

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ IBN-KHALDOUN DE TIARET

FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUÉES

DÉPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Pour l'obtention du diplôme de Master

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Génie Electrique

Spécialité: Automatique et Informatique Industrielle

THÈME

Détection, localisation et reconfiguration de défauts d'un onduleur à deux niveaux appliqué dans la commande de la machine asynchrone à cage

Préparé par: Mr Benzioua Mohamed

Mr Benouis Fayçal

Devant le Jury :

| Nom et prénoms | Grade | Lieu d'exercice | Qualité |
|----------------|-------|-----------------|------------|
| BEDOUI. M | MAA | U de Tiaret | Présidente |
| SAIBI. A | MCB | U de Tiaret | Examineur |
| OGAB .C | MCB | U de Tiaret | Examineur |
| LARIBI S | MCB | U de Tiaret | Encadreur |

PROMOTION 2017 /2018



Remerciement

*Nos remerciements vont tout premièrement à Dieu tout-puissant pour
la volonté, la santé et la patience, qu'il nous a donnée
durant toutes ces longues années.*

*On tiens à exprimer nos vifs remerciements à notre encadreur
Madame LARIBI Souad*

*qui nous a inspirer le sujet et guider pour son aide, ses conseils et toute la documentation qu'il
nous a fournie.*

*Nos sincères remerciements vont aux membres du jury pour l'honneur
qu'il nous en fait pour Juger ce travail.*

*On tiens à remercier vivement toute personne qui nous a aidés de près
ou de loin à réaliser ce mémoire.*

*Nos remerciements vont aussi à tous les enseignants du Département de
Génie Electrique spécialement les enseignants de l'option de automatique et
informatique industrielle qui ont contribué
à notre formation.*

*Enfin nous tenons à exprimer notre reconnaissance à tous nos amis et
Collègues pour leurs soutiens morale et matériel.*



Dédicace

Nous dédions ce modeste travail à :

Nos parents

Nos frères, nos sœurs,

A Toute nos familles.

Ainsi qu'a tous nos amis

Qui nous avons aidés en contribuant à

l'aboutissement de ce mémoire.

Enfin on souhaite à toute la promotion 2018

Un avenir prospère plein de réussite et de

succès.

| | |
|---|----|
| Introduction générale | 1 |
| | |
| Chapitre I: Les défauts des machines électriques et leur diagnostic | |
| | |
| I.1- Introduction | 3 |
| I.2- Diagnostic des machines électriques | 3 |
| I.3- Constitution des machines asynchrones | 5 |
| I.3.1- Stator..... | 6 |
| I.3.2- Rotor..... | 6 |
| I.3.3 -Enroulements..... | 7 |
| I.4-Les défauts des machines asynchrones | 7 |
| I.4.1- Défauts électriques | 8 |
| I.4.2- Les défauts de l'onduleur..... | 10 |
| I.4.3- Les défauts de GTO se produisent..... | 11 |
| I.4.4- Les défauts de la commande de l'onduleur..... | 11 |
| I.5-Les méthodes de diagnostic des machines asynchrones | 12 |
| I.5.1-Diagnostic par analyse des vibrations mecaniques..... | 12 |
| I.5.2-Diagnostic par analyse du flux magnétique axial de fuite..... | 12 |
| I.5.3-Diagnostic par analyse du couple électromagnetique..... | 13 |
| I.5.4-Diagnostic par analyse de la puissance instantanée..... | 13 |
| I.5.5-Diagnostic par analyse du courant statorique..... | 13 |
| I.5.6-Diagnostic par analyse du vecteur de Park..... | 13 |
| I.5.7- Diagnostic par utilisation des techniques d'intelligence artificielle..... | 14 |
| I.6 Conclusion | 14 |
| | |
| Chapitre II: Modélisation de la machine asynchrone triphasée | |
| | |
| II.1 Introduction..... | 15 |
| II.2. Modèle électrique..... | 15 |
| II.3. Modèle dynamique..... | 15 |
| II.4 . Modélisation dans le repère de Park | 18 |
| II.5. Représentation d'état | 19 |

| | |
|---|----|
| II.6. Simulation et interprétation | 20 |
| II.7. Modélisation de l'onduleur de tension | 22 |
| II.7.1 Classification des onduleurs | 22 |
| II.7.2 Types d'onduleurs autonomes de tension | 24 |
| II.7.3 Principe de fonctionnement d'un onduleur triphasé | 25 |
| II.7.4 Les Techniques de commande de l'onduleur triphasée..... | 27 |
| II.7.5 Généralités sur les MLI | 27 |
| II.7.5.1 Objectif de la technique MLI..... | 28 |
| II.8 Alimentation de la MAS par un onduleur de tension à MLI sinus- triangulaire..... | 28 |
| II.9. Analyse des défauts du convertisseur statique..... | 30 |
| II.9.1. Statistiques des défauts convertisseurs..... | 30 |
| II.9.2. Etude de défauts de type circuit-ouvert..... | 31 |
| II.9.2.1. Configuration de défauts circuit-ouvert..... | 31 |
| II.9.2.2. Résultat de simulation de défauts circuit-ouvert (C-O) | 32 |
| II.9.3. Etude de défauts de type court-circuit..... | 36 |
| II.9.3.1. Configuration de défauts court-circuit..... | 36 |
| II.10 Conclusion..... | 39 |

Chapitre III : Commande tolérante aux défauts

| | |
|--|-----------|
| III.1 Introduction..... | 40 |
| III.2 Classification de la commande tolérante aux défauts..... | 40 |
| III.3 Importance de la commande tolérante aux défauts..... | 42 |
| III.4 Modes de défaut du convertisseur..... | 42 |
| III.5 Défauts et défaillances internes à l'onduleur..... | 43 |
| III.6 Défauts externes à l'onduleur..... | 45 |
| III.7 Isolement électrique des défauts..... | 46 |
| III.8 Description de la topologie d'isolement..... | 47 |
| III.9 Résultats de simulation du control à bras de secours relié à la phase défaillante | 49 |
| III.10 Conclusion..... | 51 |
| Conclusion générale | 52 |
| Références bibliographiques..... | 53 |

Chapitre I

| | |
|---|--------------------------------------|
| Figure I.1: Classification des défauts selon leurs origines..... | 4 |
| Figure I.2: Constitution d'une machine asynchrone (vue générale) | 5 |
| Figure I.3: Photo du stator d'une machine asynchrone..... | 6 |
| Figure I.4; Figure I.4 : Rotors d'une MAS..... | 7 |
| Figure I.5: pourcentage des défauts (2008)..... | 8 |
| Figure I.6: diférents défauts au niveau de stator de la machine asynchrone.... | Erreur ! Signet non défini. 9 |
| Figure I.7: Défaut de rupture de barres et d'anneau de court-circuit..... | 10 |

Chapitre II

| | |
|--|----|
| Figure II.1: Scémas monophasé équivalent en régime permanent | 15 |
| Figure II.2: Représentation schématique des enroulements statorique et rotorique d'une machine asynchrone triphasé..... | 16 |
| Figure II.3: Représentation spatiale de la transformation triphasée /biphasée. | 18 |
| Figure II.4: Scéma bloc global de simulation | 21 |
| Figure II.5: Réponses de la machine asynchrone alimentée par un réseau triphasé équilibré | 21 |
| Figure II.6: Onduleur de tension en demi pont..... | 24 |
| Figure II.7: Onduleur de tension monophasé. | 24 |
| Figure II.8: Onduleur de tension triphasé | 25 |
| Figure II.9: Schéma d'un onduleur triphasé | 26 |
| Figure II.10: Schéma bloc global de simulation..... | 29 |
| Figure II.11: Réponses de la machina asynchrone alimentée par un onduleur de tension, avec l'application d'un couple de charge $C_r = 11 \text{ N.m}$ à $t = 1 \text{ s}$ | 29 |
| Figure II.12: Statistiques des défaillances dans les chaines de conversion d'énergie | 30 |
| Figure II.13: Schéma synoptique pour la création de défaut interrupteur (circuit ouvert)..... | 31 |
| Figure II.14: Défaut sur l'interrupteur T1 du bras 'A' avec un couple de charge $C_r = 11 \text{ N.m}$ | 32 |
| Figure II.15: Défaut sur l'interrupteur T2 du bras 'B' avec un couple de charge $C_r = 11 \text{ N.m}$ | 33 |
| Figure II.16 : Défaut sur l'interrupteur T4 du bras 'A' avec un couple de charge $C_r = 11 \text{ N.m}$ | 34 |

| | |
|---|----|
| Figure II.17: Défaut sur l'interrupteur T5 du bras 'B' avec un couple de charge $C_r=11$ N.m | 35 |
| Figure II.18 : Schéma synoptique pour création de défauts interrupteurs (court-circuit)..... | 36 |
| Figure II.19 : Défaut de court-circuit sur l' interrupteur T1 du bras 'A' avec un couple dcharge $C_r=20$ N.m..... | 37 |
| Figure II.20 : Défaut de court-circuit sur l' interrupteur T4 du bras 'A' avec un couple dcharge $C_r=20$ N.m..... | 38 |

Chapitre III

| | |
|---|----|
| Figure III.1: Classification des approches FTC | 40 |
| Figure III.2: Schéma de principe d'une loide commande FTC active | 42 |
| Figure III.3: Défaillance de type haute impédance d'un transistor | 43 |
| Figure III.4: Défaillance de type haute impédance des deux transistors d'un bras..... | 44 |
| Figure III.5: Défaut de court-circuit..... | 44 |
| Figure III.6: Défaut de court-circuit du bus continu | 45 |
| Figure III.7: Défaut d'isolement d'une phase | 46 |
| Figure III.8: Dispositifs d'isolement par cellule | 46 |
| Figure III.9: Onduleur triphasé à cellules parallélisées deux à deux avec des inductances de découplage et interrupteurs d'isolement | 47 |
| Figure III.10: Contrôle à bras de secours redondant en cas de défaut | 47 |
| Figure III.11: Contrôle de l'onduleur dans l'état biphasé | 48 |
| Figure III.12: Contrôle d'un onduleur à quatre fils dans l'état de défaut | 48 |
| Figure III.13: Réponses du système après reconfiguration en présence de défaut circuit-ouvert | 49 |
| Figure III.14: Réponses du système après reconfiguration en présence de défauts court-circuit pour un convertisseur avec un bras redondant | 50 |

Introduction

générale

La sécurité, la fiabilité et la rentabilité des actionneurs qui sont des parties intégrantes des procédés industriels sont devenues des concepts fondamentaux. Afin que ces performances soient assurées, on porte aujourd'hui un grand effort sur la surveillance et le diagnostic des systèmes afin qu'ils soient de plus en plus performants. Alors, une bonne fiabilité des systèmes des entraînements électriques est indispensable non seulement pour garantir la sécurité des systèmes et par conséquent des personnes, mais aussi pour diminuer les coûts liés à la maintenance et à la non disponibilité des systèmes. Compte tenu des enjeux économiques, une réflexion générale a été engagée en matière de sûreté de fonctionnement orientée vers le diagnostic des entraînements électriques dont le but est de superviser pour détecter défaillances.

Grâce à l'utilisation de plus en plus répandue d'actionneurs électriques commandés par commutateurs électroniques, l'électronique des semi-conducteurs et la conversion d'énergie sont en pleine croissance en ces dernières années, et en particulier l'association convertisseur électronique-machine asynchrone grâce à sa simplicité et sa robustesse. Elle est largement utilisée dans la plupart des entraînements électromécaniques, notamment pour des applications à vitesse variable. Les progrès de l'électronique de puissance associés aux commandes modernes ont permis d'envisager des applications à vitesse variable plus performantes.

Malgré toute cette évolution, nul système n'est à l'abri d'une défaillance. Un entraînement électrique subit au cours de son fonctionnement, un certains nombres de contraintes de différentes natures (électriques, mécaniques et environnementales) qui peuvent entraîner de graves conséquences sur la sécurité des personnes, des matériels et d'environnement.

La mise en œuvre du diagnostic est difficile et cette difficulté devient de plus en plus grande avec complexité du système étudié. Evidement plus le modèle représentatif reproduit fidèlement le fonctionnement du système et plus le diagnostic est facile et fiable.

C'est dans ce cadre que s'inscrit notre sujet de fin d'études et qui a pour objectif au développement des méthodes d'analyse, de détection, de localisation et de reconfiguration de défauts onduleur à deux niveaux appliqué dans la commande de la machine asynchrone à cage.

Ce mémoire comporte trois chapitres :

- **Chapitre I:** nous présentons en premier temps les éléments de construction des machines tournantes ainsi que les différents défauts pouvant survenir .Dans un deuxième temps, nous citons quelques techniques de détection de ces défauts de l'onduleur.
- **Chapitre II :** qui est consacré à la modélisation des machines asynchrone, dans cette partie on présentera le modèle mathématique dans un référentiel triphasé de la machine, basée sur des hypothèses simplificatrices. Puis nous avons fait la transformation du modèle triphasé à un modèle biphase (dq) équivalent, pour faciliter sa simulation.

On a consacré aussi l'étude du comportement du système, proposé, aux présences de défauts interrupteurs de puissance utilisés dans les convertisseurs statiques. Deux types de défauts sont considérés : le défaut circuit-ouvert et le défaut court-circuit sur l'un des interrupteurs de puissance des trois bras d'onduleur. Des scénarios de défauts interrupteurs seront créés à fin d'analyser les conséquences de ces défauts et voir le comportement du système proposé à partir des réponses des grandeurs électriques et mécaniques (courants, vitesse, couple...).

➤ **Chapitre III** : dans ce chapitre une méthode de reconfiguration sera validée et présente des bonnes performances par le mécanisme de reconfiguration appliquée sur le système redondant proposé (l'ajout du quatrième bras pour l'onduleur à trois bras).

Et enfin on terminera notre mémoire avec une conclusion générale qui résumera l'intérêt de notre étude.

Chapitre I

**Les défauts des machines électriques
et leur diagnostic**

I.1- Introduction :

Ce chapitre dresse un panorama des défauts des machines électriques et leur diagnostic, avec une référence particulière aux machines asynchrones et leur détection de défauts, sachant que ces techniques peuvent être facilement étendues à d'autres types de machines électriques.

La surveillance des machines électriques, pour le diagnostic et la prévision de pannes, a suscité de nombreux travaux ces dernières années, à cause de son influence considérable sur la continuité opérationnelle de nombreux processus industriels.

Un bon diagnostic et une détection précoce de défauts permettent de minimiser le temps d'arrêt ainsi que le temps de maintenance du processus en question. Ils permettent aussi d'éviter les conséquences nuisibles, parfois dévastatrices, des défauts ainsi que de réduire les pertes financières.

Une bonne procédure de détection doit prendre les mesures minimales nécessaires à partir du processus en question, ainsi que d'extraire un diagnostic donnant une indication claire des modes de défaillance, par l'analyse des données, dans un minimum de temps.

Le but de ce chapitre est de présenter les défauts et les méthodes de diagnostic appliquées à la machine asynchrone. Ces méthodes sont classées en deux catégories, celles qui utilisent un modèle mathématique du système et celles qui consistent à analyser les signaux mesurés.

I.2- Diagnostic des machines électriques

Les machines électriques et les systèmes d'entraînement sont soumis à de nombreux types de défauts. Ces derniers peuvent être classés en leurs causes en deux grandes familles (figure I.1) : les défauts à causes internes et les défauts à causes externes [1]. Les défauts externes sont provoqués par les tensions d'alimentation, la charge mécanique ainsi que par l'environnement d'utilisation de la machine. Les défauts internes sont causés par les constituants de la machine (circuits magnétiques, bobinages du stator et du rotor, entrefer mécanique, cage rotorique,...). A titre d'exemple, nous pouvons citer d'une manière non exhaustive les défauts suivants :

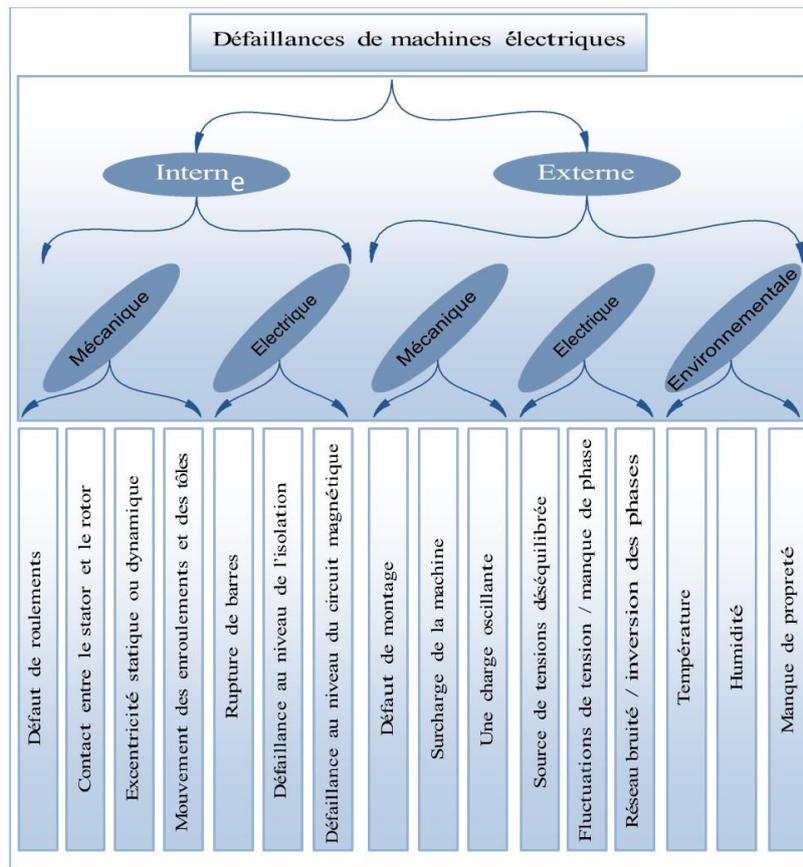


Figure I.1 : Classification des défauts selon leurs origines [1]

- Les défauts électriques au niveau du stator, qui se manifestent par l'ouverture d'une phase ou un court-circuit au sein d'une même phase, entre deux phases ou entre une phase et la carcasse du stator.
- Les défauts électriques au niveau du rotor, qui comprennent une ouverture ou un court-circuit des spires pour les machines à rotor bobine et de rupture ou fissure des barres et/ou des anneaux de court-circuit pour les machines à cage.
- Les défauts mécaniques au niveau de l'alésage du stator, ou au niveau du rotor tels que les défauts de roulement, d'excentricité et d'alignement.
- Une défaillance au niveau des composants électroniques de puissance de la commande du système d'entraînement.

