

République Algérienne Démocratique et populaire

Université Akli Mohand Oulhadj – Bouira

Faculté des sciences et sciences appliquées



Département de Génie électrique

Mémoire de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme Master 2

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Electrotechnique

Option : électromécanique et système de commande

Thème

Modélisation de la machine asynchrone à cage d'écureuil en présence des défauts de cassures de barres et d'anneaux de court-circuit

Présenté par :

ABBAS Rachid

BOUABOUD Hassiba

Soutenue le : 27/06/2016.

Devant le jury composé de :

Mr. GRICHE Issam.

Mr. YAHIOU Abdelghani.

Mr. KIHAL Med Charif.

Encadrée par:

Mme: YASSA.N

Mr. BENSAID.S

Année universitaire: 2015/2016

Remerciements

d'abord merci à dieu de nous avoir donné la force pour terminer ce travail.

On tiens à exprimer nos sincère gratitude à Mme. YASSA.N, MAA et à Mr. BENSALD.S, MCA, à l'Université de Bouira. Pour nous avoir encadré durant notre préparation de ce mémoire. leur grande disponibilité, leur grande vivacité et leur engagement scientifique nous ont aidé à dépasser les obstacles durant ces derniers mois .

Mes remerciements les plus sincères sont adressés au nombres de juries Pour l'honneur qui nous ont fait en acceptant de jugy ce mémoire.

On remercie nos enseignants de genie électrique à l'université de Bouira pendant notre cursus et sans oublier tout personne ayant participé de près ou de loin à réaliser ce travail, et toute personnes dont nous avons oublié de citer.

Merci aussi à tous nos amis et collègues à l'université de Bouira. On leur exprime notre profonde sympathie.

Madame BOUABOUD Hassiba

Je dédie ce modeste travail

A mon mari et mes enfants avec toute mon affection.

A mes parents avec toutes mes reconnaissances.

A ma famille.

A tous mes amis.

Mr ABBBAS Rachid

Je dédie ce modeste travail

A mes parents avec toutes mes reconnaissances.

A mes frères et sœurs.

A tous mes amis.

Sommaire

Sommaire

Liste des symboles

Liste des figures

Introduction Générale

Chapitre 1. Constitution et présentation des défauts de la machine asynchrone

Sommaire Chapitre 1

Introduction.....	3
1.1 Constitution des machines asynchrones.....	3
1.1.1 Stator.....	4
1.1.2 Rotor.....	5
1.1.3 Organes mécaniques.....	6
1.2 Principe de fonctionnement de la machine asynchrone.....	6
1.3 Étude statistique des défaillances de la machine asynchrone.....	7
1.4 Causes des défauts.....	8
1.5 Défaillances électriques.....	9
1.5.1. Défauts au stator.....	9
1.5.2. Défauts au rotor.....	12
1.6 Défaillances mécaniques.....	12
1.6.1. Défauts d'excentricités.....	13
1.6.2. Défauts de roulements.....	14
1.7 Conséquences des défauts.....	15
1.8 Méthodes de détection et de diagnostic des défauts la machine asynchrone.....	15
1.8.1. Détection à partir des méthodes internes (connaissance à priori).....	16
1.8.2. Détection à partir des méthodes externes.....	16
1.8.3. Analyse des signaux vibratoires.....	17
1.8.4. Analyse du couple électromagnétique.....	18
1.8.5. Analyse du flux.....	18
1.8.6. Analyse du vecteur de Park.....	18
1.8.7. Diagnostic par analyse du courant statorique.....	19
1.8.8. Rupture de barre ou portion d'anneaux.....	20
1.8.9. Excentricité.....	20
Conclusion.....	20

Chapitre 2. Modélisation de la machine asynchrone à cage d'écureuil

Sommaire Chapitre 1

Introduction.....	21
2.1 Modèle de la machine asynchrone saine.....	21
2.2 Hypothèses de départ.....	21
2.3 Modélisation du stator.....	22

2.3.1. Structure du stator.....	22
2.3.1.1 Equations électriques statoriques.....	23
2.4 Modélisation du rotor.....	25
2.4.1. Structure du rotor.....	25
2.4.1.1 Equations électriques rotoriques.....	27
2.5 Équations mécaniques de la machine.....	29
2.6 Expression du couple électromagnétique.....	30
2.7 Établissement du modèle d'état.....	30
2.8 Validation du modèle de la machine.....	33
2.9 Résultats de la simulation.....	34
2.9.1. Fonctionnement à vide.....	34
2.9.2. Fonctionnement en charge.....	36
2.10 Interprétation des résultats de simulation.....	38
Conclusion.....	39

Chapitre 3. Modélisation de la machine asynchrone à cage d'écureuil en présence des défauts de cassure de barres et d'anneaux de c-c

Sommaire Chapitre 3

Introduction.....	40
3.1 Défaut de cassure de barre rotorique.....	40
3.2 Simulation de rupture de barres au rotor.....	41
3.3 Représentation d'état du modèle de défaut.....	42
3.4 Résultats de la simulation.....	43
3.4.1. Cas d'une barre cassée à $t=2s$	43
3.4.2. Cas de cassure de deux barres cassées adjacentes à $t=2s$	46
3.4.3. Cas de cassure de deux barres cassées opposées à $t=2s$	49
3.4.4. Cas de cassure de trois barres simultanément à (1.5s, 2.5s et 3.5s).....	52
3.5 Interprétation des résultats.....	56
3.6 Cassure d'un segment d'anneau de court-circuit.....	57
3.7 Représentation d'état du modèle de défaut.....	58
3.8 Résultats de la simulation.....	58
3.8.1. Cas de cassure d'un segment d'anneau à $t=2s$	58
3.8.2. Cas de cassure d'une barre rotorique à $t=2s$ et d'un segment d'anneau à $t=3s$	61
3.9 Interprétation des résultats.....	64
3.10 Analyse spectral du courant statorique.....	65
3.10.1 Résultats de la simulation.....	65
3.10.2. Interprétation des résultats.....	66
Conclusion.....	67

Conclusion générale

Annexe

Bibliographie

Liste des symboles

LISTE DES SYMBOLES

Symboles	Désignations
S_a, S_b, S_c	les trois phases statoriques
f_s	Fréquence d'alimentation.
g	Glissement
J_t	Moments d'inertie
l	Longueur de fer
$[\Phi_s]$	vecteur flux statorique
$[\Phi_r]$	vecteur flux rotorique
$[\Phi_{sr}]$	flux statorique dû aux courants statoriques
$[\Phi_{rs}]$	flux statorique dû aux courants rotoriques
$[L_s]$	matrice inductance statorique
$[I_s]$	Vecteur courant statorique
$[I_r]$	Vecteur courant rotorique
$[M_{sr}]$	matrice des inductances mutuelles entre stator et rotor
$[M_{rs}]$	matrice des inductances mutuelles entre rotor et stator
m	Une phase statorique
N_s	Nombre d'encoches statoriques
N_r	Nombres de barres rotoriques
L_{ls}	Inductance de fuite d'une phase statorique
L_{ms}	Inductance magnétisante d'une phase statorique
e	Epaisseur de l'entrefer
r	Rayon moyen de l'entrefer
l	Longueur du rotor
$[V_s]$	vecteur tension statorique
$[R_s]$	matrice des résistances statorique

$[R_r]$	matrice des résistances rotorique
$[L_r]$	matrice inductance rotorique
a	l'angle électrique entre deux mailles rotoriques
M_{rr}	mutuelle entre deux mailles rotoriques
L_{rp}	inductance principale d'une maille
L_{kk}	L'inductance propre de maille k
L_b	Inductance de fuite d'une barre rotorique
L_e	Inductance de fuite du segment d'anneau de court-circuit
Ω	Vitesse rotorique
C_{em}	Couple électromagnétique
μ_0	Perméabilité magnétique de l'entrefer
f_v	Frottement visqueux
C_r	Couple de charge
θ_r	Position mécanique du rotor
W_{co}	Co-énergie magnétique
$[S_0]$	Vecteur nul de dimension $(N_r + 1)$
f_r	Fréquence rotorique
$F_{défaut}$	Fréquence d'un défaut
i_{rk}	courant dans la maille k
k	maille k
α	coefficient d'augmentation de la barre incriminée
β	coefficient d'augmentation de l'anneau incriminé
n	Vitesse de synchronisme
n_1	Vitesse de rotor
i_d	Courant de park
i_q	Courant de park
i_{sa}	Courant de la phase statorique A
i_{sb}	Courant de la phase statorique B

i_{sc}	Courant de la phase statorique C
f_{exc}	Fréquence du défaut d'excentricité
R_b	Résistance d'une barre rotorique
R_e	Résistance du segment d'anneau de court-circuit
$[V_r]$	vecteur tension rotorique
$[\Phi_{rr}]$	Le flux rotorique dû aux courants rotoriques
$[\Phi_{rs}]$	Le flux rotorique dû aux courant statoriques

Liste des figures

Liste des figures

L'ensemble des figures sont représenté dans le tableau suivant : **Tableau 1.1.** Liste des figures.

Figures	Noms	Pages
Figure 1.1.	Constitution typique d'une machine asynchrone à cage	04
Figure 1.2	Stator d'une machine asynchrone	04
Figure 1.3.	Vue schématique en perspective du rotor à cage d'écureuil	05
Figure 1.4.	Proportion des défauts	07
Figure 1.5.	Répartition des pannes sur les machines de faibles et moyennes puissances	08
Figure 1.6.	Répartition des pannes sur les machines de fortes puissances	08
Figure 1.7.	Détérioration typiques d'isolation menant a des courts-circuits dans les enroulements statorique de la machine asynchrone	10
Figure 1.8.	Court-circuit entre spires dans l'enroulement statorique du moteur asynchrone	11
Figure 1.9.	Rotor à cage avec rupture d'une barre.	12
Figure 1.10.	Excentricité statique et dynamique	13
Figure 1.11.	L'excentricité mixte	14
Figure 1.12.	Représentation d'un roulement à billes.	14
Figure 1.13.	Principe général de diagnostic à base de modèle.	16
Figure 1.14.	Principe de la surveillance par analyse spectrale	17
Figure 1.15.	Schéma synoptique de la méthode de l'analyse spectrale.	19
Figure 2.1.	Circuits électriques adoptés pour la modélisation des trois phases statoriques.	22
Figure 2.2.	Circuits électriques adoptés pour la modélisation de la cage rotorique.	26
Figure 2.3.	Organigramme du fonctionnement de la machine asynchrone à cage d'écureuil.	33
Figure 2.4.	Courant dans la phase statorique A.	34
Figure 2.5.	Zoom du courant dans la phase statorique A.	34
Figure 2.6.	Zoom du courant dans les trois phases statoriques.	34
Figure 2.7.	Courant dans la 3 ^{ème} barre rotorique IR ₃ .	35
Figure 2.8.	Courant dans la 10 ^{ème} barre rotorique IR ₁₀ .	35
Figure 2.9.	La vitesse de rotation.	35
Figure 2.10.	Le couple électromagnétique.	36
Figure 2.11.	Courant dans la phase statorique A.	36
Figure 2.12.	Zoom du courant dans la phase statorique A.	36
Figure 2.13.	Zoom du courant dans les trois phases statoriques.	37
Figure 2.14.	Courant dans la 3 ^{ème} barre rotorique IR ₃ .	37
Figure 2.15.	Courant dans la 10 ^{ème} barre rotorique IR ₁₀ .	37
Figure 2.16.	La vitesse de rotation.	38
Figure 2.17.	Le couple électromagnétique.	38
Figure 3.1.	Schéma de fonctionnement d'un rotor en défaut.	40
Figure 3.2.	Schéma équivalent de la cage rotorique avec une barre cassée.	42
Figure 3.3.	La vitesse de rotation.	43
Figure 3.4.	Le couple électromagnétique.	43
Figure 3.5.	Courant dans la phase statorique A.	44
Figure 3.6.	Zoom du courant dans la phase statorique A.	44

Figure 3.7.	Courant dans la phase statorique B.	44
Figure 3.8.	Courant dans la phase statorique C.	45
Figure 3.9.	Courant dans la 1 ^{ère} barre rotorique.	45
Figure 3.10.	Courant dans les barres rotoriques.	45
Figure 3.11.	Zoom des courants dans les barres rotoriques.	46
Figure 3.12.	La vitesse de rotation.	46
Figure 3.13.	Le couple électromagnétique.	46
Figure 3.14.	Courant dans la phase statorique A.	47
Figure 3.15.	Zoom du courant dans la phase statorique A.	47
Figure 3.16.	Courant dans la phase statorique B.	47
Figure 3.17.	Courant dans la phase statorique C.	48
Figure 3.18.	Courant dans la 1 ^{ère} et la 2 ^{ème} barre rotorique.	48
Figure 3.19.	Courant dans les barres rotoriques.	48
Figure 3.20.	Zoom du Courant dans les barres rotoriques.	49
Figure 3.21.	La vitesse de rotation.	49
Figure 3.22.	Le couple électromagnétique.	49
Figure 3.23.	Courant dans la phase statorique A.	50
Figure 3.24.	Zoom du courant dans la phase statorique A.	50
Figure 3.25.	Courant dans les trois phases statoriques.	50
Figure 3.26.	Courant dans la 1 ^{ère} et la 8 ^{ème} barre rotorique.	51
Figure 3.27.	Courant dans les barres rotoriques.	51
Figure 3.28.	Zoom du courant dans les barres rotoriques.	51
Figure 3.29.	Courant les barres rotoriques.	52
Figure 3.30.	Zoom du courant dans les barres rotoriques.	52
Figure 3.31.	La vitesse de rotation.	52
Figure 3.32.	Zoom de la vitesse de rotation.	53
Figure 3.33.	Le couple électromagnétique.	53
Figure 3.34.	Courant dans la phase statorique A.	53
Figure 3.35.	Zoom du courant dans la phase statorique A	54
Figure 3.36.	Courant dans les trois phases statoriques.	54
Figure 3.37.	Courant dans les barres rotoriques.	54
Figure 3.38.	Zoom du courant dans les barres rotoriques.	55
Figure 3.39.	Courant dans les barres rotoriques.	55
Figure 3.40.	Zoom du courant dans les barres rotoriques.	55
Figure 3.41.	Courant dans toutes les barres rotoriques.	56
Figure 3.42.	Schéma équivalent de la cage rotorique avec un segment d'anneau cassé.	57
Figure 3.43.	La vitesse de rotation.	58
Figure 3.44.	Le couple électromagnétique.	58
Figure 3.45.	Courant dans la phase statorique A.	59
Figure 3.46.	Zoom du courant dans la phase statorique A.	59
Figure 3.47.	Courant dans les trois phases statoriques.	59
Figure 3.48.	Courant dans la 3 ^{ème} barre rotorique.	60
Figure 3.49.	Courant dans les barres rotoriques.	60
Figure 3.50.	Zoom du courant dans les barres rotoriques.	60
Figure 3.51.	Courant dans les barres rotoriques.	61
Figure 3.52.	Zoom du courant dans les barres rotoriques.	61
Figure 3.53.	La vitesse de rotation	61

Figure 3.54.	Le couple électromagnétique.	62
Figure 3.55.	Courant dans la phase statorique A	62
Figure 3.56.	Zoom du courant dans la phase statorique A.	62
Figure 3.57.	Courant dans les trois phases statoriques.	63
Figure 3.58.	Courant dans la 1 ^{ère} et la 3 ^{ème} barre rotorique	63
Figure 3.59.	Zoom du courant dans la 1 ^{ère} et la 3 ^{ème} barre rotorique.	63
Figure 3.60.	Courant dans les barres rotoriques.	64
Figure 3.61.	Zoom du courant dans les barres rotoriques	64
Figure 3.62.	Spectre de la FFT du courant statorique à l'état sain.	65
Figure 3.63.	Spectre de la FFT du courant statorique I_{s_a} en présence d'une cassure de barre.	66
Figure 3.64.	Spectre de la FFT du courant statorique I_{s_a} en présence de cassure de trois barres.	66

Introduction générale

Introduction Générale

Durant ce dernier siècle, l'accroissement optimal de la compétitivité mondiale en matière de production dans un contexte international très concurrentiel a poussé les industriels à chercher comment assurer et à maîtriser la disponibilité et la sûreté de fonctionnement de leurs outils de production. Ces exigences en matière de sûreté de fonctionnement ont fait émerger une nouvelle science de l'ingénieur qui est la surveillance des équipements industriels. Cette dernière englobe la détection et le diagnostic des défaillances. La détection d'une défaillance a pour but principal d'améliorer et d'augmenter la disponibilité des systèmes afin de réduire les coûts de la maintenance et d'éviter un arrêt brusque de la production. Par contre le diagnostic de défauts a pour rôle la localisation (déterminer quelle partie du système est affectée) et l'identification de ce défaut (quantification du défaut). Actuellement le domaine de diagnostic est devenu un outil essentiel de la maintenance corrective et par conséquent, les entreprises équipées par des systèmes de surveillance ont tendance de plus en plus à automatiser la procédure de maintenance.

La machine asynchrone, de part sa construction, est la machine la plus robuste et la moins chère du marché. Cette machine est largement utilisée dans la plupart des entraînements électriques dans plusieurs domaines industriels, notamment pour des applications à vitesse constante ou à vitesse variable. Comme toute autre machine, la machine asynchrone n'est pas à l'abri d'un dysfonctionnement. Elle peut être affectée par des défauts électriques ou mécaniques au niveau du stator, ou du rotor, ou les deux en même temps. Les causes des défauts peuvent être dues à un simple problème de fabrication ou à une utilisation non conforme de la machine. Parfois le milieu dans lequel la machine est utilisée peut être responsable à la détérioration de la machine [1]. De ce fait, un arrêt brusque dû à une anomalie quelconque peut engendrer des pertes financières (pertes de production, la remise en état de l'outil de production, les retards de livraison) et matériels inévitables. Par conséquent, il est recommandé de détecter de façon précoce un défaut afin d'y remédier dans des délais les plus brefs et minimiser les pertes. Ceci a poussé la majorité des industriels à doter leurs chaînes de production par des systèmes sophistiqués de détection et de diagnostic de défauts. Ces deux dernières fonctions ont pour objectif d'une part l'amélioration de la sécurité des êtres humains et des biens et d'autre part l'augmentation des gains de productivité résultant de l'accroissement de la disponibilité des équipements et d'une gestion efficace des opérations de maintenance.

Le travail réalisé dans le cadre de ce mémoire présente la détection des défauts rotoriques dans la machine asynchrone à cage d'écureuil. Les outils d'analyse et diagnostic de défaut sont à base de l'utilisation du spectre par le biais de la transformée de Fourier (FFT). Pour mener cette étude, le mémoire est structuré en trois chapitres :

Dans le premier chapitre, nous présentons en premier temps les éléments de construction de la machine asynchrone ainsi que les différents défauts pouvant survenir sur chacun d'eux. Dans un deuxième temps, nous citons quelques techniques de détection de ces défauts.

Le second chapitre est consacré à la modélisation de la machine asynchrone en utilisant la méthode des circuits électriques magnétiquement couplés, où 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 phénomènes pouvant apparaître au sein de la machine asynchrone. Cette approche offre un bon compromis en termes de précision du modèle et de temps de calcul, [2][3]. De plus ce type de modélisation permet de prendre en compte un certain nombre de défauts d'origine électromagnétique :

- Les défauts de court-circuit entre spires statoriques.
- Les défauts de type rupture de barre rotorique et/ou de portion d'anneau de court-circuit.

La simulation de ce modèle, permet de déterminer le comportement de la machine asynchrone à état sain (sans défaut).

Dans le troisième chapitre, nous abordons le problème de la machine à cage présentant des défaillances de structure, nous nous intéressons, plus spécialement, à la rupture de barres rotoriques et d'anneaux de court-circuit, et à leurs impacts sur le fonctionnement de la machine.

Nous terminons notre travail par une conclusion sur l'ensemble de cette étude.

CHAPITRE 1

CONSTITUTION ET PRÉSENTATION DES DÉFAUTS DE LA MACHINE ASYNCHRONE

Introduction

Le moteur asynchrone est la machine la plus utilisée dans le domaine des puissances supérieures à quelques kilowatts car il présente de nombreux avantages tels que sa puissance massique, sa robustesse, sa facilité de mise en œuvre, son faible coût, etc.... L'apparition dans les années 1980 des variateurs permettant de faire varier la fréquence de rotation dans une large gamme a grandement favorisé son développement. En effet, il entre dans la conception de nombreux procédés industriels associant des convertisseurs statiques et des machines électriques (traction électrique, laminoirs, levage, pompage, etc....), [4].

Bien que la machine asynchrone ait la réputation d'être robuste, elle peut présenter comme toute autre machine électrique, des défaillances d'ordre électrique ou mécanique. Ainsi, en raison des conséquences importantes et coûteuses que peut engendrer l'apparition d'un défaut sur les processus industriels, le diagnostic des défauts fait l'objet d'un engouement prononcé depuis les deux dernières décennies [4].

L'objectif de ce premier chapitre est d'effectuer quelques rappels élémentaires sur les éléments de constitution de la machine asynchrone. Nous effectuons ensuite une présentation des différents défauts pouvant survenir sur chacun de ces éléments, en citant leurs causes et effets sur le comportement de la machine. Finalement nous rappelons brièvement les techniques de base couramment utilisées pour la détection des divers défauts.

1.1 Constitution des machines asynchrones

La machine asynchrone est composée d'une partie fixe appelée le stator et d'une partie tournante appelée rotor (figure1.1). Contrairement aux machines synchrones et à courant continu, seul les enroulements statoriques sont couplés à un réseau d'alimentation dont les tensions (amplitude et fréquence) définissent l'état magnétique de l'entrefer. Les enroulements du rotor sont raccordés sur eux-mêmes. Le moteur asynchrone ne possède donc ni enroulements d'excitation ni aimants permanents. Pour ce qui est du flux rotorique nécessaire pour la formation du couple électromagnétique, il est produit à partir de l'induction [5].

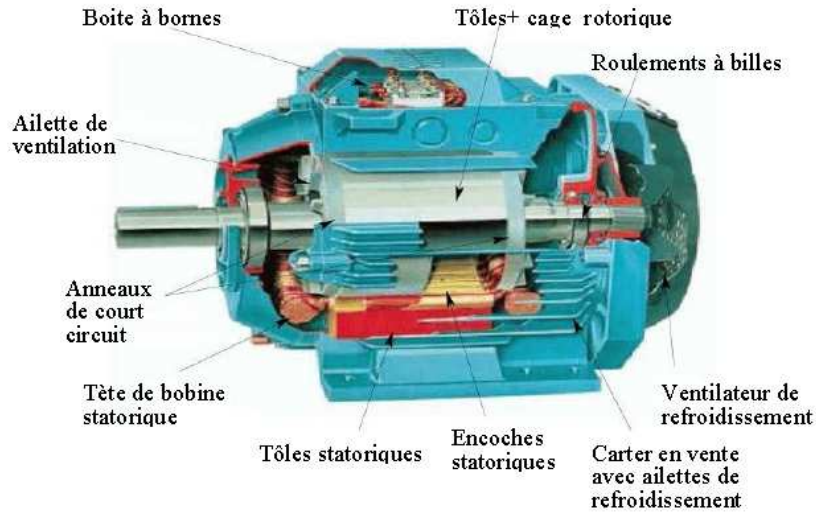


Figure 1.1. Constitution typique d'une machine asynchrone à cage, [1].

1.1.1 Stator

Le stator est constitué d'un certain nombre de bobines réparties dans des encoches qui constituent trois bobinages indépendants (figure 1.2). Elles sont destinées à créer un champ magnétique tournant lorsqu'on les alimente par un système de tensions ou de courants triphasés. Les topologies rencontrées dans les bobinages des machines tournantes à courants alternatifs sont nombreuses [5].



Figure 1.2. Stator d'une machine asynchrone.

1.1.2 Rotor

Le rotor présent deux configurations dont le choix dépend de l'utilisation de la machine. Nous distinguons le rotor bobiné qui supporte un bobinage semblable à celui du stator où ces trois bobinages sont couplés en étoile et court-circuités sur eux même. La deuxième configuration qui est la plus usitée dans l'industrie et qui est également celle utilisée au niveau des différents axes de recherche concernant la machine asynchrone est le rotor à cage d'écureuil, [6].

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 1.3). 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, [4].

Dans le cas de rotor 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. 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 et il constitue la plus grande partie du parc des moteurs asynchrones actuellement en service, [4]

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 développées deux autres types de cages (rotor à double cage et rotor à encoches profondes), [6]

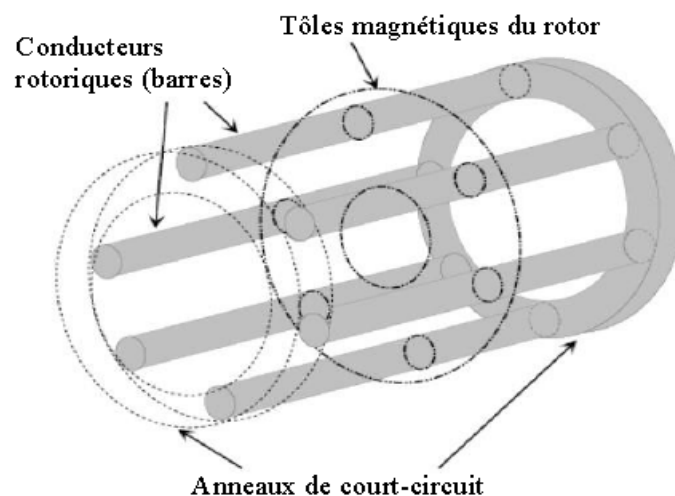


Figure 1.3. Vue schématique en perspective du rotor à cage d'écureuil [6].

1.1.3 Organes mécaniques

La carcasse sert de support, elle joue le rôle d'enveloppe et assure la protection contre l'environnement extérieur. L'arbre est un organe de transmission. Il comprend une partie centrale qui sert de support au corps du rotor et un bout d'arbre sur lequel est fixé un demi-accouplement. Il est généralement constitué en acier moulé ou forgé. Son dimensionnement est en fonction des efforts de flexion (force centrifuge qui s'exerce sur lui, attraction magnétique radiale, etc...), des efforts radiaux et tangentiels dus aux forces centrifuges, des efforts de torsion (couple électromagnétique transmis en régime permanent, transitoire). Il est supporté par un ou plusieurs paliers. Ces paliers soutiennent le rotor et assurent la libre rotation. Le second palier est libre pour assurer les dilatations thermiques de l'arbre. Une isolation électrique de l'un des paliers assure l'élimination des courants dans l'arbre dû aux dissymétries des réluctances du circuit magnétique. Ils sont généralement à roulements pour les machines de petite et moyenne puissance, [4]

1.2 Principe de fonctionnement de la machine asynchrone

Le principe de fonctionnement de la machine asynchrone est basé entièrement sur les lois de l'induction. La machine asynchrone est considérée comme un transformateur à champ magnétique tournant dont le stator étant comparable à l'enroulement primaire et le rotor à l'enroulement secondaire en court-circuit, [7].

Ce fonctionnement est reposé sur le principe de l'interaction électromagnétique du champ tournant, crée 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 au champ tournant.

Lorsque le rotor tourne à une vitesse N différente du synchronisme, l'application de la loi de FARADAY à un des enroulements rotoriques montre que celui-ci devient le siège d'une force électromotrice qui étant court-circuité sur les enroulements va donner naissance à un courant dont l'intensité est limitée par l'impédance de ce dernier. L'interaction entre ce courant et le champ glissant va donner naissance à des forces s'exerçant sur les brins du rotor dont le moment par rapport à l'axe de rotation constituera le couple de la machine, [7]. Lorsque le champ est sinusoïdal, sa vitesse de rotation est :

$$n_1 = \frac{f}{P} \quad (1.1)$$

Où f : la fréquence d'alimentation.

p : le nombre de paire de pôles.

L'interaction électromagnétique de deux parties de la machine n'est possible que lorsque la vitesse du champ tournant (n_1) diffère de celle du rotor (n), c'est-à-dire lorsque $n \neq n_1$, car dans le cas contraire, c'est-à-dire lorsque $n = n_1$, le champ serait immobile par rapport au rotor et aucun courant ne serait induit dans l'enroulement rotorique.

Le rapport $g = \frac{n_1 - n}{n}$ est appelée glissement de la machine asynchrone.

1.3 Etude statistique des défaillances de la machine asynchrone

Une étude statistique, effectuée en 1988 par une compagnie d'assurance allemande de systèmes industriels, [8] sur les pannes des machines asynchrones de moyenne puissance (de 50 kW à 200kW) a donné les résultats suivants (figure 1.4) :

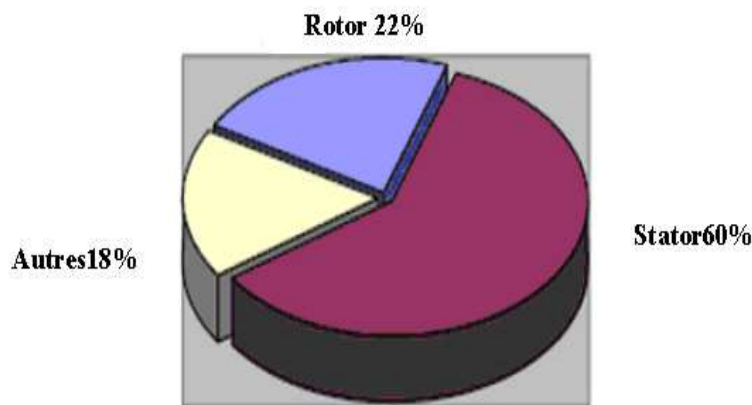


Figure 1.4. Proportion des défauts, [4]

La répartition des pannes dans les différentes parties du moteur est présentée sur la **figure 1.5**.

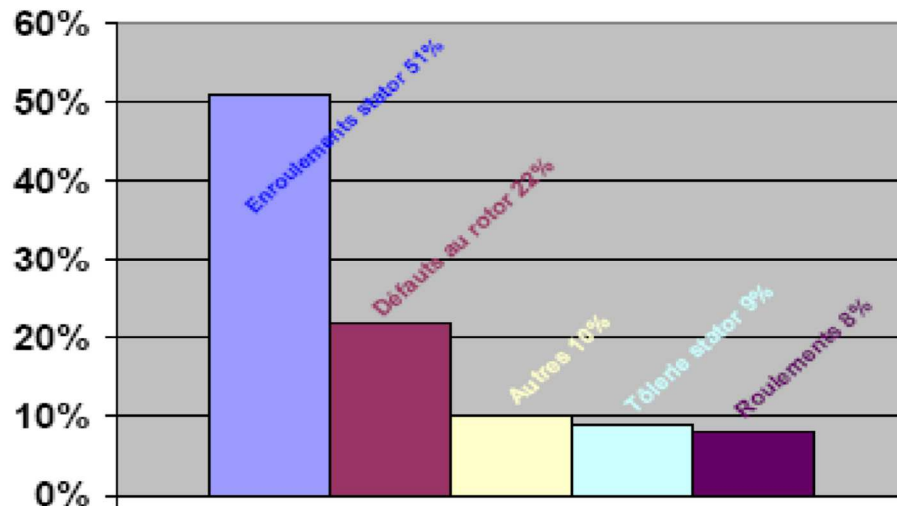


Figure 1.5. Répartition des pannes sur les machines de faibles et moyennes puissances, [4].

Une autre étude statistique [9] faite sur des machines de grande puissance (de 100 kW à 1 MW) donne des résultats qui sont présentés sur la figure 1.6.

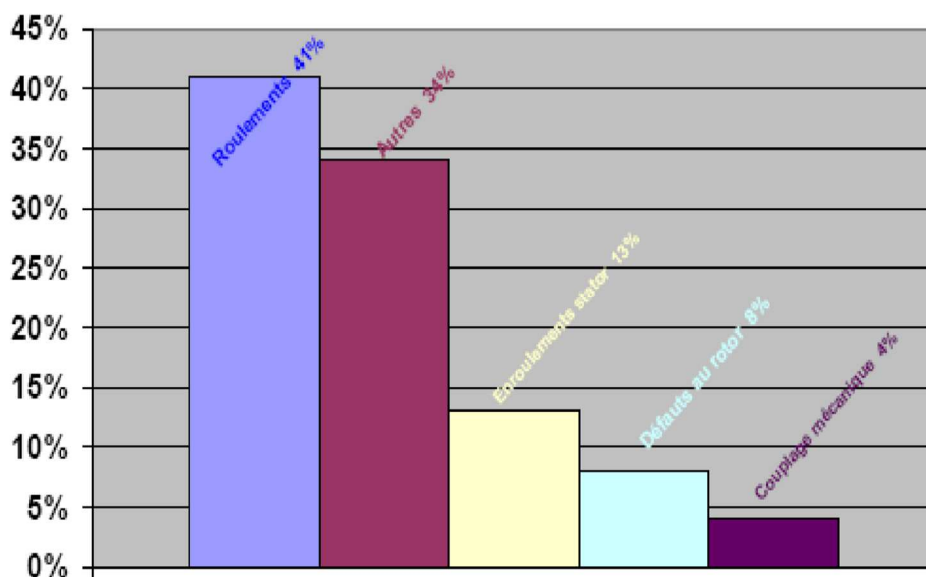


Figure 1.6. Répartition des pannes sur les machines de fortes puissances, [4].

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

1.4 Cause des défauts

Les défaillances peuvent être d'origines diverses, électriques, mécaniques ou bien encore magnétiques. Leurs causes sont multiples et peuvent se classer en trois groupes [6]:

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

1.5 Défaillances électriques

Dans cette famille nous pouvons citer les défauts statoriques et les défauts rotoriques.

