

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Amar Thelidji de Laghouat



Faculté de Technologie

Département d'Electrotechnique

Mémoire

En vue de l'obtention du diplôme de Master en Electromécanique

Option : Electromécanique

Présenté par

Kouidri Mehdi

Hammani Islam

THEME

**Modélisation et diagnostic de la machine asynchrone en
présence des défauts statoriques et rotoriques**

Soutenu publiquement devant le jury composé de :

Mr. Ameer Aissa

Pr.

Président

Mr. Boudraa Saliha

MCB

Examinatrice

Mr. Bessedik Sid Ahmed

MCA

Rapporteur

Remerciement

Nos remerciements vont tout premièrement, le bon DIEU le tout puissant de nous avoir donné le courage, la patience et la santé durant toutes ces années et que grâce à lui ce travail a pu être réalisé.

Tout d'abord, nous tenons ainsi à exprimer nos vifs remerciements et notre profonde gratitude à **Mr Bessedik Sid Ahmed** pour les conseils précieux, les orientations, et l'aide qu'il nous a accordé pour mener ce travail à terme.

Nous remercions également les membres de jury **Mr Ameer Aissa** et **Ms Boudraa Saliha** d'avoir accepté d'examiner ce travail.

Notre profonde reconnaissance et nos respects les plus distingués à l'ensemble des enseignants de la faculté de technologie de l'université de Laghouat, qui ont assuré notre formation tout au long de nos années d'études.

Nous voudrions associer à nos remerciements toutes personnes qui ont contribué de près ou de loin à ce travail. A ce jeu, il est impossible de ne pas oublier des noms. On voudrait présenter d'avance nos excuses à ceux qui pourraient alors subir les affres de l'oubli.

Enfin, nous tiens remercier toutes les personnes qui ont contribué au succès de notre projet final et qui nous ont aidés lors de la rédaction de ce mémoire.

Dédicace

Je dédie ce travail :

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

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

À Mes professeurs de département d'électrotechnique qui doivent voir dans ce travail la fierté d'un savoir bien acquis.

À toute ma famille,
À tous mes amis (es) et collègues,
À tous ceux qui me sont chers et proches,
À tous ceux qui ont semé en moi à tout point de vue,
À tous ceux que j'aime.

Kouidri Mehdi
Hammani Islam

ملخص

تلقى تشخيص الأعطال في الآلات الكهربائية، ولا سيما الآلات الغير المتزامنة، اهتمامًا بحثيًا مكثفًا. الأخطاء التي يمكن أن تظهر في الآلة الغير متزامنة أثناء التشغيل لا توجد في جزء واحد من أجزاءها. في الواقع، يمكن أن يؤدي ارتفاع درجة الحرارة والتأثيرات الاهتزازية الناتجة عن كسر القضبان إلى إتلاف موصلات الشق في الجزء الثابت. من ناحية أخرى، يمكن أن يكون التسخين غير الطبيعي بسبب عطل الجزء الثابت هو سبب فشل اللحام، وبالتالي عطل الدوار. لذلك، من الأفضل، بهدف المراقبة العامة للآلة، النظر في التشخيص المتزامن لخطأ الجزء الثابت والدوار معًا.

Résumé :

Le diagnostic de défauts des machines électriques notamment les machines asynchrones a bénéficié d'un intérêt intense de recherche. Les défauts qui peuvent apparaître dans les machines asynchrones (MAS) en cours de fonctionnement ne sont pas localisés dans une seule partie de la machine. En effet, les surchauffements et les effets vibratoires dus à une cassure de barres peuvent endommager les conducteurs d'encoches au stator. D'autre part, un échauffement anormal dû à un défaut statorique peut être à l'origine d'une rupture de soudure, et par conséquent d'un défaut rotorique. De ce fait, il est préférable, dans une optique de surveillance généralisée de la machine, d'envisager un diagnostic de défaut simultané stator/rotor.

Abstract:

The diagnosis of faults in electrical machines, in particular asynchronous machines, has received intense research interest. The faults that can appear in asynchronous machines (MAS) during operation are not located in a single part of the machine. Indeed, the overheating and the vibratory effects due to a rupture of bars can damage the notch conductors in the stator. On the other hand, abnormal heating due to a stator fault can be the cause of weld failure, and consequently of a rotor fault. Therefore, it is preferable, with a view to generalized monitoring of the machine, to consider a simultaneous stator / rotor fault diagnosis.

LISTE DES SYMBOLES ET DES ABREVIATIONS

LISTE DES SYMBOLES

Symboles liés à la machine asynchrone

u_{sa}, u_{sb}, u_{sc}	Tensions statoriques suivant les axes a_s, b_s et c_s
u_{dqs}	Composantes d et q des tensions statoriques
$u_{\alpha\beta_s}$	Composantes α et β des tensions statoriques
i_{sa}, i_{sb}, i_{sc}	Courants statoriques suivant les axes a_s, b_s et c_s
i_{dqs}	Composantes d et q des courants statoriques
i_{dqm}	Composantes d et q du courant magnétisant
i_{dqce}	Composantes d et q du courant de court-circuit dans les spires Court-circuitées
$\phi_{sa}, \phi_{sb}, \phi_{sc}$	Flux statoriques suivant les axes a_s, b_s et c_s
$\phi_{ra}, \phi_{rb}, \phi_{rc}$	Flux rotoriques suivant les axes a_s, b_s et c_s
ϕ_{dqs}	Composantes d et q du flux statorique
ϕ_{dqr}	Composantes d et q du flux rotorique
$\Phi_{\alpha\beta_m}$	Composantes α et β du flux magnétisant
$\Phi_{\alpha\beta_f}$	Composantes α et β du flux de fuite statorique
R_s	résistance statorique
R_r	résistance rotorique
L_{sp}	inductance propre d'une phase statorique
L_{rp}	inductance propre rotorique
L_s	inductance cyclique statorique
L_r	inductance cyclique rotorique
L_m	inductance mutuelle cyclique stator-rotor
L_f	inductance de fuite
L_{cc}	inductance propre de la bobine de court-circuit B_{cc}
M_s	inductance mutuelle entre deux phases du stator
M_r	inductance mutuelle entre deux phases du rotor
N_b	nombre total de barres au rotor
N_{bc}	nombre de barres cassées au rotor
N_{cc}	nombre de spires en court-circuit de la $k^{\text{ième}}$ phase
N_s	nombre total de spires dans une phase statorique sans défaut
μ_{cc_k}	pourcentage de spires en court-circuit de la $k^{\text{ième}}$ phase
η_0	pourcentage de barres cassées

θ_{cc_k}	angle de repère du bobinage en court-circuit de la $k^{\text{ième}}$ phase
θ_r	angle électrique de la position du rotor
$Q(\theta_{cc})$	matrice donnant l'angle du bobinage en court-circuit
Q_{cc_l}	quadripôle représentant un défaut de court-circuit de la $k^{\text{ième}}$ phase
p	nombre de paires de pôles
ω	vitesse angulaire électrique du rotor
Ω	vitesse de l'arbre moteur, égale à ω/p
ω_a	vitesse angulaire du repère de référence
g	glissement de la machine
C_{em}	couple électromagnétique
C_r	couple résistif
f_v	coefficient de frottement visqueux
J	moment d'inertie

LISTE DES ABREVIATIONS

Abréviations liées à la machine asynchrone

MAS	M achine a synchrone
Fem	F orce é lectromotrice
TF	T ransformé de F ourier
FFT	F ast F ourier T ransform (T ransformée de F ourier R apide)
IA	I ntelligence A rtificielle
RDF	R econnaissance D e F ormes
MLI	M odulation de L argeur d' I mpulsion

Liste des figures

Listes des Figures

Figures	page
Chapitre I	
I.01 Constitution d'une machine électrique	4
I.02 Stator d'une machine électrique	6
I.03 Rotor à cage d'écureuil	6
I.04 Rotor bobiné	7
I.05 Causes internes des défauts	8
I.06 Causes externes des défauts	8
I.07 Répartition des pannes des machines de faible et moyennes puissance	9
I.08 Répartition des pannes des machines de forte puissance	9
I.09 Court-circuit entre spires	11
I.10 Rupture de barres	13
I.11 Rupture d'anneaux	13
I.12 Excentricité statique et dynamique	15
I.13 Défaut de roulement	16
I.14 Méthodes de surveillance d'une machine électrique soumise à un défaut	17
I.15 Principe général du diagnostic à base de modèles analytiques	18
I.16 Schéma de principe de l'approche à base d'observateur	19
I.17 Schéma de principe du diagnostic par projection dans l'espace de parité	19
I.18 Principe des techniques d'identification	20
I.19 Schéma de principe de la surveillance par analyse spectrale	22
I.20 Principe de diagnostic des défauts par réseau de neurones	23
Chapitre II	
II.01 Représentation d'une machine asynchrone triphasée au stator et au rotor	27
II.02 Principe de la transformation de Park	29
II.03 Modèle de la machine saine dans le repère de Park lié au rotor	32

II.04 Court-circuit de spires sur la phase b_s du stator	35
II.05 Modèle de court-circuit dans le repère lié au stator	38
II.06 Modèle électrique de la machine en présence de défauts dans les trois phases statoriques	39
II.07 Modèle électrique de la machine en présence de défauts dans les trois phases statoriques	41
II.08 Modèle de défaut rotorique de la machine asynchrone dans le repère de Park	44
II.09 Modèle de défaut rotorique de la machine asynchrone	45
II.10 Modèle de défaut mixte stator/rotor de la machine asynchrone	47

Chapitre III

III.01 Schéma bloc du moteur asynchrone sain	52
III.02 Courbe des courants	54
III.03 Courbe de couple	55
III.04 Courbe de vitesse	56
III.05 Le couple en fonction de vitesse	56
III.06 Schéma bloc de moteur asynchrone avec défaut statorique	58
III.07 Courbe des courants avec défaut statorique	59
III.08 Courbe de couple avec défaut statorique	60
III.09 Courbe de vitesse avec défaut statorique	60
III.10 Schéma bloc de moteur asynchrone avec défaut rotorique	62
III.11 Courbe des courants avec défaut rotorique	63
III.12 Courbe de couple avec défaut rotorique	64
III.13 Courbe de vitesse avec défaut rotorique	64
III.14 Schéma bloc de moteur avec défaut mixte	66
III.15 Courbe des courants avec défaut mixte	67
III.16 Courbe de couple avec défaut mixte	68
III.17 Courbe de vitesse avec défaut mixte	68

Sommaire

Sommaire

Introduction générale	1
Chapitre I : Etat de l'art	
I.1 Introduction	3
I.2 Constitution de la machine asynchrone	4
I.2.1 Les organes mécaniques	5
I.2.2 Le stator	6
I.2.3 Le rotor	6
I.2.3.1 Le rotor à cage d'écureuil	6
I.2.3.2 Le rotor bobiné	7
I.3 Les défaillances de la machine asynchrone	8
I.3.1 Défaillances au stator	10
I.3.1.1 Court-circuit entre spires	10
I.3.1.2 Court-circuit entre phases	11
I.3.1.3 Court-circuit phase/bâti	11
I.3.1.4 Défauts de circuit magnétique	12
I.3.2 Défaillances au rotor	12
I.3.2.1 Ruptures de barres	12
I.3.2.2 Ruptures d'anneaux	13
I.3.2.3 Excentricité statique et dynamique	14
I.3.2.4 Défaut de roulement	15
I.4 Panorama des méthodes de diagnostic des machines asynchrones	16
I.4.1 Méthodes de diagnostic avec modèle analytique	17
I.4.1.1 Approche à base d'observateurs	18
I.4.1.2 Approche par la projection dans l'espace de parité	19
I.4.1.3 Approche par estimation paramétrique	20

I.4.2 Méthodes de diagnostic sans modèle analytique	21
I.4.2.1 Diagnostic par analyse des signaux	21
I.4.2.2 Diagnostic par méthode de connaissances	22
I.5 Conclusion	24

Chapitre II

Modélisation de la machine asynchrone, avec les défauts

II.1 Introduction	25
II.2 Modélisation de la machine asynchrone saine	26
II.2.1 hypothèses de départ	26
II.2.2 Schéma d'un moteur asynchrone triphasé	26
II.2.3 Equations électriques de la machine asynchrone	27
II.2.4 Transformation biphasé de PARK	29
II.2.5 Modelé de la machine dans le repéré de PARK	30
II.3 modèles de défaut statorique	34
II.3.1 Modélisation du défaut stator dans le repère de PARK	34
II.3.2 Modélisation de la machine dans le repère de PARK lié au stator	35
II.3.3 Généralisation du modèle de défaut statorique	38
II.4 Modèle de défaut rotorique	41
II.4.1 Modélisation du rotor en défaut	41
II.4.2 Modélisation du défaut de rupture des barres	42
II.4.3 Schéma électrique équivalent	44
II.5 Modèle de défaut simultané stator/rotor	47
II.5.1 Modèle global de la machine asynchrone en défaut stator/rotor	47
II.6 Conclusion	49

Chapitre III

Simulations et résultats

III.1 Introduction	50
III.2 Simulation de la machine saine	50
III.2.1 Résultats de simulation en fonctionnement saine	54

III.3 Simulation du modèle de défaut statorique	57
III.3 .1 Résultats de simulation du modèle de défaut statorique	59
III.4 Simulation du modèle de défaut rotorique	61
III.4.1 Résultats de simulation du modèle de défaut rotorique	63
III.5 Simulation du modèle de défaut simultané stator/rotor	65
III.5.1 Résultats de simulation du modèle de défaut simultané stator/rotor	67
III.6 Conclusion	69
Conclusion générale	70
Références bibliographiques	

Introduction Générale

La machine asynchrone triphasée à cage d'écureuil est la plus répandue en milieu industriel grâce à ses principaux atouts : sa puissance massique, sa robustesse, sa simplicité de construction, son coût relativement faible et un entretien minimum.

Dans de nombreux secteurs industriels, la sureté de fonctionnement est un enjeu majeur pour assurer une compétitivité optimale de l'outil de production dans un contexte international très concurrentiel ou les gains de productivité représentent un souci quotidien pour les dirigeants des entreprises.

Le diagnostic des machines électriques s'est fortement développé dans le monde industriel car la volonté d'obtenir une chaîne de production de plus en plus sûre devient, pour certaines applications, indispensable. Les chaînes de productions doivent être dotées de système de protection fiable car une quelconque défaillance, même le pli anodin, peut mener à un dommage matériel ou corporel inévitable. C'est pour éviter ces problèmes que la recherche, sur le plan mondial, s'emploie depuis plusieurs dizaines d'années à élaborer les méthodes de diagnostic. Celle-ci ont pour premier objectif de prévenir les utilisateurs d'un risque possibles pouvant apparaître ont un point particulier du système.[\[1\]](#)

Le diagnostic industriel dont la vocation première est de détecter et localiser une défaillance des matériels des systèmes industriels, joue un rôle primordial pour contribuer, par une détection rapide ou précoce, à faire gagner des points de disponibilité et de productivité des capitaux investis dans l'outil de production. Le diagnostic est maintenant devenu une partie intégrante de la fonction maintenance. La vision systémique de l'entreprise, s'attachant de plus en plus à la notion du cout global de possession d'un système ou d'un produit, prend en compte le diagnostic comme un des leviers contribuant à améliorer la compétitivité de l'outil de production.

Les entrainements électriques à base de machine asynchrone sont largement utilisés dans les applications industrielles en raison de leur faible cout, de leurs performances et de leur robustesse. Cependant, des modes de fonctionnements dégradés peuvent apparaitre durant la vie de la machine. Les défauts tels que les court-circuit entre spires, les ruptures de barres et de portions d'anneaux, l'excentricité et les défauts de roulements sont des défauts non apparents du fait que la machine conserve son mouvement de rotation. L'occurrence d'un de ces défauts induit une modification topologique de la machine et donc une manifestation de la signature dans les grandeurs mesurables de cette dernière. Aujourd'hui la recherche des méthodes de diagnostic des

défaillances de la machines asynchrone est un sujet qui mobilise de nombreux chercheur. La signature du défaut peut être détectée dans le contenu spectral du courant de phase statorique, une grandeur facilement accessible dans tous les entraînements industriels.[2-3]

L'objectif de ce mémoire est de réaliser une simulation qui sert à modéliser et diagnostiquer les défauts statoriques, rotoriques et/ou mixte de la MAS à cage.

Le présent travail comporte trois chapitres : le premier chapitre commence par une présentation des éléments constitutions de la machine asynchrone, puis les différents types des défauts affectant la machine asynchrone. Ensuite, une illustration des différentes techniques de diagnostic.

Le deuxième chapitre sera consacré à présenter un modèle mathématique lié aux circuits qui permet de simuler la MAS soit en absence, soit en présence de défauts électriques de type court-circuit entre spires et/ou une rupture des barres rotoriques.

Dans le troisième chapitre, nous allons présenter quelques résultats de simulation. Ce chapitre analysera les résultats de la simulation pour montrer l'effet de ces défauts sur les différents comportements de la machine (vitesse rotorique, couple électromagnétique et les trois courants statoriques).

Nous clôturons ce travail par une conclusion générale permettant de synthétiser les résultats obtenus et d'envisager quelques perspectives

.

CHAPITRE I

L'état de l'art

I.1 Introduction :

Les machines électriques tournantes occupent une place prépondérante dans tous les secteurs industriels. La machine asynchrone, souvent appelée moteur à induction (en anglais : IM pour Induction Machine), est la plus utilisée en industrie car elle présente de nombreux avantages tels que sa puissance massique, sa robustesse, sa facilité de mise en œuvre, son faible coût de fabrication. Elle est composée de trois éléments essentiels à savoir le stator, le rotor et les organes mécaniques.

Bien que la machine asynchrone soit 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 intérêt grandissant depuis les deux dernières décennies [1-2].

Il existe plusieurs procédures de diagnostic. Le choix d'une approche est lié à la connaissance que l'on souhaite acquérir sur le système, aussi à sa complexité. Ainsi deux principales familles de procédures sont utilisées dans le domaine du diagnostic en génie électrique à savoir les méthodes de diagnostic avec connaissance a priori et sans connaissance a priori. Ce chapitre est organisé en trois sections principales présentant :

- La constitution des machines asynchrones,
- Les différents types de défauts pouvant survenir,
- Les techniques de diagnostic des machines électriques.

I.2 Constitution des machines asynchrones :

La machine asynchrone (MAS) est une machine électrique tournante permettant la conversion d'énergie par induction électromagnétique. Les machines asynchrones produisant une énergie mécanique à partir de l'énergie électrique sont appelées moteurs. Par contre celles qui produisent une énergie électrique à partir d'une énergie mécanique sont appelées générateurs. Toutes les machines électriques tournantes sont réversibles, la distinction moteur/générateur ne se fait que sur l'usage final de la machine. Le terme asynchrone provient du fait que la vitesse de rotation de ces machines n'est pas synchrone avec la vitesse du champ tournant.

On se propose, dans cette section, de rappeler brièvement la constitution de la machine asynchrone. Cette description va nous permettre de comprendre de quelle façon le système est réalisé physiquement.

On classe les différentes pièces rencontrées dans toutes machines tournantes selon les trois grandes fonctions réalisées :

- Le stator, partie fixe de la machine où est connectée l'alimentation électrique,
- Le rotor, partie tournante qui permet de mettre en rotation la charge mécanique,
- Les paliers, partie mécanique qui permet la mise en rotation de l'arbre moteur.

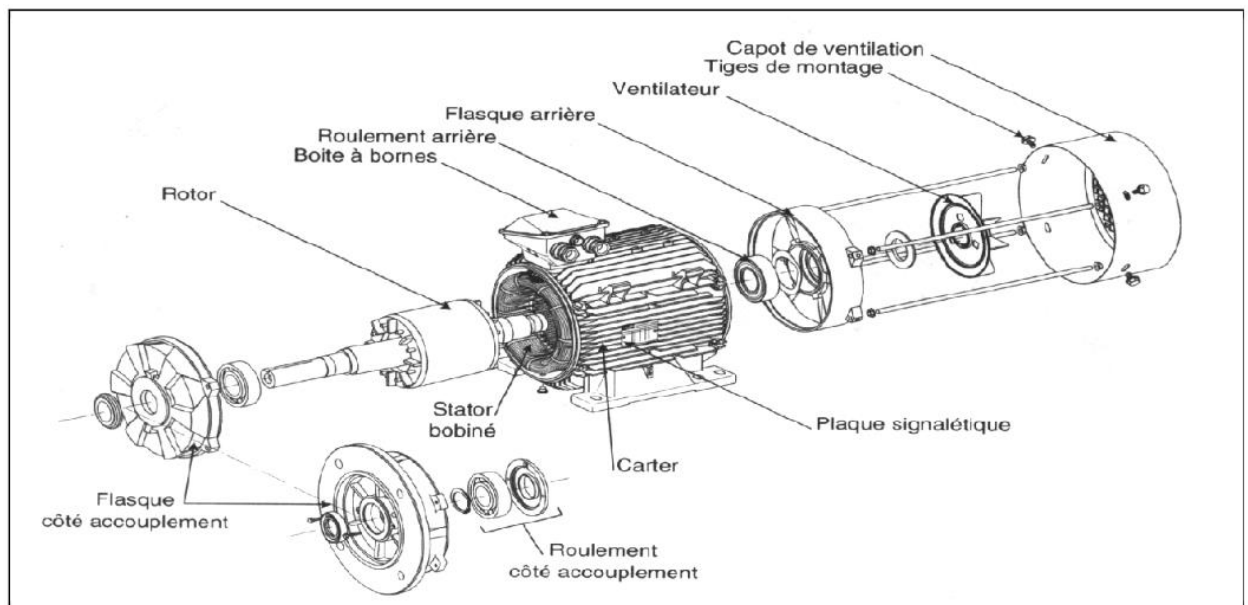


Figure I.01 : Constution d'une machine électrique.

I.2.1 Les organes constitutifs :

Organes électriques :

- 1- Enroulements statoriques.
- 2- Barres de cuivre rotoriques.

Organes magnétiques :

- 1- Circuit magnétique fixe.
- 2- Circuit magnétique tournant.

Organes mécaniques :

- 1- Carter avec fixation au stator.
- 2- Rotor avec son arbre.
- 3- Roulements à bille.
- 4- Flasque.
- 5- Ventilateur.
- 6- Capot de ventilation.
- 7- Tige de montage.
- 8- Plaque a bornes.

Rôles des organes :

- 1- Electrique :
 - Produire les flux électromagnétiques (champ tournant).
 - Assurer la continuité d l'énergie entre le réseau et la machine.
- 2- Magnétique :
 - Canaliser le flux électromagnétique avec un minimum de pertes.
- 3- Mécanique : assurer :
 - Transmission de l'énergie mécanique.
 - Support et guidage des masses tournantes.
 - Protection des parties actives.
 - Fixation de la machine

Ces différents organes peuvent être regroupés en 2 parties :

I.2.2 Le stator :

Partie fixe comprenant trois enroulements identiques répartis sur un circuit magnétique feuilleté (tôle en acier au silicium pour diminuer les pertes par hystérésis et par courant de Foucault, en général ces tôles sont isolées par oxydation ou par un vernis isolant). Les enroulements sont constitués de conducteurs logés dans des encoches du circuit magnétique. Ces enroulements seront alimentés par le réseau via la plaque à bornes.

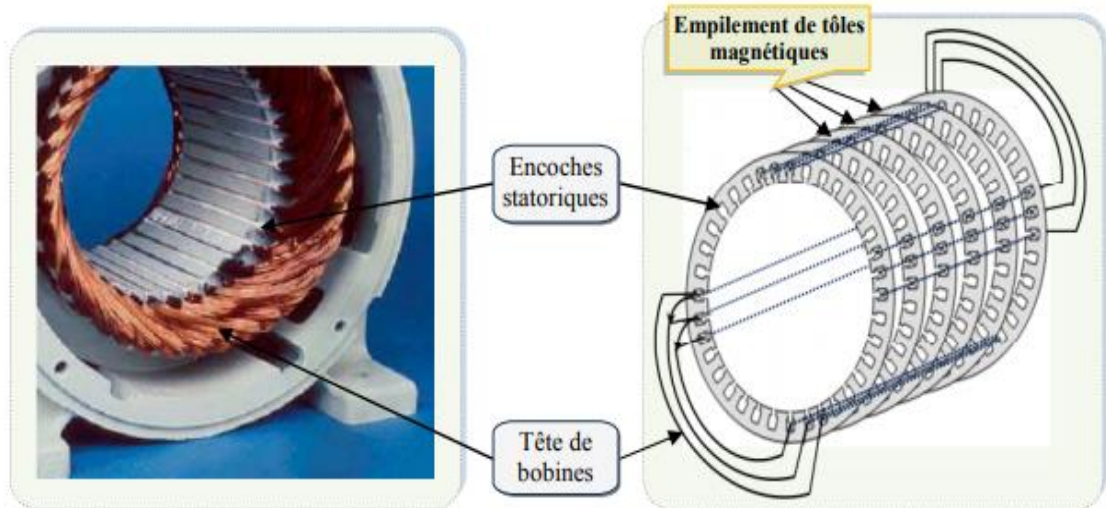


Figure I.02 : Stator d'une machine électrique.

I.2.3 Le rotor :

Il existe deux types de rotor :

I.2.3.1 Le rotor à cage d'écureuil :

Le bobinage est réduit à un ensemble de conducteurs (1) dont toutes les extrémités (2) sont reliées entre elles en formant une cage. Ce type de rotor est aussi appelé rotor en court-circuit.

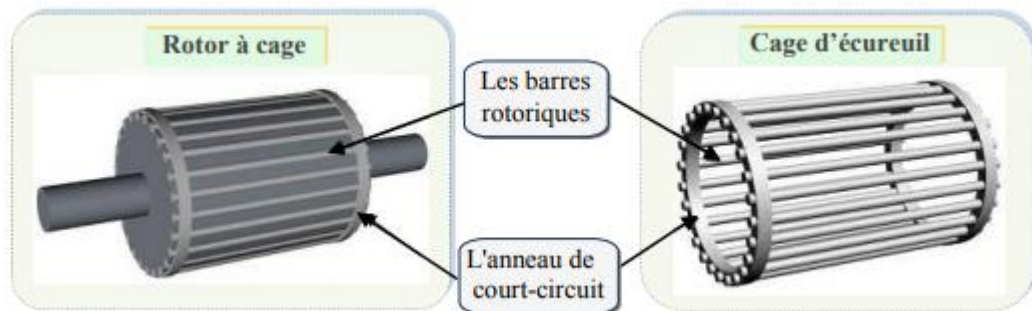


Figure I.03 : Rotor à cage d'écureuil.

I.2.3.2 Le rotor bobiné :

Trois enroulements couplés en étoile, le point neutre n'est pas accessible, par contre, les entrées des enroulements sont reliées à la plaque à bornes du stator via un ensemble de bagues et de balais. Le circuit magnétique du rotor est aussi feuilleté.



Figure I.04 : Rotor bobiné.

Intérêt de ce type de rotor

On utilise ce type de rotor s'il faut absolument limiter l'appel du courant au démarrage et obtenir un couple de démarrage élevé : Démarrage rotorique.