En raison de la symétrie des machines électriques, toute apparition d'un défaut induit une distorsion au niveau du champ magnétique tournant, qui règne dans l'entrefer de cette dernière. Elle provoque l'apparition d'harmoniques, caractérisant ces défauts, sur les signaux de mesures. La mesure de signaux pertinents nous permet de surveiller, d'une manière non invasive, le

fonctionnement de la machine. Ces signaux peuvent être électriques ou mécaniques tels que les courants, les tensions, le flux, le couple et la vitesse. Les techniques de détection et d'identification des défauts font encore l'objet de nombreux travaux de recherche, car il reste encore plusieurs questions ouvertes :

- La définition d'une unique procédure de diagnostic pour la détection et l'identification de tout type de défaut.
- L'augmentation de la robustesse des techniques de détection en les rendant insensibles aux conditions d'exploitation.
- La détection able des pannes pour un fonctionnement avec un contrôle de position, de vitesse et de couple.
- La détection fiable de pannes dans des conditions de travail variables.
- Un diagnostic efficace ouvre la voie à une commande tolérante aux défauts, et doit par conséquent augmenter la robustesse du processus industriel. Ces derniers décennies, l'avènement de l'électronique de puissance a permis d'envisager des nouvelles applications, ainsi que de retirer les meilleures performances du fonctionnement des machines électriques. Néanmoins cette avancée technologique a apporté d'autres risques de défaillance au niveau des processus d'entrainements électriques.

Actuellement, plusieurs laboratoires de recherche se penchent sur la conception et l'élaboration de nouvelles stratégies de commande [2], permettant de rattraper les pertes de performances, qui suivent l'apparition des défauts au niveau de la machine ou de la commande

I.3- Constitution des machines asynchrones

La figure I.2 illustre la vue générale d'une MAS tout en spécifiant ses différentes parties constitutives.

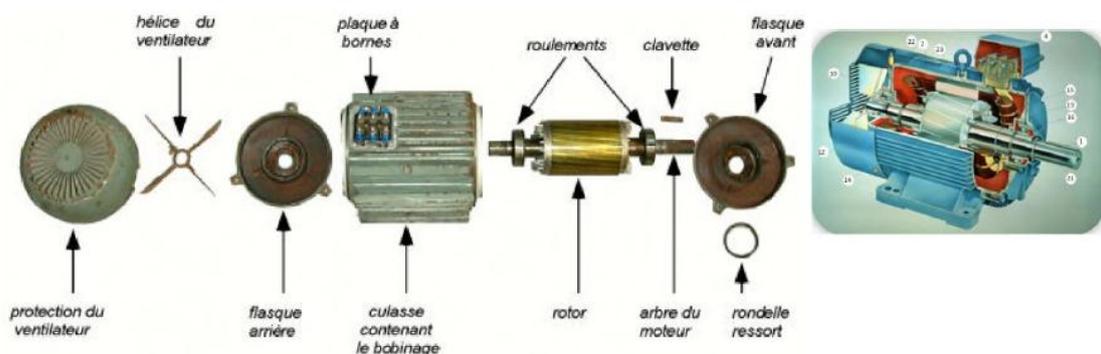


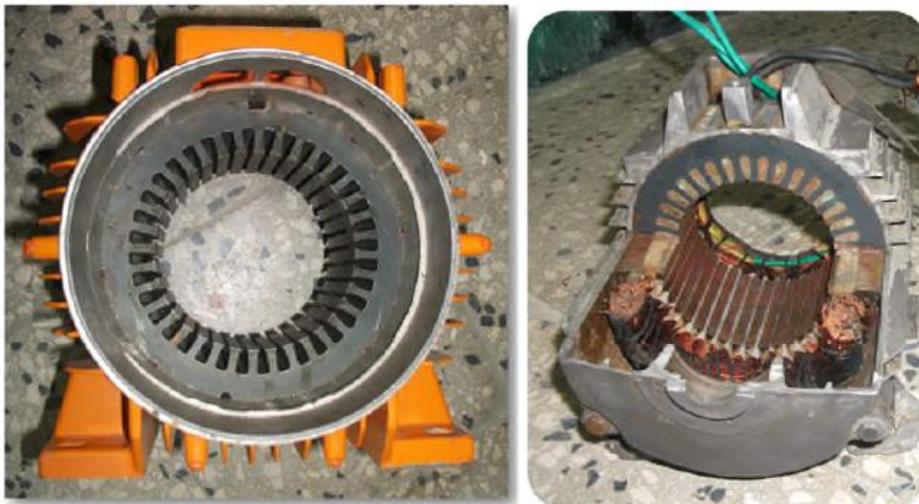
Figure I.2 : Constitution d'une machine asynchrone (vue générale) [3]

La machine asynchrone à cage d'écureuil est constituée des principaux éléments suivants :

1. Stator ;
2. Rotor ;
3. Enroulements ;

I.3.1- Stator

Il est constitué d'un enroulement bobiné réparti dans les encoches du circuit magnétique. Ce circuit magnétique est constitué d'un empilement de tôles dans lesquelles sont découpées des encoches parallèles à l'axe de la machine (figure I.2). Le bobinage statorique peut se décomposer en deux parties : les conducteurs d'encoches et les têtes de bobines. Les conducteurs d'encoches permettent de créer dans l'entrefer, le champ magnétique à l'origine de la conversion électromagnétique. Les têtes de bobines permettent, quant à elles, la fermeture des courants en organisant la circulation judicieuse des courants d'un conducteur d'encoche à l'autre. L'objectif est d'obtenir à la surface de l'entrefer une distribution de courant la plus sinusoïdale possible, afin de limiter les ondulations du couple électromagnétique [4] [3].



(a) Stator sans bobinage

(b) Coupe d'un stator

Figure I.3 : Photo du stator d'une machine asynchrone

I.3.2- Rotor

Dans le rotor à cage, les anneaux de court-circuit permettent la circulation des courants d'un conducteur d'encoche (barre rotorique) à l'autre. Ces barres conductrices sont régulièrement réparties, et constituent le circuit du rotor (figure I.4). La cage est insérée à l'intérieur d'un circuit magnétique constitué de disques en tôles empilés sur l'arbre de la machine analogue à celui du moteur à rotor bobiné. Dans le cas du rotor à cage d'écureuil, les conducteurs sont réalisés par

coulage d'un alliage d'aluminium, ou par des barres massives de cuivre préformées et frettés dans les tôles du rotor. Il n'y a généralement pas, ou très peu, d'isolation entre les barres rotoriques et les tôles magnétiques, mais leur résistance est suffisamment faible pour que les courants de fuite dans les tôles soient négligeables, sauf lorsqu'il y a une rupture de barre [4].

Les encoches rotoriques sont inclinées par rapport à l'axe longitudinal pour diminuer les harmoniques supérieurs d'espace et réduire la réactance liée à la position de la variation angulaire rotor / stator.



(a) Coupe d'un rotor à cage d'écureuil en aluminium [6]

(b) Cage d'écureuil [8]

Figure I.4 : Rotors d'une MAS

I.3.3 -Enroulements

Les trois bobines (un enroulement par phase) sont identiques, décalées l'une par rapport à l'autre de 120° et sont alimentées par des tensions triphasées. Elles produisent un champ magnétique tournant à la fréquence de rotation.

I.4-Les défauts des machines asynchrones

Bien que la machine asynchrone soit réputée robuste, elle peut parfois présenter différents types de défauts. Ces défauts se déclarent dans les différentes parties de la machine en commençant par la connexion des phases statoriques et en finissant par l'accouplement mécanique du rotor à la charge. Ces défaillances peuvent être prévisibles ou intempestives, mécaniques, électriques ou magnétiques, et leurs causes sont très variées.

Une étude statistique menée par [3] sur les machines asynchrones à cage d'écureuil, exploitées dans le domaine de l'industrie pétrochimique, nous révèle que certaines défauts sont plus

fréquentes que d'autres comme exposé par le diagramme de les (figures I.5) en présentant le pourcentage de défauts susceptibles d'affecter ces machines de grande puissance.

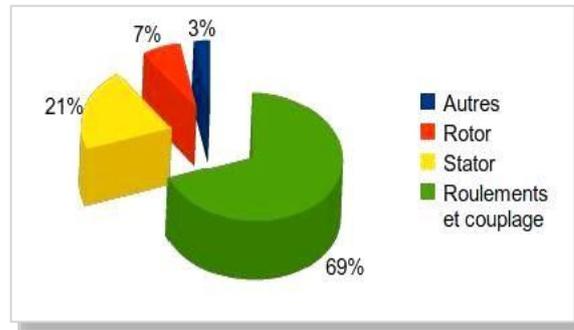


Figure I.5 : Pourcentage des défauts (2008)

I.4.1- Défauts électriques :

Les défaillances électriques, au niveau du stator ou au niveau du rotor, peuvent avoir plusieurs formes et plusieurs causes. A titre d'exemple : le déséquilibre des tensions d'alimentation de la machine ou encore les démarrages fréquents provoquent un échauffement excessif des bobinages statorique conduisant à terme à une destruction locale de l'isolant. De même, les efforts électrodynamiques que subissent les conducteurs des phases, se traduisent par des vibrations mécaniques ayant pour effet de détériorer l'isolant. Sur le plan électrique, les fronts de tension générés par les convertisseurs statiques accentuent le phénomène et réduisent, par conséquent, la durée de vie de l'isolant des conducteurs. Quant aux origines environnementales, nous pouvons citer l'humidité, les produits corrosifs ou abrasifs, . . .

➤ Au niveau du stator :

Les défauts affectant le stator peuvent être classés comme suit:

- ✓ Défauts thermiques liés aux surcharges et à l'âge qui endommagent l'isolant des conducteurs.
- ✓ Défauts électriques qui consistent en des courts-circuits entre phases, entre spires ou en des mises à la terre de spires. Ils sont liés à une dégradation de l'isolation provoquée, par exemple, par des surtensions transitoires ou une mauvaise tenue de l'isolant dans un environnement donné (humidité, température).
- ✓ Défauts mécaniques comme les mouvements d'une bobine suite à des vibrations d'origine électromagnétiques. Ceci peut entraîner une détérioration de l'isolant [9][10].

En définitive, tous ces défauts conduisent, à terre, à la mise en court-circuit de tout ou partie de l'alimentation de la machine. Ils seront donc à l'origine de transitoires de courant et de couple pouvant être critiques pour la chaîne de traction.



Figure I.6: Différents défauts au niveau de stator de la machine asynchrone

➤ **Au niveau du rotor**

Les défauts affectant le rotor sont aussi de diverses natures:

- ✓ Défauts thermiques affectant les barres ou l'anneau de court-circuit qui peuvent être à l'origine de vibrations ou de détériorations des éléments de la cage. Ces défauts peuvent être dus, par exemple, à une insuffisance du refroidissement.
- ✓ Défauts d'excentricité du rotor par rapport au stator causés entre autres par un mauvais alignement ou par un mauvais usinage. Ils se manifestent par des vibrations supplémentaires.
- ✓ Défauts mécaniques comme une rupture de barre.

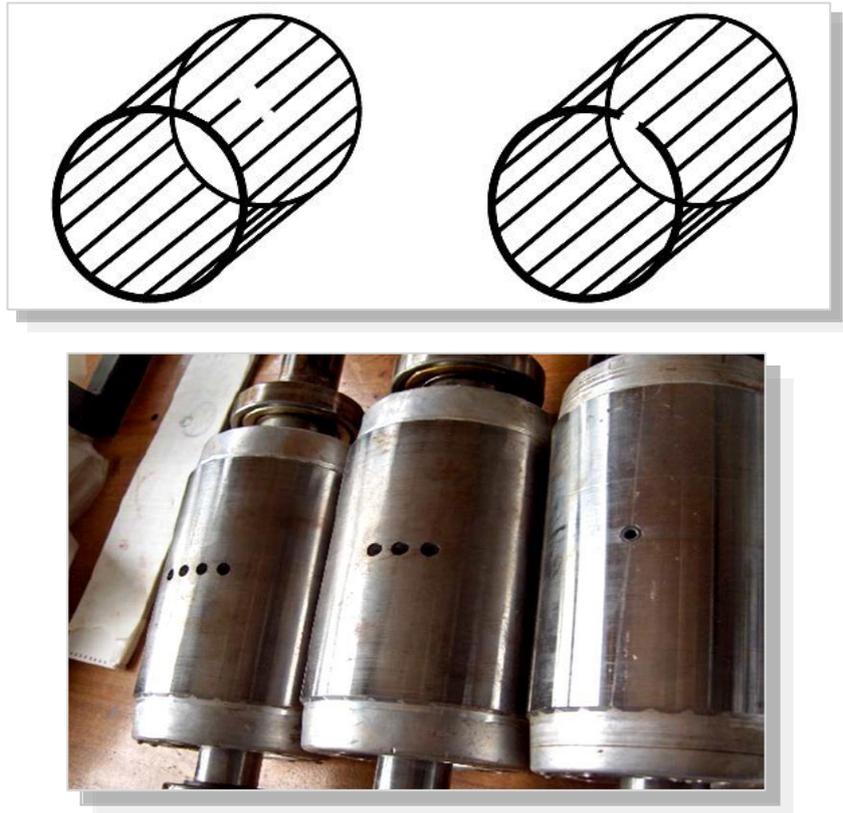


Figure I.7 : Défaut de rupture de barres et d'anneau de court-circuit

I.4.2- Les défauts de l'onduleur:

Les défauts de l'onduleur consistent essentiellement dans le fonctionnement défectueux des composants de puissance et de la commande des semi-conducteurs [6].

a. Les défauts des semi-conducteurs de puissance

Les onduleurs de tension utilisés par la traction ferroviaire utilisent essentiellement les thyristors GTO et, depuis peu, les IGBT.

La mise en défaut brutale du composant peut avoir plusieurs origines. Cependant, c'est essentiellement un phénomène thermique qui est la cause directe des destructions de composant, la

température du silicium atteignant une valeur critique qui lui fait perdre ses capacités de semi_conducteur [6]

I.4.3- Les défauts de GTO se produisent:

- à l'ouverture : remise en conduction du fait d'un taux de montée de la tension directe trop important ou échauffements localisés provoqués par la focalisation des lignes de courant.
- à la fermeture : si le taux de montée du courant est trop important et la gâchette et la cathode ne sont pas suffisamment interdiguées, il y a amorçage de seulement une partie de la cathode et donc un échauffement localisé se produit.
- pendant la conduction : si un surcourant circule pendant une durée ne respectant pas les critères de surcharge, il y a destruction thermique.
- pendant l'état bloqué : suite à une surtension, le composant est détruit par effet d'avalanche. Une circonstance aggravante est alors la température élevée du GTO.

Tous ces fonctionnements conduisent à une fusion du silicium: le thyristor GTO se comporte alors comme un interrupteur fermé idéal.

Les destructions de l'IGBT sont essentiellement dues à des surintensités, des surtensions ou des forts gradients de tension. Les mécanismes de destruction sont principalement la mauvaise dissipation des pertes et l'effet thyristor (dit "latching") qui consiste en l'amorçage incontrôlé du thyristor parasite inscrit dans la structure de l'IGBT [8] - [9]

A la différence du thyristor GTO, la destruction de l'IGBT en court-circuit est précédée par un régime de plateau durant lequel le courant est limité à une valeur fonction de la tension de gâchette, de la température et de la technologie [9] - [7]. Ce régime de plateau peut être figuré par la caractéristique idéale d'un IGBT

I.4.4- Les défauts de la commande de l'onduleur

Si la logique de commande en amont des pilotes des interrupteurs de puissance est bonne, les Fonctionnements anormaux de la commande de l'onduleur sont essentiellement dus à :

- ✓ la rupture de la connexion entre le pilote et l'interrupteur qui est alors maintenu dans l'état précédant la rupture,

- ✓ l'inhibition du pilote suite à la détection d'un court-circuit (par surveillance de la tension de saturation par exemple) ou à une tension d'alimentation du pilote insuffisante. En supposant l'interrupteur sain, cette inhibition entraîne une ouverture du semi-conducteur qui se comporte alors comme un interrupteur ouvert parfait (aux courants de fuite près).

Les défauts de commande de l'onduleur auront des conséquences importantes sur le fonctionnement de l'association car ils modifient de manière fondamentale les conditions d'alimentation de la machine.

I.5-Les méthodes de diagnostic des machines asynchrones

I.5.1-Diagnostic par analyse des vibrations mécaniques

Le diagnostic des défauts en utilisant les vibrations mécaniques est la méthode la plus utilisée dans la pratique. Les forces radiales, créées par le champ d'entrefer, provoquent des vibrations dans la machine asynchrone.

La force magnétomotrice contient les effets des asymétries du stator ou du rotor, en plus la perméance dépend de la variation de l'entrefer (à cause des ouvertures des encoches statoriques et rotoriques, l'excentricité).

Pour la surveillance de vibrations on utilise des capteurs tels que les accéléromètres. Des balourds magnétiques, mécaniques et/ou des forces produisent des vibrations. Ces dernières sont mesurées suivant la direction radiale ou la direction axiale. Les mesures ainsi effectuées sont analysées du point de vue spectrale.

Les spectres des signaux de vibrations, issus du moteur avec défaut, sont comparés avec ceux enregistrés lorsque le moteur est en bon état. Ceci permet la détection aussi bien des défauts électriques que mécaniques (défauts d'enroulements statoriques, irrégularité d'entrefer et asymétrie de l'alimentation).

I.5.2-Diagnostic par analyse du flux magnétique axial de fuite

Dans une machine idéale sans défauts, les courants et les tensions statoriques sont équilibrés, ce qui annule le flux de fuite axial. La présence d'un défaut quelconque, provoque un déséquilibre électrique et magnétique au niveau du stator ce qui donne naissance à des flux de fuite axial de valeurs dépendantes du degré de sévérité du défaut.

Si on place une bobine autour de l'arbre de la machine, elle sera le siège d'une force électromotrice induite. L'analyse spectrale de la tension induite dans cette bobine, peut être exploitée pour détecter les différents défauts comme la rupture de la barre rotorique [11].

