



UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA

*Faculté des nouvelles technologies de l'information et
de télécommunications*

Département d'électronique et de télécommunication

Mémoire

MASTER ACADEMIQUE/PROFESSIONNLE

Spécialité Instrumentation industrielle Présenté Par :

HAMADA Mouslim

MABEDI Mohammed Aimen

MEDJOU DJ Mohammed Seddike

Thème

Modélisation de la machine Asynchrone en présence des défauts

Devant le jury :

M. DJALAL Abdessemed
Mme. SOURI Samira
M. KADRI Farid

Président
Encadreur/rapporteur
Examineur

UKM Ouargla
UKM Ouargla
UKM Ouargla

Année Universitaire : 2019/2020

Résumé :

Ce travail s'inscrit dans la thématique du diagnostic des défauts de la machine asynchrone à cage d'écureuil en présence des défauts de types :

- Les anneaux de court-circuit
- Rupture des barres rotorique

Fais une modélisation de défaut avec une simulation de moteur (à vide, en charge, en présence des défauts)

La thématique du diagnostic de défaut se base sur l'application de technique de traitement de signal qui est une solution efficace pour le problème de diagnostic des défauts qui est base sur l'analyse spectrale du courant statorique (FFT)

Mots clés : Machine asynchrone, défaut rotorique, cassure des barres, les anneaux de court-circuit, modélisation, simulation, diagnostic, FFT.

Abstract:

This work fits into the theme of the monitoring and fault diagnosis of squirrel cage induction machine cage with faulty:

- short circuit rings
- broken rotor bars

Preform a defect modeling with an engine simulation (empty, in charge, in the presence of defects)

The thematic fault diagnosis is based on the application of techniques of signal processing which is an effective solution of the fault diagnosis problem based from spectral analysis of the stator current using (FFT)

Keywords: Asynchronous machine, rotor failure, broken rotor bars, short circuit, diagnosis, FFT.

ملخص :

يندرج هذا العمل حول موضوع النمذجة في المحرك اللا تزامني ثلاثي الطور نوع قفص السنجاب و تشخيص ورصد الأعطاب التالية

- حلقات قصر الدارة
- كسر أعمدة الدوار

تصميم و محاكاة لمحرك معطوب (فارغ و محمل و معطوب)

يستند موضوع تشخيص الأعطاب على طريقة لمعالجة الإشارات, هي التحليل الطيفي لتيار الجزء الثابت (FFT)

- **الكلمات المفتاحية :** الآلة الغير متزامنة ,كسر أعمدة الدوار. دارة قصيرة بين حلقات الجزء الثابت ، ، FFT ، حلقات قصر الدارة, محاكاة , تصميم.

Dédicace

Tout d'abord, je rends grâce à Allah pour toutes ses bénédictions et la grâce de la réussite.

À mon cher père, qui m'a toujours soutenu et m'a aidé à affronter les difficultés ;

À ma chère mère, pour ses sacrifices depuis qu'elle m'a mis au monde ;

À mes tantes et mes oncles.

À toute ma famille et tous ceux que j'aime.

Pour tous ceux qui ont fait pour que je puisse les honorer.

Tous mes amis, chacun en son nom.

Pour tous les enseignants du département d'électronique et de télécommunication

Je dédie cet humble travail.

Mousslim

Dédicace

*Je dédie ce modeste travail
A ALLAH*

A ma mère avec toute mon affection.

A mon père avec toute ma reconnaissance.

A mes frères et mes sœurs.

A ma famille.

A tous mes amis.

Mohammed Aimen

Dédicace

Je dédie ce travail à :

*A celle qui a inséré le goût de la vie et le sens de la
Responsabilité ...merci MERE.*

*A celui qui a été toujours la source d'inscription
Et de courage ...merci PERE.*

*A mes frères et mes sœurs.
A mes cousins et cousines.
Et à toute ma famille.*

*A toutes mes amis de près ou de loin.
A la promotion de Master II.*

Mohammed Seddik

Remerciement

Nous tenons à remercier tout premièrement ALLAH le tout puissant pour la volonté, la santé et la patience, qu'il nous a donné durant toutes ces longues années.

*Ainsi, nous tenons également à exprimer nos vifs remerciements à Madame **Souri.S** Pour avoir d'abord proposée ce thème, pour le suivi continué tout le long de la réalisation de ce mémoire et qui n'a pas cessé de nous donner ses conseils. Nous remercions également tous les membres du jury d'avoir accepté de jurer ce travail.*

Enfin, nos remerciements à toute personne ayant participé de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.

Liste des figures

| | |
|---|----|
| Figure I.1 : Eléments de constitution d'une machine asynchrone à cage d'écureuil | 3 |
| Figure I.2 : Vue schématique en perspective du stator..... | 4 |
| Figure 1.3 : les rotors à cage d'écureuil..... | 5 |
| Figure I.4 Constitution d'un roulement..... | 6 |
| Figure I.5 Représentation de l'excentricité statique et dynamique dans la machine asynchrone..... | 7 |
| Figure I.6 Exemple de dégâts provoqués par les défauts de court-circuit statoriques..... | 7 |
| Figure I.7 Les différents défauts statoriques..... | 8 |
| Figure I.8 Défauts du rotor à cage : a) rupture de barres (b) rupture d'anneau de court-circuit..... | 8 |
| Figure II.1 Structure du stator (a), et du rotor (b)..... | 11 |
| Figure II.2 Schéma équivalent d'une maille du rotor à cage d'écureuil..... | 14 |
| Figure II.3 Deux mailles adjacente..... | 20 |
| Figure II.4 Deux mailles adjacente avec une barre cassée..... | 20 |
| Figure II.5 Schéma de fonctionnement d'un rotor sain et en défaut..... | 21 |
| Figure II.6 Vitesse de moteur..... | 24 |
| Figure II.7 Couple électromagnétique..... | 24 |
| Figure II.8 Courant statorique phase A..... | 25 |
| Figure II.9 Vitesse de moteur..... | 25 |
| Figure II.10 Couple électromagnétique..... | 26 |
| Figure II.11 Courant statorique phase A..... | 26 |
| Figure III.1 Vitesse de moteur..... | 29 |
| Figure III.2 Couple électromagnétique..... | 29 |
| Figure III.3 Courant statoriques phase A..... | 30 |
| Figure III.4 Courant dans les barres rotoriques. | 31 |
| Figure III.5 La vitesse de moteur..... | 31 |
| Figure III.6 Couple électromagnétique..... | 32 |
| Figure III.7 Courant statorique de la phase A..... | 33 |
| Figure III.8 Courant dans les barres rotoriques..... | 33 |
| Figure III.9 Vitesse de moteur..... | 34 |
| Figure III.10 Couple électromagnétique..... | 35 |
| Figure III.11 Courant statorique de la phase A..... | 35 |

| | |
|---|----|
| Figure III.12 Courant de barre rotorique..... | 36 |
| Figure III.13 Vitesse de moteur..... | 37 |
| Figure III.14 Couple électromagnétique..... | 37 |
| Figure III.15 Courant statorique de la phase A..... | 38 |
| Figure III.16 Courant dans les anneaux..... | 38 |
| Figure III.17 Vitesse de moteur..... | 39 |
| Figure III.18 Couple électromagnétique..... | 40 |
| Figure III.19 Courant statorique de la phase A..... | 40 |
| Figure III.20 courants dans les anneaux..... | 41 |
| Figure III.21 Spectre du courant statorique dans la plage [20-100] Hz..... | 43 |
| Figure III.22 Spectre du courant statorique en présence d'une cassure de barre..... | 43 |
| Figure III.23 Spectre du courant statorique en présence de deux barres cassées..... | 44 |
| Figure III.24 Spectre du courant statorique en présence de trois barres cassées..... | 44 |
| Figure III.25 Spectre du courant statorique en présence d'un anneau cassée..... | 45 |
| Figure III.26 Spectre du courant statorique en présence de deux anneaux cassée..... | 45 |

Liste de tableau :

| | |
|---|---|
| Tableau I.1 : Classification des défauts selon leurs origines..... | 5 |
|---|---|

Sommaire

Résumé

Abstract

Dédicace

Remerciement

Liste des figures

Sommaire

| | |
|---|----|
| Introduction générale : | 1 |
| Chapitre I : | 2 |
| I.1. Constitution de la machine asynchrone : | 3 |
| I.1.1. La carcasse : | 3 |
| I.1.2. Le stator : | 3 |
| I.1.3. Le rotor : | 4 |
| I.2. Les défauts mécaniques dans les machines asynchrones : | 5 |
| I.2.1. Défaut de roulement : | 6 |
| I.2.2. Défauts d'excentricité : | 6 |
| I.2.3. Les défauts de flasque : | 7 |
| I.2.4. Les défauts de l'arbre : | 7 |
| I.3. Les défauts électriques dans la machine asynchrone : | 7 |
| I.3.1. Les défauts statoriques : | 7 |
| I.3.2. Les défauts rotoriques : | 8 |
| II.Chapitre II : | 10 |
| II.1. Modélisation de la machine asynchrone saine : | 11 |
| II.1.1. Equations du stator : | 11 |
| II.1.2. Equations du rotor : | 14 |
| II.1.3. Système d'équations global de la machine : | 16 |
| II.2. Modèle de la machine asynchrone en présence des défauts : | 19 |

| | | |
|-----------------------|--|----|
| II.2.1. | Le défaut de cassure de barre rotorique : | 19 |
| II.3. | Simulation de rupture de barres au rotor : | 21 |
| II.3.1. | Représentation d'état du modèle de rupture de barre : | 22 |
| II.4. | Cassure d'un segment d'anneau de court-circuit : | 22 |
| II.4.1. | Représentation d'état du model Cassure d'un segment d'anneau de court-circuit..... | 23 |
| II.5. | Simulation de moteur sain : | 23 |
| II.5.1. | Simulation de moteur à vide : | 23 |
| II.5.2. | Simulation de moteur à charge : | 25 |
| II.6. | Interprétation des résultats de simulation de la MAS saine : | 26 |
| III.Chapitre III : | | 28 |
| III.1. | Modèle de la machine Asynchrone en présence des défauts rotoriques : | 29 |
| III.1.1. | Résultats de la simulation en présence de défaut de rupture de barres : | 29 |
| III.1.2. | Résultats de la simulation en présence de défaut de rupture d'anneaux : | 37 |
| III.2. | Analyse spectrale du courant statorique : | 42 |
| III.2.1. | Interprétation des résultats l'analyse spectral du courant statorique : | 46 |
| Conclusion générale : | | 49 |

Bibliographie

Annexe

Introduction
Générale

Introduction générale :

Les machines asynchrones spécialement les moteurs asynchrones (MAS) sont certainement les machines électriques les plus fréquemment utilisées dans l'industrie vu leurs grandes robustesses, leurs facilités de démarrage, et leurs prix de maintenance bas. Toutes ces qualités justifient le regain d'intérêt de l'industrie vis-à-vis de ce type de machines. Néanmoins, ces moteurs MAS sont soumis pendant leurs fonctionnements à plusieurs contraintes de différentes natures (électrique, magnétique, mécanique et thermique) ce qui provoque des défauts électriques ou mécaniques au niveau du stator, ou du rotor, ou les deux en même temps. Noter bien que ces défauts peuvent engendrer un arrêt entraînant la perte de production et des réparations coûteuses, et peut y aller jusqu'à la détérioration de la machine.

Pour cela, cet axe de recherche est devenu un axe de référence vu le nombre important des chercheurs qui travaillent sur lui. Par conséquent, une diversité de travaux de recherche existe dans la littérature de diagnostic, ce qui peut être bénéfique pour la machine elle-même et pour le propriétaire. Tenant l'exemple de l'auteur [1] qui a contribué à la détection des défauts rotoriques dans la machine asynchrone en utilisant l'analyse par FFT. De très bons résultats ont été obtenus et la tâche a été faite avec succès.

Ainsi, diagnostic des défauts rotorique de la machine asynchrone a été convenablement présenté par [2]. Alors [3] a fait avec excellence le diagnostic de défauts de la machine asynchrone à cage d'écurie. Ainsi, le facteur commun de ces travaux de recherche est la compréhension du fonctionnement de la machine asynchrone avec et sans défaut rotorique, ce qui nécessite pratiquement un modèle mathématique adéquat décrivant le comportement de la machine.

Dans notre étude, nous utiliserons un modèle basé sur la modélisation de la MAS sous forme de mailles reliées entre elles électriquement et couplées magnétiquement pour simuler le fonctionnement de la machine asynchrone avec des défauts rotorique.

Le travail présenté dans ce mémoire s'articule autour de trois chapitres principaux :

- Le premier chapitre de ce travail décrit les éléments constitutifs d'une machine asynchrone et les différents défauts mécaniques, électriques....
- Le second chapitre est réservé en premier lieu à la modélisation de la MAS en présence des défauts et la simulation de machine asynchrone saine (à vide et en charge).
- Le troisième chapitre est composé de la simulation de machine asynchrone en présence des défauts rotorique (barre rotorique et l'anneau de court-circuit) avec une analyse spectrale FFT de signal de courant statorique.

Chapitre I :

Etat de l'art

Introduction :

Les machines asynchrones sont les plus utilisées dans l'industrie. Ils possèdent en effet plusieurs avantages : simplicité, robustesse, prix peu élevée et entretien facile. Ainsi, sa gamme de puissance est établie de quelques centaines de watts à plusieurs centaines de Kilowatts dont sa vitesse de rotation n'est pas liée à la fréquence du réseau d'alimentation.

Dans ce chapitre nous avons présente à vos la constructure de la machine asynchrone et les différents défauts (mécanique, électrique ...).

I.1. Constitution de la machine asynchrone :

Une machine asynchrone peut se décomposer principalement en trois parties essentielles (Figure. I.1) :

1. un stator fixe (inducteur) portant un bobinage triphasé logé dans les encoches et relié à la source d'alimentation.
2. un rotor (induit) qui peut être soit bobiné soit à cage d'écureuil. Ces deux parties sont coaxiales et séparées par un entrefer.
3. les palies, partie mécanique qui permet mise la en rotation de l'arbre moteur.

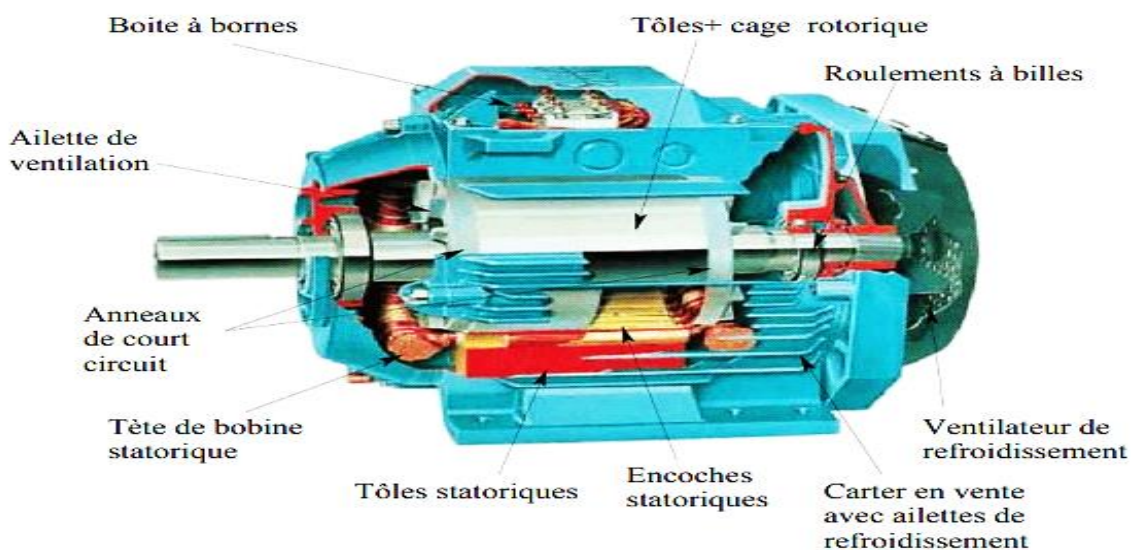


Figure I.1 : Eléments de constitution d'une machine asynchrone à cage d'écureuil

I.1.1. La carcasse :

Qui sert de support, elle joue le rôle d'une enveloppe, elle assure la protection contre les agents extérieurs et guide l'air de ventilation.

I.1.2. Le stator :

Il est constitué d'un enroulement bobiné réparti dans les encoches du circuit magnétique. Ce circuit

magnétique est constitué d'un empilage de tôles dans lesquelles sont découpées des encoches parallèles à l'axe de la machine (Figure I.2). Le bobinage statorique peut se décomposer en deux parties : les conducteurs d'encoches et les têtes des bobines. Les conducteurs d'encoches permettent de créer dans l'entrefer le champ magnétique l'origine de la conversion électromagnétique. Les têtes de bobines permettent, quant à elles, la fermeture des courants en organisant la circulation judicieuse des courants d'un conducteur d'encoche à l'autre. L'objectif est d'obtenir à la surface de l'entrefer une distribution de courant la plus sinusoïdale possible, afin de limiter les ondulations du couple électromagnétique.

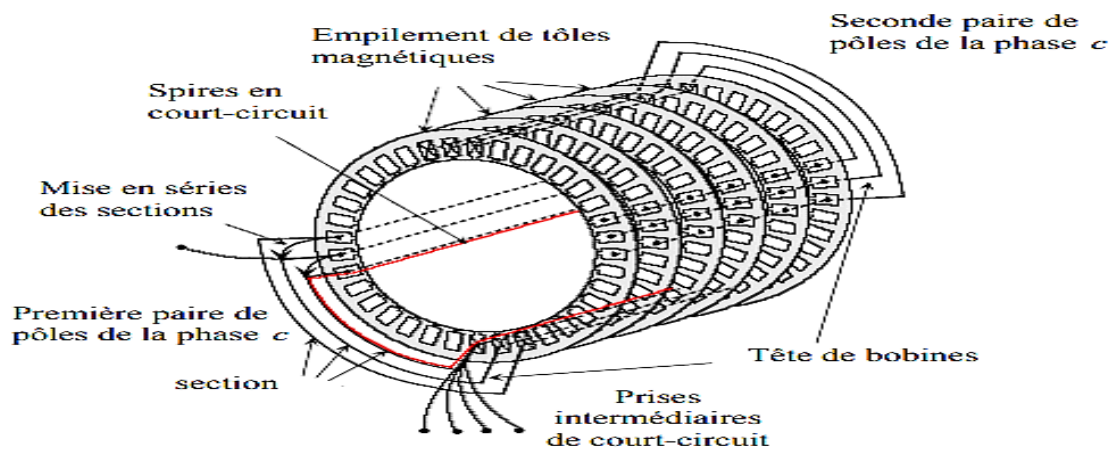


Figure I.2 : Vue schématique en perspective du stator

I.1.3. Le rotor :

Le circuit magnétique rotorique est constitué de tôles d'acier qui sont, en général, de même origine que celles utilisées pour la construction du stator. Les rotors de machines asynchrones peuvent être de deux types : bobinés ou à cage d'écurieil.

Les rotors bobinés sont construits de la même manière que le bobinage statorique (insertion des enroulements dans les encoches rotoriques). Les phases rotoriques sont alors disponibles grâce à un système de bagues balais positionné sur l'arbre de la machine. En ce qui concerne les rotors à cage d'écurieil (Figure I.3), les enroulements sont constitués de barres en cuivre pour les gros moteurs ou en aluminium pour les petits moteurs. Ces barres sont court-circuitées à chaque extrémité par deux anneaux dits "de court-circuit", eux aussi fabriqués en cuivre ou en aluminium.

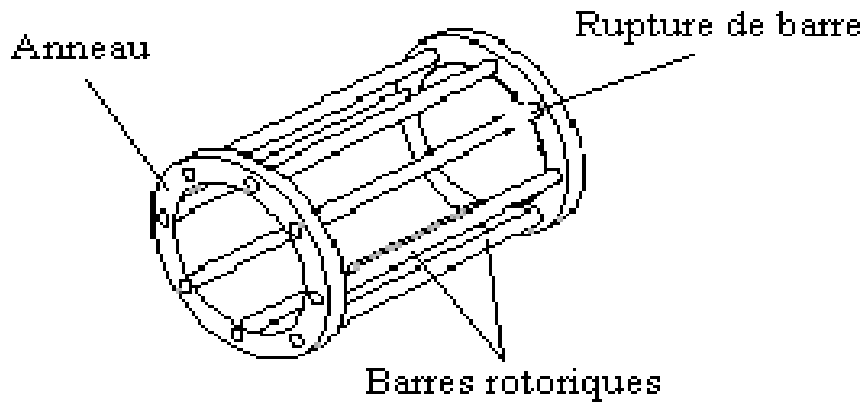


Figure I.3 : les rotors à cage d'écureuil

I.2. Les défauts mécaniques dans les machines asynchrones :

La machine asynchrone est considérée comme robuste mais peut être soumise à des contraintes au cours de son fonctionnement : longue durée, conditions dures, ce qui provoque sa défaillance. Les principaux défauts de la machine asynchrone peuvent être classés par catégories dans deux types : mécaniques et électriques. Les sources des défauts de la machine peuvent être internes, externes ou dues à l'environnement. La (figure I.4) présente l'arbre de défaut de la machine asynchrone où les défauts sont classifiés selon leur emplacement : rotorique et statorique [4].

Tableau I.1 : Classification des défauts selon leurs origines.

| | | | |
|------------------------------------|---------|------------------|---|
| Défauts des machines asynchrone | Interne | Mécanique | Contact entre le stator et rotor |
| | | | Défaut de roulements |
| | | | Excentricité |
| | | | Mouvement des enroulements et des tôles |
| | | Électrique | Défaillance au niveau de l'isolation |
| | | | Rupture de barre |
| | Externe | Mécanique | Défaillance au niveau du circuit magnétique |
| | | | Charge oscillante |
| | | | Surcharge de la machine |
| | | Environnementale | Défaut de montage |
| | | | Humidité |
| | | | Température |
| | | Électrique | Propreté |
| Fluctuation de la tension | | | |
| Sources de tensions déséquilibrées | | | |
| | | Réseau bruité | |

I.2.1. Défaut de roulement :

Les roulements à billes sont constitués de deux bagues, extérieure et intérieure, entre lesquelles existe un ensemble de billes ou de rouleaux tournants (Figure I.4) [5].