I.3 Les défaillances de la machine asynchrone :

De multiples défaillances peuvent apparaître dans la machine asynchrone. Elles peuvent être prévisibles ou intempestives, mécaniques ou électriques. Leurs causes sont très variées. Dans le but d'une présentation synthétique, ces défauts peuvent se classer en deux familles principales,

- Les causes internes, (Fig. I.05)
- Les causes externes, (Fig. I.06)

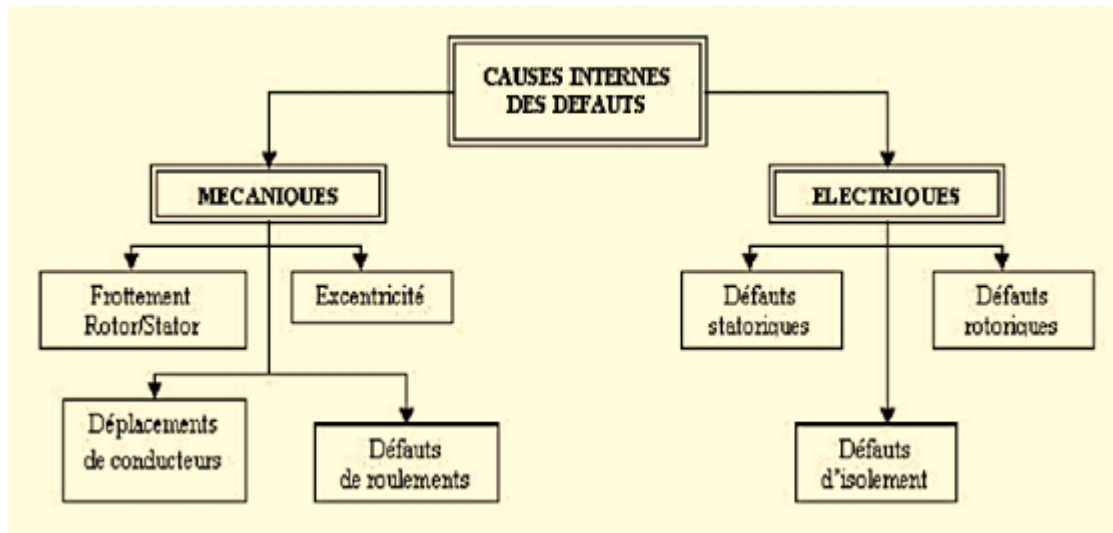


Figure I.05 : Causes internes des défauts.

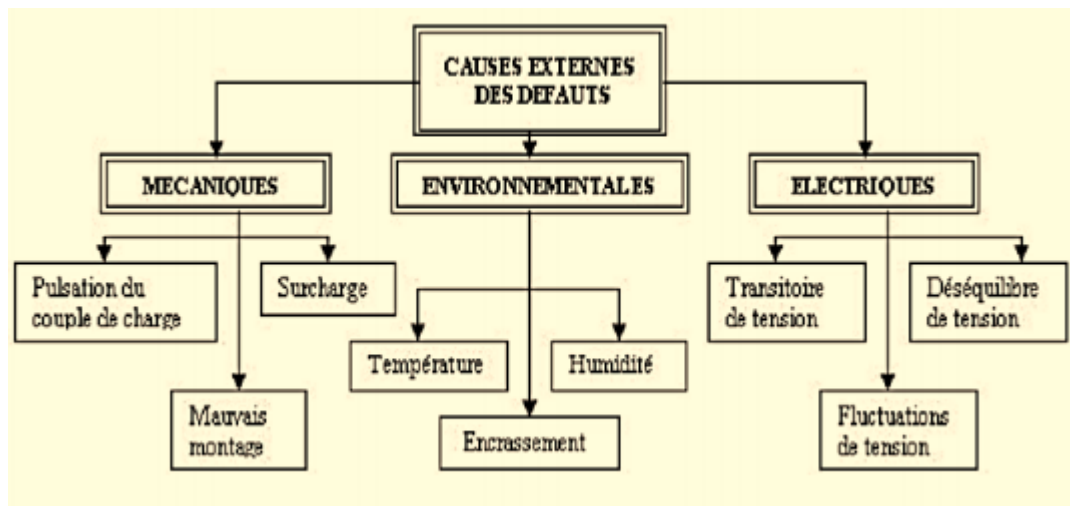


Figure I.06 : Causes externes des défauts.

Une étude statistique, effectuée en 1988 par une compagnie allemande de systèmes industriels sur les pannes des machines asynchrones de faible et moyenne puissance (50KW à 200KW) a donné les résultats suivants

(Fig. I.07).

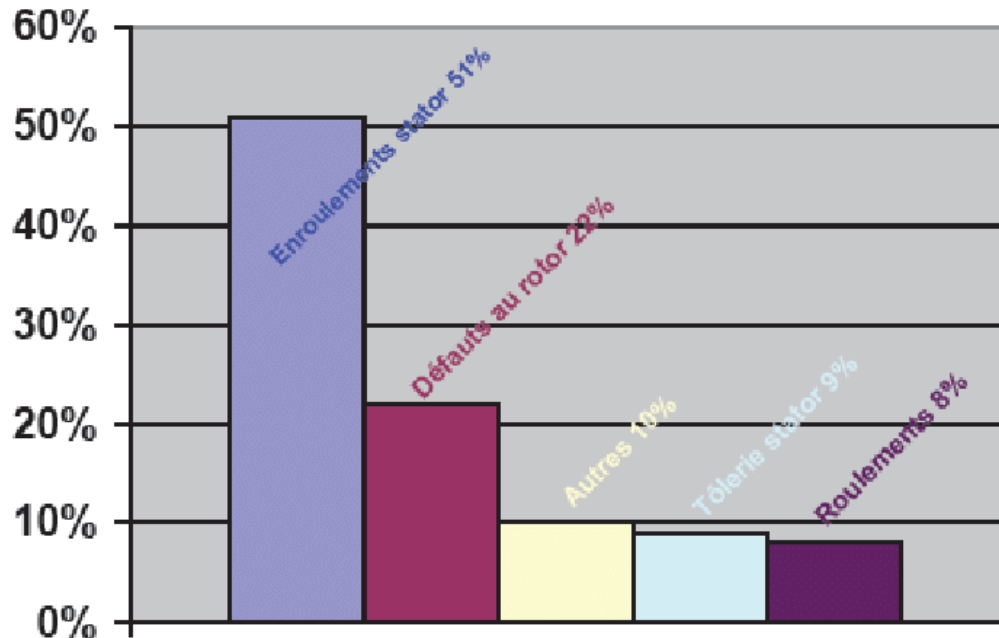


Figure I.07 : Répartition des pannes des machines de faible et moyenne puissance.

Une autre étude statistique faite sur des machines de grande puissance (100KW à 1MW) a donné les résultats suivants : (**Figure I.08**)

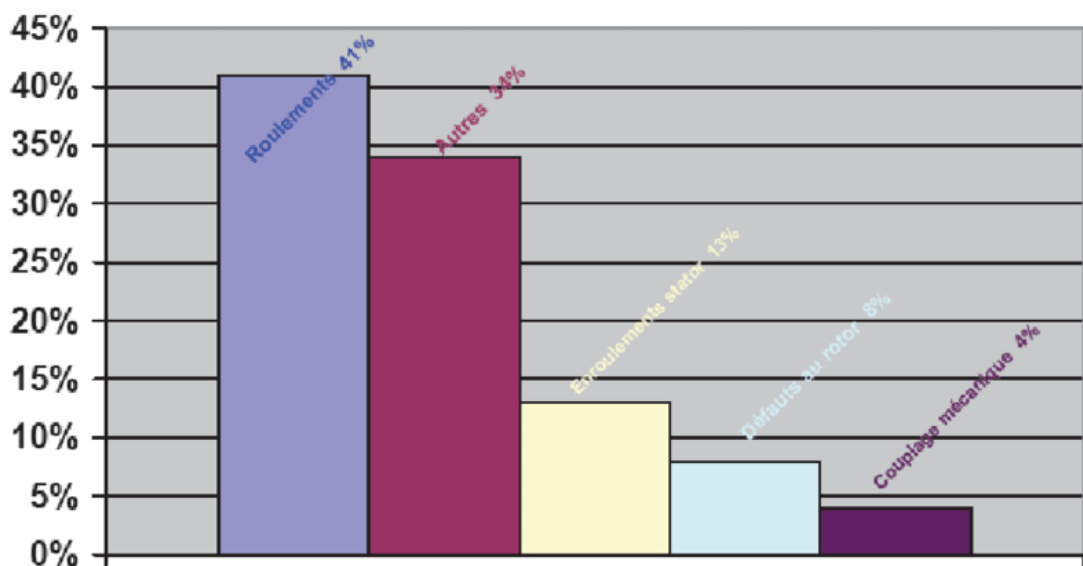


Figure I.08 : Répartition des pannes des machines de forte puissance.

I.3.1 Défaillances au stator :

Les défauts qui sont les plus récurrents, localisés au niveau du stator, peuvent être définis comme suit :

- Défaut d'isolant ;
- Court-circuit entre spires ;
- court-circuit entre phases;
- court-circuit phase/bâti;
- Déséquilibre d'alimentation ;
- Défaut de circuit magnétique

Défauts d'isolant dans un enroulement

La dégradation des isolants dans les enroulements peut provoquer des courts-circuits. En effet, les différentes pertes (Joule, fer, mécanique,) engendrent des phénomènes thermiques se traduisant par une augmentation de la température des différents constituants du moteur. Or les matériaux d'isolation ont une limite de température, de tension et mécanique. De ce fait, si l'environnement de travail d'un matériau d'isolation dépasse une de ces limites, ce matériau se dégrade de manière prématurée ou accélérée, puis finit par ne plus assurer sa fonction.

Dans ce cas, un court-circuit peut apparaître dans l'enroulement concerné. Les différentes causes pour ce type de défaut sont :

- Dégradation de l'isolant à la fabrication.
- Tension de l'enroulement supérieure à la limite du matériau d'isolation.
- Courant élevé dans l'enroulement dû à un court-circuit, un défaut du convertisseur, une surcharge. Ceci entraîne une élévation de la température dégradant prématurément le matériau d'isolation.
- Vibrations mécaniques.
- Vieillessement naturel des isolants. Tous les matériaux isolants ont une durée de vie limitée. Même dans une utilisation 'normale', l'isolant finit naturellement par se dégrader.
- Fonctionnement dans un environnement sévère.

I.3.1.1 Court-circuit entre spires :

Un court-circuit entre spires de la même phase est un défaut assez fréquent. Cette défaillance a pour origine un ou plusieurs défauts d'isolant dans l'enroulement concerné. Il entraîne une augmentation des courants statoriques dans la phase affectée, une légère variation de l'amplitude sur les autres phases, modifie le facteur de puissance et amplifie les courants dans le circuit rotorique. Ceci a pour conséquence une augmentation de la température au niveau du bobinage et, de ce fait, une dégradation accélérée des isolants, pouvant

provoquer ainsi, un défaut en chaîne (apparition d'un 2^{ème} court-circuit). Par contre, le couple électromagnétique moyen délivré par la machine reste sensiblement identique hormis une augmentation des oscillations proportionnelle au défaut. (Figure I.09)



Au niveau des têtes de bobines

Au niveau des encoches

Figure I.09 : Court-circuit entre spires.

I.3.1.2 Court-circuit entre phases :

Ce type de défaillance peut arriver en tout point du bobinage, cependant les répercussions ne seront pas les mêmes selon la localisation. Cette caractéristique rend difficile une analyse de l'incidence de ce défaut sur le système.

L'apparition d'un court-circuit proche de l'alimentation entre phases, induirait des courants très élevés qui conduiraient à la fusion des conducteurs d'alimentation et/ou à la disjonction par les protections. D'autre part, un court-circuit proche du neutre entre deux phases engendre un déséquilibre sans provoquer la fusion des conducteurs.

Les courants statoriques sont totalement déséquilibrés et ce déséquilibre est proportionnel au défaut qui apparaît. Les courants dans les barres ainsi que dans les anneaux sont augmentés lors de l'apparition de ce défaut. La détection de ce type de défaut peut reposer sur le déséquilibre des courants de phases.

I.3.1.3 Court-circuit phase/bâti:

Le bâti a généralement un potentiel flottant, mais pour des raisons de liaisons mécaniques, il est souvent relié à la masse. Si le potentiel est flottant, un court-circuit entre l'enroulement et le bâti n'a pas d'importance du point de vue matériel, excepté les effets capacitifs, le bâti prend alors le potentiel de l'enroulement à l'endroit du court-circuit. Par contre, au niveau de la sécurité

des personnes, ce type de défaut peut être très dangereux et il est alors nécessaire de mettre en place des dispositifs de protection (disjoncteurs différentiels).

En présence de ce type de défaillance, la tension de la phase concernée ne change pas. Cependant le courant circulant dans cette phase augmente avec la réduction de la résistance et de l'inductance. Cette augmentation du courant se traduit par une augmentation de la température pouvant entraîner des défauts d'isolant dans l'enroulement. De plus, cette défaillance va générer une composante homopolaire entraînant l'apparition d'un couple pulsatoire. Une mesure du courant de fuite pourrait permettre de détecter ce type de défaut.

I.3.1.4 Défauts de circuit magnétique :

Ces défauts aboutissent dans la plupart des cas à une dissymétrie au niveau du fonctionnement de la machine, qui à son tour peut accentuer le problème par des phénomènes de surchauffe, de surtension, d'élévation importante du courant, etc.

I.3.2 Défaillances au rotor :

Les défauts qui sont les plus récurrents, localisés au niveau du rotor, peuvent être définis comme suit :

- Rupture de barres ;
- Rupture d'une portion d'anneau de court-circuit ;
- Excentricité statique et dynamique.

I.3.2.1 Ruptures de barres :

La cassure ou rupture de barre est un des défauts les plus fréquents au rotor. Elle peut se situer soit au niveau de son encoche soit à l'extrémité qui la relie à l'anneau rotorique. La détérioration des barres réduit la valeur moyenne du couple électromagnétique et augmente l'amplitude des oscillations, qui elles-mêmes provoquent des oscillations de la vitesse de rotation, ce qui engendre des vibrations mécaniques et donc, un fonctionnement anormal de la machine. La grande amplitude de ces oscillations accélère la détérioration de la machine.

Ainsi, le couple diminue sensiblement avec le nombre de barres cassées induisant un effet cumulatif de la défaillance. L'effet d'une cassure de barre croît rapidement avec le nombre de barres cassées.

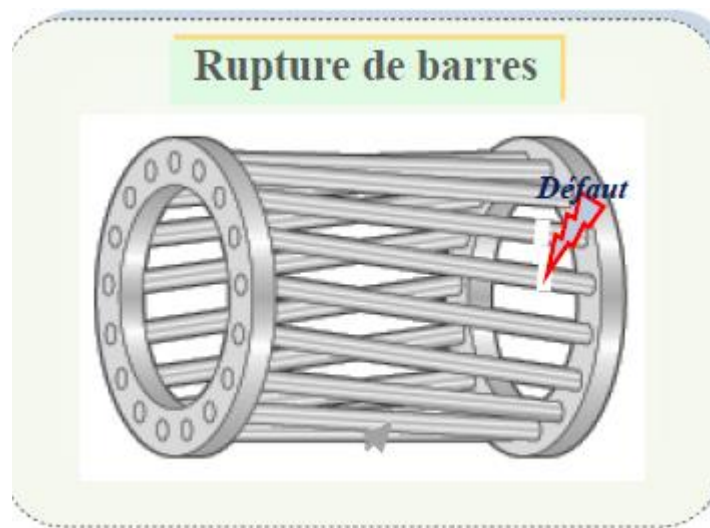


Figure I.10 : Rupture de barres.

I.3.2.2 Ruptures d'anneaux :

La rupture de portion d'anneau est un défaut qui apparaît aussi fréquemment que la cassure de barres. Ces ruptures sont dues soit à des bulles de coulées ou aux dilatations différentielles entre les barres et les anneaux.

Comme il est difficile de le détecter, ce défaut est généralement groupé, voir confondu, avec la rupture de barres dans les études statistiques. Ces portions d'anneaux de court-circuit véhiculent des courants plus importants que ceux des barres rotoriques. De ce fait, un mauvais dimensionnement des anneaux, une détérioration des conditions de fonctionnement (température, humidité,) ou une surcharge de couple et donc de courants, peuvent entraîner leur cassure.

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.

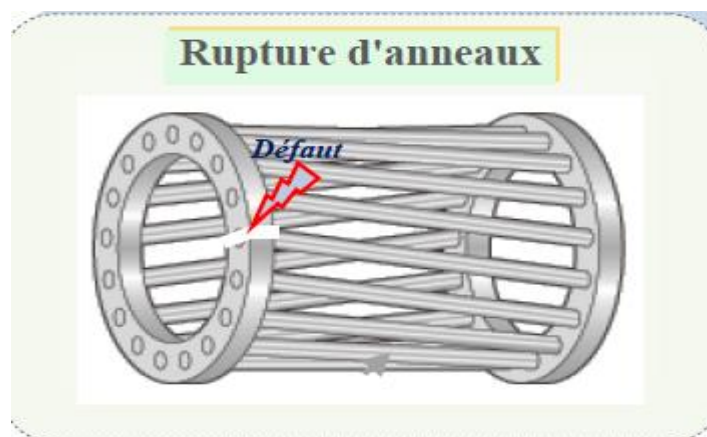


Figure I.11 : Rupture d'anneaux.

I.3.2.3 Excentricité statique et dynamique :

Parfois, la machine électrique peut être soumise à un décentrement du rotor, se traduisant par des oscillations de couple (décalage entre le centre de rotation de l'arbre et le centre du rotor, Ce phénomène est appelé excentricité (statique et dynamique) dont l'origine peut être liée à un positionnement incorrect des paliers lors de l'assemblage, à un défaut roulement (usure), à un défaut de charge, ou à un défaut de fabrication (usinage).

Trois cas d'excentricité sont généralement distingués :

- **L'excentricité statique**, le rotor est déplacé du centre de l'alésage stator mais tourne toujours autour de son axe
- **L'excentricité dynamique**, le rotor est positionné au centre de l'alésage mais ne tourne plus autour de son axe
- L'excentricité qu'on pourrait qualifier de '**mixte**', associant les deux cas précédemment cités

On peut représenter l'excentricité statique et dynamique de la manière suivante :

Ce défaut modifie le comportement magnétique ainsi que mécanique de la machine. En effet, l'augmentation de l'excentricité dans l'entrefer induit une augmentation des forces électromagnétiques qui agissent directement sur le noyau statorique ainsi que l'enroulement correspondant, ce qui engendre une dégradation de son isolation.

D'autre part, cette augmentation peut avoir comme conséquence des frottements entre le stator et le rotor en raison des forces d'attraction magnétique qui déséquilibrent le système.

Ceci donne naissance à des niveaux de vibration considérables dans les enroulements.

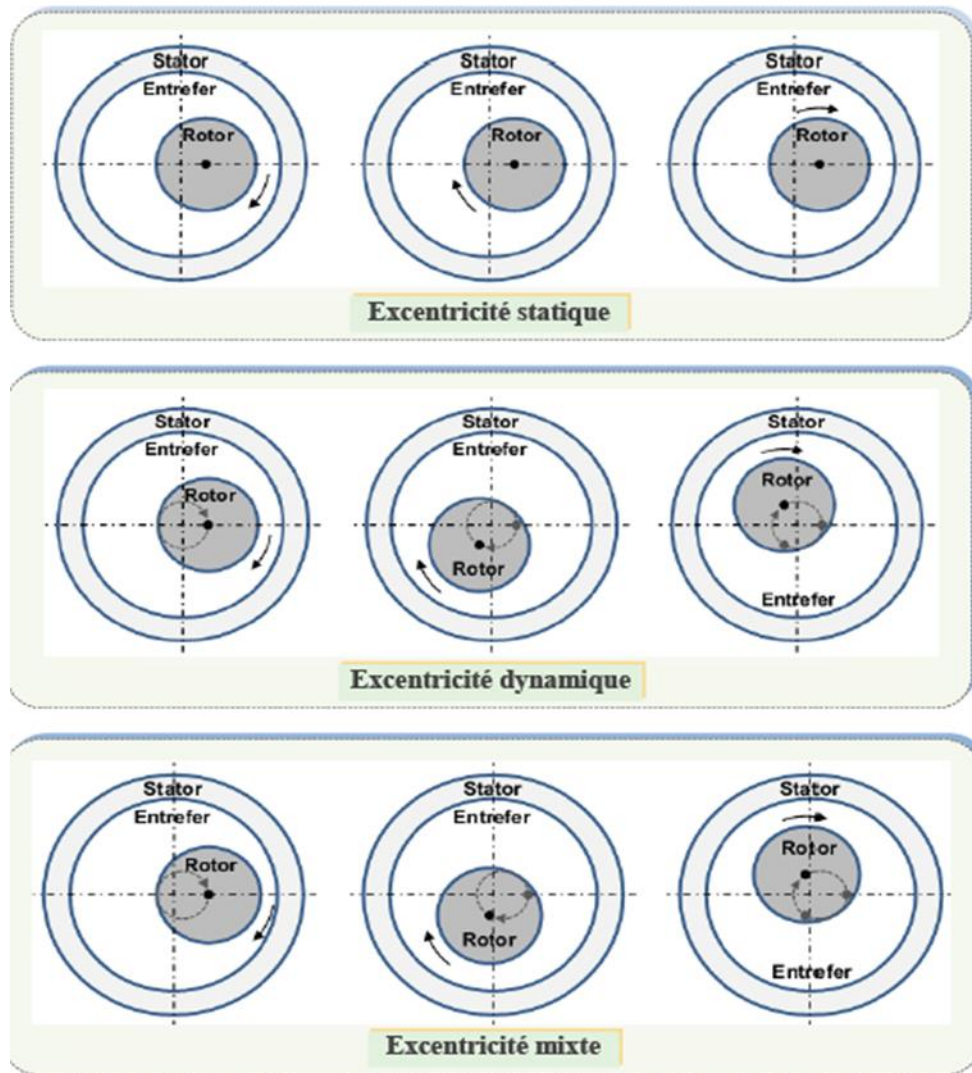


Figure I.12 : Excentricité statique et dynamique.

I.3.2.4 Défaut de roulement :

Les roulements sont constitués généralement de deux bagues, intérieure et extérieure, entre lesquelles existe un ensemble de billes ou de rouleaux tournants (figure I.09)

Les défauts de roulement sont généralement classés dans la catégorie des défauts liés à l'excentricité. Les défauts de roulements à billes peuvent être classifiés comme suit :

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

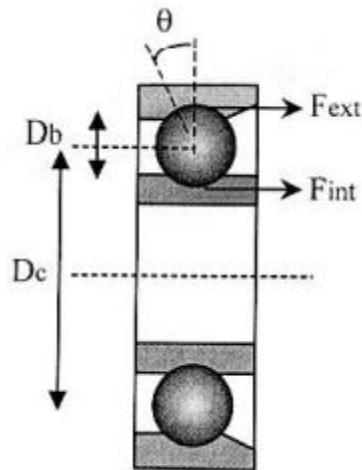


Figure I.13 : Défaut de roulement

I.4 Panorama des méthodes de diagnostic des machines asynchrones :

La recherche de signatures ou d'indicateurs de défauts a pour but de caractériser le fonctionnement d'un système en identifiant le type et l'origine de chacun des défauts. Ceci permet d'assurer une certaine discrimination des pannes ou des anomalies qui se produisent.

L'apparition d'un défaut au niveau de l'entraînement modifie le fonctionnement de ce dernier, ce qui affecte ses performances. Etant donné la diversité de ces défauts et la complexité des relations de cause à effet, de nombreuses méthodes, permettant de réaliser une démarche de diagnostic et de prévenir au mieux la dégradation du système surveillé, ont été développées.

Le but de cette section est de présenter un panorama non exhaustif des méthodes de diagnostic appliquées aux machines électriques. Ces méthodes sont classées en deux grandes catégories, celles qui utilisent un modèle analytique du système et celles qui se dispensent de ce modèle. L'approche analytique est plutôt inspirée par les automaticiens, alors que les communautés du génie électrique et du traitement du signal préfèrent s'intéresser à des méthodes plus heuristiques. Ces méthodes de diagnostic sont reportées sur la figure I.14.

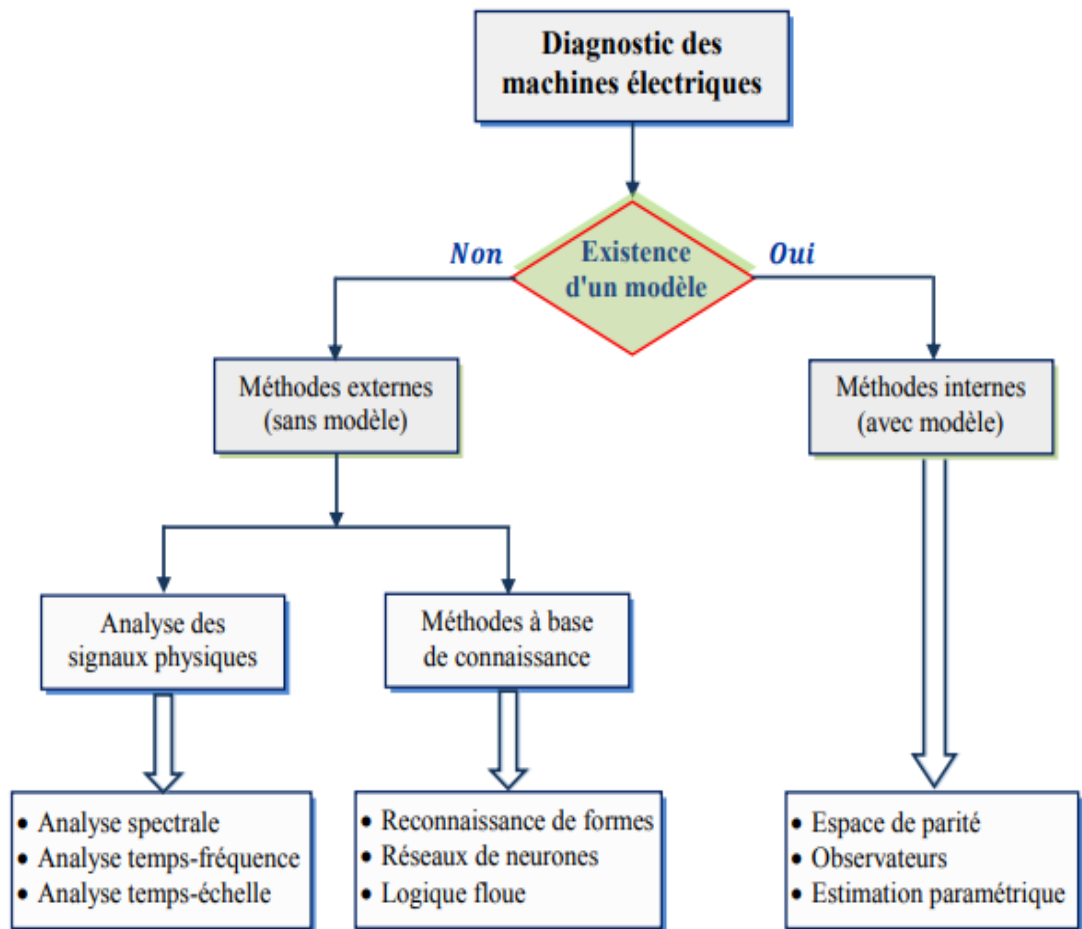


Figure I.14 : Méthodes de surveillance d'une machine électrique soumise à un défaut.

I.4.1 Méthodes de diagnostic avec modèle analytique :

Le principe de ce type de méthodes repose sur l'utilisation d'un modèle mathématique du système à surveiller. Pour notre cas, cela consiste à comparer le comportement de la machine réelle (éventuellement défaillante) à celui d'un modèle de représentation soumis aux mêmes excitations ; ce modèle de représentation peut correspondre à un modèle sain de la machine où

à Un modèle spécifique caractérisant le défaut étudié. Cette comparaison entre le modèle et le système réel fait apparaître des différences sur certaines grandeurs caractéristiques et forment ainsi des résidus. Ces derniers sont exploités afin de construire un indicateur de présence du défaut étudié. Afin de générer ces résidus, trois approches sont couramment utilisées :

- La surveillance par les observateurs.
- La surveillance par redondance analytique (espace de parité).
- La surveillance par estimation paramétrique.