I.5.3-Diagnostic par analyse du couple électromagnétique

Le couple électromagnétique développé dans les machines électriques, provient de l'interaction entre le champ statorique et celui rotorique. Par conséquent, tout défaut, soit au niveau du stator ou au rotor, affecte directement le couple électromagnétique .

L'analyse spectrale du signal du couple (mesuré ou estimé), donne des informations sur l'état de santé du moteur. [4]

I.5.4-Diagnostic par analyse de la puissance instantanée

L'utilisation de la puissance instantanée pour la détection des défauts dans les moteurs asynchrones, a fait l'objet des nombreux travaux. [7]. Car la puissance instantanée est la somme des produits des courants et des tensions dans les trois phases statoriques. Donc, le niveau d'informations apportées par cette grandeur, est plus grand que celui apportées par le courant d'une seule phase (oscillations plus importantes et plus visibles). Ceci présente l'avantage de cette méthode par rapport aux autres.

I.5.5-Diagnostic par analyse du courant statorique

Parmi tous les signaux utilisables, le courant statorique s'est avéré être l'un des plus intéressants, car il est très facile d'accès et nous permet de détecter aussi bien les défauts: électriques que les défauts purement mécaniques [5] [10] .

Cette technique est dénommée "Motor Current Signature Analysis" (MCSA) Les défauts de la machine asynchrone se traduisent dans le spectre du courant statorique soit par :

- ✓ L'apparition des raies spectrales dont les fréquences sont directement liée à la fréquence de rotation de la machine, aux fréquences des champs tournants et aux paramètres physiques de la machine (nombre d'encoche rotorique et nombre de paires de pôles).
- ✓ La modification de l'amplitude des raies spectrales, déjà présentés dans le spectre du courant

I.5.6-Diagnostic par analyse du vecteur de Park

Deux versions d'analyse par cette méthode à savoir :

La première utilise les grandeurs biphasées $i_{s\alpha}$ et $i_{s\beta}$, qui sont calculées à partir des trois courants d'alimentation, pour l'obtention de la courbe de Lissajous : $i_{s\beta} = f(i_{s\alpha})$. Le changement de l'épaisseur et de la forme de cette courbe donne une information sur le défaut.

La deuxième est appelée Vecteur de Park Etendu, qui est basée sur l'analyse spectrale du module du vecteur de Park

I.5.7- Diagnostic par utilisation des techniques d'intelligence artificielle :

En dépit des diverses techniques mentionnées précédemment, ces dernières années, la surveillance et la détection de défaut des machines électriques se sont éloignées des techniques traditionnelles pour s'orienter vers des techniques dites d'intelligence artificielle. Ces méthodes sont basées sur la connaissance a priori du système et utilisent un ensemble de règles et de faits (données manipulées par les règles) qui constituent ce qu'on appelle la base de connaissance. Parmi ces méthodes, on peut citer :

- Logique floue,
- Réseaux neuronaux,
- Reconnaissance des formes.

I.6 Conclusion :

La protection des moteurs est une fonction essentielle pour la continuité du fonctionnement des machines. Le choix du dispositif de protection doit être fait avec rigueur. La recherche d'anomalies et la rapidité de remise en route seront ainsi nettement améliorées.[5]

De là vient le rôle du diagnostic des machines électriques a été (et il est encore) un thème de recherche très important depuis plusieurs décennies, tel que rapporte dans la bibliographie (non exhaustive) citée dans ce chapitre. L'avènement de la surveillance à révolutionne l'entretien des systèmes basés sur des machines électriques. En fait, ce terme se réfère à un suivi du système permettant de diagnostiquer l'état d'un moteur à courant alternatif afin de déterminer les types de défaillance et leur gravité quand le moteur est dans des conditions de fonctionnement normales.

Dans ce chapitre nous avons essayé de regrouper le maximum d'information sur les symptômes qu'une machine (asynchrone-onduleur) peut manifester. Pour chaque symptôme, une liste de causes possibles est nécessaire pour la détermination les possibles origines pour chaque type de défaut.

Chapitre II

Modélisation de la machine asynchrone triphasée

II.1 Introduction :

La simulation sur ordinateur du fonctionnement des moteurs électriques est particulièrement utile pour gagner en perspective dans le comportement dynamique ainsi que l'interaction électromécanique. Avec un modèle approprié, les défauts du moteur ainsi que le changement des paramètres correspondants peuvent être simulés.

La lecture de littérature nous révèle une multitude de modèles dédiés au diagnostic et à la surveillance des défauts de type court-circuit et circuit ouvert au niveau de l'onduleur.

Le but de ce chapitre est de présenter les modèles qui nous semblent les plus adéquats pour simulation, d'une part la machine asynchrone toute seule et d'autre part la MAS avec l'onduleur. Ce modèle doit permettre une prise en charge optimale du défaut afin d'extraire les signatures susceptibles d'être sensibles à ce dernier. Nous montrerons également, les équations qui traduisent le modèle réel de la machine (machine triphasée) après une brève mise au point de certaines conventions. Nous présenterons en suite le modèle général de Park, duquel, nous déduirons après un choix judicieux du repère d'observation, le modèle de la machine alimentée en tension.

II.2. Modèle électrique:

La machine asynchrone peut être considérée comme un transformateur triphasé avec un enroulement secondaire tournant. On peut analyser son comportement en régime permanent en utilisant le schéma monophasé équivalent. Ce circuit est donné par la figure (II.01) et permet d'extraire les différents paramètres physiques du moteur. [14]

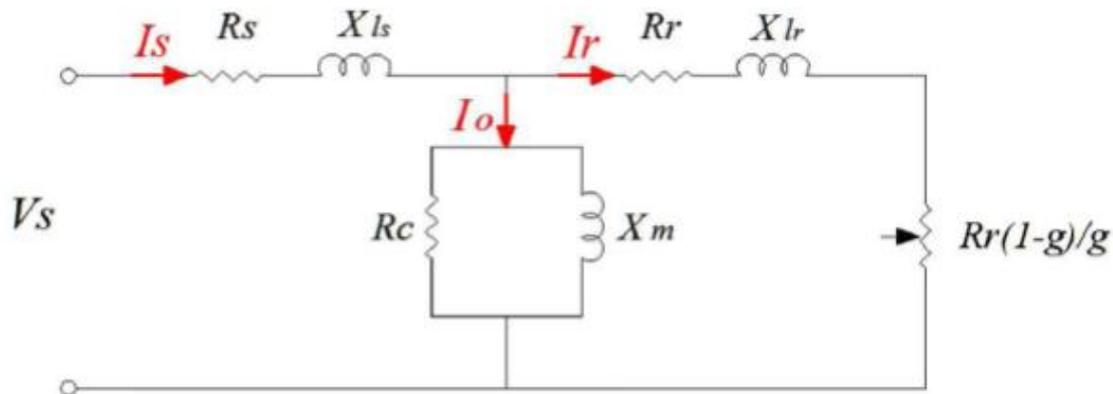


Figure II.1: Schéma monophasé équivalent en régime permanent.

II.3. Modèle dynamique:

La structure générale de la machine asynchrone est composée de six enroulements dans l'espace électrique, les axes statoriques sont décalés entre eux d'un angle $(2\pi/3)$, ainsi que les axes rotoriques.

L'angle θ représente l'angle entre l'axe de la rotorique et l'axe fixe de la phase statorique. Les axes rotoriques sont court-circuités sur elles-mêmes, et tournent avec ω_r par rapport aux axes statoriques fixes, sont représentés par la Figure(II.02). [17], [18] phase

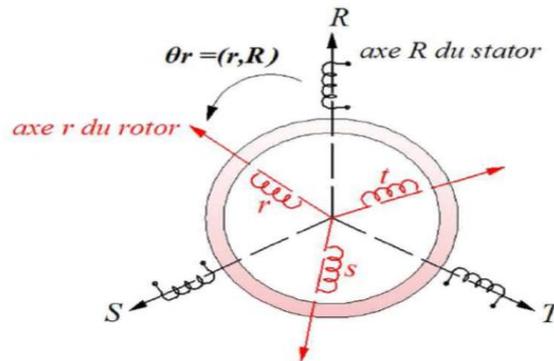


Figure II.2: Représentation schématique des enroulements statoriques et rotoriques d'une machine asynchrone triphasée

➤ Equations électriques

Nous pouvons à présent écrire le système matriciel électrique suivant dans le repère a , b , c :

$$\begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \\ V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_r & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \\ i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{sa} \\ \Phi_{sb} \\ \Phi_{sc} \\ \Phi_{ra} \\ \Phi_{rb} \\ \Phi_{rc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.01})$$

Ou de manière plus raccourcie :

$$[v_{sabc}] = [R_s][i_{sabc}] + \left(\frac{d}{dt}\right)[\Phi_{sabc}] \quad (\text{II.02})$$

$$[v_{rabc}] = [R_r][i_{rabc}] + \left(\frac{d}{dt}\right)[\Phi_{rabc}] \quad (\text{II.03})$$

➤ Equation magnétiques :

Maintenant, nous devons exprimer les grandeurs magnétiques au stator et au rotor, toujours dans le repère a,b ,c :

$$\begin{bmatrix} \Phi_{sa} \\ \Phi_{sb} \\ \Phi_{sc} \\ \Phi_{ra} \\ \Phi_{rb} \\ \Phi_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_s & M_s & M_s & M_1 & M_3 & M_2 \\ M_s & l_s & M_s & M_2 & M_1 & M_3 \\ M_s & M_s & l_s & M_3 & M_2 & M_1 \\ M_1 & M_3 & M_2 & l_r & M_r & M_r \\ M_2 & M_1 & M_3 & M_r & l_r & M_r \\ M_3 & M_2 & M_1 & M_r & M_r & l_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \\ i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.04})$$

Pour l'écriture condensée, on met :

$$[L_{ss}] = \begin{bmatrix} l_s & M_s & M_s \\ M_s & l_s & M_s \\ M_s & M_s & l_s \end{bmatrix} \quad (\text{II.05})$$

$$[L_{rr}] = \begin{bmatrix} l_r & M_r & M_r \\ M_r & l_r & M_r \\ M_r & M_r & l_r \end{bmatrix} \quad (\text{II.06})$$

On aura :

$$[M_{sr}] = [M_{sr}]^t = M_{sr} \begin{bmatrix} \cos(\alpha) & \cos(\alpha + 2\pi/3) & \cos(\alpha - 2\pi/3) \\ \cos(\alpha - 2\pi/3) & \cos(\alpha) & \cos(\alpha + 2\pi/3) \\ \cos(\alpha + 2\pi/3) & \cos(\alpha - 2\pi/3) & \cos(\alpha) \end{bmatrix} \quad (\text{II.07})$$

On aura finalement :

$$[v_{sabc}] = [R_s][i_{sabc}] + (d/dt)([L_{ss}][i_{sabc}] + [M_{sr}][i_{rabc}]) \quad (\text{II.08})$$

$$[v_{rabc}] = [R_r][i_{rabc}] + (d/dt)([L_{rr}][i_{rabc}] + [M_{rs}][i_{sabc}]) \quad (\text{II.09})$$

➤ Equations mécaniques :

Pour étudier les phénomènes transitoires électromécaniques avec une vitesse rotorique variable (par exemple le démarrage, le freinage, la variation de la charge à l'arbre, etc...), il faut ajouter l'équation de mouvement au système d'équations différentielles.

$$J \cdot \frac{d\Omega_r}{dt} = C_g - C_r - f\Omega_r \quad (\text{II.10})$$

Notons que la vitesse électrique du rotor est donnée par l'expression suivante :

$$W_r = p\Omega_r \quad (\text{II.11})$$

Remarque :

Cette modélisation triphasée présente un inconvénient majeur pour notre application. Les matrices $[M_{sr}]$ et $[M_{rs}]$ dépendent de l'angle de rotation mécanique, et nécessitent donc d'être recalculées à chaque pas d'échantillonnage.

II.4 . Modélisation dans le repère de Park :

A présent, nous devons effectuer une transformation de notre repère triphasé en un repère biphasé. Nous avons classiquement le choix entre trois repères .Le premier se situe sur le champ statorique et est communément appelé $\alpha\beta$, le second se place quant à lui sur le champ tournant et est appelé dq, et le dernier se place sur le champ électromagnétique est appelé XY. La modélisation en $\alpha\beta$ voit des grandeurs alternatives tournant à la fréquence statorique. Celle en dq voit par contre des grandeurs continues car elle est située sur le champ tournant. Cette transformation des équations de phase en un système équivalent biphasé est effectuée grâce à la matrice de transformation de Park. Dans la théorie de Park, on utilise la transformation unique pour les courants, tensions et flux.[12],[13]

$$[P] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta - 4\pi/3) \\ -\sin \theta & -\sin(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta - 4\pi/3) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (II.12)$$

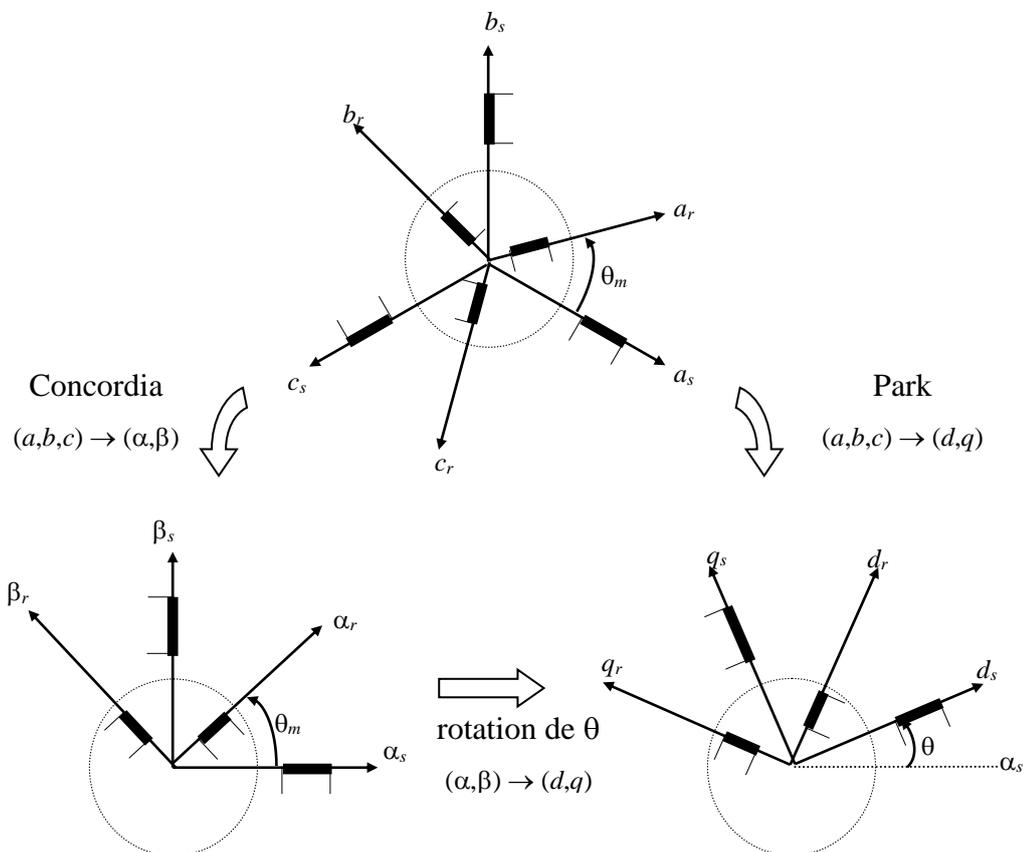


Figure II.3: Représentation spatiale de la transformation triphasée / biphasée

➤ Equations électriques

$$V_{ds} = R_s \cdot i_{ds} + \frac{d\Phi_{ds}}{dt} - \omega_s \cdot \Phi_{qs} \quad (\text{II.13})$$

$$V_{qs} = R_s \cdot i_{qs} + \frac{d\Phi_{qs}}{dt} - \omega_s \cdot \Phi_{ds} \quad (\text{II.14})$$

$$V_{dr} = R_r \cdot i_{dr} + \frac{d\Phi_{dr}}{dt} - \omega_r \cdot \Phi_{qr} = 0 \quad (\text{II.15})$$

➤ Equations magnétiques :

$$\Phi_{ds} = L_s \cdot i_{ds} + M \cdot i_{dr} \quad \Phi_{dr} = L_r \cdot i_{dr} + M \cdot i_{ds} \quad (\text{II.16})$$

$$\Phi_{qs} = L_s \cdot i_{qs} + M \cdot i_{qr} \quad \Phi_{qr} = L_r \cdot i_{qr} + M \cdot i_{qs} \quad (\text{II.17})$$

➤ Equations mécaniques :

$$J \cdot \frac{d\Omega_r}{dt} = C_e - C_r - f\Omega_r \quad (\text{II.18})$$

$$C_e = \left(\frac{3}{2}\right) \cdot p \cdot M \cdot (i_{rd} \cdot i_{sq} - i_{sd} \cdot i_{rq}) \quad (\text{II.19})$$

$$\omega_r = p \cdot \Omega_r \quad (\text{II.20})$$

II.5. Représentation d'état :

$$[X'] = [A][X] + [B][U]$$

[X] : Vecteur d'état, avec $[X] = [i_{ds} \ i_{qs} \ i_{dr} \ i_{qr}]^t$

[V] : Matrice d'évolution d'état du système.

[B] : Matrice de la commande.