1.5.1 Défauts au stator

La majeure partie des défauts statoriques est attribuée à la dégradation d'isolants qui se manifestent sous la forme d'un court-circuit entre spires, d'un court-circuit entre deux phases ou d'un court-circuit entre une phase et la carcasse.

a. Court-circuit entre spires

Le court-circuit entre spires de la même phase est un défaut fréquent qui peut apparaître soit au niveau des têtes de bobines soit dans les encoches, ce qui entraîne une diminution du nombre de spires effectives de l'enroulement. D'autre part, il entraîne aussi une augmentation des courants statoriques dans la phase affectée, une légère variation de l'amplitude sur les autres phases et dans le cas des machines asynchrones, il amplifie les courants dans le circuit rotorique. La contrainte thermique amenée par le courant de court-circuit risque d'entraîner la propagation du défaut à d'autres spires, ce qui peut conduire au déclenchement des protections électriques dans l'alimentation.

b. Court-circuit entre phases

Un court-circuit entre phases peut arriver en tout point du bobinage [10], mais les plus fréquents apparaissent dans les têtes de bobines, puisque c'est dans celles-ci que les conducteurs de phases différentes se côtoient. L'influence de ce type de défaut sur le fonctionnement de la machine dépend de la localisation du défaut (de la partie affectée). Si le court-circuit est proche de l'alimentation entre phases, il induit des courants très élevés qui conduisent à la fusion des conducteurs d'alimentation ce qui provoque un arrêt net de la machine. Si le court-circuit est proche du neutre entre deux phases, il engendre un déséquilibre des courants de phases avec un risque moindre de fusion des conducteurs. L'apparition de ce type de défaut dans le cas des machines asynchrones, provoque une augmentation des courants dans les barres ainsi que dans les anneaux du

rotor à cage, [11]. **La figure 1.7.** représente de manière significative les différents types de court-circuit pouvant affecter le stator de la machine asynchrone. **La figure 1.8.** représente, quant à elle, la provenance de ces courts-circuits.

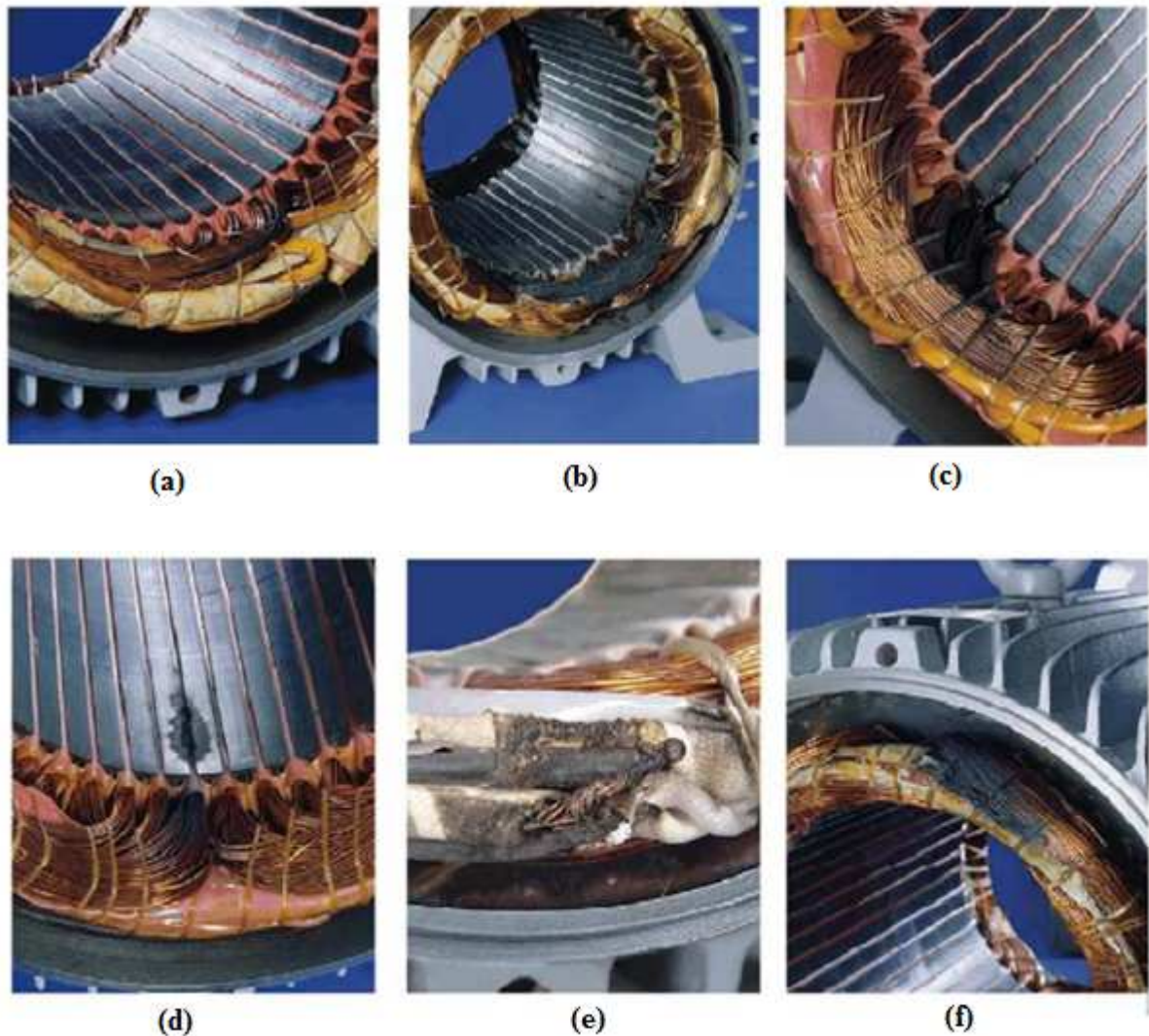


Figure 1.7. Détérioration typiques d'isolation menant à des courts-circuits dans les enroulements statorique de la machine asynchrone, [12].

Avec :

(a) : court-circuit entre spires et des spires de la même phase.

(b) : Enroulement court-circuité.

(c) : Court-circuit entre l'enroulement et le noyau statorique à l'extrémité de l'encoche statorique.

(d) : Court-circuit entre l'enroulement et le noyau statorique au centre de l'encoche statorique.

(f) : Court-circuit entre phases.

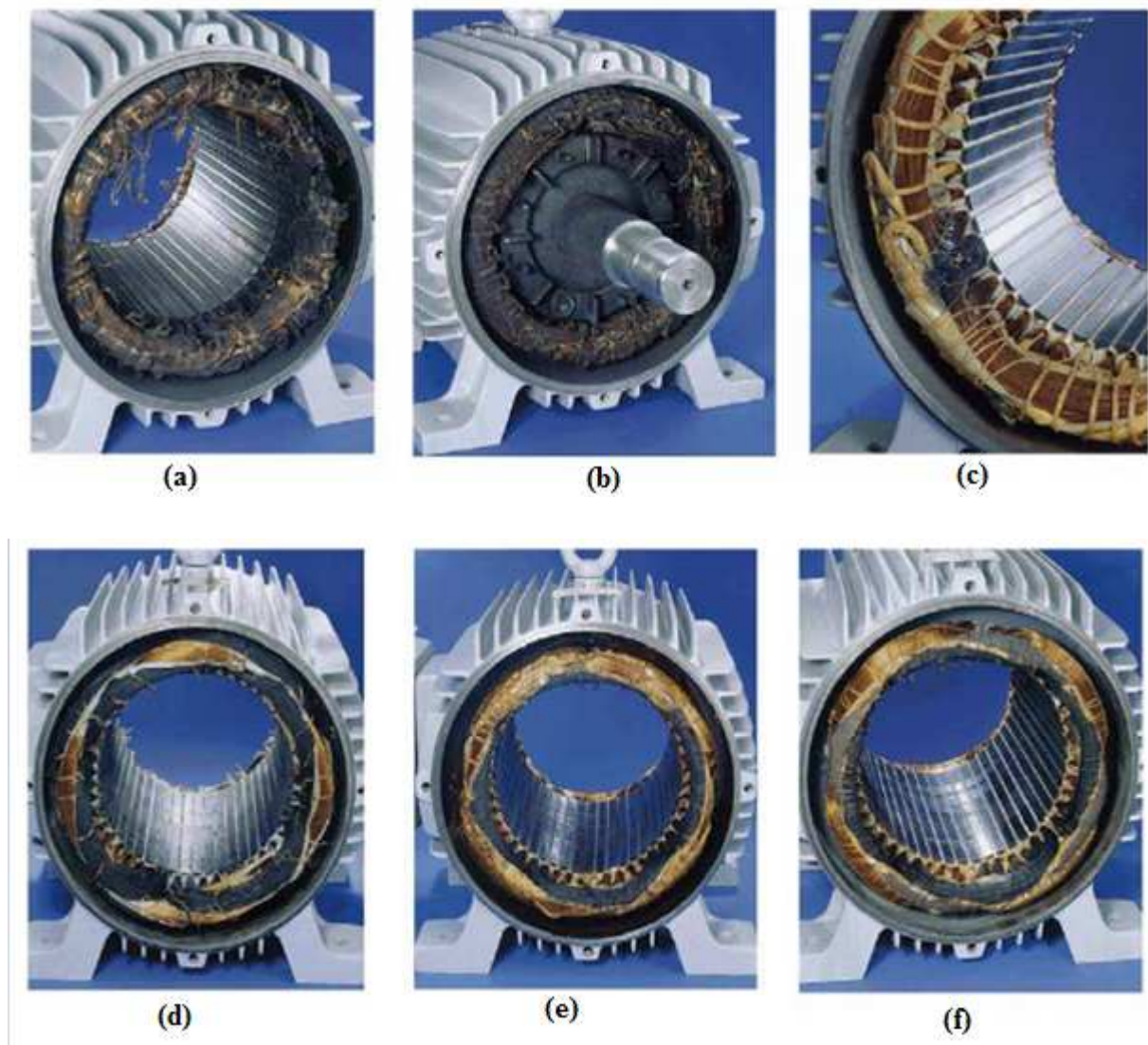


Figure 1.8. Court-circuit entre spires dans l'enroulement statorique du moteur asynchrone, [12].

Avec :

- (a) : Court-circuit dans une phase due à la surcharge du moteur.
- (b) : Court-circuit dans une phase due au rotor bloqué.
- (c) : Court-circuit entre spires dû aux coupures de tension.
- (d) : Court-circuit dans une phase due à une perte de phase dans un moteur connectée en étoile.
- (e) : Court-circuit dans une phase due à une perte de phase dans un moteur connecté en triangle.
- (f) : Court-circuit dans une phase due à un déséquilibre d'alimentation.

1.5.2 Défauts au rotor

Un rotor peut être affecté par les mêmes défauts que le stator s'il s'agit d'un rotor bobiné. En revanche pour un rotor à cage d'écureuil, les défauts peuvent être une rupture de barre ou encore une rupture d'anneaux de court-circuit. Ces ruptures de barres ou portions d'anneau peuvent être dues à une surcharge mécanique ou encore à un échauffement local excessif ou tout simplement à un défaut de fabrication. La détection de ces défaillances est rendue difficile par le fait que lors de leurs apparitions, la machine continue à fonctionner.

Ces défauts ont par ailleurs un effet cumulatif. Le courant qui conduisait une barre cassée, par exemple, se répartit sur les barres adjacentes. Ces barres sont alors surchargées, ce qui conduit à leur rupture, et ainsi de suite jusqu'à la rupture d'un nombre suffisamment important de barres qui provoquera l'arrêt de la machine. Elles provoquent aussi une dissymétrie de répartition de courants au rotor et des à-coups des couples, ceci va générer des oscillations sur les courants et le couple électromagnétique. Quant à la cassure de portoin d'anneau, c'est un défaut aussi fréquent que la cassure de barre car un mauvais dimensionnement des anneaux, induit une détérioration des conditions de fonctionnement ou encore une surcharge de couple peuvent entraîner leur cassure.

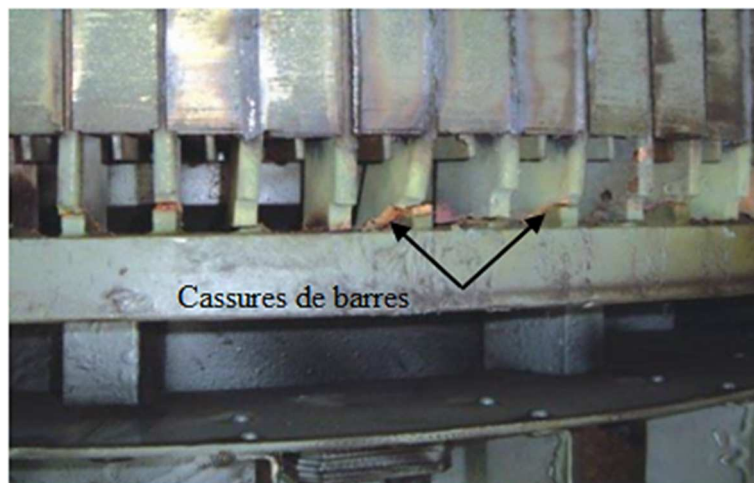


Figure 1.9. Rotor à cage avec rupture d'une barre.

1.6 Défaillances mécaniques

Dans la littérature, les défauts mécaniques tiennent une grande place dans les défauts du moteur. Dans cette catégorie de défaillances nous pouvons citer les défauts d'excentricités statique, dynamique et mixte ou encore les défauts de roulement, [13], [14] et [15].

1.6.1 Défauts d'excentricités

Les conséquences des défauts mécaniques se manifestent généralement au niveau de l'entrefer par des défauts d'excentricité. L'excentricité d'une machine électrique est un phénomène qui évolue dans le temps et qui existe de sa fabrication. Celle-ci passe en effet par différentes étapes d'usinage et de montage qui induisent un décentrement du rotor par rapport au stator. Lors du fonctionnement de la machine, deux causes principales aggraveront l'excentricité. La première est inhérente à la chaîne cinématique dans laquelle la machine intervient et qui peut imposer une force radiale sur l'arbre de cette machine, qui va engendrer une usure des roulements et une amplification du décentrement. Le deuxième phénomène risquant d'aggraver l'excentricité est quant à lui inhérent au fonctionnement de la machine ; en effet, le décentrement génère un déséquilibre dans la distribution des efforts radiaux entre le stator et le rotor. L'effort radial est maximal à l'endroit où se situe l'épaisseur minimale de l'entrefer et va tendre à diminuer encore plus la valeur de l'entrefer minimum et augmenter par conséquent encore plus le déséquilibre des efforts radiaux. Le point ultime de l'excentricité est le frottement du stator sur le rotor, qui est synonyme de destruction rapide de la machine, [16].

➤ L'excentricité statique

Dans ce type d'excentricité, la position de l'épaisseur minimale de l'entrefer est fixe dans l'espace. Elle peut être causée par l'ovalité de la partie intérieure du stator ou encore par le mauvais positionnement du rotor ou du stator durant la phase de construction. Si cependant l'assemblage entre le rotor et l'arbre est suffisamment rigide, le niveau d'excentricité statique ne change pas.

➤ L'excentricité dynamique

Pour ce qui est de l'excentricité dynamique, le centre du rotor n'est pas en son centre de rotation et de ce fait la position d'épaisseur minimale d'entrefer tourne avec le rotor. Les causes de ce type d'excentricité sont, la flexion de l'arbre du rotor, l'usure ou le défaut l'alignement du roulement, la résonance mécanique à la vitesse critique.

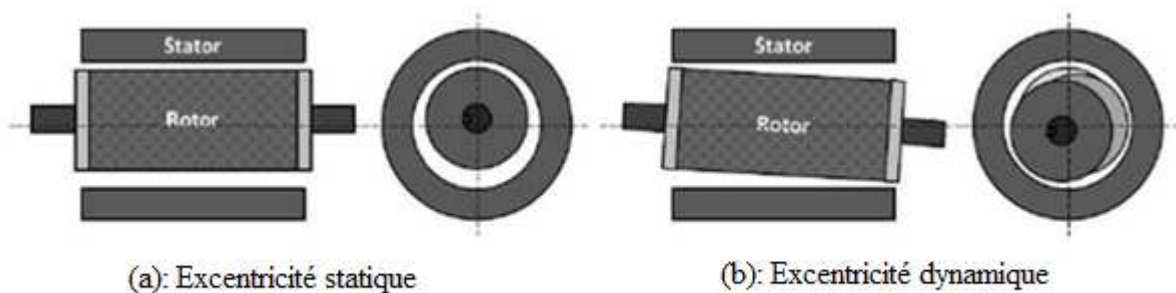


Figure 1.10. Excentricité statique et dynamique, [17].

➤ **L'excentricité mixte**

La plus fréquente, et c'est la combinaison des deux excentricités précédemment citées.

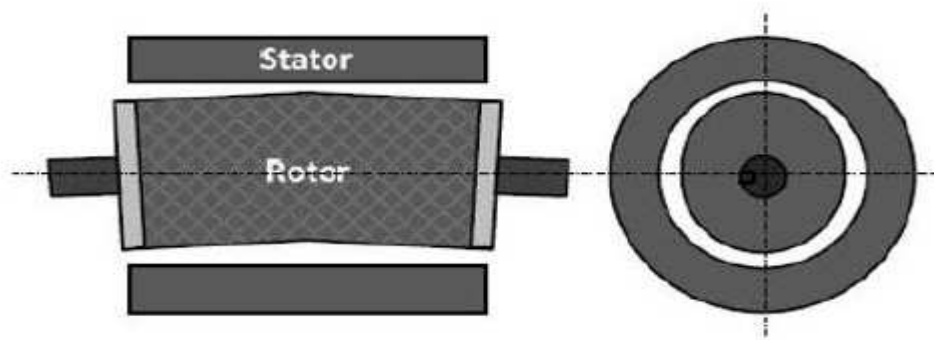


Figure 1.11.L'excentricité mixte, [17].

1.6.2 Défauts des roulements

Dans l'étude statistique nous remarquons une présence d'un pourcentage élevé pour ce type de défaut. Pourtant, ce type de défaut ainsi que sa détection est très peu mentionnée dans la littérature des électrotechniciens. Les roulements se composent généralement de deux bagues, une bague intérieure et une autre extérieure entre lesquelles existe un ensemble billes ou de rouleaux tournants (**voir figure 1.12**). En fonctionnement normal, la défaillance due à la fatigue commence par de petites fissures situées au-dessous des surfaces du chemin de roulement et de l'élément roulant, qui se propage graduellement sur la surface. Les défauts de roulements entraînent une augmentation du niveau sonore et l'apparition de vibrations dans le couple de charge de la machine. Ces défauts ont des causes multiples telles que la contamination du lubrifiant, une charge excessive ou encore des causes électriques comme la circulation des courants de fuites induits par les onduleurs.

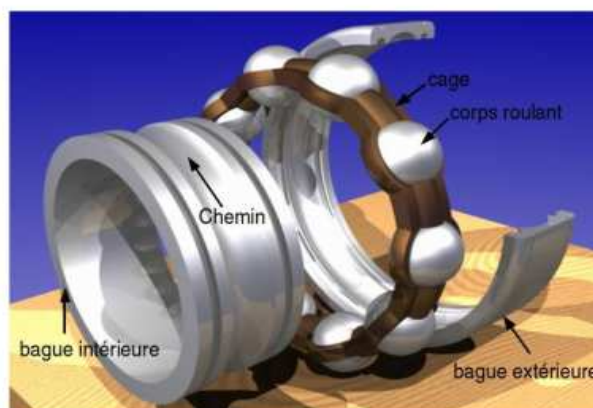


Figure 1.12.Représentation d'un roulement à billes, [18]

1.7 Conséquences des défauts

Les défauts qui surviennent sur les machines asynchrones conduisent à de multiples problèmes qui affectent la rentabilité de l'installation globale, et qui peuvent aller jusqu'à l'arrêt total [19]. On cite parmi les conséquences des défauts:

- Fluctuations au niveau du couple et de la vitesse.
- Appel supplémentaire de courant.
- Déséquilibre au niveau de la tension et du courant de ligne.
- Augmentations des arrêts non programmés, des pertes de production, et par conséquent, du rendement global.

Ainsi, en raison des conséquences importantes et coûteuses que peut engendrer l'apparition d'un défaut sur les processus industriels, le diagnostic des défauts fait l'objet d'un engouement prononcé depuis les deux dernières décennies.

Afin de mieux situer notre travail, il a été nécessaire de regarder quelles sont les différentes méthodes de diagnostic actuellement utilisées pour détecter la présence d'une anomalie au sein de la machine asynchrone.

Le mot diagnostic peut avoir plusieurs interprétations selon le contexte et le domaine d'application. Le diagnostic des procédés industriels a pour objet de trouver la cause d'une défaillance ou d'un défaut. La définition de ce dernier, adoptée par les instances internationales de normalisation, est la suivante : « Le diagnostic est l'identification de la cause probable de la (ou des) défaillance(s) à l'aide d'un raisonnement logique fondé sur un ensemble d'informations provenant d'une inspection, d'un contrôle ou d'un test».

1.8 Méthodes de détection et de diagnostic des défauts de la machine asynchrone

Durant les deux précédentes décennies, des recherches ont été menées sur la façon dont on pourrait détecter une défaillance et d'y comprendre la relation cause à effet, permettant ainsi d'améliorer la fiabilité du moteur asynchrone. La recherche des signatures ou indicateurs de défauts a pour but de caractériser le fonctionnement du système en identifiant le type et l'origine de chacun de ces défauts, ceci permet d'assurer une bonne discrimination des pannes ou anomalies survenant aux différents niveaux de processus et avoir une chaîne de production de plus en plus sûre. Il existe plusieurs méthodes de détection et de diagnostic, le choix d'une approche est lié à la connaissance que l'on souhaite acquérir sur le système mais aussi la complexité de ce système.

1.8.1 Détection à partir des méthodes internes (connaissance à priori)

Ces méthodes sont issues principalement de l'automatique et supposent une connaissance à priori du système. Elles s'appuient sur le suivi d'évolution des paramètres caractéristiques du système étudié ou sur la différence entre le modèle et le processus. Une comparaison entre les paramètres mesurés ou calculés et ceux associés à un mode de fonctionnement normal (sain) nous renseigne sur la présence éventuelle de défaut. Nous pouvons citer trois approches qui peuvent être utilisées pour diagnostiquer les défauts à partir des modèles paramétriques.

- La surveillance par les observateurs.
- La surveillance par la méthode des résidus.
- La surveillance par estimation paramétrique.

Le principe général de ces méthodes est illustré dans la figure 1.13.

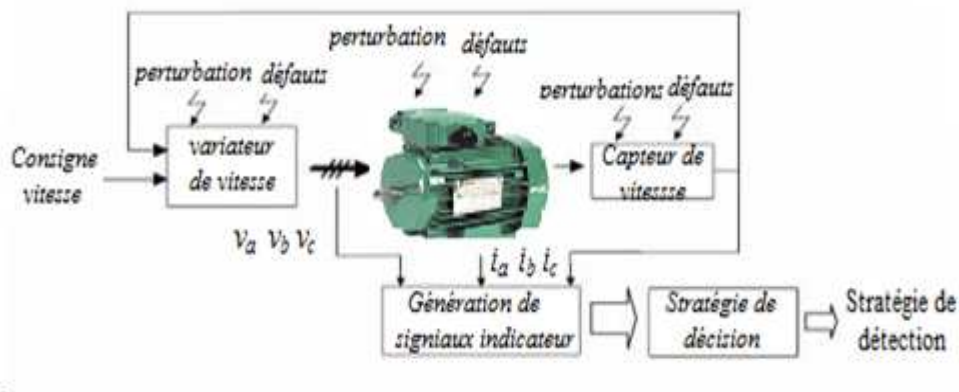


Figure 1.13. Principe général de diagnostic à base de modèle, [10].

1.8.2 Détection à partir des méthodes externes

Ces méthodes se basent sur l'analyse spectrale des signaux ou des mesures que fournit la machine lors de son fonctionnement tels que les courants, le couple estimé et les flux. Le principe de ces méthodes repose sur l'existence de caractéristiques fréquentielles propre au fonctionnement sain et défaillant du procédé. La première étape est basée sur la connaissance du système sain (par mesure ou par modèles numériques). La deuxième étape consiste ensuite en une création « artificielle » de défaut (à nouveau par modèle numérique). La signature du défaut, c'est-à-dire sa répercussion sur certaines grandeurs, est alors identifiée. Une observation est ensuite réalisée sur un convertisseur réel. Une analyse est portée sur les grandeurs (approche traitement du signal) consistant en la reconnaissance de signatures de défauts déjà connues, [3][20]. Nous nous intéressons aux méthodes reposant sur l'analyse fréquentielle par mesure des grandeurs suivantes :

- La surveillance des vibrations avec des capteurs de vibrations (accéléromètres...)

- L'analyse du courant de phase avec la méthode MCSA (Motor Current Signature Analysis) parce que les machines sont généralement équipées d'un capteur de courant ;
- La surveillance du couple électromagnétique.
- La surveillance du flux.

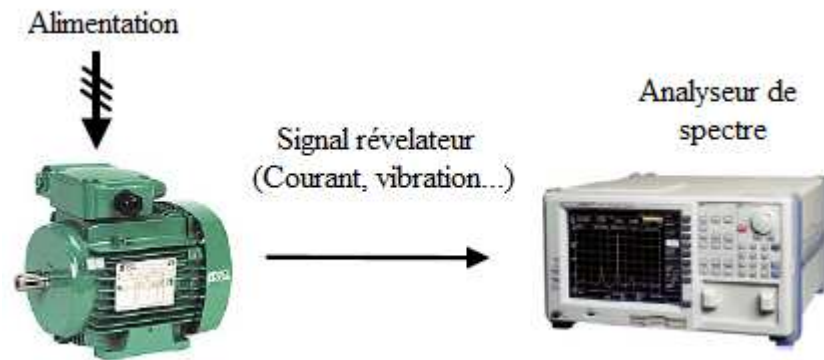


Figure 1.14.Principe de la surveillance par analyse spectrale.

Les grandeurs mesurées sont analysées du point de vue spectrale. En effet, en ce qui concerne la détection de la présence d'un défaut dans la machine asynchrone, les méthodes de diagnostic sont classiquement basées sur l'analyse fréquentielle de signaux en utilisant une transformée de Fourier. En effet, une comparaison de l'amplitude des composantes signataires de défaut avec un seuil de référence (seuil calculé lorsque la machine est saine) est utilisée pour détecter la présence d'une anomalie.

1.8.3 Analyse des signaux vibratoires

L'analyse vibratoire de la machine peut être menée grâce à des accéléromètres placés sur les paliers dans les directions verticales, axiales et radiales. Au même titre que les courants, les vibrations de la machine fournissent des informations sur pratiquement tous les défauts mécaniques fréquemment rencontrés. Cependant cette analyse comporte les inconvénients dus au problème d'accessibilité et des difficultés rencontrées dans les connexions mécaniques des accéléromètres pour effectuer les mesures nécessaires au voisinage direct du défaut. De plus, le coût de ces capteurs reste relativement élevé par rapport aux autres capteurs tels que les capteurs de vitesse ou de courant.

Pour s'affranchir de ces problèmes, les recherches focalisent leurs efforts pour détecter et localiser les défauts par l'analyse d'autres signaux.

1.8.4 Analyse du couple électromagnétique

Lorsqu'une rupture de barre apparaît, le spectre fréquentiel du couple électromagnétique laisse apparaître des composantes supplémentaires. L'utilisation de ce signal peut s'avérer un bon choix pour la détection des défauts de charge. En effet les variations de couple de charge vont induire des variations du flux et du courant dans la machine de même la torsion de l'arbre entraîne l'apparition, d'harmoniques dans le spectre du couple. Les oscillations de couple provoquées par certains défauts rotoriques peuvent servir à détecter ceux-ci. Il a été montré par une analyse théorique et des essais comment le spectre de couple se trouve modifié lorsqu'un des deux anneaux d'une cage est cassé. Les fréquences d'encoches présentées dans le spectre de couple sont données [21].

$$f_{sb} = f_s \cdot \left[\frac{N_r(1-g)}{p} \pm n \right] \pm 2 \cdot g \cdot f_s \quad (1.2)$$

$$n = 1, 2, 3, \dots \in N$$

1.8.5 Analyse du flux

Certaines études conduites sur l'analyse du flux de dispersion de la machine asynchrone pour la détection des courts-circuits entre spires statoriques ont montré que l'apparition de ce type de défaut induisait des composantes additionnelles dans le spectre fréquentielle du flux de dispersion. Cette approche permet de détecter tant un défaut statorique qu'un défaut rotorique en utilisant un capteur de flux. Les composantes fréquentielles du flux de fuite dans l'axe du rotor qui permettent de détecter et d'identifier des courts circuits dans les enroulements statoriques sont $k \cdot f_s \pm n \cdot f_r$, avec n et k des nombres entiers et k impair, ces composants présentent dans le spectre du flux pour une machine saine, vont augmenter avec l'apparition d'un défaut, [22].

1.8.6 Analyse du vecteur de Park

Une représentation en deux dimensions peut être utilisée pour décrire le phénomène des moteurs asynchrones triphasés. Une des plus connues et des plus appropriés repose sur le calcul des courants dits de Park, [1]. En fonction des courants de phases $i_{sa}(t), i_{sb}(t), i_{sc}(t)$, les courants de Park $i_d(t), i_q(t)$ peuvent être calculés grâce aux relations suivantes:

$$i_d(t) = \sqrt{\frac{2}{3}} i_{sa}(t) - \frac{1}{\sqrt{6}} i_{sb}(t) - \frac{1}{\sqrt{6}} i_{sc}(t) \quad (1.3)$$

$$i_q(t) = \frac{1}{\sqrt{2}} i_{sb}(t) - \frac{1}{\sqrt{2}} i_{sc}(t) \quad (1.4)$$

En présence d'une barre cassée, le courant absorbé par le moteur asynchrone contient des composantes latérales de part et d'autre de sa composante fondamentale dont les fréquences sont données par la relation $(1 \pm 2kg).f_s$.

Ces composantes seront, par conséquent, aussi présentes les courants de Park $i_d(t), i_q(t)$ (1.3) et (1.4). Dans ces conditions, il est très simple de montrer que le spectre du module $\sqrt{i_d(t)^2 + i_q(t)^2}$ contient une composante continue générée par la composante fondamentale du courant statorique plus des composantes de fréquence $2kg.f_s$. De cette façon, le spectre des courants de Park, en éliminant préalablement la composante continue, ne contiendra que les composantes spécifiques au défaut de la machine. Il sera alors plus facile de détecter ces composantes et de diagnostiquer la présence d'un défaut rotorique.

1.8.7 Diagnostic par analyse du courant statorique

Parce qu'il est facilement accessible, et vue sa capacité de détecter aussi bien les défauts électromagnétiques que mécaniques, l'analyse du courant statorique occupe une place privilégiée dans le diagnostic par analyse des signaux. Cette technique est connue sous l'abréviation MCSA (Motor Current Signature Analysis). La MCSA était l'objet de plusieurs travaux de recherche, elle consiste à affecter à chaque défaut une signature spectrale le caractérisant. Dans le même contexte, il a été démontré que la sévérité du défaut est en fonction de l'amplitude des composantes fréquentielles qu'il génère, et notamment, des raies déjà présentes dans le moteur sain (harmoniques d'espace). [23]

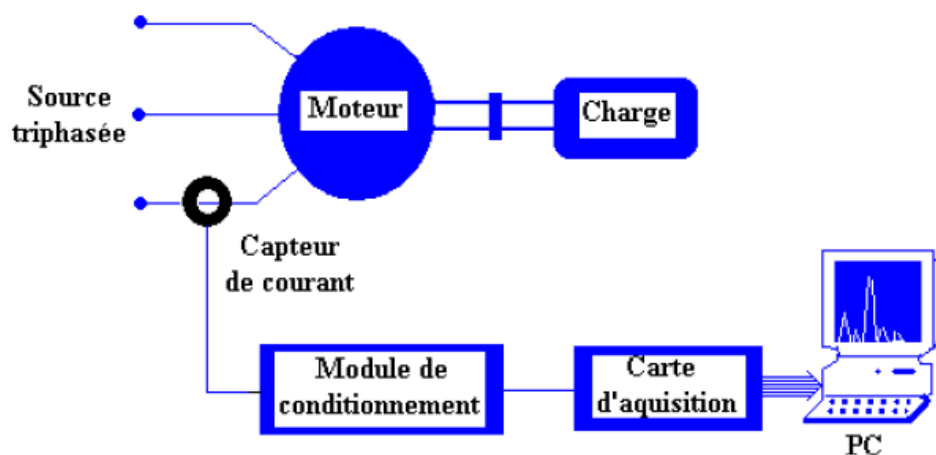


Figure 1.15. Schéma synoptique de la méthode de l'analyse spectrale, [24].

1.8.8 Rupture de barre ou portion d'anneaux

La rupture de barres d'une machine asynchrone est un des défauts le plus couramment étudié en raison à sa simplicité de réalisation. Ce défaut induit des modifications dans les courants du stator, et entraîne donc l'apparition d'harmoniques caractéristiques dans le spectre de ce signal. En effet, lors de l'apparition d'une rupture de barre, des harmoniques de flux sont produits et induisent des harmoniques de courant dans l'enroulement statorique aux fréquences:

$$f = (1 \pm 2.g) f_s \quad (1.5)$$

De plus les amplitudes des raies dans ces bandes latérales du fondamental augmentent avec le nombre de barres défailantes.