Bien que ces approches soient différentes, leur but est le même ; il consiste à générer un vecteur caractéristique : le résidu, qui est sensiblement nul en absence de défauts et non nul en leur présence. Ainsi, le problème de diagnostic des défauts par ces méthodes peut se reformuler sous la forme d'un problème de génération de résidus. Ces derniers se devant de justifier de certaines propriétés. Le principe général du diagnostic à base de modèles analytiques appliqué à la machine asynchrone est illustré sur la figure I.15.

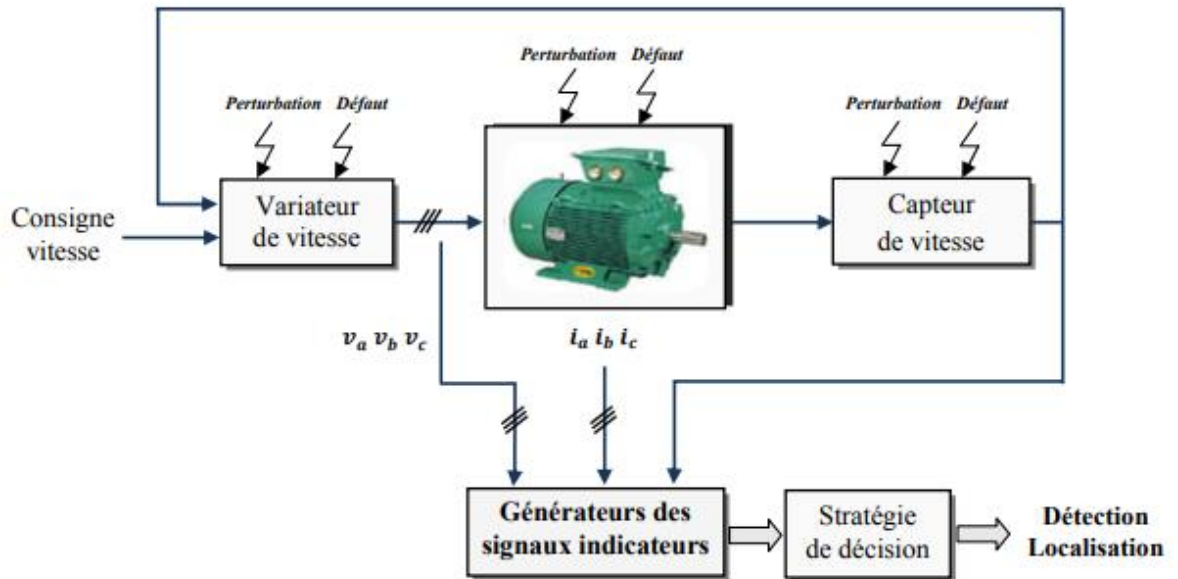


Figure I.15 : Principe général du diagnostic à base de modèles analytiques

I.4.1.1 Approche à base d'observateurs :

L'idée principale des méthodes de génération du vecteur de résidus à base d'observateurs est d'estimer une partie ou l'ensemble des mesures du système surveillé à partir des grandeurs mesurables. Le résidu est alors généré en formant la différence (éventuellement filtrée) entre les sorties estimées et les sorties réelles. L'observateur revient finalement à un modèle parallèle au système avec une contre réaction qui pondère l'écart de sortie. Ce principe est illustré sur la figure I.16. Plusieurs techniques existent pour la synthèse d'un générateur de résidus par exemple : observateur de Luenberger, observateurs à entrées inconnues [9], observateur proportionnel intégral. Les résidus ainsi générés sont exploités par un système de décision permettant de déterminer l'action à mener en fonction des propriétés du résidu.

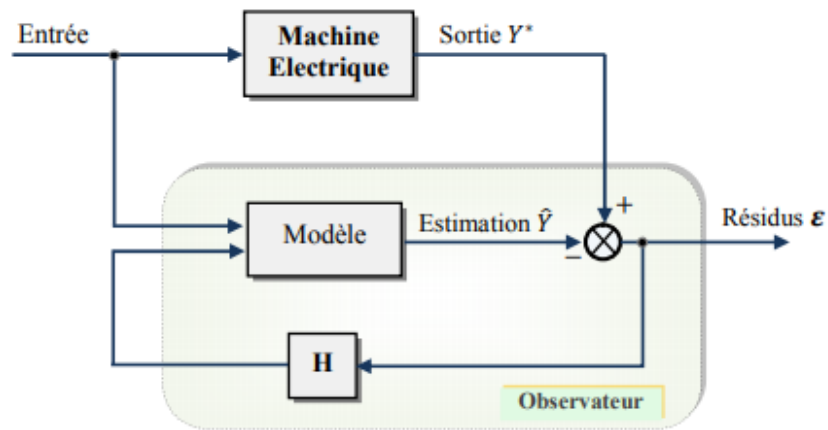


Figure I.16 : Schéma de principe de l'approche à base d'observateur

I.4.1.2 Approche par la projection dans l'espace de parité :

Le principe de l'approche par projection dans l'espace de parité est d'exploiter la redondance analytique existant dans les équations de modélisation du dispositif surveillé. On cherche à établir des relations de redondance analytique entre les mesures qui sont indépendantes des grandeurs inconnues mais qui restent sensibles aux défaillances. Ces relations de redondance servent à construire, par des techniques de projection matricielles, le vecteur de parité. Ce dernier représente une quantité ayant pour propriété d'être nul en fonctionnement normal et d'évoluer en présence de défauts. L'analyse du vecteur de résidus dans l'espace de parité permet alors de mettre en évidence la présence d'une défaillance. Le principe de cette méthode est schématisé sur la figure I.17 où correspond à la matrice de projection orthogonale.

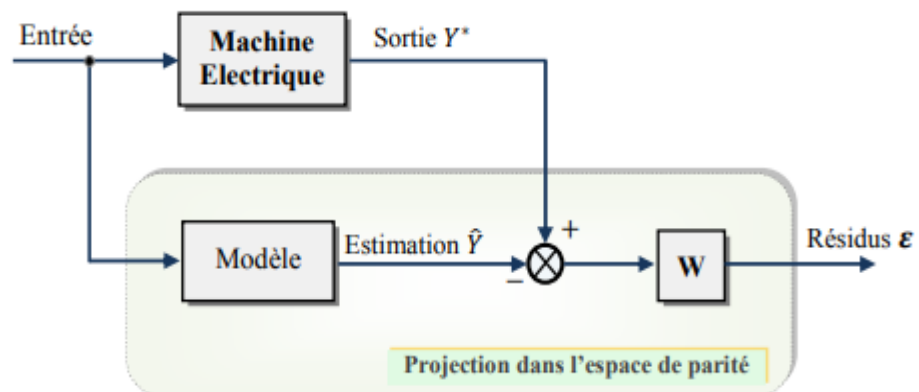


Figure I.17 : Schéma de principe du diagnostic par projection dans l'espace de parité

Pour les deux approches précédentes, la stratégie de diagnostic revient à créer un registre de signatures de défauts afin de les discriminer, c'est pourquoi elles sont plus dédiées aux pannes de capteurs et d'actionneurs qu'aux défauts structurels.

I.4.1.3 Approche par estimation paramétrique :

Les techniques d'identification paramétrique sont appliquées depuis de nombreuses années sur des applications utilisant des machines électriques. Ces techniques ont pour objectif de déterminer un modèle dynamique du système à surveiller à partir de mesures expérimentales, d'entrée et de sortie. L'idée fondamentale est que les paramètres caractérisant ce modèle identifié vont être sensibles aux défauts affectant la machine, et vont donc permettre par leurs variations de caractériser ces défauts.

L'estimation des paramètres du modèle est assurée par un algorithme de minimisation de l'erreur entre la sortie du modèle et celle de la machine. La figure I.18 traduit cette procédure, appelée aussi méthode du modèle.

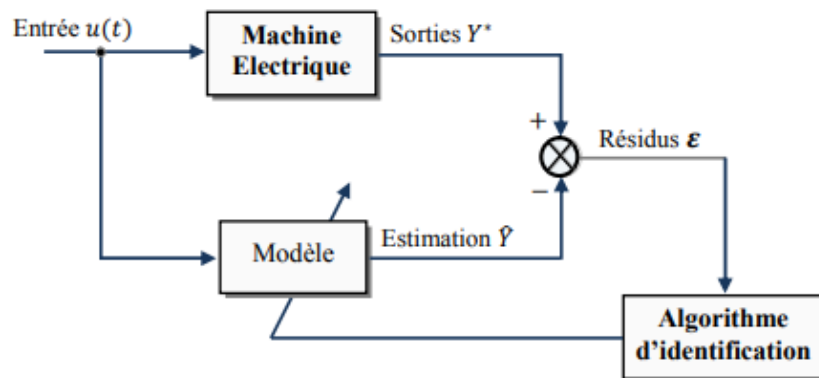


Figure I.18 : Principe des techniques d'identification

Plusieurs difficultés principales ont été relevées par rapport à l'utilisation des techniques d'identification.

Tout d'abord, le choix du modèle à identifier est primordial. Selon sa structure, selon les hypothèses simplificatrices émises lors de sa formulation, selon le choix des paramètres qui lui sont associés, il va être plus ou moins bien adapté à décrire le comportement de la machine et réagira de manière différente aux sollicitations qui lui sont imposées et aux éventuels changements de structure induits par la présence d'un défaut. Lorsqu'un modèle est associé à une procédure d'identification, on conçoit aisément dans quelles mesures la réponse du modèle choisi conditionnera les valeurs des paramètres obtenus et les exploitations qui pourront en être faites.

Le choix de l'algorithme de détermination des paramètres fait également partie des éléments importants. Plusieurs techniques se côtoient dans ce domaine, certaines étant mieux adaptées à une identification hors-ligne, d'autres plus efficaces dans un contexte en ligne. La sensibilité aux bruits de mesures, aux bruits liés à la quantification et à la précision des capteurs, entrent également en ligne de compte pour évaluer les performances d'un algorithme.

Enfin, les conditions d'excitation imposées au modèle conditionnent largement les qualités des valeurs obtenues pour les paramètres. Il est important qu'une excitation suffisamment riche soit appliquée pour garantir la

convergence, la stabilité et la précision des algorithmes. Cette contrainte est souvent difficilement compatible avec les modes de fonctionnement naturels des machines surveillées et l'injection d'une excitation adaptée n'est pas toujours possible.

Différentes formulations de modèles de machines asynchrones sont associées à des techniques d'identification hors-ligne et en ligne. Les travaux décrits dans [10-14] utilisent des techniques d'estimations basées sur des observateurs de paramètres électriques, comme par exemple le filtre de Kalman étendu. Dans [15-17], des méthodes récursives basées sur les méthodes des moindres carrés sont mise en œuvre pour identifier les paramètres de modèles comportementaux de la machine asynchrone.

Des travaux similaires ont été réalisés sur des machines synchrones à aimants permanents comme dans [18-20] où sont appliqués des méthodes d'identification en ligne pour identifier certains paramètres électriques ou comme dans [21-22] où sont plutôt privilégiées des méthodes hors-ligne.

Qu'il s'agisse de la machine asynchrone ou de la machine synchrone, la plupart des travaux réalisés dans le domaine concernent l'utilisation des techniques d'identification paramétrique pour permettre une meilleure connaissance des paramètres d'une machine afin d'améliorer les performances de robustesse et de précision des algorithmes de contrôle, comme par exemple dans le cadre de la commande adaptative.

La première famille de méthodes de diagnostic nécessite la connaissance du comportement dynamique de la machine à l'aide d'un modèle de connaissance. Toutefois, ces méthodes ne permettent pas d'étudier tous les défauts de la machine (défauts de roulements par exemple). Dans la section suivante, nous nous intéressons aux méthodes de diagnostic sans modèle, basées sur le suivi et l'analyse des grandeurs (telles que les courants, les vibrations, les flux et le couple) et les méthodes de connaissances.

I.4.2 Méthodes de diagnostic sans modèle analytique :

Ces méthodes ne nécessitent pas forcément de modèle précis du système mais reposent plutôt sur une reconnaissance de signatures. Les signatures de défauts, obtenues par modélisation ou par mesure sur maquette, sont généralement classées dans une base de données. L'analyse est réalisée par une interprétation du type signal ou par système expert.

I.4.2.1 Diagnostic par analyse des signaux :

Le principe des méthodes d'analyse de signal repose sur l'existence de caractéristiques fréquentielles propres au fonctionnement sain ou défaillant du procédé. La première étape dans cette approche concerne la modélisation des signaux en les caractérisant dans le domaine fréquentiel, en déterminant leur contenu spectral, leur variance, etc... [23-25].

L'apparition d'un défaut est à l'origine de nombreux phénomènes tels que le bruit, l'échauffement, les vibrations, etc... Ces symptômes sont la manifestation flagrante d'une modification des caractéristiques temporelles et fréquentielles des grandeurs électriques et mécaniques. Dans la littérature, sont présentées plusieurs techniques de détection de défauts par traitement du signal [26-30]. Le traitement du signal est utilisé depuis de nombreuses années pour détecter des défaillances dans les machines électriques, essentiellement les défauts rotoriques [26, 30-31]. Le défaut étant traduit par l'apparition de fréquences directement liées à la vitesse de rotation, ces méthodes se trouvent bien adaptées à la détection de défauts. Exigeant uniquement un capteur de courant ou/et un capteur de vitesse, l'analyse spectrale est de loin la méthode de diagnostic la plus économique et la plus rapide, d'où son succès auprès des industriels (figure 1.19). Cependant, cette méthode se prête uniquement au diagnostic à vitesse constante et principalement sur des machines alimentées par le réseau à fréquence constante.

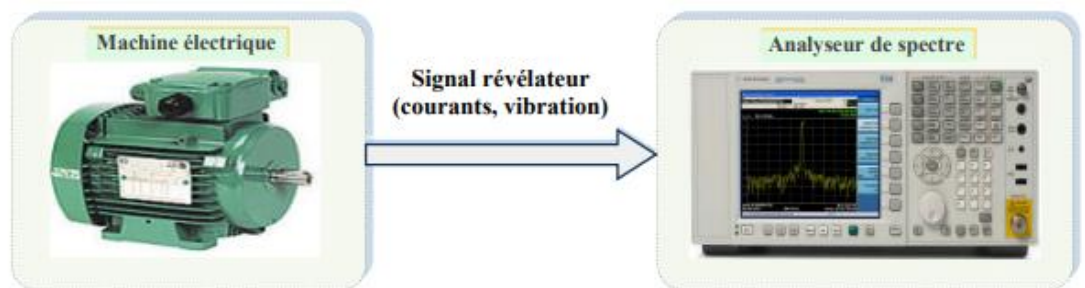


Figure 1.19 : Schéma de principe de la surveillance par analyse spectrale

Ces méthodes ont l'avantage de l'indépendance de l'analyse par rapport aux fluctuations internes du système. D'autre part, l'information contenue dans les signaux, n'étant pas filtrée par la modélisation, reste intacte.

I.4.2.2 Diagnostic par méthodes de connaissances

Comme pour les méthodes précédentes basées sur l'analyse des signaux, les méthodes dites de connaissances, se basent sur des données issues du système étudié sans passer par la formulation d'un modèle analytique. Cependant, ces méthodes utilisent en plus les techniques de classification [32] comme la reconnaissance de formes [33] ou les outils liés à l'intelligence artificielle [2, 34] (réseaux de neurones, logique floue, réseaux bayésiens) afin de renseigner précisément sur l'état du système.

Dans la littérature, l'approche par réseaux de neurones a été particulièrement étudiée ces dernières années pour la détection et localisation des défauts dans les machines électriques [35-37]. Par exemple dans [37], la détection des courts-circuits entre spires au stator par la méthode neuronale utilise, en entrée, les tensions et les courants statoriques ainsi que le déphasage entre ces deux grandeurs électriques (figure 1.20).

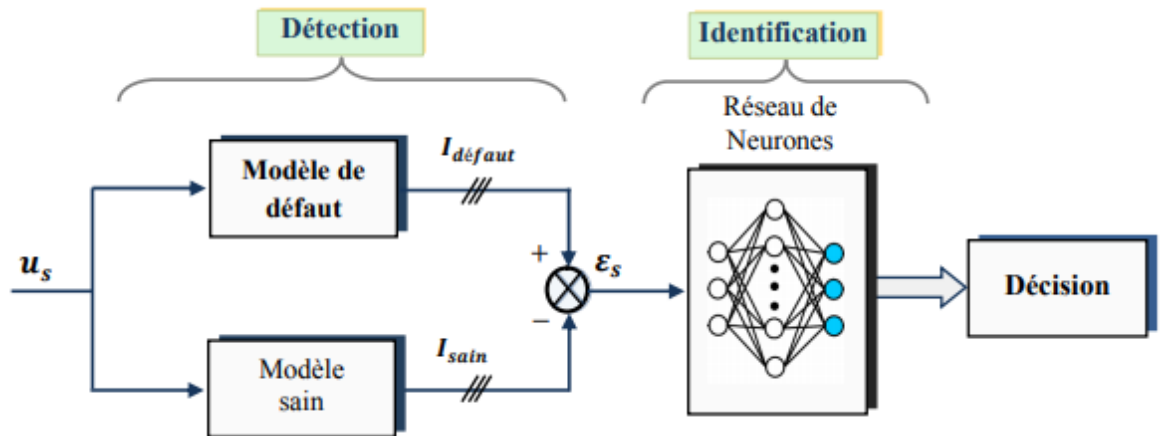


Figure I.20 : Principe de diagnostic des défauts par réseau de neurones

Dans tous les cas, ces méthodes nécessitent une bonne connaissance au préalable de la machine et du réseau électrique associé, en définissant une base de données initiale la plus précise possible afin de s'assurer de la fiabilité du diagnostic.

Ces deux types de méthodes de diagnostic, internes et externes, donnent un large éventail de signatures plus ou moins pertinentes vis-à-vis des différents défauts pouvant se produire sur un moteur électrique. Ces méthodes ne doivent pas être mises en concurrence, mais au contraire peuvent être utilisées de manière complémentaire pour tirer parti de leurs avantages respectifs.

I.5 Conclusion :

Nous avons commencé ce chapitre par un rappel de la constitution de la machine asynchrone, nous avons présenté par la suite une classification des défaillances susceptibles d'affecter les différentes parties des machines électriques. Puis, nous avons cité une liste non exhaustive des causes pouvant engendrer des défaillances mécaniques et électriques de ces machines.

Plusieurs méthodes de surveillance et de diagnostic relatifs à ce type de défauts ont également été évoquées. Deux grandes familles de méthodes de diagnostic appliquées à la machine asynchrone pour établir la présence d'un défaut sont discutées : l'approche avec modèle analytique de la machine et l'approche sans modèle, basées sur l'analyse de Fourier et sur une approche heuristique.

Nous nous sommes focalisés sur des méthodes basées sur une identification de certains paramètres de la machine, ces dernières étant les moins explorées dans le contexte de la surveillance et du diagnostic. De manière générale, lors de l'apparition d'un défaut, la topologie de la machine est modifiée ce qui implique l'apparition des signatures particulières sur certaines grandeurs physiques ou certains paramètres représentatifs de sa structure. L'extraction, l'exploitation et l'analyse de ces changements constituent le cœur même de la mise en place des algorithmes de détection et de localisation auxquels nous nous intéressons dans ce présent travail.

Le prochain chapitre sera consacré aux modèles de la machine en régime sain et défectueux, ainsi que les différentes grandeurs simulées de la machine. Ces modèles nous permettront d'étudier l'effet des défauts sur les variables de la machine afin de pouvoir extraire les bons indicateurs de défauts qui caractérisent au mieux le défaut.

CHAPITRE II

Modélisation de la machine asynchrone

II.1 Introduction :

La modélisation des machines électriques est un processus essentiel pour diagnostiquer et contrôler leur fonctionnement. En général, les méthodes numériques et analytiques sont les deux méthodes de calcul les plus utilisées dans la modélisation des machines électriques [8, 38-39].

La machine asynchrone présente en plus d'un comportement dynamique conventionnel, un comportement dû au défaut. Ainsi, ces études ont permis l'élaboration de modèles permettant le découplage de deux modes :

- Le mode commun, image du comportement sain de la machine, est exprimé dans le repère triphasé ou dans le repère de Park, et tire ses paramètres des composants électriques de la machine.
- Le mode différentiel est une partie supplémentaire, due à la présence d'un défaut et permet d'exprimer l'écart entre le mode commun et le fonctionnement défaillant de la machine.

Nous nous intéressons dans ce travail à deux types de défauts internes de la machine, le défaut de court-circuit entre spires au stator et le défaut de rupture de barres au rotor.

II.2 Modélisation du fonctionnement de la machine saine :

Dans cette section, nous allons considérer le cas d'une machine asynchrone à cage d'écureuil. Nous admettrons par contre que sa structure rotorique est électriquement équivalente à celle d'un rotor bobiné. Le champ tournant induit des courants rotoriques dans les barres de la cage d'écureuil (ou bobinage) : ces courants induits provoquent un couple permettant au rotor de tourner à une vitesse voisine de celle du champ tournant, mais nécessairement inférieure.

La mise en équation de la machine asynchrone avec les hypothèses retenues étant classique, nous ne mentionnerons que les points qui nous semblent essentiels et les choix qui nous sont propres par rapport à ce qui se fait habituellement.

II.2.1 Hypothèses de départ :

Le modèle de la MAS est établi en tenant compte des hypothèses de base suivantes [39-42] :

- la machine est symétrique à entrefer constant,
- la répartition dans l'entrefer de la force magnétomotrice et du flux est sinusoïdale,
- le circuit magnétique n'est pas saturé et à perméabilité constante,
- les pertes fer par hystérésis et courants de Foucault, l'effet de peau et les effets de dentures sont négligeables,
- l'effet des encoches est négligé.

L'ensemble de ces hypothèses permet ainsi de s'appuyer sur des propriétés telles que l'additivité des flux, la constance des inductances propres ou sur une loi de variation des inductances mutuelles entre le rotor et le stator de type sinusoïdale.

II.2.2 Schéma d'un moteur asynchrone triphasé :

La machine asynchrone à cage d'écureuil est constituée de trois enroulements logés symétriquement dans les encoches du stator et d'une cage d'écureuil conductrice au rotor.

Cette dernière est assimilable à trois enroulements en court-circuit et identiques en fonctionnement sain.

On modélise la machine asynchrone à cage dans un repère a, b, c (modèle triphasé-triphasé) ou dans un repère orthonormé dqo (modèle diphasé). La figure II.01 montre la représentation spatiale d'une machine asynchrone à cage comprenant un enroulement triphasé au stator (a_s, b_s, c_s) comme au rotor (a_r, b_r, c_r). Dans le modèle biphasé, les grandeurs statoriques (rotoriques) liées

au repère $a_s, b_s, c_s (a_r, b_r, c_r)$, décalées de 120° , sont ramenées vers les grandeurs biphasées équivalentes $s_d, s_q (r_d, r_q)$ en quadrature de phase.

Le modèle triphasé-triphasé modélise les trois phases statoriques ce qui permet de différencier le comportement de chaque phase. Les enroulements rotoriques (barres + anneaux) sont représentés par trois phases également.

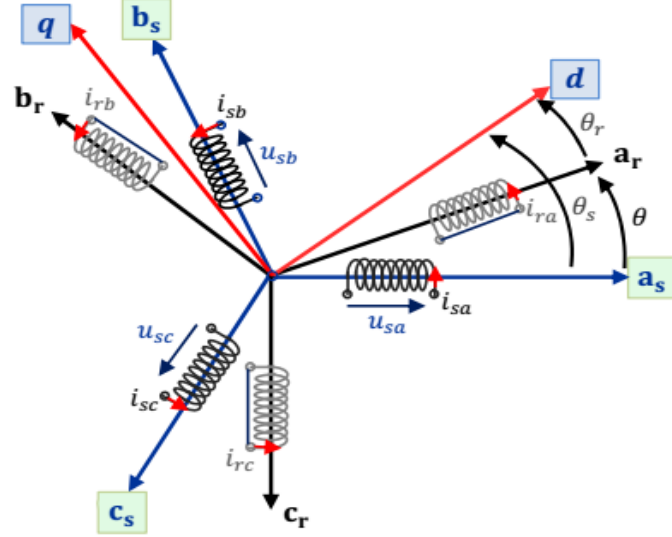


Figure II.01 : Représentation d'une machine asynchrone triphasée au stator et au rotor

II.2.3 Equations électriques de la machine asynchrone :

La machine asynchrone est constituée par deux circuits couplés électromagnétiquement.

Pour représenter le modèle d'une machine dans un repère triphasé, il faut écrire les équations différentielles liant les tensions, les courants et les flux pour chaque enroulement du stator et du rotor selon le modèle présenté sur la figure II.01.

Les équations des tensions régissant le fonctionnement d'une machine asynchrone s'écrivent sous forme matricielle :

$$\begin{cases} u_s = [R_s] \cdot i_s + \frac{d}{dt} \phi_s \\ 0 = [R_r] \cdot i_r + \frac{d}{dt} \phi_r \end{cases} \quad (2.1)$$

avec

$$u_s = \begin{bmatrix} u_{sa} \\ u_{sb} \\ u_{sc} \end{bmatrix}; i_s = \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix}; \phi_s = \begin{bmatrix} \phi_{sa} \\ \phi_{sb} \\ \phi_{sc} \end{bmatrix}; [R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix}$$

$$u_r = \begin{bmatrix} u_{ra} \\ u_{rb} \\ u_{rc} \end{bmatrix}; i_r = \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix}; \phi_r = \begin{bmatrix} \phi_{ra} \\ \phi_{rb} \\ \phi_{rc} \end{bmatrix}; [R_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}$$

u_s, u_r : Vecteurs des tensions statoriques et rotoriques.

i_s, i_r : Vecteurs des courants statoriques et rotoriques.

ϕ_s, ϕ_r : Vecteurs des flux statoriques et rotoriques.

$[R_s], [R_r]$: Matrices des résistances statoriques et rotoriques.

Les flux totalisés ϕ_s et ϕ_r des phases statoriques et rotoriques s'expriment sous la forme :

$$\begin{cases} \phi_s = [L_s] \cdot i_s + [M_{rs}] \cdot i_r \\ \phi_r = [M_{rs}] \cdot i_s + [L_r] \cdot i_r \end{cases} \quad (2.2)$$

L'isotropie et la symétrie de la machine font que les inductances propres des phases statoriques sont égales, de même pour celles du rotor. Les matrices $[L_s]$ et $[L_r]$ deviennent :

$$[L_s] = \begin{bmatrix} L_{sp} & M_s & M_s \\ M_s & L_{sp} & M_s \\ M_s & M_s & L_{sp} \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

$$[L_r] = \begin{bmatrix} L_{rp} & M_r & M_r \\ M_r & L_{rp} & M_r \\ M_r & M_r & L_{rp} \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

L_{sp}, L_{rp} : Inductances propres statoriques et rotoriques,

M_s : Inductance mutuelle entre deux phases du stator,

M_r : Inductance mutuelle entre deux phases du rotor.