[U] : Vecteur du système de commande.

$$[A] = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sigma \cdot T_s} & \frac{M^2 \cdot w_r}{L_s \cdot L_r} & \frac{M}{\sigma \cdot L_s \cdot T_r} & \frac{M \cdot w_r}{\sigma \cdot L_s} \\ \frac{M^2 \cdot w_r}{\sigma \cdot L_s \cdot L_r} & \frac{1}{\sigma \cdot T_s} & \frac{M \cdot w_r}{\sigma \cdot L_s} & \frac{M}{\sigma \cdot L_s \cdot T_r} \\ \frac{M}{\sigma \cdot L_r \cdot T_s} & \frac{M \cdot w_r}{\sigma \cdot L_s} & \frac{1}{\sigma \cdot T_r} & \frac{w_r}{\sigma} \\ \frac{M \cdot w_r}{\sigma \cdot L_r} & \frac{M}{\sigma \cdot L_r \cdot T_s} & \frac{w_r}{\sigma} & \frac{1}{\sigma \cdot T_r} \end{bmatrix} \quad (\text{II.21})$$

$$[U] = [V_{ds} V_{qs} \ 0 \ 0]^t \quad (\text{II.22})$$

$$[B] = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sigma \cdot L_s} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sigma \cdot L_s} & 0 & 0 \\ -\frac{M}{\sigma \cdot L_s \cdot L_r} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{M}{\sigma \cdot L_s \cdot L_r} & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{II.23})$$

II.6. Simulation et interprétation :

Dans un premier temps, nous considérons que la machine est connectée en étoile et alimentée par un système de tension triphasé équilibré sous la forme suivante :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = 220\sqrt{2} \begin{bmatrix} \sin(2\pi f * t) \\ \sin(2\pi f * t - 2\pi/3) \\ \sin(2\pi f * t - 4\pi/3) \end{bmatrix} f \quad (\text{II.24})$$

Dans notre travail, nous avons utilisé le logiciel «*MATLAB Simulink*» pour la simulation du comportement dynamique de la machine asynchrone triphasée. Nous avons utilisé un démarrage en charge d'un couple de charge $C_r=100\text{N.m}$ à $t=1\text{s}$ (figureII.04).

Les paramètres nominaux de la machine utilisée sont donnés au l'annexe

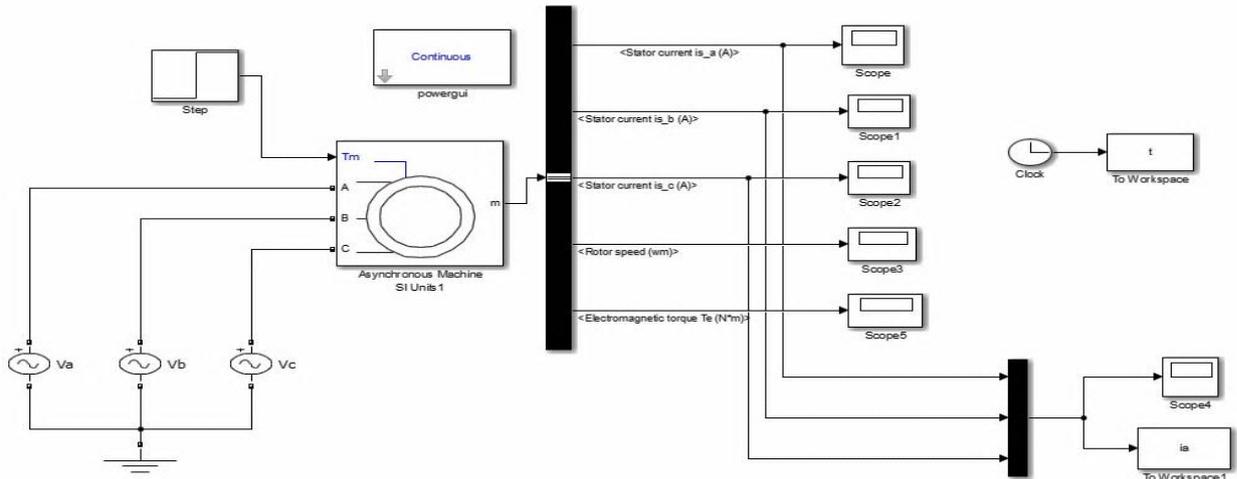
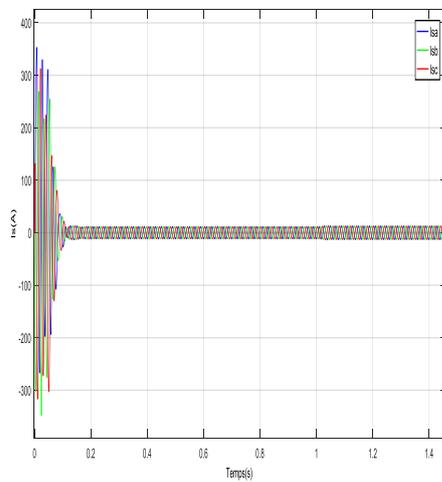
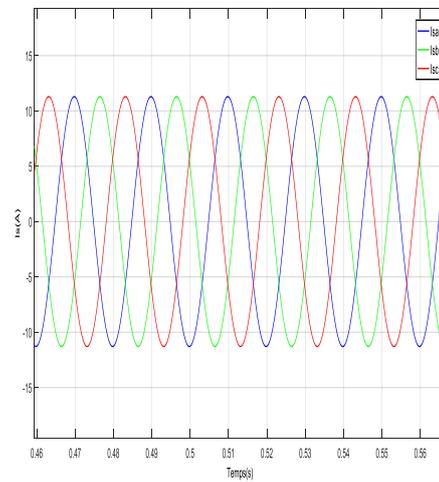


Figure II.4: Schéma bloc global de simulation

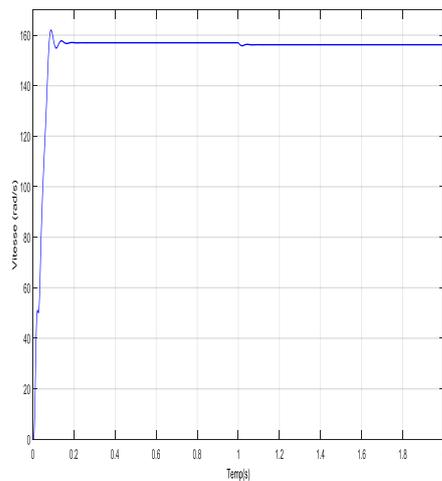
Les résultats obtenus sont représentés dans la figure(II.05) .



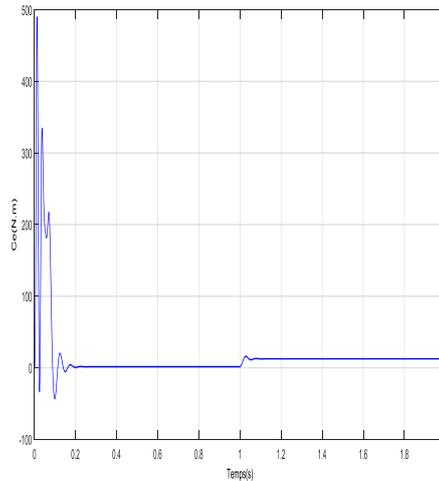
a) Les courants statoriques



b) Zoom des courants statoriques



c) La vitesse de rotation



d) Le couple électromagnétique

Figure II.5 : Réponses de la machine asynchrone alimentée par un réseau triphasé équilibré

- **INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS DE SIMULATION :**

- Le moteur étant à vide pendant $1s$ (démarrage à vide). On constate des pics importants de courants qui se disparaissent avec l'évolution du régime transitoire, un croisement linéaire de la vitesse qui atteint 153 rad/s (vitesse nominale) et qui correspond aussi un couple de démarrage important ($C_{em} = 11 \text{ N.m}$).
- A $t=1 \text{ s}$ on applique une charge de 11 N.m , ce qui provoque une diminution de la vitesse de rotation, cela apparait un fort appel de courant qui est nécessaire à développer un couple pour la machine, et donc un mouvement de rotation sur son arbre, ce qui donne une augmentation des courants et de couple qui rejoignent après un régime transitoire la valeur qui compense le couple résistant (11 N.m) appliqué.

II.7. Modélisation de l'onduleur de tension :

L'onduleur de tension est un convertisseur statique qui permet de fournir une tension alternative d'amplitude et de fréquence réglables à partir d'une source de tension continue.

L'onduleur de tension est constitué de cellule de commutation généralement à transistor ou thyristor pour les grandes puissances. [16]

II.7.1 Classification des onduleurs :

Un onduleur peut modifier de façon périodique les connexions entre l'entrée continue et obtenir une alternative à la sortie. Cette définition conduit à distinguer deux types d'onduleurs; onduleur non autonome et un onduleur autonome.

Entre ces deux types d'onduleurs, il existe un type intermédiaire appelé communément onduleur à résonance ou onduleur à commutation par la charge [17].

Il est à noter qu'en générale la classification des onduleurs se fait selon les modes de commutation (la transition d'un état fermé à un autre état ouvert ou l'inverse) de leurs interrupteurs.

➤ Onduleur autonome (non assisté)

Un onduleur autonome est très lié aux caractéristiques du générateur et du récepteur entre lesquels il est monté, et à partir de ces caractéristiques, on peut dériver notamment la nature des commutations à effectuer et par suite les semi-conducteurs à utiliser, ces semi-conducteurs doivent être des composants commandés à la fois à la fermeture et à l'ouverture, ce type d'onduleur n'est pas réversible. Cela conduit à distinguer:

- Les onduleurs de tension.
- Les onduleurs de courant.

➤ Onduleur autonome de tension

Un onduleur de tension est un onduleur qui permet de convertir la tension d'une source d'entrée continue (source d'impédance interne négligeable), cette tension n'est pas affectée par les

variations du courant «i» qui la traverse, la source continue impose la tension à l'entrée de l'onduleur et donc à sa sortie, le courant à la sortie est donc identique au courant d'entrée et dépend de la charge placée du côté alternative et peut être quelconque à condition qu'il ne s'agisse pas d'une autre source de tension (capacité ou force électromotrice alternative). Donc cette charge doit être reliée directement au borne de sortie de l'onduleur [12],[13].

➤ Onduleur autonome de courant

Un onduleur de courant (commutateur de courant) est alimenté par une source de courant continue (source d'inductance interne très importante) le courant qui la traverse ne peut être affecté par les variations de la tension à ses bornes.

La source de sortie est une source de courant alternative puisque la source d'entrée est une source de courant (imposé), la tension à la sortie est donc identique à la tension d'entrée et dépend de la charge placée du côté alternative et peut être quelconque à condition qu'il ne s'agit pas d'une autre source du courant alternative ou d'un circuit inductif donc cette charge doit être reliée directement au borne de la sortie de l'onduleur [18],[19].

L'avantage de l'onduleur de tension par rapport à celui du courant est indéniable et son utilisation dans de nombreuses applications se justifie principalement par les deux avantages:

- La bidirectionnalité en courant de sa topologie grâce aux diodes de récupération en antiparallèles.
- Le stockage d'énergie capacitive est plus aisé et efficace que son dual inductif. De plus, le coût et le poids des condensateurs sont moindres [20].

➤ Onduleur non autonome (assisté)

Un onduleur est dit non autonome si l'énergie, nécessaire pour la commutation des composants utilisés (peuvent être de simple thyristors commandés seulement à la fermeture), est fournie par un réseau alternatif qui est donc un réseau actif, la fréquence et l'amplitude de tension sont imposées par le réseau alternatif [17],[18].

➤ Onduleur à résonance

Un onduleur à résonance est un onduleur qui fournit une énergie alternative nécessaire à l'entretien des oscillations à une charge constituée d'un circuit oscillant peu amorti, les interrupteurs sont commandés via une fréquence très proche de la fréquence de résonance de la charge; donc l'onduleur doit être piloté par la charge (jouer sur la fréquence de commande), est appelé aussi "onduleur moyenne fréquence", car sa fréquence est d'ordre nettement plus élevée que celle du réseau.

On distingue deux types d'onduleur à résonance:

- L'onduleur série.
- L'onduleur parallèle.

II.7.2 Types d'onduleurs autonomes de tension :

➤ Les onduleurs monophasés :

L'onduleur autonome de tension réalise une conversion réversible continue alternative de type $E(=) \Leftrightarrow V(\sim)$ avec f désirée [21].

La conversion continue alternative par un onduleur monophasé peut se réaliser par deux montages:

➤ Onduleur en demi-pont :

Appelé onduleur en demi pont, il ne nécessite que deux interrupteurs avec un point milieu du côté de l'entrée continue, on obtient deux tensions sensiblement constantes égale à $E/2$;

- Si $S1=1$ (fermé), $U_{ch}=E/2$.

- Si $S2=1$ (fermé), $U_{ch}=-E/2$.

$S1$ et $S2$ peut être transistors bipolaire, IGBT, GTO, MOSFET ou thyristors [22].

La topologie de cet onduleur est donnée par la figure ci-dessous :

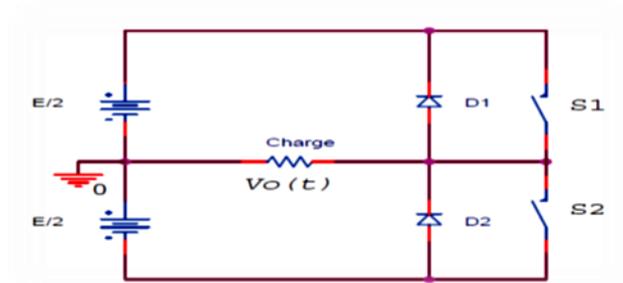


Figure II.6: Onduleur de tension en demi pont

➤ L'onduleur en pont :

Nécessite quatre interrupteurs pour varier la largeur relative aux créneaux formants les alternances de la tension de sortie; $K1, K2, K3, K4$ soient des interrupteurs statiques bidirectionnels en courant commandés à l'ouverture et la fermeture. Ils doivent être complémentaire entre eux ($K1$ et $K4, K2$ et $K3$) chaque deux interrupteurs de même bras.

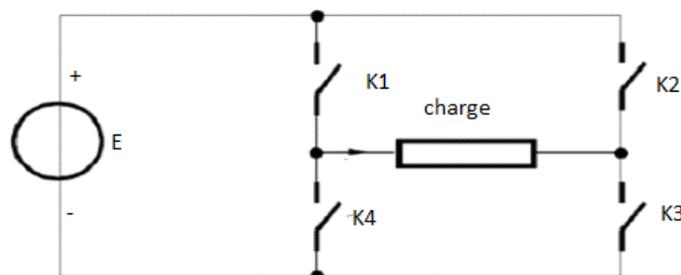


Figure II.7: Onduleur de tension monophasé

➤ L'onduleur triphasé :

Pour réaliser un onduleur triphasé, on regroupe trois demi-point monophasés et utilisant un diviseur capacitif commun pour la commande des trois phases contenant six interrupteurs bidirectionnels en courant réalisés par des semi-conducteurs commandables à l'ouverture et à la fermeture. Il s'agit généralement des IGBTs montés en antiparallèle avec une diode. Pour cette structure, on doit respecter certaines contraintes :

- Les interrupteurs d'un même bras doit conduire de façon complémentaire afin d'éviter tout court-circuit de la source de tension.
- La mise en antiparallèle des diodes au niveau des interrupteurs permet toujours au courant de ligne de trouver un chemin possible.

Théoriquement les deux semi-conducteurs d'un même bras doivent être commandés de façon complémentaire, pratiquement les deux semi-conducteurs d'un même bras ne doivent jamais conduire simultanément afin d'éviter de court-circuiter la source de tension, donc il faut générer un temps d'attente appelé temps mort entre les commandes de blocage et l'amorçage des deux interrupteurs d'un même bras [23].

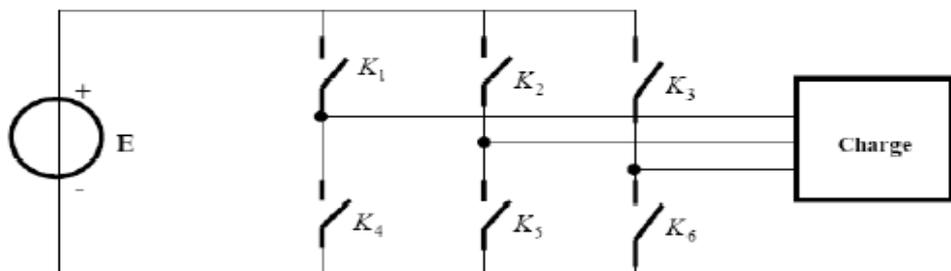


Figure II .8: Onduleur de tension triphasé.

II.7.3 Principe de fonctionnement d'un onduleur triphasé :

La représentation schématique de l'onduleur est fournie par la figure ci-dessous, la continuité de courant de sortie alternative i_a et i_b et i_c est assurée de faire en sorte que les interrupteurs doivent être complémentaires deux à deux et pour que les tensions de sortie V_a , V_b et V_c soient identiques à un tiers de la période T . Il faut que chaque demi-pont soit commandé avec un retard de $T/3$ de leurs fondamentaux près [24].

On peut commander l'onduleur triphasé de manière que :

- Chaque interrupteur conduit durant « $2*\pi/3$ ».
- Chaque interrupteur conduit durant « π ».

Nous nous intéresserons uniquement à la structure de l'onduleur à trois bras.

Considérons le schéma ci-dessous :

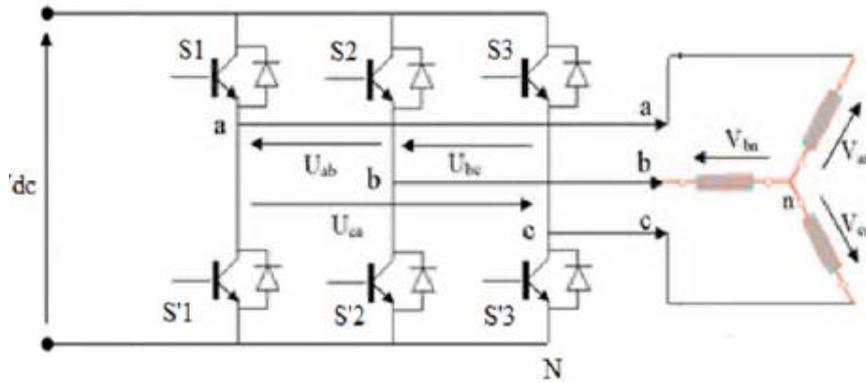


Figure II.9: Schéma d'un onduleur triphasé.