1.8.9 Excentricité

La variation de la longueur de l'entrefer entraîne des variations dans la densité du flux d'entrefer. Les enroulements statoriques sont électriquement modifiés, ce qui entraîne des effets dans le spectre des courants. L'identification de type de l'excentricité est possible par la visualisation dans ce spectre des composantes fréquentielles suivantes :

Pour l'excentricité statique :

$$f_{exc} = f_s \cdot \left[1 \pm \frac{n \cdot N_r \cdot (1-g)}{p} \right] \quad (1.6)$$

Pour l'excentricité dynamique :

$$f_{exc} = f_s \cdot [1 \pm 2.n(1-g)] \quad (1.7)$$

Pour le désalignement :

$$f_{exc} = f_s \cdot \left[1 \pm \frac{n \cdot (1-g)}{p} \right] \quad (1.8)$$

Conclusion

Ce chapitre, a été consacré à la représentation des différents défauts pouvant se produire sur la machine asynchrone. Dans un premier temps, après avoir rappelé succinctement les éléments de constitution de la machine asynchrone, nous nous sommes intéressés à répertorier les principales défaillances se produisant sur les différentes parties de la machine ainsi que les causes et les conséquences de leur apparition. Ensuite nous avons brièvement rappelé quelques techniques de diagnostic utilisées pour la détection des défauts. Dans le chapitre suivant, nous allons nous intéresser à la modélisation triphasée-polyphasée de la machine asynchrone à rotor cage.

CHAPITRE 2

MODÉLISATION DE LA MACHINE ASYNCHRONE À CAGE D'ÉCUREUIL

Introduction

Ce chapitre est consacré à la modélisation de la machine asynchrone à rotor à cage d'écureuil, la méthode utilisée dans notre étude est la méthode des Circuits Electriques Magnétiquement Couplés (CEMC), il s'agit de représenter les bobinages de la machine par des circuits électriques distribués dont les inductances propres et mutuelles sont calculées en utilisant les fonctions de bobinage issues des expressions analytiques du dimensionnement de la machine asynchrone, 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 électromagnétique tels que les défauts de court-circuit entre spires statoriques, et les défauts de type rupture de barre rotorique, [1]. Nous présentons en premier lieu les différentes équations électriques, magnétiques et mécaniques caractérisant le modèle de la machine. La simulation de modèle est alors fondée sur l'intégration numérique d'une représentation d'état continue de la machine qui nécessite l'expression analytique de l'ensemble des équations différentielles indépendantes régissant l'évolution de la machine et son alimentation et de déterminer les valeurs numériques des paramètres du modèle. Dans notre cas il s'agit des résistances et des inductances.

2.1 Modèle de la machine asynchrone saine

Dans notre étude, nous utiliserons la méthode des circuits électriques magnétiquement couplés pour modéliser la machine asynchrone. Les facilités apportées par cette approche pour étudier les défauts nous ont semblé être les plus adéquates pour analyser l'influence des défaillances sur le fonctionnement de la machine asynchrone. Dans cette méthode, les inductances peuvent être calculées en utilisant les fonctions de bobinage, en sachant que cela impose une connaissance précise de la forme du bobinage de la machine. [3].

Tout type de modélisation ne peut se faire sans effectuer quelques hypothèses qui font l'objet de la suite de cette partie. Nous développerons ensuite les équations des circuits électriques statoriques et rotoriques et l'équation de mécanique pour permettre proposer un modèle de la machine.

2.2 Hypothèses de départ

Le premier objectif de cette modélisation est de mettre en évidence l'influence des défauts électriques sur les grandeurs de la machine asynchrone (vitesse de rotation, couple électromagnétique, courants statoriques et courants rotoriques). Pour ce faire, il est indispensable de poser certaines hypothèses qui ont pour but de faciliter la mise en équations des circuits électriques de la machine.

Dans l'approche proposée, nous avons supposé que :

- ❖ Les barres rotoriques étaient isolées les unes des autres ce qui permet d'éliminer les courants inter-barres et leurs effets au sein même de la cage rotorique ;
- ❖ L'entrefer est constant, l'effet d'encoche est négligé ;
- ❖ La linéarité du circuit magnétique (perméabilité relative du fer fixe), cette hypothèse nous a permis d'introduire le concept d'inductance propre et mutuelle entre les bobinages statoriques et rotoriques ;
- ❖ La répartition dans l'entrefer de la force magnétomotrice et du flux est sinusoïdale.
- ❖ La saturation, les effets capacitifs et les effets thermiques ont été négligés dans la construction du modèle de la machine asynchrone à cage d'écureuil ;

2.3 Modélisation du stator

2.3.1 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 statoriques sont placées de sorte à obtenir une distribution de la force magnétomotrice la plus sinusoïdale possible le long de l'entrefer. La **Figure 2.1** donne une représentation de la modélisation choisie pour les trois phases statoriques de la machine asynchrone. La valeur des inductances est fonction du nombre de bobines ainsi que du type de bobinage mis en place dans les encoches statoriques (concentrique, imbriqué, ...), celle des résistances dépend essentiellement de la longueur, de la section et de type de cuivre utilisé.

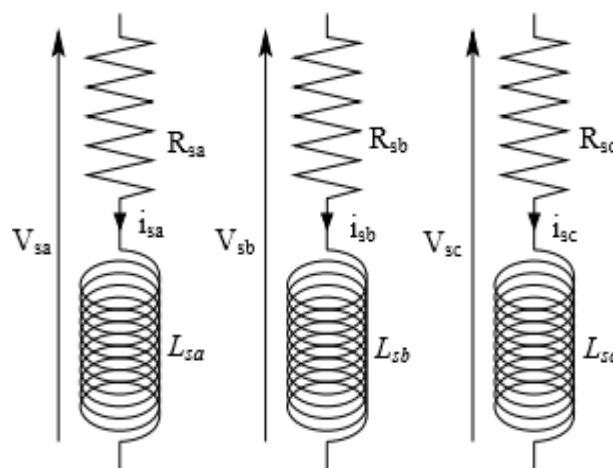


Figure 2.1. Circuits électriques adoptés pour la modélisation des trois phases statoriques, [1].

2.3.1.1 Equations électriques statoriques

Ces équations électriques vont nous permettre d'associer le vecteur tension, le vecteur courant ainsi que le vecteur flux pour les trois phases statoriques S_a, S_b, S_c .

En appliquant la loi d'Ohm sur les trois phases statoriques, nous obtenons :

$$[V_s] = [R_s][I_s] + \frac{d[\Phi_s]}{dt} \quad (2.1)$$

Avec $[V_s]$ représente le vecteur tension, $[I_s]$ le vecteur courant et $[\Phi_s]$ le vecteur flux tel que:

$$[V_s] = \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} \quad [I_s] = \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix} \quad [\Phi_s] = \begin{bmatrix} \Phi_{sa} \\ \Phi_{sb} \\ \Phi_{sc} \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

La matrice des résistances $[R_s]$, où sont regroupées les résistances de chacune des phases statoriques, se met sous la forme suivante, tel que : $r_s = R_{sa} = R_{sb} = R_{sc}$

$$[R_s] = \begin{bmatrix} R_{sa} & 0 & 0 \\ 0 & R_{sb} & 0 \\ 0 & 0 & R_{sc} \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

Les trois phases statoriques sont non seulement magnétiquement couplées entre elles mais également avec les circuits électriques rotoriques. Par conséquent, les courants de boucles rotoriques notés ici $[I_r]$ interviennent dans les équations des trois flux statoriques comme le montre l'équation ci-dessous :

$$[\Phi_s] = [\Phi_{ss}] + [\Phi_{sr}] \quad (2.4)$$

Avec:

$[\Phi_{ss}]$ Le flux statorique dû aux courants statoriques.

$[\Phi_{sr}]$ Le flux statorique dû aux courants rotoriques.

a. Détermination du flux statorique dû aux courants statoriques

Pour une distribution sinusoïdale des enroulements, le flux statorique dû aux courants statoriques est donné par :

$$[\Phi_{s.s}] = [L_s] * [I_s] \quad (2.5)$$

La matrice inductance $[L_s]$ se compose des inductances propres, de magnétisation, de fuite et mutuelles des trois phases statoriques. Elle peut se mettre sous la forme :

$$[L_s] = \begin{bmatrix} L_{ls} + L_{ms} & -L_{ms} / 2 & -L_{ms} / 2 \\ -L_{ms} / 2 & L_{ls} + L_{ms} & -L_{ms} / 2 \\ -L_{ms} / 2 & -L_{ms} / 2 & L_{ls} + L_{ms} \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

Ou :

$$L_{ms} = \frac{\mu_0 l r}{g} N_s^2 \left(\frac{\pi}{4} \right) \quad (2.7)$$

L_{ls} Inductance de fuite d'une phase statorique.

L_{ms} Inductance magnétisante d'une phase statorique.

μ_0 Perméabilité magnétique de l'entrefer.

N_s Nombre de spires par phase statorique.

g L'épaisseur de l'entrefer.

r Rayon moyen de l'entrefer.

l Longueur du rotor.

b. Détermination du flux statorique dû aux courants rotoriques

Chaque maille rotorique est formée de deux barres adjacentes et les portions d'anneau de court-circuit qui les relie, et magnétiquement couplée avec toutes les autres mailles rotoriques et avec les trois phases statoriques **Figure 2.2**. Le flux statorique dû aux courants rotoriques est donné par:

$$[\Phi_{sr}] = [M_{sr}] [I_r] \quad (2.8)$$

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

$$[M_{sr}] = \begin{bmatrix} M_{s_a r_1} & M_{s_a r_2} & \dots & M_{s_a r_k} & \dots & M_{s_a r_N} \\ M_{s_b r_1} & M_{s_b r_2} & \dots & M_{s_b r_k} & \dots & M_{s_b r_N} \\ M_{s_c r_1} & M_{s_c r_2} & \dots & M_{s_c r_k} & \dots & M_{s_c r_N} \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

Avec :

$M_{s_m r_k}$ L'inductance mutuelle entre la phase m du stator et la maille k du rotor.

N_r Nombres de barres rotoriques.

Et :

$$M_{s_m r_k} = M_{sr} \cdot \cos\left(\theta - m \frac{2\pi}{3} + k.a\right) \quad (2.10)$$

$$M_{sr} = \frac{4}{\pi} \frac{\mu_0}{e.p^2} \cdot N_s \cdot L.R. \sin\left(\frac{a}{2}\right) \quad (2.11)$$

Ou :

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

On associe les deux équations (2.5) et (2.8) et on obtient :

$$[\Phi_s] = \{[L_s][I_s] + [M_{sr}][I_r]\} \quad (2.12)$$

2.4 Modélisation du rotor

2.4.1 Structure du rotor

La cage d'écureuil de la machine se compose de N_r encoches rotoriques. 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'anneau 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 les consécutif 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 $(N_r + 1)$ courant rotoriques. Chaque barre rotorique est modélisée par une inductance en série avec une résistance, tout comme chaque segment d'anneau de court-circuit [25]. **La figure 2.2** représente la forme des circuits électriques adoptée pour la modélisation de la cage d'écureuil de la machine, on nomme :

R_{b_k} Résistance d'une barre rotorique k ,

L_{b_k} Inductance de fuite d'une barre rotorique k .

R_{e_k} Résistance du segment d'anneau de court-circuit k.

L_{e_k} Inductance de fuite du segment d'anneau de court-circuit k.

j_{rb_k} Courant circulant dans la barre rotorique k.

i_{r_k} Courant circulant dans la boucle rotorique k.

$i_{r_{cc}}$ Courant circulant dans l'anneau de court-circuit dans ce cas, il est nul.

$j_{e_N}^{int}$ Courant dans le segment d'anneaux de court-circuit intérieur k.

$j_{e_N}^{ext}$ Courant dans le segment d'anneaux de court-circuit extérieur k.

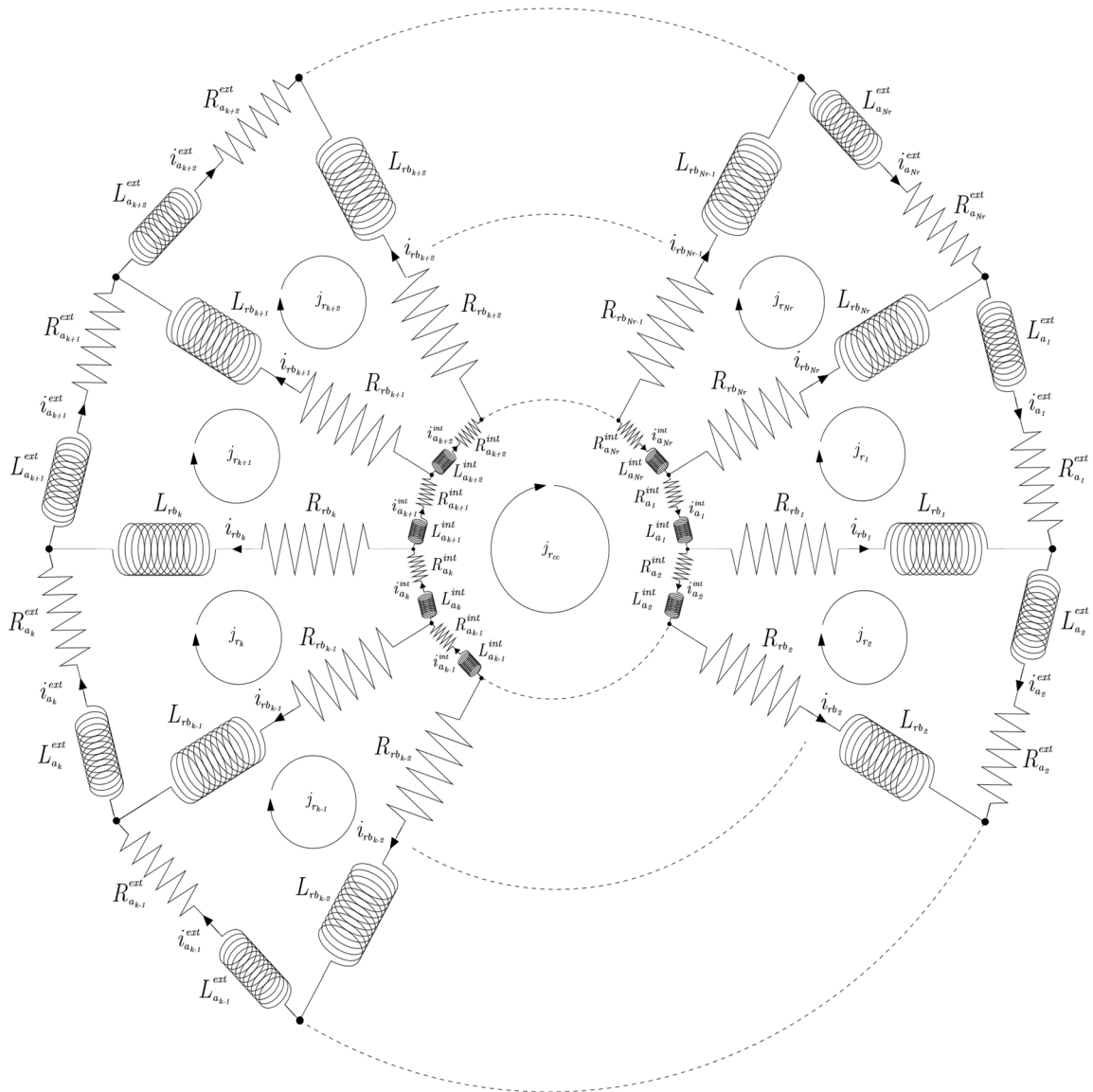


Figure 2.2. Circuits électriques adoptés pour la modélisation de la cage rotorique, [1].

2.4.1.1 Equations électriques rotoriques

Tout comme pour les équations du stator de la machine asynchrone ; les équations natives des circuits électriques rotoriques peuvent se mettre sous une forme matricielle. Nous relierons les tensions de chacune des boucles rotoriques avec les courants et les flux grâce à l'équation :

$$[V_r] = [R_r][I_r] + \frac{d[\Phi_r]}{dt} \quad (2.13)$$

Avec: $[\Phi_r]$ donnée dans l'équation précédente, se décompose de la façon suivante :

$$[\Phi_r] = [\phi_{r_1} \quad \phi_{r_2} \quad \dots \quad \phi_{r_k} \quad \dots \quad \phi_{r_N}]^T \quad (2.14)$$

Nous devons noter que dans le cas particulier de la machine asynchrone à cage d'écureuil, le vecteur tension $[V_r]$ est nul.

Dans la matrice $[R_r]$ comme les résistances des N_r boucles rotoriques sont regroupées comme suit :

$$[R_r] = \begin{bmatrix} 2(R_b + R_e) & -R_b & 0 & \dots & 0 & -R_b \\ -R_b & 2(R_b + R_e) & \cdot & \dots & \cdot & 0 \\ 0 & \cdot & \cdot & \dots & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot & -R_b \\ -R_b & 0 & \cdot & \dots & -R_b & 2(R_b + R_e) \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

Avec :

R_b La résistance d'une barre rotorique.

R_e La résistance d'une portion d'anneau de court-circuit.

Les boucles rotoriques étant magnétiquement couplées aux phases statoriques, le vecteur flux $[\Phi_r]$ dépend non seulement des courants de boucles rotoriques mais aussi des courants de chacune des phases statoriques si bien que :

$$[\Phi_r] = [\Phi_{rr}] + [\Phi_{rs}] \quad (2.16)$$

Avec:

$[\Phi_{rr}]$ Le flux rotorique dû aux courants rotoriques,

$[\Phi_{rs}]$ Le flux rotorique dû aux courant statoriques.

a- Détermination du flux rotorique dû aux courant statorique

Le couplage magnétique entre le rotor et le stator, est donné par :

$$[\Phi_{rs}] = [M_{rs}][I_s] \quad (2.17)$$

La matrice $[M_{rs}]$ décrite à l'équation (2.17), se compose des inductances mutuelles entre les boucles rotoriques et les trois phases statoriques, tel que $[M_{rs}] = [M_{sr}]^T$:

$$[M_{rs}] = \begin{bmatrix} M_{r_1s_a} & M_{r_1s_b} & M_{r_1s_c} \\ M_{r_2s_a} & M_{r_2s_b} & M_{r_2s_c} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ M_{r_ks_a} & M_{r_ks_b} & M_{r_ks_c} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ M_{r_{Nr}s_a} & M_{r_{Nr}s_b} & M_{r_{Nr}s_c} \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

Avec :

$$M_{r_ks_x} = M_{s_xr_k} : L'inductance mutuelle entre la maille k du rotor et la phase x du stator.$$

b- Détermination du flux rotorique dû aux courants rotoriques

Le flux dans la $K^{ème}$ maille du rotor provoqué par les courants rotoriques est exprimé par la relation suivante :

$$\Phi_{rkr} = L_{k_1} i_{r_1} + \dots + L_{k_N} i_{r_N} + 2(L_e + L_b) i_{r_k} - L_b (i_{r_{(k-1)}} + i_{r_{(k+1)}}) \quad (2.19)$$

Le flux dû par le courant rotorique est exprimé par la relation matricielle suivante:

$$[\Phi_{rr}] = [\Phi_{r_1r} \Phi_{r_2r} \dots \Phi_{r_kr} \dots \Phi_{r_{Nr}r}]^T = [L_r][I_r] \quad (2.20)$$

Ou la matrice inductance $[L_r]$ décrite à l'équation (2.21), se compose des inductances propres, de magnétisation, de fuite et mutuelles de chaque boucle rotorique.

$$[L_r] = \begin{bmatrix} L_0 & L_{12} - L_{b_2} & L_{13} & \dots & L_{1(N-1)} & L_{1N} - L_{b_N} \\ L_{21} - L_{b_1} & L_0 & L_{23} - L_{b_3} & \dots & \cdot & L_{2N} \\ L_{31} & L_{32} - L_{b_2} & \cdot & \dots & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot & L_{N(N-1)} - L_{b_N} \\ L_{N1} - L_{b_1} & \cdot & \cdot & \dots & L_{N(N-1)} - L_{b_{(N-1)}} & L_0 \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

Telle que :

$$L_0 = L_{kk} + 2(L_b + L_e) \quad (2.22)$$

Où L_{kk} L'inductance propre de maille k .

Avec :

L'inductance principale d'une maille rotorique ainsi que la mutuelle entre deux mailles

$$L_{rp} = \frac{N_r - 1}{N_r^2} \cdot \frac{\mu_0}{e} \cdot 2\pi \cdot L \cdot R \quad \text{Et} \quad M_{rr} = -\frac{1}{N_r^2} \cdot \frac{\mu_0}{e} \cdot 2\pi \cdot L \cdot R \quad (2.23)$$

On associe les deux équations (2.17) et (2.20) et on obtient :

$$[\Phi_r] = \{[L_r][I_r] + [M_{rs}][I_s]\} \quad (2.24)$$

2.5 Equations mécaniques de la machine

Les équations mécaniques qui régissent le fonctionnement de la machine asynchrone peuvent se mettre sous la forme :

$$J_t \frac{d\Omega}{dt} = C_{em} - f_v \Omega - C_r \quad (2.25)$$

$$\Omega = \frac{d\theta_r}{dt} \quad (2.26)$$

Où :

J_t Moment d'inertie de la machine étudiée.

Ω Vitesse rotorique.

C_{em} Couple électromagnétique.

f_v Frottement visqueux.

C_r Couple de charge.

L'équation (2.26) lie la vitesse rotorique à la position du rotor.

2.6 Expression du couple électromagnétique

Le calcul du couple électromagnétique est déterminé en étudiant la Co-énergie magnétique. Si cette Co-énergie est exprimée en fonction des différents courants de phases de la machine, le couple électromagnétique se calcul en dérivant cette dernière par rapport à la position θ_r que prend le rotor vis-à-vis du stator. L'expression du couple électromagnétique C_{em} peut finalement être déterminée grâce à la relation :

$$C_{em} = \left[\frac{\partial W_{co}}{\partial \theta_r} \right]_{(I_s, I_r \text{ constantes})} \quad (2.27)$$

$$C_{em} = \frac{p}{2} [I_s]^T \frac{d}{d\theta_r} [M_{sr}] [I_r] \quad (2.28)$$

2.7 Etablissement du modèle d'état

En remplaçant les équations (2.12) et (2.24) dans les équations électriques de la machine (2.1) et (2.13), nous obtenons :

$$[V_s] = [R_s][I_s] + \frac{d}{dt} \{ [L_s][I_s] + [M_{sr}][I_r] \} \quad (2.29)$$

$$[V_r] = [R_r][I_r] + \frac{d}{dt} \{ [L_r][I_r] + [M_{rs}][I_s] \} \quad (2.30)$$

En posant $[V] = [[V_s], [V_r]]^T$ et en sachant que le vecteur $[V_r]$ est nul, nous obtenons :

$$[V] = [R] \cdot [I] + \frac{d([L] \cdot [I])}{dt} \quad (2.31)$$

$$[V] = [R] \cdot [I] + [I] \cdot \frac{d[L]}{dt} + [L] \cdot \frac{d[I]}{dt} \quad (2.32)$$

$$[V] = [R] \cdot [I] + [I] \frac{d\theta}{dt} \cdot \frac{d([L])}{d\theta} + [L] \cdot \frac{d[I]}{dt} \quad (2.33)$$

$$[V] = [R] \cdot [I] + [I] \cdot \Omega_r \cdot \frac{d([L])}{d\theta} + [L] \cdot \frac{d[I]}{dt} \quad (2.34)$$

En associant l'équation mécanique et celle du couple, nous obtenons le modèle d'état suivant :

$$\begin{bmatrix} [V] \\ -C_r \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left([R] + \Omega_r \frac{d[L]}{d\theta} \right) & 0 & 0 \\ -\frac{1}{2} \cdot [I]^T \cdot \frac{d[L]}{d\theta} & f_v & 0 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} [I] \\ \Omega_r \\ \theta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} [L] & 0 & 0 \\ 0 & j_t & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{[I]} \\ \dot{\Omega}_r \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} \quad (2.35)$$

Une forme condensée est obtenue sous l'écriture suivante :

$$[U] = [B] \cdot [X] + [A] \cdot \dot{[X]} \quad (2.36)$$

Le $\begin{bmatrix} \dot{X} \end{bmatrix}$ vecteur peut s'écrire :

$$\begin{bmatrix} \dot{X} \end{bmatrix} = [A]^{-1} \cdot ([U] - [B] \cdot [X]) \quad (2.37)$$

Où $[U]$ le vecteur de commande a pour expression :

$$[U] = ([V], [-C_r], [0])^T \quad (2.38)$$

Et le vecteur d'état $[X]$ est donné par :

$$[X] = ([I], [\Omega_r], [\theta])^T \quad (2.39)$$

La matrice $[A]$ obtenue s'écrit sous la forme :

$$A = \begin{bmatrix} [L_s] & [M_{sr}] & [S_o] & [S_o] \\ [M_{rs}] & [L_r] & [S_o] & [S_o] \\ [S_o]^t & [S_o]^t & J_t & 0 \\ [S_o]^t & [S_o]^t & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.40)$$

$[S_o] = [0 \ 0 \ 0 \ \dots \ 0]$ Vecteur nul de dimension $(N_r + 1)$

La matrice $[B]$ est donnée sous la forme :

$$B = \begin{bmatrix} [R_s] & \left[\Omega_r \cdot \frac{dM_{sr}}{d\theta} \right] & [S_o] & [S_o] \\ \left[\Omega_r \cdot \frac{dM_{rs}}{d\theta} \right] & [R_r] & [S_o] & [S_o] \\ C_{stator} & C_{rotor} & f_v & 0 \\ [S_0] & [S_0] & -1 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.41)$$

Les deux matrices qui interviennent dans l'expression de la matrice $[B]$ sont:

$$\left[\Omega_r \cdot \frac{dM_{sr}}{d\theta} \right] = -M_{sr} \begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} & \dots & g_{1 N_r+1} \\ g_{21} & g_{22} & \dots & g_{2 N_r+1} \\ g_{31} & g_{32} & & g_{3 N_r+1} \end{bmatrix} \quad (2.42)$$

$$= -M_{sr} \begin{bmatrix} \Omega_r \cdot p \sin(\theta) & \Omega_r \cdot p \sin(p\theta + a) & \dots & \Omega_r \cdot p \sin(p\theta + (N_r + 1) \cdot a) \\ \Omega_r \cdot p \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \Omega_r \cdot p \sin\left(p\theta + \frac{2\pi}{3} + a\right) & \dots & \Omega_r \cdot p \sin\left(p\theta + \frac{2\pi}{3} + (N_r + 1) \cdot a\right) \\ \Omega_r \cdot p \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \Omega_r \cdot p \sin\left(p\theta - \frac{2\pi}{3} + a\right) & \dots & \Omega_r \cdot p \sin\left(p\theta - \frac{2\pi}{3} - (N_r + 1) \cdot a\right) \end{bmatrix} \quad (2.43)$$

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

$$C_{stator} = 0.5 \cdot p \cdot [I_r] [H]^T \quad (2.44)$$

$$C_{rotor} = 0.5 \cdot p \cdot [I_s] [H] \quad (2.45)$$

$$[H] = M_{sr} \begin{bmatrix} \sin(\theta) & \sin(p.\theta + a) & \dots & \sin(p.\theta + (N_r + 1).a) \\ \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(p.\theta + \frac{2\pi}{3} + a\right) & \dots & \sin\left(p.\theta + \frac{2\pi}{3} + (N_r + 1).a\right) \\ \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(p.\theta - \frac{2\pi}{3} + a\right) & \dots & \sin\left(p.\theta - \frac{2\pi}{3} + (N_r + 1).a\right) \end{bmatrix} \quad (2.46)$$

2.8 Validation du modèle de la machine

Après avoir décrit le modèle de la machine asynchrone à rotor à cage, un programme écrit sous l'environnement Matlab nous a permis de mettre en évidence le comportement de la machine pour la résolution du système différentiel nous avons utilisé la méthode Rung-kutta d'ordre 4 selon l'organigramme illustré dans **la figure (2.3)**. Les paramètres de la machine utilisés sont donnés en annexe.

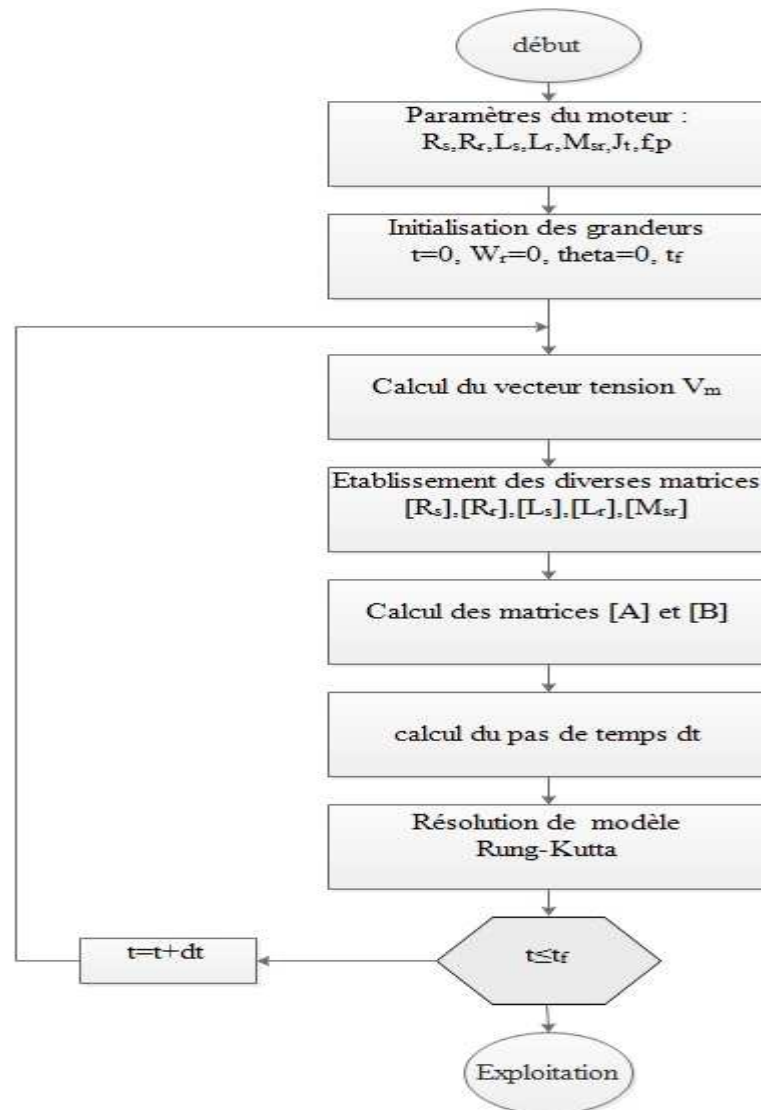


Figure 2.3. Organigramme du fonctionnement de la machine asynchrone à cage d'écureuil

2.9 Résultats de la simulation

2.9.1 Fonctionnement à vide

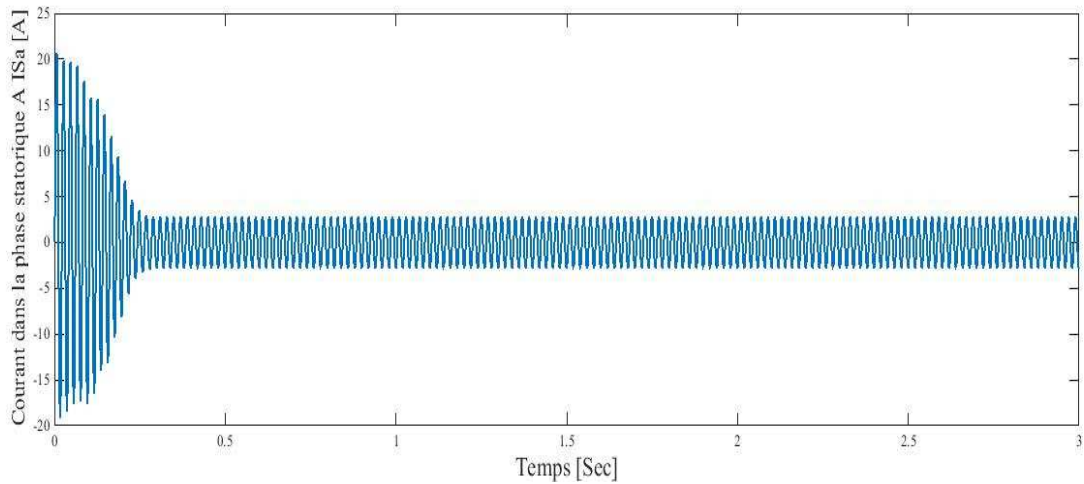


Figure 2.4. Courant dans la phase statorique A.

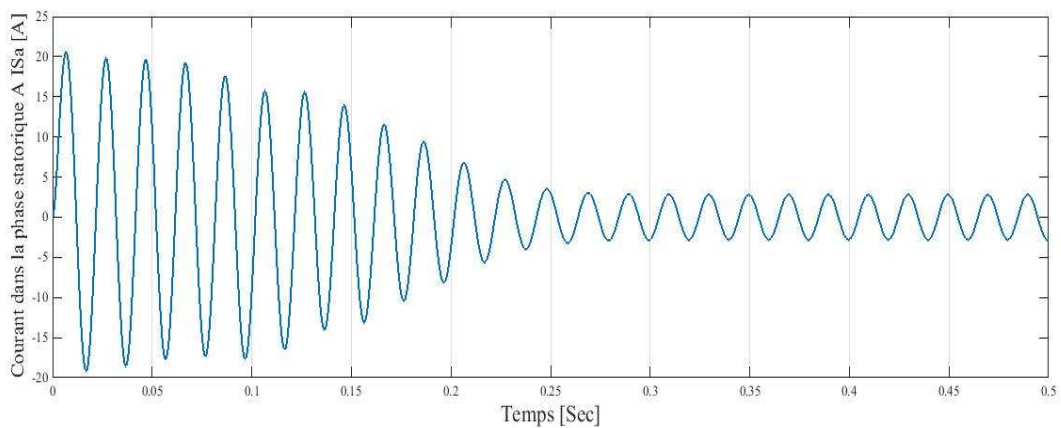


Figure 2.5. Zoom du courant dans la phase statorique A.