La matrice des inductances mutuelles entre les phases du stator et du rotor dépend de la position angulaire θ entre l'axe du stator et celui du rotor :

$$[M_{rs}] = [M_{sr}]^T = M_{rs} \begin{bmatrix} \cos(p\theta) & \cos(p\theta - 2\pi/3) & \cos(p\theta - 4\pi/3) \\ \cos(p\theta - 4\pi/3) & \cos(p\theta) & \cos(p\theta - 2\pi/3) \\ \cos(p\theta - 2\pi/3) & \cos(p\theta - 4\pi/3) & \cos(p\theta) \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

Le modèle de représentation de la machine asynchrone que nous venons de présenter présente l'inconvénient d'être relativement complexe dans la mesure

où les matrices contiennent des éléments variables en fonction de l'angle de rotation θ . Pour simplifier le modèle, une transformation mathématique est appliquée au système. Cette dernière qui est couramment utilisée pour étudier les machines tournantes consiste en un changement du référentiel (abc) en un référentiel biphasé (dq). Cette transformation est la transformation de Park. Le modèle de Park, en plus de sa simplicité, permet de réduire sensiblement le temps de calcul et par conséquent celui de la simulation.

II.2.4 Transformation biphasée de Park :

Le principe de cette transformation repose sur le fait qu'un champ tournant créé par un système triphasé équilibré peut l'être aussi, à l'identique, pour un système biphasé de deux bobines décalées des courants déphasés de $\pi/2$ dans le temps. Cette transformation est orthonormée, elle conserve donc la puissance instantanée dans les enroulements équivalents [40]. La transformation de Park consiste à projeter les grandeurs statoriques et rotoriques sur deux axes en quadrature. Elle fait appel à deux changements de coordonnées : la transformation de Concordia et un changement de repère par rotation. Il est à noter que la transformation de Park est effectuée uniquement sur les grandeurs du régime sain (axes triphasés équilibrés de la machine).

Comme le montre la figure II.02, nous remplaçons les trois phases d'axes fixes (a_s, b_s, c_s) du stator par un enroulement équivalent formé des deux bobinages d'axes en quadrature (s_d, s_q) tournant à la vitesse ω_a . De même, au rotor, nous substituons deux bobinages r_d et r_q aux enroulements triphasés équivalents. Nous notons par θ_s (resp. θ_r) l'angle de transformation de Park des grandeurs statoriques (resp. Rotoriques). Nous remarquons qu'ils sont liés à θ par la relation 2.6 suivante :

$$\theta_s - \theta_r = \theta \quad (2.6)$$

Ceci simplifie les équations et par conséquent le modèle final.

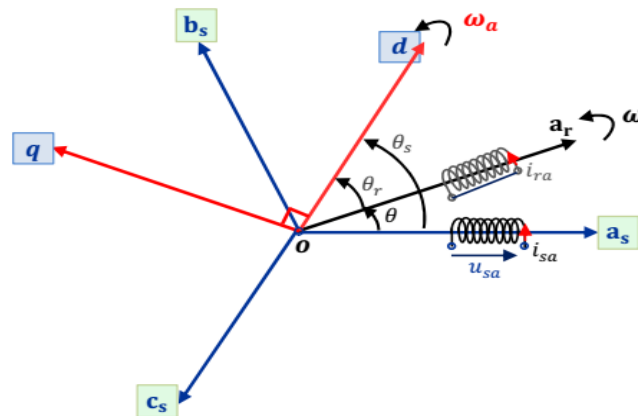


Figure II.02 : Principe de la transformation de Park

Le système de coordonnées fixe (a_s, b_s, c_s) est ainsi transformé en un système de coordonnées orthogonales tournant (dqo). Comme la machine est équilibrée, les composantes homopolaires "o" sont nulles. Nous passons des coordonnées triphasées (a_s, b_s, c_s) aux nouvelles coordonnées (dq) de Park, en appliquant la transformation suivante :

$$\begin{bmatrix} x_{ds} \\ x_{qs} \end{bmatrix} = P(-\theta) \cdot T_{32} \cdot \begin{bmatrix} x_{as} \\ x_{bs} \\ x_{cs} \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

$$\begin{bmatrix} x_{as} \\ x_{bs} \\ x_{cs} \end{bmatrix} = T_{23} \cdot P(\theta) \cdot \begin{bmatrix} x_{ds} \\ x_{qs} \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

Où

– x : Tension, courant ou flux, et :

– d : indice de l'axe direct.

– q : indice de l'axe en quadrature.

T_{32} , la matrice de transformation modifiée qui est orthogonale, s'écrit :

$$T_{32} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} \cos(0) & \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) \\ \sin(0) & \sin\left(\frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\frac{4\pi}{3}\right) \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1 & \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) \\ 0 & \sin\left(\frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\frac{4\pi}{3}\right) \end{bmatrix}$$

Et

$$T_{23} = T_{32}^T = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) & \sin\left(\frac{4\pi}{3}\right) \end{bmatrix}$$

$$P(\theta) = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix}: \text{Matrice de rotation d'angle } \theta$$

$$P(-\theta) = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ \sin(-\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix}: \text{Matrice de rotation d'angle } (-\theta)$$

II.2.5 Modèle de la machine dans le repère de Park :

Dans un souci de simplification du modèle de la machine asynchrone, on choisit de totaliser les fuites magnétiques au stator [8, 40].

Par définition, le système d'axes (d, q) tourne à la vitesse ω_a . Il est intéressant de pouvoir changer de repère selon les besoins de l'utilisateur. Ainsi, pour un référentiel noté (x) tournant à une vitesse ω_a par rapport au stator de la machine asynchrone, l'ensemble des équations électriques de la machine s'écrit [5,40] :

$$\begin{cases} \underline{u}_{dq_s}^{(x)} = R_s \underline{i}_{dq_s}^{(x)} + \frac{d}{dt} \underline{\phi}_{dq_s}^{(x)} + \omega_a \cdot P\left(\frac{\pi}{2}\right) \cdot \underline{\phi}_{dq_s}^{(x)} \\ \underline{u}_{dq_r}^{(x)} = 0 = R_r \underline{i}_{dq_r}^{(x)} + \frac{d}{dt} \underline{\phi}_{dq_r}^{(x)} + (\omega_a - \omega) \cdot P\left(\frac{\pi}{2}\right) \underline{\phi}_{dq_r}^{(x)} \\ \underline{\phi}_{dq_s}^{(x)} = L_s \underline{i}_{dq_s}^{(x)} + L_m \underline{i}_{dq_r}^{(x)} \\ \underline{\phi}_{dq_r}^{(x)} = L_m \underline{i}_{dq_s}^{(x)} + L_r \underline{i}_{dq_r}^{(x)} \end{cases} \quad (2.9)$$

Avec :

$L_s = L_{sp} - M_s$: inductance cyclique statorique

$L_r = L_{rp} - M_r$: Inductance cyclique rotorique

$L_m = \frac{3}{2} M_{sr}$: Inductance mutuelle cyclique stator-rotor

$\omega = p\Omega$: pulsation électrique de rotor

Et

$$P\left(\frac{\pi}{2}\right) = \begin{bmatrix} \cos\left(\frac{\pi}{2}\right) & \cos\left(\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{2}\right) \\ \sin\left(\frac{\pi}{2}\right) & \sin\left(\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{2}\right) \end{bmatrix}$$

Si on fait l'hypothèse que les fuites magnétiques sont totalisées au stator et en définissant :

$$\begin{cases} L_s = L_f + L_m \\ L_r = L_m \end{cases} \quad (2.10)$$

L'équation 2.9 se réécrit alors :

$$\begin{cases} \underline{u}_{dq_s}^{(x)} = R_s \underline{i}_{dq_s}^{(x)} + \frac{d}{dt} \underline{\phi}_{dq_s}^{(x)} + \omega_a \cdot P \left(\frac{\pi}{2} \right) \underline{\phi}_{dq_s}^{(x)} \\ \underline{u}_{dq_r}^{(x)} = 0 = R_r \underline{i}_{dq_r}^{(x)} + \frac{d}{dt} \underline{\phi}_{dq_r}^{(x)} + (\omega_a - \omega) P \left(\frac{\pi}{2} \right) \underline{\phi}_{dq_r}^{(x)} \\ \underline{\phi}_{dq_s}^{(x)} = (L_f + L_m) \underline{i}_{dq_s}^{(x)} + L_m \underline{i}_{dq_r}^{(x)} \\ \underline{\phi}_{dq_r}^{(x)} = L_m (\underline{i}_{dq_s}^{(x)} + \underline{i}_{dq_r}^{(x)}) \end{cases} \quad (2.11)$$

Le fonctionnement de la machine asynchrone est habituellement analysé dans trois repères : un repère lié au stator, un repère lié au rotor et un repère lié au champ tournant. Le choix du référentiel dépend de la vitesse de rotation ω_a du système d'axes (dq) selon [43] :

- Si le référentiel est fixe par rapport au stator alors $\omega_a = 0$ et on obtient un système électrique où les grandeurs statoriques sont purement alternatives et à la fréquence de l'alimentation. La simulation de la machine asynchrone dans ce repère n'exige donc aucune connaissance de la position du rotor, ce qui constitue un avantage pour la commande sans capteur de position. L'inconvénient majeur est la manipulation de signaux à fréquence élevée.
- Si Le référentiel tourne à la vitesse de synchronisme alors $\omega_a = \omega_s = 2\pi f_s$ et on obtient un système électrique purement continu qui est très bien adapté aux techniques d'identification. Cependant la position du champ tournant doit être reconstituée à chaque instant d'échantillonnage.
- Si le référentiel est fixe par rapport au rotor alors $\omega_a = \omega$ et les signaux électriques sont alors quasi-continus. La pulsation des grandeurs électriques est égale à $g\omega$ (où $g = \frac{\omega_s - \omega}{\omega_s}$ est le glissement de la machine) qui est faible dans les conditions réelles de fonctionnement. Lorsqu'on a accès à la position mécanique, ce repère est privilégié du fait de la quasi-continuité des grandeurs électriques.

Dans ce travail nous avons opté pour le référentiel lié au rotor car c'est celui qui nécessite le moins de transformations/estimations.

La figure II.03 représente le schéma électrique équivalent de la machine asynchrone en régime dynamique, avec les fuites totalisées au stator.

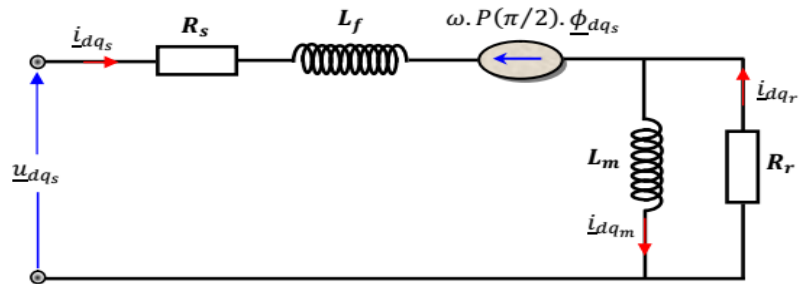


Figure II.03 : Modèle de la machine saine dans le repère de Park lié au rotor

Le modèle de la machine se caractérise alors par quatre paramètres physiques :

R_s, R_r, L_m et L_f . Ce sont donc ces quatre paramètres que nous allons chercher à estimer par la suite dans le cas d'une machine saine.

Pour pouvoir accéder au rotor et concevoir le modèle complet de la machine, il faut tenir compte de l'équation mécanique suivante :

$$J \frac{d\Omega}{dt} = C_{em} - f_v \cdot \Omega - C_r \quad (2.12)$$

$\Omega = \dot{\theta} = \frac{\omega}{p}$ Est la vitesse de l'arbre moteur, J le moment d'inertie, C_{em} le couple électromagnétique, C_r l'ensemble des couples résistifs et f_v le coefficient de frottement visqueux. Le couple électromagnétique peut s'écrire dans le repère diphasé lié au rotor [66] :

$$C_{em} = p \cdot (i_{qs} \cdot \phi_{dr} - i_{ds} \cdot \phi_{qr}) \quad (2.13)$$

En plaçant l'équation 2.13 dans 2.12 on obtient l'équation différentielle électromécanique de la pulsation :

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{p^2}{J} \cdot (i_{qs} \cdot \phi_{dr} - i_{ds} \cdot \phi_{qr}) - \frac{f_v}{J} \cdot \omega - \frac{p}{J} \cdot C_r \quad (2.14)$$

Modéliser la machine de cette manière permet de réduire le nombre de grandeurs nécessaires pour pouvoir simuler le fonctionnement de la machine. En effet, seules les valeurs instantanées des tensions statoriques et du couple résistant doivent être déterminées pour les imposer à la machine.

II.3 Modèle de défauts statoriques :

Les efforts de recherche en modélisation de la machine asynchrone en vue de sa surveillance et son diagnostic sont toujours d'actualité. Plusieurs modèles ont été développés pour tenir compte du défaut de court-circuit entre spires des enroulements statoriques.

Nous pouvons citer les modèles triphasés basés sur la description de la topologie constitutive et géométrique de la machine asynchrone à cage, sous la forme de circuits électriques équivalents magnétiquement couplés [1,44], ou bien les modèles multi enroulements qui représentent la machine par des enroulements au stator et au rotor. Au niveau du stator le modèle est représenté par trois enroulements. Le nombre d'enroulements utilisé pour représenter le rotor est égal au nombre de barres de la cage [45]. Ces modèles triphasés, classés parmi les modèles "complexes" [41], présentent l'avantage d'être fidèles à la structure électrique et magnétique de la machine en défaut. Cependant, ils sont très complexes à mettre en œuvre puisque les hypothèses de simplification liées à la symétrie de la structure de la machine saine ne sont plus valables. De plus la résolution de ces modèles implique des moyens informatiques de calcul puissants ce qui en limite la mise en œuvre.

II.3.1 Modélisation du défaut stator dans le repère de Park :

Dans ce travail de thèse, nous utilisons un modèle relativement simple et adéquat, qui a été développé en vue du diagnostic de la machine asynchrone à cage. Ce modèle est basé sur le fait que, en situation de défaut, la MAS présente en plus d'un comportement dynamique classique, un comportement du au défaut [5]. Il est alors essentiel d'envisager deux modes ; un mode "commun" et un mode "différentiel". Le mode commun doit correspondre au modèle dynamique de la MAS. Exprimé en repère triphasé ou biphasé, il traduit le fonctionnement sain de la machine.

Le mode différentiel a pour objectif de traduire le dysfonctionnement et ses paramètres doivent être essentiellement sensibles au défaut.

Il s'agit de modéliser une machine fictive équivalente dont le stator et le rotor sont toujours constitués de trois phases identiques parcourues par des courants triphasés. Pour prendre en compte l'existence de spires en court-circuit au stator de la machine asynchrone, on introduit une bobine supplémentaire court-circuitée dont le nombre de spires N_{cc} est égal au nombre de spires en défaut dans la machine [5]. Ainsi, en présence d'un déséquilibre statorique, la machine comporte, en plus des bobinages triphasés statoriques et rotoriques, un bobinage court-circuité à l'origine du champ stationnaire de direction fixe θ_{cc} par rapport au stator.

La figure II.04 illustre le stator d'une machine asynchrone à une paire de pôles avec court-circuit sur la phase b_s du stator [8].

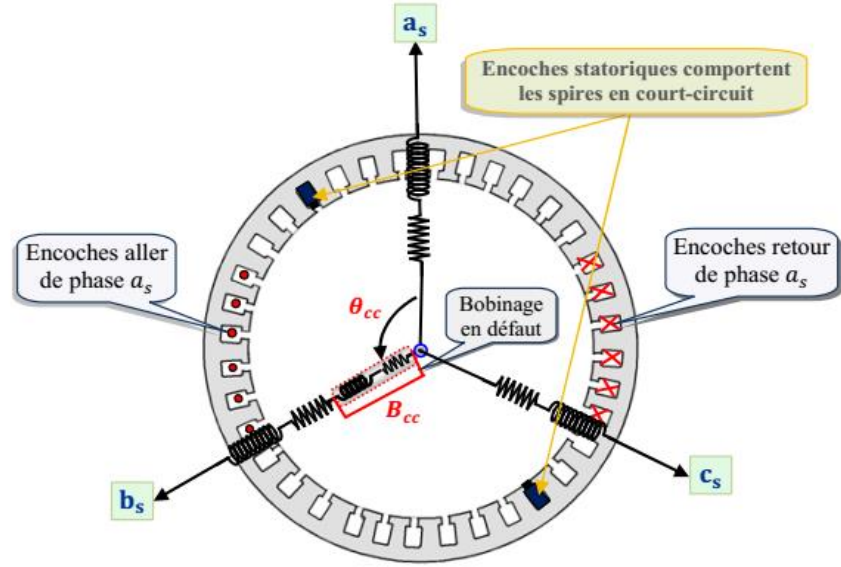


Figure II.04 : Court-circuit de spires sur la phase b_s du stator

On peut constater que le défaut fait apparaître dans la machine un nouveau bobinage B_{cc} , dont le nombre de spires est égal au nombre de spires en court-circuit et la direction égale à $\frac{2\pi}{3}$ (direction de la phase b_s). Afin de définir ce défaut, il est nécessaire d'introduire deux paramètres :

- le rapport de court-circuit, noté $\mu_{cc_k} = \frac{N_{cc_k}}{N_s}$, égal au rapport du nombre de spires en court-circuit (N_{cc_k}) de la $k^{\text{ième}}$ phase sur le nombre total de spires (N_s) dans une phase statorique sans défaut. Ce paramètre permet de quantifier le déséquilibre et d'obtenir le nombre de spires en court-circuit,

- l'angle électrique, noté θ_{cc_k} , repère le bobinage en court-circuit par rapport à l'axe de référence de la phase a_s . Ce paramètre permet la localisation du bobinage en défaut et ne peut prendre que les trois valeurs $0, \frac{2\pi}{3}$ ou $\frac{4\pi}{3}$, correspondant respectivement à un court-circuit sur les phases a_s, b_s ou c_s .

Nous allons maintenant exprimer les différentes équations de tensions et de flux de la machine asynchrone en présence d'un défaut statorique de type court-circuit, en introduisant les paramètres électriques de la bobine en court-circuit B_{cc} .

II.3.2 Modélisation de la machine dans le repère de Park lié au stator :

Les équations de tension et de flux de la bobine B_{cc} exprimées dans le repère biphasé d'axe α et β lié au stator sont les suivantes [5,8,46 – 47]:

$$\begin{cases} 0 = \mu_{cc} \cdot R_s \cdot i_{cc} + \frac{d\phi_{cc}}{dt} \\ \phi_{cc} = \mu_{cc}^2 \cdot \left(\frac{2}{3} \cdot L_m + L_f \right) \cdot i_{cc} + \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \mu_{cc} \cdot L_m [\cos(\theta_{cc}) \sin(\theta_{cc})] (\underline{i}_{\alpha\beta_s} + \underline{i}_{\alpha\beta_r}) \end{cases} \quad (2.18)$$

L_m et L_f : inductance magnétisante et inductance de fuite.

$$\mu_{cc} = \frac{\text{Nombre de spires en court-circuit}}{\text{Nombre de spires sur une phase saine}}$$

θ_{cc} et θ : angle du bobinage en court-circuit et angle mécanique, respectivement.

R_s : résistance propre d'une phase statorique.

Le courant i_{cc} dans le bobinage en défaut est à l'origine du champ magnétique stationnaire par rapport au stator, dirigé selon l'axe θ_{cc} . Ce champ magnétique est à l'origine du flux ϕ_{cc} . En projetant i_{cc} et ϕ_{cc} sur les axes α et β , on leur associe les vecteurs stationnaires :

$$\underline{i}_{\alpha\beta_{cc}} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_{cc}) \\ \sin(\theta_{cc}) \end{bmatrix} \cdot i_{cc} \text{ et } \underline{\phi}_{\alpha\beta_{cc}} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_{cc}) \\ \sin(\theta_{cc}) \end{bmatrix} \cdot \phi_{cc} \quad (2.19)$$

Les relations de l'équation 2.18 deviennent des relations entre des vecteurs stationnaires par rapport au stator. Ainsi, le modèle global de la machine asynchrone en défaut de court-circuit s'écrit :

pour le stator :

$$\begin{cases} \underline{u}_{\alpha\beta_s} = R_s \cdot \underline{i}_{\alpha\beta_s} + \frac{d}{dt} \underline{\phi}_{\alpha\beta_s} \\ \underline{\phi}_{\alpha\beta_s} = L_f \cdot \underline{i}_{\alpha\beta_s} + L_m \cdot \left(\underline{i}_{\alpha\beta_s} + \underline{i}_{\alpha\beta_r} + \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \mu_{cc} \cdot \underline{i}_{\alpha\beta_{cc}} \right) \end{cases} \quad (2.20)$$

Pour le rotor :

$$\begin{cases} \underline{u}_{\alpha\beta_r} = 0 = R_r \underline{i}_{\alpha\beta_r} + \frac{d}{dt} \underline{\phi}_{\alpha\beta_r} - \omega \cdot P \left(\frac{\pi}{2} \right) \underline{\phi}_{\alpha\beta_r} \\ \underline{\phi}_{\alpha\beta_r} = L_m \cdot \left(\underline{i}_{\alpha\beta_s} + \underline{i}_{\alpha\beta_r} + \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \mu_{cc} \cdot \underline{i}_{\alpha\beta_{cc}} \right) \end{cases} \quad (2.21)$$

– et pour le bobinage en défaut :

$$\begin{cases} 0 = \mu_{cc} \cdot R_s \cdot \underline{i}_{\alpha\beta_{cc}} + \frac{d}{dt} \underline{\phi}_{\alpha\beta_{cc}} \\ \underline{\phi}_{\alpha\beta_{cc}} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \mu_{cc} \cdot Q(\theta_{cc}) \cdot \left[L_m \cdot \left(\underline{i}_{\alpha\beta_s} + \underline{i}_{\alpha\beta_r} + \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \mu_{cc} \cdot \underline{i}_{\alpha\beta_{cc}} \right) + \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \mu_{cc} \cdot \underline{i}_{\alpha\beta_{cc}} \right] \end{cases} \quad (2.22)$$

Avec

$\underline{u}_{\alpha\beta_s}$ et $\underline{u}_{\alpha\beta_r}$: tensions statoriques et rotoriques sur les deux axes α et β .
 R_r est la résistance propre d'une phase rotorique et ω_m la pulsation mécanique.

$$Q(\theta_{cc}) = \begin{bmatrix} \cos(\theta_{cc})^2 & \cos(\theta_{cc}) \cdot \sin(\theta_{cc}) \\ \cos(\theta_{cc}) \cdot \sin(\theta_{cc}) & \sin(\theta_{cc})^2 \end{bmatrix}$$

Par analogie avec le schéma équivalent ramenée au primaire des transformateurs et en négligeant le terme en L_f devant L_m dans l'expression du flux de court-circuit (équation 2.22), les équations de flux de la machine asynchrone en défaut statorique deviennent :

$$\begin{cases} \underline{\phi}_{\alpha\beta_s} = \underline{\phi}_{\alpha\beta_f} + \underline{\phi}_{\alpha\beta_m} = L_f \cdot \underline{i}_{\alpha\beta_s} + L_m \cdot (\underline{i}_{\alpha\beta_s} + \underline{i}_{\alpha\beta_r} - \tilde{\underline{\alpha}}\beta_{cc}) \\ \underline{\phi}_{\alpha\beta_r} = \underline{\phi}_{\alpha\beta_m} = L_m \cdot (\underline{i}_{\alpha\beta_s} + \underline{i}_{\alpha\beta_r} - \tilde{\underline{\alpha}}\beta_{cc}) \\ \underline{\phi}_{\alpha\beta_0} \approx \mu_{cc} \cdot Q(\theta_{cc}) \cdot \underline{\phi}_{\alpha\beta_m} \end{cases} \quad (2.23)$$

Avec

$$\tilde{\underline{\alpha}}\beta_{cc} = -\sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \mu_{cc} \cdot \underline{i}_{\alpha\beta_{cc}} \quad \text{et} \quad \underline{\phi}_{\alpha\beta_{cc}} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \underline{\phi}_{\alpha\beta_{cc}}$$

$\underline{\phi}_{\alpha\beta_m}$ et $\underline{\phi}_{\alpha\beta_f}$: flux magnétisant et flux de fuite statorique.

Ainsi, l'équation de tension du bobinage en défaut ramenée au primaire s'écrit :

$$\tilde{\underline{\alpha}}\beta_{cc} = \frac{2}{3} \cdot \frac{\mu_{cc}}{R_s} \cdot Q(\theta_{cc}) \cdot \frac{d\phi_{\alpha\beta_m}}{dt} \quad (2.24)$$

D'après cette équation, la bobine en défaut se ramène à un simple quadripôle résistif, non équilibré, mis en parallèle avec l'inductance magnétisante.

L'existence de la matrice $Q(\theta_{cc})$ fait que la représentation d'état dans le repère du stator reste complexe. En négligeant les chutes de tension dues à R_s et L_f devant les tensions d'entrée $\underline{u}_{\alpha\beta_s}$, on peut approcher les tensions aux bornes du quadripôle de court-circuit par les tensions statoriques. Les courants de ligne sont alors la somme des courants dus au court-circuit et des courants consommés par le modèle classique de Park. Ainsi, il devient possible d'exprimer simplement l'équation du bobinage en défaut dans le repère statorique :

$$\tilde{\underline{\alpha}}\beta_{cc} = \frac{2}{3} \cdot \frac{\mu_{cc}}{R_s} \cdot Q(\theta_{cc}) \cdot \underline{u}_{\alpha\beta_s} \quad (2.25)$$

La figure II.05 représente le schéma équivalent de la machine asynchrone en régime dynamique à fuites totalisées au stator, tenant compte du défaut de court-circuit.

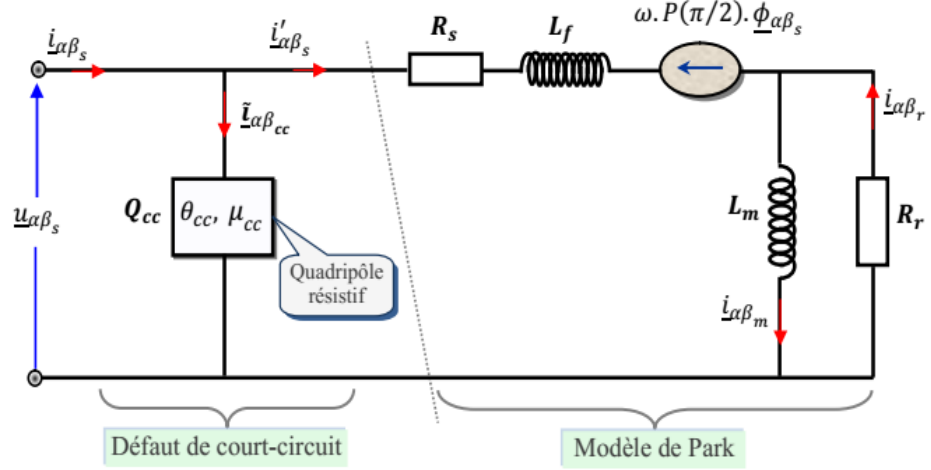


Figure II.05 : Modèle de court-circuit dans le repère lié au stator

II.3.3 Généralisation du modèle de défaut statorique :

Très simple à implanter car exprimé dans le repère de Park lié au rotor, le modèle de défaut stator que nous venons de présenter offre l'avantage d'expliquer le défaut à travers un quadripôle résistif dédié au bobinage en défaut. Par contre, il est inadapté dans le cas d'un défaut simultané sur plusieurs phases. En effet, cette représentation n'est valide que dans le cas d'un défaut sur une seule phase, le quadripôle de court-circuit se chargeant alors d'expliquer le défaut à travers les deux paramètres θ_{cc} et μ_{cc} . En présence de courts-circuits sur plusieurs phases, ce modèle risque de traduire le défaut par des paramètres aberrants, vu qu'il ne tient compte que d'un seul bobinage.