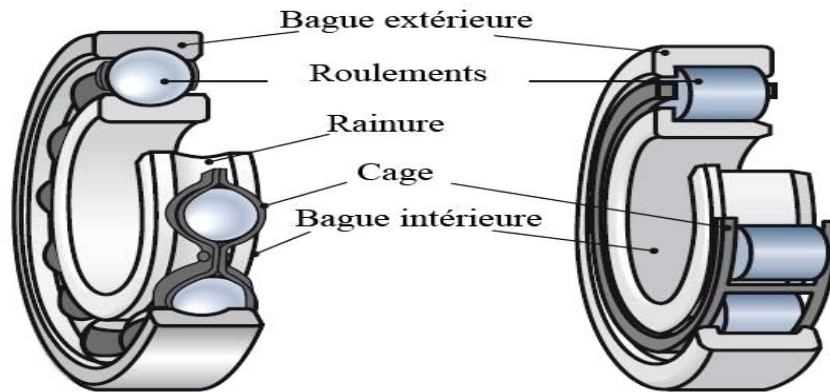


Figure I.4 Constitution d'un roulement.

Nous pouvons distinguer les types de défauts suivants [6] :

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

I.2.2. Défauts d'excentricité :

La variation d'épaisseur 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 (Figure I.5) [6].

Il existe deux types d'excentricité :

- Excentricité statique : déformation du corps du stator, positionnement incorrecte du rotor.
- Excentricité dynamique : le centre du rotor n'est plus confondu avec le centre de rotation.

L'apparition des deux types d'excentricité au même temps est généralement appelée excentricité mixte.

- Excentricité mixte : l'excentricité dans la machine à induction augmente l'apparition des composantes additionnelles dans le spectre du courant.

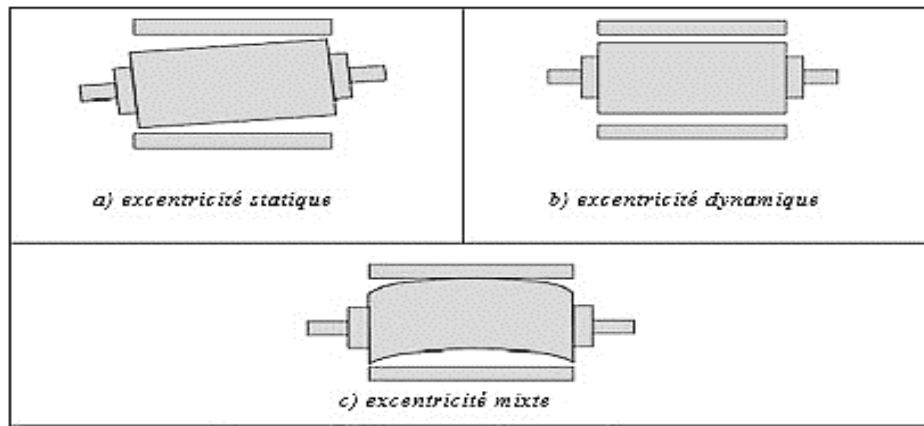


Figure I.5 Représentation de l'excentricité statique et dynamique dans la machine asynchrone

I.2.3. Les défauts de flasque :

Les défauts créés par les flasques sont le plus généralement causés à l'étape de fabrication. Un mauvais positionnement des flasques provoque un désalignement des roulements à billes, ce qui induit une excentricité [6].

I.2.4. Les défauts de l'arbre :

L'arbre de la machine peut laisser paraître une fissure due à l'utilisation d'un mauvais matériau lors de sa construction, cette fissure peut mener à une fracture nette de l'arbre provoquant un arrêt de la machine asynchrone [6].

I.3. Les défauts électriques dans la machine asynchrone :

I.3.1. Les défauts statoriques :

La dégradation de l'isolation électrique engendre des défauts de court-circuit illustrés par la (Figure. I.6). On peut clarifier Les différents défauts possibles de court-circuit par [1], [6] :

- Des défauts inter-spires qui apparaissent à l'intérieur des encoches statoriques.
- Les défauts entre une phase et le neutre.
- Les défauts entre une phase et la carcasse métallique de la machine ou entre deux phases statoriques.



Figure I.6 Exemple de dégâts provoqués par les défauts de court-circuit statoriques

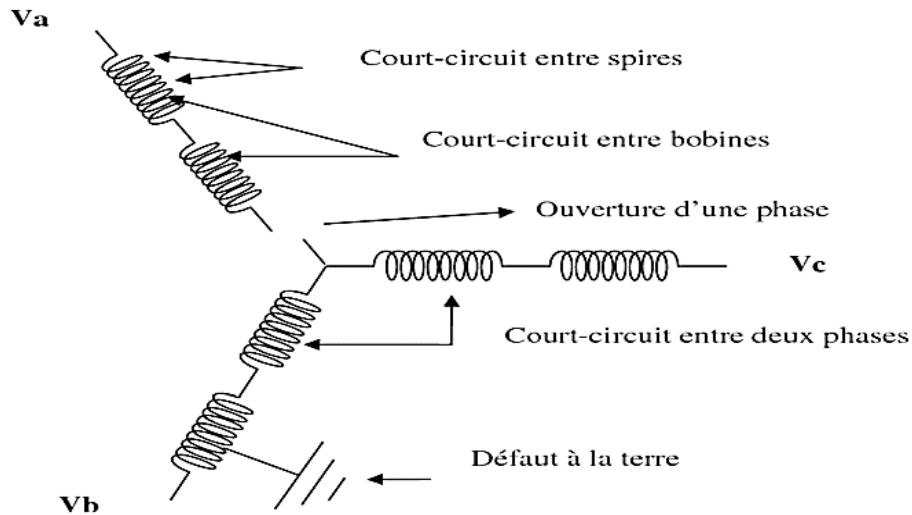


Figure I.7 Les différents défauts statoriques

I.3.2. Les défauts rotoriques :

I.3.2.1. Rupture de barres :

La cassure de barre est l'un des défauts les plus fréquents au rotor (Figure I.8). Une barre cassée, signifie que le courant dans cette barre est nul [5]. La détérioration des barres réduit la valeur moyenne de couple électromagnétique et augment l'amplitude de l'oscillation, ce qui engendre des vibrations mécaniques et un fonctionnement anormal de la machine [6].

I.3.2.2. Ruptures d'anneaux :

Les ruptures peuvent être dues à des bulles de coulées ou aux dilatations différentielles entre les barres et les anneaux (Figure I.8). La rupture d'une portion d'anneau déséquilibre la répartition des courants dans les barres rotoriques et de ce fait, engendre un effet de modulation d'amplitude sur les courants statoriques similaire à celui provoqué par la cassure de barres [6].

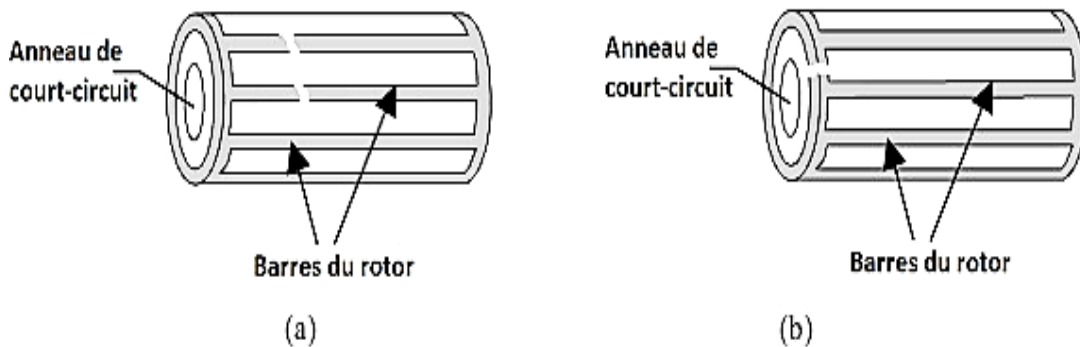


Figure I.8 Défauts du rotor à cage : a) rupture de barres (b) rupture d'anneau de court-circuit

Conclusion :

Nous avons présenté dans ce premier chapitre les éléments de constitution de la machine asynchrone, les différents défauts pouvant se produire sur les différentes parties de la machine.

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

Chapitre II :

Modélisation de la MAS En Présence Des Défauts

Introduction :

La simulation de la machine asynchrone à cage d'écurueil est effectuée après l'étape de modélisation qui utilise les circuits électriques magnétiquement couplés.

La modélisation présente dans ce chapitre est modélisation de défaut rotorique (barre rotoriques, l'anneau de court-circuit).

L'objectif de cette modélisation est de mettre en évidence l'influence des défauts rotorique sur les grandeurs de la machine asynchrone (vitesse de rotation, couple électromagnétique, courants statoriques et courants rotoriques).

II.1. Modélisation de la machine asynchrone saine :

Considérons une machine à cage d'écurueil ayant (3) enroulements identiques et symétriques au stator dont Chacun est traité en tant qu'enroulement séparé (Figure. II.1.a) [7].

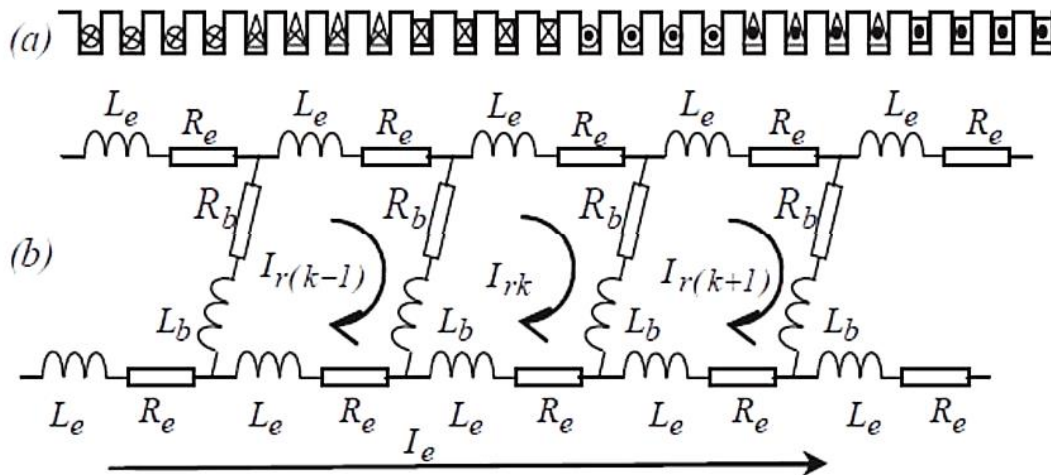


Figure II.1 Structure du stator (a), et du rotor (b).

Le rotor est considéré comme un circuit maillé, c'est-à-dire constitué d'un nombre (Nbr) de barres identiques et équidistantes court-circuitées aux deux extrémités par deux anneaux identiques (Figure. II.1.b).

II.1.1. Equations du stator :

Ces équations différentielles vont nous permettre d'associer le vecteur de tension, le vecteur de courant ainsi que le vecteur de flux pour les trois phases statoriques (S_a S_b S_c). En généralisant les équations à toutes les phases statoriques, alors l'équation du stator peut être mise sous la forme vectorielle suivante :

$$[V_S] = [R_S][I_S] + \frac{d\psi_S}{dt} \quad (2-1)$$

Où :

$[V_S]$: Vecteur des tensions des phases statoriques de dimension 3.

$[i_S]$: Vecteur des courants des phases statoriques de dimension 3

$[\psi_S]$: Vecteur des flux traversant les phases statoriques de dimension 3.

$[R_S]$: Matrice diagonal des résistances des phases du stator de dimensions (3,3).

Les vecteurs $[V_S][i_S][\psi_S]$ et la matrice des résistances $[R_S]$ s'écrivent de la façon suivante :

$$[V_{sabc}] = [V_{sa} \ V_{sb} \ V_{sc}] = [i_{sa} \ i_{sb} \ i_{sc}]^t \quad [\psi_S] = [\psi_{sa} \ \psi_{sb} \ \psi_{sc}] \quad (2-2)$$

$$[R_S] = \begin{bmatrix} r_s & 0 & 0 \\ 0 & r_s & 0 \\ 0 & 0 & r_s \end{bmatrix} \text{ Avec } R_{SA} = R_{SB} = R_{SC} = R_S \quad (2-3)$$

Le vecteur de flux statorique $[\psi_S]$ s'exprime en fonction des vecteurs courants statoriques et courants rotoriques de la manière suivante :

$$[\psi_S] = [L_{SS}] \cdot [I_S] + [M_{SR}] \cdot [I_R] \quad (2-4)$$

$$[I_R] = [I_{r1} \ I_{r2} \ I_{r3} \ \dots \ I_{r(NBr+1)}]^t \quad (2-5)$$

Où :

$[L_{SS}]$: Est la matrice symétrique des inductances statoriques de dimension (3,3).

$[M_{SR}]$: Est la matrice des inductances mutuelles des phases statoriques et les mailles rotoriques de dimension (3, Nbr+1)

Ces deux matrices s'écrivent :

$$[L_{SS}] = \begin{bmatrix} L_{sasa} & M_{sasb} & M_{sasc} \\ M_{bsas} & L_{sbsb} & M_{bsbc} \\ M_{csas} & M_{csbs} & L_{scsc} \end{bmatrix} \quad (2-6)$$

Où : L'inductance totale d'une bobine statorique est la somme à l'inductance magnétisant L_{ms} et l'inductance de fuite L_{fs} :

$$L_{sasa} = L_{sbsb} = L_{scsc} = L_{ms} + L_{fs} \quad (2-7)$$

$$[M_{sr}] = \begin{bmatrix} M_{sar1} & M_{sar2} & M_{sar} \\ M_{sbr1} & M_{sbr2} & M_{sbr} \\ M_{scr1} & M_{scr2} & M_s \end{bmatrix} \quad (2-8)$$

Avec :

M_{sari} : Représente l'inductance mutuelle entre la phase "a" et la (i^{eme}) maille rotorique.

M_{sbri} : Représente l'inductance mutuelle entre la phase "b" et la (i^{eme}) maille rotorique.

M_{scri} : Représente l'inductance mutuelle entre la phase "c" et la (i^{eme}) maille rotorique.

M_{smri} : L'inductance mutuelle entre la phase m du stator et la maille i du rotor s'écrit de la façon suivante :

$$M_{sari} = M_{sr} \cos(\theta + ka)$$

$$Msari = M_{sr} \cos(\theta + ka - \frac{2\pi}{3}) \quad (2-9)$$

$$Msari = M_{sr} \cos(\theta + ka + \frac{2\pi}{3})$$

$$Msr = \frac{4u_0 N_s Rl}{ep^2\pi} \sin(\frac{a}{2}) \quad (2-10)$$

$$a = p \frac{2\pi}{q} \text{ Et } k= 1, 2, 3 \dots \text{ Nbr}-1$$

La matrice Msr peut-être représenté sous la forme suivante :

$$[Msr] = \begin{bmatrix} \dots & Msr \cos(\Theta + ka) & \dots \\ \dots & Msr \cos(\Theta + ka - 2\pi/3) & \dots \\ \dots & Msr \cos(\Theta + ka - 4\pi/3) & \dots \end{bmatrix} \quad (2-11)$$

Où :

U_0 = Perméabilité magnétique de l'entrefer.

N_s = Nombre de spires par phase statorique.

R_e : Rayon moyen de l'entrefer.

l : Longueur de rotor.

q : nombre des barres rotoriques.

e : L'épaisseur de l'entrefer.

Si les inductances mutuelles entre les phases statoriques et les segments de l'anneau de court-circuit sont négligées, la dernière colonne de la matrice représentée par un zéro. Ce qui peut se mettre sous la forme :

$$[Msr] = \begin{bmatrix} Msar1 & Msar2 & \dots & Msar(nbr) & 0 \\ Msbr1 & Msbr2 & \dots & Msar(nbr) & 0 \\ Mscr1 & Mscr2 & \dots & Msar(nbr) & 0 \end{bmatrix} \quad (2-12)$$

On peut remarquer, à ce stade, que la matrice [Lss] est de dimensions (3,3) compte tenu du nombre de phases statoriques, alors que la matrice [M_{SR}] est de dimensions (3, Nbr+1) ce qui implique que le vecteur [i_r] des courants rotoriques comportera (Nbr+1) éléments Correspondants aux (Nbr) mailles (Nbr barres) de la cage plus la maille de l'anneau de court-circuit. En remplaçant l'équation (2-4) dans (2-1) on obtient :

$$[Vs] = [Rs][Is] + [Lss] d[is]/dt + [Msr] [Ir]/dt + [ir][Msr]/dt \quad (2-13)$$

Avec :

$$\frac{d[Msr]}{dt} [ir] = \frac{d[Msr]d\theta_r}{d\theta_r dt} [ir] \quad (2-14)$$

$$\Omega = \frac{d\theta_r}{dt} \quad (2-15)$$

Où :

θ_r : Est l'angle qui définit la position du rotor par rapport au stator.

Ω : Est la vitesse mécanique du rotor.

Par substitution (2-14) et (2-15) dans (2-13), on obtient :

$$[V_s] = [R_s] \cdot [I_s] + [L_{ss}] \frac{di_s}{dt} + [M_{sr}] \frac{di_r}{dt} + \Omega \frac{d[M_{sr}]}{d\theta_r} [i_r] \quad (2-16)$$

II.1.2. Equations du rotor :

La cage d'écuriel de la machine se compose de (Nbr) encoches rotoriques (nombre de barres rotoriques) qui peuvent se décomposer en (Nbr+1) circuits électriques rotoriques indépendants (Figure. II.1). À chacun de ces circuits (boucles) on associe un courant, ce qui amène à calculer (Nbr+1) courants rotoriques. Chaque barre rotorique est modélisée par une inductance en série avec une résistance, tout comme chaque segment d'anneau de court-circuit.

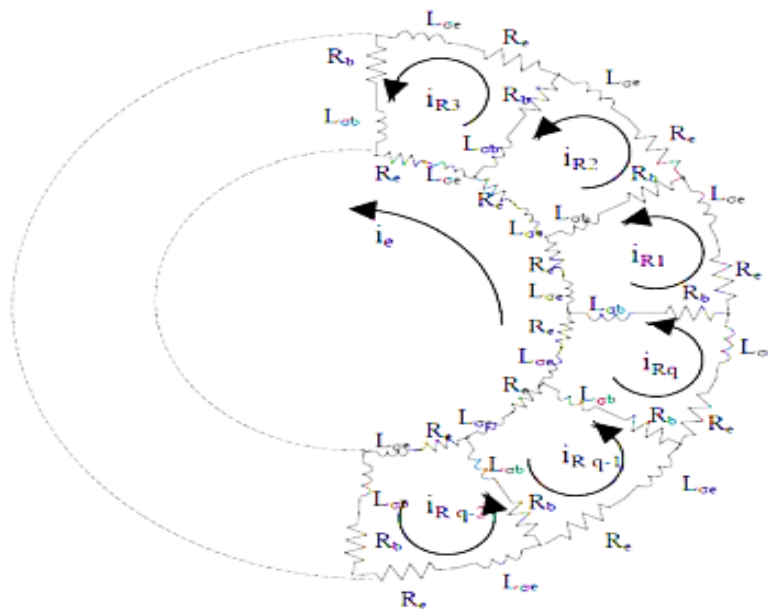


Figure II.2 Schéma équivalent d'une maille du rotor à cage d'écuriel

Le nombre d'équations différentielles obtenues est égal au nombre de barres plus un (tenant compte de l'un des deux anneaux). Par conséquent, les courants indépendants dans la cage sont au nombre de (Nbr+1).

La mise en équation de la maille rotorique (k) de la cage donne lieu à l'expression suivante :

$$-R_b i_{rk-1} + 2(R_b + R_e) i_{rk} - R_b i_{rk+1} - R_e i_e + \frac{d}{dt} \psi_{rk} + \frac{d}{dt} \psi_{sk} = 0 \quad (2-17)$$

Où :

ψ_{rk} et ψ_{sk} : sont respectivement le flux de la cage envoyé à travers la maille (k), y compris le flux propre de la maille (k), et le flux envoyé par les bobinages statoriques à travers la maille (k). De la même façon pour le stator, en désignant par (L_{rrkn}) l'inductance mutuelle entre la maille (k) et la maille (n) d'un côté,

et par (L_{rskn}) l'inductance mutuelle entre la maille (k) et la phase statorique (n) de l'autre, les flux ψ_{rk} et ψ_{sk} s'écrivent en fonction des courants de mailles et de phases de la façon suivante :

$$\psi_{sk} = \sum_{n=1}^m L_{rskn} I_{sn} \quad (2-18)$$

$$\psi_{sk} = (L_{rrkk} - L_b)I_{rk-1} + (L_{rrkk} + 2(L_b + L_e)I_{rk-1} + (L_{rrkk} - L_b)I_{rk+1} + \sum_{\substack{n=1 \\ n=k \\ n=k+1}}^n L_{rrkn} - L_e I_e$$

Les équations précédentes peuvent être généralisées à toutes les mailles de la cage. A cela, il faut ajouter l'équation d'un anneau de court-circuit en considérant qu'il n'y a pas de flux axial dans la machine :

$$qR_e i_e - \sum_{n=1}^m R_e I_{rn} + \frac{d}{dt} (qL_e I_e - \sum_{n=1}^q L_e I_{rn}) = 0 \quad (2-19)$$

En regroupant les équations précédentes (2-18) et (2-19) sous forme matricielle, on aboutit à l'équation du rotor :

$$[V_r] = [0] = [R_r][V_r] + \frac{d}{dt} [\psi_S] \quad (2-20)$$

Le vecteur flux rotorique $[\psi_S]$ s'exprime en fonction des vecteurs courants rotoriques et statoriques de la manière suivante :

$$[\psi_S] = [L_{rr}] \cdot [i_r] + [M_{rs}] \cdot [i_s] \quad (2-21)$$

Où :

$[V_r]$: Est le vecteur des tensions rotoriques, qui est nul pour le cas d'un rotor à cage d'écureuil.

$[i_r]$: Est le vecteur des courants de mailles rotoriques, de dimension $(q+1)$.

$[\psi_S]$: Est le vecteur des flux traversant les mailles rotoriques, de dimension $(q+1)$.

$[R_r]$: Est la matrice des résistances de la cage, de dimensions $(q+1, q+1)$.