Pour exprimer les tensions en ligne en fonction de la tension d'entrée continue et de l'état des commutateurs, on définit les variables (S_a, S_b, S_c) en fonction de l'état des commutations des interrupteurs des trois bras de l'onduleur. Quand ces interrupteurs étant fermés, ceux-ci imposent des tensions entre les bornes de sortie a, b, c et le point \circ (neutre fictif):

- Bras 1 (S_a)

Si $S_a=1$, Alors S1 est passant et S'1 est ouvert

Si $S_a=0$, Alors S1 est ouvert et S'1 est passant

- Bras 2 (S_b)

Si $S_b=1$, Alors S2 est passant et S'2 est ouvert

Si $S_b=0$, Alors S2 est ouvert et S'2 est passant

- Bras 3 (S_c)

Si $S_c =1$, Alors S3 est passant et S'3 est ouvert

Si $S_c=0$, Alors S3 est ouvert et S'3 est passant

- **Equations de tensions**

Les tensions composées sont obtenues à partir des sorties de l'onduleur :

$$\left. \begin{aligned} V_{aN} &= V_{dc} \cdot S_a \\ V_{bN} &= V_{dc} \cdot S_b \\ V_{cN} &= V_{dc} \cdot S_c \end{aligned} \right\} \quad \text{(II.25)}$$

$$\begin{bmatrix} V_{aN} \\ V_{bN} \\ V_{cN} \end{bmatrix} = V_{dc} \cdot \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad \text{(II.26)}$$

$$V_{ab} + V_{bc} = 0 \quad \Longrightarrow \quad V_{ac} = - V_{bc} \quad \text{(II.27)}$$

$$V_{ac} + V_{ca} = 0 \quad \Longrightarrow \quad V_{ac} = - V_{ca} \quad \text{(II.28)}$$

Si le système est équilibré:

$$V_{an} + V_{bn} + V_{cn} = 0 \quad (\text{II.29})$$

$$V_{an} - V_{bn} + V_{bN} - V_{aN} = 0 \quad (\text{II.30})$$

$$V_{an} - V_{cn} + V_{cN} - V_{aN} = 0$$

$$2V_{an} - 2V_{aN} - V_{bn} - V_{cN} + V_{bN} + V_{cN} = 0 \quad (\text{II.31})$$

$$3V_{an} = 2V_{aN} - V_{bn} - V_{cN} \quad (\text{II.32})$$

On remplace (II.27) dans (II.39), il vient:

$$3V_{an} = V_{dc} [2S_a - S_b - S_c] \quad \Longrightarrow \quad V_{an} = \frac{1}{3} V_{dc} [2S_a - S_b - S_c] \quad (\text{II.33})$$

Les tensions simples:

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} V_{dc} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.34})$$

Les tensions composées:

$$V_{ab} = V_{aN} - V_{bN} \quad (\text{II.35})$$

$$V_{bn} = V_{dc} (S_a - S_b) \quad (\text{II.36})$$

$$V_{bc} = V_{bN} - V_{cN} \quad (\text{II.37})$$

$$V_{bc} = V_{dc} (S_b - S_c) \quad (\text{II.38})$$

$$V_{ca} = V_{cN} - V_{aN} \quad (\text{II.39})$$

$$V_{ca} = V_{dc} (S_c - S_a) \quad (\text{II.40})$$

II.7.4 Les Techniques de commande de l'onduleur triphasée :

- ✓ Commande par modulation sinus – triangle.
- ✓ Commande par M.L.I Vectorielle « Space Vector Modulation S.V.M » La MLI Vectorielle.
- ✓ Commande pleine onde.
- ✓ Commande décalée.

II.7.5 Généralités sur les MLI :

Le choix d'une technique dépend du type de machine à commander, de la gamme de puissance, des semi-conducteurs utilisés pour l'onduleur et de la simplicité d'implantation de l'algorithme. Ce sont finalement des critères de coût et de performance qui vont déterminer ce choix. Les critères de performances permettent d'évaluer et de comparer les qualités des différentes techniques de MLI. [14] [15]

II.7.5.1 Objectif de la technique MLI :

Les objectifs principaux d'une **MLI** sont les suivants:

- Obtenir dans la charge électrique des courants dont la variation est proche de la sinusoïdale par le contrôle de l'évolution des rapports cycliques et grâce à une fréquence élevée des commutations des interrupteurs par rapport à la fréquence des tensions de sortie.
- Imposer à l'entrée de l'onduleur un courant de type continu avec des composantes alternatives d'amplitudes réduites et de fréquences élevées.
- Permettre un contrôle fin de l'amplitude du fondamentale des tensions de sortie généralement sur la plus grande plage possible et pour une fréquence de sorties larges variables.

Les paramètres essentiels de **MLI** sont par conséquent:

- La fréquence de modulation : f_m ;
- L'indice de modulation: $m = f_m / f_s$

Où f_s est la fréquence des fondamentaux des grandeurs de sortie de l'onduleur;

- Coefficient de réglage:

$$r = \frac{\text{valeur crête du fondamental de la tension de charge souhaitée}}{\text{Amplitude des créneaux de la tension de sortie}}$$

On cherche généralement à obtenir une valeur maximale de " r " la plus élevée possible.

II.8 Alimentation de la MAS par un onduleur de tension à MLI sinus- triangulaire

Dans cette partie nous associons la MAS avec l'onduleur de tension commandé par la technique MLI.

Les conditions de simulation sont :

- Le réseau électrique est de tension 230/400V, $f_s = 50\text{Hz}$
- Après un fonctionnement à vide pendant 1 s , nous appliquons un couple de charge

de 11 N.m .

- Schéma de simulation avec un onduleur de tension à MLI sinus- triangulaire

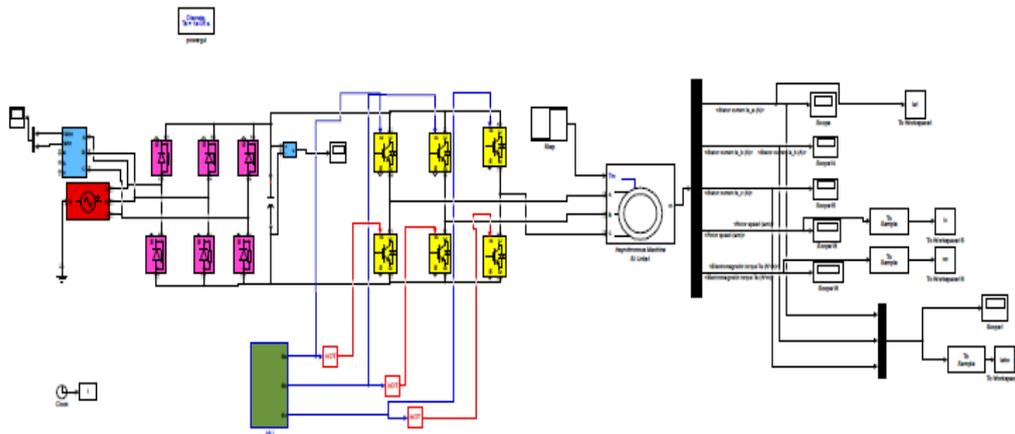
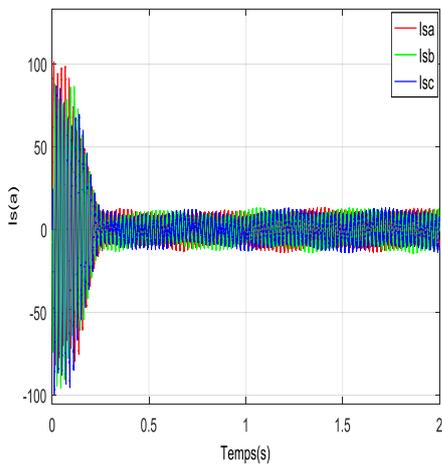


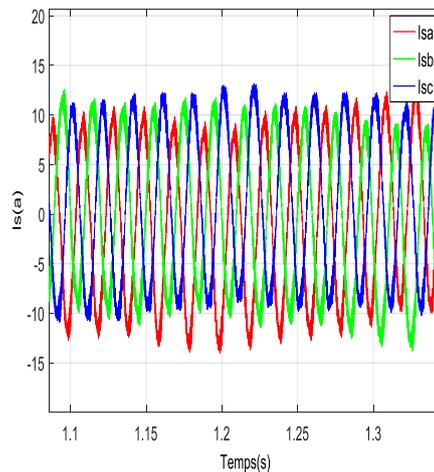
Figure II.10: Schéma bloc global de simulation

- Résultats obtenues :

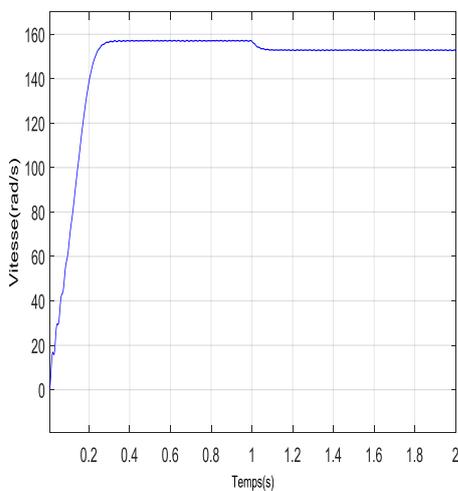
Les résultats obtenus sont représenté dans la figure (II.7)



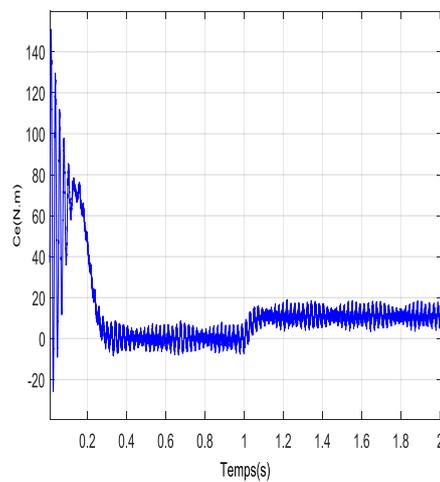
a) Les courants statoriques



b) Zoom des courants statoriques



c) La vitesse de rotation



d) Le couple électromagnétique

Figure II.11 : Réponses de la machine asynchrone alimentée par un onduleur de tension, avec l'application d'un couple de charge $C_r=11N.m$ à $t=1 s$

- **Interprétation des résultats :**

Lors du démarrage, on constate des pics de courants importants qui s'atténuent avec l'évolution du régime transitoire, ainsi que la forme du courant statorique est presque sinusoïdale.

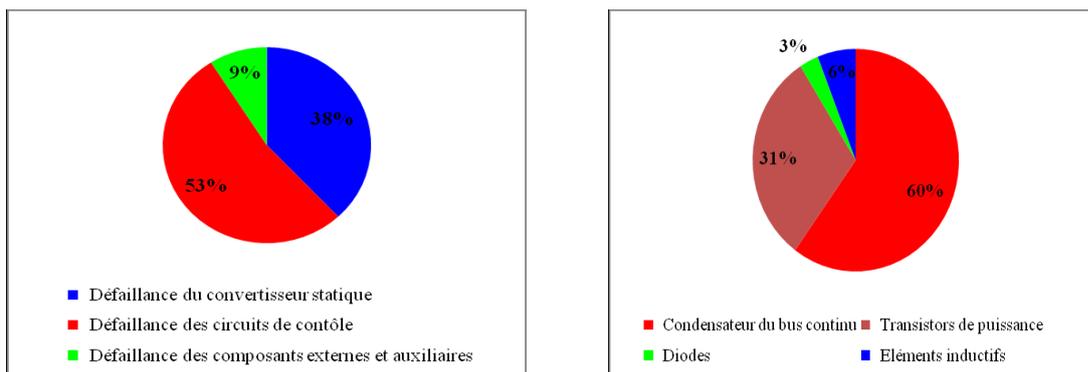
La courbe de la vitesse présente un accroissement linéaire, après un temps d'environ 0.2 s, après il se stabilise à 153 rad/s (vitesse nominale).

L'application d'un couple de charge de 11 N.m à l'instant $t=1$ s, introduit une diminution de la vitesse de rotation (une chute de vitesse de 4.26%), cela apparait un fort appel de courant qui est nécessaire à développer un couple pour la machine, et donc un mouvement de rotation sur son arbre, ce qui donne une augmentation des courants et de couple qui rejoignent après un régime transitoire la valeur qui compense le couple résistant (11 N.m) appliqué.

II.9. Analyse des défauts du convertisseur statique

II.9.1. Statistiques des défauts convertisseurs

Les deux diagrammes de la figure II.12 montrent que plus de 90% des défaillances sont du fait du convertisseur lui-même ou des circuits de contrôle. Pour les composants du convertisseur statique, les condensateurs et les transistors sont les éléments qui subissent le plus de défaillances. La difficulté majeure rencontrée dans le diagnostic des défauts dans les composants d'électronique de puissance est la difficulté d'établir un modèle mathématique suffisamment représentatif du composant ou du convertisseur et de suffisamment d'informations ou des mesures on ligne (pendant le fonctionnement du convertisseur) [16].



(a): Taux de défaillance dans la chaîne de conversion d'énergie

(b) : Taux de défaillance des composants du convertisseur statique

Figure II.12 : Statistiques des défaillances dans les chaînes de conversion d'énergie

Les défauts de l'onduleur consistent essentiellement dans le fonctionnement defectueux des composants de puissance et de la commande des semi-conducteurs.

Dans cette section, nous analysons les conséquences des défauts circuit-ouvert et court-circuit d'un interrupteur électronique au niveau de l'onduleur sur les grandeurs électriques et mécaniques de l'association (MAS + onduleur).

Pour cela nous nous appuyons sur les résultats de la simulation numérique d'une MAS triphasée alimentée par un onduleur de tension triphasé à deux niveaux commandé en MLI sinus-triangulaire. Les tests de simulation numérique sont réalisés sur Matlab/Simulink qui nous a permis de créer de multiples scénarios de défauts (possibilité des cascades de défauts de même nature ou différent).

Signalons aussi qu'un défaut dans un onduleur (circuit-ouvert ou court-circuit) alimentant une machine asynchrone peut provoquer des conséquences importantes sur le plan mécanique : l'ondulation du couple et de la vitesse amènent des vibrations indésirables et des bruits sonores gênants.

II.9.2. Etude de défauts de type circuit-ouvert

II.9.2.1. Configuration de défauts circuit-ouvert

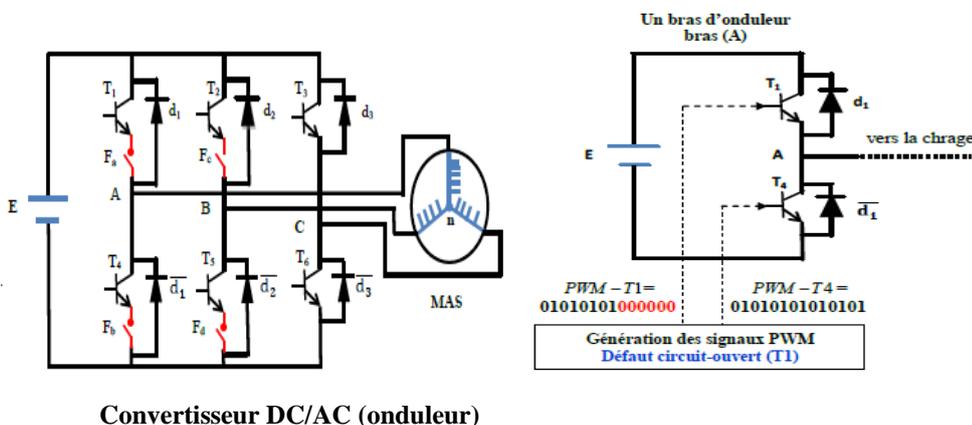
Il existe de multiple cas de défaut circuit ouvert (C-O), nous présenterons l'essentiel de ces défauts, on note ,[24]:

- **DF1** : défauts d'ouvertures des deux interrupteurs du bras **A** ($F_a \wedge F_b$).
- **DF2** : défauts d'ouvertures des deux interrupteurs du bras **B** ($F_c \wedge F_d$).

D'une manière générale, le régime de défaut de circuit-ouvert pour n'importe quel mode est obtenu par le blocage de l'IGBT du bras de la phase concernée par le défaut à l'état ouvert ($S_i=0$).

Les résultats obtenus pendant l'application des différents défauts (DF1, DF2,) sont présentés dans le but de comprendre et de connaître les conséquences de ces défauts sur les grandeurs électriques (courants) et mécaniques (vitesse et couple).

La figure (II.13) présente le principe d'application d'un défaut de circuit-ouvert appliqué sur le convertisseur statique.



Convertisseur DC/AC (onduleur)

Figure II.13 : Schéma synoptique pour la création de défauts interrupteurs (circuit-ouvert)

II.9.2.2. Résultat de simulation de défauts circuit-ouvert (C-O)

Dans cette partie nous proposons une simulation de l'ensemble (MAS + onduleur) avec application du couple de charge, le but est de comprendre et de connaître les conséquences de présence d'un défaut circuit-ouvert (C-O) sur les grandeurs électriques (courants) et mécaniques (vitesse et couple). Pour cela nous allons met en évidence l'application de couple ($C_r=11 \text{ N.m}$). En effet l'analyse de comportement du système sain (MAS + onduleur) avec l'application d'un couple de charge est déjà étudiée, donc dans la suite on s'intéresse à l'analyse de comportement du système en présence du défaut de convertisseur statique.

Les défauts appliqués (C-O) sont limités seulement sur un ou deux bras (A ou B), et on généralise l'analyse sur les autres bras, car on considère que les mêmes phénomènes se reproduisent. Les figures (II.14 ,II.15) représentent respectivement l'effet d'un défaut de (C-O) des interrupteurs du bras A :T1 et T4sur les différentes grandeurs (courante, vitesse, couple...).

