple de trois} \end{cases}$$

donc l'orde non multiple de trois

Résumé:

Ce travail s'intéresse à l'élaboration de plusieurs tests virtuels pouvant renseigner sur les performances des machines électriques et/ou sont états à savoir avec ou sans défauts. La machine prise comme exemple est la machine asynchrone à cage d'écureuil. Ces tests ne peuvent en aucun cas remplacer les tests pratiques conventionnels, mais peuvent être utilisés avec profits à des fins didactiques entre autres. Parmi les tests effectués on cite, génération de la caractéristique électromécanique, parasites du couple, couple de démarrage, cassure de barres, influence de la résistance rotorique....

Mots clés :

Machine asynchrone

Diagnostic

PSH

ملخص:

هذا العمل يهتم بإجراء عدة اختبارات افتراضية من شأنها الإعلام أو الإخبار عن مردود وإمكانيات الماكينات الكهربائية و حالتها سواء مع أو بدون عطب.

الماكينات المأخوذة كمثال هي الماكينة اللامتزامنة ذات قفص السنجاب و هذه وهذه الاختبارات لا يمكنها بأي حال من الأحوال أن تعوض الاختبارات العلمية النظامية ولكن يمكنها أن تخدم أهداف تعليمية كمثال خاص.

الكلمات المفتاحية :

المكينات للامتزامنة

التشخيص

PSH