$[L_{rr}]$: Est la matrice des inductances propres rotoriques.

$[M_{rs}]$: Est la matrice des inductances mutuelles entre les mailles rotoriques et les phases statoriques, elle est égale à la matrice $[M_{rs}]^t$.

$$[i_r] = [i_{r1} \ i_{r2} \ i_{r3} \ \dots \ i_{r(q+1)}]^t \quad \mathbf{Et} \quad [\psi_S] = [\psi_{S1} \ \psi_{S2} \ \dots \ \psi_{S(q+1)}]^t \quad (2-22)$$

$$[R_r] = \begin{bmatrix} 2(R_b + R_e) & -R_b & 0 & \dots & -R_b & -R_e \\ -R_b & 2(R_b + R_e) & -R_b & \dots & 0 & -R_e \\ 0 & -R_b & 2(R_b + R_e) & \dots & 0 & -R_e \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ -R_b & 0 & 0 & \dots & 2(R_b + R_e) & -R_e \\ -R_e & -R_e & -R_e & \dots & -R_e & (Nbr + 1)(-R_e) \end{bmatrix}$$

Avec : R_b et R_e représentent, respectivement, la résistance d'une barre rotorique et la résistance d'un segment de l'anneau de court-circuit.

- $[L_{rr}]$: est de dimensions $(N_{br}+1, N_{br}+1)$ composées par l'inductance de fuite d'une barre L_b et l'inductance d'une portion de l'anneau de court-circuit L_e en plus insérant les inductances propres aux mailles L_{mr} et les inductances mutuelles L_{rirj} entre la maille i et la maille j .
- $[M_{rs}]$: est de dimensions $(N_{br}+1, 3)$. Ces deux matrices s'écrivent de la façon suivante :

$$[M_{rs}] = \begin{bmatrix} M_{sar1} & M_{sbr1} & M_{scr1} \\ M_{sar2} & M_{sbr2} & M_{scr2} \\ \dots & \dots & \dots \\ M_{sar(N_{br}+1)} & M_{sbr(N_{br}+1)} & M_{scr(N_{br}+1)} \end{bmatrix} \quad (2-23)$$

$$[L_{rr}] = \begin{bmatrix} L_{mr} + 2(L_b + L_e) & -L_{r1r2} - L_b & L_{r1r3} & \dots & -L_{r1rq} - L_b & -L_e \\ -L_{r2r1} - L_b & L_{mr} + 2(L_b + L_e) & -L_{r2r3} - L_b & \dots & -L_{r2rq} & -L_e \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & -L_e \\ L_{rqr1} - L_b & L_{rqr2} & L_{rqr3} & \dots & L_{mr} + 2(L_b + L_e) & -L_e \\ -L_e & -L_e & -L_e & \dots & -L_e & -(N_{br} + 1)L_e \end{bmatrix}$$

Où :

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

L'inductance principale d'une maille rotorique est donnée par l'équation suivante :

$$L_{rp} = \frac{N_{br}-1}{N_{br}^2} \frac{u_0}{e} 2\pi \cdot l \cdot Re \quad (2-24)$$

La mutuelle entre deux mailles rotoriques est donnée par l'équation suivante :

$$M_{rr} = \frac{-1}{N_{br}^2} \frac{u_0}{e} 2\pi \cdot l \cdot Re \quad (2-25)$$

En remplaçant l'équation (2-21) dans (2-20), on obtient :

$$[V_r] = [R_r][i_r] + [L_{rr}] \frac{di_r}{dt} [M_{rs}] \frac{di_s}{dt} + \frac{d[M_{rs}]}{dt} [i_s] \quad (2-26)$$

Sachant que :

$$\frac{d[M_{rs}]}{dt} [i_s] = \frac{d[M_{rs}]d\theta_r}{d\theta_r dt} [i_s] \quad (2-27)$$

$$[V_r] = [R_r][i_r] + [L_{rr}] \frac{di_r}{dt} [M_{rs}] \frac{di_s}{dt} + \Omega \frac{d[M_{rs}]}{dt} [i_s] \quad (2-28)$$

II.1.3. Système d'équations global de la machine :

Les deux équations matricielles (2-6) et (2-14) du stator et du rotor peuvent être regroupées dans une seule équation sous la forme suivante :

$$\begin{bmatrix} [V_s] \\ [V_r] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [R_s] & 0 \\ 0 & [R_r] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [i_s] \\ [i_r] \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} [L_{ss}] & [M_{sr}] \\ [M_{rs}] & [L_{rr}] \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} [i_s] \\ [i_r] \end{bmatrix} + \Omega \frac{d}{d\theta_r} \begin{bmatrix} [L_{ss}] & [M_{sR}] \\ [M_{rs}] & [L_{rr}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [i_s] \\ [i_r] \end{bmatrix} \quad (2-29)$$

On obtient :

$$[V] = [R] \cdot [I] + L \left\{ \frac{d}{dt} [i] \right\} + \Omega \left\{ \frac{d}{d\theta_r} [L] \right\} [I] \quad (2-30)$$

Où :

- $[V] = \begin{bmatrix} [V_s] \\ [0] \end{bmatrix}$ de dimension $(3+Nbr+1)$.
- $[i] = \begin{bmatrix} [i_s] \\ [i_r] \end{bmatrix}$ de dimension $(3+Nbr+1)$.
- $[R] = \begin{bmatrix} [R_s] & [0] \\ [0] & [R_r] \end{bmatrix}$ de dimension $(3+Nbr+1, 3+Nbr+1)$.
- $[L] = \begin{bmatrix} [L_{ss}] & [M_{sr}] \\ [M_{rs}] & [L_{rr}] \end{bmatrix}$ de dimension $(3+Nbr+1, 3+Nbr+1)$.

La vitesse mécanique de rotation du rotor :

$$\Omega = \frac{d\theta_r}{dt} \quad (2-31)$$

La vitesse mécanique de l'arbre s'écrit de la façon suivante :

$$j \frac{d\Omega}{dt} = c_{em} - c_r - f\Omega \quad (2-32)$$

Où :

c_{em} : Est le couple électromécanique.

c_r : est le couple de charge.

J : est le moment d'inertie de l'ensemble de masses tournantes,

F : est le coefficient de frottement visqueux,

Le couple électromagnétique peut être obtenu à partir de la Co-énergie magnétique emmagasinée dans la machine :

$$c_{em} = \left[\frac{\partial w_{ce}}{\partial \theta_r} \right] \quad (2-33)$$

Dans un système magnétique linéaire, la Co-énergie est égale à l'énergie stockée dans un circuit linéaire s'exprime en fonction des courants et des inductances :

$$W_{Co} = \frac{1}{2} [I]^T [L] [I] \quad (2-34)$$

D'où :

$$c_{em} = \frac{1}{2} [I]^t \left\{ \frac{d}{d\theta_r} [L] \right\} [I] \quad (2-35)$$

$$W_{Co} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} i_s^t & i_r^t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_{ss} & M_{sr} \\ M_{rs} & L_{rr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_s \\ i_r \end{bmatrix} \quad (2-36)$$

$$W_{Co} = \frac{1}{2} i_s^t L_{ss} i_s + \frac{1}{2} i_s^t M_{sr} i_r + \frac{1}{2} i_r^t M_{rs} i_s + \frac{1}{2} i_r^t L_{rr} i_r \quad (2-37)$$

Dans ce cas L_{ss} et L_{rr} contiennent seulement des éléments constants donc :

$$\frac{dL_{ss}}{d\theta_r} = 0 \text{ et } \frac{dL_{rr}}{d\theta_r} = 0 \quad (2-38)$$

En remplaçant les équations (2-37) et (2-38) dans (2-33), on obtient :

$$c_{em} = \frac{1}{2} \cdot i_s^t \frac{\partial M_{sr}}{\partial \theta_r} i_r + \frac{1}{2} \cdot \frac{\partial M_{sr}}{\partial \theta_r} i_r^t i_s \quad (2-39)$$

Pour un entrefer uniforme M_{sr} et M_{rs} sont égaux, l'expression du couple électromagnétique se réduit à la forme suivante :

$$c_{em} = i_s^t \frac{\partial M_{sr}}{\partial \theta_r} i_r \quad (2-40)$$

Les équations (2-31) et (2-32) peuvent être écrites sous la forme matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} j & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Omega \\ \theta_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 \\ -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Omega \\ \theta_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_{em} & - & c_r \\ & 0 & \end{bmatrix} \quad (2-41)$$

En combinant l'équation électrique (2-41) et l'équation de mouvement (2-30), les équations de la machine asynchrone s'écrivent de la façon suivante :

$$\begin{bmatrix} [V] \\ -Cr \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [R] + \Omega \frac{d}{d\theta_r} [L] & 0 & 0 \\ \frac{1}{2} [i]^t \frac{d[L]}{d\theta_r} & f & 0 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [I] \\ \Omega \\ \theta_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} [L] & 0 & 0 \\ 0 & J & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} [I] \\ \Omega \\ \theta_r \end{bmatrix} \quad (2-42)$$

Ce qui donne une forme condensée sous la forme suivante :

$$[U] = [B][X] + [A][\dot{x}] \quad (2-43)$$

Le vecteur $[X]$ peut s'écrire :

$$[\dot{x}] = [A]^{-1}([U] - [B][X]) \quad (2-44)$$

Le vecteur $[u]$ est donné par l'expression suivante :

$$[u] = ([v], [-Cr], [0])^t \quad (2-45)$$

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

$$A = \begin{bmatrix} [L_s] & [M_{sr}] & [A_0]^t & [A_0]^t \\ [M_{rs}] & [L_r] & [A_0]^t & [A_0]^t \\ [A_0] & [A_0] & j & 0 \\ [A_0] & [A_0] & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-46)$$

Avec : $[A_0] = [A_0sta \ A_0rot \ A_0cc]$

$A_0sta = zeros(1,3)$

$A_0rot = zeros(1, Nbr)$

$A_0cc = 0$

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

$$\begin{bmatrix} [R_s] & \Omega \frac{dM_{rs}}{d\theta_r} & [S_0]^t & [S_0]^t \\ \Omega \frac{dM_{rs}}{d\theta_r} & [R_r] & [B_0]^t & [B_0]^t \\ C_{stator} & C_{barre} & f & 0 \\ [S_0] & [B_0] & -1 & 0 \end{bmatrix} \quad (2-47)$$

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

$$\left[\Omega \frac{dM_{rs}}{d\theta_r} \right] = -M_{sr} \begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} & \dots & g_{1\ Nrb+1} \\ g_{21} & g_{22} & \dots & g_{2\ Nrb+1} \\ g_{31} & g_{32} & \dots & g_{3\ Nrb+1} \end{bmatrix} \quad (2-48)$$

$$\left[\Omega \frac{dM_{rs}}{d\theta_r} \right] = -M_{sr} \begin{bmatrix} \Omega \sin(\theta_r) & \Omega \sin(\theta_r + a) & \dots & \Omega \sin(\theta_r + (Nrb + 1)a) \\ \Omega \sin(\theta_r - \frac{2\pi}{3} + a) & \Omega \sin(\theta_r - \frac{2\pi}{3} + a) & \dots & \Omega \sin(\theta_r - \frac{2\pi}{3} + (Nrb + 1)a) \\ \Omega \sin(\theta_r - \frac{4\pi}{3} + a) & \Omega \sin(\theta_r - \frac{4\pi}{3} + a) & \dots & \Omega \sin(\theta_r - \frac{4\pi}{3} + (Nrb + 1)a) \end{bmatrix} \quad (2-49)$$

Les constantes C_{stator} et C_{rotor} et C_{barre} et B_0 sont définies comme suit :

$$C_{stator} = 0.5p[i_r][H]^T \quad (2-50)$$

$$C_{rotor} = 0.5p[i_s][H] \quad (2-51)$$

$$C_{barre} = [C_{rotor} \ 0] \quad (2-52)$$

$$[B_0] = \text{zeros}(1, Nrb + 1) \quad (2-53)$$

$$[H] = M_{rs} \begin{bmatrix} \sin(\theta_r) & \sin(\theta_r + a) & \dots & \sin(\theta_r + (Nrb + 1)a) \\ \sin(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta_r + \frac{2\pi}{3} + a) & \dots & \sin(\theta_r + \frac{2\pi}{3} + (Nrb + 1)a) \\ \sin(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta_r - \frac{2\pi}{3} + a) & \dots & \sin(\theta_r - \frac{2\pi}{3} + (Nrb + 1)a) \end{bmatrix} \quad (2-54)$$

II.2. Modèle de la machine asynchrone en présence des défauts :

Dans la simulation des défauts de barres ou de segments d'anneaux de court-circuit, le modèle du moteur sain sera utilisé tel qu'il est, il suffit seulement de faire augmenter les résistances des barres ou de segments en défaut à des valeurs pouvant refléter le degré de rupture partielle voulu. Ces considérations sont prises du fait qu'une rupture totale de barres se reproduit rarement. Les résultats obtenus sont intéressants, du fait que toutes les raies prédites par les développements analytiques peuvent être observées dans les spectres résultants. Plus le facteur de multiplication est grand, plus la sévérité de défaut grande.

II.2.1. Le défaut de cassure de barre rotorique :

La rupture d'une barre peut être totale ou partielle.

II.2.1.1. Cassure totale d'une barre :

Le cas d'une cassure totale d'une barre signifie que le courant ne passe pas dans cette barre, donc il est nul. La (Figure II.4) montre la disposition générale de deux mailles adjacentes et donne les courants qui circulent dans les barres et dans les anneaux [8].

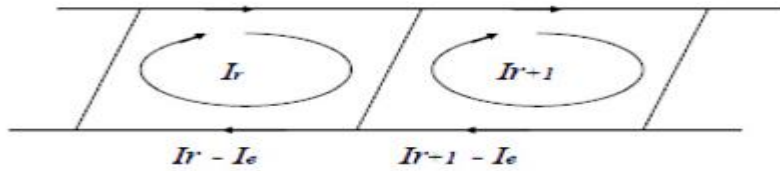


Figure II. 3 Deux mailles adjacente.

Si une barre est ouverte (cassée), cela implique que ($I_{r+1} = I_r$) voir la (Figure II.5).

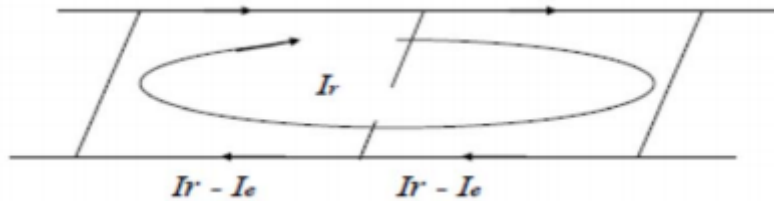


Figure II.4 Deux mailles adjacente avec une barre cassée.

La condition ($I_{r+1} = I_r$) est imposée sur la matrice des résistances et des inductances par l'addition de la colonne relative à (I_{r+1}), à celle relative à (I_r). De même pour les lignes (I_{r+1}) est supprimé du vecteur courant et tension. La taille des matrices est réduite selon le nombre de barres cassées [8].

II.2.1.2. Cassure partielle d'une barre :

Une barre rétrécie ou mal soudée représente une augmentation de la résistance de cette dernière par rapport à une barre normale, Ce qui signifie le passage d'un faible courant dans cette barre. La matrice de résistance est modifiée en augmentant la valeur de la résistance de la barre défectueuse [8].

Le rotor avec ce défaut crée, en plus du champ rotorique direct qui tourne à la vitesse Le rotor avec ce défaut crée, en plus du champ rotorique direct qui tourne à la Vitesse ($g\Omega_s$) par rapport au rotor (g le glissement de la machine), un champ inverse qui, lui tourne à une Vitesse ($-g\Omega_s$) L'interaction de ces champs avec celui issu du bobinage statorique donne naissance des composantes de fréquence ($2g\Omega_s$) dans le couple électromagnétique. Ces composantes seront la cause d'oscillations de la vitesse. Cette dernière donne naissance à des f.é.m. aux pulsations (Ω_s), ($(1-2g)\Omega_s$), et ($(1-4g)\Omega_s$) qui créent à leur tour des courants aux mêmes pulsations. Les champs créent par ces courants vont à leur tour induire au rotor des courants directs et inverses. Ainsi par un processus identique, on retrouve dans le courant statorique des Composantes de fréquences [8] :

$$f_{defaut} = (1 \pm kg)f \quad (2-55)$$

Où :

K : Un entier positif.

g : Le glissement.

f : La fréquence d'alimentation

Le schéma de la figure (II.6) permet une meilleure compréhension du fonctionnement du moteur avec un rotor sain et en défaut.

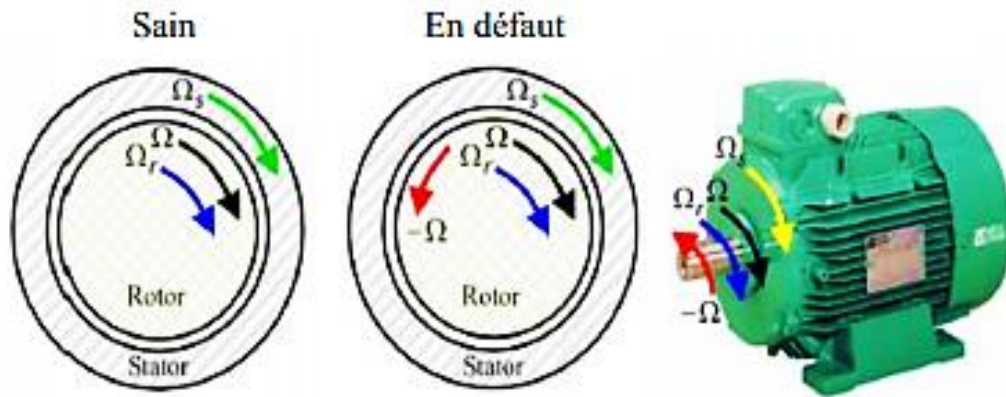


Figure II.5 Schéma de fonctionnement d'un rotor sain et en défaut.

$$\Omega_s = \frac{2\pi f}{p} \quad (2-56)$$

Ω_s : Représente la vitesse de synchronisme.

P : Est le nombre de paires de pôles de la machine.

$$\Omega_r = (1 - g)\Omega_s \quad (2-57)$$

Ω_r : Représente la vitesse de rotation

$$g = \frac{\Omega_s - \Omega_r}{\Omega_s} \quad (2-58)$$

g : est le glissement.

Alors :

$$\Omega_{\text{defaut}} = \Omega_r - g\Omega_s = (1 - g)\Omega_s - g\Omega_s \quad (2-59)$$

$$\Omega_{\text{defaut}} = (1 - 2g)\Omega_s \quad (2-60)$$

D'où la fréquence du défaut :

$$f_{\text{defaut}} = (1 - g)f - gf = (1 - 2g)f \quad (2-61)$$

II.3. Simulation de rupture de barres au rotor :

Il est assez difficile 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 II.6)) 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. 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 $(k - i)$ devient égal au courant dans la maille (k) , c'est-à-dire $(ir(k - i) = irk)$

Ceci est traduit dans les matrices des inductances et des résistances, Par l'addition des deux colonnes et des deux lignes liées aux courant $ir(k - 1)$ et i_{rk} . Le courant i_{rn} 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 [9].

II.3.1. Représentation d'état du modèle de rupture de barre :

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

$$[R_r] = \begin{bmatrix} 2(R_b + R_e) & -R_b & 0 & 0 & \cdot & \cdot & -R_b & -R_e \\ -R_b & 2(R_b + R_e) & -R_b & 0 & \cdot & \cdot & 0 & -R_e \\ 0 & -R_b & 2(R_b + R_e) & \cdot & \cdot & \cdot & 0 & -R_e \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ -R_b & 0 & 0 & \cdot & \cdot & \cdot & -R_b & 2(R_b + R_e) & -R_e \\ -R_e & -R_e & -R_e & \cdot & \cdot & \cdot & -R_e & -R_e & (N_{br+1}) - R_e \end{bmatrix}$$

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

II.4. 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.