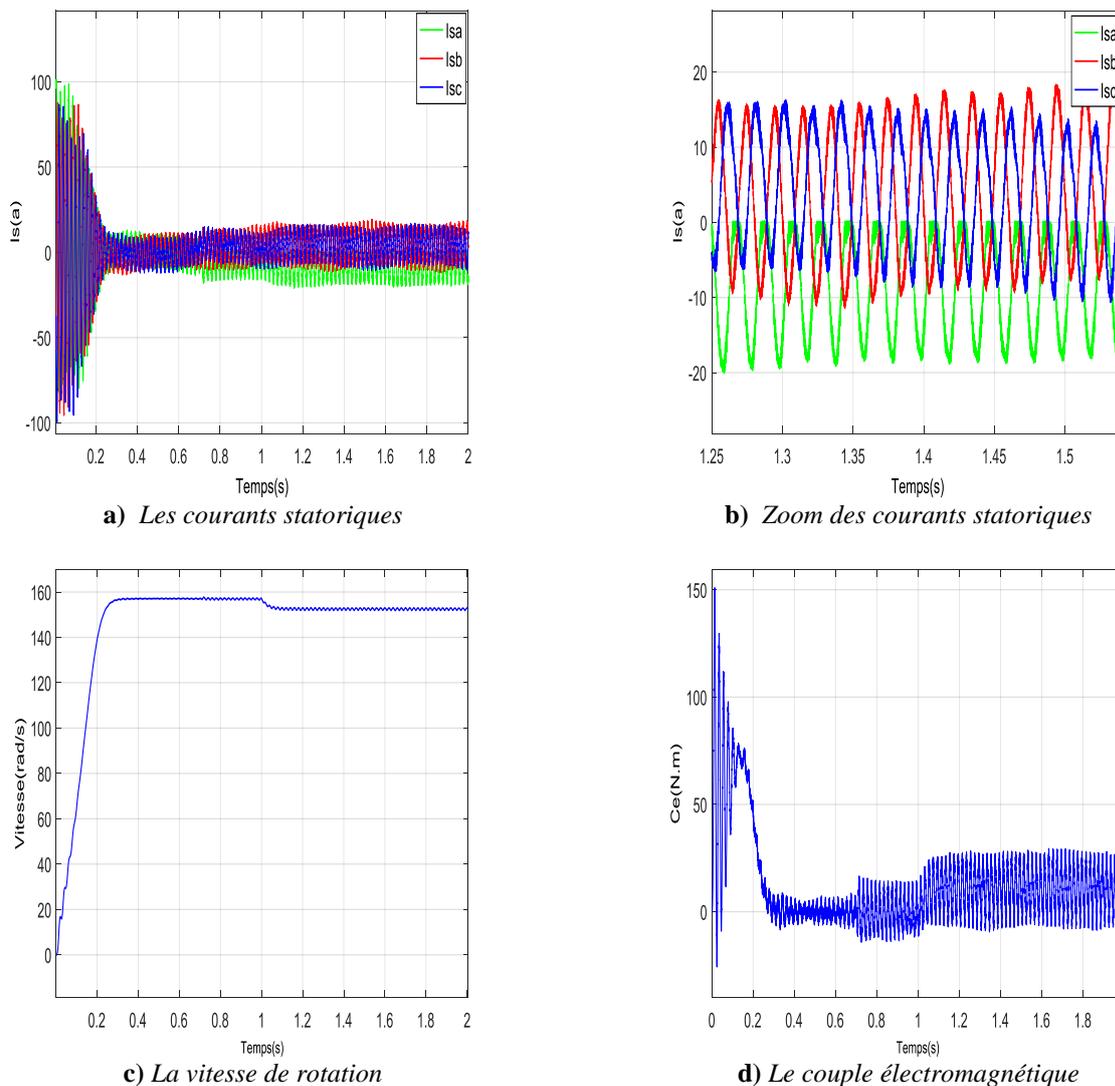
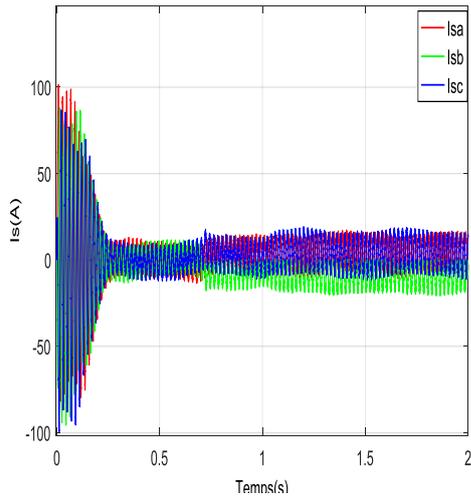
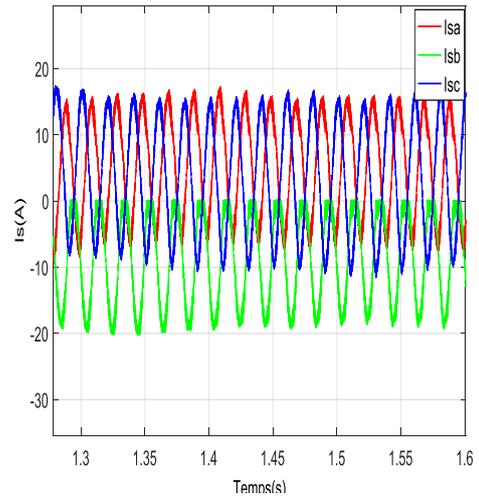


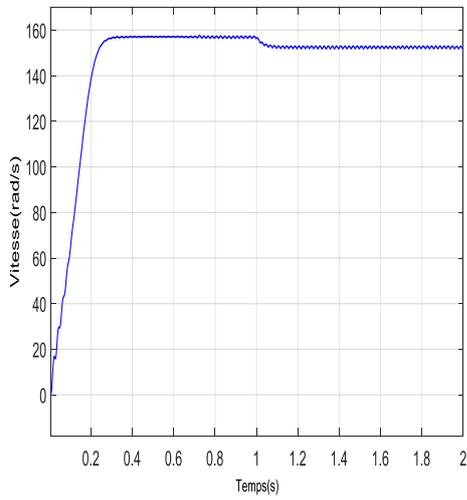
Figure II.14 : Défaut sur l'interrupteur T1 du bras 'A' avec un couple de charge $C_r=11 \text{ N.m}$



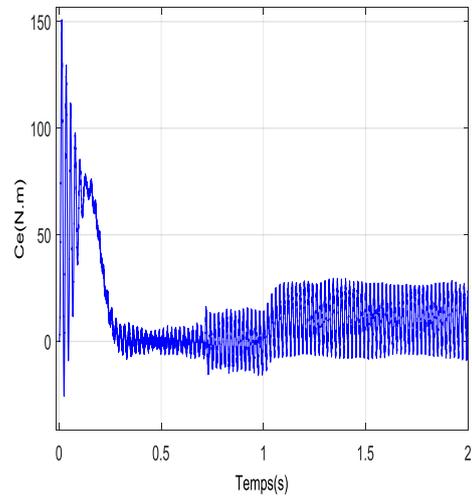
a) Les courants statoriques



b) Zoom des courants statoriques



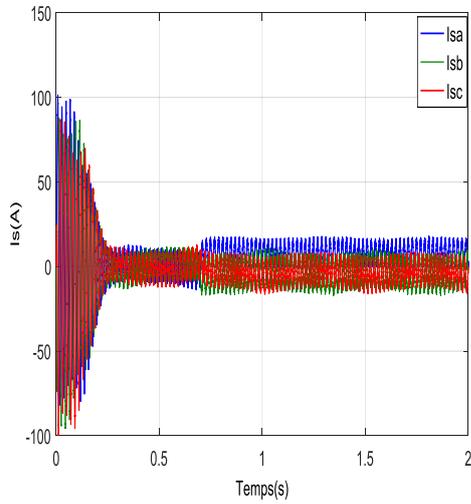
c) La vitesse de rotation



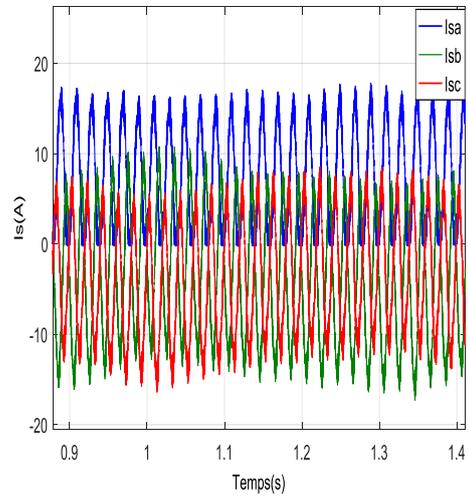
d) Le couple électromagnétique

Figure II.15 : Défaut sur l'interrupteur T2 du bras 'B avec un couple de charge $C_r=11$ N.m

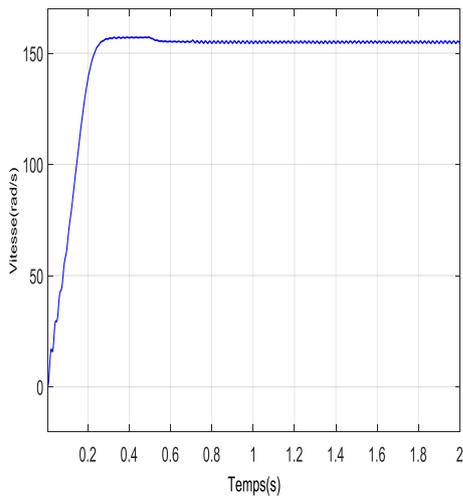
Les figures (II.16 ,II.17) représentent respectivement l'effet d'un défaut de (C-O) des interrupteurs du bras A :T2 et T5 sur les différentes grandeurs (courante, vitesse, couple...).



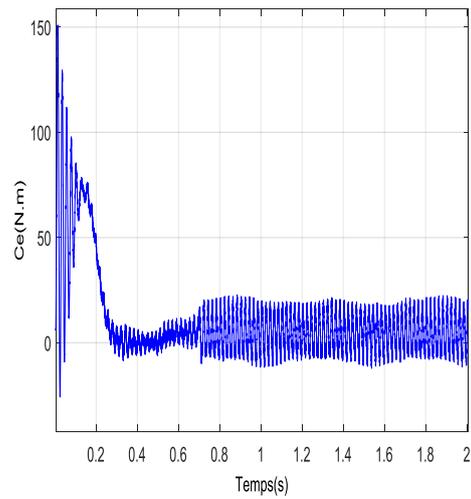
a) Les courants statoriques



b) Zoom des courants statoriques

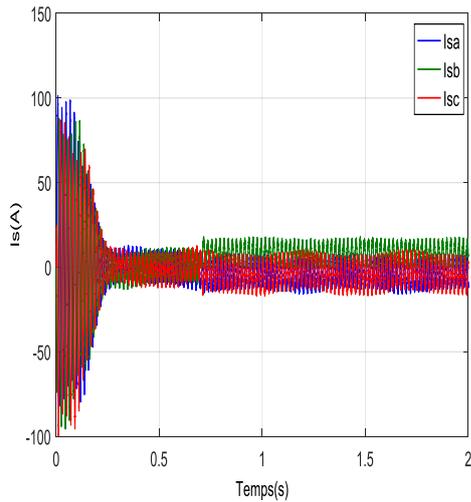


c) La vitesse de rotation

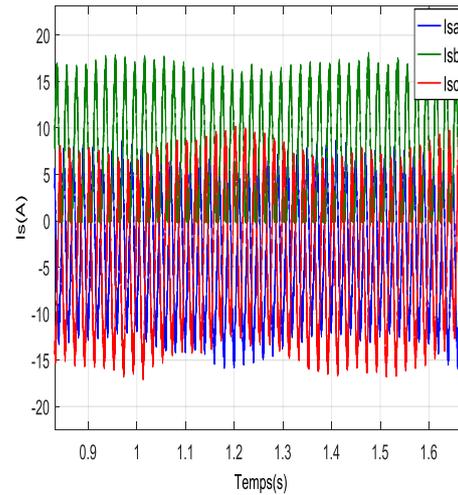


d) Le couple électromagnétique

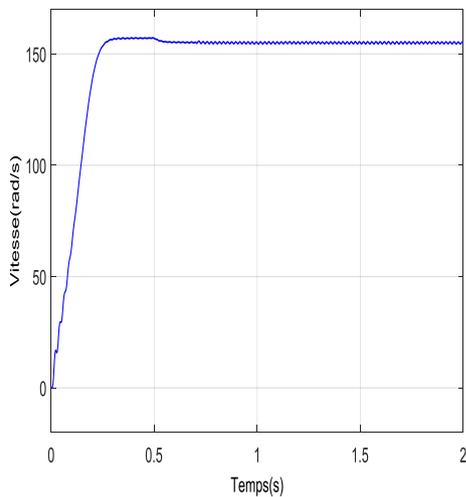
Figure II.16 : Défaut sur l'interrupteur T4 du bras 'A' avec un couple de charge $C_r=11$ N.m



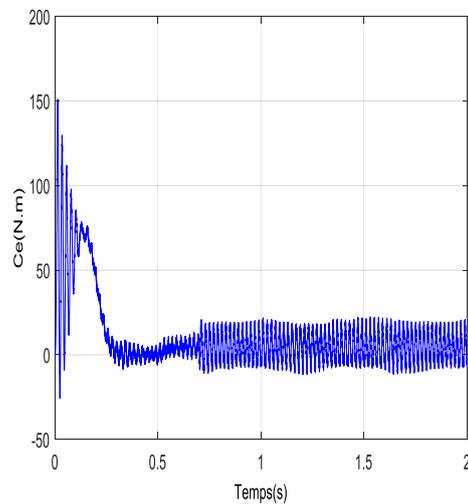
a) Les courants statoriques



b) Zoom des courants statoriques



c) La vitesse de rotation



d) Le couple électromagnétique

Figure II.17 : Défaut sur l'interrupteur T5 du bras 'B' avec un couple de charge $C_r=11 \text{ N.m}$

- **Interprétation des résultats**

Ce type de défaut consiste à la mise en ouverture de l'un des interrupteurs de bras A ou B (T_1 ou T_4) \wedge (T_2 ou T_5), cela conduit à éliminer l'alternance positive ou négative du courant de phase du bras lié à l'interrupteur défectueux. Ce défaut provoque des perturbations dans le système (changement de fonctionnement).

L'onde de courants est déformée, ce qui introduit des pertes électriques à cause des harmoniques qu'il contient, les courants des deux autres phases, prennent des valeurs instantanément élevées pour maintenir le couple moyen et donc la vitesse.

II.9.3. Etude de défauts de type court-circuit

II.9.3.1. Configuration de défauts court-circuit

Il existe aussi plusieurs scénarios de défaut court-circuit, on s'intéresse au court-circuit d'un seul interrupteur du bras 'A' .

Le régime de défaut court-circuit se produit lorsqu'un des composants d'une cellule de commutation (IGBT) reste constamment fermé ($S_i=1$) figure (II.18).

La validation de la première approche pour l'analyse de défaut C-C est faite en utilisant Matlab/Simulink, car la mise en pratique de ce type de défaut nécessite certains dispositifs de protection pour éviter l'endommagement des interrupteurs (IGBT) et leurs commandes.

La figure (II.16) présente le principe d'application d'un défaut de court-circuit appliqué sur l'un des interrupteurs du bras 'A' .

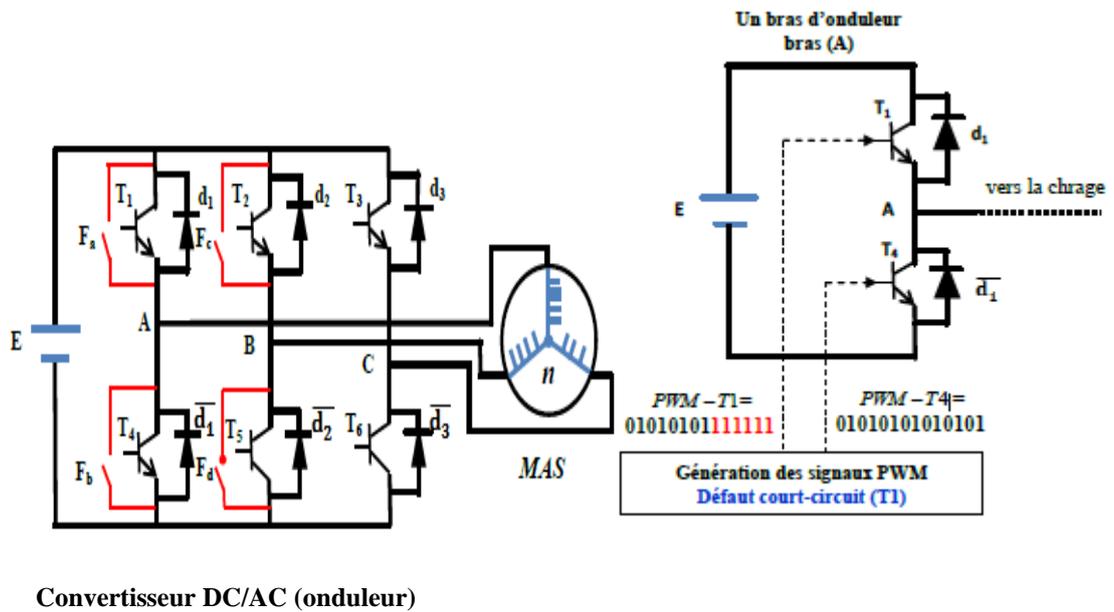
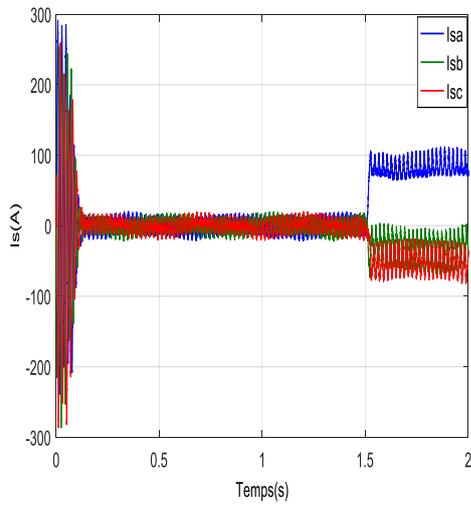
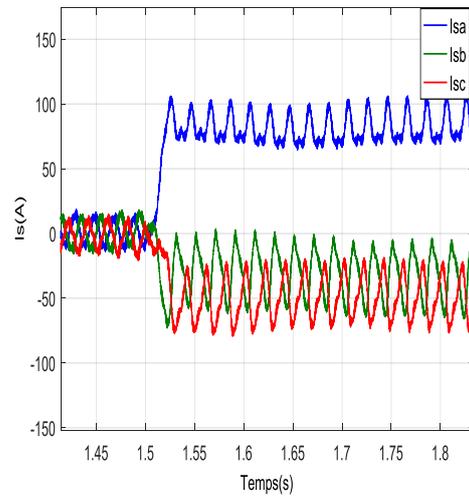


Figure II.18 : Schéma synoptique pour création de défauts interrupteurs (court-circuit)