Pour y remédier, ce modèle est généralisé, associant ainsi à chaque phase du stator un quadripôle de court-circuit qui prend en charge l'explication d'éventuels bobinages en défaut [8]. Ainsi, en présence de plusieurs courts-circuits, chaque quadripôle permet le diagnostic d'une phase en surveillant la valeur du paramètre μ_{cc} et le simple dépassement d'un seuil permet de détecter la présence d'un déséquilibre au stator.

Le mode différentiel représenté par le quadripôle Q_{cc} étant indépendant de la dynamique du mode commun, il serait judicieux de généraliser le modèle de défaut au cas d'un défaut simultané sur plusieurs phases en associant à chaque phase un quadripôle de court-circuit. Comme les trois phases sont repérées par les angles $0, \frac{2\pi}{3}$ et $\frac{4\pi}{3}$ il suffit donc de définir trois bobinages de court-circuit dont les rapports sont respectivement $\mu_{cc_1}, \mu_{cc_2}, \mu_{cc_3}$ correspondant aux phases a_s, b_s et c_s du stator [48-49]. Ce qui revient à mettre en parallèle trois quadripôles résistifs Q_{cc_k} prenant en charge l'explication d'éventuels bobinages en défaut.

Chaque quadripôle sera parcouru par un courant $\tilde{I}_{dq_{cc_k}}$ dont l'expression est la suivante :

$$\tilde{I}_{dq_{cc_k}} = \frac{2\mu_{cc_k}}{3R_s} P(-\theta) \cdot Q(\theta_{cc_k}) \cdot P(\theta) \cdot \underline{u}_{dq_s} \quad (2.26)$$

$Q(\theta_{cc_k})$: Matrice situant l'angle du bobinage en court-circuit (si le court-circuit se produit sur la phase a_s (resp. b_s et c_s) alors l'angle est égal à 0 rad (resp. $\frac{2\pi}{3}$ et $\frac{4\pi}{3}$).

La figure II.06 donne le schéma électrique équivalent de la machine asynchrone en régime transitoire dans le repère de Park avec fuites totalisées au stator, en tenant compte d'un éventuel défaut de court-circuit sur une ou plusieurs phases.

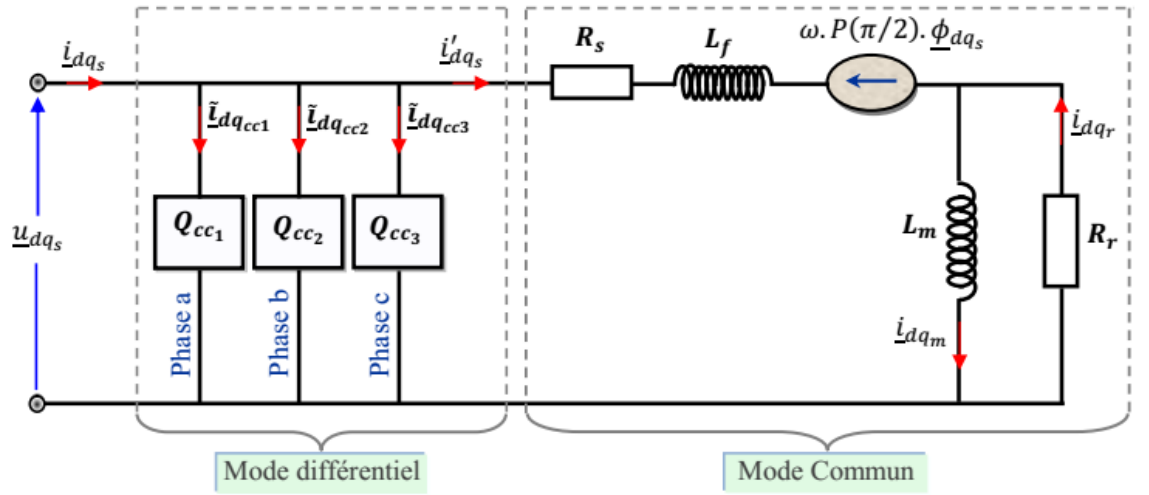


Figure II.06 : Modèle électrique de la machine en présence de défauts dans les trois phases statoriques

A présent, les angles de court-circuit θ_{cc_k} sont connus, ce qui permet de diagnostiquer chaque phase indépendamment en surveillant la valeur du rapport μ_{cc_k} et le simple dépassement d'un seuil permet de signaler la présence d'un déséquilibre sur celle-ci. Le modèle global de défaut statorique sera donc paramétrisé par 7 termes $\{R_s, R_r, L_m, L_f, \mu_{cc_1}, \mu_{cc_2}, \mu_{cc_3}\}$.

Dans un référentiel noté (x) tournant à une vitesse ω_a par rapport au stator de la machine asynchrone, l'ensemble des équations électriques de la machine asynchrone en défaut de court-circuit statorique s'écrit [5,8] :

$$\begin{cases} \underline{u}_{dq_s}^{(x)} = R_s \cdot i_{dq_s}'^{(x)} + \frac{d}{dt} \phi_{dq_s}^{(x)} + \omega_a \cdot P\left(\frac{\pi}{2}\right) \cdot \underline{\phi}_{dq_s}^{(x)} \\ \underline{\phi}_{dq_s}^{(x)} = (L_f + L_m) \cdot i_{dq_s}'^{(x)} + L_m \cdot i_{dq_r}'^{(x)} \end{cases} \quad (2.27)$$

$$\begin{cases} 0 = R_r \cdot i_{dq_r}'^{(x)} + \frac{d}{dt} \phi_{dq_r}^{(x)} + (\omega_a - \omega) \cdot P\left(\frac{\pi}{2}\right) \cdot \underline{\phi}_{dq_r}^{(x)} \\ \underline{\phi}_{dq_r}^{(x)} = L_m \cdot (i_{dq_s}'^{(x)} + i_{dq_r}'^{(x)}) \end{cases} \quad (2.28)$$

$$i_{dq_s}^{(x)} = i_{dq_s}'^{(x)} + \tilde{i}_{dq_{cc}}^{(x)} = i_{dq_s}'^{(x)} + \sum_{k=1}^3 \underline{l}_{dq_{cc}k}^{(x)} \quad (2.29)$$

$$\tilde{i}_{dq_{cc}k}^{(x)} = \frac{2\mu_{cc_k}}{3R_s} P(-\theta_a) \cdot Q(\theta_{cc_k}) \cdot P(\theta_a) \quad (2.30)$$

Si on veut procéder à un diagnostic par identification paramétrique, on est obligé de se placer dans le repère du rotor. Ainsi les équations de tensions et de flux de la machine asynchrone en présence d'un défaut statorique de type court-circuit, dans un référentiel lié au rotor, deviennent : Mode commun (stator et rotor) :

$$\begin{cases} \underline{u}_{dq_s} = R_s \cdot i_{dq_s}' + \frac{d}{dt} \phi_{dq_s} + \omega \cdot P\left(\frac{\pi}{2}\right) \cdot \phi_{dq_s} \\ \phi_{dq_s} = (L_f + L_m) \cdot i_{dq_s}' + L_m \cdot i_{dq_r}' \end{cases} \quad (2.31)$$

$$\begin{cases} 0 = R_r \cdot i_{dq_r}' + \frac{d}{dt} \phi_{dq_r} \\ \phi_{dq_r} = L_m \cdot (i_{dq_s}' + i_{dq_r}') \end{cases} \quad (2.32)$$

Mode différentiel (courants de court-circuit) :

$$\tilde{i}_{dq_{cc}k} = \frac{2\mu_{cc_k}}{3R_s} \cdot P(-\theta) \cdot Q(\theta_{cc_k}) \cdot P(\theta) \cdot \underline{u}_{dq_s} \quad (2.33)$$

Courant résultant

$$i_{dq_s} = i_{dq_s}' + \tilde{i}_{dq_{cc}} = i_{dq_s}' + \sum_{k=1}^3 \underline{l}_{dq_{cc}k} \quad (2.34)$$

II.4 Modèle de défauts rotoriques :

Plusieurs modèles de rupture de barres sont proposés dans la littérature. Dans le cadre du diagnostic des défauts rotoriques, la mise au point d'un modèle est surtout motivée par les possibilités de simuler ces défauts. Les références [50-52] proposent une modélisation de la machine asynchrone à cage d'écureuil faisant intervenir les paramètres électriques des barres et de l'anneau.

Ces modèles offrent la possibilité de simuler une rupture de barres en réduisant simplement leur nombre total ou en augmentant leur résistance. Outre leur complexité, l'inconvénient de ces modèles est qu'ils nécessitent une connaissance approfondie des paramètres électriques de la machine. Dans le cas d'une approche paramétrique, ce modèle est inapproprié en raison du nombre élevé des paramètres qui le régissent.

Comme dans le cas de la modélisation des courts-circuits au stator, le modèle de défaut rotorique, que nous allons présenter dans ce paragraphe, explique le déséquilibre à travers des paramètres qui sont l'image du défaut présent dans la machine. Ces paramètres permettent ainsi de quantifier et de localiser le défaut.

II.4.1 Modélisation du rotor en défaut :

La figure II.07 illustre la modélisation conventionnelle du rotor par dipôles élémentaires avec une barre cassée [31,76].

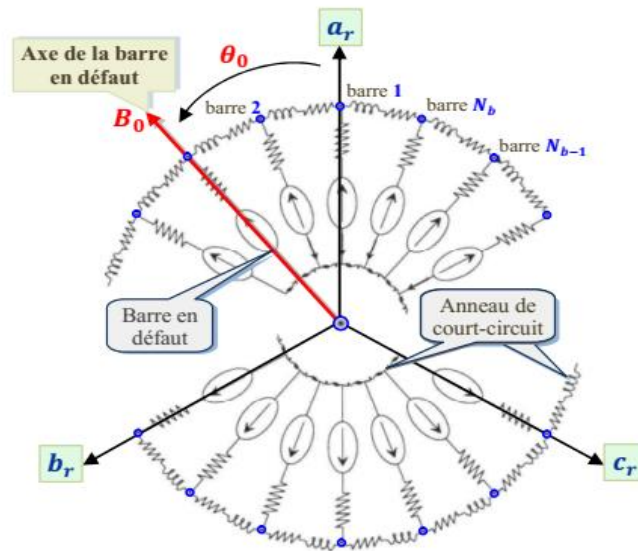


Figure II.07 : Modélisation par dipôles élémentaires du rotor en défaut

Comme pour un défaut statorique, une rupture de barre rotorique est à l'origine d'un champ stationnaire H_0 par rapport au rotor, dirigé selon l'angle θ_0 de la barre en défaut. Un paramètre supplémentaire η_0 est naturellement introduit pour quantifier le défaut rotorique [47,53]. Le rotor, dans le repère biphasé,

comporte donc un troisième bobinage court-circuité du fait de la cage d'écureuil, parcouru par un courant de défaut fictif i_0 et dont le nombre de spires fictives est proportionnel au taux de défaut. Pour tenir compte de cette anomalie de champ, ce bobinage doit obligatoirement avoir la même direction que la barre en défaut. Par conséquent, le mode différentiel introduit comporte deux paramètres de défaut permettant la détection et la localisation des barres cassées : l'angle électrique noté θ_0 repérant le bobinage en défaut. Ce paramètre permet la localisation de la barre en défaut.

– Le rapport de défaut noté η_0 égal au rapport du nombre de spires en défaut sur le nombre total de spires dans une phase triphasée rotorique fictive sans défaut. Ce Paramètre permet de quantifier le déséquilibre et d'obtenir le nombre de barres cassées.

Le nombre de spires au rotor étant fictif, pour un rotor de N_b barres, si on considère une spire rotorique comme étant une maille constituée de deux barres court-circuitées par deux portions d'anneaux [47,53], alors le nombre total de spires rotoriques est égal au nombre de barres au rotor. Une phase fictive est donc constituée de $N_b/3$ barres. Pour N_{bc} barres cassées sur une phase, l'expression du rapport de défaut η_0 est donnée par :

$$\eta_0 = \frac{3 \cdot N_{bc}}{N_b} \quad (2.36)$$

II.4.2 Modélisation du défaut de rupture des barres :

Les équations de tension et de flux de la bobine en défaut B_0 exprimées dans le repère biphasé d'axe d et q lié au rotor sont les suivantes [47] :

$$\begin{cases} 0 = \eta_0 \cdot R_r \cdot i_0 + \frac{d\phi_0}{dt} \\ \phi_0 = \frac{2}{3} \eta_0^2 \cdot L_r \cdot i_0 + \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \eta_0 \cdot L_r \cdot [\cos(\theta_0) \sin(\theta_0)] \cdot (\underline{i}_{dq_s} + \underline{i}_{dq_r}) \end{cases} \quad (2.37)$$

Avec

$$\eta_0 = \frac{\text{Nombre de spires fictives en défaut}}{\text{Nombre total de spires fictives sur une phase}}$$

θ_0 : angle repérant le défaut

Le courant i_0 dans le bobinage représentant le défaut est donc à l'origine du champ magnétique H_0 stationnaire par rapport au rotor et dirigé selon l'axe θ_0 . Ce champ magnétique est à l'origine du flux ϕ_0 . En projetant i_0 et ϕ_0 sur les axes d et q de Park, on leur associe les vecteurs stationnaires :

$$\underline{i}_{dq_0} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_0) \\ \sin(\theta_0) \end{bmatrix} \cdot i_0; \quad \underline{\phi}_{dq_0} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_0) \\ \sin(\theta_0) \end{bmatrix} \cdot \phi_0 \quad (2.38)$$

La relation 2.37 devient une relation entre des vecteurs stationnaires par rapport au rotor.

Ainsi, dans le repère rotorique, l'ensemble des équations de la matrice au stator, au rotor et au bobinage B_0 est donné par :

$$\begin{cases} \underline{u}_{dq_s} = R_s \cdot \underline{i}_{dq_s} + \frac{d}{dt} \underline{\phi}_{dq_s} + \omega \cdot P\left(\frac{\pi}{2}\right) \cdot \underline{\phi}_{dq_s} \\ \underline{\phi}_{dq_s} = L_f \cdot \underline{i}_{dq_s} + L_m \cdot \left(\underline{i}_{dq_s} + \underline{i}_{dq_r} + \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \eta_0 \cdot \underline{i}_{dq_0} \right) \end{cases} \quad (2.39)$$

$$\begin{cases} 0 = R_r \underline{i}_{dq_r} + \frac{d}{dt} \underline{\phi}_{dq_r} \\ \underline{\phi}_{dq_r} = L_m \cdot \left(\underline{i}_{dq_s} + \underline{i}_{dq_r} + \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \eta_0 \cdot \underline{i}_{dq_0} \right) \end{cases} \quad (2.40)$$

$$\begin{cases} 0 = \eta_0 \cdot R_r \cdot \underline{i}_{dq_0} + \frac{d}{dt} \underline{\phi}_{dq_0} \\ \underline{\phi}_{dq_0} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \eta_0 \cdot L_m \cdot Q(\theta_0) \cdot \left(\underline{i}_{dq_s} + \underline{i}_{dq_r} + \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \eta_0 \cdot \underline{i}_{dq_0} \right) \end{cases} \quad (2.41)$$

Avec :

$$Q(\theta_0) = \begin{bmatrix} \cos(\theta_0)^2 & \cos(\theta_0) \cdot \sin(\theta_0) \\ \cos(\theta_0) \cdot \sin(\theta_0) & \sin(\theta_0)^2 \end{bmatrix} \text{ et } P(\theta) = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta + \frac{\pi}{2}\right) \\ \sin(\theta) & \sin\left(\theta + \frac{\pi}{2}\right) \end{bmatrix}$$

Par analogie avec le schéma équivalent ramené au primaire des transformateurs, les équations de flux de la machine asynchrone en défaut rotorique deviennent :

$$\begin{cases} \underline{\phi}_{dq_s} = \underline{\phi}_{dq_f} + \underline{\phi}_{dq_m} = L_f \cdot \underline{i}_{dq_s} + L_m \cdot (\underline{i}_{dq_s} + \underline{i}_{dq_r} - \tilde{\underline{i}}_{dq_0}) \\ \underline{\phi}_{dq_r} = \underline{\phi}_{dq_m} = L_m \cdot (\underline{i}_{dq_s} + \underline{i}_{dq_r} - \tilde{\underline{i}}_{dq_0}) \\ \tilde{\underline{\phi}}_{dq_0} = \eta_0 \cdot Q(\vartheta_0) \cdot \underline{\phi}_{dq_m} \end{cases} \quad (2.42)$$

Avec :

$$\tilde{\underline{i}}_{dq_0} = -\sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \eta_0 \cdot \underline{i}_{dq_0}; \quad \underline{\phi}_{dq_0} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \underline{\phi}_{dq_m}$$

De même, l'équation de tension du bobinage en défaut ramenée au primaire s'écrit :

$$\underline{L}_{dq_0} = \frac{2}{3} \cdot \frac{\eta_0}{R_r} \cdot Q(\theta_0) \cdot \frac{d\phi_{dq_m}}{dt} = R_0^{-1} \cdot \frac{d\phi_{dq_m}}{dt} \quad (2.43)$$

Le schéma équivalent de la machine asynchrone en défaut de rupture de barres dans le repère de Park lié au rotor est représenté par la figure II.08.

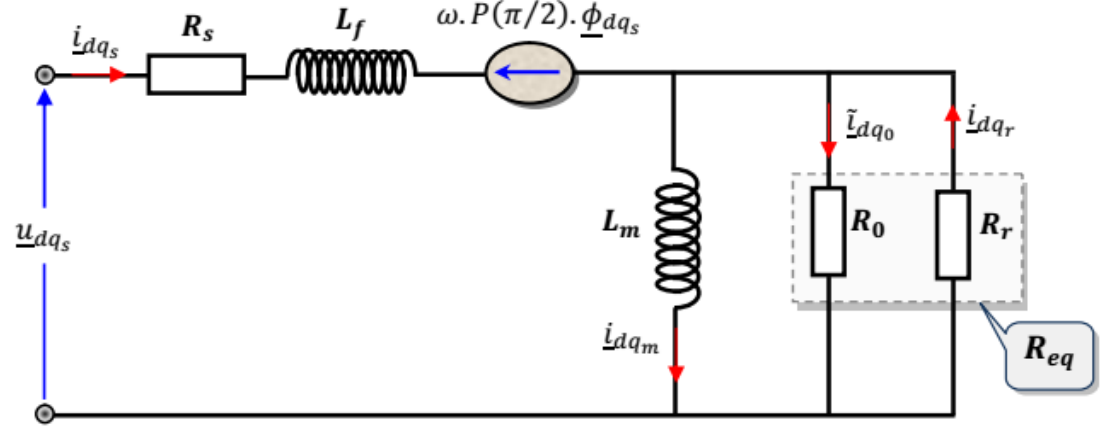


Figure II.08 : Modèle de défaut rotorique de la machine asynchrone dans le repère de Park

II.4.3 Schéma électrique équivalent :

Le schéma équivalent peut être représenté en considérant la résistance R_{eq} équivalente et cela par la mise en parallèle de la résistance R_r et la résistance de défaut R_0 :

$$R_{eq}^{-1} = R_r^{-1} + R_0^{-1} = R_r^{-1} + \frac{2}{3} \cdot R_r^{-1} \cdot Q(\theta_0) \quad (2.44)$$

En inversant pour obtenir l'expression de la matrice équivalente :

$$R_{eq} = R_r + R_{\text{déf}} = R_r - \frac{\alpha}{1 + \alpha} \cdot Q(\theta_0) \cdot R_r \quad (2.45)$$

Avec : $\alpha = \frac{2}{3} \cdot \eta_0$

Ainsi on obtient un schéma équivalent avec la mise en série de la résistance R_r et de la matrice de défaut $R_{\text{déf}}$

La figure II.09 illustre le schéma équivalent de la machine asynchrone avec un défaut rotorique en régime dynamique avec fuites ramenées au stator, dans le repère rotorique. La rupture de barre au rotor se ramène à un simple quadripôle résistif $R_{\text{déf}}$ mis en série avec la résistance rotorique.

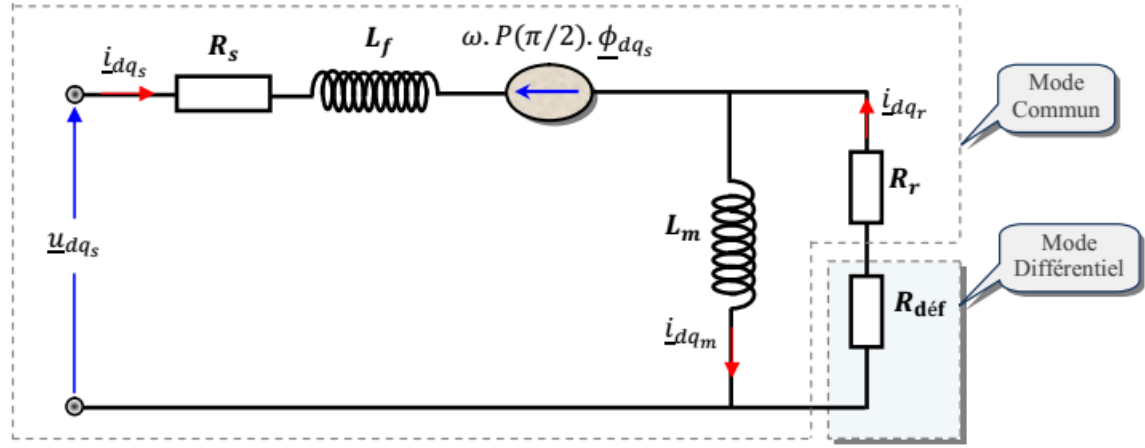


Figure II.09 : Modèle de défaut rotorique de la machine asynchrone

La distinction entre les résistances R_r saine et de défaut $R_{d\acute{e}f}$ se fait à travers :

$$R_r = R_r \cdot I_2 = R_r \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Et

$$R_{d\acute{e}f} = -\frac{\alpha}{1 + \alpha} \cdot R_r \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta_0)^2 & \cos(\theta_0) \cdot \sin(\theta_0) \\ \cos(\theta_0) \cdot \sin(\theta_0) & \sin(\theta_0)^2 \end{bmatrix}$$

On remarque que la résistance de défaut, au contraire de la résistance saine, possède des termes de couplage.

Si la machine est saine ($\alpha = 0$), ce qui correspond à $R_{d\acute{e}f}$ nulle, ce qui revient à court-circuiter le quadripôle de défaut, le schéma équivalent correspond donc à celui du modèle classique de Park lié au rotor.

Lorsque le paramètre α est non nul, la résistance $R_{d\acute{e}f}$ introduit un déséquilibre dans les grandeurs rotoriques ainsi que des termes de couplage sur les axes d et q du rotor. Par conséquent, de nouvelles composantes dont la pulsation est proportionnelle au glissement de la machine sont introduites, et se retrouvent de ce fait dans les courants statoriques, traduisant ainsi un déséquilibre rotorique.

L'angle θ_0 permet d'effectuer un repérage absolu du bobinage en défaut par rapport à l'axe d . En effet, les courants réels induits dans les encoches rotoriques étant N_p phasés, l'angle θ_0 est donc fixé par la position initiale du rotor par rapport au stator. Pour localiser une barre cassée, il faut donc imposer au rotor une référence qui permet de repérer les barres selon l'angle θ_0 : il suffit pour cela d'effectuer la mesure de la position du rotor grâce à un capteur de position.

L'ensemble des équations électriques de la machine asynchrone en défaut rotorique, dans un référentiel lié au rotor, s'écrit :

$$\begin{cases} \underline{u}_{dq_s} = R_s \cdot \underline{i}_{dq_s} + \frac{d}{dt} \phi_{dq_s} + \omega \cdot P \left(\frac{\pi}{2} \right) \cdot \underline{\phi}_{dq_s} \\ \underline{\phi}_{dq_s} = (L_f + L_m) \cdot \underline{i}_{dq_s} + L_m \cdot \underline{i}_{dq_r} \end{cases} \quad (2.46)$$

$$\begin{cases} 0 = R_r \cdot \underline{i}_{dq_r} + \frac{d}{dt} \phi_{dq_r} \\ \phi_{dq_r} = L_m \cdot (\underline{i}_{dq_s} + \underline{i}_{dq_r}) \end{cases} \quad (2.47)$$

$$\begin{cases} R_{eq} = R_r \cdot I_2 + R_{\text{déf}} \\ R_{\text{déf}} = \frac{\alpha}{1 - \alpha} \cdot Q(\theta_0) \cdot R_r \end{cases} \quad (2.48)$$

II.5 Modèle de défaut simultané stator/rotor :

Nous avons présenté, dans les paragraphes précédents, deux modèles de défaut de la machine asynchrone à cage. Chaque modèle est dédié à un défaut particulier : court-circuit des spires au stator et rupture de barres au rotor. En milieu industriel, les défauts intervenant en cours de fonctionnement sont rarement localisés dans une seule partie de la machine. En effet, la réaction en chaîne des incidents est fortement envisageable car le rotor, comme le stator, sont soumis au même environnement. Ainsi, il est intéressant, dans une optique de surveillance généralisée de la machine, d'envisager un diagnostic de défauts simultanés stator/rotor.

II.5.1 Modèle global de la machine asynchrone en défaut stator/rotor :

En situation de défaut combiné stator/rotor, la signature d'un défaut statorique est différente d'un défaut rotorique. En effet, un quelconque défaut statorique est à l'origine d'un champ stationnaire par rapport au stator dirigé selon l'axe de la bobine en défaut, les grandeurs qui en découlent sont alors naturellement autour des hautes fréquences (fréquence du champ tournant). Par contre, un défaut rotorique est à l'origine d'un champ stationnaire par rapport au rotor dirigé selon l'axe de la barre en défaut. Le rotor étant mobile, les grandeurs du défaut sont alors proches des basses fréquences (fréquence de glissement).

Etant donné que les deux principaux défauts peuvent être découplés, on propose le modèle global de défaut simultané stator/rotor [8, 43] représenté sur la figure II.10.

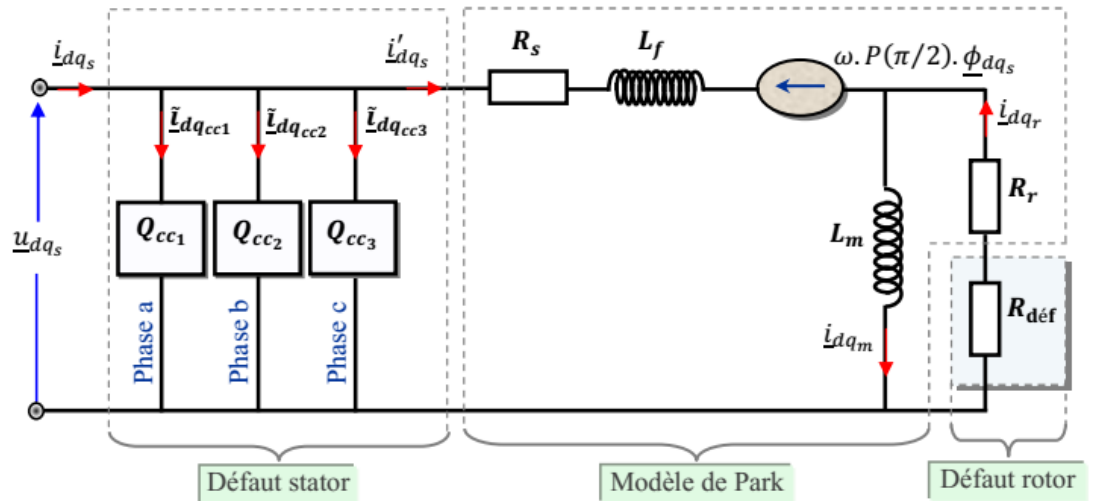


Figure II. 10 : Modèle de défauts mixte stator/rotor de la machine asynchrone

Ce modèle fait intervenir le fonctionnement sain de la machine (modèle de Park), les courts-circuits de spires au stator à travers des quadripôles de court-circuit, et la rupture de barres au rotor à travers la matrice résistance de défaut.