II.4.1. Représentation d'état du model Cassure d'un segment d'anneau de court-circuit

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 :

$$[Rr] = \begin{bmatrix} 2(R_b + R_e) & -R_b & 0 & 0 & \cdot & \cdot & -R_b & -R_e \\ -R_b & 2(R_b + R_e) & -R_b & 0 & \cdot & \cdot & 0 & -R_e \\ 0 & -R_b & 2(R_b + R_e) & \cdot & \cdot & \cdot & 0 & -R_e \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & 2(R_b + \beta R_e) & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & -\beta R_e \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ -R_b & 0 & 0 & \cdot & \cdot & \cdot & -R_b & 2(R_b + R_e) \\ -R_e & -R_e & -R_e & \cdot & \cdot & \cdot & -R_e & -R_e \end{bmatrix} \quad (N_{br-1})R_e + \beta R_e$$

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

II.5. Simulation de moteur sain :

II.5.1. Simulation de moteur à vide :

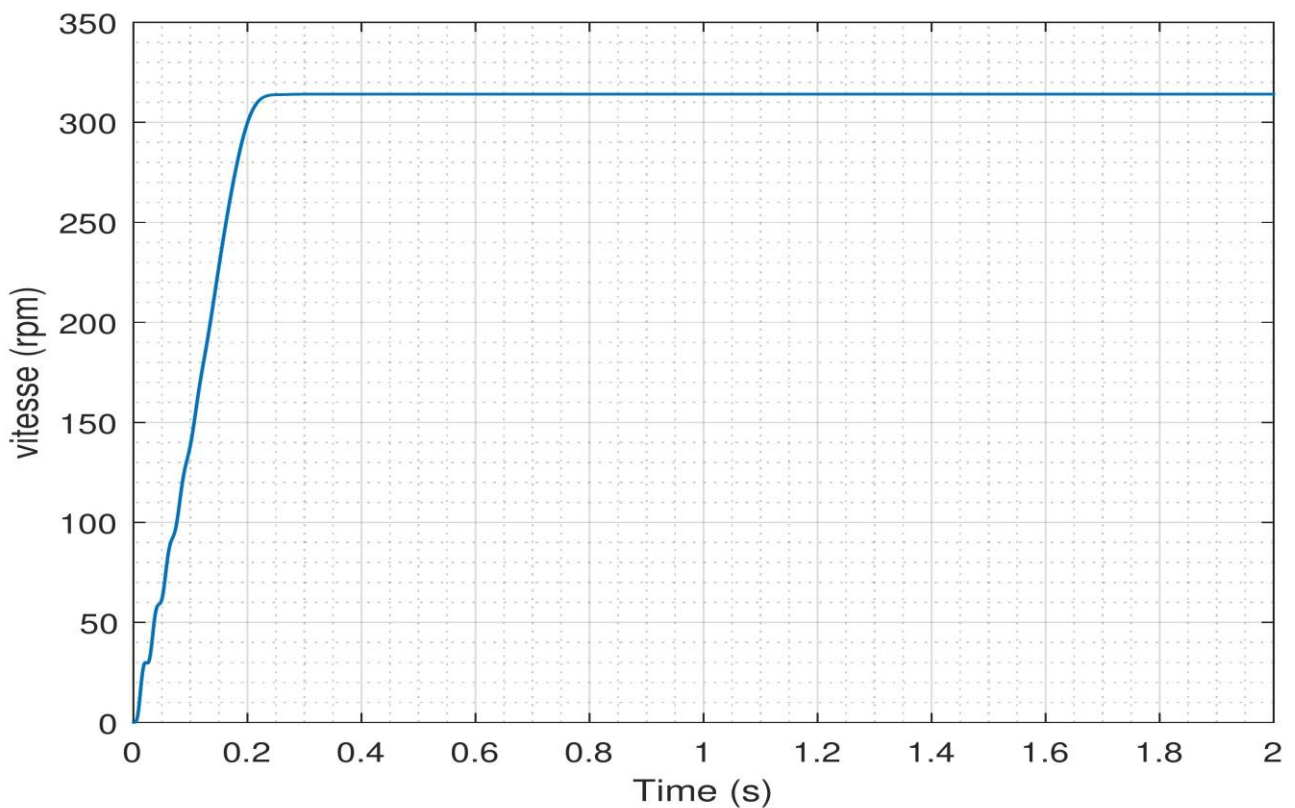


Figure II.6 Vitesse de moteur

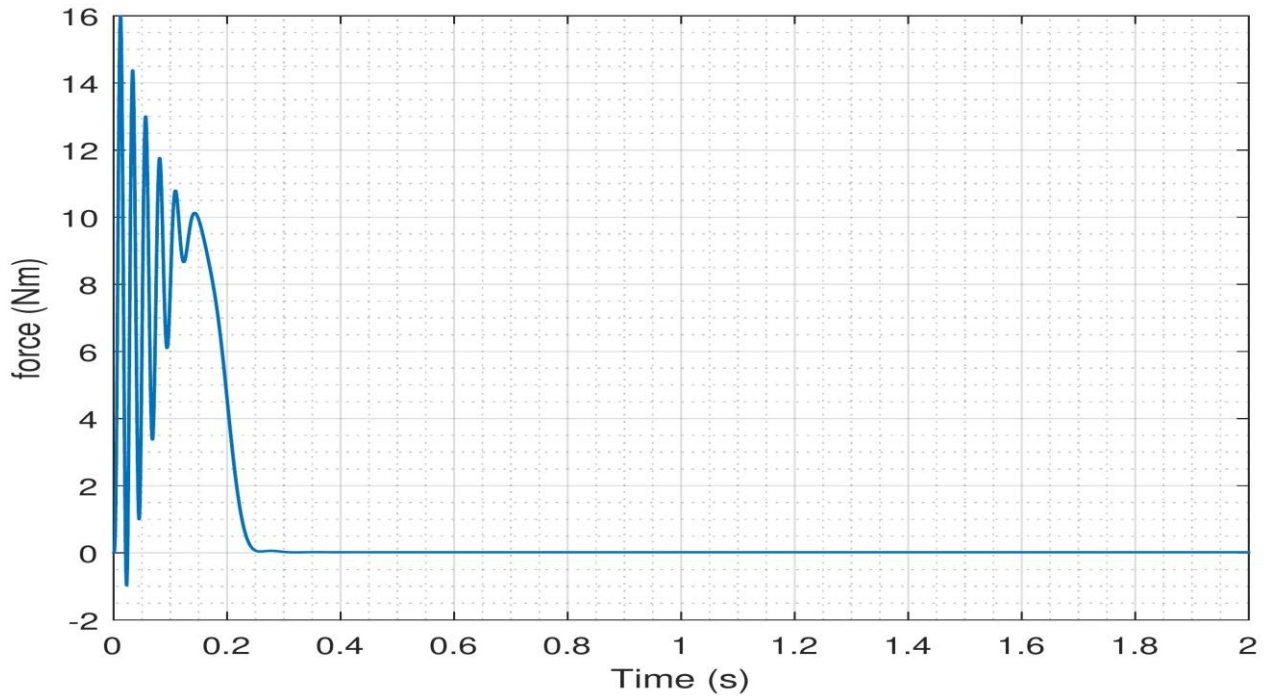


Figure II.7 Couple électromagnétique.

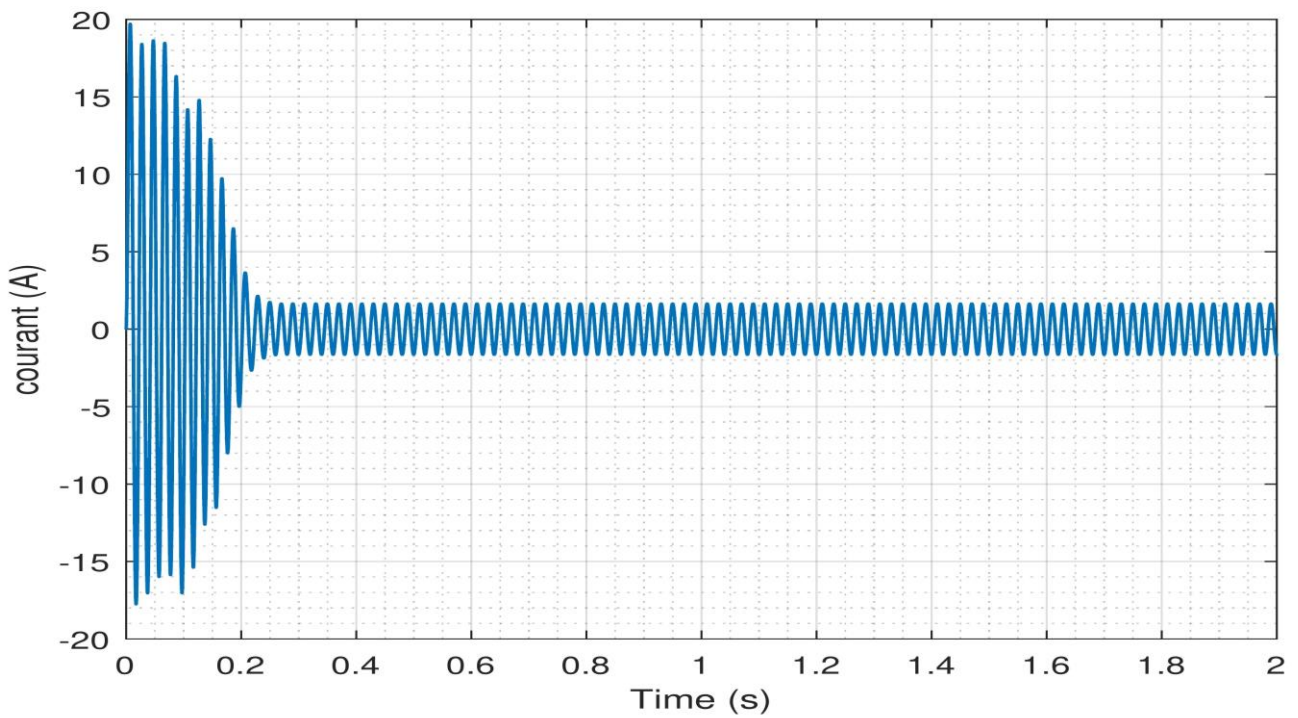


Figure II.8 Courant statorique phase A.

II.5.2. Simulation de moteur à charge :

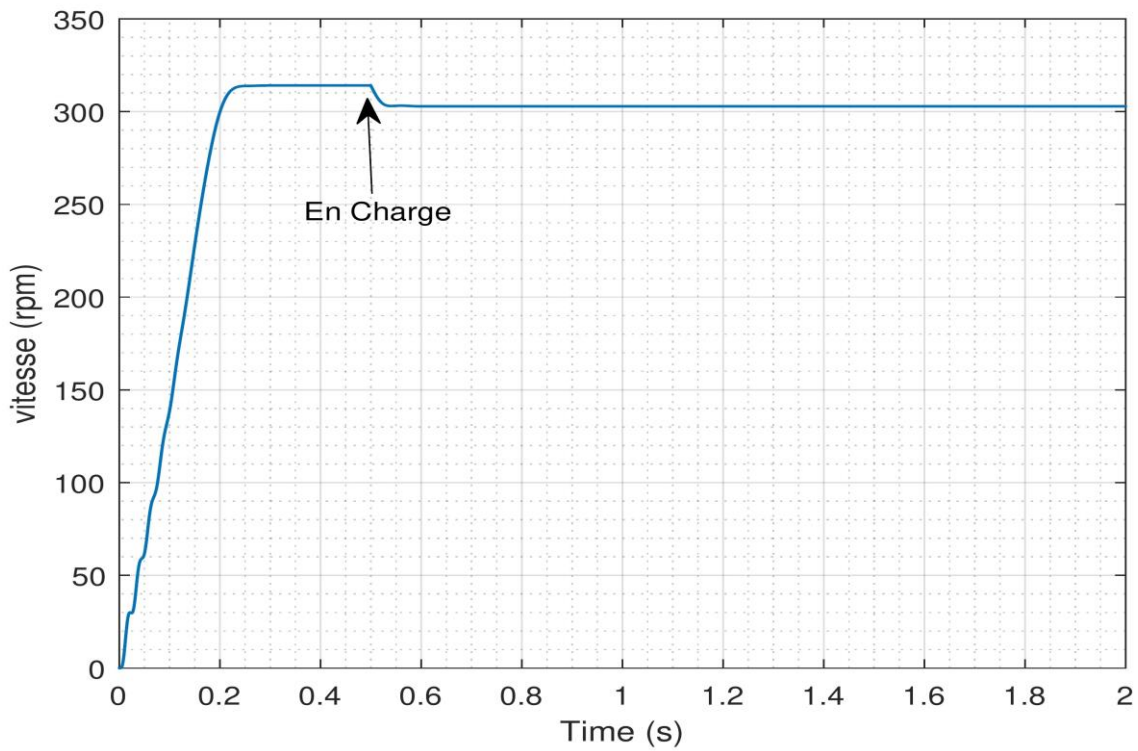


Figure II.9 Vitesse de moteur.

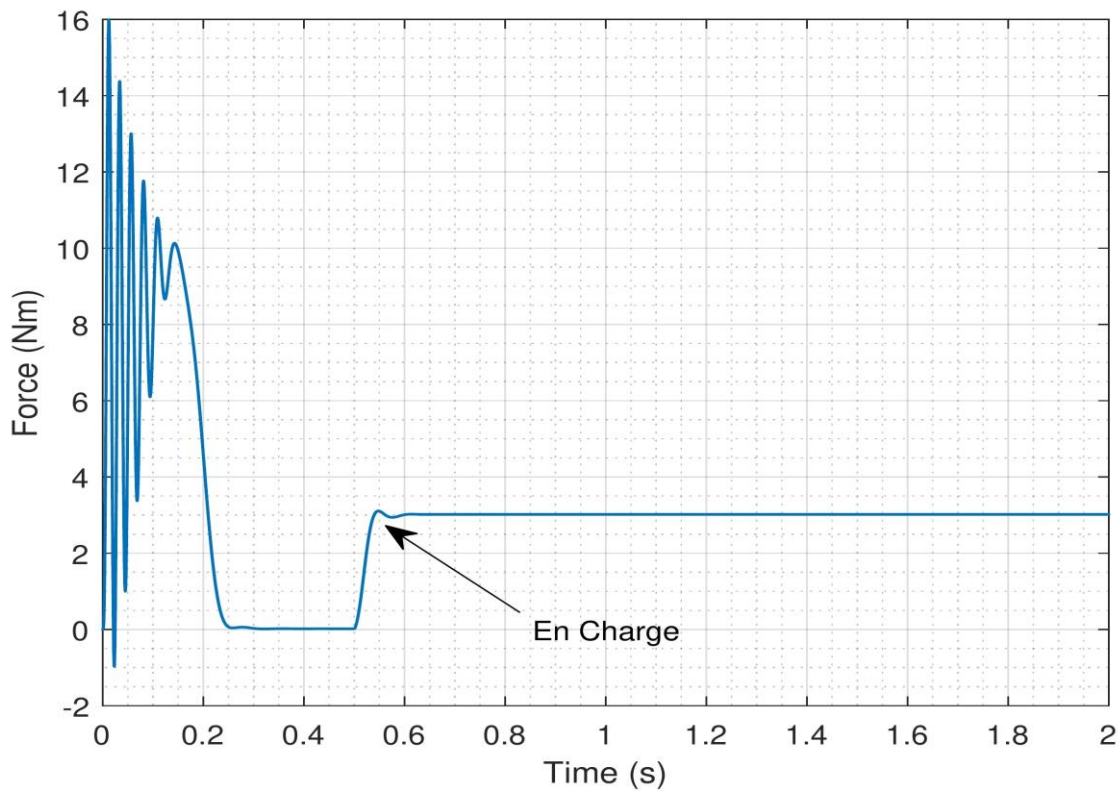


Figure II.10 Couple électromagnétique.

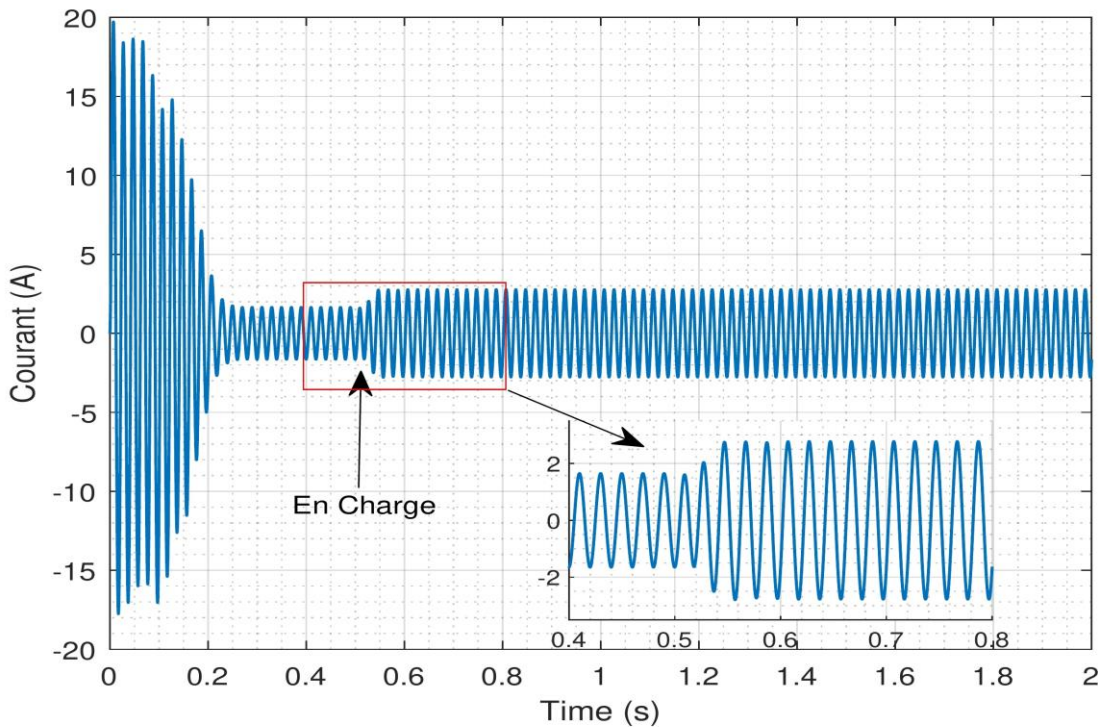


Figure II.11 Courant statorique phase A.

II.6. Interprétation des résultats de simulation de la MAS saine :

La simulation de la machine asynchrone alimentée par des tensions sinusoïdales, nous a permis d'observer le comportement de celle-ci. Lors du démarrage, on constate des pics de courant importants qui s'atténuent avec l'évolution du régime transitoire. Les courbes présentées par les figures (II.7 jusqu'à II.12) détaillent l'évolution de la vitesse, du couple électromagnétique, et des courants statoriques à vide et en charge. Les deux figures (II.7) et (II.10) représentent l'évolution de la vitesse de rotation de la machine en fonction du temps, en régime transitoire nous remarquons un accroissement linéaire de la vitesse au début de démarrage, qui en régime permanent se stabilise à 314 rpm, puisque la machine possède une paire de pôles. A l'application du couple résistant à $t=0.5s$, à partir de cet instant la vitesse décroît puisqu'elle est inversement proportionnelle à la charge, puis elle se stabilise à une certaine valeur (303 rpm). Les deux figures (II.8) et (II.11) représentent l'évolution du couple électromagnétique, au démarrage dans l'intervalle 0 et 0.5s, le couple est fortement pulsatoire, il atteint une valeur maximale de 16 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 0.5s on remarque le passage d'un régime à vide vers un régime en charge s'établit presque instantanément, sans oscillations, avec un très faible dépassement. L'application de couple résistant $C_r = 3N.m$ à l'instant 0.5s

la machine développe un couple électromagnétique qui augmente brusquement pour atteindre la valeur $C_{em}=3 \text{ N.m}$.

L'évolution des courants statoriques absorbés par la phase A du stator est illustrée dans les figures (II.9) et (II.12) En régime transitoire, les courants oscillent autour de l'axe zéro avec une amplitude de 20 A, puis il se stabilise à une valeur efficace de 1.7 A. En régime permanent et après l'application du couple résistant à l'instant $t=0.5\text{s}$, les courants augmentent pour atteindre une valeur maximale de 2.9 A et cela est dû au fait que la machine faisant appel à un sur plus de courant pour faire face à ce couple résistant.

Conclusion :

Nous avons bien illustré, dans ce chapitre, le modèle multi enroulement qui tient compte de la structure complète du rotor. Le choix d'un tel modèle est imposé par l'objectif de pouvoir simuler une rupture de barre ou de portion d'anneaux de court-circuit au rotor. Pour cela, nous avons représenté toutes les équations de divers types de barres et de portions d'anneaux du rotor. Puis fait une simulation de moteur sain (à vide et en charge) et bien analysée les résultats.

Dans le chapitre suivant, nous attendrons impatiemment les résultats de simulation et les défauts de ce modèle envers différents essais (défaillant des barres et des anneaux) qui seront étudiés puis analysés.

Chapitre III :

*Simulation et analyse de la
MAS au présence des
défauts*

Introduction :

Dans ce chapitre, nous présentons des simulations d'une machine asynchrone pour étudier l'influence de ruptures d'une ou plusieurs barres rotoriques et l'influence des anneaux sur les grandeurs courantes, vitesse et couple électromagnétique de la machine. Pour cela, un programme de simulation sera écrit sous Matlab afin de nous donner l'évolution temporelle des différents signaux pour un fonctionnement sain et en défaut. Dans ce contexte, l'analyse spectrale des courants statoriques est effectuée par l'algorithme de la transformée de Fourier rapide FFT sous Matlab.

III.1.Modèle de la machine Asynchrone en présence des défauts rotoriques :

III.1.1.Résultats de la simulation en présence de défaut de rupture de barres :

III.1.1.1. Cas d'une barre cassée (N°1) à $t=0.8$ s :

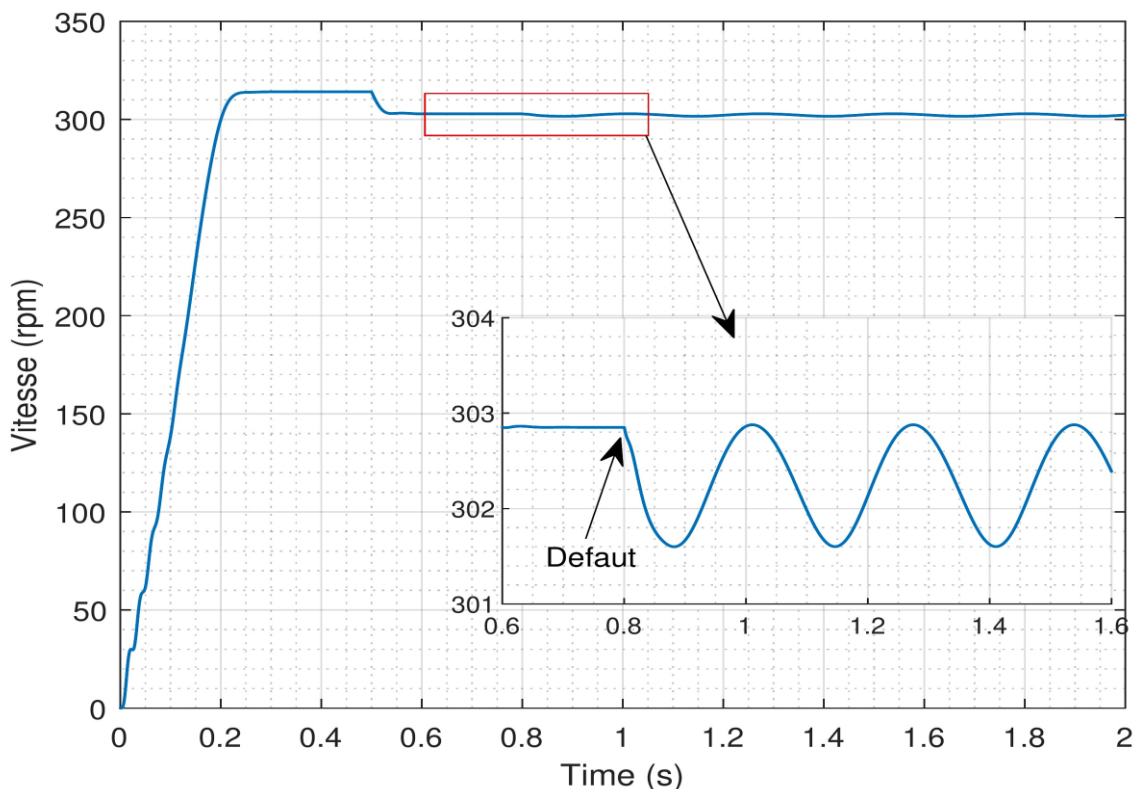


Figure III.1 Vitesse de moteur.