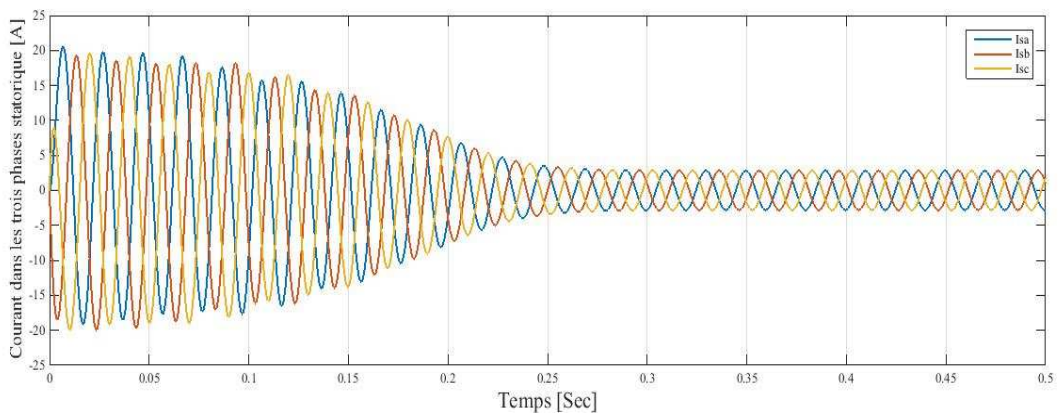


Figure 2.6. Zoom du courant dans les trois phases statoriques.

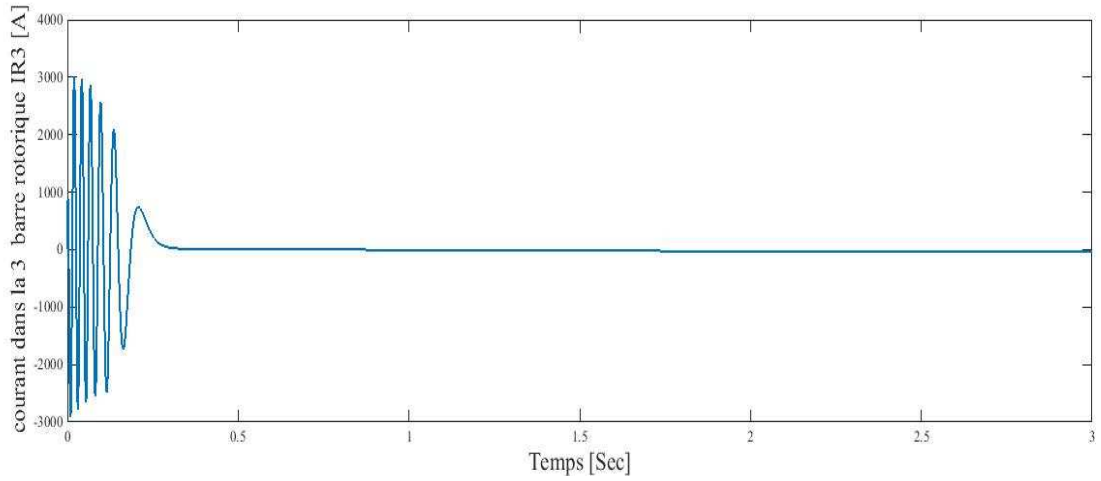
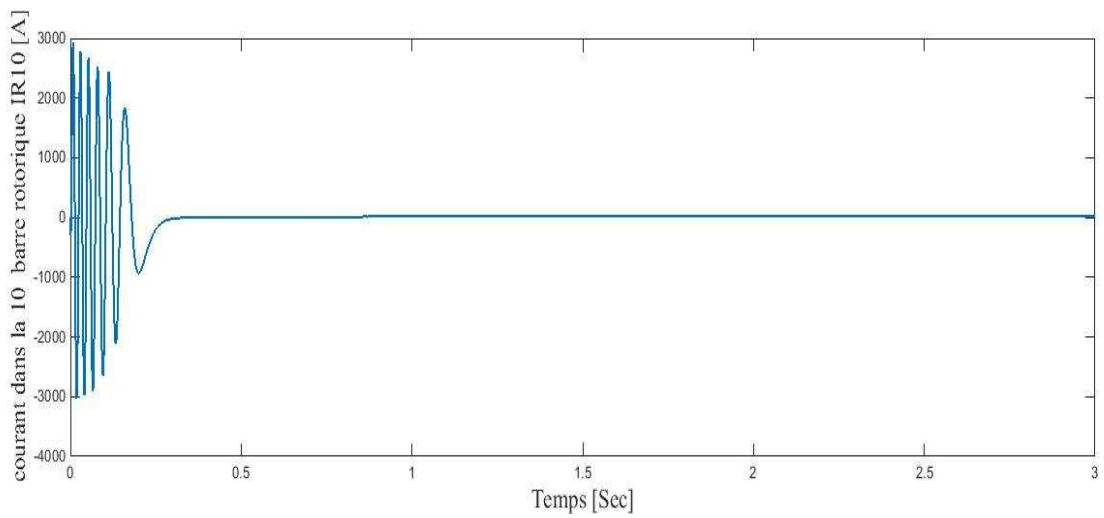
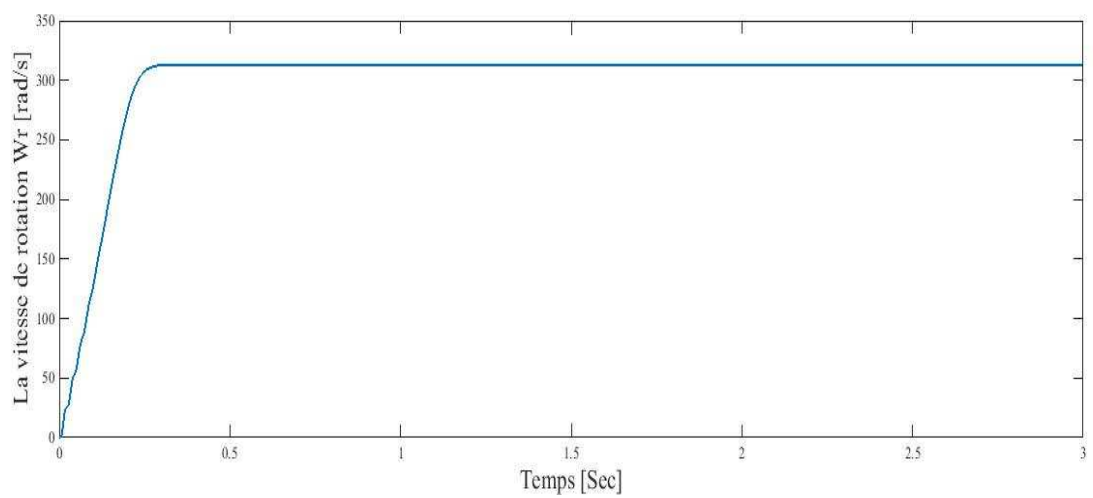
Figure 2.7. Courant dans la 3^{ème} barre rotorique IR3.Figure 2.8. Courant dans la 10^{ème} barre rotorique IR10.

Figure 2.9. La vitesse de rotation.

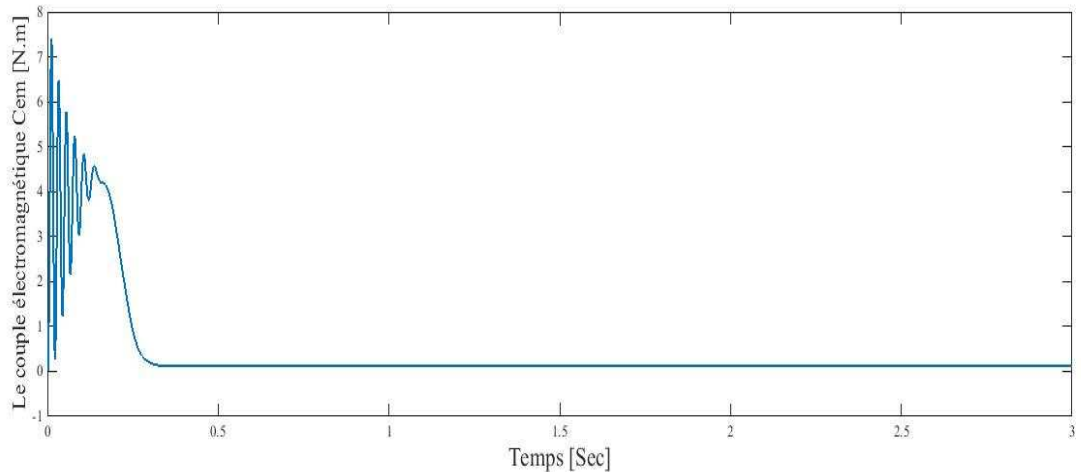


Figure 2.10. Le couple électromagnétique.

2.9.2 Fonctionnement en charge, à $t=0.7s$

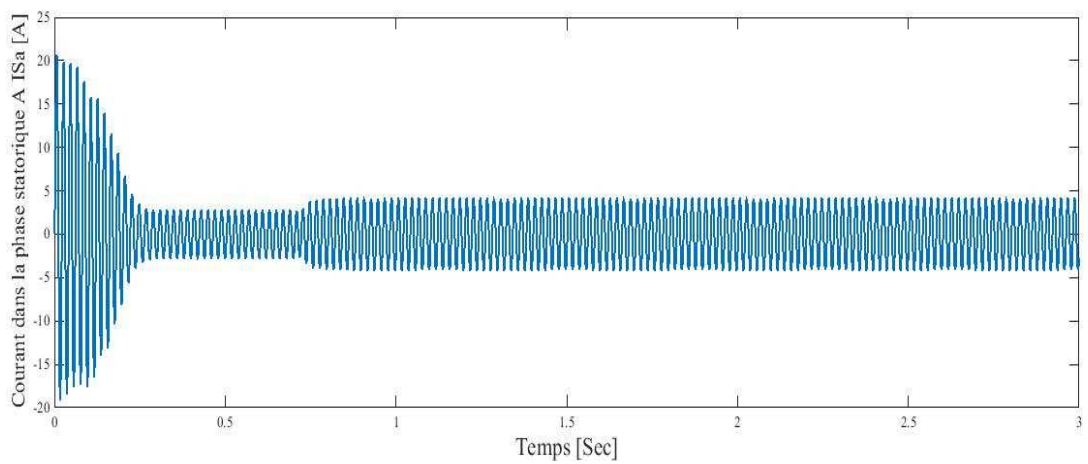


Figure 2.11. Courant dans la phase statorique A.

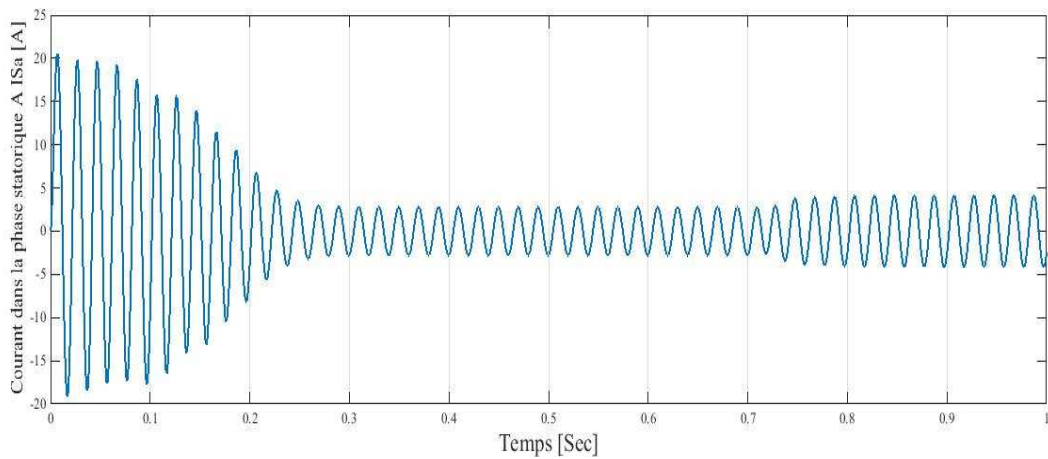


Figure 2.12. Zoom du ourant dans la phase statorique A.

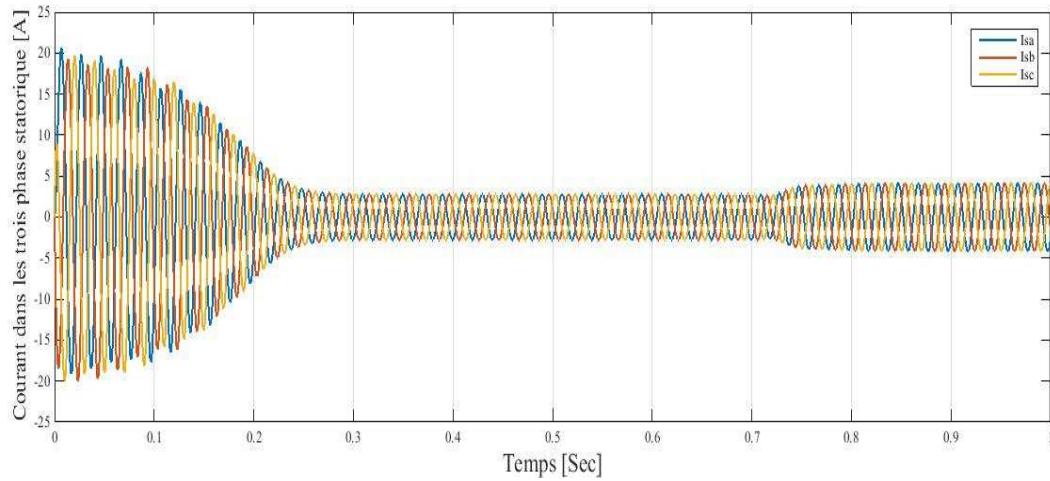
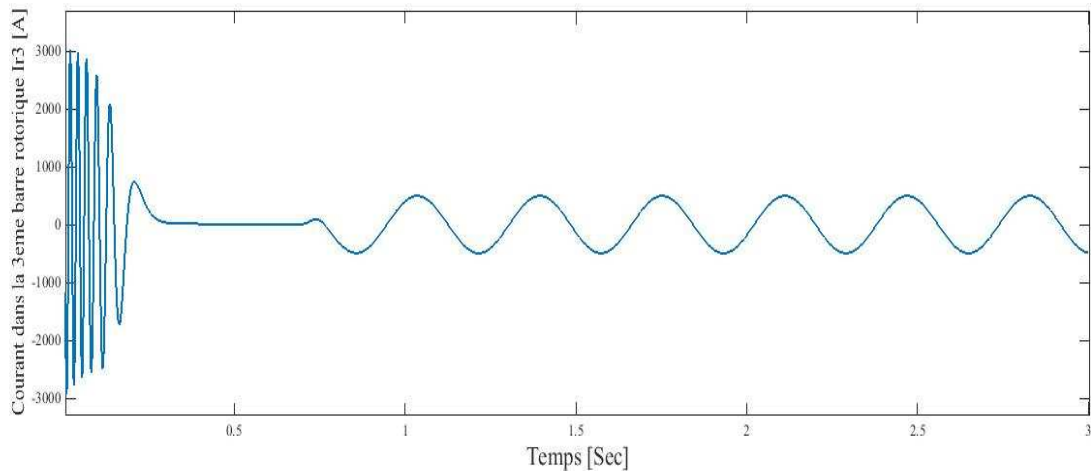
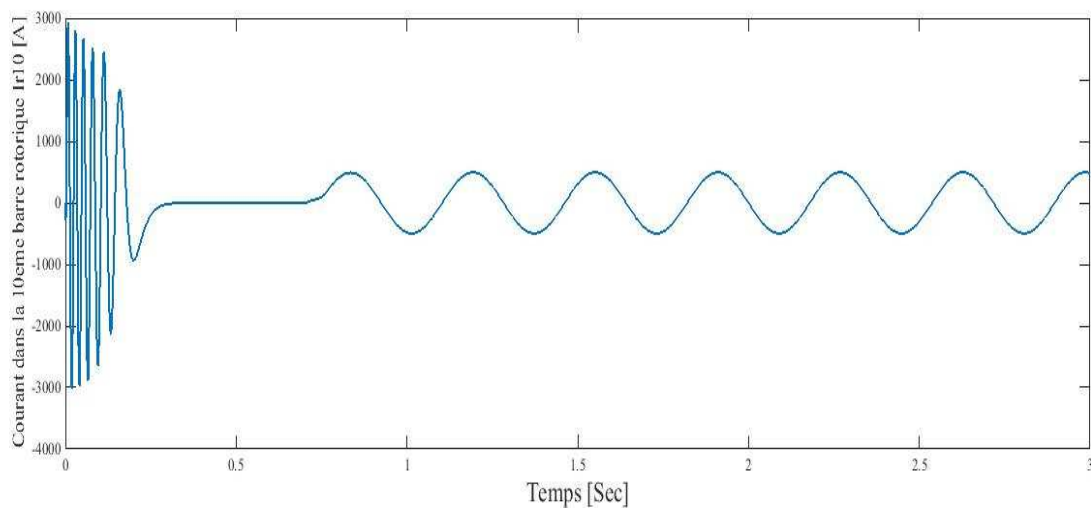


Figure 2.13. Zoom du Courant dans les trois phases statoriques.

Figure 2.14. Courant dans la 3^{ème} barre rotorique IR₃.Figure 2.15. Courant dans la 10^{ème} barre rotorique IR₁₀.

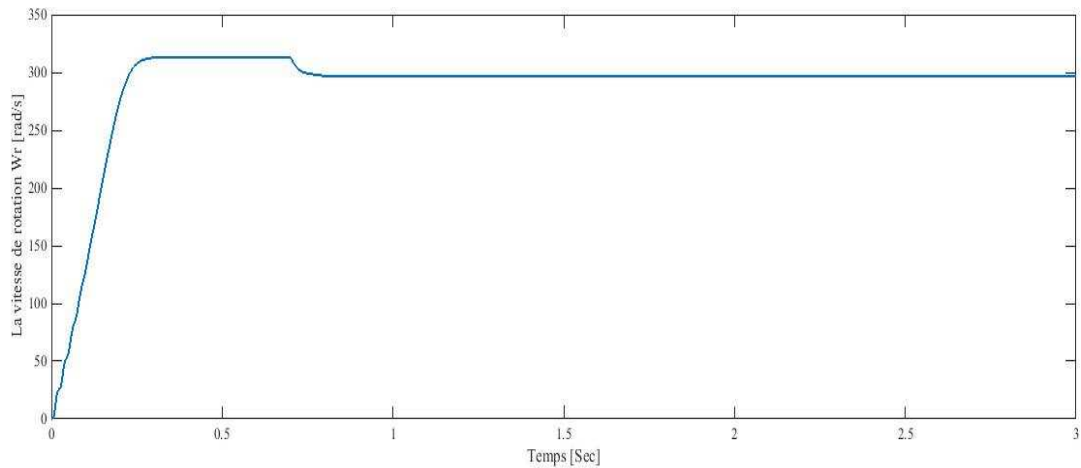


Figure 2.16. La vitesse de rotation.

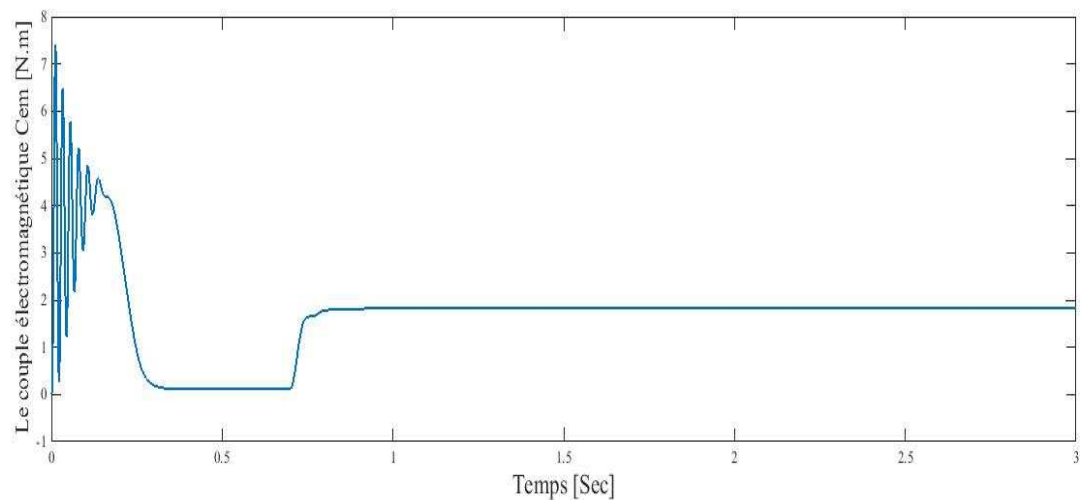


Figure 2.17. Le couple électromagnétique.

2.10 Interprétation des résultats de simulation

La simulation de la machine asynchrone à cage d'écureuil alimenté par des tensions sinusoïdales, nous a permis d'observer le comportement de celle-ci, les courbes présentées par les figure (2.4 jusqu'à 2.17) détaillent l'évolution de la vitesse, du couple électromagnétique, et des courants statoriques et rotoriques à vide et en charge.

Les deux figures (2.9) et (2.16) représente l'évolution de la vitesse de rotation de la machine, nous remarquons que la montée en vitesse est linéaire au début de démarrage, qui en régime permanent se stabilise à 314 rad/s, puisque la machine possède une paire de pôles. A l'application du couple résistant à $t=0.7s$, à partir de cet instant la vitesse décroît puisqu'elle est inversement proportionnelle à la charge, puis elle se stabilise à une certaine valeur.

Le couple électromagnétique est représenté par les deux figures (2.10) et (2.17), au démarrage, le couple est fortement pulsatives, il atteint une valeur maximale de 7.5 N.m, ceci explique le bruit engendré par la partie mécanique et après disparition du régime transitoire, le couple tend vers zéro, cette valeur représente le couple de frottement, jusqu'à l'instant d'application de couple résistant, ou la machine développe un couple électromagnétique qui augmente brusquement pour atteindre la valeur $C_{em}=1.8$ N.m.

Les figures (2.7), (2.8), (2.14) et (2.15) représente l'évolution des courants rotoriques, nous remarquons qu'au démarrage, les courants oscillent et ils atteignent la valeur maximale de 3000A, ce qui illustre le régime transitoire, à partir de $t=0.25$ s, les courants chutent à une valeur presque nulle, cela est due au fait que la vitesse au rotor s'approche de celle du champ tournant statorique (vitesse de synchronisme), et lors de l'application de couple résistant ($C_r=3.5$ N.m), des ondulations sont apparues et oscillent autour de l'axe de zéro, ainsi le courant varie sinusoidalement autour d'une valeur efficace de 500A.

L'évolution des courants statoriques absorbés par les trois phases du stator est illustré dans les figures (2.4), (2.5), (2.6), (2.11), (2.12) et (2.13), en régime transitoire, les courants oscillent autour de l'axe zéro avec une amplitude de 20 A, puis il se stabilisent à une valeur efficace de 2.8 A en régime permanent, après l'application de couple résistant à l'instant $t=0.7$ s, les courants augmentent pour atteindre une valeur maximale de 4 A et cela est dû au fait que la machine faisant appel à un surplus de courant pour faire face à ce couple résistant.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté un modèle externe de simulation de la machine asynchrone à cage d'écureuil en régime sain. Cette modélisation consiste à la résolution numérique du système d'équation différentielle, en utilisant la méthode Rung-kutta d'ordre quatre, un programme écrit sous l'environnement Matlab nous a permis d'analyser le comportement de la machine en régime sain. La particularité de ce modèle réside dans l'utilisation des paramètres réels de la machine sans passer par la transformation de Park ce qui permet de discriminer un comportement défectueux d'un comportement dû à un fonctionnement normal de la machine. Les résultats de simulation obtenus traduisent bien le comportement connu du fonctionnement de la machine. La modélisation de la machine en présence de défaut de cassure de barres fera l'objet du prochain chapitre.

CHAPITRE 3

MODÉLISATION DE LA MACHINE ASYNCHRONE À CAGE D'ÉCUREUIL EN PRÉSENCE DES DÉFAUTS DE CASSURE DE BARRES ET D'ANNEAUX DE C-C

Introduction

Ce chapitre consiste à étudier les différents phénomènes qui apparaissent au niveau des grandeurs temporelles lorsque la cage rotorique présente un défaut de type rupture d'une ou plusieurs barres et rupture de portions d'anneaux de court-circuit. Pour ce faire, il convient de développer un modèle qui tient compte de ces défauts. Les résultats de simulation en présence de ces défauts seront présentés.

3.1 Défaut de cassure de barre rotorique

Le problème des ruptures de barres dans les machines à induction a été l'objet de plusieurs travaux de recherches : [26], [27], [28], [29] et [30], l'information de la rupture de barre se trouve donc portée par le flux magnétique, et par conséquent dans le courant absorbé du réseau électrique. Il est donc nécessaire de connaître les fréquences résultant d'une rupture de barres afin de pouvoir les détecter à travers une analyse spectrale de ces courants.

Comme le montre [31], suite à une rupture de barre, les circuits rotoriques créent en plus du champ rotorique direct, un champ magnétique inverse de pulsation $-gf_s$ et qui est dû au déséquilibre des enroulements rotoriques **Figure 3.1**. Cela a pour effet d'induire des forces électromotrices dans les circuits statoriques de fréquences $(1-2g)f_s$, et donc des composantes de courant à ces fréquences selon la relation:

$$F_{\text{défaut}} = f_r - gf_s \quad (3.1)$$

$$= (1-g)f_s - gf_s = (1-2g)f_s \quad (3.2)$$

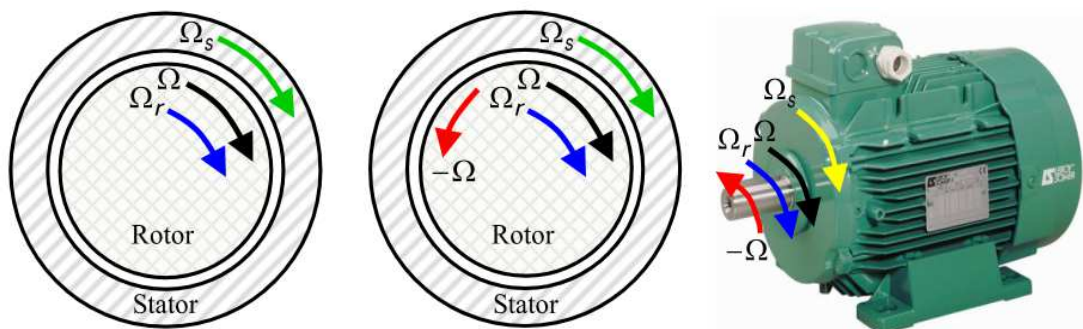


Figure 3.1. Schéma de fonctionnement d'un rotor en défaut, [16].

Produite par l'interaction du champ direct et inverse. Les forces électromotrices dues au défaut sont alors de fréquences $(1 \pm 2g)f_s$. Les champs créés par les courants vont induire, par conséquent, au rotor des courants directs et inverses de fréquences $\pm 3gf_s$. Ainsi, au stator, des courants de

fréquences $(1 \pm 4g)f_s$ sont générées selon le même processus. Par conséquent, des composantes de fréquences $(1 \pm 2kg)f_s$, où k est un entier positif, se retrouvent dans les courants absorbés par la machine [32].

3.2 Simulation de rupture de barres au rotor

Il est assez difficile de d'écrire exactement la succession des phénomènes physiques entrant en jeu lors d'une rupture d'une barre. La simulation de ce type de défaillance peut être faite en utilisant deux méthodes différentes, le but étant d'annuler le courant qui traverse la barre incriminée. Le circuit électrique rotorique donné par la **Figure 3.2** doit être reconsidéré pour permettre la prise en compte du défaut rotorique dans le modèle de la machine.

Une première méthode de modélisation consiste à annuler le courant qui traverse cette barre [33], [3]. Les matrices des inductances et des résistances sont modifiées de tel façon que : si la barre k est rompue, le courant i_{bk} dans cette barre s'annule. Dans ce cas, le courant dans la maille $(k-1)$ devient égal au courant dans la maille (k) , c'est-à-dire, $(i_{r(k-1)} = i_{rk})$. Ceci est traduit dans les matrices des inductances et des résistances, Par l'addition des deux colonnes et des deux lignes liées aux courant $i_r(k-1)$ et i_{rk} . Le courant i_{rk} est donc supprimé du vecteur des courants.

La seconde approche consiste à augmenter artificiellement la valeur de la résistance de la barre incriminée d'un facteur suffisant pour que le courant qui la traverse soit le plus proche possible du zéro en régime permanent. En comparaison avec la première méthode, la structure du circuit électrique rotorique n'est pas modifiée car nous considérons dans ce type de modélisation, qu'une rupture de barre n'altère pas les inductances propres et mutuelles de la cage rotorique. Par conséquent, le programme de simulation s'adaptera à cette nouvelle contrainte et nous donnera l'évolution temporelle des différents signaux pour un fonctionnement de la machine avec ce type de défaut.

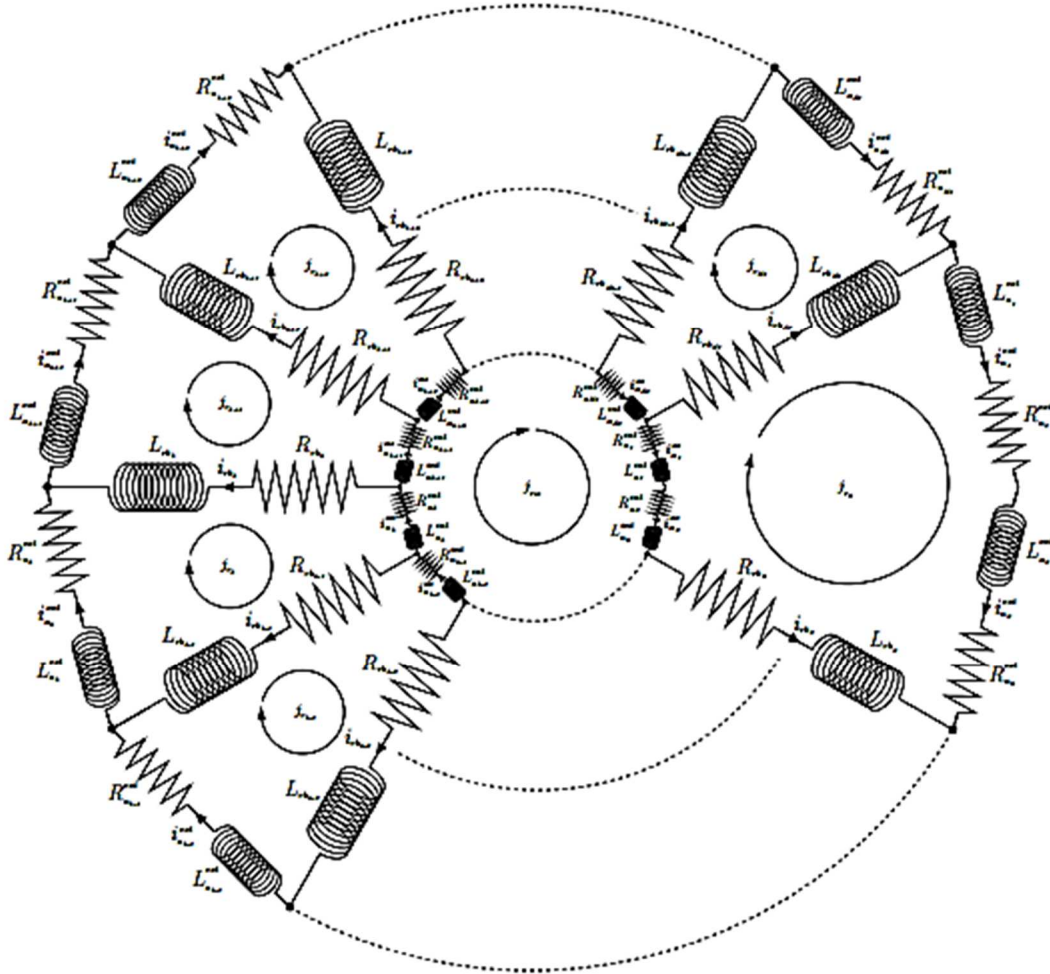


Figure 3.2. Schéma équivalent de la cage rotorique avec une barre cassée, [1].

3.3 Représentation d'état du modèle de défaut

Le modèle d'état à étudier dans ce cas est le même que celui utilisé pour le cas de la machine en régime sain, avec la matrice résistances rotoriques est définie comme suit :

$$[R_r] = \begin{bmatrix} 2(R_b + R_e) & -R_b & 0 & 0 & \dots & \cdot & -R_b & -R_e \\ -R_b & 2(R_b + R_e) & -R_b & 0 & \dots & \cdot & 0 & -R_e \\ \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \dots & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \dots & -\alpha R_{bk} & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \dots & (\alpha 2R_b + R_e) & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \dots & -\alpha R_{bk} & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \dots & \cdot & \cdot & \cdot \\ -R_b & 0 & \cdot & \dots & \dots & -R_b & 2(R_b + R_e) & -R_e \\ -R_e & -R_e & \cdot & \dots & \dots & \cdot & -R_e & N_r R_e \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

α est le coefficient d'augmentation de la barre incriminée.