L'ensemble des équations électriques de la machine asynchrone en défaut simultané stator/rotor, dans le repère de Park lié au rotor, s'écrit alors :

$$\begin{cases} \underline{u}_{dq_s} = R_s \underline{i}'_{dq_s} + \frac{d}{dt} \underline{\phi}_{dq_s} + \omega \cdot P \left(\frac{\pi}{2} \right) \underline{\phi}_{dq_s} \\ \underline{\phi}_{dq_s} = (L_f + L_m) \cdot \underline{i}'_{dq_s} + L_m \cdot \underline{i}_{dq_r} \end{cases} \quad (2.50)$$

$$\begin{cases} 0 = R_{eq} \cdot \underline{i}_{dq_r} + \frac{d}{dt} \underline{\phi}_{dq_r} \\ \underline{\phi}_{dq_r} = L_m \cdot (\underline{i}'_{dq_s} + \underline{i}_{dq_r}) \end{cases} \quad (2.51)$$

$$\underline{i}_{dq_s} = \underline{i}'_{dq_s} + \sum_1^3 \underline{\underline{L}}_{dq_{cc_k}} \quad (2.52)$$

$$\underline{\tilde{L}}_{dq_{cc_k}} = \frac{2\mu_{cc}}{3R_s} \cdot P(-\theta) \cdot Q(\theta_{cc_k}) \cdot P(\theta) \cdot \underline{u}_{dq_s} \quad (2.53)$$

$$\begin{cases} R_{eq} = R_r \cdot I_2 + R_{\text{déf}} \\ R_{\text{déf}} = \frac{\alpha}{1 - \alpha} \cdot Q(\theta_0) \cdot R_r \end{cases} \quad (2.54)$$

Le modèle de défaut mixte stator/rotor permet la détection et la localisation de spires en court-circuit à partir des rapports μ_{cc_k} et des angles θ_{cc_k} ainsi que la quantification du nombre de barres cassées à travers le rapport η_0 . Ainsi, la connaissance de ces paramètres par identification paramétrique permet une surveillance généralisée de la machine asynchrone.

II.6 Conclusion :

. Afin d'aboutir à des méthodes de détection de défauts fiables, il est apparu le besoin de disposer de modèles de la machine en présence de défaut permettant non seulement de caractériser la signature du défaut, mais aussi de comprendre l'origine de son apparition, son évolution éventuelle et ses conséquences sur les performances de la machine.

Pour ces raisons, ce chapitre a été consacré à la présentation du modèle de la machine saine ainsi que des modèles de défaut statorique et rotorique. Les modèles de défauts utilisés sont des modèles simples qui sont basés sur le fait que, en situation de défaut, la machine présente en plus d'un comportement dynamique classique un comportement du au défaut.

Il est alors essentiel d'envisager deux modes : un mode "commun" et un mode "différentiel".

Le mode commun doit correspondre au modèle dynamique de la machine asynchrone. Exprimé en repère triphasé ou biphasé, il traduit le fonctionnement sain de la machine.

Le mode différentiel a pour objectif de traduire le dysfonctionnement et ses paramètres qui doivent être essentiellement sensibles au défaut.

CHAPITRE III

Simulation et résultats

III.1 Introduction :

La simulation des machines constituent une étape primordiale pour la mise au point d'une procédure de diagnostic, elles permettent la compréhension du fonctionnement sain et défectueux.

Après avoir défini les modèles de la machine : défaut de court-circuit entre spires statoriques, défaut de rupture des barres rotoriques et défauts simultanés stator/rotor, un programme écrit en Matlab/Simulink, permet de mettre en évidence le comportement du moteur asynchrone dans les différentes conditions de fonctionnement.

Cette simulation a pour objectif, d'analyser ainsi que d'expliquer les phénomènes observés sur les grandeurs électriques et mécaniques de la machine telle que les oscillations qui apparaissent dans les courants statoriques, le couple électromagnétique et la vitesse du rotor.

III.2 Simulation de la machine saine :

En considérant les dynamiques des flux rotoriques Φ_{dq_r} , des courants statoriques i_{dq_s} et les dynamiques électromécaniques (ω, θ) , le système peut alors être décrit par le système d'équations non linéaires :

$$\begin{cases} \dot{\underline{x}} = f(\underline{x}) + g \cdot \underline{u} \\ \underline{y} = h(\underline{x}) \end{cases} \quad (2.15)$$

Avec :

$\underline{x} = [i_{d_s} \ i_{q_s} \ \phi_{d_r} \ \phi_{q_r} \ \omega \ \theta]^T$: vecteur d'état

$\underline{U} = [u_{d_s} \ u_{q_s} \ c_r]^t$ et $\underline{y} = [i_{d_s} \ i_{q_s} \ \omega]^t$: entrées et sorties du système, respectivement

$$f(\underline{x}) = \begin{bmatrix} -\frac{R_s + R_r}{L_f} \cdot i_{d_s} + \omega \cdot i_{q_s} + \frac{R_r}{L_m \cdot L_f} \cdot \phi_{d_r} + \frac{\omega}{L_f} \cdot \phi_{q_r} \\ -\omega \cdot i_{d_s} - \frac{R_s + R_r}{L_f} \cdot i_{q_s} - \frac{\omega}{L_f} \cdot \phi_{d_r} + \frac{R_r}{L_m \cdot L_f} \cdot \phi_{q_r} \\ R_r \cdot i_{d_s} - \frac{R_r}{L_m} \cdot \phi_{d_r} \\ R_r \cdot i_{q_s} - \frac{R_r}{L_m} \cdot \phi_{q_r} \\ \frac{p^2}{J} \cdot (i_{q_s} \cdot \phi_{d_r} - i_{d_s} \cdot \phi_{q_r}) - \frac{f_v}{J} \cdot \omega \\ \omega \end{bmatrix}, g = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_f} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_f} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{p}{J} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, h(\underline{x}) = \begin{bmatrix} i_{d_s} \\ i_{q_s} \\ \omega \end{bmatrix}$$

$$\omega = d\theta/dt$$

La résolution des équations de ce modèle a été faite par la méthode de Runge-Kutta d'ordre 4 avec une période d'échantillonnage de 0.7 ms. Nous excitons la machine avec une entrée triphasée sinusoïdale u_s , et à chaque pas d'échantillonnage, nous calculons les tensions statoriques u_{dqs} de park :

$$u_{dqs} = P(-\theta).T_{32}.u_s \quad (2.16)$$

Pour pouvoir tracer les courants de chaque phase statorique, nous les avons calculés en simulation à partir des courants de Park i_{dqs} :

$$i_s = T_{32}.P(\theta).i_{dqs} \quad (2.17)$$

Le modèle de simulation de la machine asynchrone alimentée par une source de tension sinusoïdale triphasée équilibrée. Les variables d'entrée sont les trois tensions u_a, u_b, u_c et le couple de charge C_r

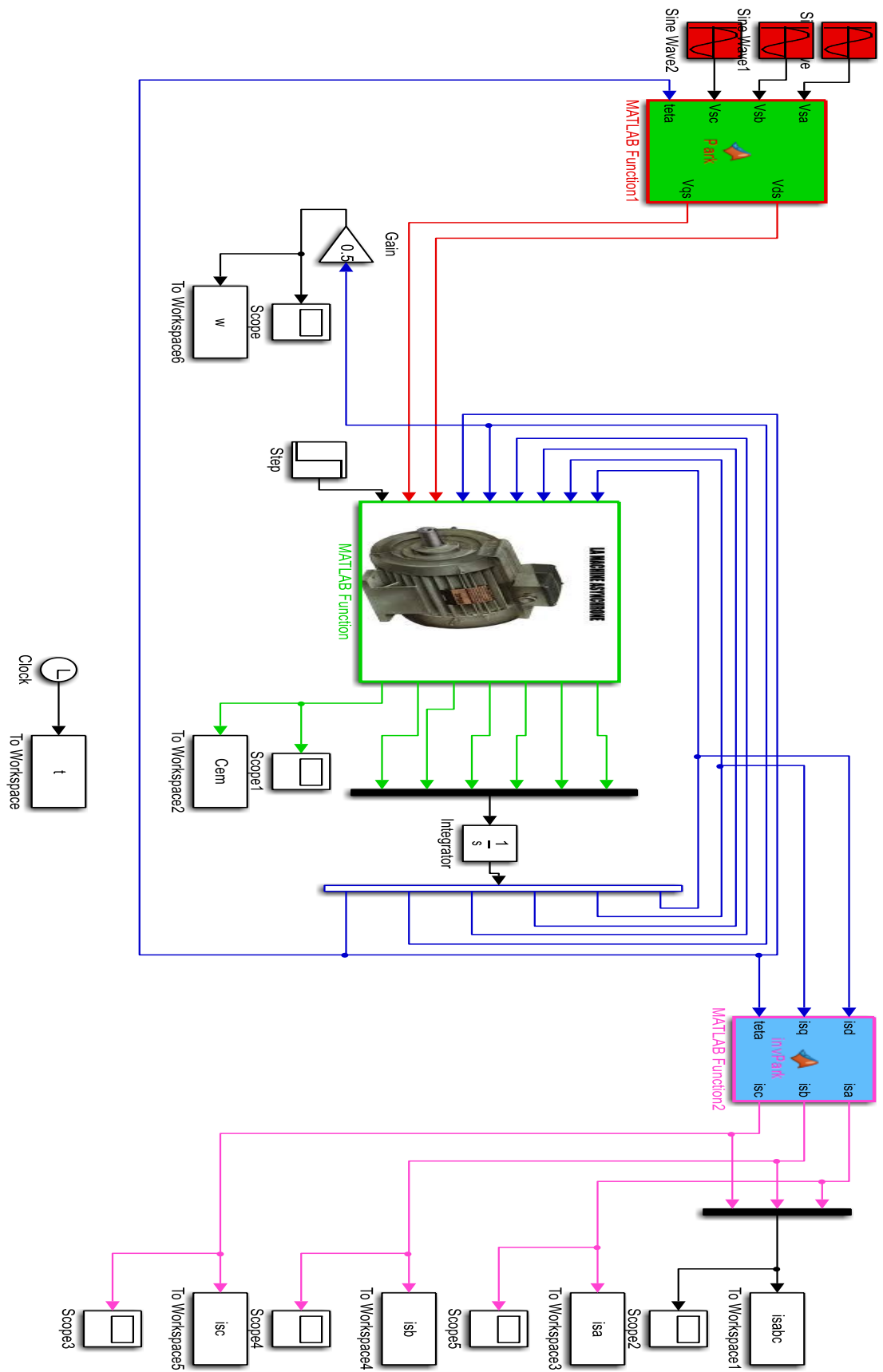


Figure III.01 : Schéma bloc du moteur asynchrone sain

Les simulations ont été effectuées sous Matlab-Simulink. Les paramètres de la machine utilisée dans cette modélisation sont groupés dans le tableau :

220/380 V, 50HZ, 1.1KW	
Paramètres	Valeurs
Résistance statorique	$R_s = 9.8\Omega$
Résistance rotorique	$R_r = 5.3\Omega$
Inductance rotorique	$L_m = 0.5H$
Inductance de fuites	$L_f = 0.04H$
Coefficient de frottement visqueux	$f_v = 1.19 \cdot 10^{-3} \text{ N.m.s/rad}$
Moment d'inertie	$J = 12.5 \cdot 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
Nombre de paires de pôles	$p = 2$
Nombre de barres au rotor	$N_b = 28$
Nombre de spires par phase	$N_s = 464$

III.2.1 Résultats de simulation en fonctionnement saine :

Le modèle complet de la machine asynchrone étant maintenant connu, nous pouvons étudier l'évolution des grandeurs temporelles tels que les courants, le couple ou encore la vitesse rotorique lorsque la machine ne présente aucune défaillance.

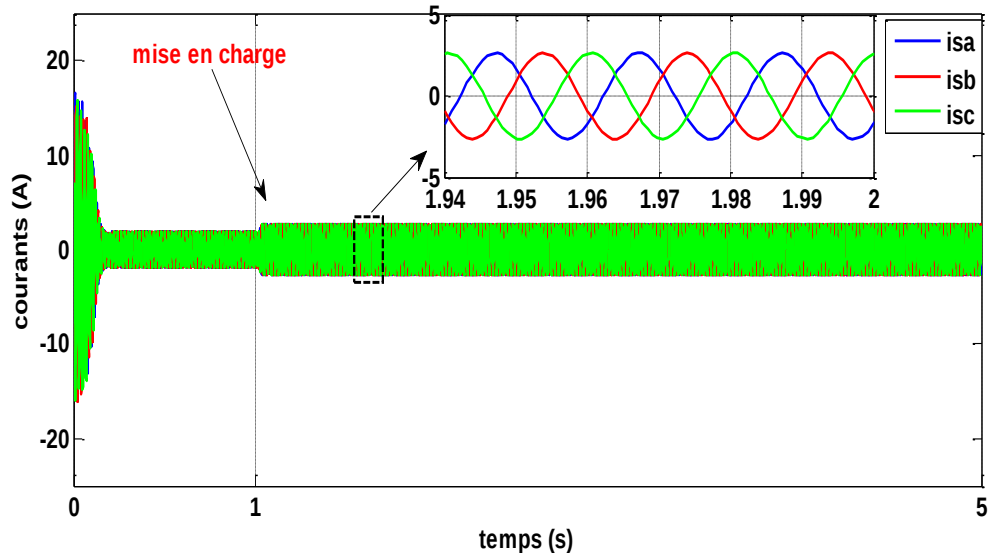


Figure III.02 : Courbe des courants

La figure III.02 montre l'évolution des courants statoriques de la machine en fonction du temps, lors d'un démarrage à vide, puis en charge, sous une tension nominale avec une alimentation sinusoïdale équilibrée.

Etant donné que le rotor est initialement à l'arrêt, le régime transitoire se manifeste par des amplitudes de courant qui atteignent des valeurs maximales allant jusqu'à 15 A et qui dure 0.2 sec. Par la suite un régime permanent s'établit et se traduit par la chute des courants avec des oscillations sinusoïdales autour de la valeur nulle. A l'instant $t = 1$ sec, nous appliquons un couple résistant nominal de 5 Nm. Nous obtenons, comme effet, l'augmentation des courants qui atteignent une valeur maximale de 2.65 A.

Cet effet est dû à l'augmentation de la réaction magnétique du rotor qui est, elle-même, due à l'augmentation de l'amplitude des courants rotoriques.

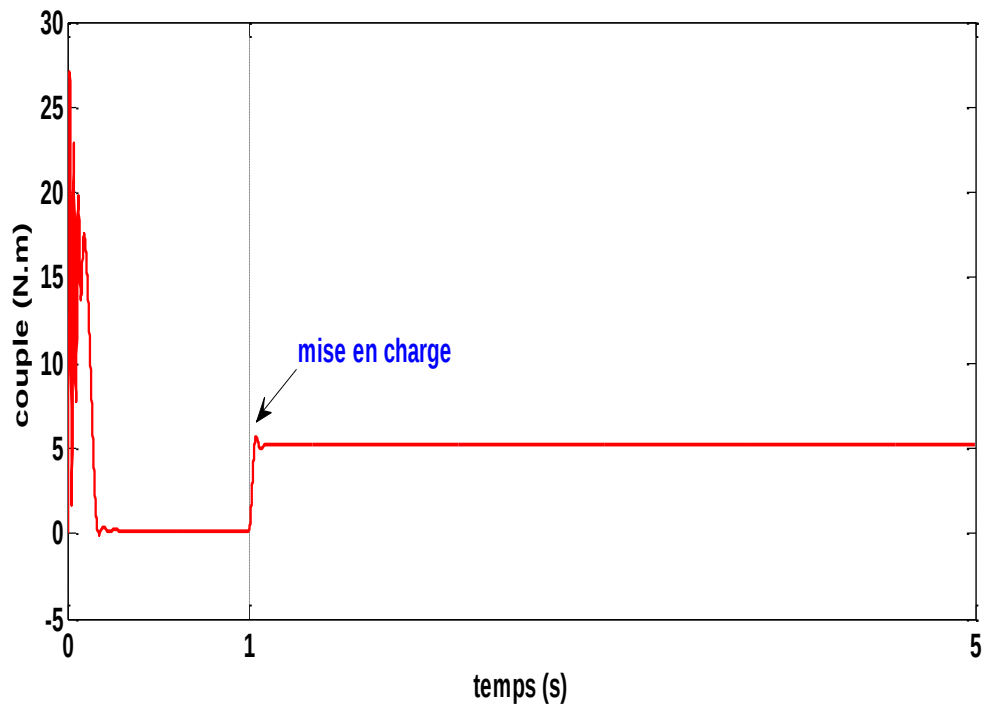


Figure III.03 : Courbe de couple

La figure III.03 montre l'évolution du couple électromagnétique. Le régime transitoire, qui dure 0.2 sec, se manifeste par un régime transitoire amorti autour de 16 Nm avec valeur maximale de 28 Nm. A partir de $t = 0.2$ sec, le couple chute rapidement pour atteindre une valeur presque nulle et égale à celle du couple de frottement fluide. A l'instant $t = 1$ sec, nous appliquons un couple de 5 Nm. Evidemment le couple électromagnétique réagit d'une manière inverse de sorte à s'opposer au couple résistant.

La figure III.04 montre l'évolution de la vitesse de rotation du rotor. Aux premiers instants du démarrage, la vitesse augmente de 0 à 157 rad/s dans un intervalle de temps de 0.2 sec, atteignant ainsi le régime permanent. A l'instant $t = 1$ sec, l'application d'un couple résistant de 5 Nm a tendance à freiner l'arbre moteur d'où la diminution de la vitesse.

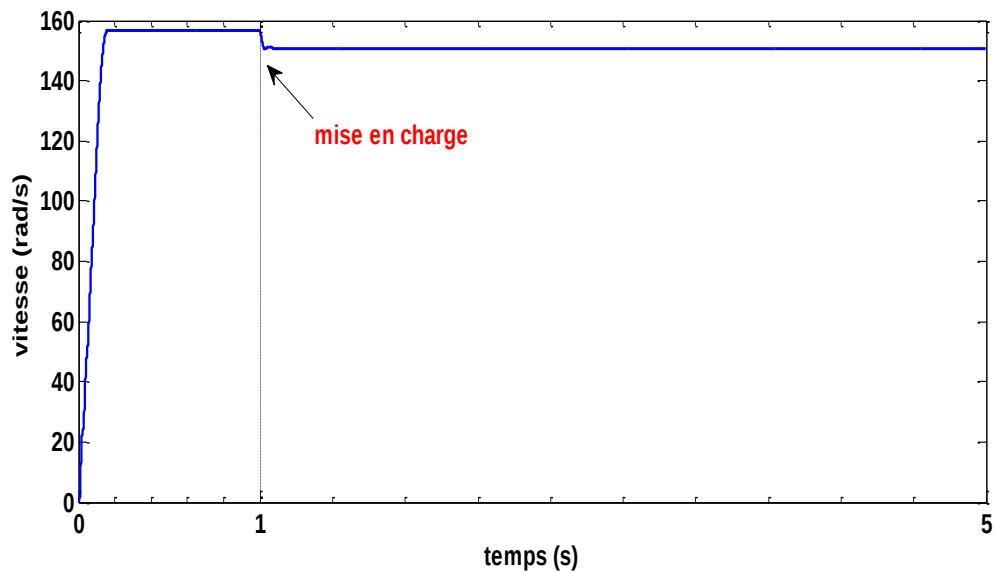


Figure III.04 : Couple de vitesse

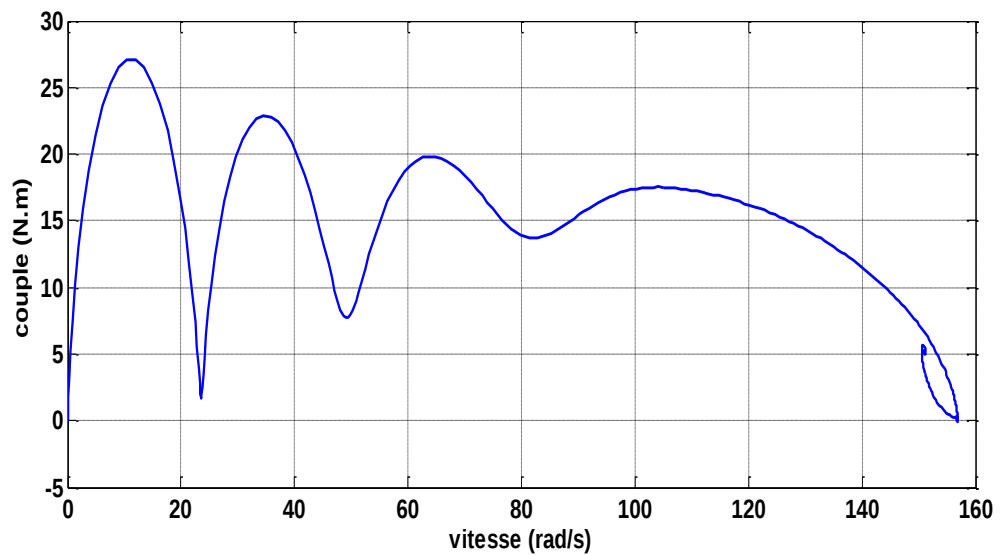


Figure III.05 : Le couple en fonction de vitesse.

La figure III.05 montre l'allure du couple électromagnétique en fonction de la vitesse angulaire.

III.3 Simulation du modèle de défaut statorique :

En considérant les dynamiques des flux rotoriques ϕ_{dqr} , des courants statoriques i_{dqs} et les dynamiques électromécaniques (ω, θ) , le système peut alors être décrit par le système d'équations non linéaires :

$$\begin{cases} \dot{\underline{x}} = f(\underline{x}) + g \cdot \underline{u} \\ \underline{y} = h(\underline{x}) + H(\underline{x}) \cdot \underline{u} \end{cases} \quad (2.35)$$

Avec :

$\underline{x} = [i'_{ds} \quad i'_{qs} \quad \phi_{dr} \quad \phi_{qr} \quad \omega \quad \theta]^T$: vecteur d'état

$\underline{U} = [u_{ds} \quad u_{qs} \quad c_r]^T$ et $\underline{y} = [i_{ds} \quad i_{qs} \quad \omega]^T$: entrées et sorties du système, respectivement

$$f(\underline{x}) = \begin{bmatrix} -\frac{R_s + R_r}{L_f} \cdot i'_{ds} + \omega \cdot i'_{qs} + \frac{R_r}{L_m \cdot f} \cdot \phi_{dr} + \frac{\omega}{L_f} \cdot \phi_{qr} \\ -\omega \cdot i'_{ds} - \frac{R_s + R_r}{L_f} \cdot i'_{qs} - \frac{\omega}{L_f} \cdot \phi_{dr} + \frac{R_r}{L_m \cdot L_f} \cdot \phi_{qr} \\ R_r \cdot i'_{ds} - \frac{R_r}{L_m} \cdot \phi_{dr} \\ R_r \cdot i'_{qs} - \frac{R_r}{L_m} \cdot \phi_{qr} \\ \frac{p^2}{J} \cdot (i'_{qs} \cdot \phi_{dr} - i'_{ds} \cdot \phi_{qr}) - \frac{f_v}{J} \cdot \omega \end{bmatrix}, g = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_f} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_f} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{p}{J} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$h(\underline{x}) = \begin{bmatrix} i'_{ds} \\ i'_{qs} \\ \omega \end{bmatrix}, H(\underline{x}) = \begin{bmatrix} \frac{2}{3R_s} \cdot \sum_{k=1}^3 \mu_{cc_k} \cdot P(-\theta) \cdot Q(\theta_{cc_k}) \cdot P(\theta) & \underline{0} \\ \underline{0} & \underline{0} \end{bmatrix}$$

La figure III.06 représente notre modèle de simulation sous l'environnement Matlab/Simulink construit à partir des équations électriques. Les variables d'entrée sont les trois tensions u_a, u_b, u_c et le couple de charge C_r et les paramètres de défaut $\{N_{cc1}, N_{cc2}, N_{cc3}\}$ correspondant respectivement à un court-circuit sur les phases a_s, b_s ou c_s .

Le démarrage s'effectue à vide sous tension nominale avec une alimentation triphasée sinusoïdale équilibrée. La simulation est effectuée pendant une durée de 5 sec de la manière suivante :

À l'instant $t = 1$ sec la machine est soumise à un couple résistant nominal :

$$C_r = 5 \text{ N.m.}$$

En régime établi, on introduit à l'instant $t = 3$ sec, un défaut de type court-circuit de 18 spires sur la phase a_s (ce qui correspond respectivement à $u_{cc1} = 0.0388$, $u_{cc2} = 0$ et $u_{cc3} = 0$).

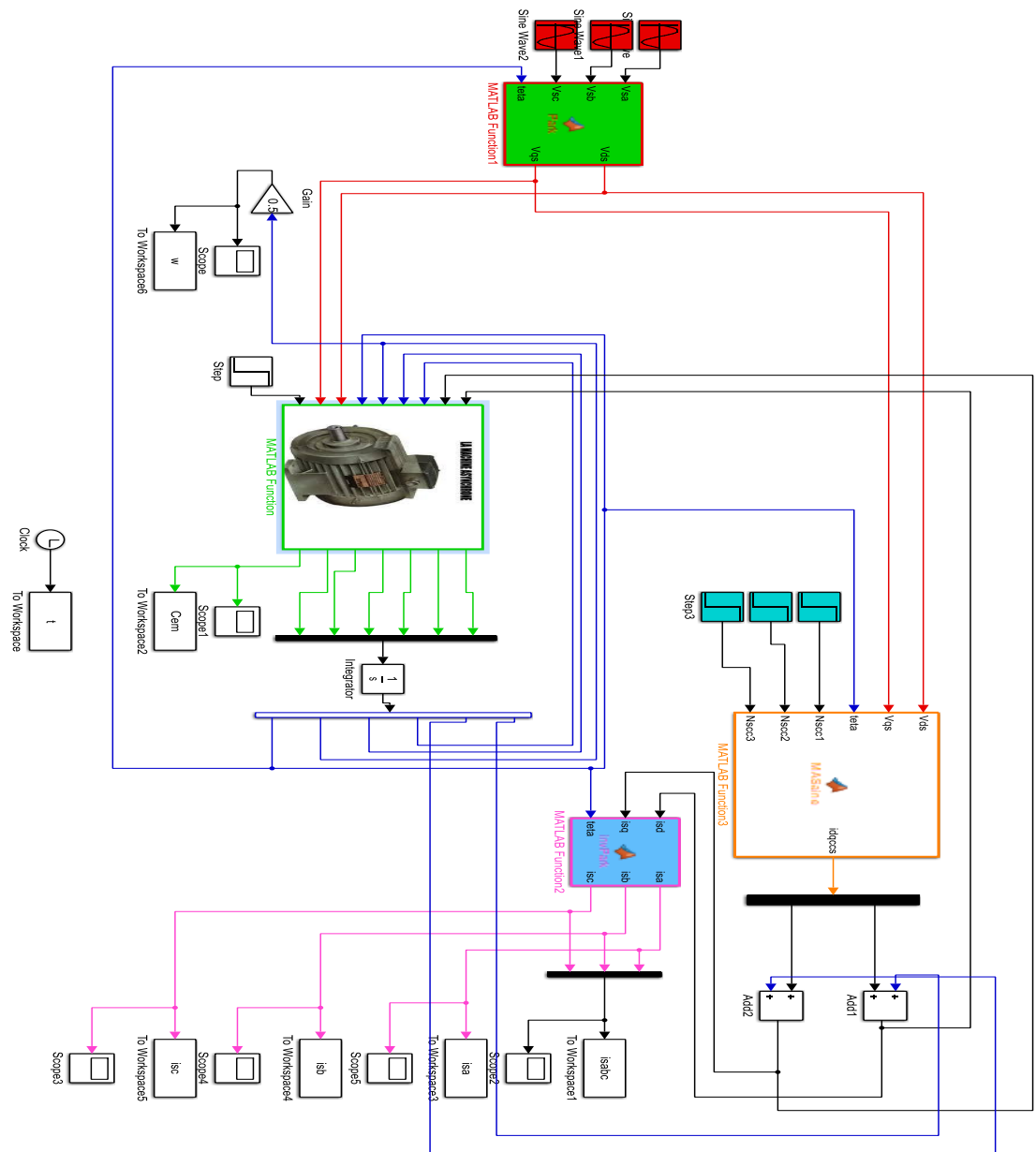


Figure III.06 : Schéma bloc de moteur asynchrone avec défaut statorique.