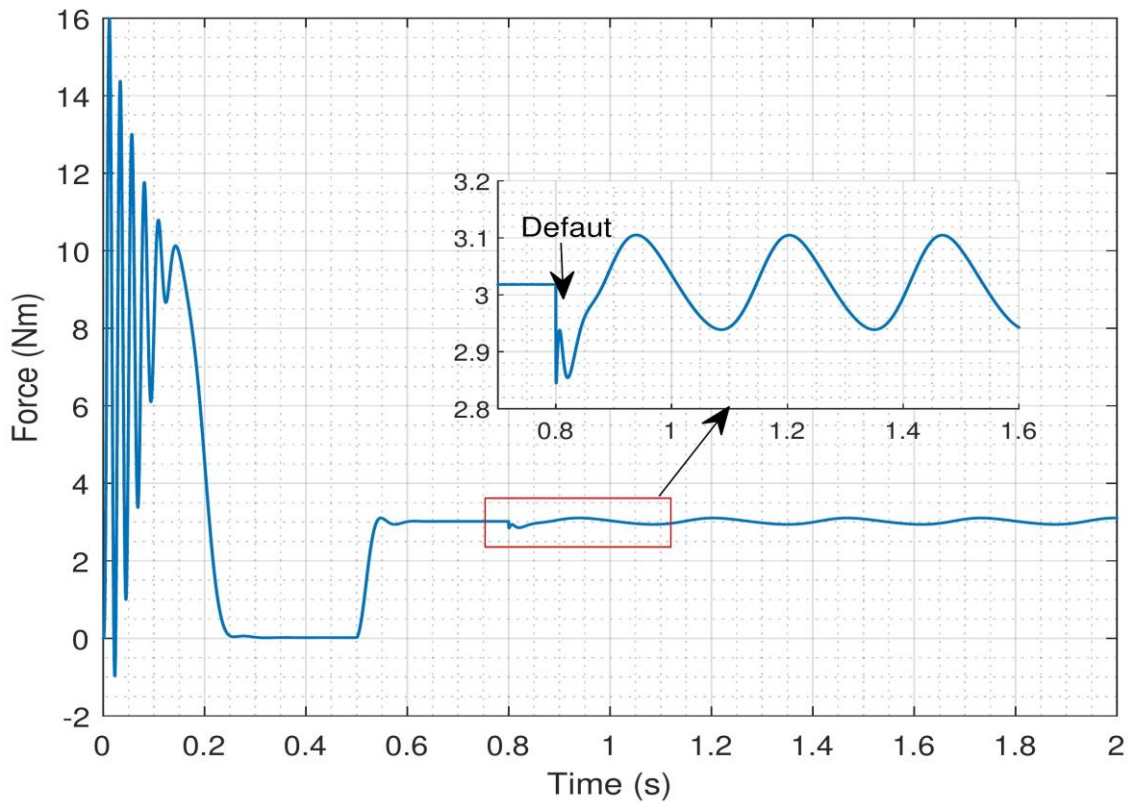


Figure III.2 Couple électromagnétique.

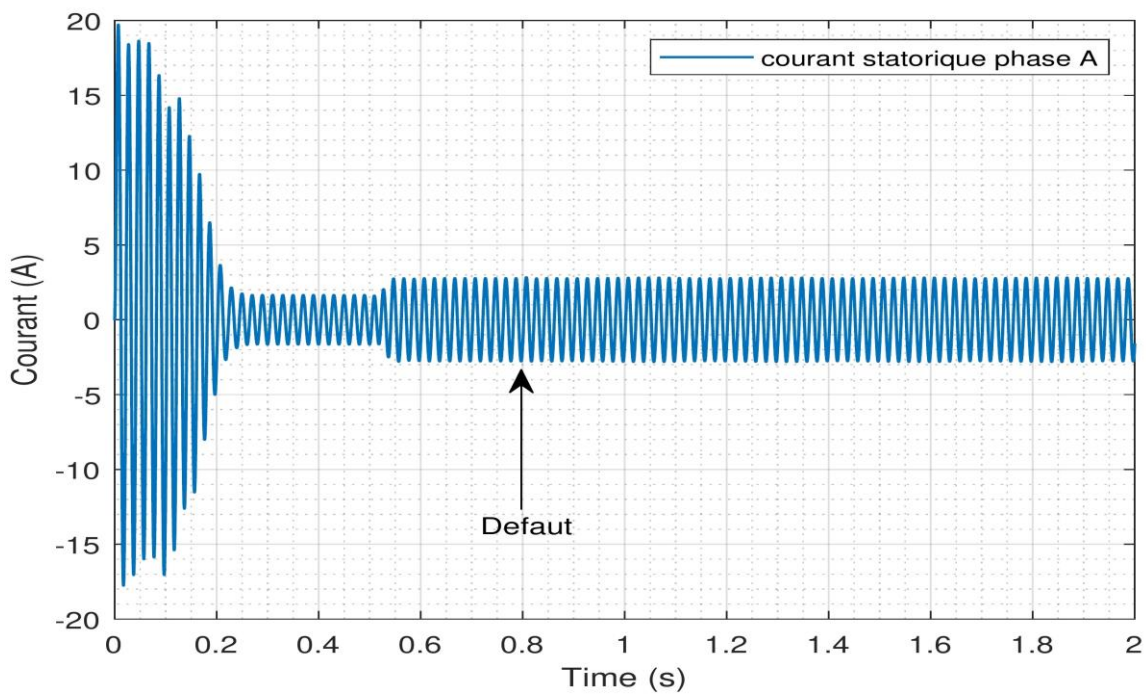


Figure III.3 Courant statoriques phase A.

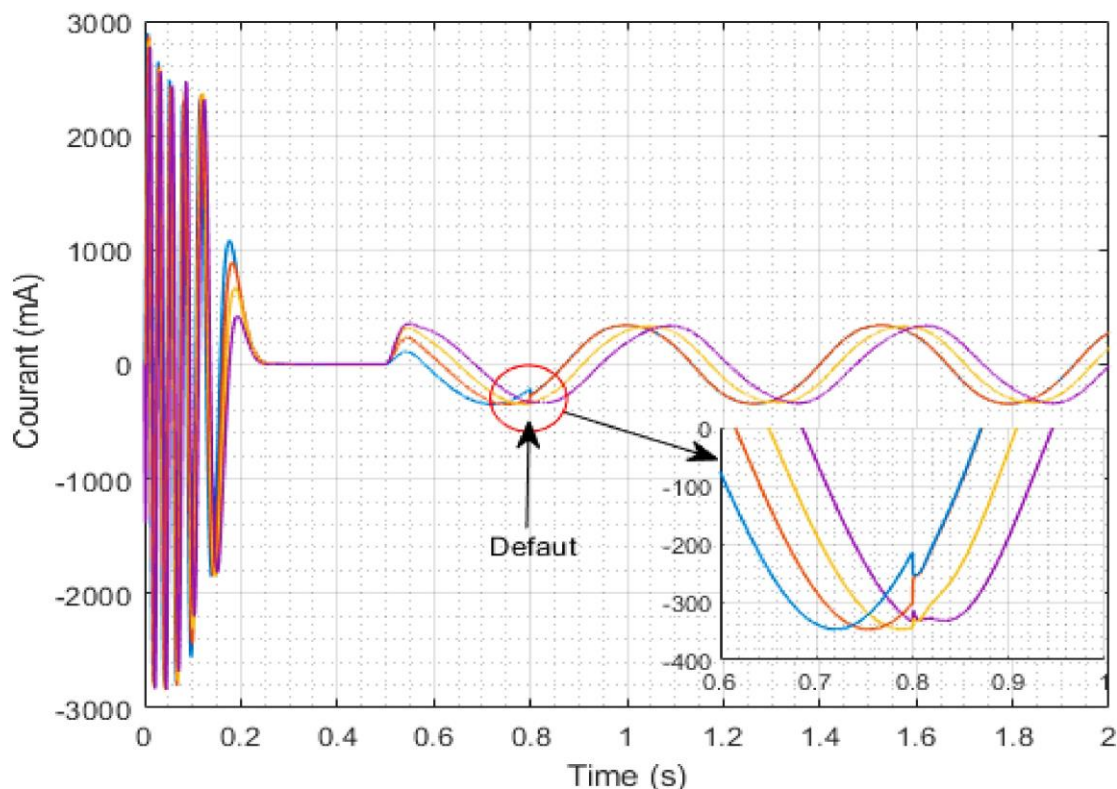


Figure III.4 Courant dans les barres rotoriques.

III.1.1.1.1. Analyse des résultats dans le cas d'une barre cassée (N° 1 à $t = 0.8s$) :

Le démarrage s'effectue à vide sous tension nominale avec une alimentation triphasée sinusoïdale équilibré. A l'instant $t = 0.5s$, la machine été soumise à un couple résistance nominale $C_r = 3Nm$. Dans ce cas-là, le couple électromagnétique vient pour équilibrer le couple résistance, et la vitesse chute alors à la valeur de $303tr/m$. Ainsi, le courant rotorique augmente et atteint la valeur de 350 mA (voir les figure III.4). A l'instant $t = 0.8s$, on simule ainsi la rupture de la barre 1. Par conséquent, le courant dans cette barre s'annule en augmentant sa résistance de 200fois (voir la figure III.4). On constate l'apparition d'une légère oscillation dans courbe de la vitesse (figure III.1), dans le couple électromagnétique (figure III.9), ainsi qu'une très légère ondulation du courant statorique dans la phase A (figure III.3).

III.1.1.2. Cas d'une cassure de deux barres adjacentes (N° 1 à t=0.8s et N° 2 à t=1.4s) :

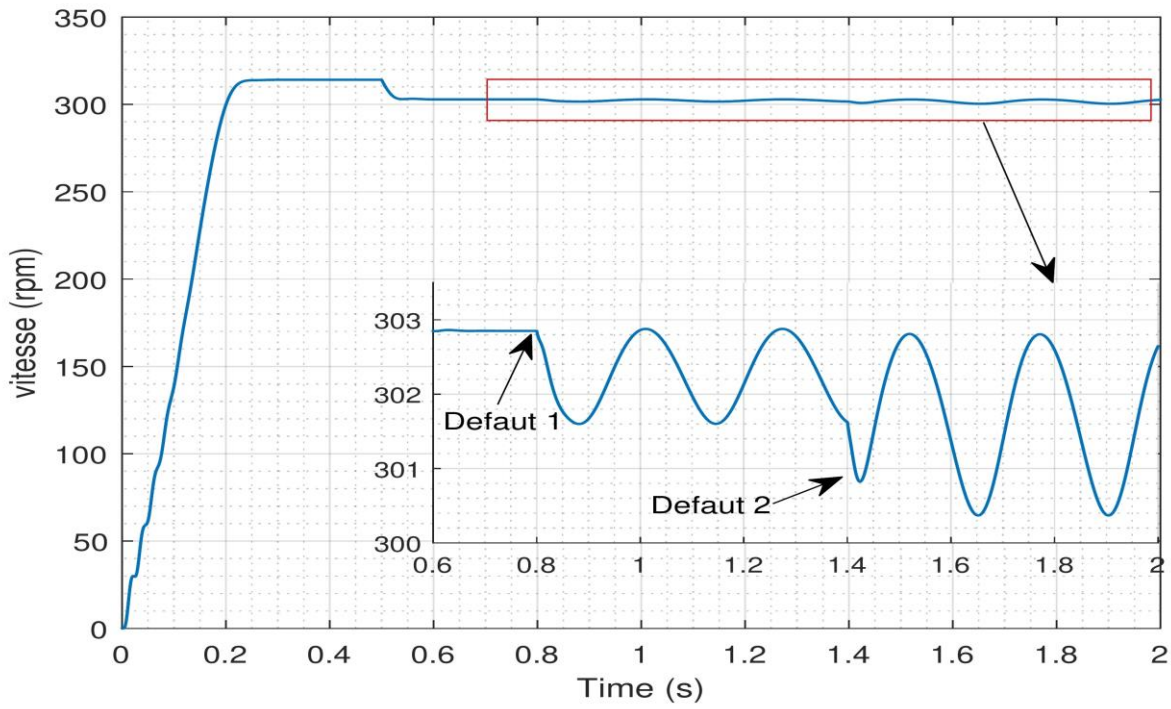


Figure III.5 La vitesse de moteur.

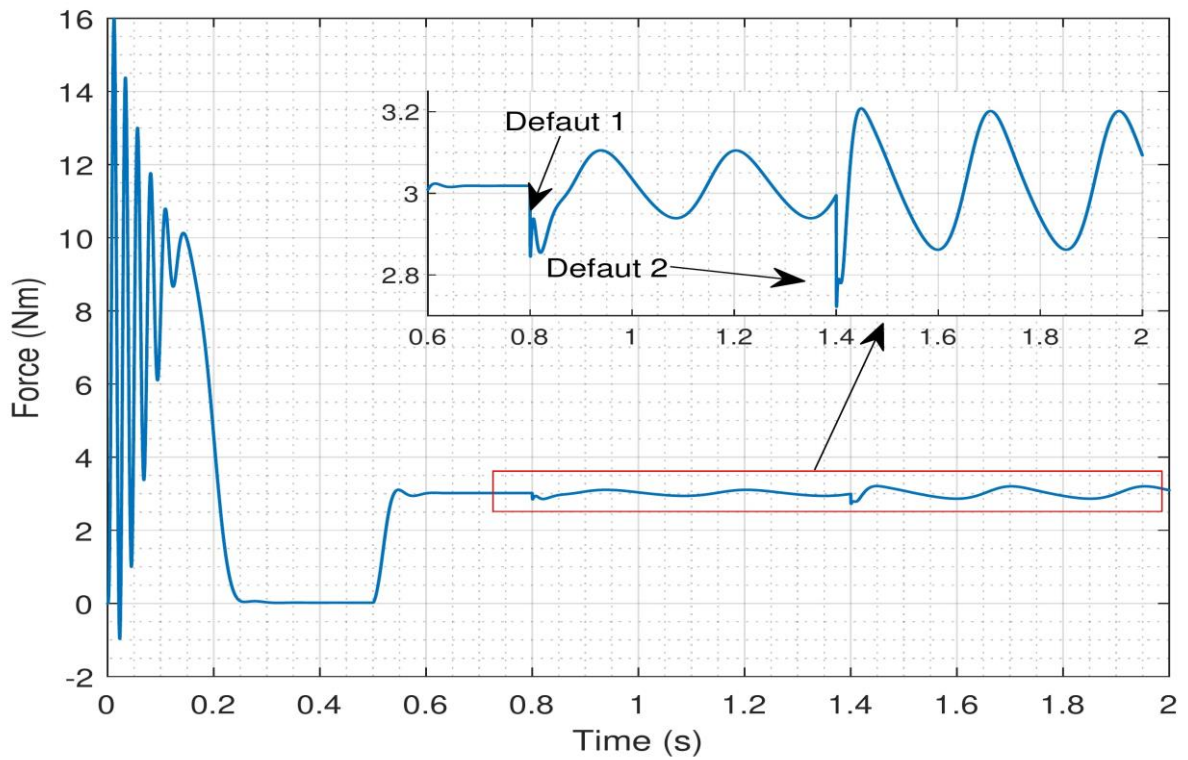


Figure III.6 Couple électromagnétique.

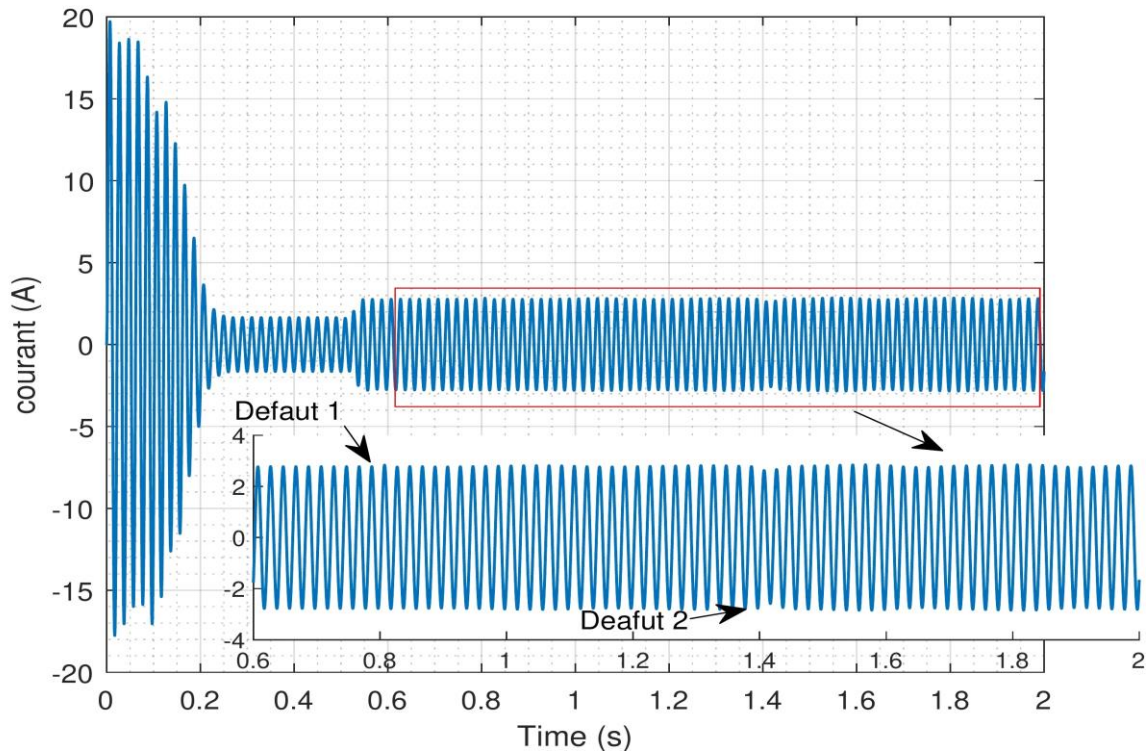


Figure III.7 Courant statorique de la phase A.

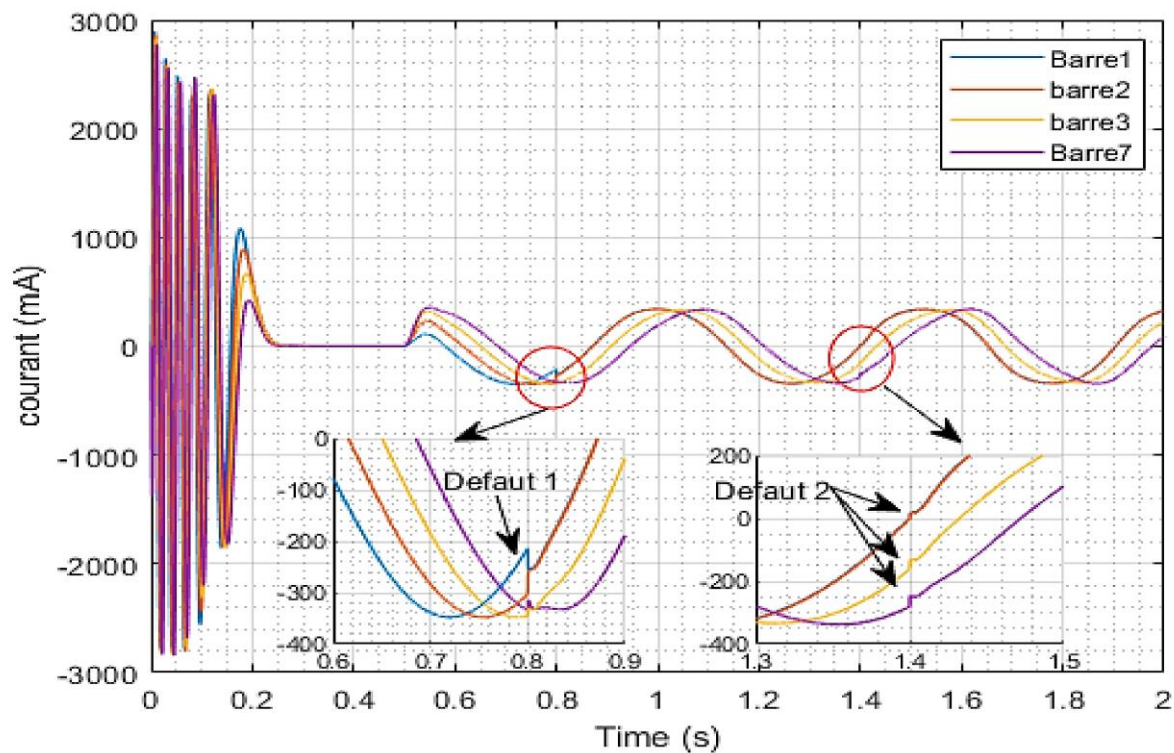


Figure III.8 Courant dans les barres rotoriques.

III.1.1.2.1. Analyse des résultats dans le cas d'une cassure de deux barres (N° 1 à $t=0.8s$ et N° 2 à $t=1.4s$) :

Nous simulons dans ce cas la rupture de deux barres afin de montrer l'influence du nombre de barres cassées sur le fonctionnement normal du MAS. Par conséquent, le courant dans ces barres s'annule fortement (voir figure III.8) et entraîne une surintensité dans les barres voisines (figure III.8). Ainsi, le courant qui parcourait la barre cassée est alors réparti dans les barres voisines, ce qui traduit l'augmentation de l'amplitude des ondulations dans les courbes de vitesse et du couple (voir les figures III.5 et III.6). Nous constatons également l'augmentation de l'amplitude des ondulations du courant statorique (voir figure III.7) et avec chaque barre cassée l'augmentation de l'amplitude augmente.