3.4 Résultats de la simulation

3.4.1 Cas d'une barre cassée (N°1) à $t=2s$

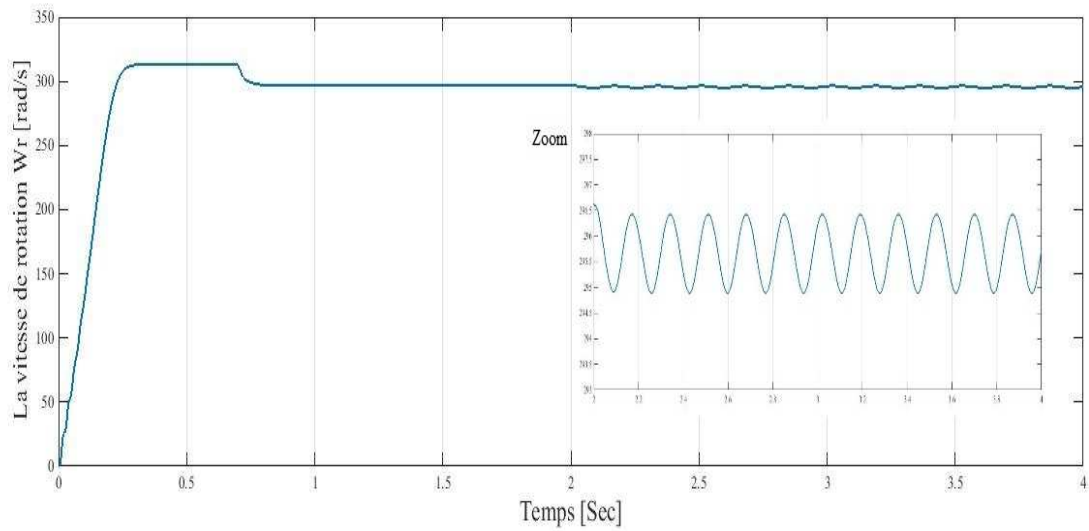


Figure 3.3. La vitesse de rotation.

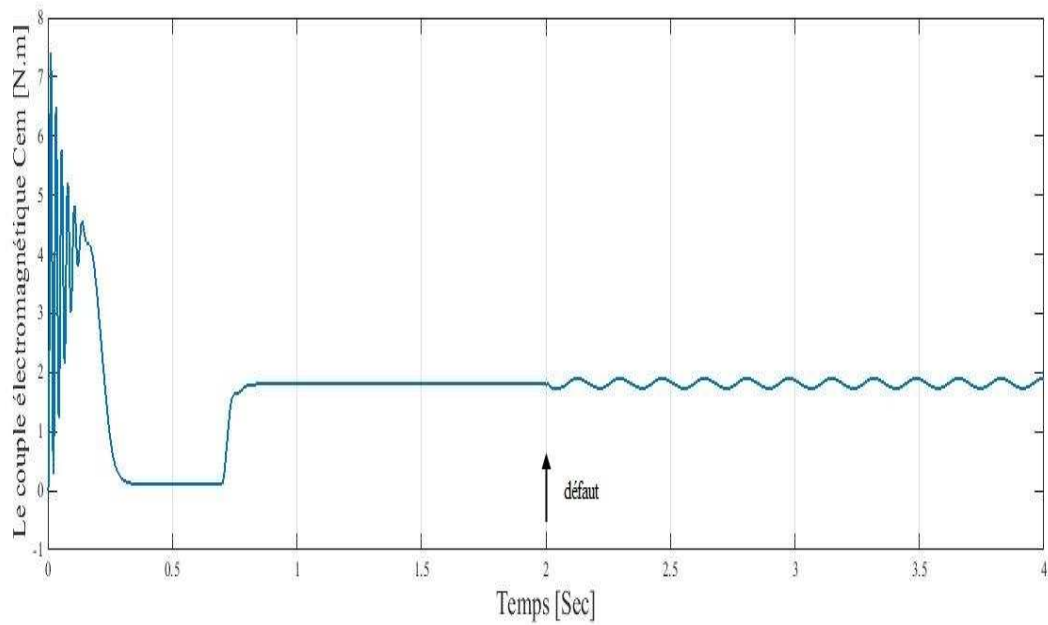


Figure 3.4. Le couple électromagnétique.

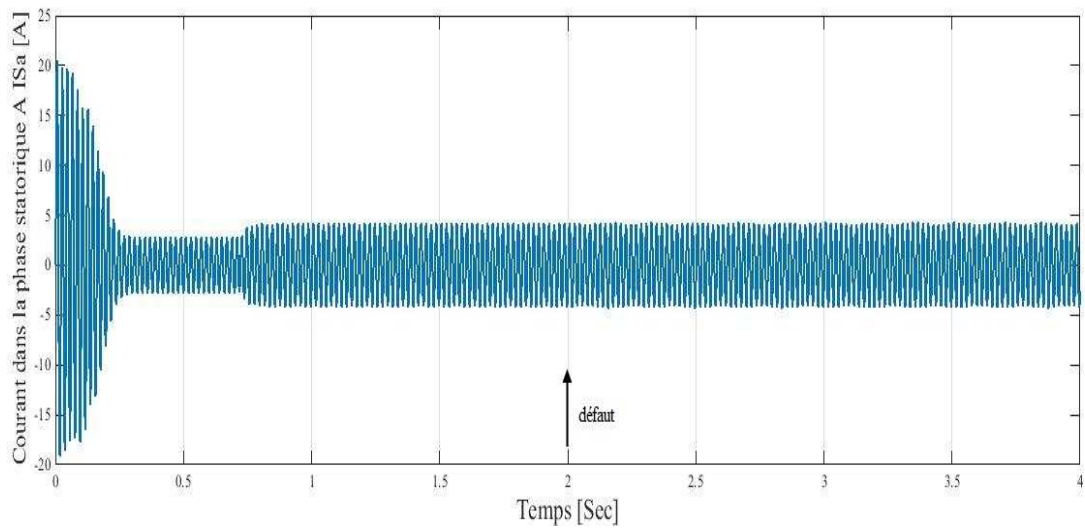


Figure 3.5. Courant dans la phase statorique A.

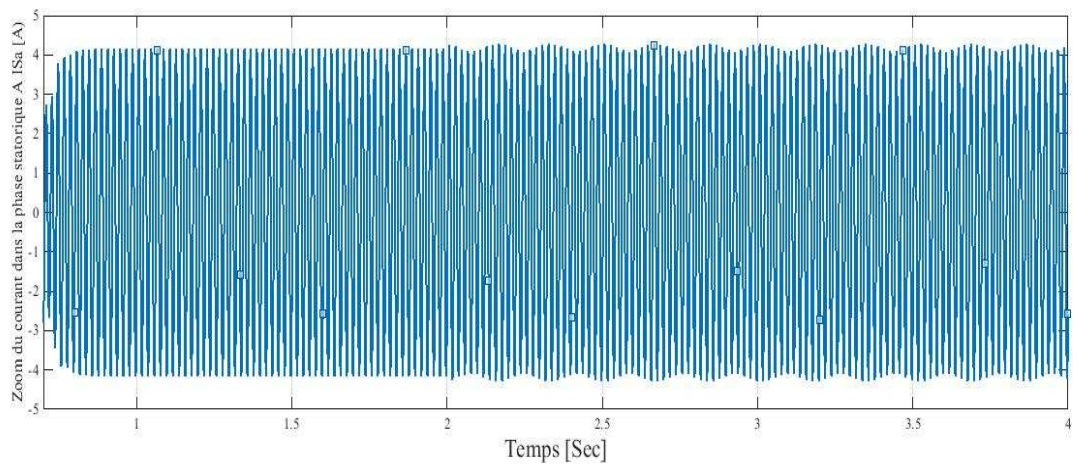


Figure 3.6. Zoom du courant dans la phase statorique A.

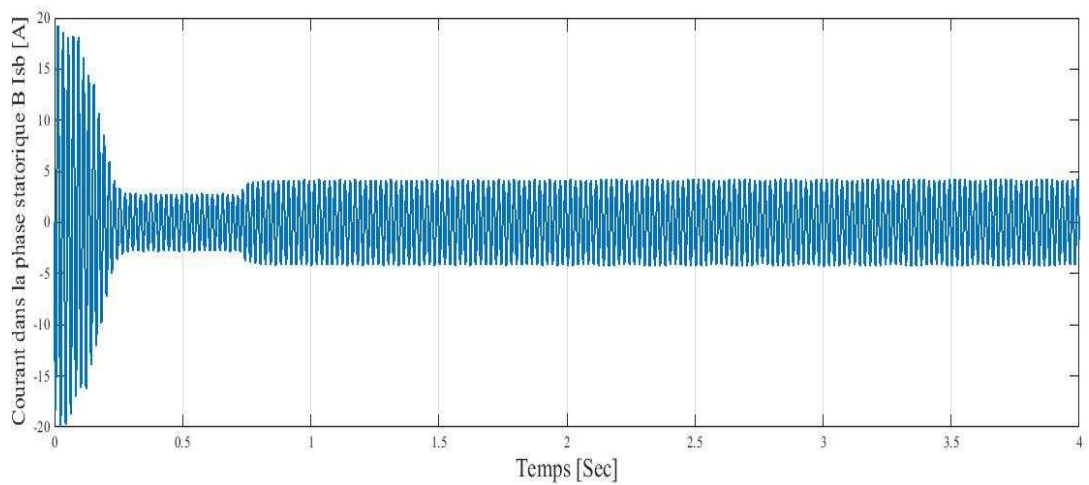


Figure 3.7. Courant dans la phase statorique B.

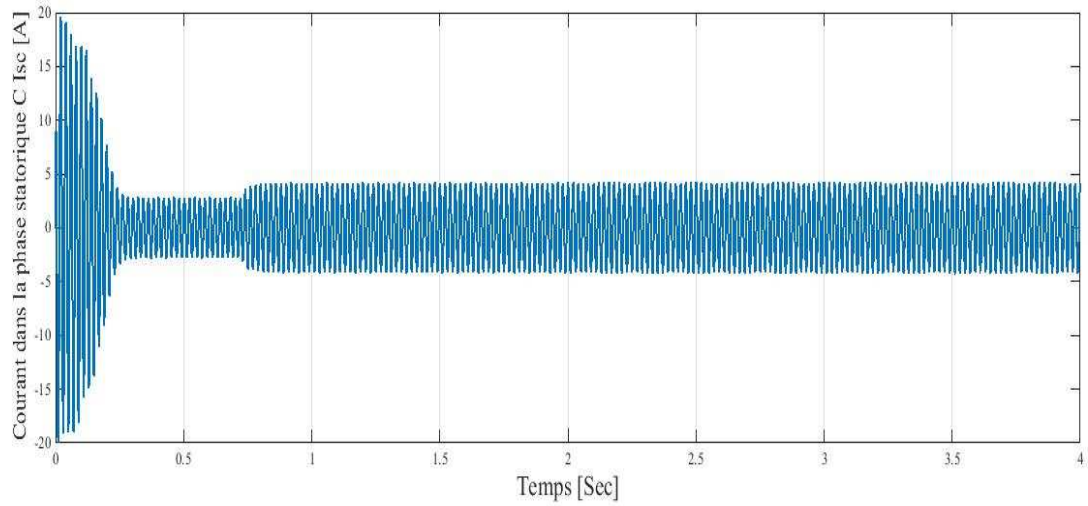


Figure 3.8. Courant dans la phase statorique C.

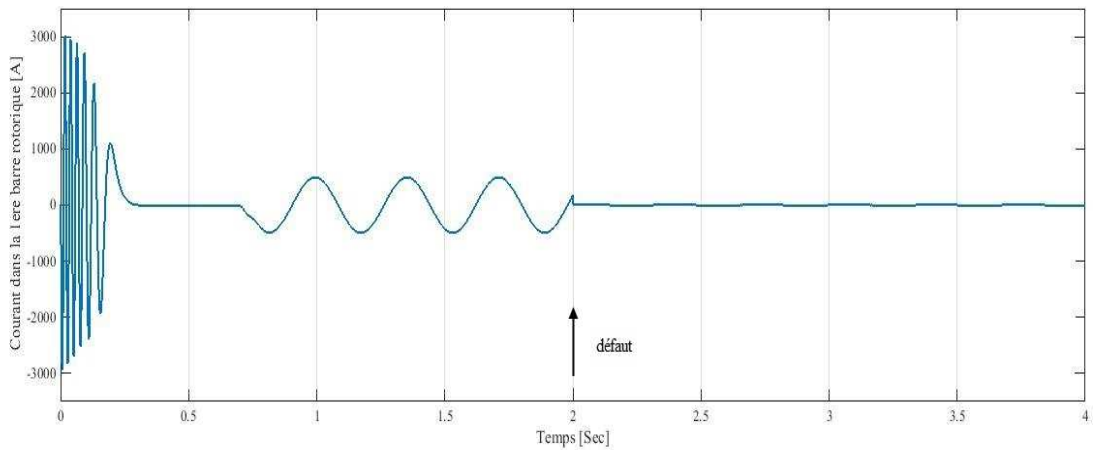


Figure 3.9. Courant dans la 1^{ère} barre rotorique.

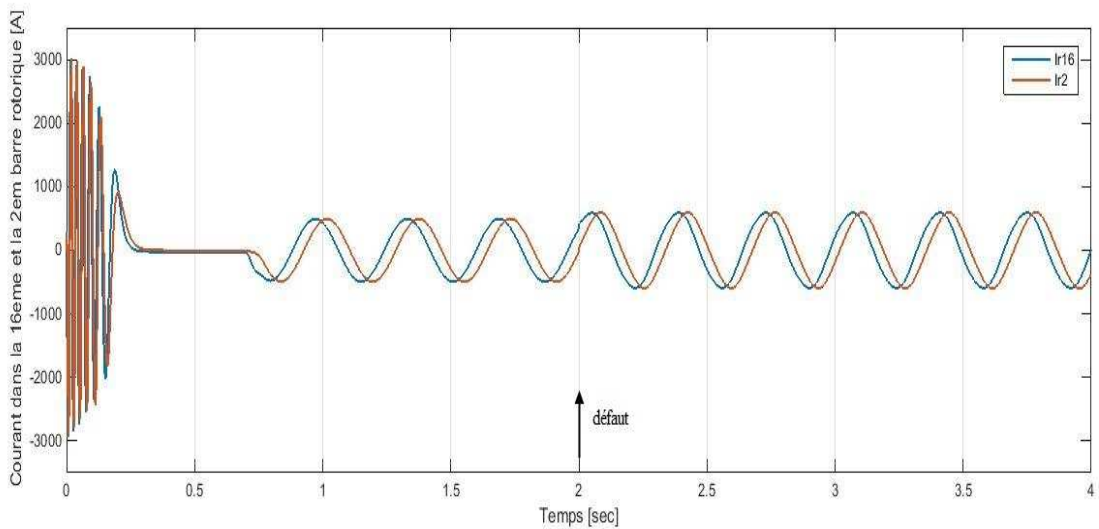


Figure 3.10. Courant dans les barres rotoriques.

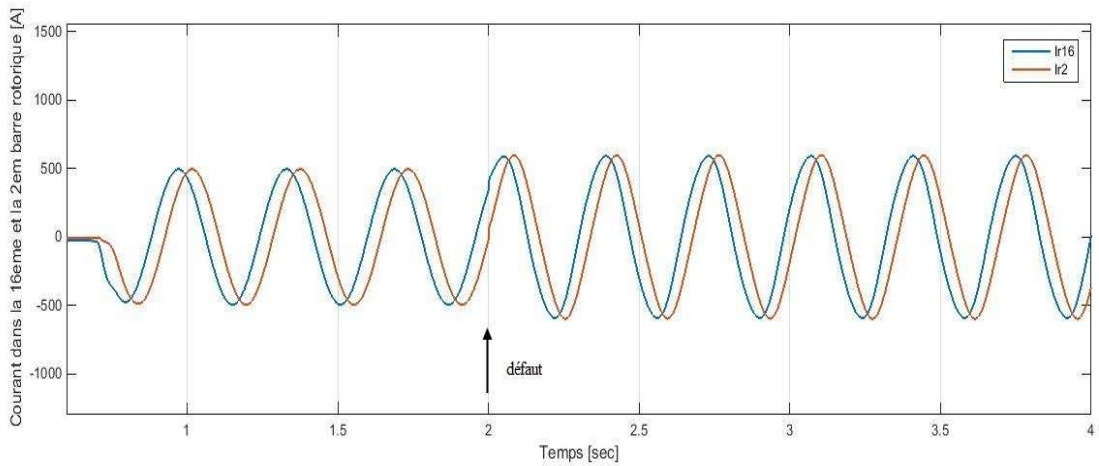


Figure 3.11. Zoom des courants dans les barres rotoriques.

3.4.2 Cas de cassure de deux barres adjacentes (N° 1 et N° 2) à t=2s

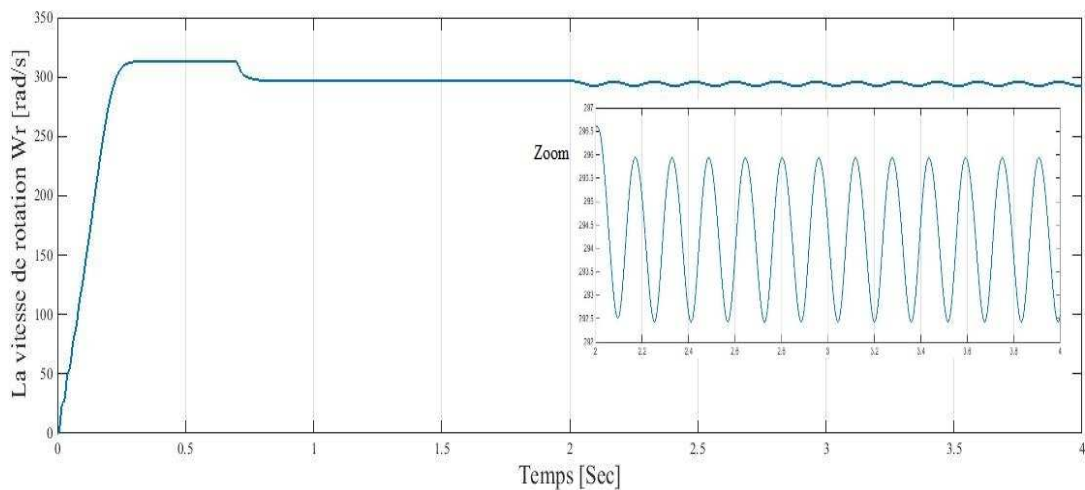


Figure 3.12. La vitesse de rotation.

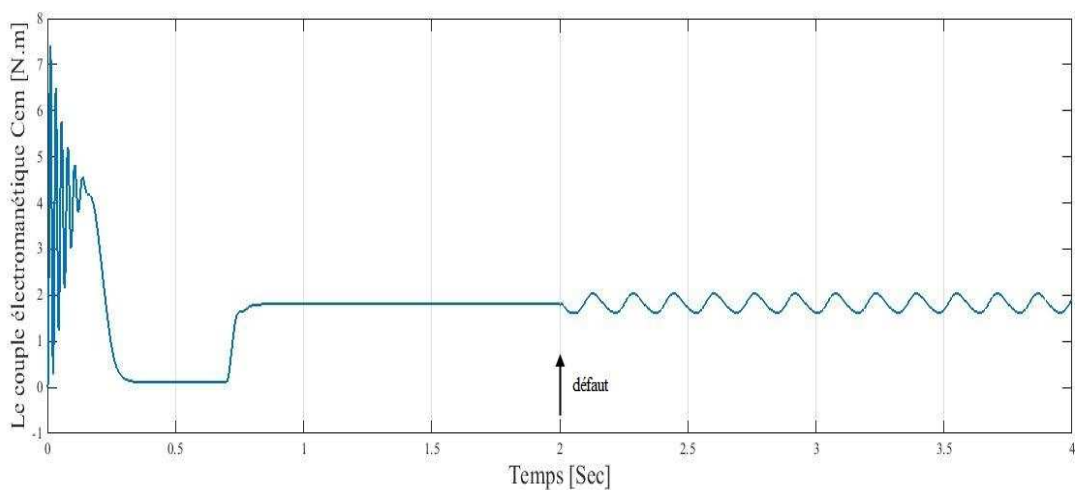


Figure 3.13. Le couple électromagnétique.

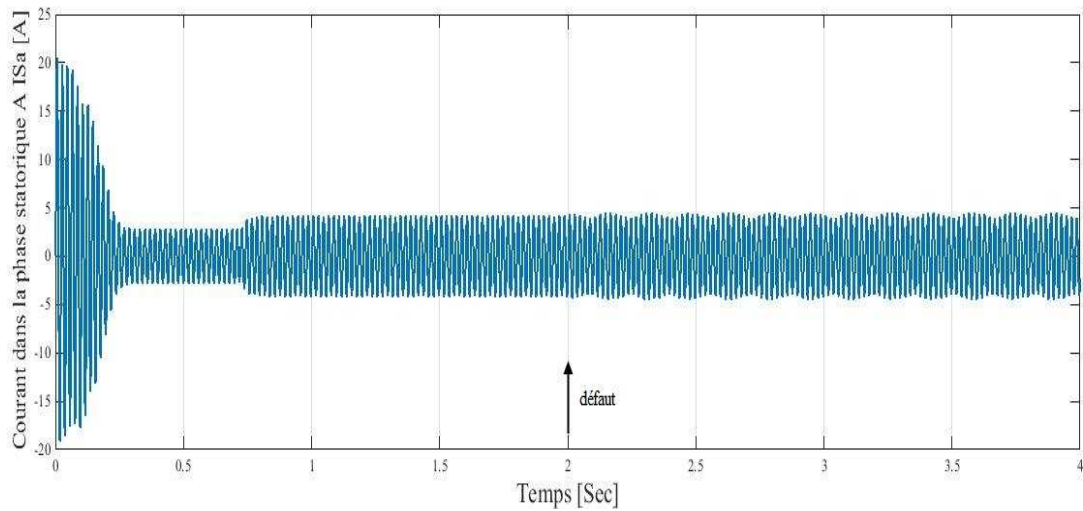


Figure 3.14. Courant dans la phase statorique A.

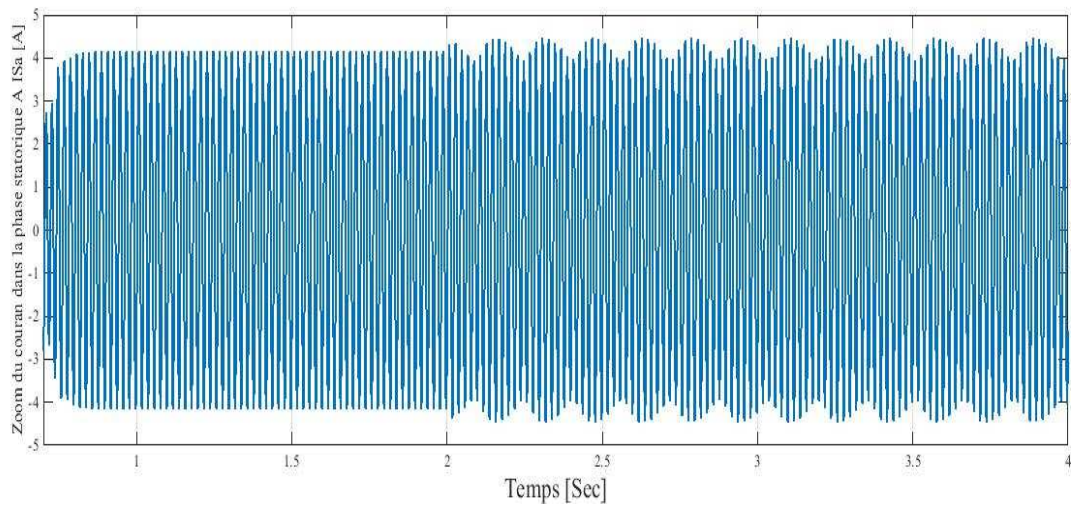


Figure 3.15. Zoom du courant dans la phase statorique A.

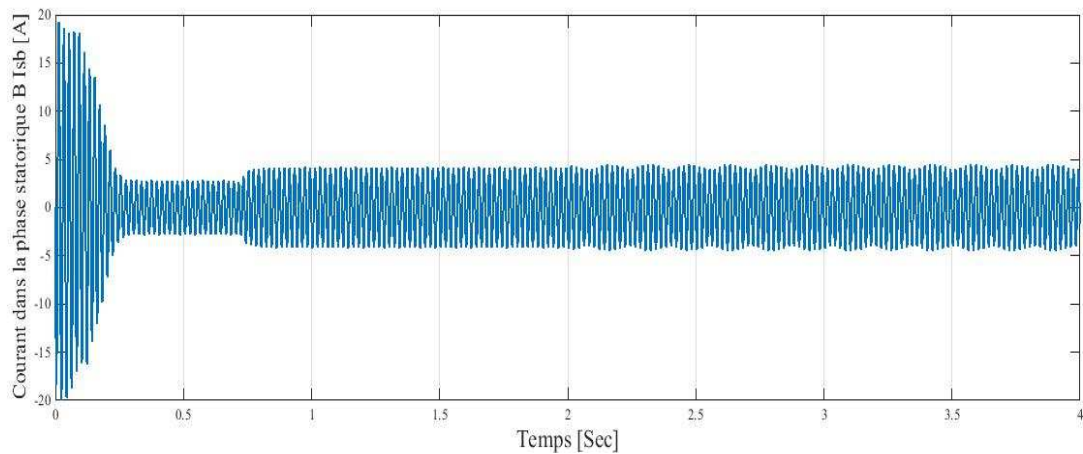


Figure 3.16. Courant dans la phase statorique B.

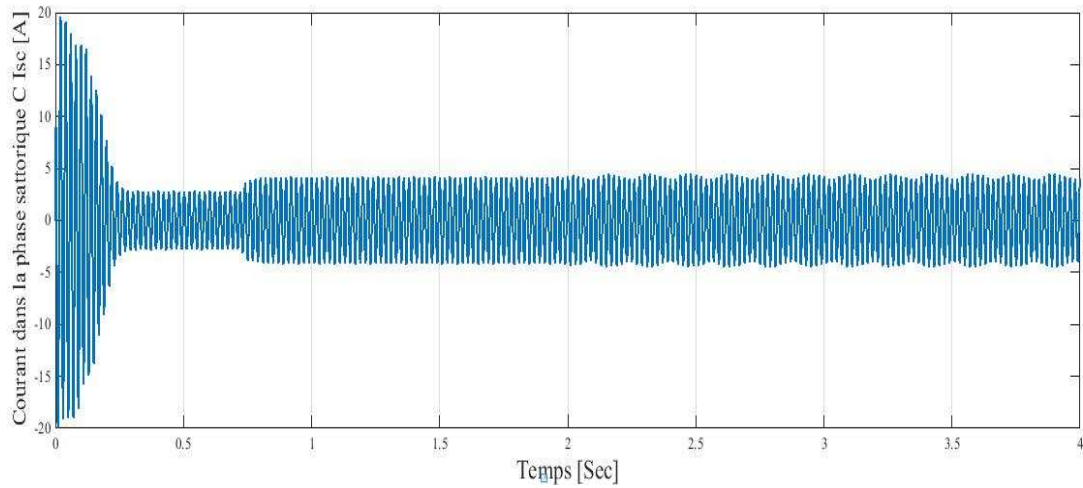


Figure 3.17. Courant dans la phase statorique C.

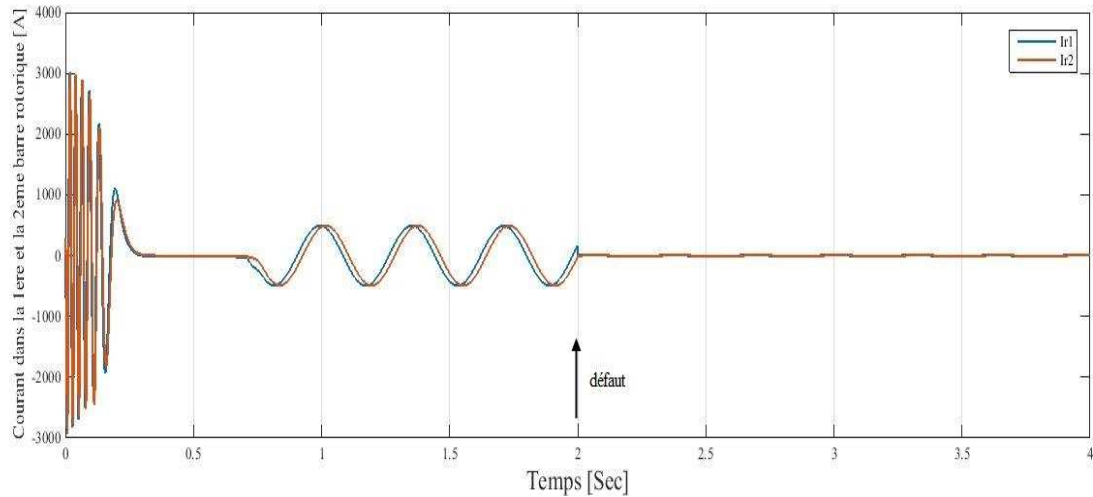


Figure 3.18. Courant dans la 1^{ère} et la 2^{ème} barre rotorique.

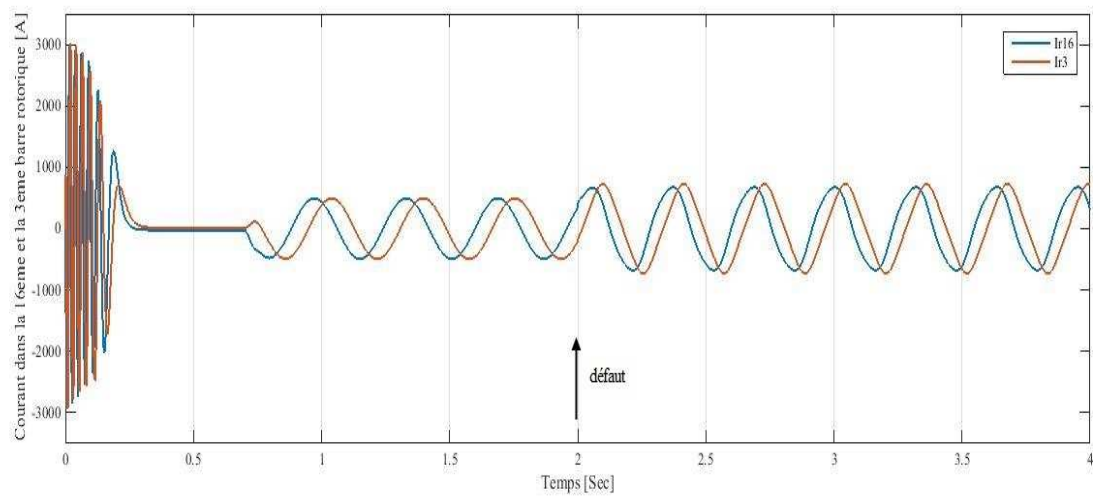


Figure 3.19. Courant dans les barres rotoriques.

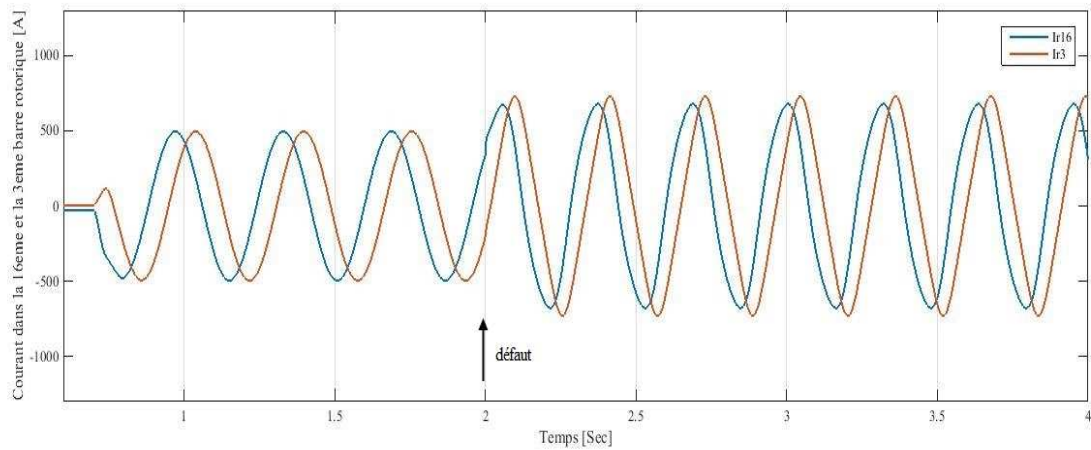


Figure 3.20. Zoom du Courant dans les barres rotoriques.

3.4.3 Cas de cassure de deux barres opposées (N° 1 et N° 8) à t=2s

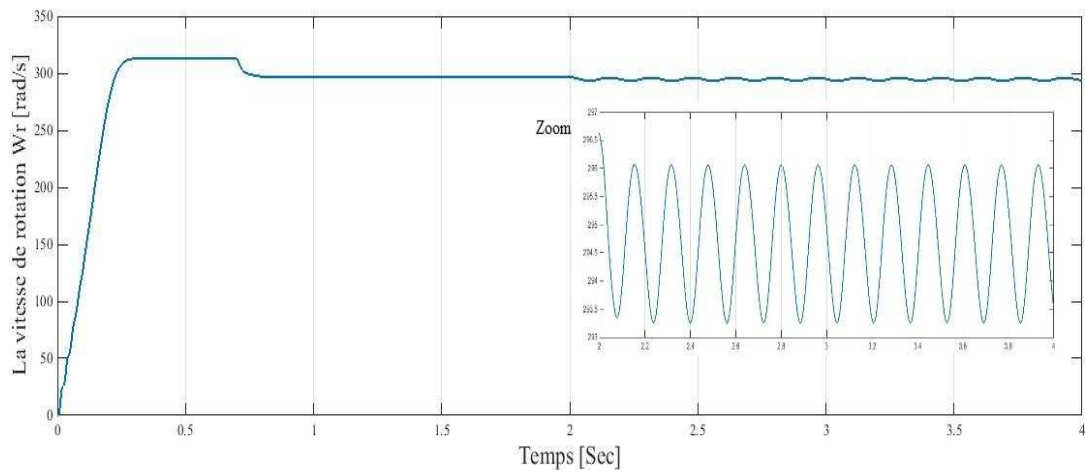


Figure 3.21. La vitesse de rotation.