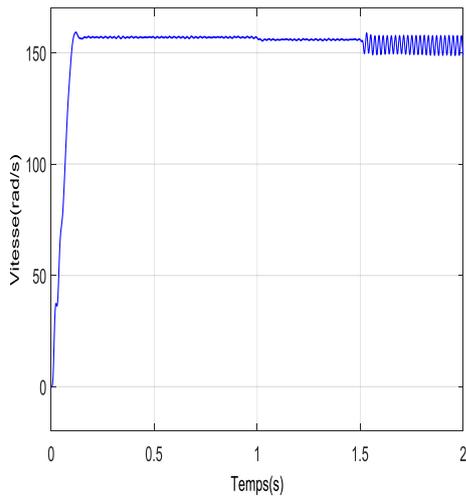
Les résultats de simulation pour ce type de défaut (C-C) sont présentés dans les figures ci-après



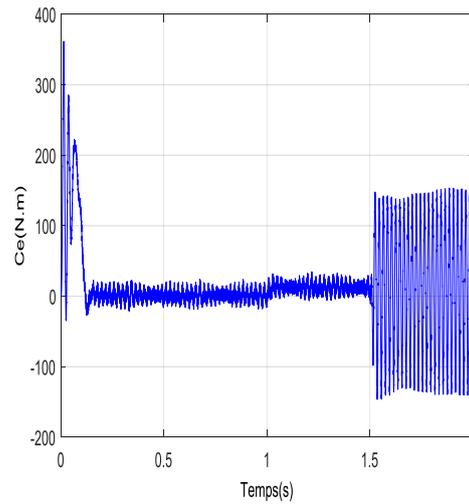
a) Les courants statoriques



b) Zoom des courants statoriques



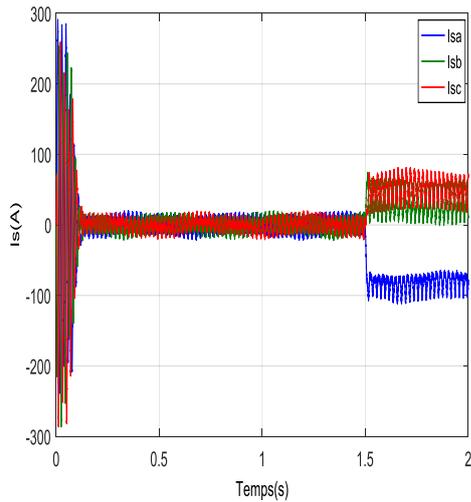
c) La vitesse de rotation



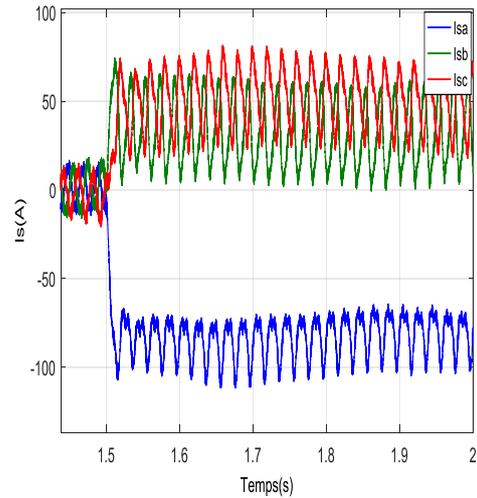
d) Le couple électromagnétique

Figure II.19 : Défaut de court-circuit sur l' interrupteur T1 du bras 'A' avec un couple de charge

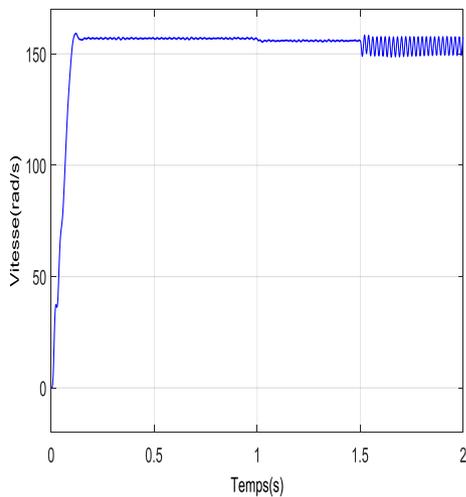
Cr=20 N.m



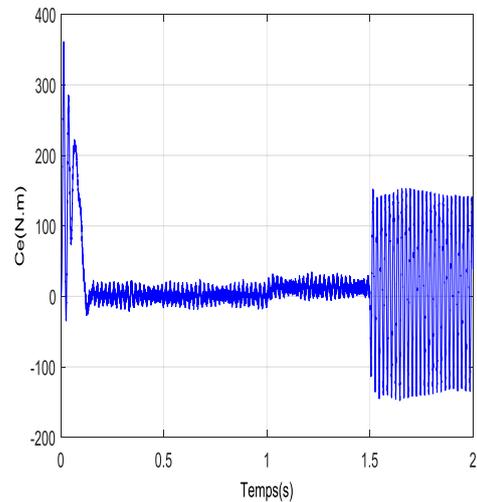
a) Les courants statoriques



b) Zoom des courants statoriques



c) La vitesse de rotation



d) Le couple électromagnétique

Figure II.20 : Défaut de court-circuit sur l' interrupteur T4 du bras 'A' avec un couple de charge

$$Cr=20 \text{ N.m}$$

Défaut de court-circuit : Ce défaut consiste à la mise en états fermé de l'un des interrupteurs du bras 'A' (T1 et T4), Nous constatons que ce type de défaut provoque un fonctionnement perturbé et instable du système en raison du changement du mode de fonctionnement pendant l'application du défaut. En effet le courant de la phase défectueuse ne peut plus être contrôlé car il augmente à des niveaux intolérables.

Les courants de phases deviennent fortement déséquilibrés et leurs amplitudes peuvent atteindre à des valeurs très supérieurs au courant normal.

Les grandeurs mécaniques (couple, vitesse) comportent également de très fortes ondulations. Ce qui risque d'endommager les autres composants, et met en danger le fonctionnement du système en présence de ce type de défaut.

A partir des résultats obtenues par voie de simulation nous montrerons que l'effet de défauts court-circuit avec l'application de couple de charge ($Cr=11 \text{ N.m}$) peut introduire des ondulations au niveau de la vitesse dans l'intervalle de l'apparition du défaut [1.5 : 2.5] s, et l'augmentation de l'amplitude du couple.

II.10 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté un modèle externe de simulation de la machine asynchrone à cage en régime sain, dit modèle triphasé-triphasé. Ce modèle consiste à modéliser les trois phases statoriques ce qui permet de différencier le comportement de chaque phase. Les enroulements rotoriques sont représentés par trois phases également. Cette modélisation consiste à la résolution numérique du système d'équation différentielle.

La particularité de ce modèle réside dans l'utilisation des paramètres réels de la machine sans passer par la transformation de Park ce qui permet de discriminer un comportement défectueux d'un comportement dû à un fonctionnement normal de la machine.

Dans notre étude deux types de défauts ont été considérés : le défaut circuit-ouvert et le défaut court-circuit. Pour cela nous avons créé des scénarios de défauts interrupteurs afin d'analyser les conséquences de ces défauts et voir le comportement de la machine à partir des réponses du système (courants, vitesse, couple...).

Les résultats de simulations montrent le degré de danger de défauts type court-circuit par rapport au défaut de type circuit-ouvert (augmentation très rapide du courant de charge, ondulations importantes au niveau couple...)

Chapitre III

Commande tolérante aux défauts

III.1 Introduction

Un système tolérant aux défauts possède la capacité de maintenir les objectifs nominaux en dépit de l'occurrence d'un défaut et à s'en accommoder de manière automatique. Il permet notamment de garantir la stabilité du système et/ou des performances dégradées acceptables en présence de défauts. Un conventionnel gain de retour d'état peut s'avérer très limité et amener le système vers des comportements non désirés, voire à l'instabilité, en présence d'un défaut.

Pour pallier de telles catastrophes, de nouvelles lois de commande ont été développées dans le but précis de maintenir les performances du système ainsi que sa stabilité, lors d'un mauvais fonctionnement du système. Dans le domaine industriel ou en aéronautique, ce type de problèmes a été souvent évité en se fondant sur de la redondance matérielle à base d'actionneurs et de capteurs. Cette stratégie est non seulement onéreuse mais elle requiert aussi un important dispositif de maintenance. Ainsi, la commande tolérante aux défauts traitée de manière analytique, permet d'éviter de tels coûts d'achat et d'entretien.

III.2 Classification de la commande tolérante aux défauts

La commande tolérante aux défauts est généralement classée en deux approches distinctes : une approche passive (Passive FaultTolerant Control, PFTC) et une approche active (Active Fault Tolerant Control, AFTC). La Figure(III.01) permet de classifier de manière plus précise les diverses méthodes de commande tolérante aux défauts.

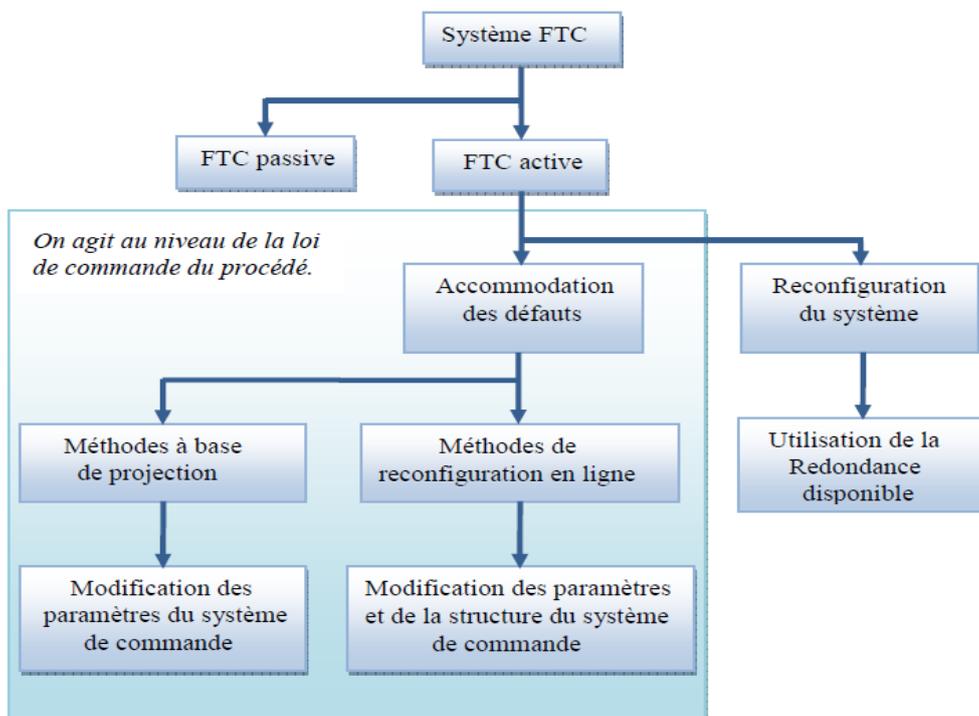


Figure III.1 : Classification des approches FTC

➤ **Méthodes FTC passives**

Dans le cadre de la première approche, les régulateurs sont synthétisés de façon à être robuste à certains défauts. L'idée principale est de faire en sorte que le système en boucle fermée (BF) soit robuste aux incertitudes et à quelques défauts spécifiques. Cette approche ne nécessite aucun schéma de détection de défauts ni aucune reconfiguration de loi de commande mais sa capacité de tolérance reste restreinte à quelques défauts. Cette approche ne nécessite aucun schéma de détection de défauts ni aucune reconfiguration de loi de commande est donc du point de vue calcul plus attractive. Mais son applicabilité est très limitée à cause de ses désavantages:

1. Les défauts sont alors pris en compte dans la conception du système de commande. Le contrôleur est donc robuste aux défauts prescrits (sa capacité de tolérance reste restreinte à quelques défauts).
2. Assurer la robustesse vis à vis des défauts, ne peut se faire sans réduire les performances nominales du système. Comme les défauts sont des phénomènes qui arrivent rarement, il n'est pas raisonnable de dégrader les performances nominales du système pour un ensemble très réduit de défauts.
3. Dans des conditions pratiques, l'utilisation seule de la commande robuste peut être risquée. Comme un régulateur inintelligent, sans utilisation de module de diagnostic et sans connaissance sur l'occurrence de défaut (sa sévérité, sa localisation, . . .), le système passif a alors une faible capacité de tolérance aux défauts.

➤ **Méthodes FTC active**

A l'opposé de la voie passive, l'AFTC est amenée à réagir aux diverses défaillances du système en reconfigurant les lois de commande tout en préservant la stabilité et les performances de celui-ci. La Figure(III.02)présente un schéma typique de systèmes de commande tolérante aux défauts,avec 4 principaux composants : un bloc de diagnostic de défauts (en anglais FaultDetection and Diagnosis, FDD) donnant des informations en temps réel, un mécanisme de reconfiguration, un régulateur reconfigurable et une référence appliquée au système. Dans le schéma de FDD, les paramètres en défaut ainsi que les variables d'état du système doivent être estimés en ligne. Ce schéma de FDD doit permettre de prendre en compte les différents types de défauts intervenant sur le système et d'assurer la fiabilité de ses informations pour activer le mécanisme de reconfiguration en un temps minimal. A partir de cette information en ligne produite par le module de FDD, le régulateur reconfigurable doit être synthétisé automatiquement pour maintenir la stabilité, la dynamique du système ainsi que ses performances initiales. De plus, afin d'assurer que le système en boucle fermée soit capable de suivre la commande de référence/trajectoire spécifiée même en présence de défauts, un régulateur "feedforward" reconfigurable doit pouvoir être synthétisé pour

réaliser un asservissement. Dans le cas de dégradation de performances du système, la commande de référence doit permettre d'ajuster l'entrée de commande ou la trajectoire de référence automatiquement ou informer les opérateurs humains de la présence de défauts. Grâce à leurs meilleures performances et leur capacité de traiter une large classe de défauts, les méthodes FTC actives sont plus développées dans la littérature que les méthodes passives.

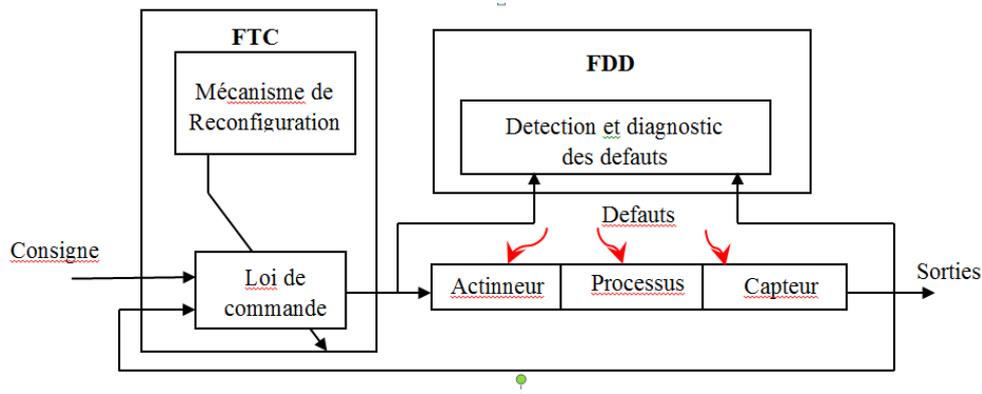


Figure III.2 : schéma de principe d'une loi de commande FTC active

III.3 Importance de la commande tolérante aux défauts

Nominaux en dépit de l'occurrence d'un défaut et s'adapter de manière automatique. Il permet notamment de garantir la stabilité du système et/ou des performances acceptables en présence de défauts. Dans les applications industrielles critiques telles que l'aéronautique ou le nucléaire, le problème de la tolérance aux défauts est souvent traité au moyen de la redondance matérielle. Cette stratégie est non seulement onéreuse, mais elle requiert également un important dispositif de maintenance. Ainsi, la commande tolérante aux défauts abordée par des approches analytiques, permet d'éviter des coûts élevés d'investissement et d'entretien.

Par conséquent, la tâche principale qui incombe à la commande tolérante aux défauts est de synthétiser des lois de commande avec une structure appropriée permettant de garantir la stabilité et les performances du système, non seulement lorsque tous les composants de la commande sont opérationnels, mais aussi lorsqu'un ou plusieurs composants sont défectueux (mode dégradé).

On peut dire que la commande tolérante aux défauts peut s'intégrer à la commande comme une réaction contre les défauts, ou bien, comme une autre condition considérée à l'avance comme la pire situation de fonctionnement et prise en compte lors de l'étape de conception d'un système.

III.4 Modes de défaut du convertisseur

Un défaut (ou une imperfection) est caractérisé par une altération du fonctionnement partielle ou globale, temporaire ou permanente, pouvant être réparable ou corrigée tant que l'intégrité des composants n'en est pas affectée. Au sein de l'onduleur, les défauts les plus communs et les plus critiques

concernent majoritairement la commande des transistors. À l'inverse, une défaillance traduit la perte irréversible du fonctionnement d'un composant. Elle peut résulter d'une dégradation causée par une contrainte électrique, thermique ou mécanique trop forte ; son origine peut être interne et liée au fonctionnement même, ou externe et liée à l'environnement ou à un usage hors spécification [17]. En particulier, un défaut de commande répété peut induire la défaillance d'un transistor.

Cette partie décrit différentes topologies d'onduleur reconfigurables compatibles avec l'approche de module de conversion générique [29].

III.5 Défauts et défaillances internes à l'onduleur

➤ Défaillance de type "haute impédance" d'un transistor

Le maintien à l'état ouvert d'un transistor, dû par exemple à une défaillance de grille, entraîne une perte de réversibilité en courant de l'interrupteur et se manifeste en mode onduleur par la perte d'une alternance du courant de phase, qui est alors unipolaire et non sinusoïdal. Ainsi, dans le cas où le transistor supérieur d'une cellule reste ouvert (figure III.03) et que le courant dans la phase correspondante est positif, la phase de la MAS reste connectée au potentiel négatif du bus par la diode du bas. La distorsion importante des courants se traduit par une puissance fluctuante significative et elle implique, pour une même puissance mécanique fournie, une augmentation du courant efficace par rapport au régime normal puisque les harmoniques résultants ne génèrent que des pertes.