III.1.1.3. Cas de cassure de trois barres (N° 1, 2, et 7 à 0.8s, 1.2s et 1.5s) :

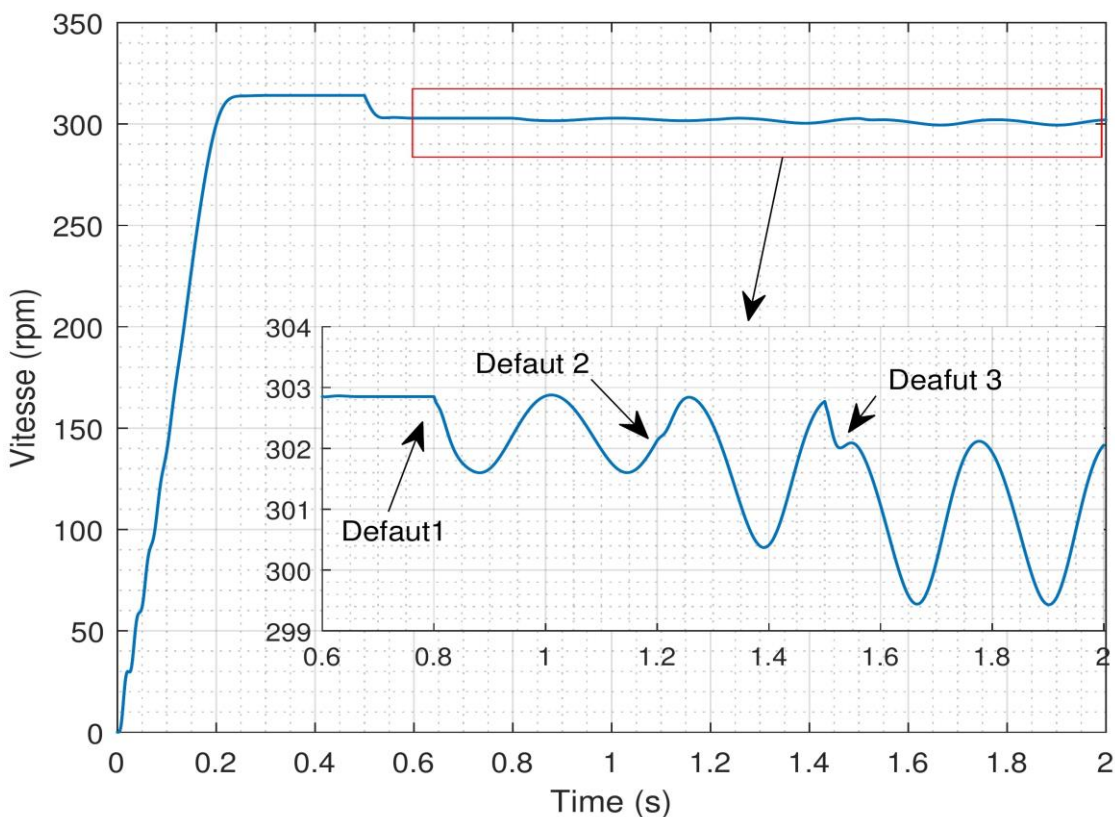


Figure III.9 Vitesse de moteur.

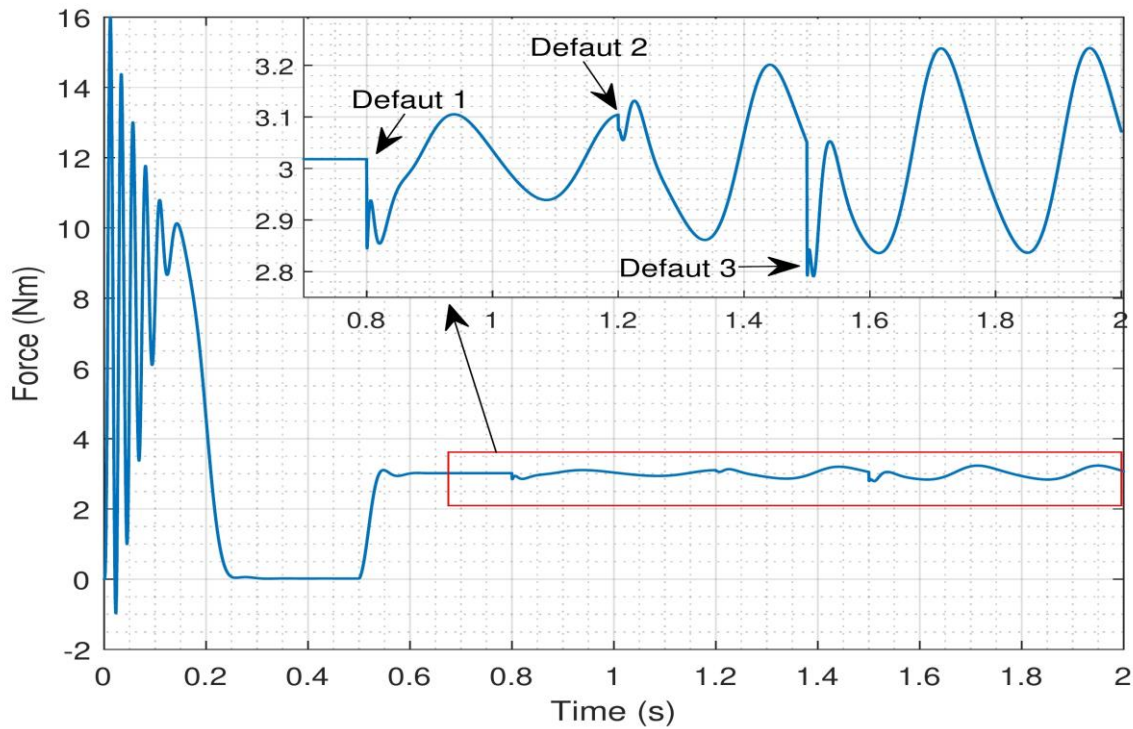


Figure III.10 Couple électromagnétique.

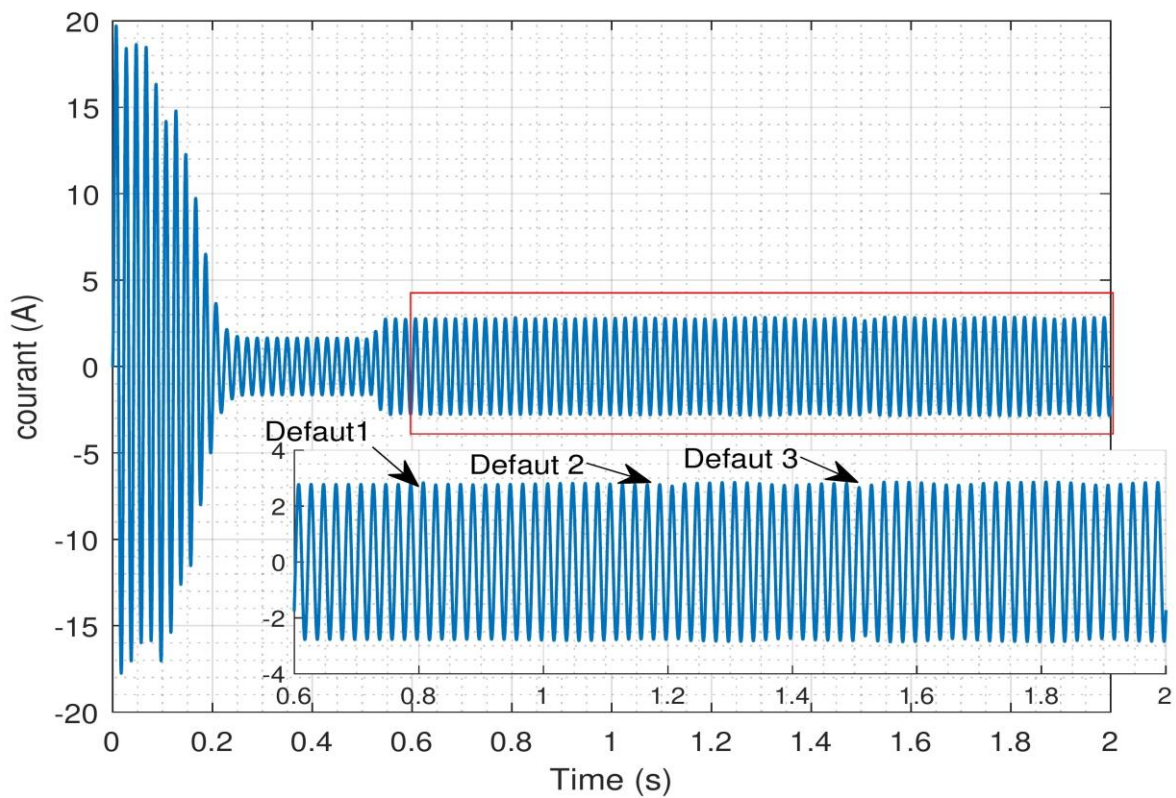


Figure III.11 Courant statorique de la phase A.

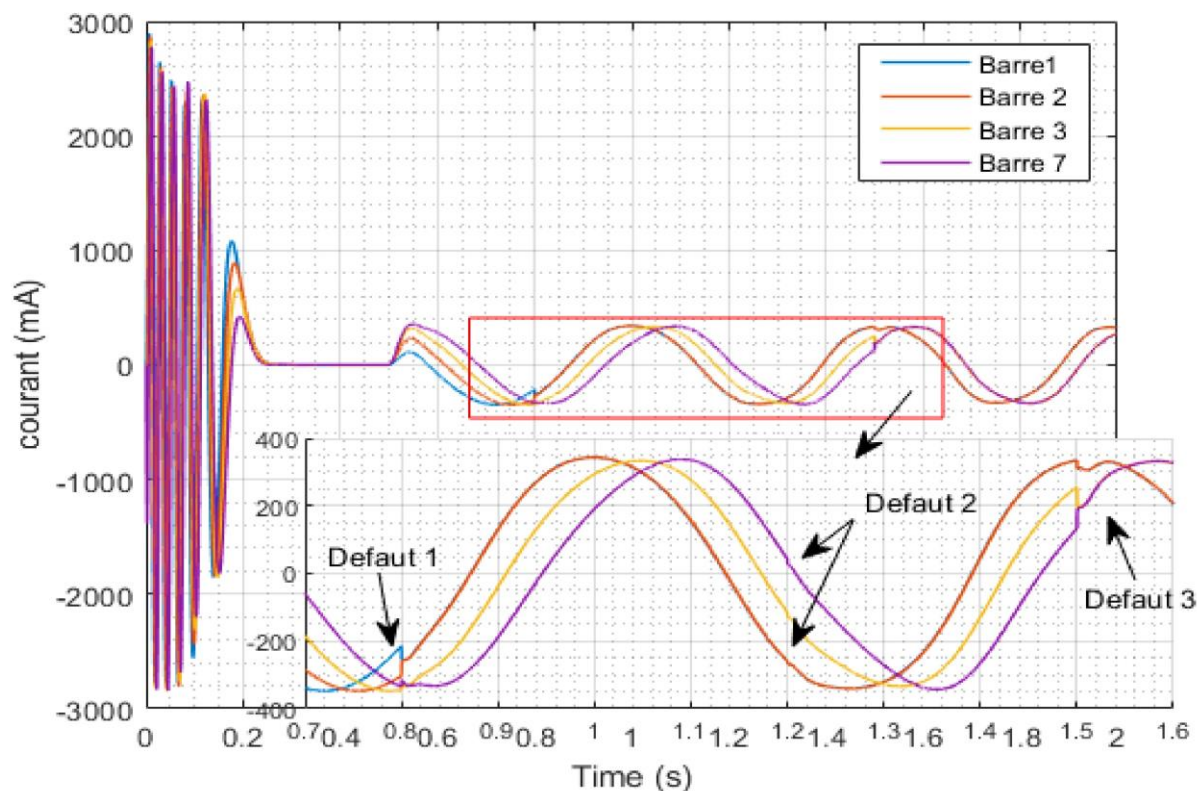


Figure III.12 Courant de barre rotorique.

III.1.1.3.1. Analyse des résultats dans le cas de cassure de trois barres (N° 1, 2, et 7 à 0.8s, 1.2s et 1.5s) :

Dans ce test, on présentera le cas de rupture de trois barres (voir figure III.12). Par conséquent, On obtient le même comportement de la machine dont on constate l'augmentation des amplitudes des surintensités des barres voisines, (voir la figure III.12) ainsi que l'augmentation des amplitudes des ondulations de la vitesse et du couple, (voir les figures III.9 et III.10) plus une augmentation d'amplitudes des courants statoriques (voir les figures III.11). Lorsque le défaut atteint trois barres cassées, on constate que le courant maximum traversant les barres adjacentes est supérieur au courant rotorique obtenu avec une cage d'écureuil saine. De ce fait, une augmentation anormale du courant dans les barres provoque un échauffement local et conduit à une nouvelle rupture [10]. D'après l'analyse précédent, on peut conclure que la détection d'une ou plusieurs défauts de barres rotorique est très difficile si l'on ne se base que sur l'analyse des signaux [10].

III.1.2. Résultats de la simulation en présence de défaut de rupture d'anneaux :

III.1.2.1. Cas d'n'anneau cassée (N°1) à t=0.8 s :

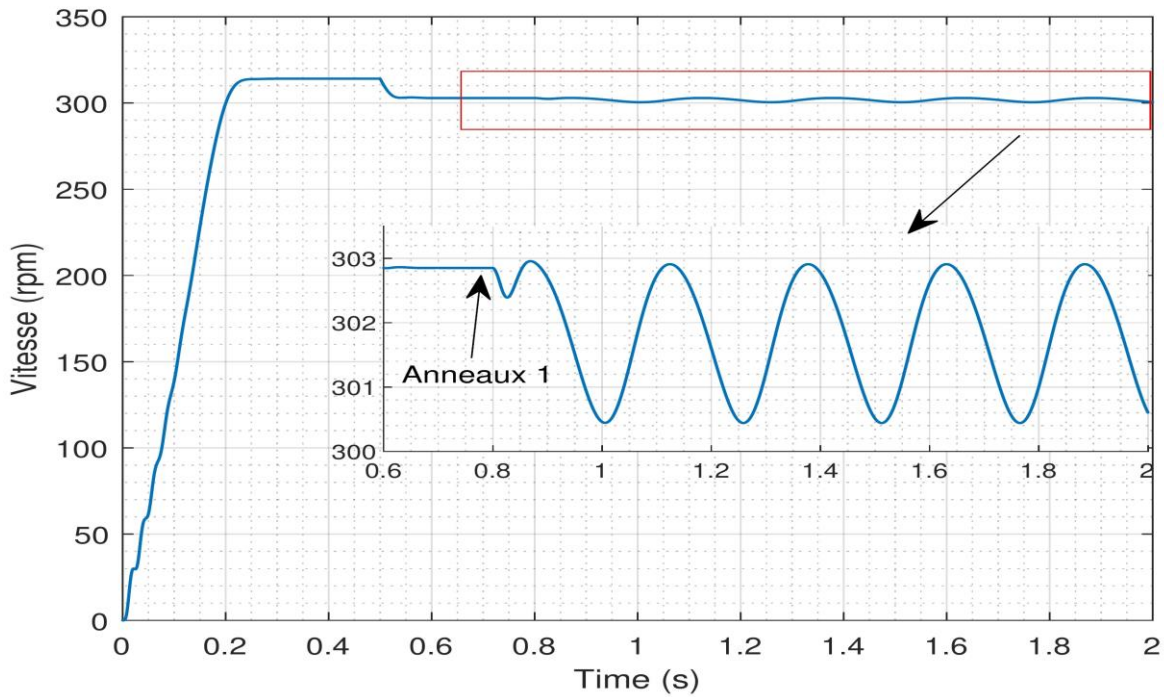


Figure III.13 Vitesse de moteur.

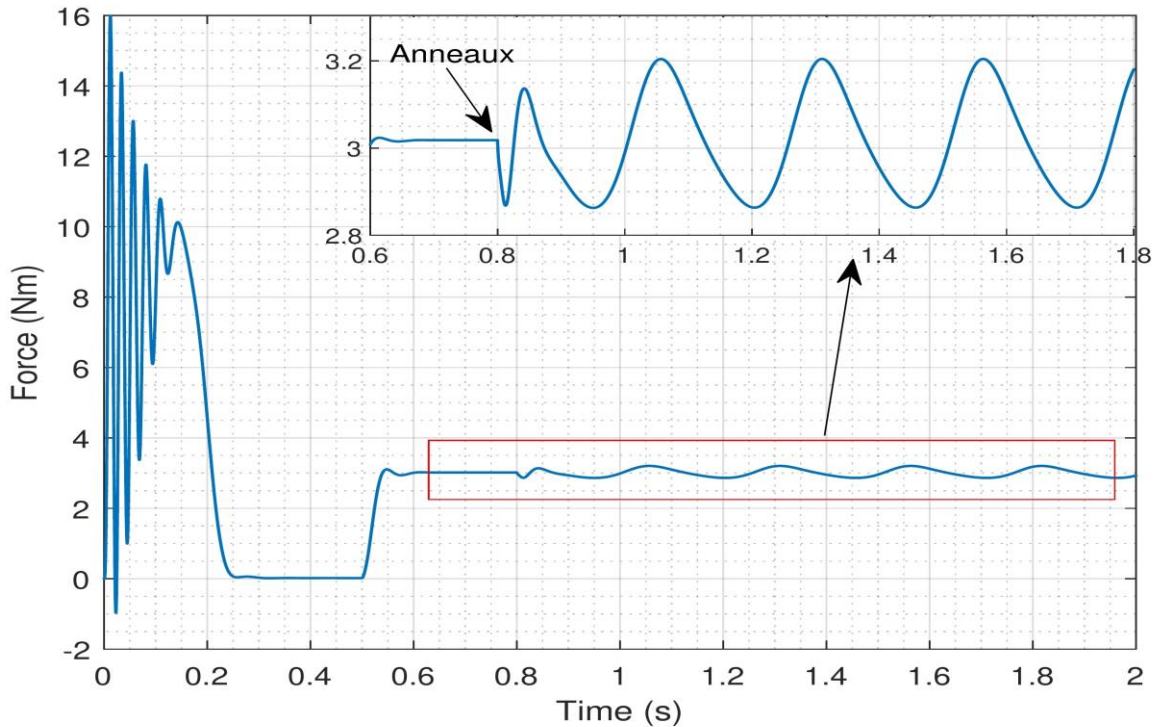


Figure III.14 Couple électromagnétique.

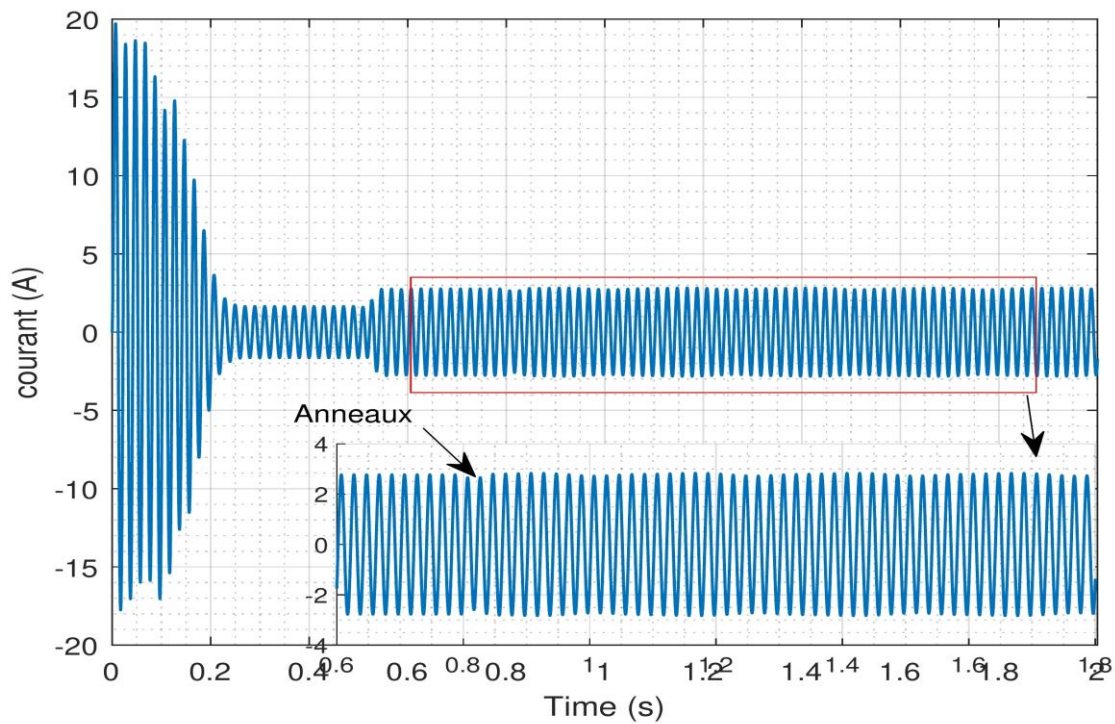


Figure III.15 Courant statorique de la phase A.

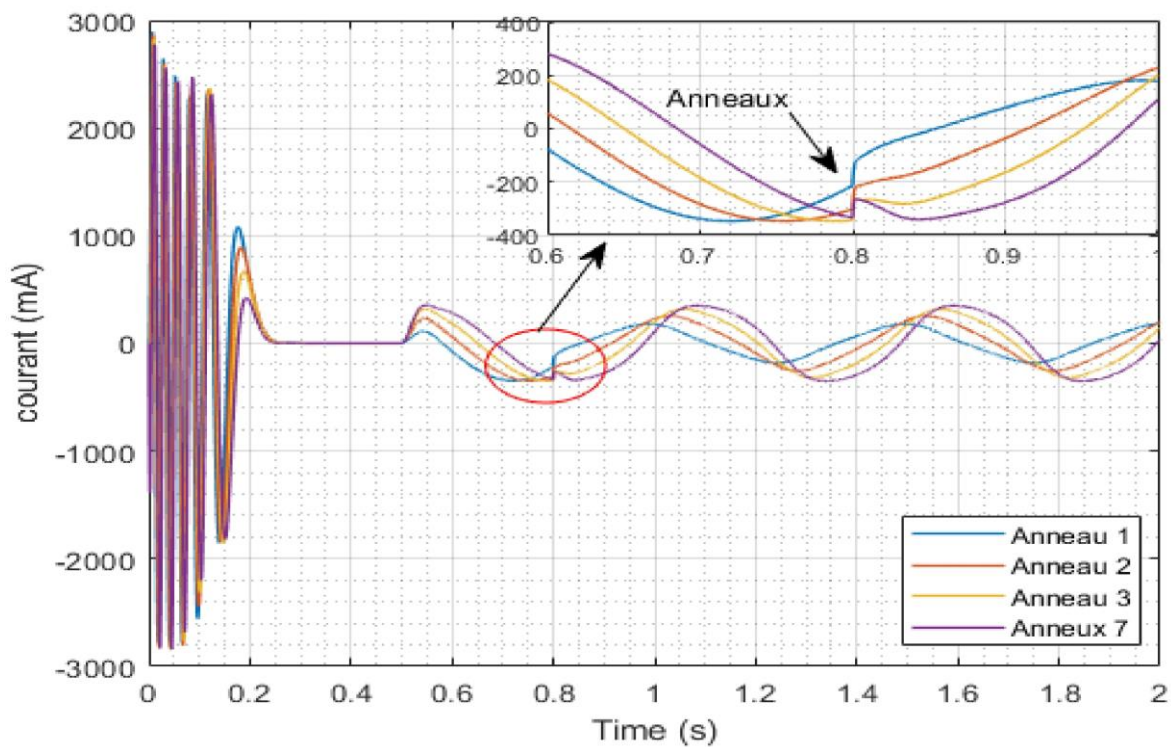


Figure III.16 Courant dans les anneaux.