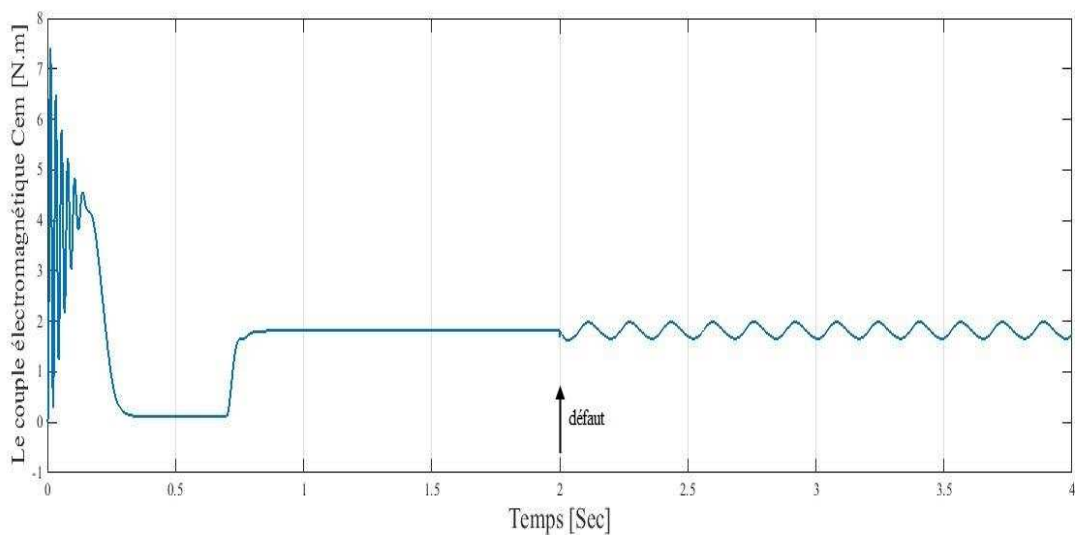


Figure 3.22. Le couple électromagnétique.

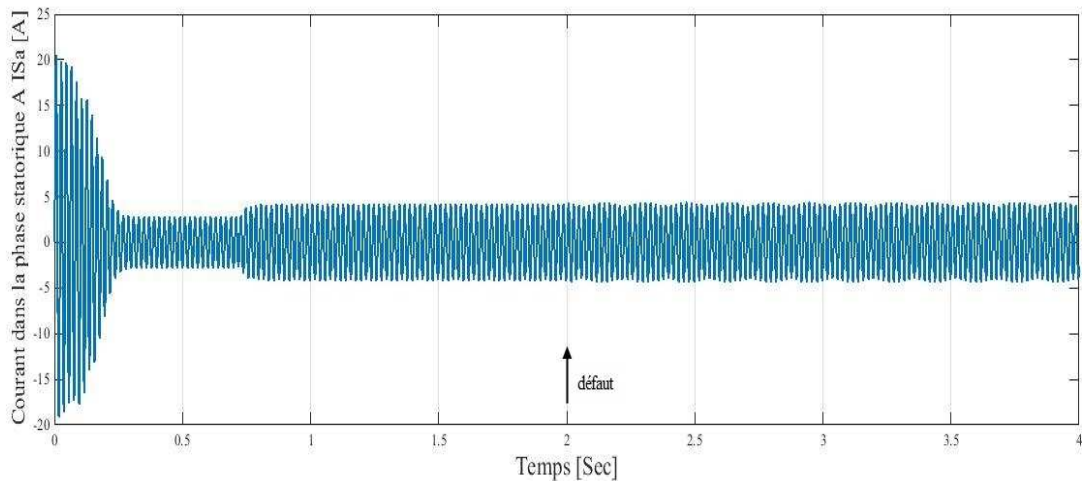


Figure 3.23. Courant dans la phase statorique A.

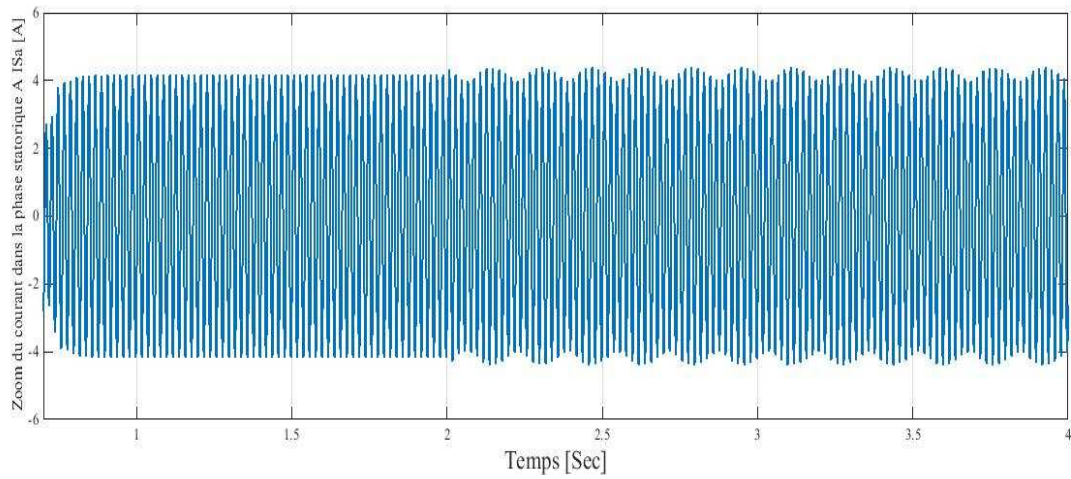


Figure 3.24. Zoom du courant dans la phase statorique A.

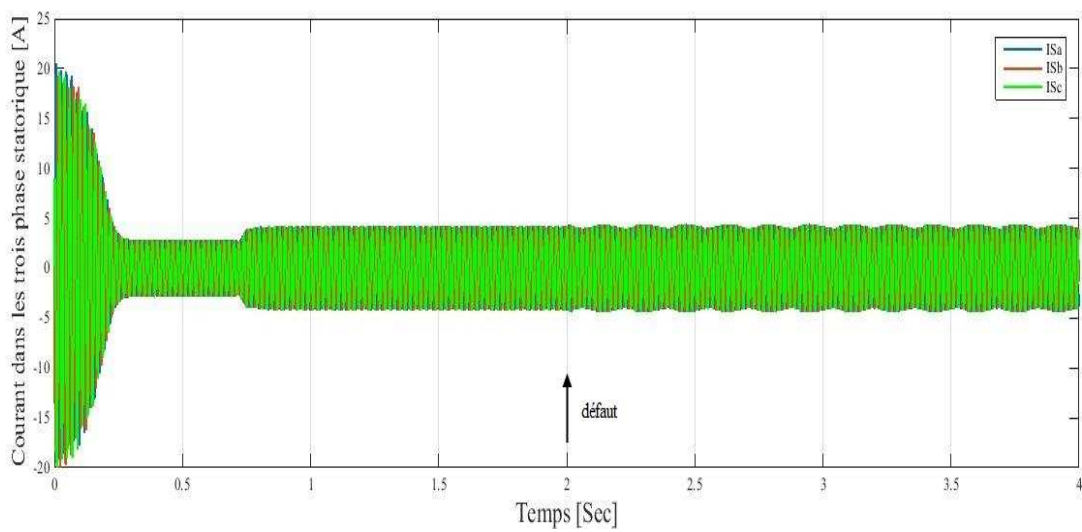


Figure 3.25. Courant dans les trois phases statoriques.

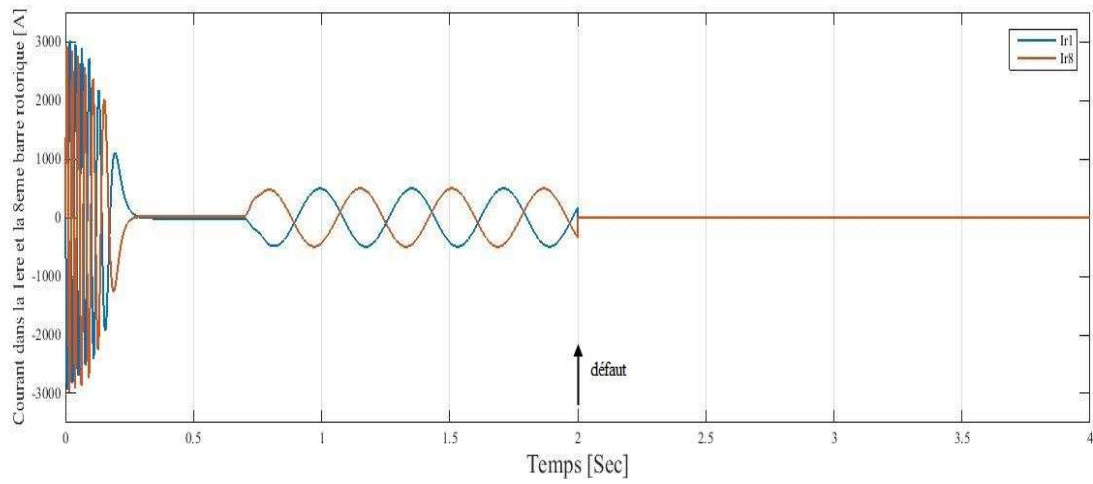


Figure 3.26. Courant dans la 1^{ère} et la 8^{ème} barre rotorique.

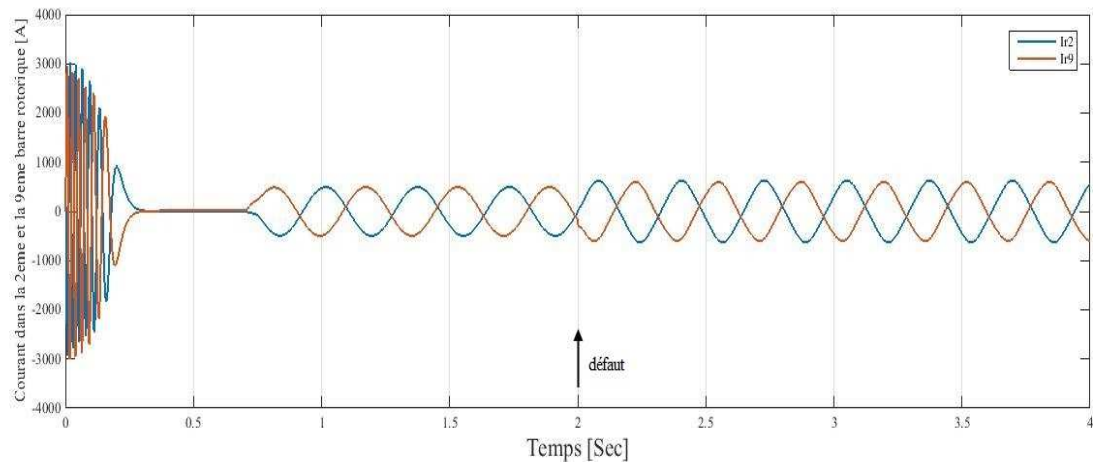


Figure 3.27. Courant dans les barres rotoriques.

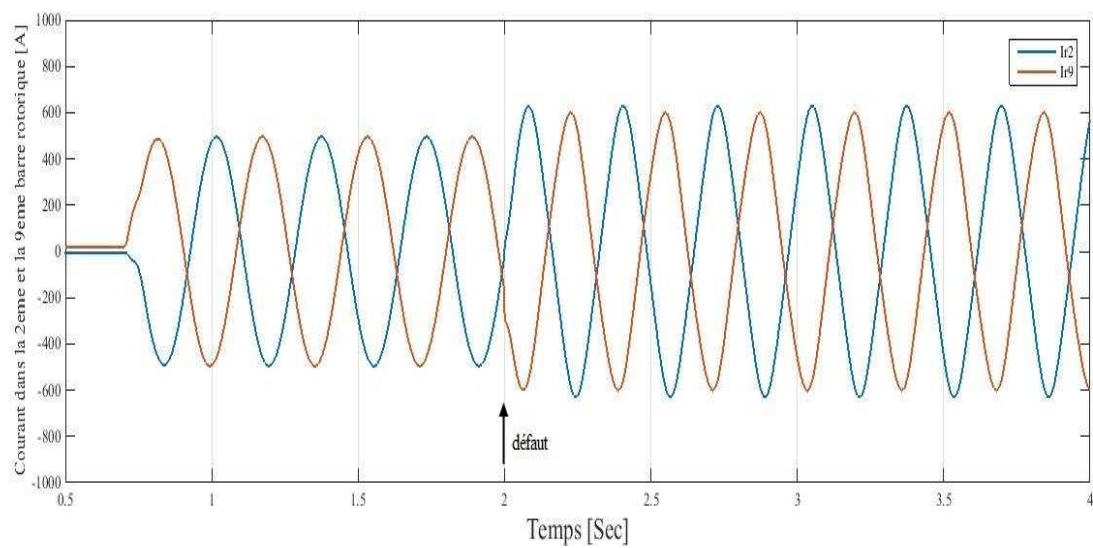


Figure 3.28. Zoom du courant dans les barres rotoriques.

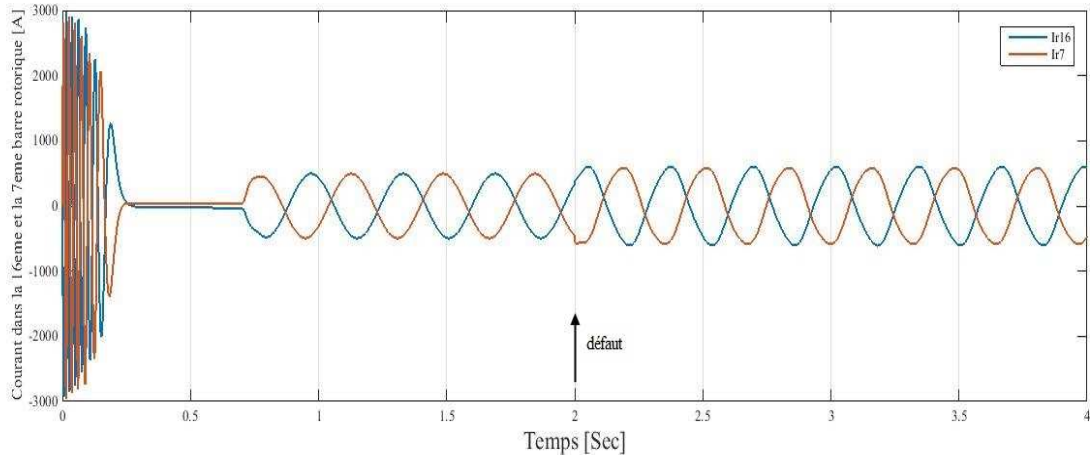


Figure 3.29. Courant les barres rotoriques.

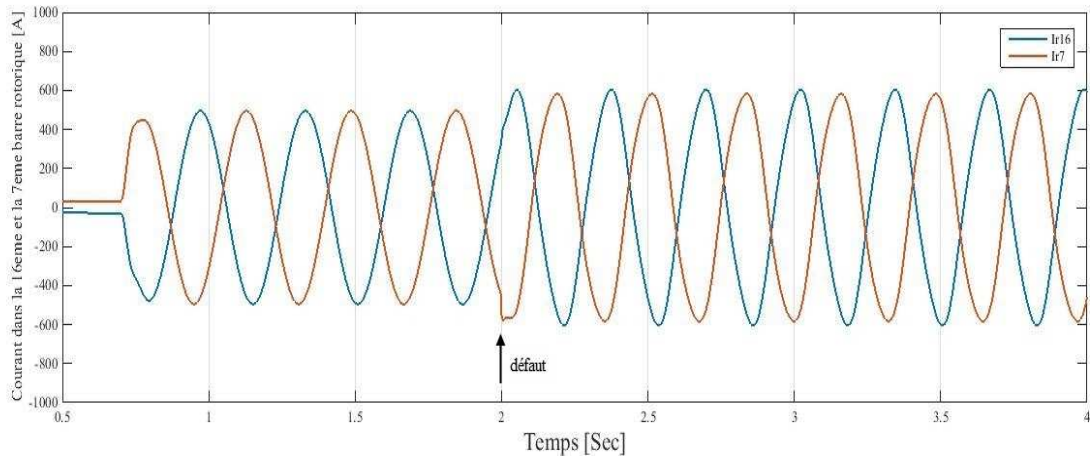


Figure 3.30. Zoom du courant dans les barres rotoriques.

3.4.4 Cas de cassure de trois barres simultanément à (1.5s, 2.5s et 3.5s)

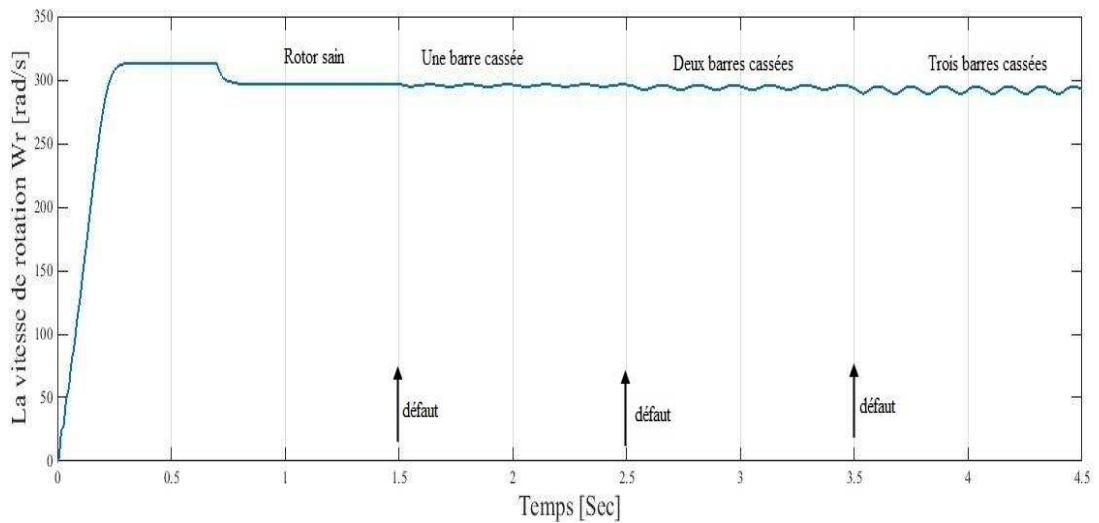


Figure 3.31. La vitesse de rotation.

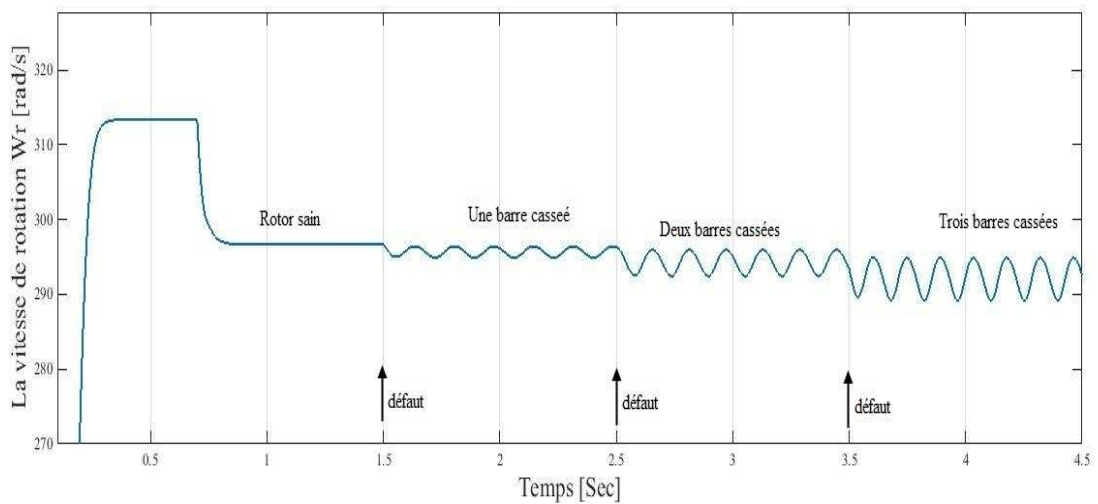


Figure 3.32. Zoom de la vitesse de rotation.

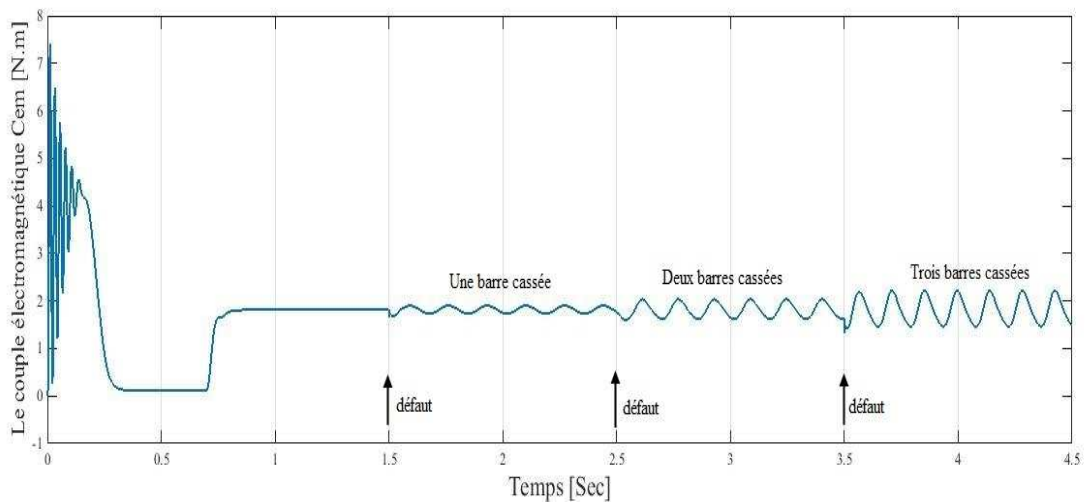


Figure 3.33. Le couple électromagnétique.

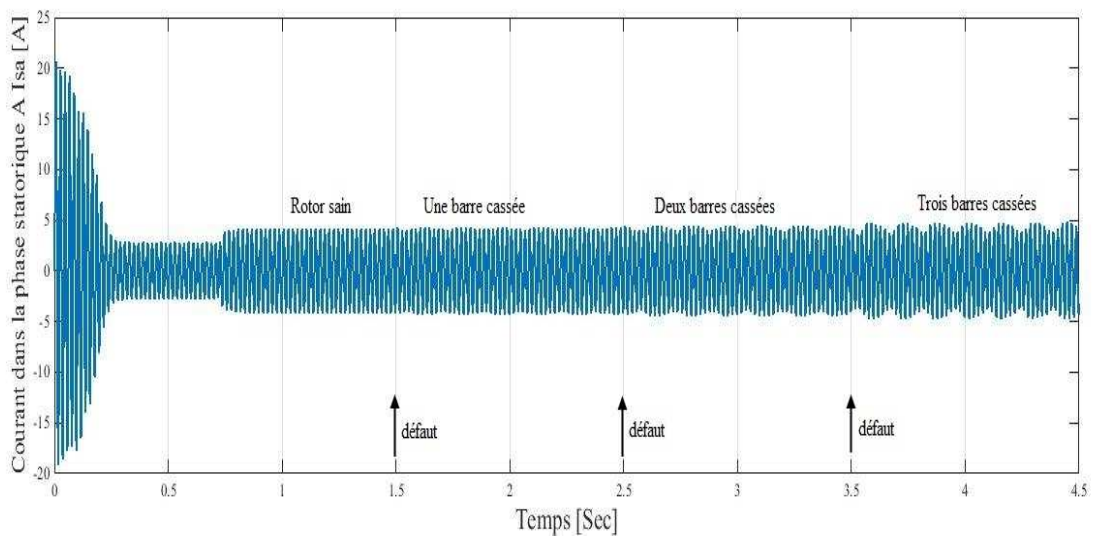


Figure 3.34. Courant dans la phase statorique A.

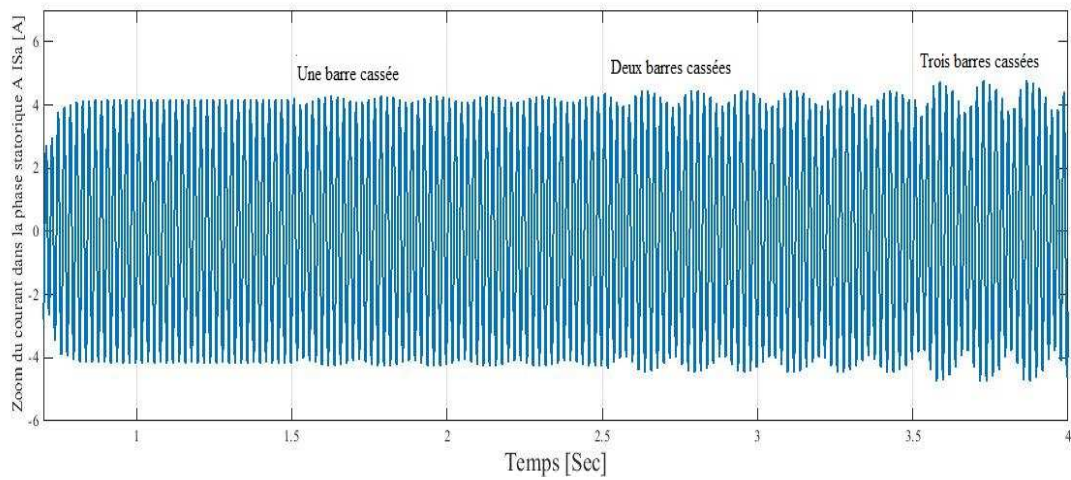


Figure 3.35. Zoom du courant dans la phase statorique A.

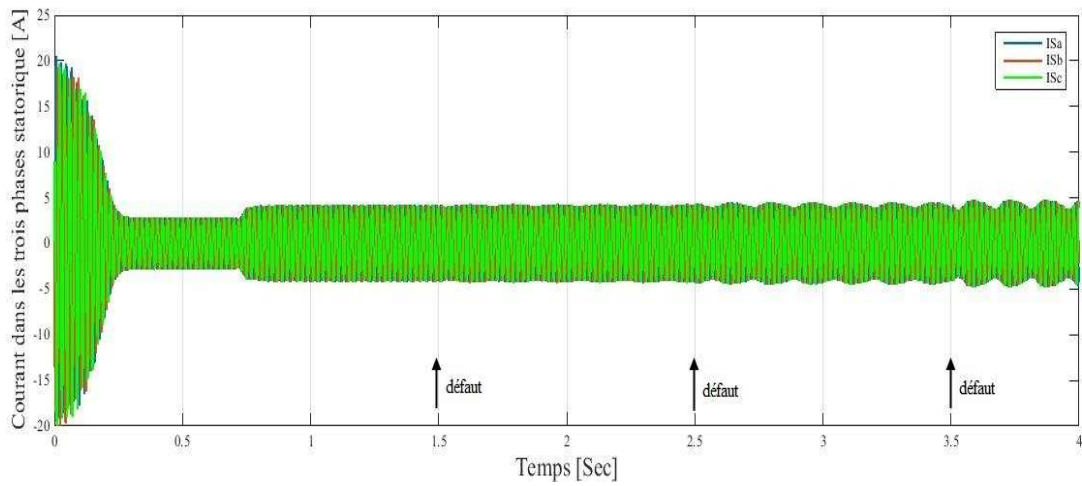


Figure 3.36. Courant dans les trois phases statoriques.

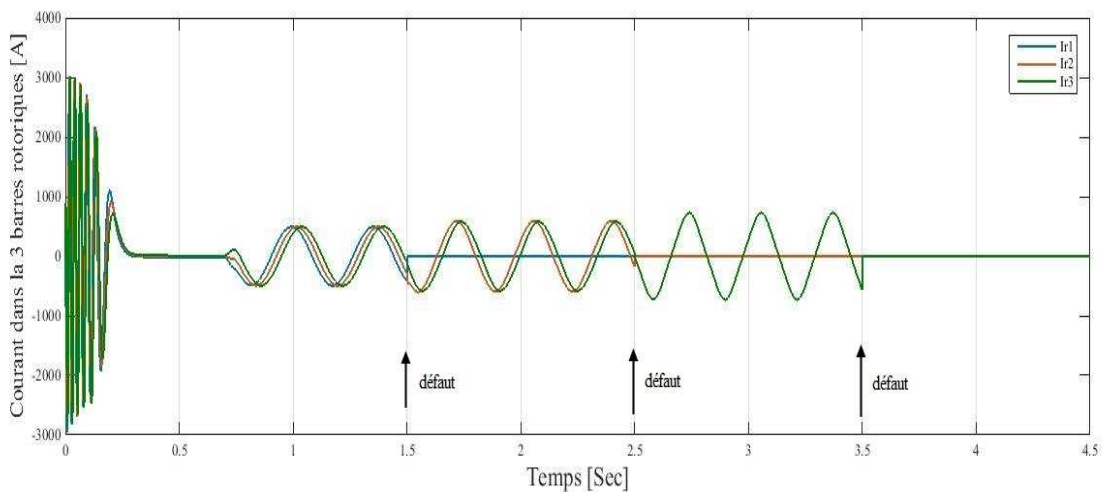


Figure 3.37. Courant dans les barres rotoriques.

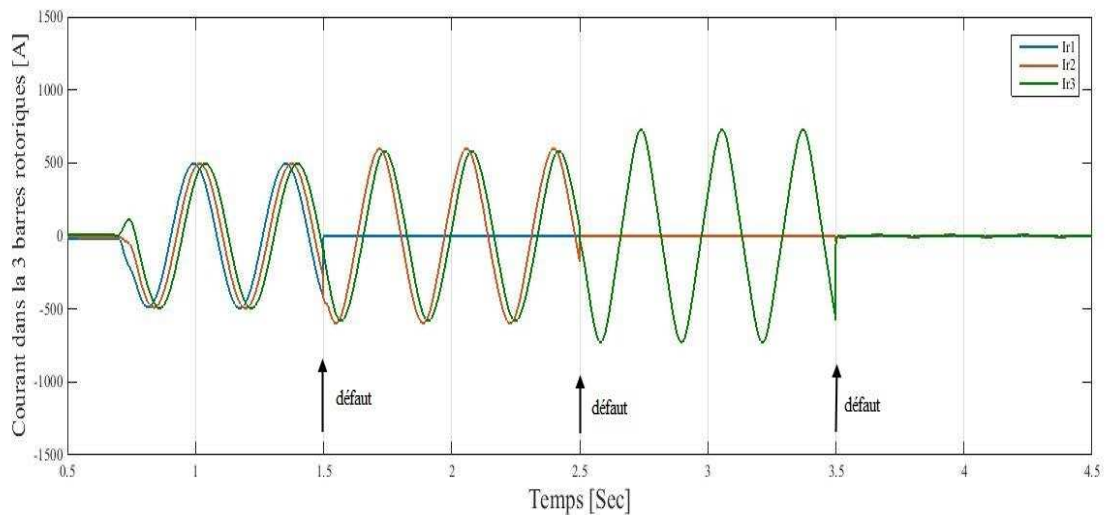


Figure 3.38. Zoom du courant dans les barres rotoriques.

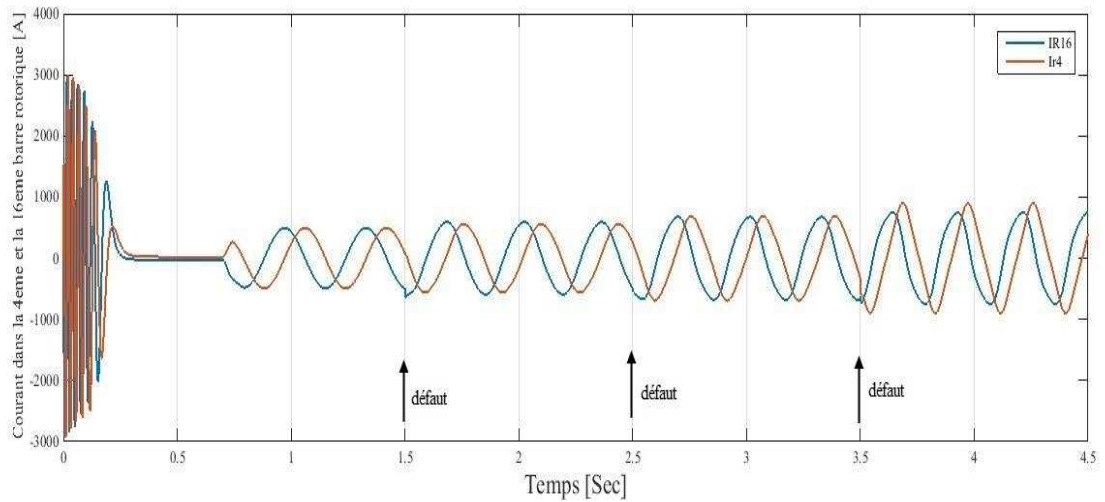


Figure 3.39. Courant dans les barres rotoriques.