III.3.1 Résultats de simulation du modèle de défaut statorique :

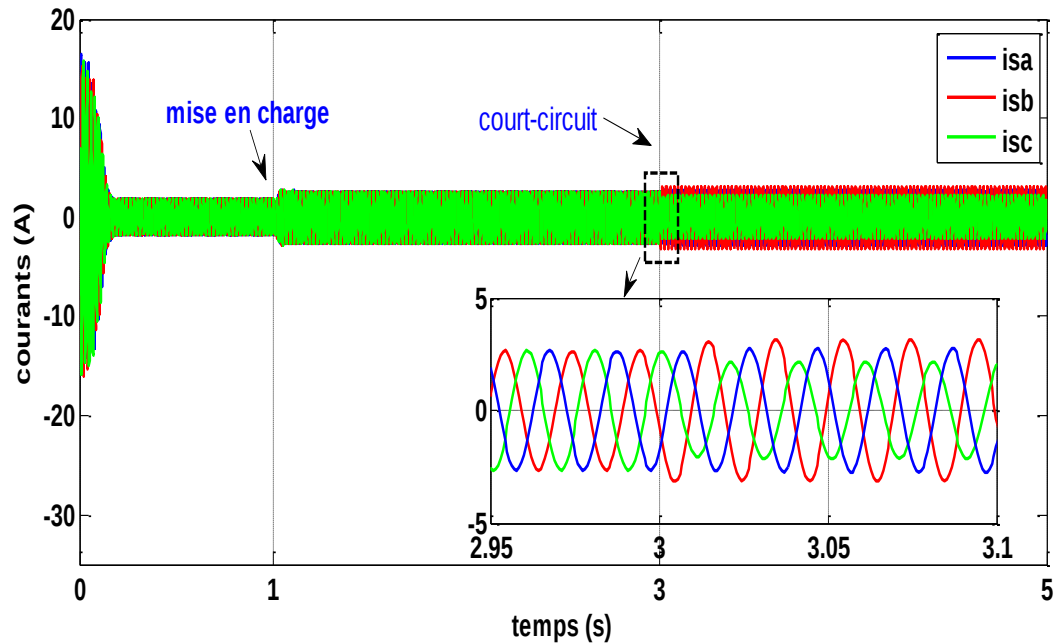


Figure III.07 : Courbe des courants avec défaut statorique.

La figure III.07 représente la comparaison des trois courants statoriques pour un défaut de court-circuit de 18 spires dans la phase a_s . À $t=3$ sec un déséquilibre se manifeste sous forme d'une augmentation importante du courant de la phase où s'est produit le défaut (phase a_s) et d'une augmentation moins importante pour les deux autres phases (phases b_s et c_s). Cette augmentation se produit suivant une permutation circulaire directe.

Nous avons aussi remarqué que plus le nombre de spires en court-circuit est important, plus forte est l'augmentation des courants. En plus du déséquilibre du courant, nous remarquons aussi un déséquilibre au niveau des déphasages illustré par la figure III.07. Ce déphasage n'est plus égal à 120° (cas de fonctionnement sain).

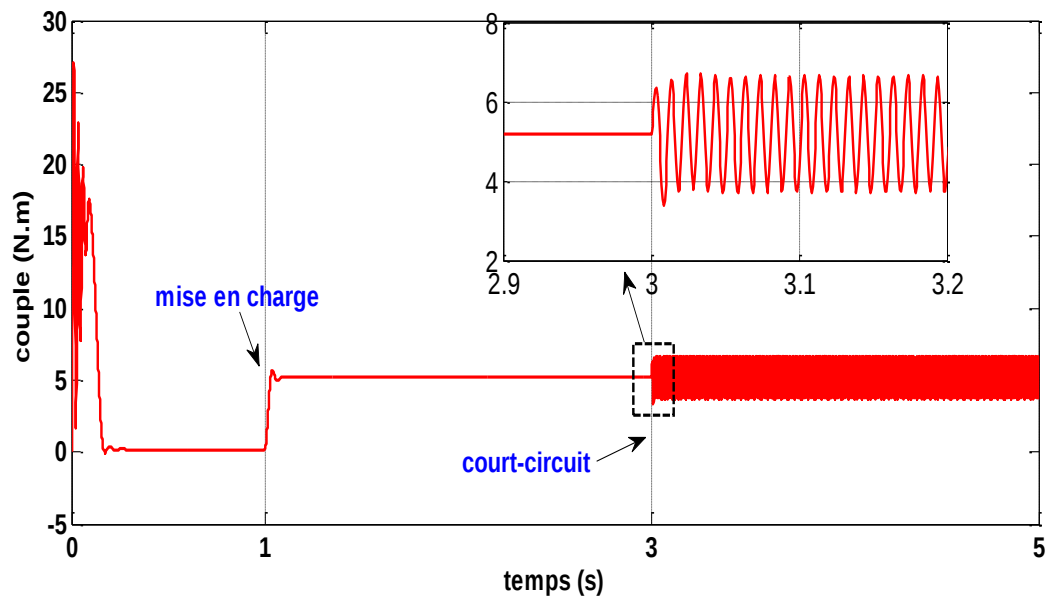


Figure III.08 : Courbe de couple avec défaut statorique.

La figure III.08, représentant l'évolution du couple électromagnétique, révèle que lors de l'application du défaut de court-circuit entre spires d'une même phase, une nouvelle interaction entre la bobine court-circuitée et le rotor s'ajoute à celle qui existe dans le régime de fonctionnement. Ainsi, les ondulations du couple électromagnétique sont à l'origine de cette interaction créée dans l'entrefer. Ces ondulations croissent avec l'augmentation du nombre de spires en court-circuit, sans que cela change la valeur de la moyenne du couple par rapport à sa valeur en régime sain.

Les résultats de simulation montrent que le défaut de court-circuit au stator affecte aussi la vitesse de rotation (figure III.09).

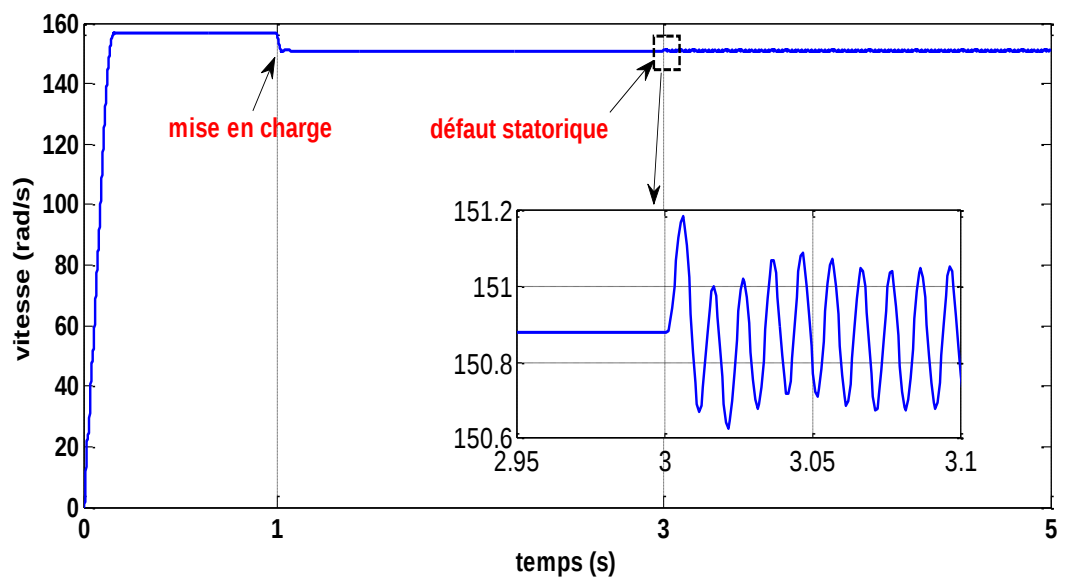


Figure III.09 : Courbe de vitesse avec défaut statorique.

III.4 Simulation du modèle de défauts rotoriques :

Le système global simulé est obtenu en introduisant l'équation électromécanique de la machine. Ainsi, la machine asynchrone en défaut de rupture de barre peut être décrite par le système d'équations différentielles :

$$\begin{cases} \dot{\underline{x}} = f(\underline{x}) + g \cdot \underline{u} \\ \underline{y} = h(\underline{x}) \end{cases} \quad (2.49)$$

Avec :

$\underline{x} = [i_{ds} \quad i_{qs} \quad \phi_{dr} \quad \phi_{qr} \quad \omega \quad \theta]^T$: vecteur d'état

$\underline{u} = [u_{ds} \quad u_{qs} \quad C_r]^T$ et $\underline{y} = [i_{ds} \quad i_{qs} \quad \omega]^T$: entrées et sorties du système, respectivement

$$f(\underline{x}) = \begin{bmatrix} -\left((R_s \cdot I + R_{eq}) \cdot L_f^{-1} + \omega \cdot P(\pi/2)\right) \cdot i_{dq_s} + (R_{eq} \cdot L_m^{-1} - \omega \cdot P(\pi/2)) \cdot L_f^{-1} \cdot \phi_{dq} \\ R_{eq} \cdot i_{dq_s} - R_{eq} \cdot L_m^{-1} \cdot \phi_{dq_r} \\ \frac{p^2}{J} \cdot (i_{qs} \cdot \phi_{dr} - i_{ds} \cdot \phi_{qr}) - \frac{f_v}{J} \cdot \omega \\ \omega \end{bmatrix}$$

$$g = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_f} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_f} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{p}{J} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, h(\underline{x}) = \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ \omega \end{bmatrix}$$

$$[R_{eq}] = R_r \cdot \left(I + \frac{\alpha}{1 - \alpha} \cdot Q(\theta_0) \right), \alpha = \frac{2}{3} \cdot \eta_0$$

La figure III.10 montre une représentation visuelle des fichiers Simulink utilisés pour la simulation de la machine asynchrone en défaut de rupture de barre. L'intérêt de cet outil est de disposer d'un environnement permettant de mettre en œuvre rapidement et simplement la simulation de l'entraînement électrique, avec différents défauts de rupture des barres au rotor.

Les variables d'entrée de ce modèle, sont les trois tensions $\{u_a, u_b, u_c\}$ le couple de charge C_r et les paramètres de défaut de rupture des barres rotorique $\{N_{bc1}, N_{bc2}, N_{bc3}\}$

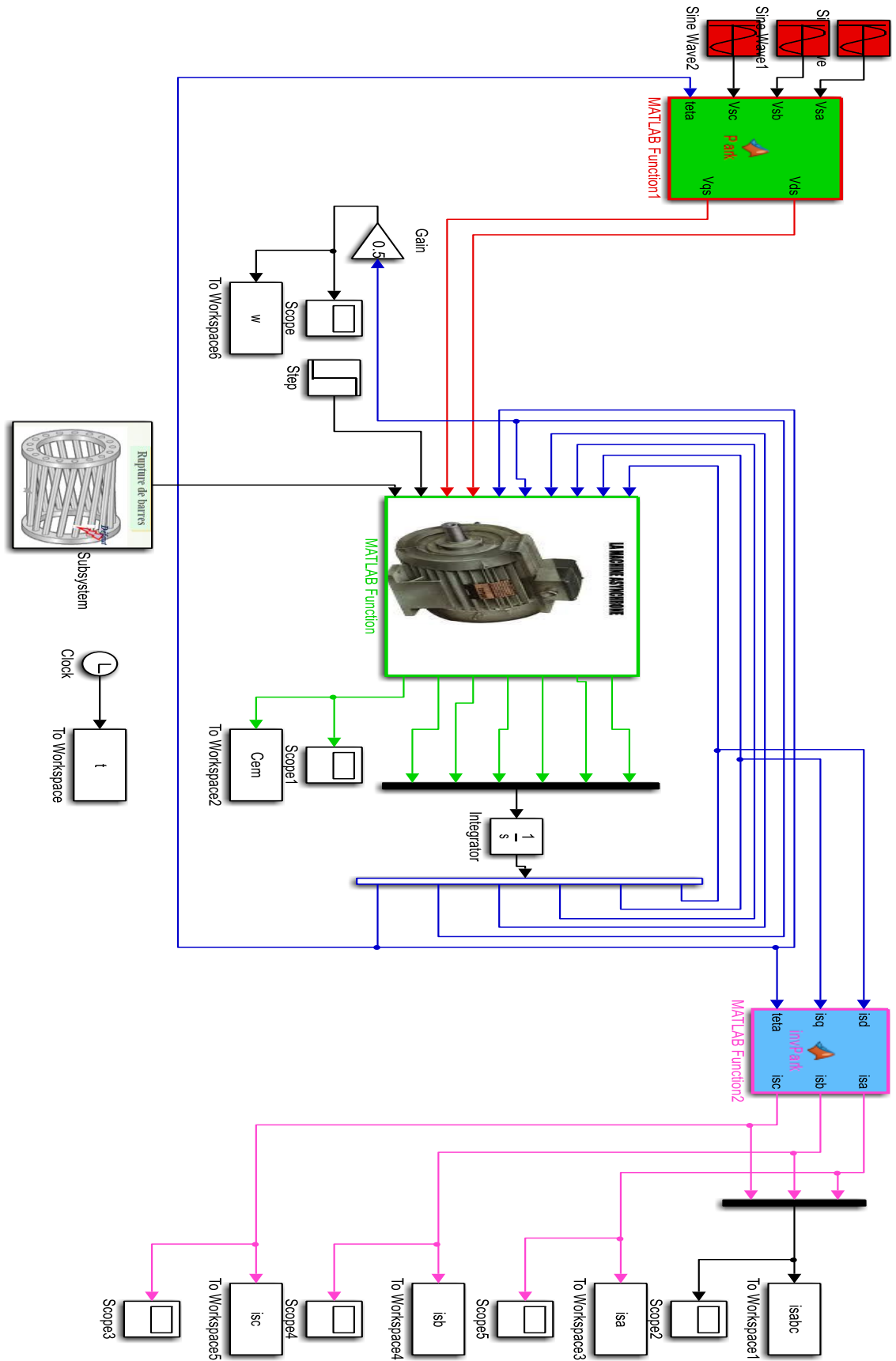


Figure III.10 : Schéma bloc de moteur asynchrone avec défaut rotorique

III.4.1 Résultats de simulation du modèle de défauts rotoriques :

Le démarrage s'effectue à vide sous tension nominale avec une alimentation triphasée sinusoïdale équilibrée. La simulation est menée sur une durée de 5 sec de la manière suivante :

- À l'instant $t = 0.5$ sec la machine est soumise à un couple résistant $C_r = 5 \text{ N.m}$,
- À l'instant $t = 2$ sec nous simulons la rupture de la première barre,
- Par la suite, la rupture de la deuxième barre se produit à $t = 4$ sec pour mettre en évidence l'effet du nombre de barres rompues.

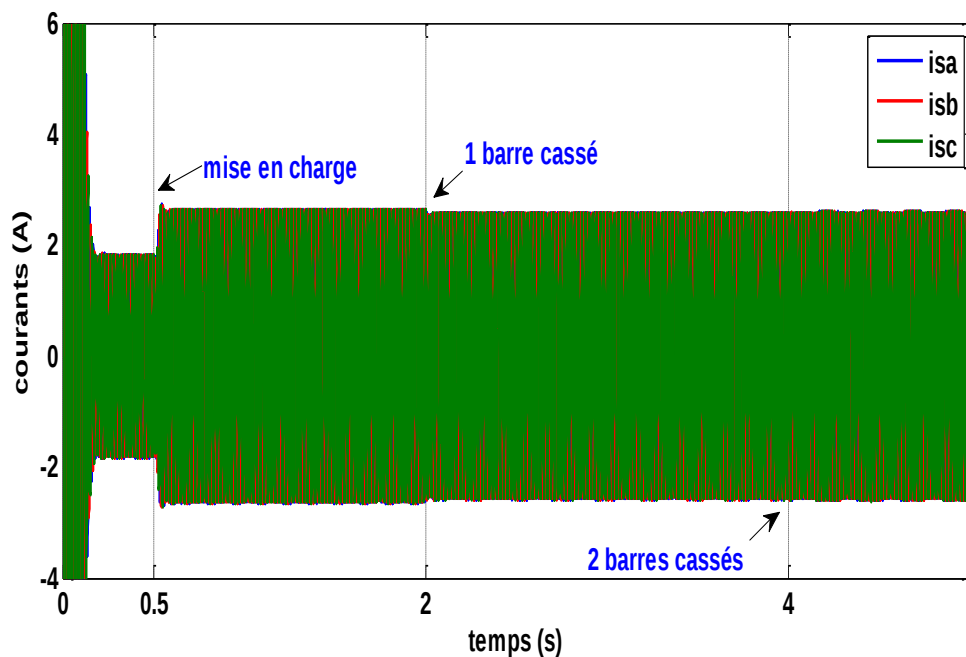


Figure III.11 : Courbe des courants avec défaut rotorique.

La figure III.11 représente l'évolution des courants de ligne absorbés par les phases statoriques. Comme on peut le constater, lors d'un défaut de rupture de barres au rotor, il y a apparition d'ondulations identiques sur les trois courants statoriques tout en restant toujours déphasés de 120° entre eux. Cependant, l'amplitude de cette ondulation est proportionnelle au nombre de barres cassées. Nous remarquons que l'amplitude des oscillations augmente avec l'augmentation du nombre de barres cassées.

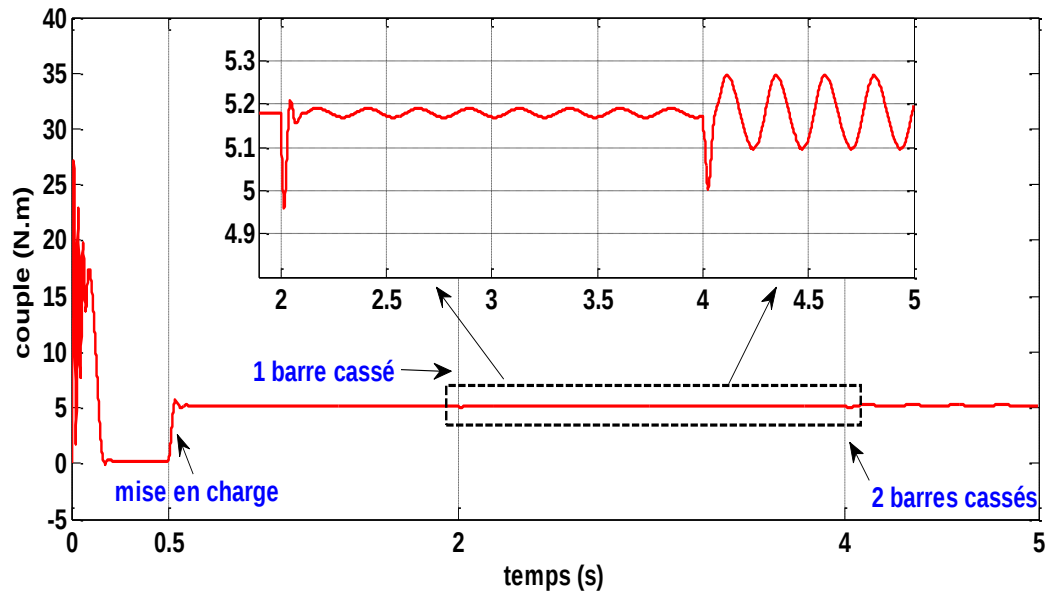


Figure III.12 : Courbe de couple avec défaut rotorique.

L'analyse du couple électromagnétique (figure III.12) montre une modification importante de son allure lorsque les défauts rotoriques apparaissent. La présence d'une oscillation lorsque le rotor de la machine est sain est due à la prise en compte des harmoniques. Nous apercevons qu'une légère modulation vient perturber l'évolution du couple lorsque la première barre est cassée. Nous remarquons aussi que cette modulation prend plus d'importance avec l'apparition du second défaut. En théorie, cette modulation d'amplitude a une fréquence identique à celle de la vitesse, c'est-à-dire $(2 \cdot g \cdot f_s)$.

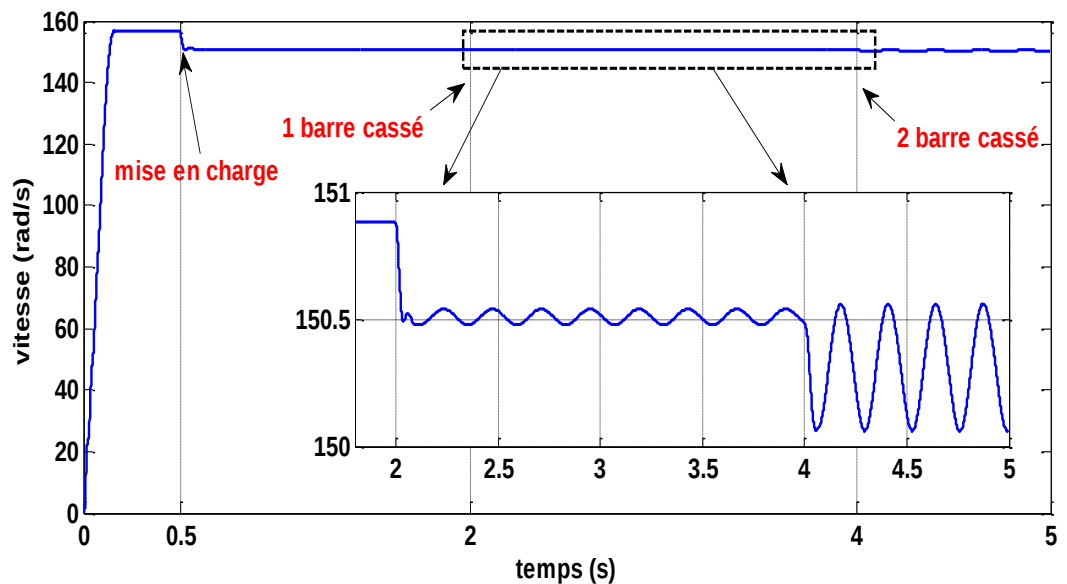


Figure III.13 : courbe de vitesse avec défaut rotorique.

En analysant la figure III.13 présentant l'évolution de la vitesse rotorique, nous remarquons l'apparition d'une légère ondulation lorsque la rupture de la première barre rotorique apparaît. Cette ondulation, qui augmente lorsque le deuxième défaut est créé, oscille à une fréquence de $(2 \cdot g \cdot f_s)$. Cette variation de vitesse est très faible car elle dépend essentiellement de l'inertie J de l'ensemble machine-charge. Plus l'inertie de l'ensemble sera grande, moins la variation de vitesse sera importante.

III.5 Simulation du modèle de défaut simultané stator/rotor :

En introduisant l'équation électromécanique, on écrit le modèle de la machine asynchrone avec défaut simultané stator/rotor dans le repère de Park lié au rotor :

$$\begin{cases} \dot{\underline{x}} = f(\underline{x}) + g \cdot \underline{u} \\ \underline{y} = h(\underline{x}) + H(\underline{x}) \cdot \underline{u} \end{cases} \quad (2.55)$$

Avec :

$\underline{x} = [i'_{ds} \quad i'_{qs} \quad \phi_{dr} \quad \phi_{qr} \quad \omega \quad \theta]^T$: vecteur d'état

$\underline{u} = [u_{ds} \quad u_{qs} \quad C_r]^T$ et $\underline{y} = [i_{ds} \quad i_{qs} \quad \omega]^T$: entrées et sorties du système, respectivement

$$f(\underline{x}) = \begin{bmatrix} -\left((R_s \cdot I + [R_{eq}])L_f^{-1} + \omega P(\pi/2)\right)i'_{dq_s} + ([R_{eq}]L_m^{-1} - \omega P(\pi/2))L_f^{-1}\phi_{dq_r} \\ [R_{eq}] \cdot i'_{dq_s} - [R_{eq}] \cdot L_m^{-1} \cdot \phi_{dq_r} \\ \frac{p^2}{J} \cdot (i'_{qs} \cdot \phi_{dr} - i'_{ds} \cdot \phi_{qr}) - \frac{f_v}{J} \cdot \omega \\ \omega \end{bmatrix}$$

$$g = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_f} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_f} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{p}{J} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, h(\underline{x}) = \begin{bmatrix} i'_{ds} \\ i'_{qs} \\ \omega \end{bmatrix}, H(\underline{x}) = \begin{bmatrix} \frac{2}{3R_s} \cdot \sum_{k=1}^3 \mu_{cc_k} \cdot P(-\theta) \cdot Q(\theta_{cc_k}) \cdot P(\theta) & \underline{0} \\ \underline{0} & 0 \end{bmatrix}$$

$$[R_{eq}] = R_r \cdot \left(I + \frac{\alpha}{1 - \alpha} \cdot Q(\theta_0) \right) \text{ où } \alpha = \frac{2}{3} \cdot \eta_0$$

La figure III.14 montre une représentation visuelle des fichiers Simulink utilisés pour la simulation de la machine asynchrone en cas de défaut combiné stator/rotor.