III.1.2.1.1. Analyse des résultats dans le cas d'un anneau cassé (N°1 à $t=0.8$ s) :

A l'instant $t=0.8$ s, on simule la rupture de l'anneau 1. Par conséquent, le courant dans cet anneau est annulé avec une augmentation dans les autres anneaux (voir la figure III.16). On constate l'apparition d'une légère oscillation dans la courbe de la vitesse (figure III.13), dans le couple (figure III.14), ainsi qu'une très légère ondulation du courant statorique (figure III.15).

III.1.2.2. Cas de deux anneaux cassés (N°1 à $t=0.8$ s et N°2 à $t=1.4$ s) :

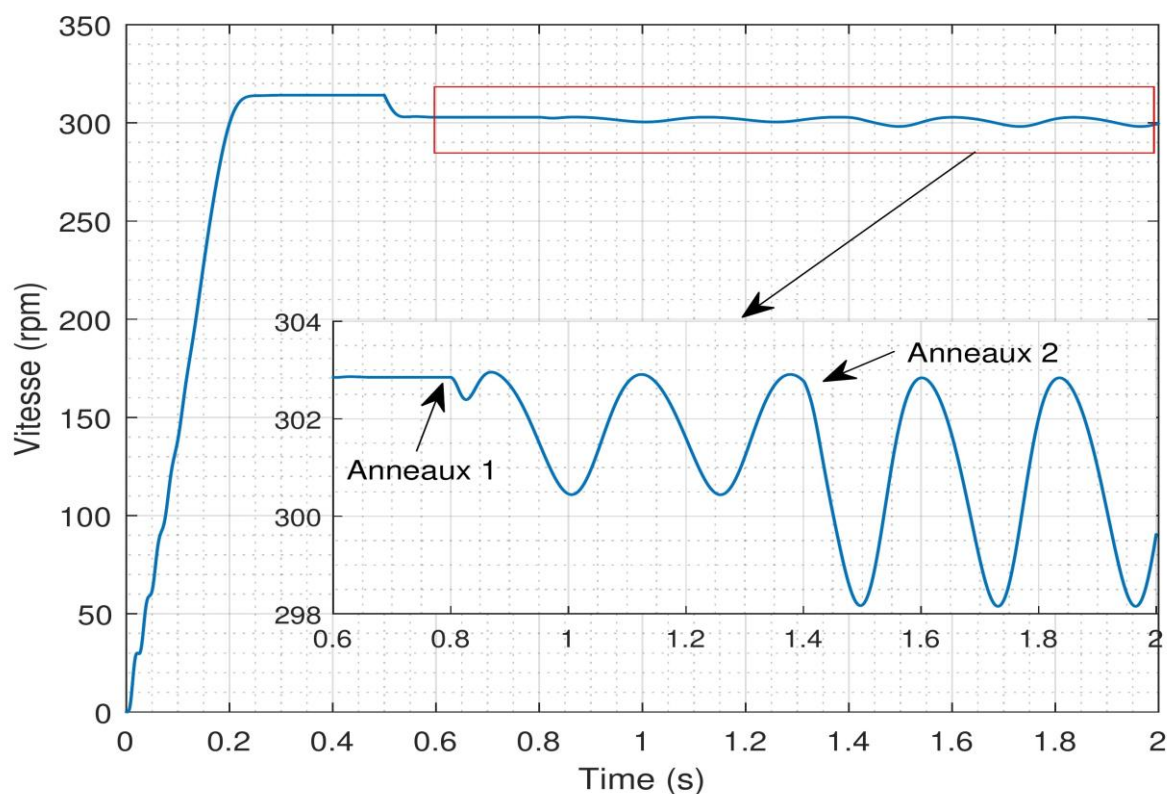


Figure III.17 Vitesse de moteur.

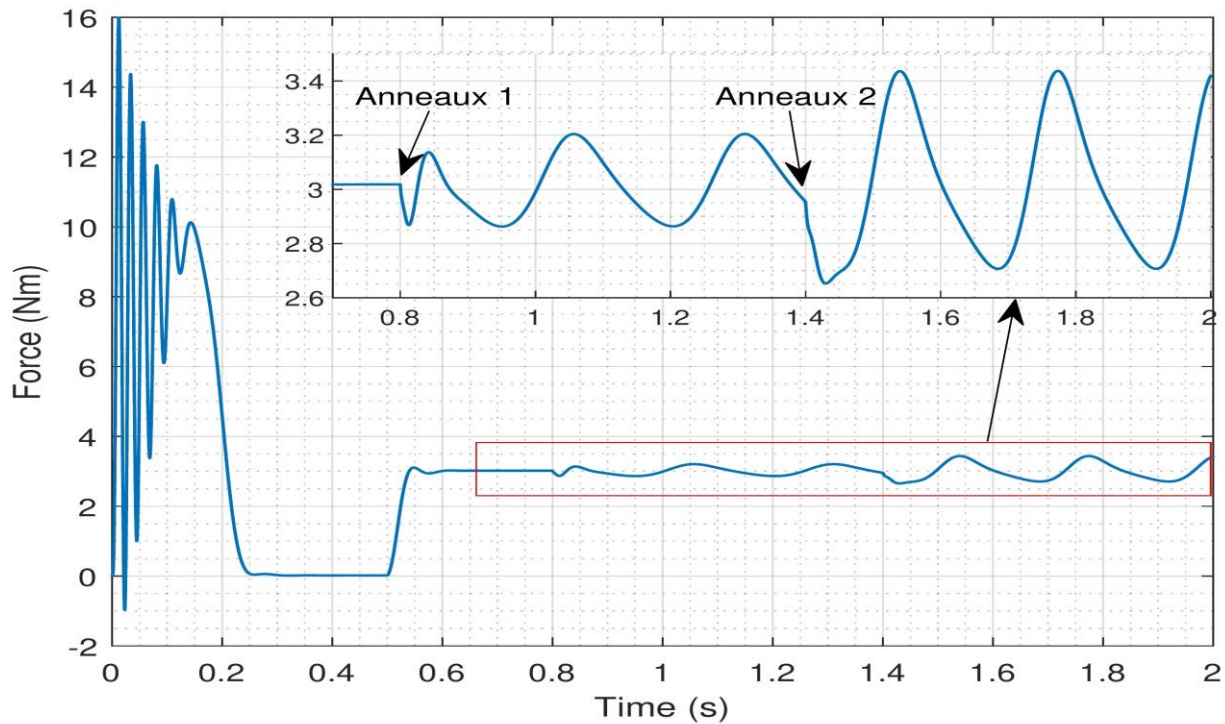


Figure III.18 Couple électromagnétique.

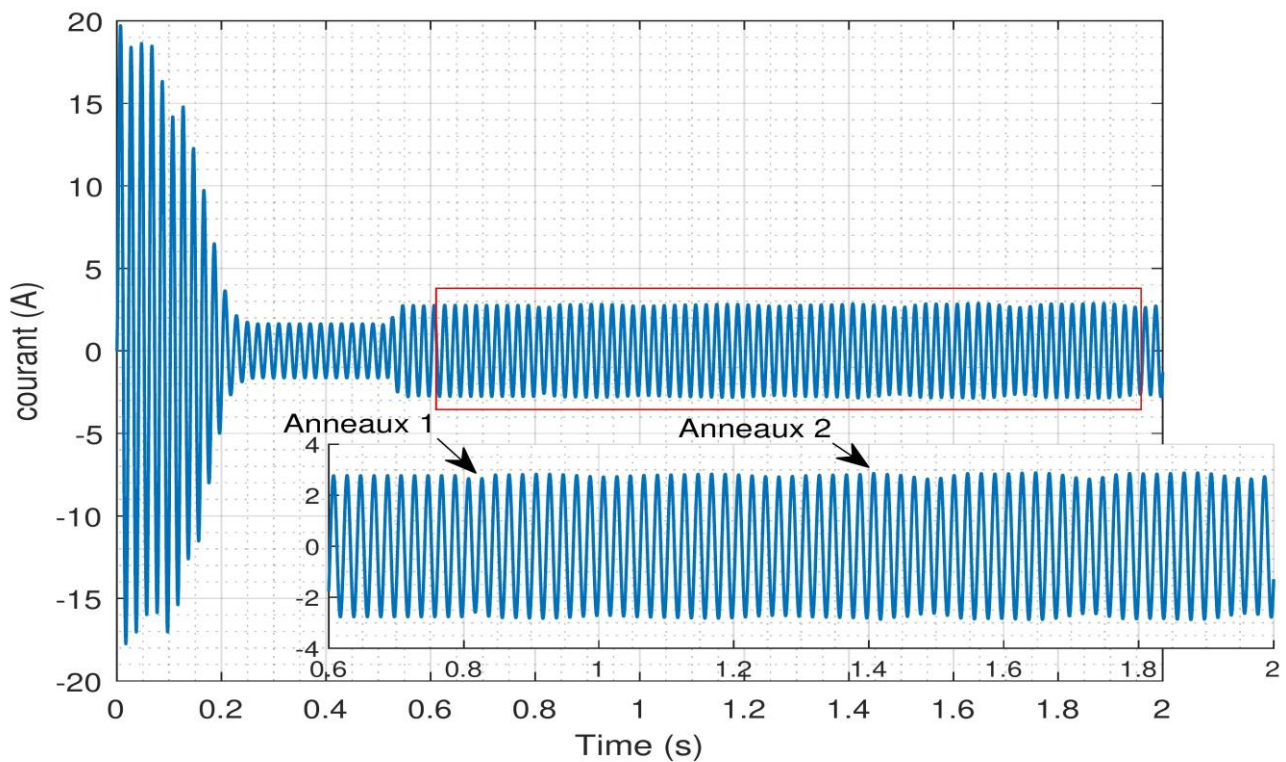


Figure III.19 Courant statorique de la phase A.

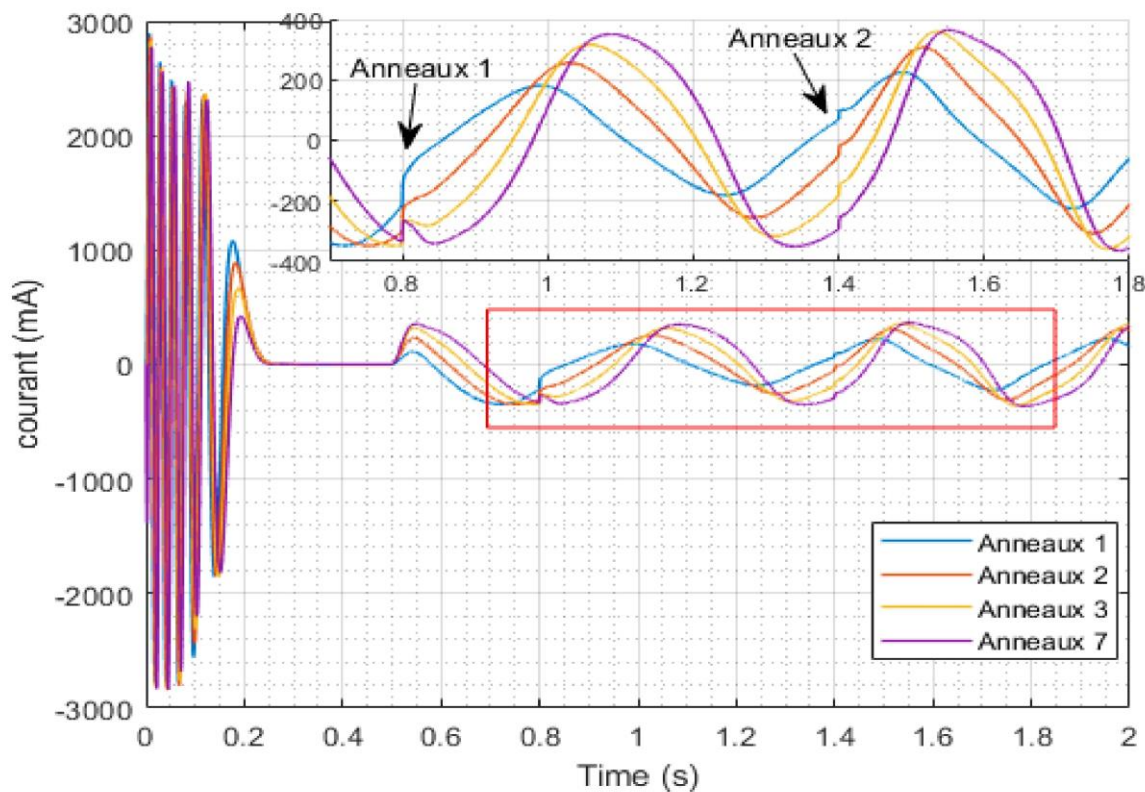


Figure III.20 courants dans les anneaux.

III.1.2.2.1. Analyse des résultats dans le cas de deux anneaux cassés (N°1 à $t=0.8$ s et N°2 à $t=1.4$ s) :

Nous simulons dans ce cas la rupture de deux anneaux afin de montrer l'influence du nombre d'anneau cassés sur le fonctionnement normal du MAS. Par conséquent, le courant dans ces anneaux s'annule fortement et entraîne une surintensité dans les anneaux voisines (figure III.20). Ainsi, le courant qui parcourait l'anneau cassé est alors réparti dans les anneaux voisines, ce qui traduit l'augmentation de l'amplitude des ondulations dans les courbes de vitesse et du couple (voir les figures III.17 et III.18). Nous constatons également l'augmentation de l'amplitude des ondulations du courant statorique (voir figure III.19) et avec chaque anneau cassé l'augmentation de l'amplitude augmente et les grandeurs (vitesse et couple et courant) déforme jusqu'à plusieurs anneaux cassés le moteur arête.

III.2. Analyse spectrale du courant statorique :

L'analyse précédente ne permet pas une visualisation adéquate et une détection exacte des défauts. Ainsi, la distinction de toutes modulations ou oscillations perturbantes des grandeurs mesurables de la machine est rendu difficile si on se base seulement sur l'analyse des signaux temporels. Pour pouvoir discerner facilement la modulation de l'amplitude de fréquence ($2 \cdot g \cdot f_s$) qui est la fréquence caractérisant les défauts, une analyse de ces signaux dans le domaine fréquentiel devient une nécessité. C'est là où l'analyse spectrale du courant statorique sera introduite elle reste toujours parmi les méthodes les plus employée depuis de nombreuses années qui servent à détecter les défaillances dans les machines électriques.

De ce fait, nous déterminons le contenu fréquentiel du courant statorique tout en utilisant la transformée de Fourier rapide (FFT), et par la suite nous retrouverons les raies et les bandes latérales associées aux défauts rotoriques [11].

L'analyse par la transformée de Fourier rapide (FFT) permet de mettre en évidence les raies présentes dans le spectre du signal.

Dans ce contexte, plusieurs travaux ont été présentés dans la littérature de diagnostic afin de présenter des solutions performantes pour les ruptures des moteurs asynchrone à cage. L'auteur a présenté une étude détaillée sur les outils de diagnostic appliqués à la machine asynchrone triphasée à cage d'écureuil [11]. Ainsi, un travail de thèse présenté par [1] cible spécifiquement la détection des défauts statorique et rotorique dans la machine asynchrone en utilisant l'analyse par FFT et ondelettes, dont l'auteur a présenté une étude large sur cette technique FFT, ce qui a permis d'avoir des résultats acceptables.

Tenant compte des techniques et des résultats obtenus dans les travaux [1] et [11], nous présentons les résultats de simulation de l'analyse du courants statorique Isa par FFT en régime permanent et en charge.

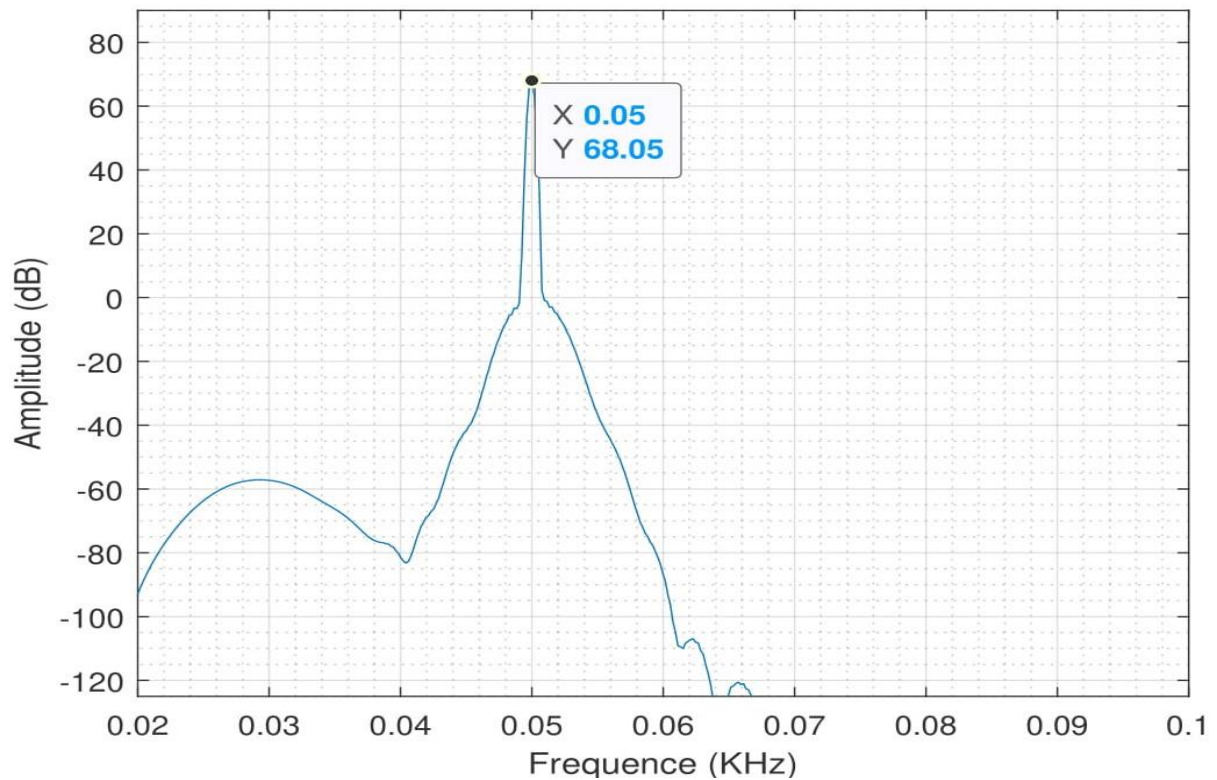


Figure III.21 Spectre du courant statorique dans la plage [20-100] Hz.

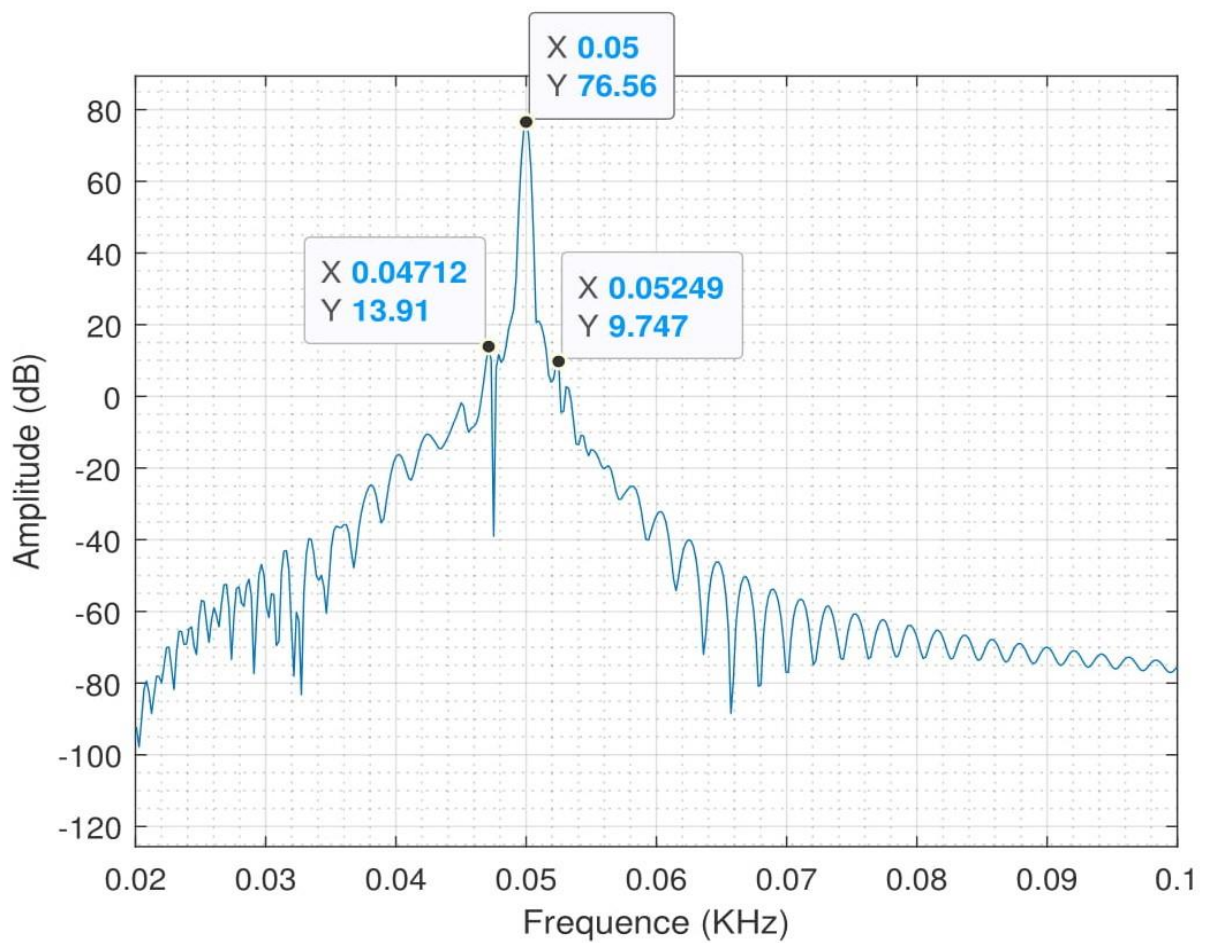


Figure III.22 Spectre du courant statorique en présence d'une cassure de barre.