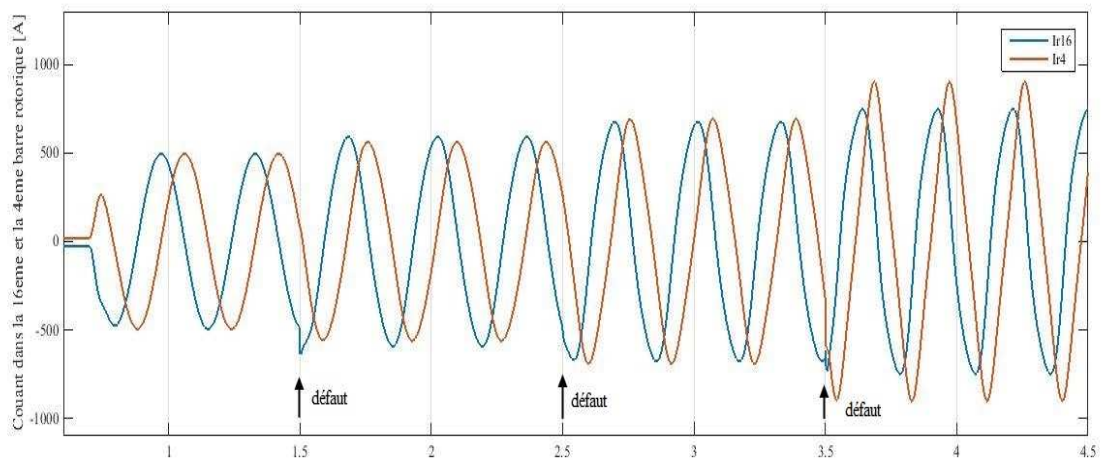


Figure 3.40. Zoom du courant dans les barres rotoriques.

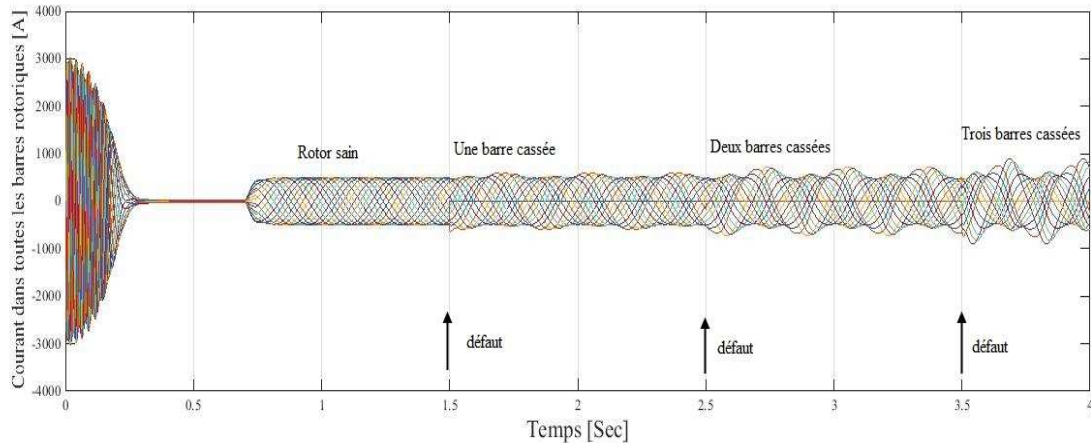


Figure 3.41. Courant dans toutes les barres rotoriques.

3.5 Interprétation des résultats

Les figures (3.3) jusqu'à (3.41) montrent l'évolution du courant statorique, du couple électromagnétique et de la vitesse de rotation, ainsi que du courant dans les barres, en charge et lors de du défaut.

Le démarrage s'effectue à vide sous tension nominale avec une alimentation triphasée sinusoïdale équilibré, à l'instant $t=0.7s$ la machine été soumise à un couple résistance nominale $Cr=3.5Nm$, le couple électromagnétique vient équilibrer le couple résistance, la vitesse chute alors à la valeur de $2830tr/m$, le courant augmente et atteint la valeur de 520 A.

A l'instant $t=2s$, nous simulons la rupture de la première barre, voir la Figure (3.9), en augmentant sa résistance de 200fois.

Lors d'une rupture de barre, le rotor crée en plus du champ direct (g_{w_s}) et un champ rotorique inverse ($-g_{w_s}$). L'interaction de ces champs avec celui issu du bobinage statorique donne naissance à un couple électromagnétique qui est la somme d'une composante constante et d'une composante inverse sinusoïdale de pulsation ($2g_{w_s}$), figure (3.4), cette dernière sera la cause d'oscillations sur la vitesse figure (3.3).

Nous simulons la rupture de deux barres adjacente, voir les figure (3.12) jusqu'à (3.20), pour montrer l'influence du nombre de barres cassées. Le courant dans ces barres s'annule fortement, voir figure (3.18) et entraîne une surintensité dans les barres voisines figure (3.19) et (3.20). Le courant qui parcourait la barre cassée est alors réparti dans les barres voisines, ce traduit sur le couple et la vitesse par une augmentation de l'amplitude des ondulations, voir les figures (3.12) et (3.13). Nous remarquons également l'augmentation de l'amplitude des ondulations du courant statorique, figure (3.14) jusqu'à la figure (3.17).

Dans le cas de rupture de deux barres opposées et de trois barres simultanément, voir les figures (3.26), (3.27) et (3.28). On obtient le même comportement dans la machine avec augmentation des amplitudes des surintensités des barres voisines, voir les figures (3.27), (3.28), (3.29), (3.30), (3.39) et (3.40), ainsi que l'augmentation des amplitudes des ondulations de la vitesse et du couple, voir les figures (3.21), (3.22), (3.31), (3.32) et (3.33), plus une augmentation d'amplitudes des courants statoriques pour chaque cassure de barre, voir les figures (3.23), (3.24), (3.25), (3.34), (3.35) et (3.36) qui cause la détérioration des performances de la machine plus rapidement, comme le montre la figure des courants rotoriques, figure (3.41).

3.6 Cassure d'un segment d'anneau de court-circuit

Les défauts qui peuvent apparaître au niveau des segments d'anneau de court-circuit ont souvent les mêmes origines que celle 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 elle aussi identique à l'approche utilisée pour la simulation d'une barre rotorique défaillante. La simulation d'une rupture d'un segment d'anneau de court-circuit s'effectue en augmentant la valeur de sa résistance de telle sorte que le courant le traversant soit le plus proche possible de zéro en régime permanent. Le circuit électrique rotorique est donc modifié lors de l'apparition d'un tel défaut et prend la forme donnée à la figure 3.42.

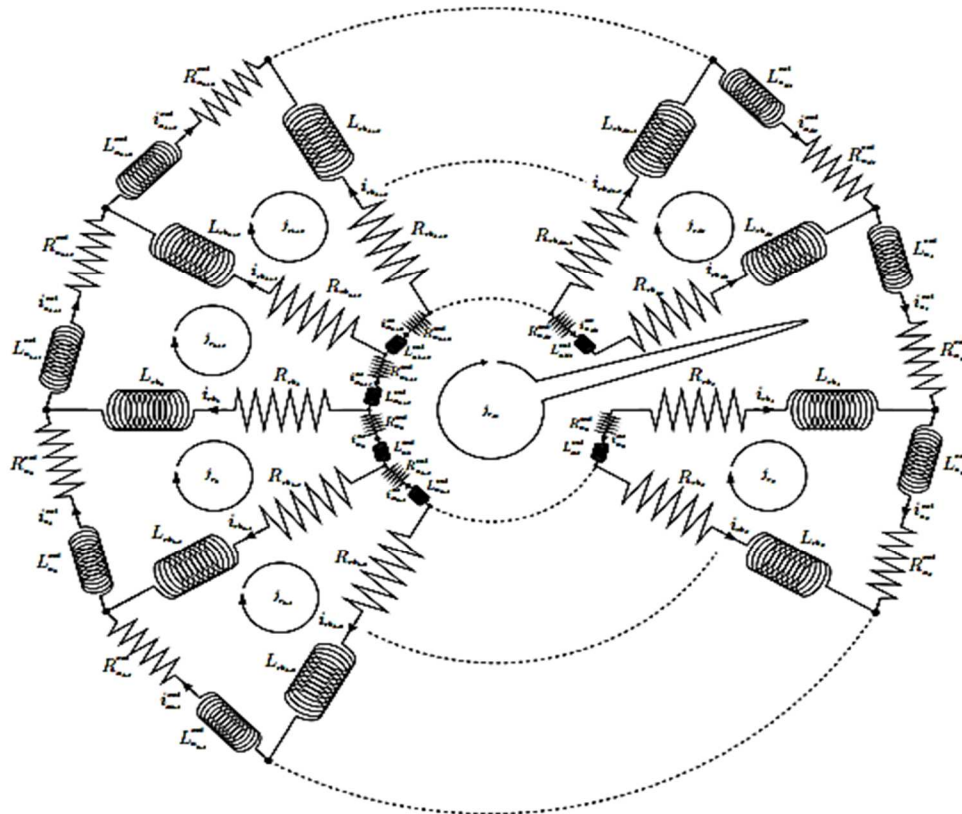


Figure 3.42. Schéma équivalent de la cage rotorique avec un segment d'anneau cassé, [1].

3.7 Représentation d'état du model de défaut

Le modèle d'état à étudier dans ce cas est aussi le même que celui utilisé pour le cas de la machine en régime sain, avec la matrice résistances rotoriques est définie comme suit :

$$[R_r] = \begin{bmatrix} 2(R_b + R_e) & -R_b & 0 & 0 & \dots & \cdot & -R_b & -R_e \\ -R_b & 2(R_b + R_e) & -R_b & 0 & \dots & \cdot & 0 & -R_e \\ \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \dots & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \dots & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & 2(R_b + \beta R_e) & \dots & \dots & \cdot & \cdot & -\beta R_e \\ \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \dots & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \dots & \cdot & \cdot & \cdot \\ -R_b & 0 & \cdot & \dots & \dots & -R_b & 2(R_b + R_e) & -R_e \\ -R_e & -R_e & -\beta R_e & \dots & \dots & \cdot & -R_e & ((N_r - 1)R_e + \beta_r R_e) \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

β est le coefficient d'augmentation de l'anneau incriminé.

3.8 Résultats de la simulation

3.8.1 Cas de cassure d'un segment d'anneau (anneau N°3) à t=2s

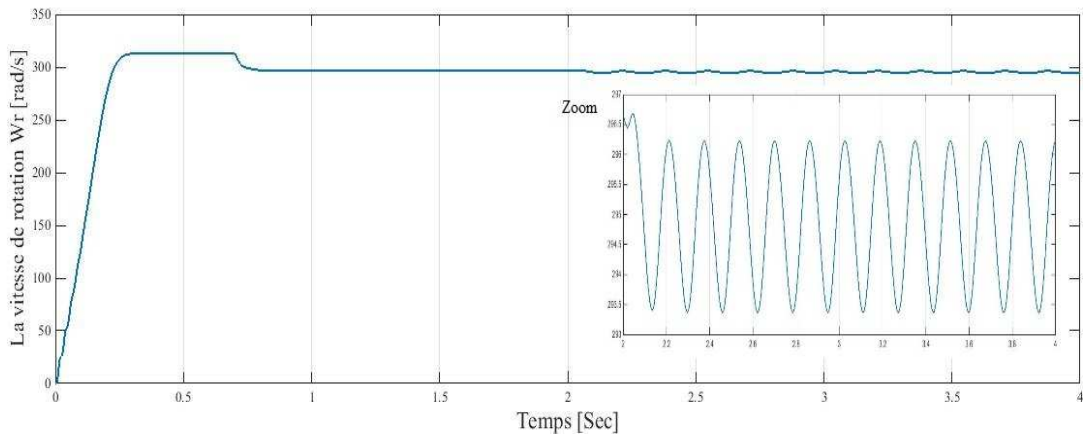


Figure 3.43. La vitesse de rotation.

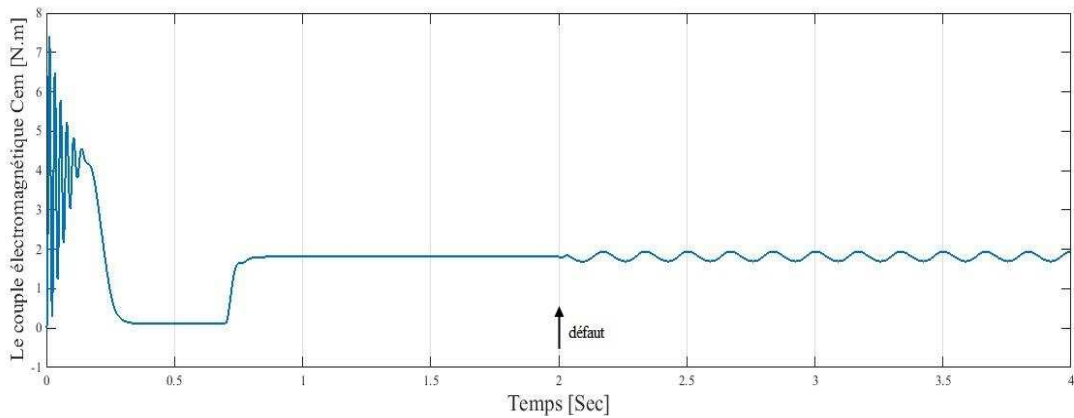


Figure 3.44. Le couple électromagnétique.

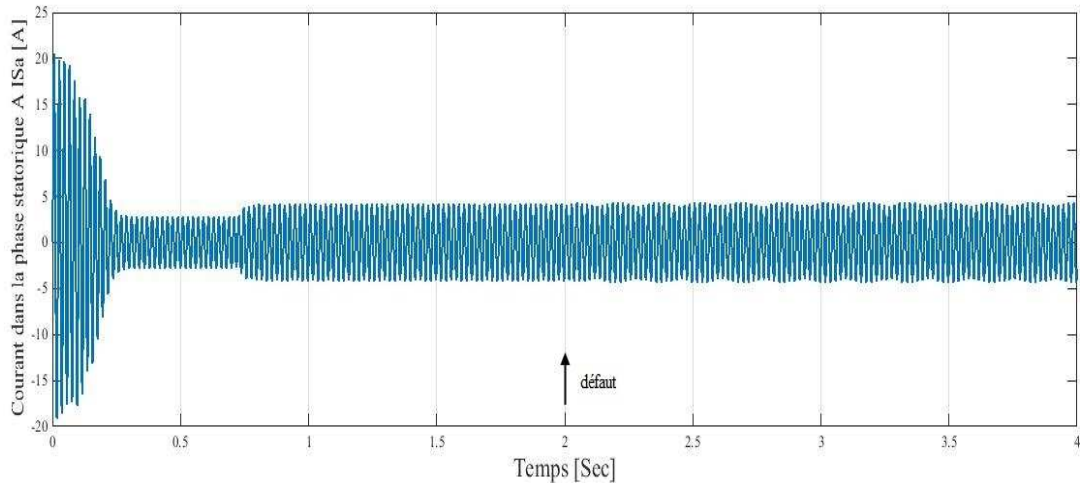


Figure 3.45. Courant dans la phase statorique A.

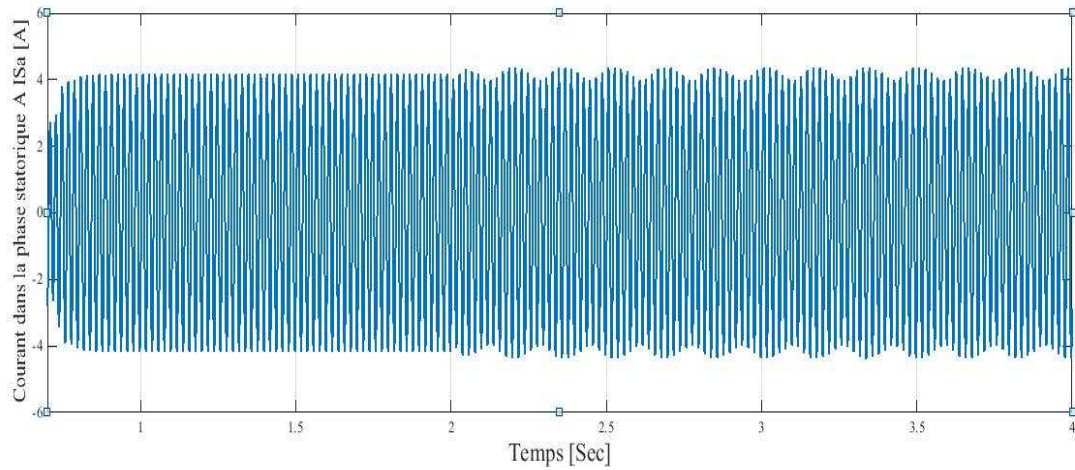


Figure 3.46. Zoom du courant dans la phase statorique A.

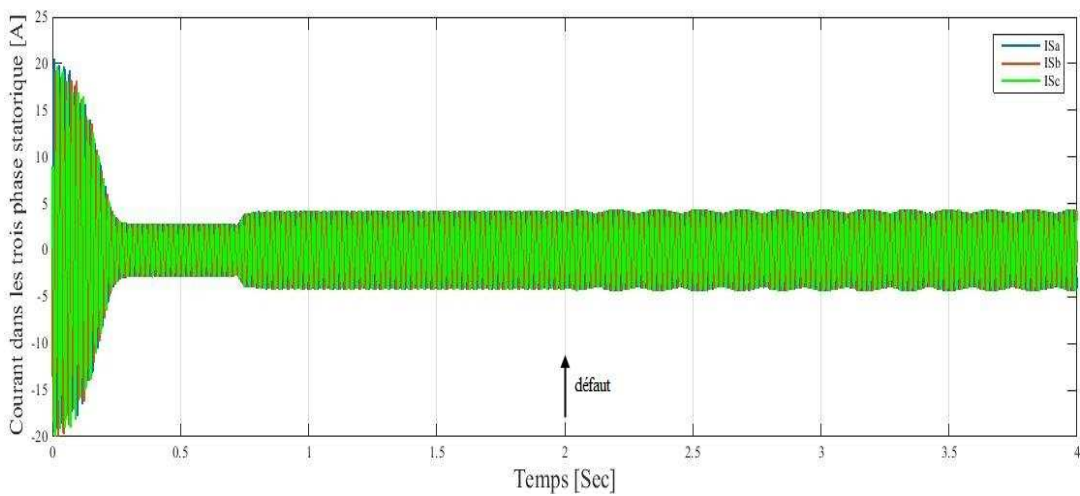


Figure 3.47. Courant dans les trois phases statoriques.

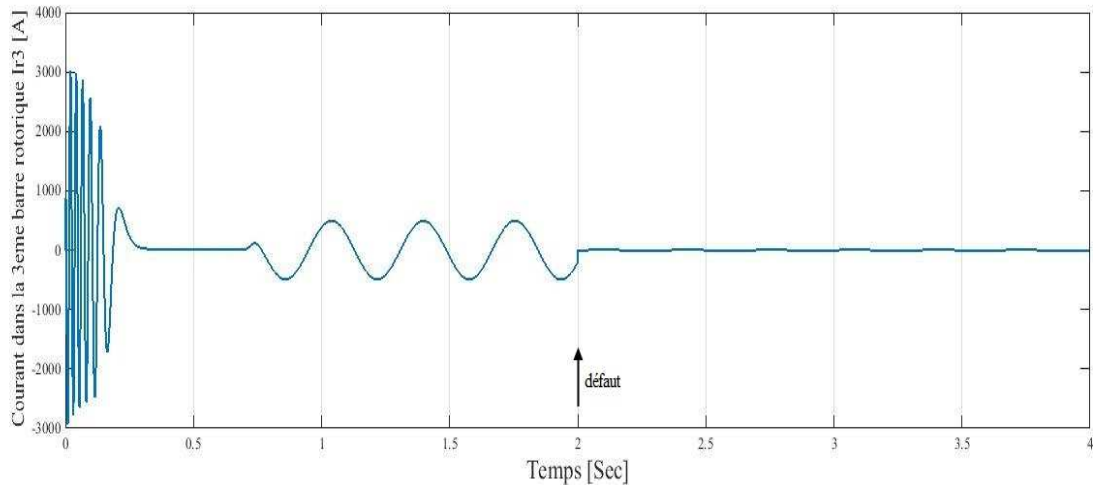


Figure 3.48. Courant dans la 3^{ème} barre rotorique.

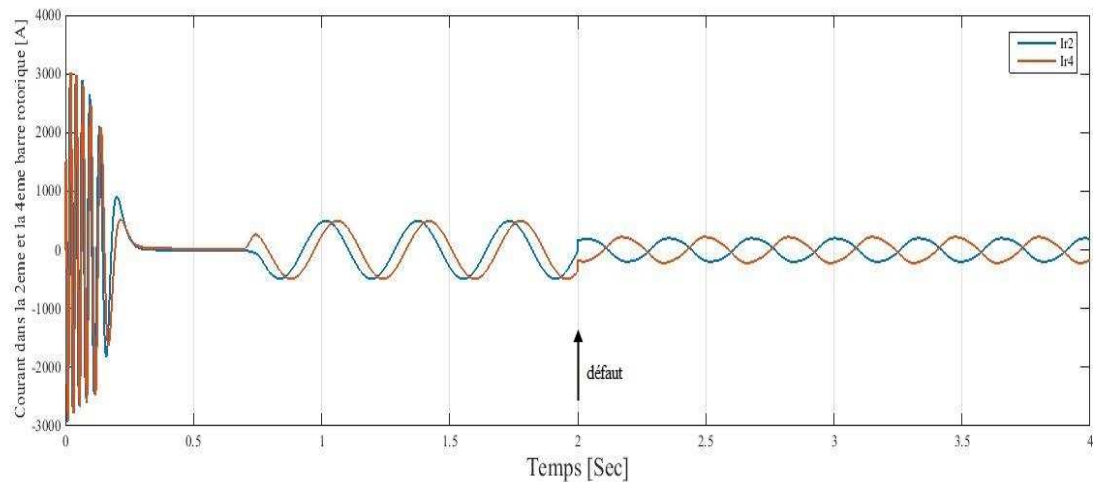


Figure 3.49. Courant dans les barres rotoriques.

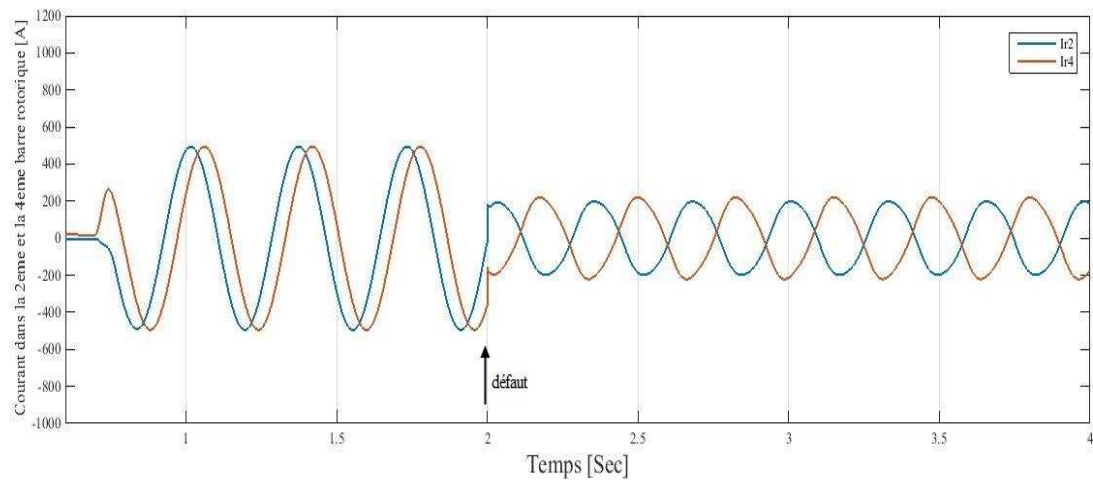


Figure 3.50. Zoom du courant dans les barres rotoriques.

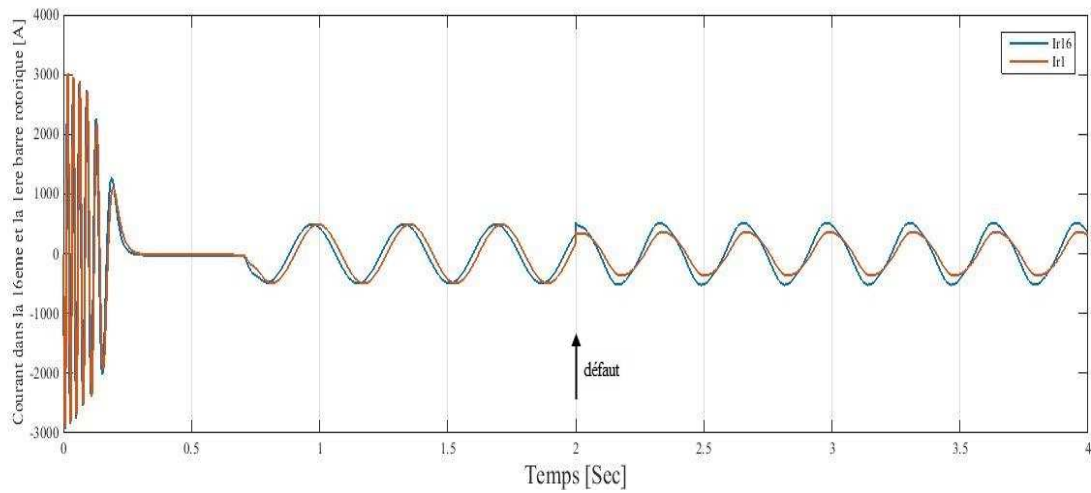


Figure 3.51. Courant dans les barres rotoriques.

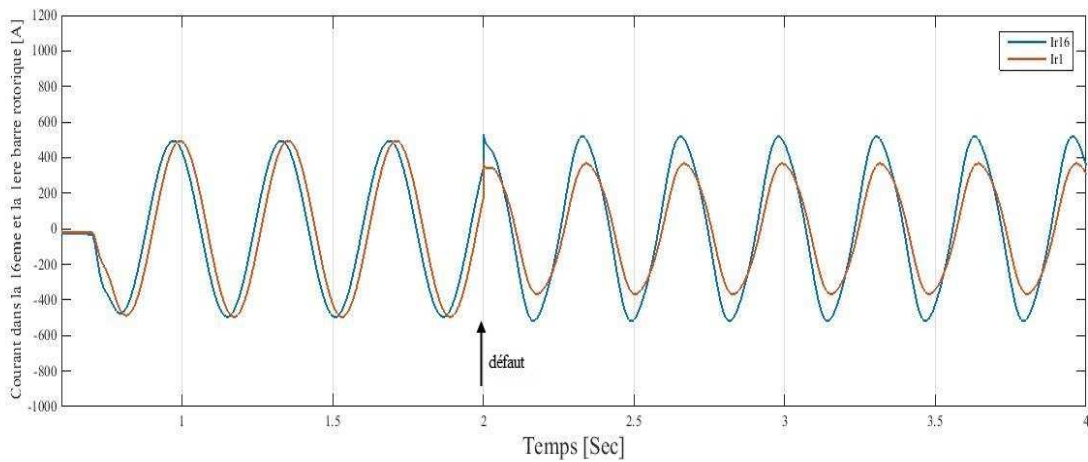


Figure 3.52. Zoom du courant dans les barres rotoriques.

3.8.2 Cas de cassure d'une barre rotorique à $t=2s$ et d'un segment d'anneau à $t=3s$

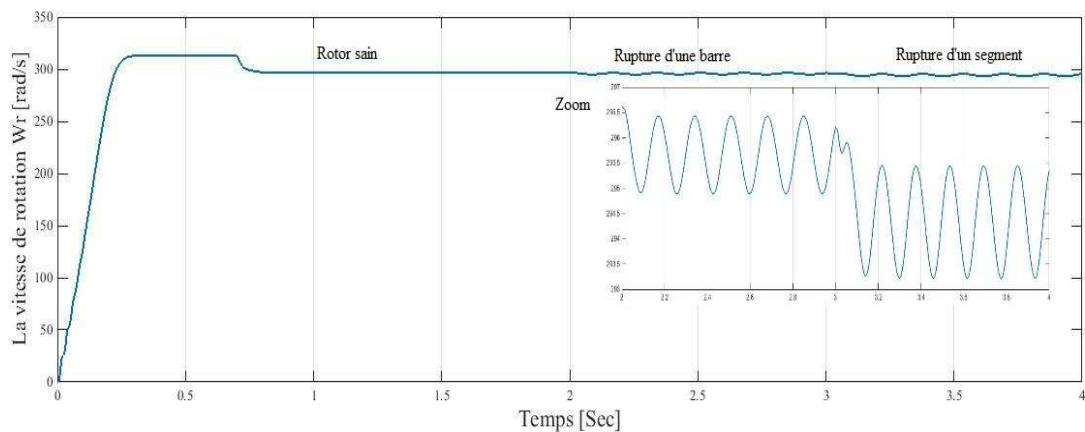


Figure 3.53. La vitesse de rotation

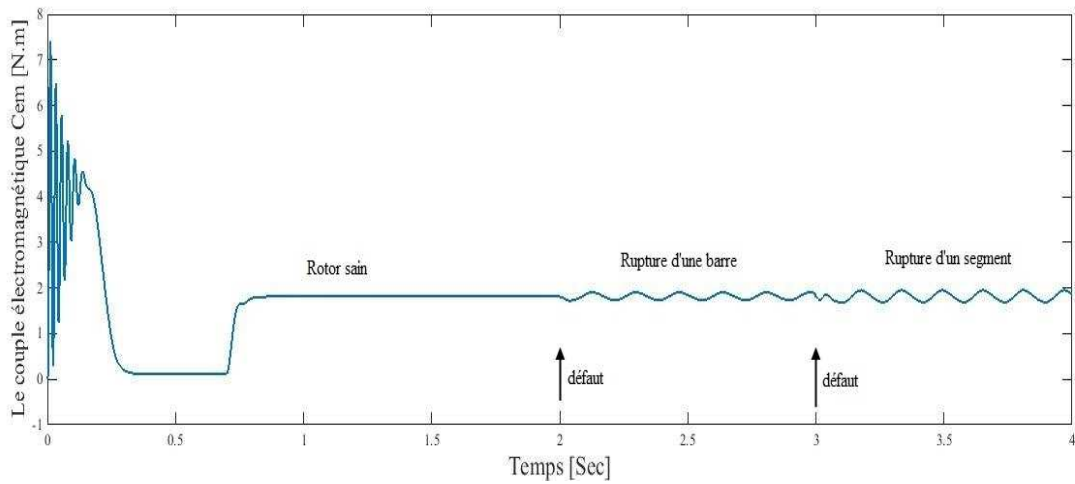


Figure 3.54. Le couple électromagnétique.

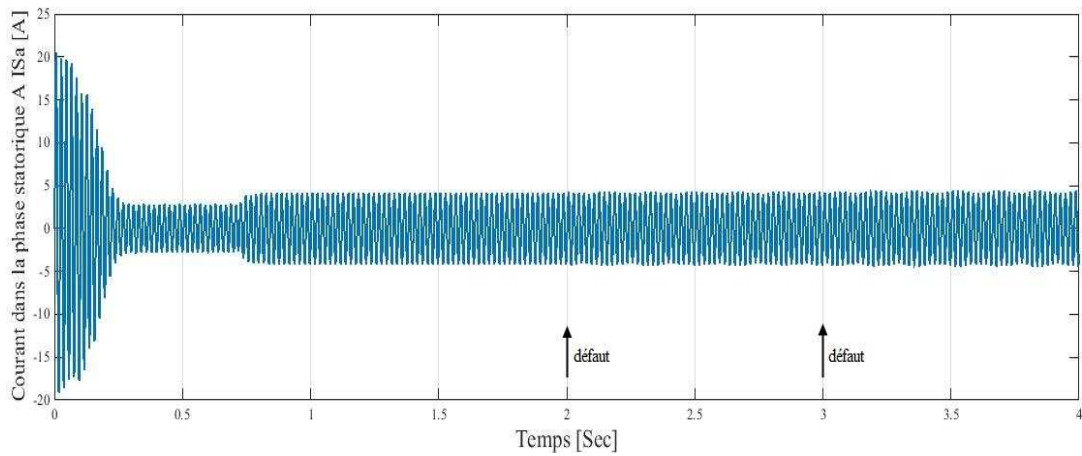


Figure 3.55. Courant dans la phase statorique A.

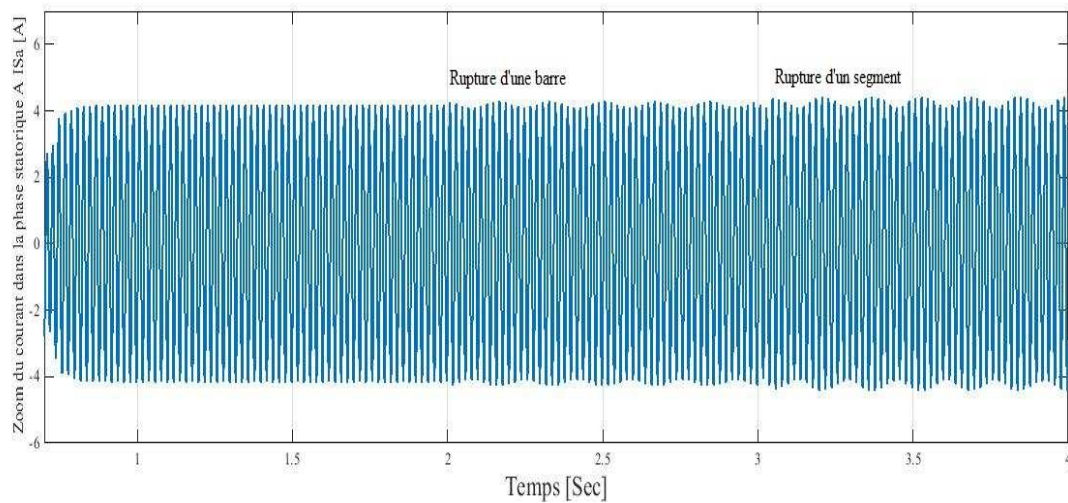


Figure 3.56. Zoom du courant dans la phase statorique A.