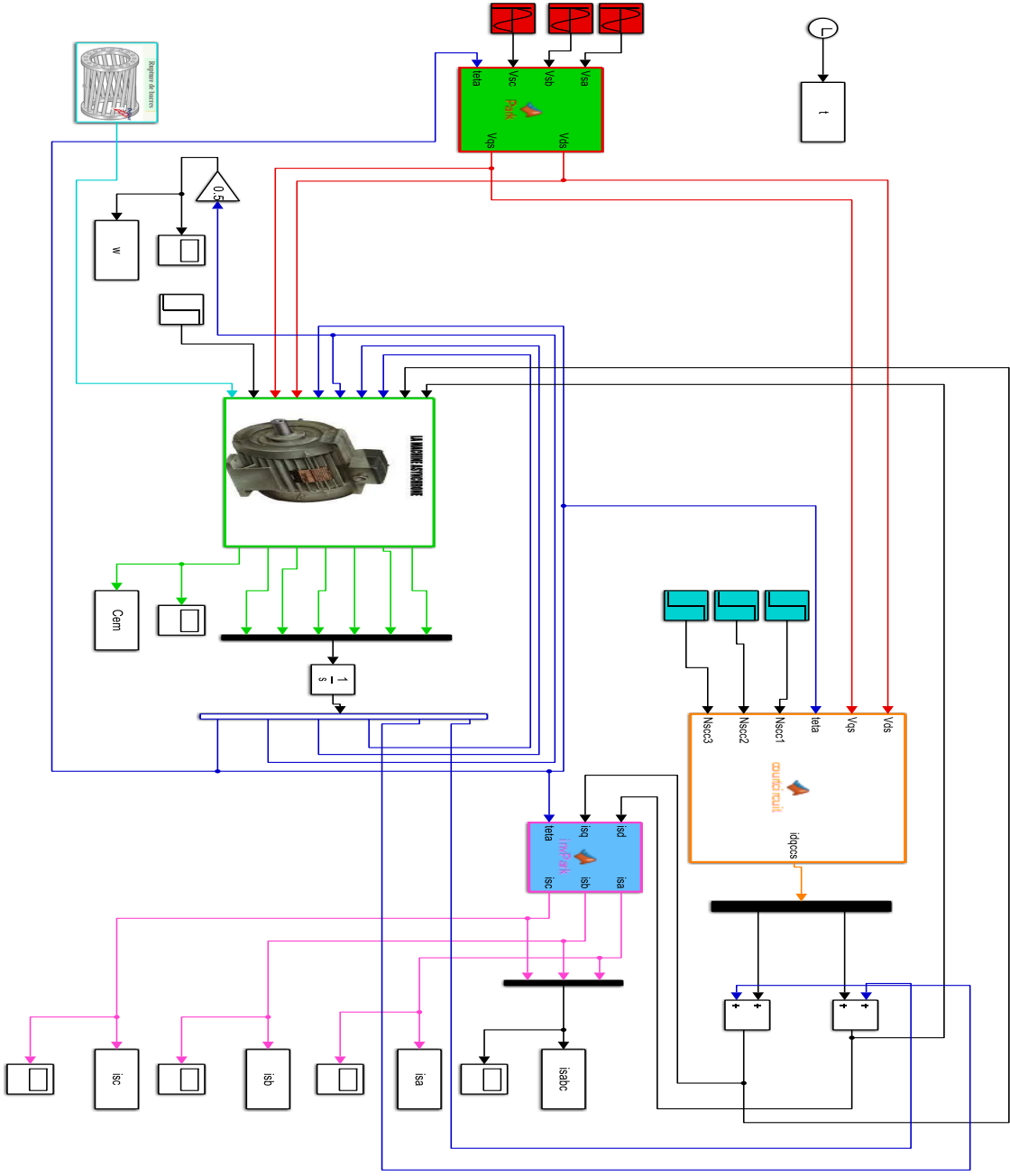


Figure III.14 : Schéma bloc de moteur avec défaut mixte.

III.5.1 Résultats de simulation du modèle de défaut simultané stator/rotor :

La simulation est effectuée pour une durée de 5 sec à l'instant $t = 1$ sec, nous procédons l'application d'un échelon de couple résistant de 5 N.m. Pour simuler un défaut simultané stator/rotor, on introduit en régime établi une rupture d'une barre à l'instant $t = 2$ sec et deux barres à l'instant $t = 4$ sec, un court-circuit de 18 spires sur la phase a_s à l'instant $t = 3$ sec.

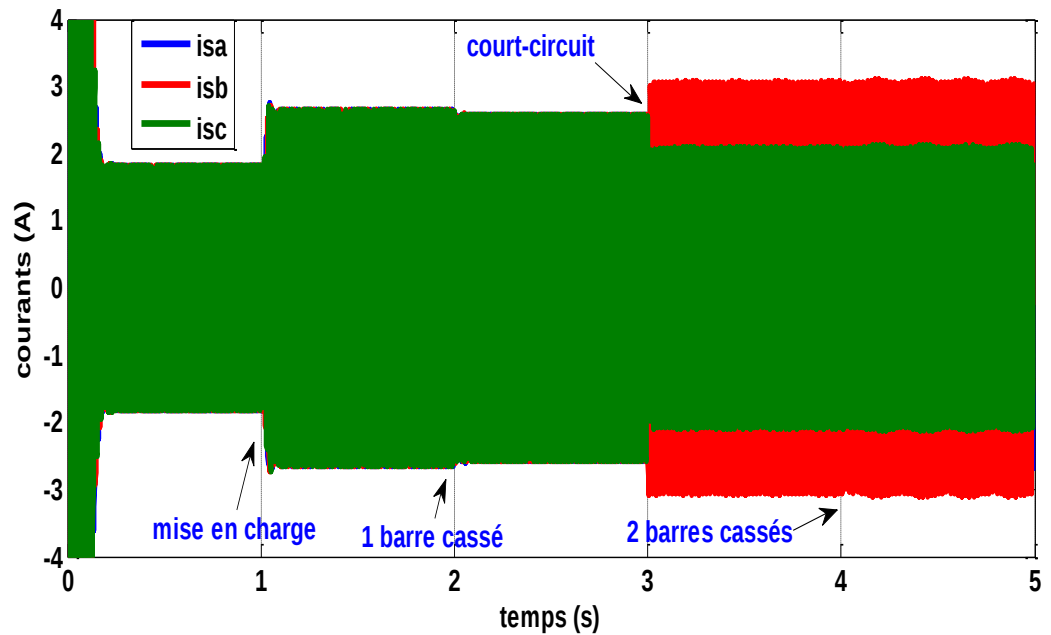


Figure III.15 : Courbe des courants avec défaut mixte.

La figure III.15 montre les courants de ligne avec un défaut simultané stator/rotor : un défaut statorique de $\mu_{cc_1} = 3.88\%$ de spires court-circuitées sur la phase a_s et un défaut rotorique de type rupture d'une barre cassée. On peut remarquer qu'à partir de $t = 2$ sec de nouvelles composantes dues aux barres cassées apparaissent dans les trois courants (cas de défaut rotor). A $t = 3$ sec le court-circuit fait augmenter le courant dans la phase a_s où s'est produit le défaut (cas de défaut stator).

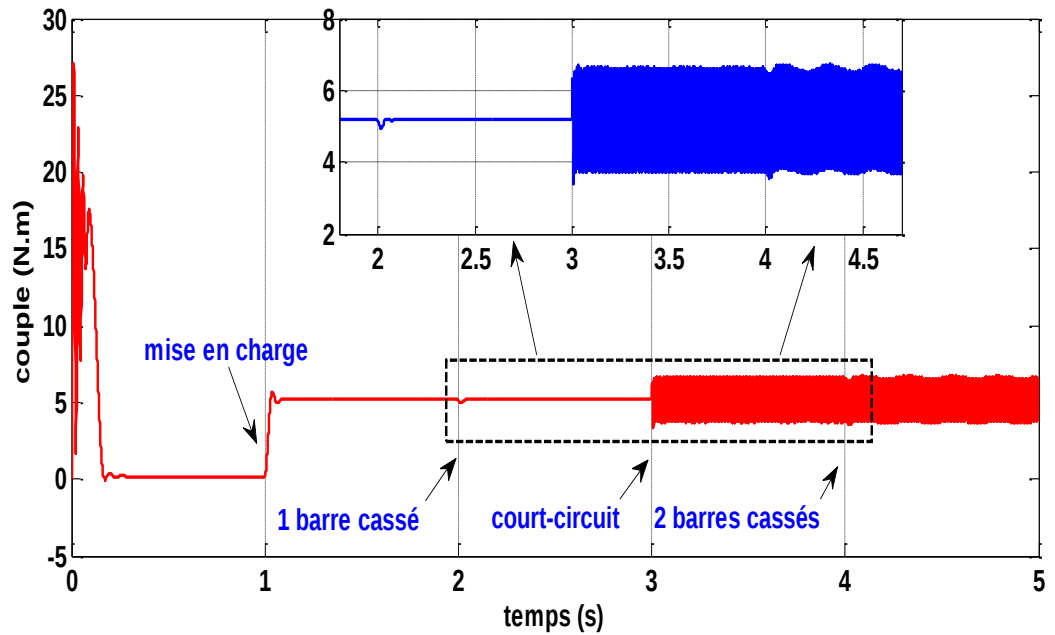


Figure III.16 : Courbe de couple avec défaut mixte.

Les figures III.16 et III.17, représentent respectivement l'évolution du couple électromagnétique et de la vitesse de rotation, lors de la création du défaut de deux barres successives puis lors de l'introduction du défaut de court-circuit de 18 spires sur la phase a_s . A partir de $t=3$ sec, nous retrouvons les mêmes phénomènes combinés des deux défauts.

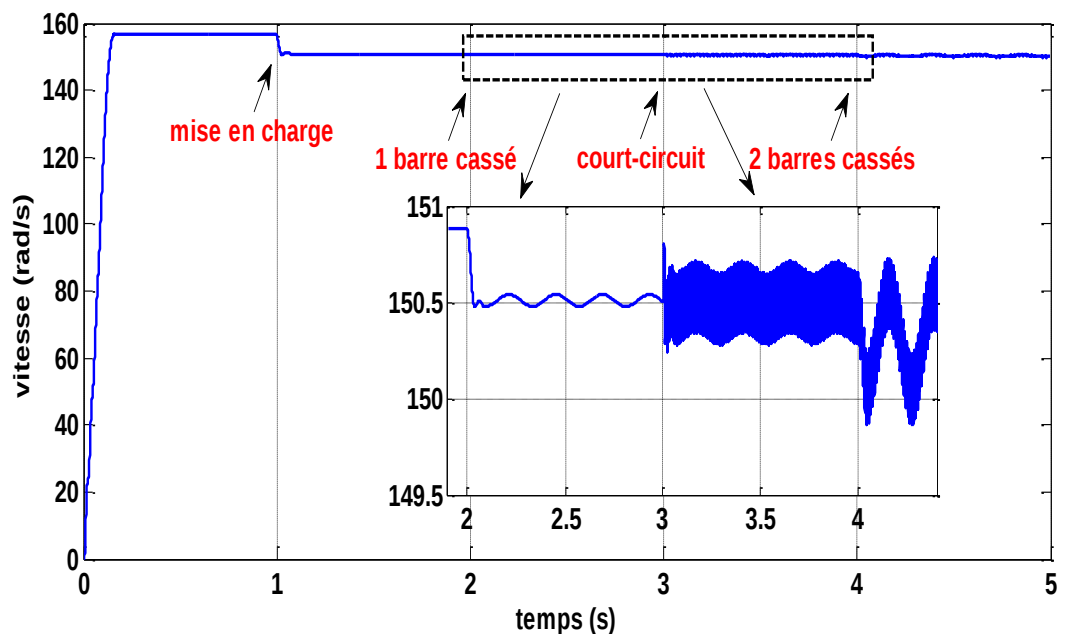


Figure III.17 : Courbe de vitesse avec défaut mixte.

III.6 Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons étudié et présenté la simulation de la MAS en vue de leur diagnostic en présence de courts-circuits entre spires et de rupture des barres du rotor.

Après une analyse de l'influence du défaut statorique et rotorique sur les grandeurs de la MAS, nous avons remarqué que le courant est un signal très riche en informations sur l'état de la machine. Il est révélateur de défauts statorique et rotorique en même temps, ce qui n'est pas le cas pour la vitesse et le couple électromagnétique.

En effet, le défaut statorique se manifeste par un déséquilibre au niveau du courant, où nous constatons une augmentation du courant sur la phase où s'est produit le défaut. Le couple électromagnétique moyen délivré par la machine ne varie pas beaucoup en valeur moyenne, mais des oscillations proportionnelles au défaut apparaissent. Par contre le défaut rotorique se manifeste par une modulation d'amplitude basse fréquence des trois courants statoriques.

Conclusion générale

Compte tenu de l'importance et de l'utilisation fréquente des machines asynchrones dans l'industrie, la détection précoce des défauts dans ces machines est devenue un enjeu économique important. L'intérêt grandissant des industriels pour la maintenance des entraînements électriques justifie l'accent mis par la recherche sur le diagnostic des machines asynchrones. Il est donc important de développer des outils de diagnostic et de détection pour examiner l'état de fonctionnement de la machine.

Le travail présenté dans ce mémoire consiste à apporter une contribution à la modélisation et au diagnostic des machines asynchrones en vue de leur surveillance. Les courts-circuits de spires au stator et la rupture de barres au rotor, ont fait plus spécifiquement l'objet de notre travail.

Dans le premier chapitre et, après avoir rappelé d'une manière non exhaustive les éléments de constitution de la machine asynchrone à cage d'écureuil, nous avons cité les principaux types de défauts pouvant survenir sur les différentes parties de ceux-ci. Nous nous sommes volontairement attardés sur les deux défauts internes fréquemment rencontrés et qui sont le sujet de cette étude. Ces deux défauts sont : défaut statorique du type court-circuit entre spires d'une même phase et défaut rotorique du type rupture de barres. Nous avons ensuite présenté un état de l'art des différentes méthodes couramment utilisées dans le domaine du diagnostic.

Le deuxième chapitre est basé sur l'élaboration de modèles dédiés à la simulation et à la détection de défauts sur la machine asynchrone à cage d'écureuil. Deux types de défaut ont retenu notre attention : les courts-circuits de spires au stator et la rupture de barres au rotor. L'association de ces deux modèles avec le modèle de la machine saine a permis de définir un modèle global en situation de défauts simultanés stator/rotor, pour une surveillance généralisée de la machine asynchrone à cage. Ces modèles ont été utilisés afin de simuler les variables de la machine en fonctionnement sain et en situation de défaut, afin d'extraire la signature caractéristique du défaut.

Dans le dernier chapitre, nous avons illustré les caractéristiques électriques (courants statoriques) et mécaniques (vitesse, couple électromagnétique) de la MAS en conditions de fonctionnement sain et avec défaut de court-circuit de bobinage statorique, de rupture de barres rotorique et simultané stator/rotor.

D'après les résultats obtenus, nous avons constaté que le défaut statorique se manifeste par un déséquilibre au niveau du courant, où une augmentation du courant sur la phase où s'est produit le défaut. De plus, le défaut rotorique se manifeste par une apparition d'ondulations sur les courants statoriques. L'amplitude de ces ondulations est proportionnelle au nombre de barres cassées.

Il est important de noter que ce travail s'est concentré uniquement sur la détection des défauts électriques internes de la MAS. Il est donc recommandé d'étendre ce travail au diagnostic des défauts mécanique (usure des roulements, etc.) ou des défauts externes, tels que les déséquilibres des tensions d'alimentation, etc.

Références bibliographiques

- [1] G. Didier: *"Modélisation et diagnostic de la machine asynchrone en présence de défaillances"*, Thèse de doctorat, Université de Henri Poincaré, Nancy-I, France, 2004.
- [2] O. Ondel: *"diagnostic par reconnaissance des formes: application a un ensemble convertisseur-machine asynchrone"*, Thèse de doctorat, Ecole central de Lyon, France, Octobre 2006.
- [3] M. Bouzid: *"Diagnostic de défauts de la machine asynchrone par réseaux de neurones"*, Thèse de doctorat, Génie Electrique, Tunis, Janvier 2009.
- [4] B. Vaseghi: *"Contribution à l'étude des machines électriques en présence de défaut entre-spices"*, Thèse de doctorat, GREEN - Groupe de Recherche en Electrotechniqueet Electronique de Nancy, Nancy Université-Institut National Polytechnique de Lorraine, 2009
- [5] E. Schaeffer: *"Diagnostic des machines asynchrones : modèles et outils paramétriques dédiés à la simulation et à la détection de défauts"*, Thèse de doctorat, Institut de Recherche en Cybernétique de Nantes, École Centrale de Nantes, Nantes, France, 1999.
- [6] E. Schaeffer: *"Diagnostic des machines asynchrones : modèles et outils paramétriques dédiés à la simulation et à la détection de défauts"*, Thèse de doctorat, Institut de Recherche en Cybernétique de Nantes, École Centrale de Nantes, Nantes, France, 1999.
- [7] B. Aubert: *"Détection des courts-circuits inter-spices dans les Générateurs Synchrones à Aimants Permanents: Méthodes basées modèles et filtre de Kalman étendu- Application à un canal de génération électrique en aéronautique"*, Thèse Doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse - INPT, Mars 2014.
- [8] S. Bachir: *"Contribution au diagnostic de la machine asynchrone par estimation paramétrique"*, Thèse de doctorat, Université de Poitiers, France, 2002.
- [9] S. Tahraoui: *"Diagnostic Des Systèmes Dynamiques à Base D'observateurs à Entrées Inconnues (Applications Aux Processus Hydrauliques)"*, Thèse de doctorat, Université Aboubekr Belkaid Tlemcen, Algérie, Décembre 2015.
- [10] J. Chung, M. Dolen, Kim Hyunbae, R.D. Lorenz: *"A continuous-time observer to*

- estimate electrical parameters of induction machines*", Industry Applications Conference, 2001.
- [11] K. Radhakrishnan, A. Unnikrishnan, K.G. Balakrishnan: *"Joint State and Parameter Estimation of Squirrel Cage Induction Motor—A System Identification Approach using EM based Extended Kalman Filter"*, International Journal of Computer Applications, Vol. 27, No. 1, pp. 24–29, August 2011.
 - [12] Saadettin Aksoy, Aydin Mühürçü, Hakan Kizmaz: *"State and parameter estimation in induction motor using the Extended Kalman Filtering algorithm"*, IEEE Proceedings of the International Symposium, Modern Electric Power Systems (MEPS), 20–22 September 2010.
 - [13] A. Ticlea, G. Besançon: *"Observer Scheme for State and Parameter Estimation in Asynchronous Motors with Application to Speed Control"*, European Journal of Control, Vol. 12, No. 4, pp. 400–412, 2006.
 - [14] J. Zhang, L. Kang, L. Chen, Z. Xu: *"Parameter Estimation of Induction Machine at Standstill Using Two-Stage Recursive Least Squares Method"*, Mathematical Problems in Engineering, Vol. 2015, pp. 1–13, 2015.
 - [15] A. Hamoudi, B. Kouadri: *"Stator winding inter-turn short-circuit detection in induction motors by parameter identification"*, IET Electric Power Applications, Vol. 11, No. 2, pp. 272–288, March 2017.
 - [16] A. Hamoudi, B. Kouadri: *"On-line stator winding inter-turn short-circuit detection in induction motors using recursive Levenberg-Marquardt algorithm"*, International Journal on Electrical Engineering and Informatics (IJEI), Vol. 9, No. 1, pp. 42–57, March 2017.
 - [17] S. Perez-Londono, A. Perez-Londono, Y. Romero-Mora: *"On-line identification of the physical parameters in a synchronous generator"*, Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America, pp. 1–6, August 2008.
 - [18] M. KHOV: *"Surveillance et diagnostic des machines synchrones à aimants permanents: Détection des courts-circuits par suivi paramétrique"*, Thèse Doctorat, Université de Toulouse, France, Décembre 2009.
 - [19] B. Aubert, J. Regnier, S. Caux, D. Alejo: *"Kalman-Filter-Based Indicator for Online Inter-turn Short Circuits Detection in Permanent-Magnet Synchronous Generators"*, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 62, No. 3, March 2015.
 - [20] S. Moreau, R. Kahoul, J.-P. Louis: *"Parameters estimation of permanent magnet synchronous machine without adding extra-signal as input excitation"*, IEEE

- International Symposium on Industrial Electronics, Vol. 1, pp. 371–376, 4-7 Mai 2004.
- [21] M.-W. Naouar, E. Monmasson, I. Slama-Belkhodja: "*Identification of Synchronous Machine Parameters Using Hysteresis Based Current Controller*", IECON 2006 - 32nd Annual Conference on IEEE Industrial Electronics, pp. 1357–1362, November 2006.
- [22] R. Casimir, E. Bouteleux, H. Yahoui, et al.: "*Synthèse de plusieurs méthodes de modélisation et de diagnostic de la machine asynchrone à cage en présence de défauts*", Journal RIGE, Vol. 8, No. 2, pp. 287–300, 2005.
- [23] Z. Gao, C. Cecati, S.X. Ding: "*A survey of fault diagnosis and fault-tolerant techniques part I: fault diagnosis with model-based and signal-based approaches*", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 62, No. 6, pp. 3757–3767, 2015.
- [24] R.M. Tallam, Sang Bin Lee, G.C. Stone, G.B. Kliman, Jiyoung Yoo, T.G.Habetler, R.G. Harley: "*A Survey of Methods for Detection of Stator-Related Faults in Induction Machines*", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 43, No. 4, pp. 920–933, July/August 2007.
- [25] A. H. Boudinar, N. Benouzza, A. Bendiabdellah, N. Boughanmi: "*The use of improved Root-Music Frequency Estimation Method for Three Phase Induction Motor Incipient Rotor's Faults Detection*", Acta Electrotechnica et Informatica, Vol. 8, No. 2, pp. 22–28, 2008.
- [26] M.K. Oumaamar: "*Surveillance et Diagnostic des Défauts Rotoriques et Mécaniques de la machine asynchrone avec alimentation équilibrée ou déséquilibrée*", Thèse de doctorat de l'Université de Lorraine, Mars 2012.
- [27] M. Drif, M. Cardoso: "*Stator fault diagnostics in squirrel cage three-phase induction motor drives using the instantaneous active and reactive power signature analyses*", IEEE Transactions Ind. Inform., Vol. 10, No. 2, pp. 1348–1360, 2014.
- [28] S. Laribi: "*Contribution à la Commande et Diagnostic des Défauts Statoriques et Rotoriques de la Machine Asynchrone à Cage d'Ecureuil*", Thèse Doctorat, Université de l'USTO, Avril 2016.
- [29] S. Bhattacharyya, D. Sen, S. Adhvaryyu et al.: "*Induction motor fault diagnosis by motor current signature analysis and neural network techniques*", Journal of Advanced Computing and Communication Technologies, Vol. 03, No. 1, pp. 12–18,

Feb. 2015.

- [30] G. Didier, E. Ternisien, O. Caspary, H. Razik: "*A new approach to detect broken rotor bars in induction machines by current spectrum analysis*", Journal of Mechanical Systems and Signal Processing (MSP), Vol. 21, No. 2, pp. 1127–1142, February 2007.
- [31] A. Siddique, G.S. Yadava, B. Singh: "*Applications of artificial intelligence techniques for induction machine stator fault diagnostics: review*", 4th IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED'03), pp. 29–34, August 2003.
- [32] R. Casimir: "*Diagnostic des défauts des machines asynchrones par reconnaissance de formes*", Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Lyon, 2003.
- [33] F. Filippetti, G. Franceschini, C. Tassoni, P. Vas: "*Recent developments of induction motor drives fault diagnosis using AI techniques*", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 47, No. 5, pp. 994–1004, October 2000.
- [34] B. Bessam: "*Analyse et détection des défauts dans la machine asynchrone à base des techniques intelligentes*", Université Mohamed Khider–Biskra, Algérie, Juin 2016.
- [35] P.J. Broniera, W.S. Gongora, A. Goedtel, W.F. Godoy: "*Diagnosis of stator winding inter-turn short circuit in three-phase induction motors by using artificial neural networks*", 9th IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED'13), pp. 281–287, 27-30 August 2013.
- [36] M. Bouzid, G. Champenois, N.M. Bellaaj, L. Signac, K. Jelassi: "*An Effective Neural Approach for the Automatic Location of Stator Inter-turn Faults in Induction Motor*", IEEE Trans. on Indus. Electron., Vol. 55, No. 12, pp. 4277–4289, Dec. 2008.
- [37] A. Faidallah: "*Contribution à l'identification et à la commande vectorielle des machines asynchrones*", Thèse de doctorat de l'INP de Lorraine, 1995.
- [38] S. Moreau: "*Contribution à la modélisation et à l'estimation paramétrique des machines électriques à courant alternatif: Application au diagnostic*", Thèse de doctorat, Université de Poitiers, 1999.
- [39] J.-P. Caron, and J.-P. Hautier: "*Modélisation et commande de la machine asynchrone*", Editions Technique, France, 1995.
- [40] J.M. Pelbois, M. Boussak, P. Goerger: "*Modèle simplifié de la machine asynchrone triphasée en défaut de court-circuit entre spires au stator*", Electrotechnique du

- futur EF, Décembre 2003.
- [41] H. Razik, G. Didier: "*Diagnostic de la machine asynchrone*", Groupe de Recherche en Electrotechnique et Electronique de Nancy, G.R.E.E.N, 7 Janvier 2003.
 - [42] I. Ben Ameer Bazine: "*Identification en boucle fermée de la machine asynchrone: Application à la détection de défaut*", Thèse de doctorat, Université de Poitiers et Université de Tunis El-Manar, 2008.
 - [43] V. Devanneaux: "*Modélisation des machines asynchrones triphasées à cage d'écureuil en vue de la surveillance et du diagnostic*", Thèse de Doctorat de l'Institut National Polytechnique de Toulouse, France, Décembre 2002.
 - [44] M. Bouharaket: "*Etude de l'évolution des courants rotoriques d'une machine asynchrone à cage en régime dynamique*", Thèse de Doctorat, Université de Batna, Algérie, Février 2006.
 - [45] S. Bachir, S. Tnani, J-C. Trigeassou, G. Champenois: "*Diagnostic de la machine asynchrone par identification paramétrique- Modélisation et détection des défauts stator et rotor*", Revue Internationale de Génie Électrique, Vol. 05, No. 03, 2002.
 - [46] S. Bachir, S. Tnani, J-C. Trigeassou, G. Champenois: "*Diagnosis by parameter estimation of stator and rotor faults occurring in induction machines*", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 53, No. 3, pp. 963–973, June 2006.
 - [47] S. Bachir, S. Tnani, T. Poinot, J-C. Trigeassou: "*Stator Fault Diagnosis in Induction Machines by Parameter Estimation*", IEEE International (SDEMPED'01), Grado, Italie, pp. 235–239, Septembre 2001.
 - [48] S. Bachir, S. Tnani, J-C. Trigeassou, and G. Champenois: "*Diagnosis by parameter estimation of stator and rotor faults occurring in induction machines*", European Power Electronics (EPE'01), Graz, Autriche, August 2001.
 - [49] A. Abed, L. Baghli, H. Razik, A. Rezzoug: "*Modelling induction motors for diagnosis purposes*", EPE'99, Lausanne, Suisse, pp.1–8, 7–9 September 1999.
 - [50] A. Makki, A. Ah-jaco, H. Yahoui, G. Grellet: "*Modelling of capacitor single-phase asynchronous motor under stator and rotor winding faults*", IEEE International (SDEMPED'97), Carry-le-Rouet, France, pp. 191–197, Septembre 1997.
 - [51] P. Vas, F. Filippetti, G. Franceschili, C. Tassoni: "*Transient modelling oriented to diagnostics of induction machines with rotor asymmetries*", ICEM'94, 1994.

- [52] S. Bachir, S. Tnani, G. Champenois, and J-C. Trigeassou: "*Induction motor modeling of broken rotor bars and fault detection by parameter estimation*", In IEEE International (SDEMPED'01), Grado, Italie, 2001.
- [53] Abdallah HAMOUDI: "*Contribution au diagnostic de la machine asynchrone par les techniques d'identification*", Thèse Doctorat, Université des sciences et technologies d'Oran Mohamed Boudiaf, 2017/2018.
- [54] Monia BEN KHADER BOUZID: "*Diagnostic de défauts de la machine asynchrone par réseaux de neurones*", Thèse Doctorat, université tunis el manar, ecole nationale d'ingenieurs de tunis, 27 Janvier 2009.
- [55] Souad LARIBI: "*Contribution à la Commande et Diagnostic des Défauts Statoriques et Rotoriques de la Machine Asynchrone à Cage d'Ecureuil*", Thèse Doctorat, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf, le 27 Avril 2016.
- [56] Mohamed el kamel oumaamar: "*surveillance et diagnostic des défauts rotoriques et mécaniques de lamachine asynchroneavec alimentation équilibrée ou déséquilibrée*", Thèse Doctorat, Université de Lorraine metz France, 19 Mars 2012.