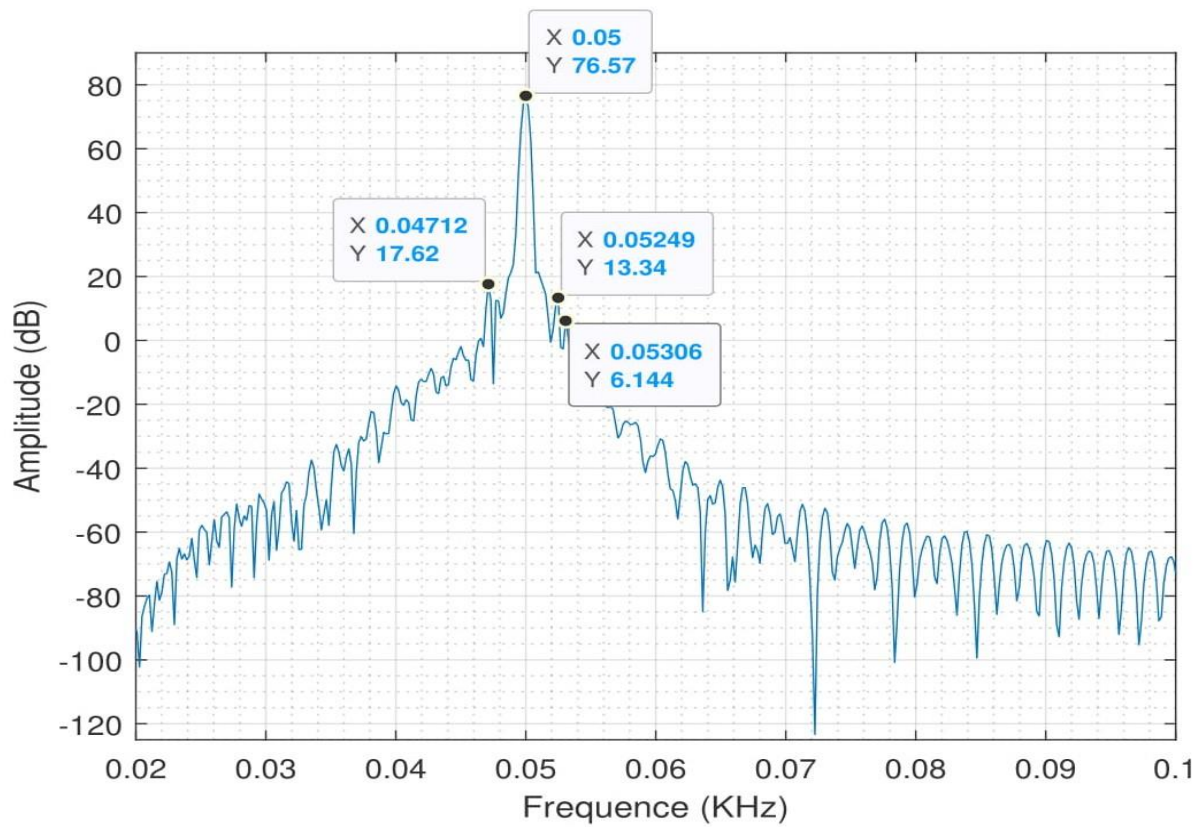


Figure III.23 Spectre du courant statorique en présence de deux barres cassées.

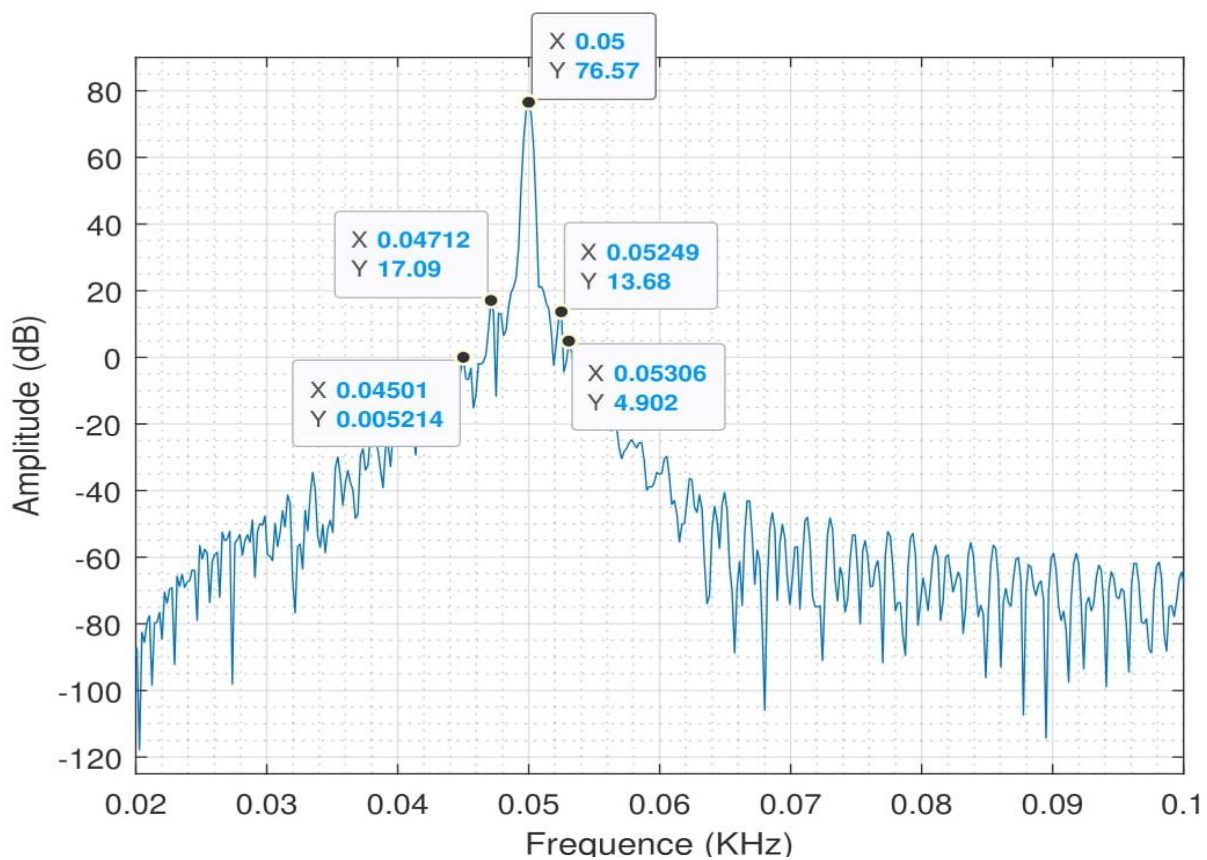


Figure III.24 Spectre du courant statorique en présence de trois barres cassées.

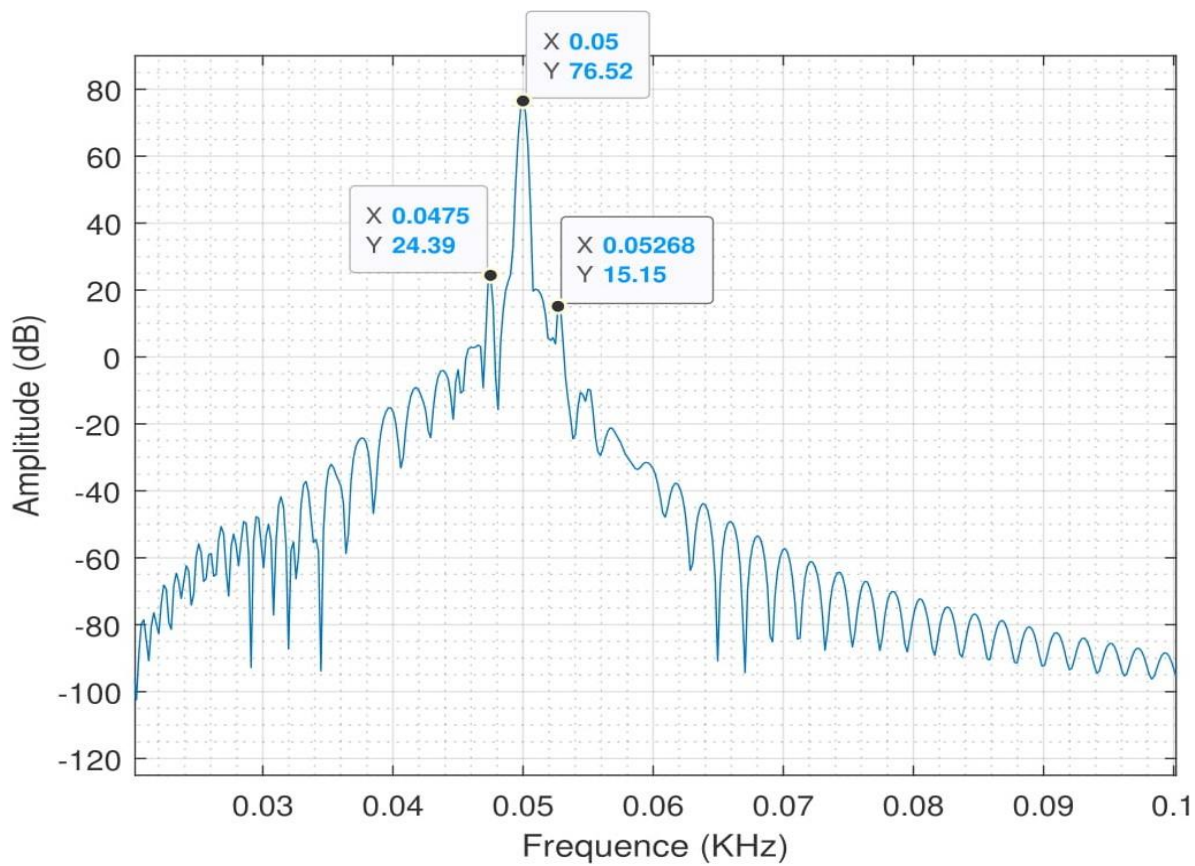


Figure III.25 Spectre du courant statorique en présence d'un anneau cassé.

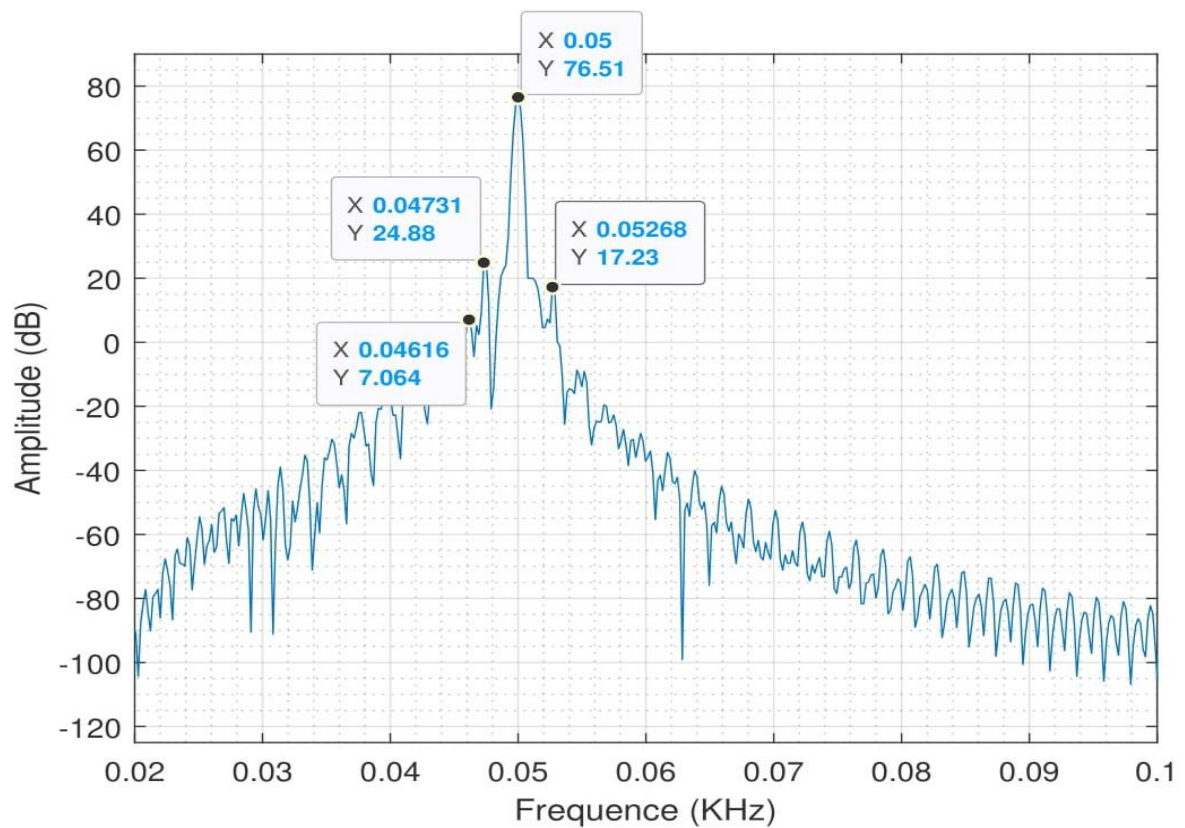


Figure III.26 Spectre du courant statorique en présence de deux anneaux cassés.

III.2.1. Interprétation des résultats l'analyse spectral du courant statorique :

Les figure (III.21), (III.22), (III.23), (III.24), (III.25) et (III.26) mettent en évidence l'allure du spectre fréquentielle du courant statorique de la machine asynchrone à cage d'écureuil, en charge à l'état sain et en présence de défaut de cassure de barres rotoriques. Ensuite, la figure (III.21) présente le contenu spectral du courant statorique en régime permanent lorsque la machine ne présente aucuns défauts (fonctionnement sous conditions nominales). Ainsi, nous n'observons aucunes raies latérales mais juste la fondamentale oscillant à 50 Hz.

La (figure III.22) montre le spectre du courant dans le cas d'une barre casée, dont la rupture de barre manifeste par la création d'harmonique de fréquence $(1 \pm 2 * g) fs$.

Dans notre cas, le glissement est de $g = 0.056$ dont les fréquences sont de valeurs $fb1 = 47.1\text{HZ}$ et $fb2 = 52.4\text{HZ}$ avec des amplitudes qui atteignent 13.9db et 9.7db nous montre une apparition des raies au voisinage de la fréquence fondamentale 50HZ. Ces fréquences ont pour expression $(1 \pm 2 * g) fs$, ($k = 1, 2, 3, \dots$). Elles apparaissent sous formes de raies latérales. Lors de la rupture du second défaut, on constate l'augmentation des amplitudes avec des raies à $(1 \pm 4 * g) fs$. Ainsi de suite avec la rupture du troisième défaut et le quatrième défaut pour arriver à l'expression finale, en tenant compte des harmoniques de raies latérales qui aura pour expression $(1 \pm 2 * g) fs$ dont leurs amplitudes évoluent avec la rupture de barres adjacentes [11].

Les figures (III.23) et (III.24) représentent le spectre du courant statorique en fonction avec deux et trois barres cassées, et les figures (III.25) et (III.26) représentent le spectre du courant statorique en fonction d'un anneau et deux anneaux cassée. Une apparition des raies latérales au voisinage du fondamental correspondant aux raies de défaut.

Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté les résultats de simulation d'une machine en présence d'un ou plusieurs cassures des défauts (barres et anneaux), Cette étude nous a permis d'identifier l'impact de défaut sur l'évolution temporelle des différentes grandeurs tels que les courants, la vitesse et le couple électromagnétique de la machine asynchrone à cage d'écureuil.

D'après les résultats l'effet du défaut de rupture des barres ou des anneaux provoque des oscillations dans le couple électromécanique et dans la vitesse, ainsi qu'une modulation de l'enveloppe du courant statorique, l'amplitude de ces oscillations augment avec le nombre des barres cassées et le nombre des anneaux cassée.

Nous avons ensuite étudié l'analyse spectrale du courant statorique après introduction de la transformation de Fourier rapide (FFT), nous a permis de déterminer la composition fréquentielle de ce signal et par la suite retrouver les raies latérales associées aux défauts.

D'après ces résultats, on constate que la présence des harmoniques $2 \cdot g \cdot f_s$ est un signe de l'existence du défaut et leurs amplitudes indiquent son degré de sévérité.

Conclusion
Général

Conclusion générale :

L'évolution croissante des machines asynchrones dans les secteurs industriels oblige certains utilisateurs à se prémunir contre l'apparition d'un défaut provoquant le plus souvent un arrêt intempestif de la machine. Le travail présenté traite donc du diagnostic de défauts rotoriques et plus particulièrement la rupture de barres et des anneaux pouvant survenir au sein de la cage d'écoreuil des machines asynchrones.

Dans ce manuscrit, nous avons présenté un modèle externe de simulation de la machine asynchrone à cage d'écoreuil en régime sain. Cette modélisation consiste à la résolution numérique du système d'équation différentielle.

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.

Ainsi, la modélisation de la machine en présence des défauts rotorique, nous a permis de mettre en évidence un modèle de la machine asynchrone à cage d'écoreuil en présence de défaut. De ce fait, le modèle utilisé permet de simuler pratiquement tous les défauts envisageables dans les circuits rotoriques. Nous avons étudié la rupture des barres rotoriques, et la rupture des anneaux de court circuited et ses influences sur le comportement de la machine. Les conséquences de ces défauts s'obtiennent en augmentant la résistance de la barre incriminée. Les résultats de simulation montrent que la rupture de barre et la rupture d'un 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.

Bibliographie :

- [1]: HAKIMA CHERIF « Détection des défauts statorique et rotorique dans la machine asynchrone en utilisant l'analyse par FFT et ondelettes », Mémoire de Magistère, Université de Biskra, sep 2014.
- [2] : MOHAMED EL KAMEL OUMAAR« Surveillance et diagnostic des défauts rotorique et mécaniques de la machine asynchrone avec alimentation équilibrée ou déséquilibrée », thèse de doctorat, Université de Lorraine, Mars 2012
- [3]: M.SADDEK, H.DJAAFAR «Diagnostic de défauts de la machine asynchrone à cage d'écureuil par la méthode de reconnaissance des forme » mémoire PFE ENP Alger 2007.
- [4] : Bousseksou Modélisation analytique des machines Asynchrone application au diagnostic. Mémoire de Magister. Université Mentouri Constantine. Algérie 2007
- [5] : A. Menacer, "Contribution à l'identification des paramètres et des états d'une machine à induction pour diagnostic et développement de commande robuste : robustesse vis-à-vis de défauts", Thèse de doctorat, Université de Batna, Décembre 2007
- [6]: BELHAMDI SAAD« Diagnostic des défauts de la machine asynchrone contrôlée par différents techniques de commande », Thèse de doctorat Université de Biskra Mai 2014.
- [7] : GILLES HOUDOUIN « Contribution à la modélisation de la machine asynchrone en présence de défauts rotoriques », Thèse de doctorat université de havre mai 2004.
- [8] : HARIR Miloud : « Etude des Défauts dans La Machine Asynchrone à Cage d'Ecureuil par l'Emploi de la Fonction d'Enroulement Modifiée », Mémoire de magister université d'Oran, 2009.
- [9] : ABBAS Rachid, et BOUABOUD Hassiba : «Modélisation de la machine à cage d'écureuil en présence des défauts de cassures de barres et d'anneaux de court-circuit », Mémoire de master université de Bouira, 2016.
- [10] : G.DIDIER «Modélisation et diagnostique de la Machine asynchrone en présence de défaillance », Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy I.
- [11] : MERAD Rafik : «Outils de diagnostic appliques a la machine asynchrone triphasée a cage d'écureuil», Mémoire de Magister Université de Constantine 2006.

Annexe :

- **Caractéristiques nominales :**

| | |
|-----------------------|---------------------------------------|
| Puissance nominale | $P_n = 1,1 \text{ Kw}$ |
| Tension nominale | 220V / 380V |
| Courant nominal | $I_n = 4.5 \text{ A} / 2.6 \text{ A}$ |
| Vitesse nominale | $\Omega_n = 314 \text{ tr /mn}$ |
| Nombre pairs de pôles | $p = 1$ |

- **Paramètres de la machine :**

| symbole | valeur | désignation |
|---------------|--------------------------------|---|
| μ_0 | $4\pi * 10^{-7}$ | Perméabilité du vide |
| f | 50Hz | Fréquence d'alimentation |
| ω_s | $2\pi f$ | Pulsation de l'alimentation |
| V_m | 380v | Tension composée de l'alimentation |
| r_s | 7.58Ω | Résistance d'une phase de l'enroulement au stator |
| f_v | 0.00006 Nm /s | Coefficient de frottement |
| J_t | 0.00540 kg/m^2 | Moment d'inertie des masses tournantes |
| $Long_{mot}$ | $65 * 10^{-3} \text{ m}$ | Longueur effective de la machine |
| e | $0.25 * 10^{-3} \text{ mm}$ | Epaisseur de l'entrefer |
| R_{moy} | $37.75 * 10^{-3} \text{ m}$ | 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 |
| Δ | 1 | Facteur de raccourcissement |
| m_e | $N_s / ((2 * p) * nb_{phase})$ | Nombre d'encoche/pôle/phase |
| α | $(2 * p) / (nb_{barre})$ | 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 | $100 * 10^{-6} \Omega$ | Résistance d'un enroulement anneau de court-circuit |