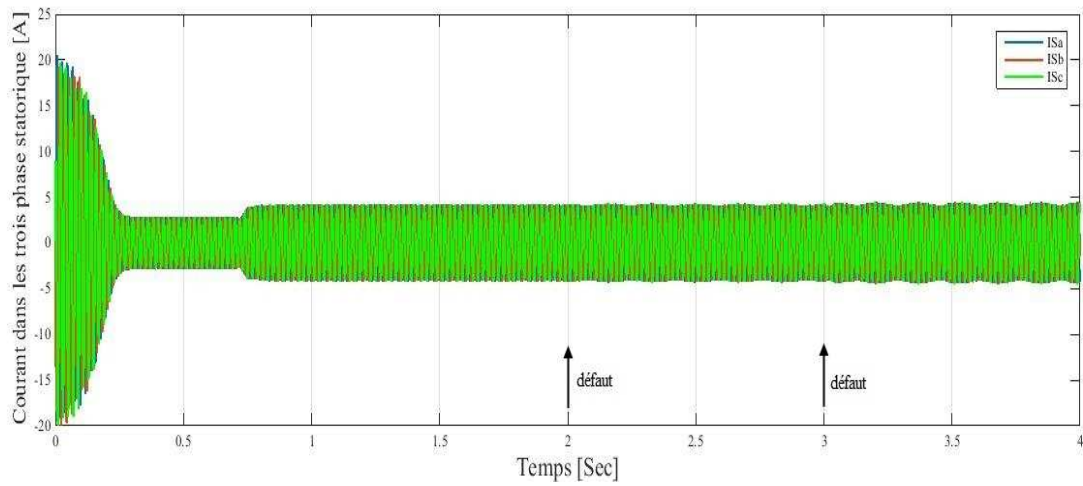


Figure 3.57. Courant dans les trois phases statoriques.

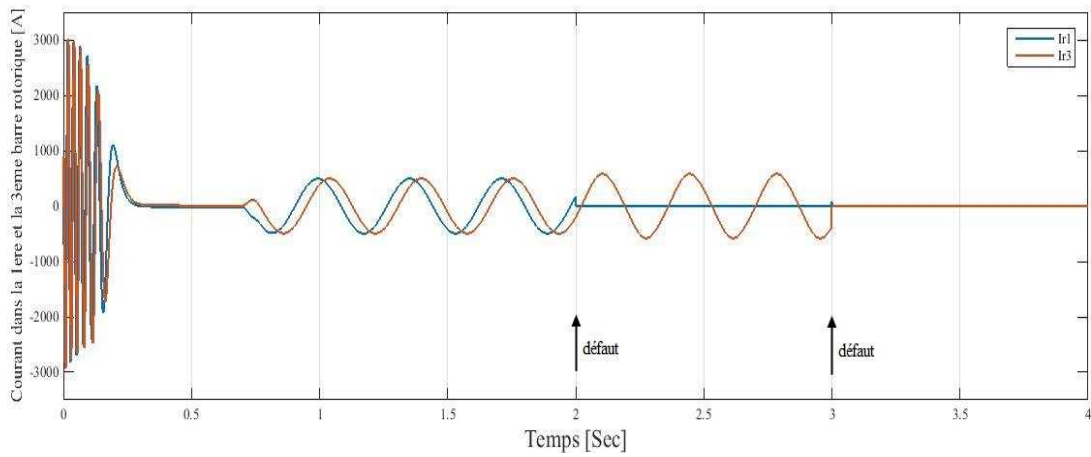


Figure 3.58. Courant dans la 1^{ère} et la 3^{ème} barre rotorique.

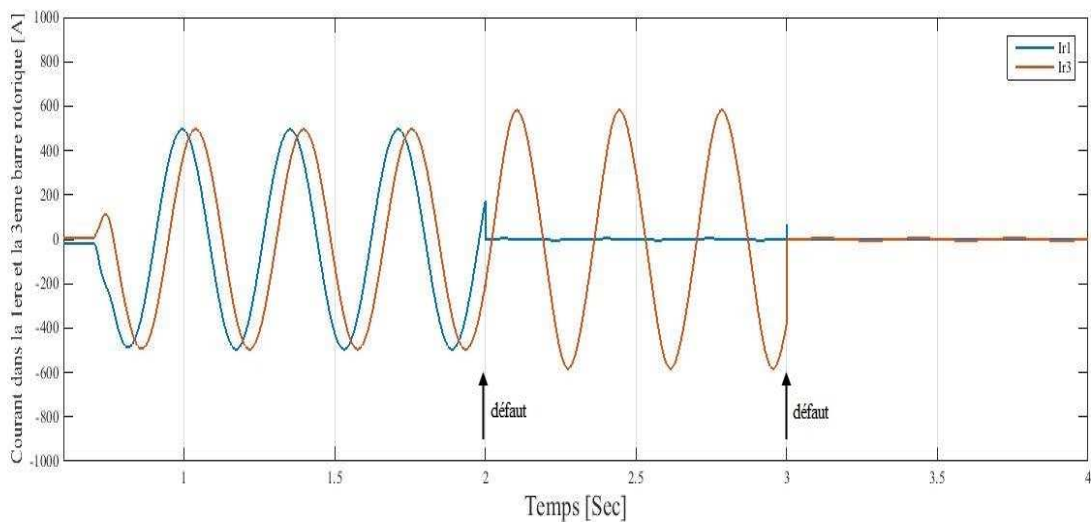


Figure 3.59. Zoom du courant dans la 1^{ère} et la 3^{ème} barre rotorique.

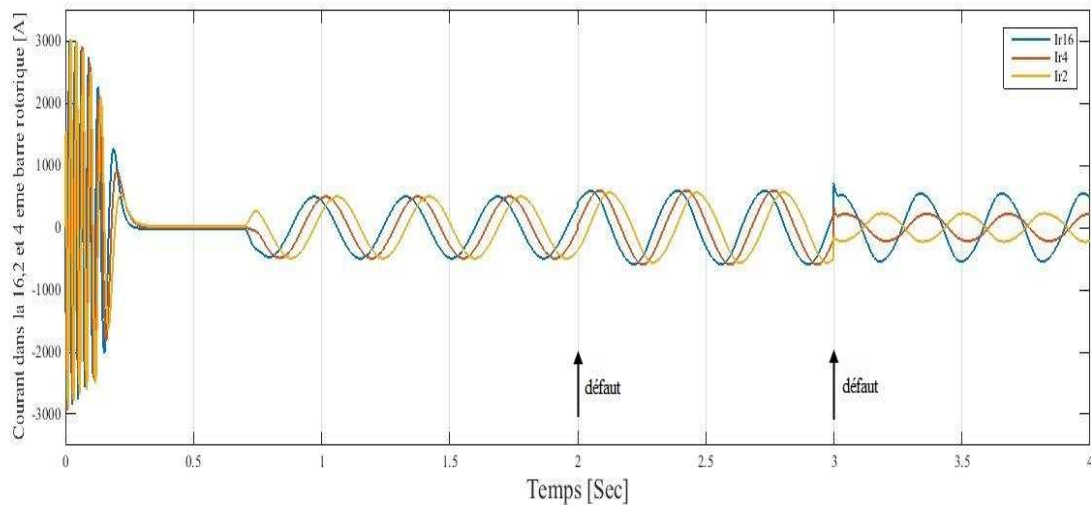


Figure 3.60. Courant dans les barres rotoriques.

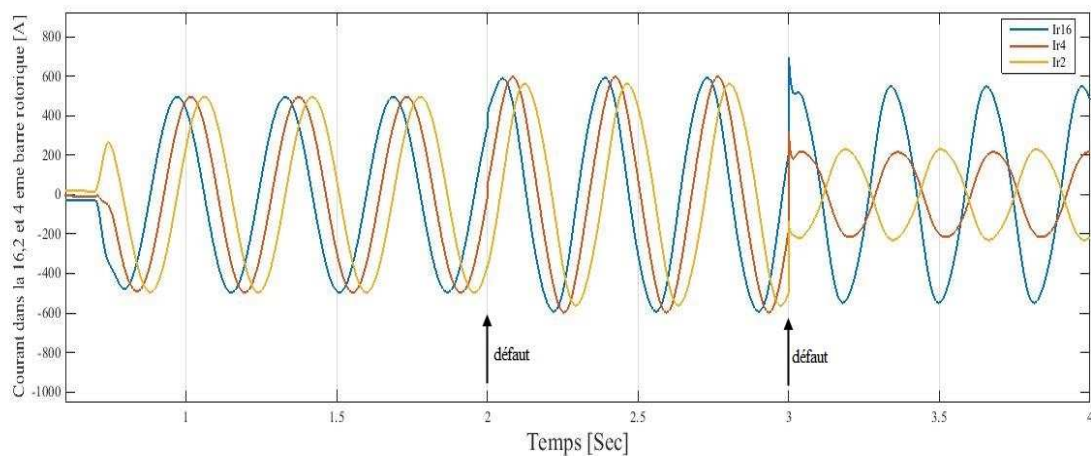


Figure 3.61. Zoom du courant dans les barres rotoriques.

3.9 Interprétation des résultats

Les figures (3.43) jusqu'à (3.61) montrent le comportement de la machine asynchrone à cage d'écureuil suite à la cassure d'un anneau de court-circuit, et la cassure mixte d'une barre et d'un segment d'anneau.

On remarque que la machine asynchrone après application du défaut de cassure du segment à $t=2s$, voir figure (3.48). Subit un fort déséquilibre comme le montre la figure de la vitesse et du couple électromagnétique, voir les figures (3.43), et (3.44). Contrairement aux cassures de barres le cas de cassure du segment induit une diminution d'amplitude de ces courants, voir les figures (3.49), (3.50) et (3.51). D'autres part, les figures du courant statorique (3.45), (3.46) et (3.47), montrent également l'augmentation de l'amplitude des ondulations suite à l'effet du défaut.

La succession de défaut de rupture de barre rotorique, à $t=2s$ et le défaut de cassure du segment d'anneau de court-circuit, à $t=3s$. Nous dévoile le comportement de la machine suite à ces de défauts, est traduit par l'augmentation des amplitudes des ondulations pour les déférents grandeurs, vitesse de rotation, couple électromagnétique, courant dans les barres au voisinage du segment et courant statorique dans les trois phases, comme nous le montre les figures (3.53) jusqu'à (3.61).

3.10 Analyse spectral du courant statorique

Nous avons pu, grâce à ce chapitre, de déterminer quelles étaient les composantes spectrales les plus significatives pour la détection d'une ou plusieurs barres rotoriques cassées. Les méthodes qui utilisent l'estimation de la densité spectrale de puissance sont à ce jour les méthodes les plus connues et les plus utilisées pour diagnostiquer la présence ou non d'un défaut au niveau de la cage d'écureuil de la machine asynchrone. Plus précisément, c'est la représentation dans le domaine fréquentiel du courant absorbé qui est la plus utilisée car elle ne nécessite, pour son analyse, qu'une instrumentation simple et peut onéreuse.

De plus, le transfert de ce type de signal se fait le plus souvent sans modifier l'installation dans laquelle la machine asynchrone opère.

Lors de la rupture de barre, il est difficile d'analyser directement le courant statorique. Ce dernier ne présente en effet qu'une faible modulation.

L'analyse par FFT permet de mettre en évidence les raies présentes dans le spectre du signal. Nous présentons les résultats de simulation de l'analyse du courants statorique I_{sa} par FFT en régime permanent et en charge.

3.10.1 Résultats de la simulation

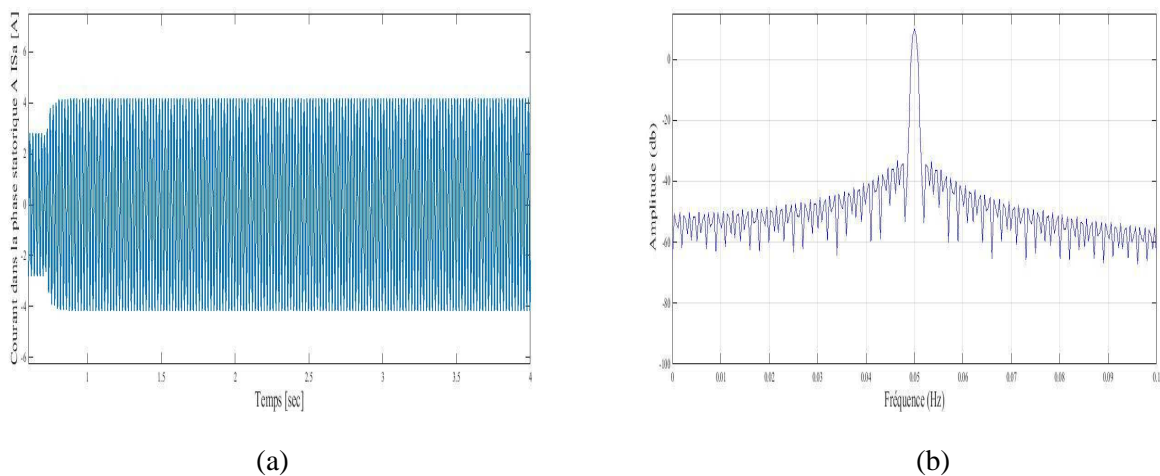
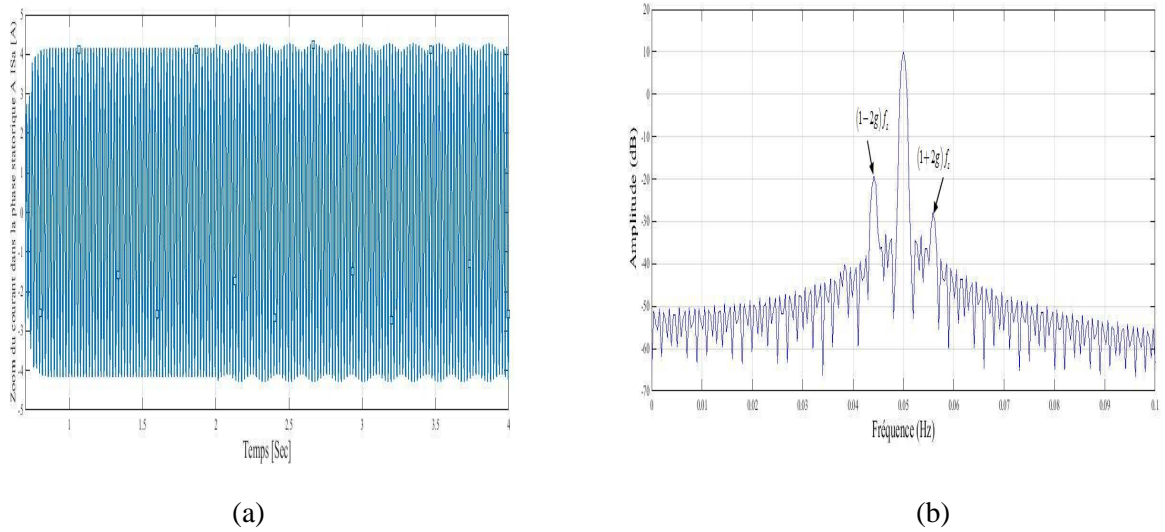
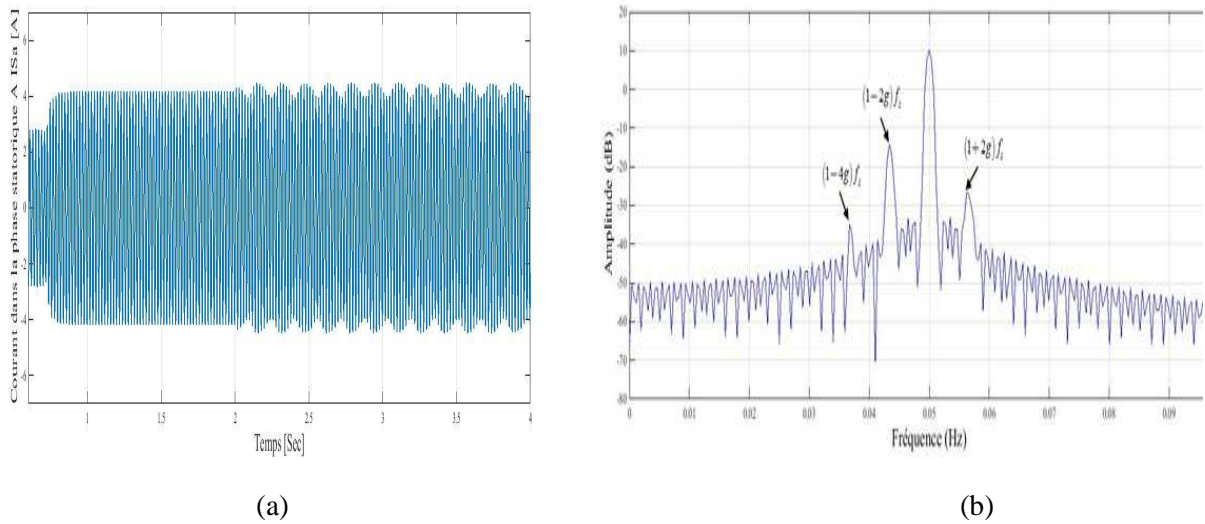


Figure 3.62. Spectre de la FFT du courant statorique à l'état sain.

Figure 3.63. Spectre de la FFT du courant statorique I_{s_a} en présence d'une cassure de barre.Figure 3.64. Spectre de la FFT du courant statorique I_{s_a} en présence de cassure de trois barres.

3.10.2 Interprétation des résultats

Les figure (3.62), (3.63) et (3.64) mettent en évidence l'allure du spectre fréquentielle du courant statorique I_{s_a} de la machine asynchrone à cage d'écureuil, en charge à l'état sain et en présence de défaut de cassure de barres rotoriques.

La figure (3.63) nous montre une apparition des raie au voisinage de la fréquence fondamentale $f_s = 50\text{Hz}$, dont les fréquences est égal à (44Hz) et (56Hz), avec des amplitudes qui atteignent les valeurs de -24,8 db et -31,6db.

La figure (3.64), montre le spectre du courant dans le cas de trois barres cassées. On remarque l'augmentation d'amplitudes des raies $(1+2g)f_s$, $(1-2g)f_s$, et une apparition d'une nouvelle raie à $(1-4g)f_s$.

Conclusion

L'étude effectuée dans cette partie, nous a permis de mettre en évidence un modèle de la machine asynchrone à cage d'écureuil en présence de défaut. Le modèle utilisé permet de simuler pratiquement tous les défauts envisageables dans les circuits rotoriques. Dans un premier temps, nous avons étudié la rupture des barres rotoriques, et ses influences sur le comportement de la machine. Nous avons ensuite décrit brièvement le modèle d'un rotor à cage avec une rupture de portions d'anneaux de court-circuit. Les conséquences de ces défauts s'obtiennent en augmentant la résistance de la barre incriminée (ou la résistance de la portion d'anneau considérée). Les résultats de simulation montrent que la rupture de barre ou de portion d'anneau au rotor cause des oscillations dans les courants statoriques qui induisent des ondulations dans le couple électromagnétique, qui elles même provoquent des oscillations de la vitesse de rotation de la machine, engendrant ainsi des vibrations mécaniques.

Les courants dans les barres du rotor sont les premiers à être affectés par le défaut. Les courants dans les barres adjacentes aux barres cassées atteignent des valeurs très importantes et peuvent dépasser le double du courant des autres barres, ce qui cause un échauffement excessif et engendre la cassure de ces barres. Ces résultats sont en très bonne conformité avec ceux trouvés par d'autres travaux.

Conclusion générale

Conclusion Générale

Ce mémoire se situe dans le contexte du diagnostic des machines asynchrones, thème actuellement d'actualité en vue de diagnostiquer au mieux les défauts qui peuvent affecter la machine durant sa période de fonctionnement. L'ampleur des pannes survenant dans les machines impose de manière impérative l'élaboration d'un système de diagnostic fiable et efficace.

Le travail présenté dans ce mémoire a traité donc le diagnostic des défauts rotoriques pouvant survenir au sein des machines asynchrones. Ce domaine très vaste, ouvre de larges perspectives pour ces différents types de machine. L'étude des défauts a un double objectif :

- ✓ comprendre leur genèse de manière à prévoir leur gravité et leur développement.
- ✓ Analyser leur impact sur le comportement de la machine et en déduire les signatures permettant, à posteriori, de remonter jusqu'à la cause de la défaillance. Il est donc important de développer des outils de diagnostic pour détecter de manière précoce ces défauts.

L'objectif est avant tout de posséder un modèle de la machine asynchrone qui met en évidence l'influence des défauts sur les grandeurs mesurables de la machine, principalement les courants, afin d'étudier les phénomènes mis en jeu en utilisant une approche dite méthode des Circuits Electriques Magnétiquement couplés (*CEMC*), consiste à modéliser le rotor de la machine par des mailles reliées entre elles électriquement et couplées magnétiquement, c'est à cette dernière que nous nous sommes intéressée afin de disposer d'un modèle mathématique où les paramètres mesurables apparaissent explicitement et ne nécessitent pas d'outils de calcul complexes. Les défauts étudiés sont le court-circuit, et la rupture de barres et d'anneaux de circuit-circuit.

Pour aborder cette étude, nous avons établi un état de l'art sur la constitution de la machine asynchrone en mettant l'accent sur les possibilités d'apparition des défauts tant au stator qu'au rotor ainsi que les divers outils utilisés pour la détection et le diagnostic des défauts et les différents types de maintenance. Nous nous sommes intéressés ensuite à la présentation d'un modèle réel de la machine asynchrone à cage d'écureuil, en développant les différentes équations régissant le fonctionnement de la machine, une représentation d'état est alors obtenue dont la résolution permet de retrouver l'évolution de toutes les grandeurs de la machine. Un programme écrit sous *MATLAB* nous a permis de valider ce modèle.

Conclusion générale

Finally, we have finished our work with a study of the machine in the presence of a fault on the rotor through the use of models of bar and ring breakage and short-circuit of the machine. The implementation of the fault model is considered simple taking into account the imbalance of the rotor resistance matrix in the fault situation. We have established that during the rupture of a bar or a portion of a ring on the rotor, the adjacent bars are the most stressed. Oscillations appear on the electromagnetic torque and on the absorbed currents. The effect of bar and ring breakage and short-circuit, increases the amplitudes of the currents in the three statoric phases and in the rotor electrical circuit.

The simulation results of the two models are convincing because they agree with those published in several works.

Annexe

1.1 Caractéristiques nominales

Puissance nominale	$P_a = 1,1Kw$
Tension nominale	220V / 380V
Courant nominal	$I_a = 4,5A / 2,6A$
Vitesse nominale	$\Omega_n = 2850tr / mn$
Nombre pairs de pôles	$p = 1$

1.2 Paramètres de la machine

Les paramètres de la machine à cage d'écureuil utilisée pour la simulation présentée dans le mémoire sont donnés dans le tableau suivant : **Tableau 1.2.** Paramètres de simulation de la machine asynchrone à cage d'écureuil.

Symbole	Valeur	Désignation
μ_0	$4\pi * 10^{-7}$	Perméabilité du vide
f	50Hz	Fréquence d'alimentation
w_s	$2\pi f$	Pulsation de l'alimentation
V_m	280v	Tension composée de l'alimentation
r_s	7.828 Ω	Résistance d'une phase de l'enroulement au stator
f_v	$0.725 * 10^{-3}$	Coefficient de frottement
J_t	$0.6093 * 10^{-2}$	Moment d'inertie des masses tournantes
$long_mot$	$65 * 10^{-3}m$	Longueur effective de la machine
e	$0.5 * 10^{-3}m$	Epaisseur de l'entrefer
R_{moy}	$37,75 * 10^{-3}m$	Diamètre moyen de l'alésage
nb_phase	3	Nombre de phases du stator
nb_barre	16	Nombre de barres de la cage
N_s	22	Nombre d'encoches au stator
N_{sw}	160	Nombre de conducteurs par encoche au stator
N_{rw}	1	Nombre de conducteurs par encoche au rotor
$alpha_sta$	1	Angle d'inclinaison des encoches au stator
$delta$	1	Facteur de raccourcissement
m_e	$N_s / ((2 * p) * nb_phase)$	Nombre d'encoche/pôle/phase
$alfa$	$(2 * p) / (nb_barre)$	Angle électrique entre deux barres rotoriques
l_s	0.018H	L'inductance propre d'un enroulement au stator
R_b	$150 * 10^{-6}\Omega$	Résistance d'un enroulement au rotor
R_e	$(72 * 10^{-6}) / (nb_barre)\Omega$	Résistance d'un enroulement anneau de court-circuit

Bibliographie

- [1] G. Didier, "Modélisation et diagnostic de la machine asynchrone en présence de défaillances", Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy-I, France, 2004.
- [2] A. khezzar, M.E.K.Oumaamar, A.Lebaroud and M.Boucherma, "Novel study of induction motors with broken bar faults", Electrical laboratory of Constantine "LEC", Department of Electrical Engineering, Mentouri University, 25000, Constantine, Algeria.
- [3] G.houdouin, G. Barakat, B.Dakyo, E.Destobbeleer and C.Nichita, "A coupled magnetic circuit based global method for the simulation of cage induction machines under rotor and stator faults.", *Electrimacs 2002*, August 18-21
- [4] Ab. Bouguerne, "Diagnostic automatique des défauts des moteurs asynchrone", Thèse Magister, Université MENTOURI de Constantine.
- [5] B. Fatma, "Contribution à la modélisation et la commande de la machine asynchrone : application au diagnostic des défauts statorique", Thèse de doctorat, Université de Constantine 1, juin 2014.
- [6] N. Bessous, "Contribution au diagnostic des machines Asynchrone", Thèse Magister, Université MENTOURI de Constantine.
- [7] H. Cherif, "Détection des défauts statoriques et rotoriques dans la machine asynchrone en utilisant l'analyse par FFT et ondelettes", Thèse de Magister, Université Mouhamed Khider, Biskra, Septembre 2014.
- [8] "Présentation des avaries, Machines électriques tournantes", Cahier des préventions, CP2, Allianz, 1988.
- [9] O. V. Thorsen, M. Dalva, "A survey of fault on induction motors in offshore oil industry, petrochemical industry, gas terminals, and oil refineries" *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol.31, no.5, pp.1186-1196, September 1995.
- [10] B. Vaseghi, "Contribution à l'étude des machines électriques en présence de défauts entre-spires", Thèse de Doctorat, Green-Groupe de recherche en électrotechnique et électronique de Nancy, Nancy Université-Institut National Polytechnique de Lorraine, 2009.
- [11] J. S. Thomson, C. S. Kallesoe, "Stator fault modelling of induction motors", *SPEEDAM Conference*, 2006.
- [12] Adriano M. Da Silva, B.S, "Induction motor faults diagnostic and monitoring methods", thèse de Master, Milwaukee, Wisconsin, may 2006.
- [13] A. H. Bonnett. Root cause ac motor failure analysis with a focus on shaft failures. *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 36(5) :1435-1448, Sep/ Oct 2000.
- [14] J. Povinelli, F. Bangura, "Diagnostics of Eccentricities and Bar/End-Ring Connector Breakages in Polyphase Induction Motors Through a Combination of Time-Series Data Mining and Time-Stepping Coupled FE-State-Space Techniques", *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 39, NO. 4, Jul/Aug 2003.

- [15] S. Diouf, "Contribution au diagnostic industriel de défauts de roulement et de Balourd par techniques Neuronales Application à la machine asynchrone", Thèse de doctorat, Université Paris XII Val De Marine-CRETEIL, 2007.
- [16] A. Ceban, "Méthodes globale de diagnostic des machines électriques", Thèse de Doctorat, Université de Lille de Nord de France -École doctorale SPI université d'Arbois-, Laboratoire Systèmes électrotechniques et environnement, 2 février 2012.
- [17] M. Arhoujdani et W. Elmajdoub, "Détection des défauts électrique et mécaniques dans la machine asynchrone par l'analyse du courant statorique", Thèse de Licence, Université Mouhamed V-Sououssi- Ecole Normale Supérieure de l'Enseignement Technique, juin 2014.
- [18] B. Trajin, "Analyse et traitement de grandeurs électriques pour la détection et le diagnostic de défauts mécaniques dans les entraînements asynchrone", Thèse de doctorat, Université de Toulouse, Institut National Polytechnique de Toulouse, 1 décembre 2009.
- [19] A.H. Bonnett and G.C. Soukup, "Cause and analysis of stator and rotor failures in three- phase squirrel- cage induction motors", IEEE transactions Industry Applications, Vol 28, No.4, PP.921-937,1992.
- [20] Hubert Razik, "Le contenu spectral du courant absorbé par la machine asynchrone en cas de défaillance, un état de l'art", Revue 3EI, Numéros 27, Décembre 2001.
- [21] R. Casimir, "Diagnostic des Défaut des Machines Asynchrones par Reconnaissance des Formes ", Thèse de Doctorat, L'Ecole Centrale de Lyon, Décembre 2003.
- [22] H.Henao, G-A. Capolino, M. Garcia-Melero et M.F. Cabanas, "A new model of the induction motor rotor cage for diagnostics", IEEE SDEMPED 1999- Symposium on Diagnostics for Electric Machines, power Electronics and drives, PP 383-388, Espagne, Septembre 1999 Gijon.
- [23] A. Ghoggal, "Diagnostic de la machine asynchrone triphasée : Modèle dédiée à la détection des défauts", Thèse de Magister, Université de Batna, Mai 2005.
- [24] B. Mustafa, "Réalisation d'un banc d'essai destiné au diagnostic des défauts d'excentricité", Thèse de Magister, Université Mouhamed Boudiaf- Oran, 2012.
- [25] A. Thomas, "Complex vector model of squirrel cage induction machine including instantaneous rotor bar currents", IEEE Transaction on Industry application, 1998.
- [26] G.B. Kilman, R.A Koegl, J. Stein, R.D Endicott, and M.W Madden, "Noninvasive detection of broken rotor bar in operating induction motor", IEEE Transaction on Energy Conversion, Vol.3, No.4, pp.873-879, Dec 1988.
- [27] W.T Thorson, and I.D Stewart, "On-line current monitoring for fault diagnosis in inverter fed induction motor", In Prodc. Inst. Elect. Engy, 3rd International Conference Power Electronics drives, London, UK, pp.432-435, 1988.
- [28] N.M. Elkasabgy, A.R Eastham, and G.E Danson, "Detection of broken bars in the cage rotor on an induction machine", IEEE Transaction on Industry Application, Vol.22, No.6, pp.165-171, Jan/Feb 1992

- [29] F. Filippetti, G. Franceshini, C. TASSONI, and P. Vas, "AI Technique in induction machines diagnosis including the speed ripple effect", In Proc, IEEE Industry App Soc, Annual Meeting Conf., San Diago, CA, pp.655-661, Oct 6-10, 1996
- [30] G. Didier, E. Ternisien, O. Caspary, and H. Razik, "Fault detection of broken rotor bars in induction motor using a global fault index", IEEE ON Industry Application, Vol.42, No.1, Jan/Feb 2006.
- [31] F. Filippetti, G. Franceshini, C. Tassoni, and P. Vas, "AI Technique in induction machines diagnosis including the speed ripple effect", IEEE ON Industry Application, Vol.34, No.1, Jan/Feb 1998.
- [32] F. Filippetti, G. Franceshini, C. Tassoni, "Broken bar detection in induction machines; comparison between current spectrum approach and parameter estimation approach", IEEE ON Industry Conf, Vol.1, Denver, USA, Oct 1994.
- [33] H.A Toliyat, and T.A Lipo, "Transient analysis of cage induction machine under stator, rotor bar and end ring faults", IEEE ON Energy Conversion, Vol.10, Issue.2, Juin 1995.

Résumé

L'apparition des défauts sur le processus industriel peut engendrer des conséquences importantes et coûteuses, le diagnostic des défauts fait l'objet d'un engouement prononcé depuis les deux dernières décennies.

Les défauts électriques qui peuvent affecter la machine asynchrone à cage d'écuriel peuvent apparaître au niveau du stator qui s'exprime en court-circuit (inter-spire, entre deux phases et entre phase et la carcasse), au niveau du rotor qui s'exprime en cassure de barre et anneau de court-circuit rotorique. Les défauts mécaniques apparaissent comme défauts d'excentricité et défaut de roulement.

Plusieurs méthodes sont connues pour détecter les différents défauts, notre thèse est basée sur l'analyse spectrale du courant statorique (MCSA), pour y arriver, il faut d'abord modéliser le moteur asynchrone à cage, qu'on a choisi la méthode des circuits électriques magnétiquement couplés. L'introduction des défauts rotoriques (cassure de barre et anneau de court-circuit) sur le modèle de la machine se réalise en jouant sur sa matrice des résistances (augmentation de la valeur de la résistance de la barre affecté ou portion d'anneau de court- circuit).

Abstract

The appearance of defects in the manufacturing process can cause significant and costly consequences, fault diagnosis been a pronounced enthusiasm for the past two decades.

Electrical faults that can affect the induction motor squirrel cage may occur in the stator which is expressed in short circuit (inter-winding between two phases and between phase and carcass) in the rotor that s is expressed in bar breakage and rotor short-circuit ring. Mechanical defects appear as eccentricity defects and bearing fault.

Several methods are known for detecting different defects, our thesis is based on the spectral analysis of the stator current (MCSA), to get there, we must first model the induction motor cage, we chose the method electrical magnetically coupled circuits. The introduction of defects rotor (bar breakage and short-circuit ring) on the model of the machine is realized by varying the matrix of resistors (increase in resistance value of the affected bar or ring portion of short circuit).