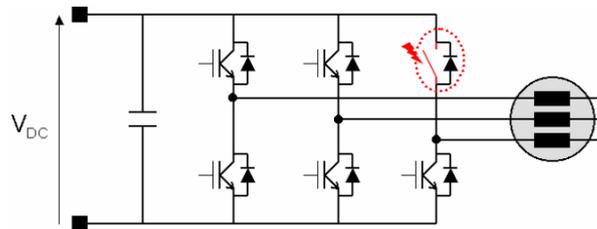


Figure III.3: Défaillance de type haute impédance d'un transistor

➤ Défaillance de type "haute impédance" des deux transistors d'une cellule de commutation 'circuit ouvert'

Ce mode de défaut correspond à la perte de la commande d'un bras, ses deux transistors restant ouverts. La phase n'est plus connectée qu'à travers les diodes antiparallèles de la cellule de commutation (Figure III.04) ; la conduction spontanée d'une des diodes du bras en défaut dépend des forces électromotrices développées par la machine et des commandes des bras restants. La dégradation des formes d'onde des courants est encore accrue par rapport au cas précédent (Figure III.04). Le courant dans la phase concernée est assez faible, voire quasiment nul, selon la

commande effectuée et les courants dans les phases saines ont leurs fondamentaux en opposition de phase : ce mode de défaut est donc assez semblable au cas de l'ouverture d'une phase de la machine. Le couple présente une ondulation à fréquence double de la fréquence électrique dont l'amplitude est encore supérieure à celle du mode de défaut précédent.

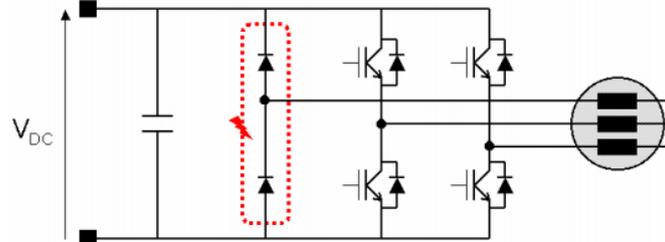


Figure III.4 : Défaillance de type haute impédance des deux transistors d'un bras

➤ **Défaillance de type "haute impédance" de l'ensemble des transistors**

Ce mode de défaut correspond en particulier à la perte de la commande du convertisseur. S'il survient dans la plage de fonctionnement à couple constant de l'actionneur, les courants s'annulent et le couple électromagnétique également, à condition que la tension continue reste imposé par le réseau.

➤ **Défaillance de type "basse impédance" d'un transistor **circuit Ferme****

Une défaillance physique ou une imperfection de commande d'un transistor résultant en un état de basse impédance est nettement plus critique car la cellule de commutation se trouve court-circuitée. S'il s'agit d'un défaut de commande, le courant dans les transistors augmente jusqu'à la désaturation de l'un d'entre eux (en quelques dizaines de nanosecondes) puis la fusion de la puce ou de sa connectique. Ce transistor se trouve alors définitivement en état de faible impédance. Sans intervention, le transistor encore actif subit le même phénomène et la cellule est définitivement court-circuitée.

Après une défaillance de type basse impédance d'un transistor, le transistor adjacent doit donc être bloqué : le défaut de bras est de type basse impédance asymétrique. Le courant dans la phase du bras en défaut devient incontrôlable car il existe deux chemins de court-circuit avec les diodes antiparallèles de même niveau que le transistor défaillant (Figure III.05).

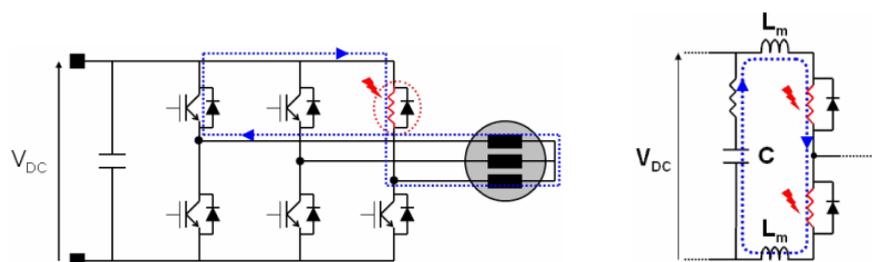


Figure III.5 : défaut de court-circuit

➤ Défaut asymétrique croisé

Ce mode de défaut résulte de la défaillance de type "basse impédance" de deux transistors de niveaux différents. Ce cas de panne double est mentionné car il s'agit de la situation menant aux amplitudes de courant et de couple les plus élevées. Même si une continuité de fonctionnement n'est pas envisagée, l'intérêt du confinement du défaut est évident.

III.6 Défauts externes à l'onduleur

Cette partie constitue une étude des défauts externes à l'onduleur, seuls les plus représentatifs pour cette étude sont décrits afin d'évaluer les éventuels bénéfices fonctionnels d'un onduleur à tolérance de panne. En effet, même lorsque la continuité de service n'est plus possible, la capacité d'isolement peut encore être mise à profit.

➤ Défaut de court-circuit du bus continu

Ses causes peuvent être diverses (défauts de connectique, défaillance d'un condensateur, des diodes du redresseur, etc.) (Figure III.06) et les conséquences sont semblables à celles d'un court-circuit de bras d'onduleur. Au niveau du réseau alternatif, les contacteurs de l'actionneur assurent l'isolement pour ne pas mettre en défaut la génération. Au niveau de l'ensemble onduleur-machine, la commande n'agit plus puisqu'aucune tension ne peut être appliquée aux phases de la machine.

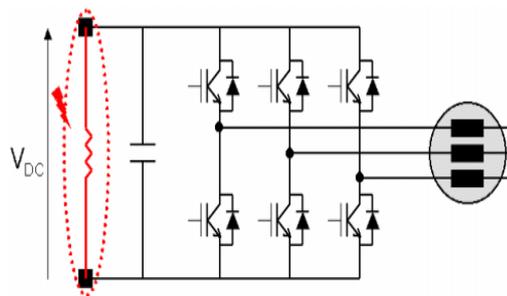


Figure III.6 : Défaut de court-circuit du bus continu

➤ Défaut d'isolement d'une phase

Les défauts affectant le stator ou le rotor peuvent résulter en l'ouverture d'une phase, un court-circuit partiel ou complet entre phases, un court-circuit avec la masse ou un défaut de roulement.

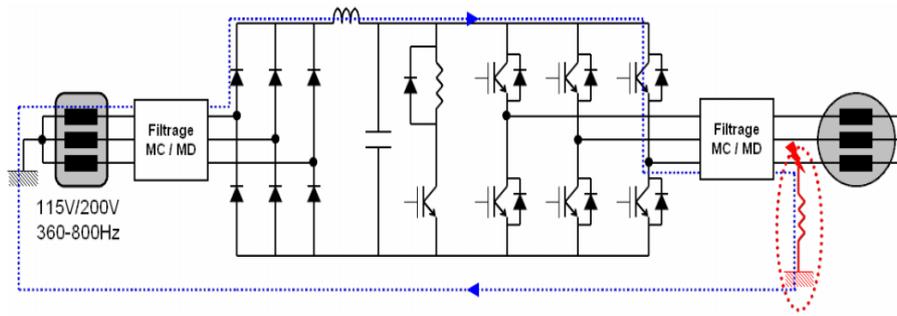


Figure III. 7 : Défaut d'isolement d'une phase

III.7 Isolement électrique des défauts

La partie précédente a mis en évidence les contraintes résultant de différents modes de défaut. En particulier, dans certains cas de court-circuit, le blocage des transistors n'est pas suffisant pour isoler électriquement l'ensemble onduleur-machine puisque la rotation des aimants de la machine entretient le régime de défaut. L'intérêt de dispositifs d'isolement appropriés a été montré pour la plupart des défauts, afin de réduire les régimes dégradés et éventuellement d'assurer le mode de défaillance ultime adéquat. Cela constitue également un moyen d'envisager une tolérance de panne en permettant la reconfiguration du convertisseur afin de poursuivre la mission[28].

Aspects technologiques

Pour pouvoir isoler totalement un bras d'onduleur de l'ensemble des potentiels environnants (masse avion, points chaud et froid du bus continu, phases de la machine), 3 dispositifs d'isolement sont nécessaires puisque cette cellule de commutation est un triple. Cette solution pénalise fortement les pertes et la compacité du convertisseur et elle semble donc contraignante pour la plupart des applications industrielles. Avec un nombre réduit de dispositifs (Figure III.08), l'isolement n'est que partiel, en particulier dans le cas du défaut d'isolement par rapport à la masse.

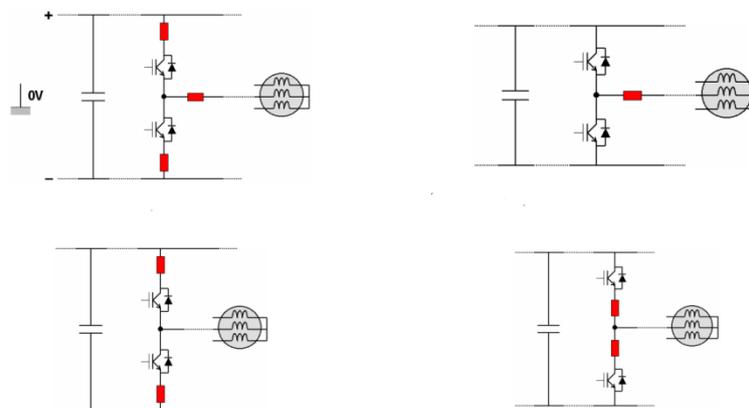


Figure III.8 : Dispositifs d'isolement par cellule

III.8 Description de la topologie d'isolement

➤ Association parallèle de cellules de commutation

L'association de cellules de commutation en parallèle est une manière simple d'introduire des redondances dans la topologie (Figure III.09). De plus, comme ces redondances sont actives, cela constitue un moyen d'augmenter la puissance d'alimentation de la charge à partir d'un module générique à calibre fixé et pour une tension continue imposée, en doublant le courant total de chaque phase[30].

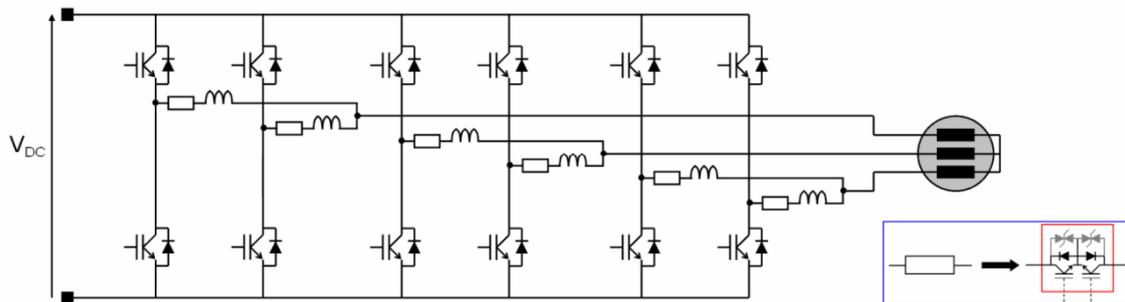


Figure III.9 : Onduleur triphasé à cellules parallélisées deux à deux avec des inductances de découplage et interrupteurs d'isolement

➤ Onduleur à bras secours redondant

Le niveau de redondance élevé de la topologie précédente (deux bras par phase) peut sembler excessif pour permettre la tolérance d'une panne au minimum. Il est alors envisageable de mutualiser les redondances introduites dans cette topologie sous la forme d'un bras secours pouvant se substituer à chacune des cellules de commutation. La redondance est donc ici passive puisque le bras additionnel est inactif en fonctionnement normal[27].

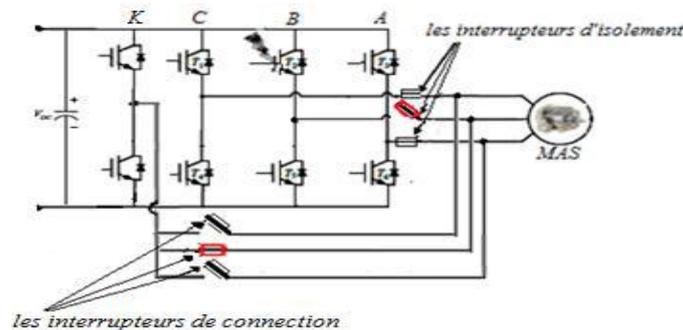


Figure III.10: Contrôle à bras de secours redondant en cas de défaut

➤ Contrôle biphasé de la machine asynchrone

Ce type de contrôle consiste à commander les deux phases saines après la déconnexion de la phase défaillante. L'isolation du défaut est effectuée par l'interrupteur d'isolement à l'instant de l'annulation du courant de la phase défaillante

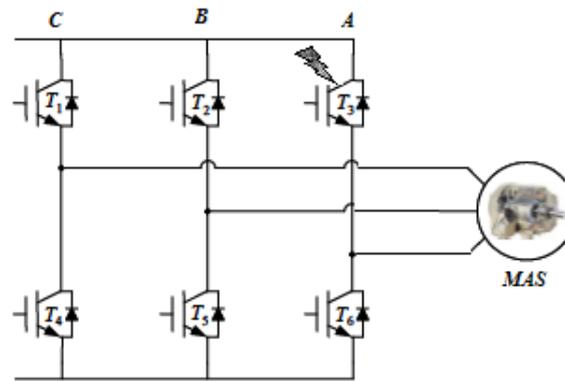


Figure III.11 : Contrôle de l'onduleur dans l'état biphasé

➤ **Contrôle de la machine asynchrone avec un onduleur à quatre fils**

La Figure III.12 présente la topologie d'un onduleur triphasé classique. En cas de défaut, cette topologie peut être modifiée par la connexion du neutre de la machine au point milieu du bus continu. Cette structure est proposée par [28].

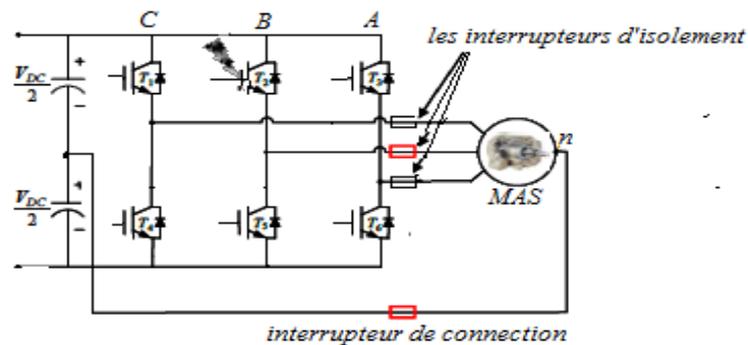
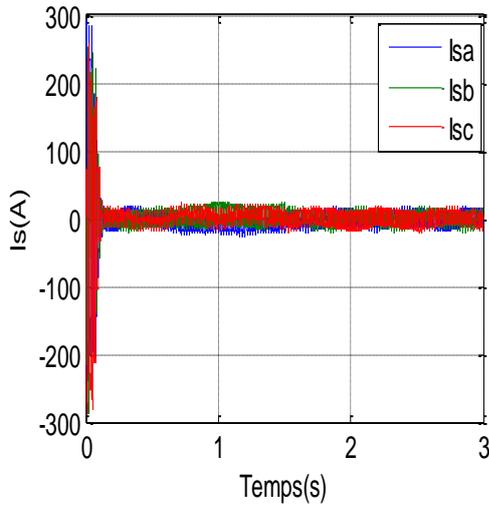


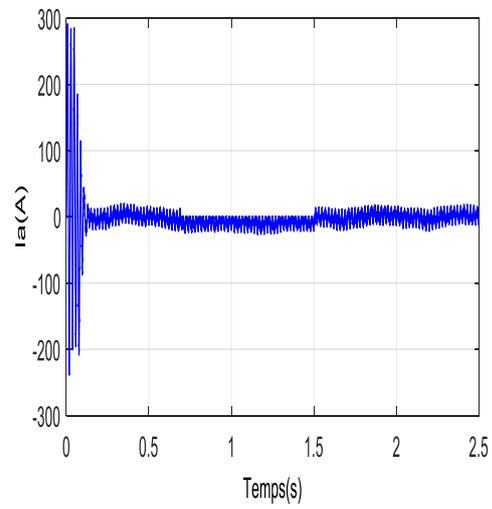
Figure III.12: Contrôle d'un onduleur à quatre fils dans l'état de défaut

III.9 Résultats de simulation du control à bras de secours relié à la phase défaillante

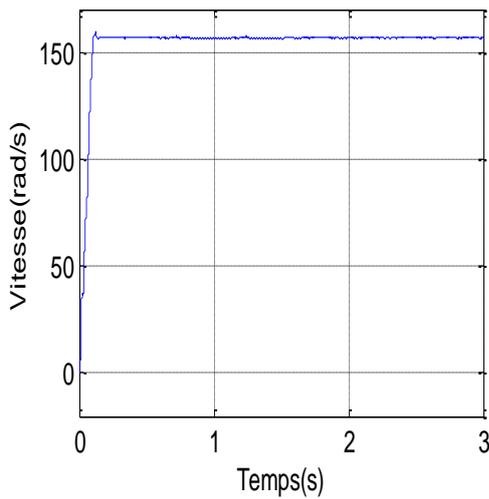
➤ **Résultats de simulation de défaut de type C-O**



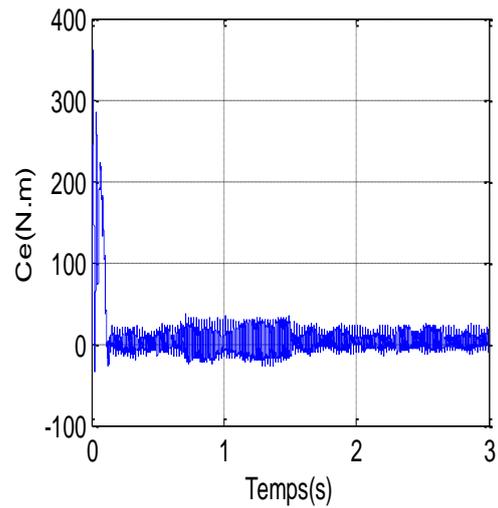
a) Les courants statoriques



b) Zoom des courants statoriques



c) La vitesse de rotation



d) Le couple électromagnétique

Figure III.13: Réponses du système après reconfiguration en présence de défauts circuit-ouvert

➤ **Résultats de simulation de défaut de type C-C :**

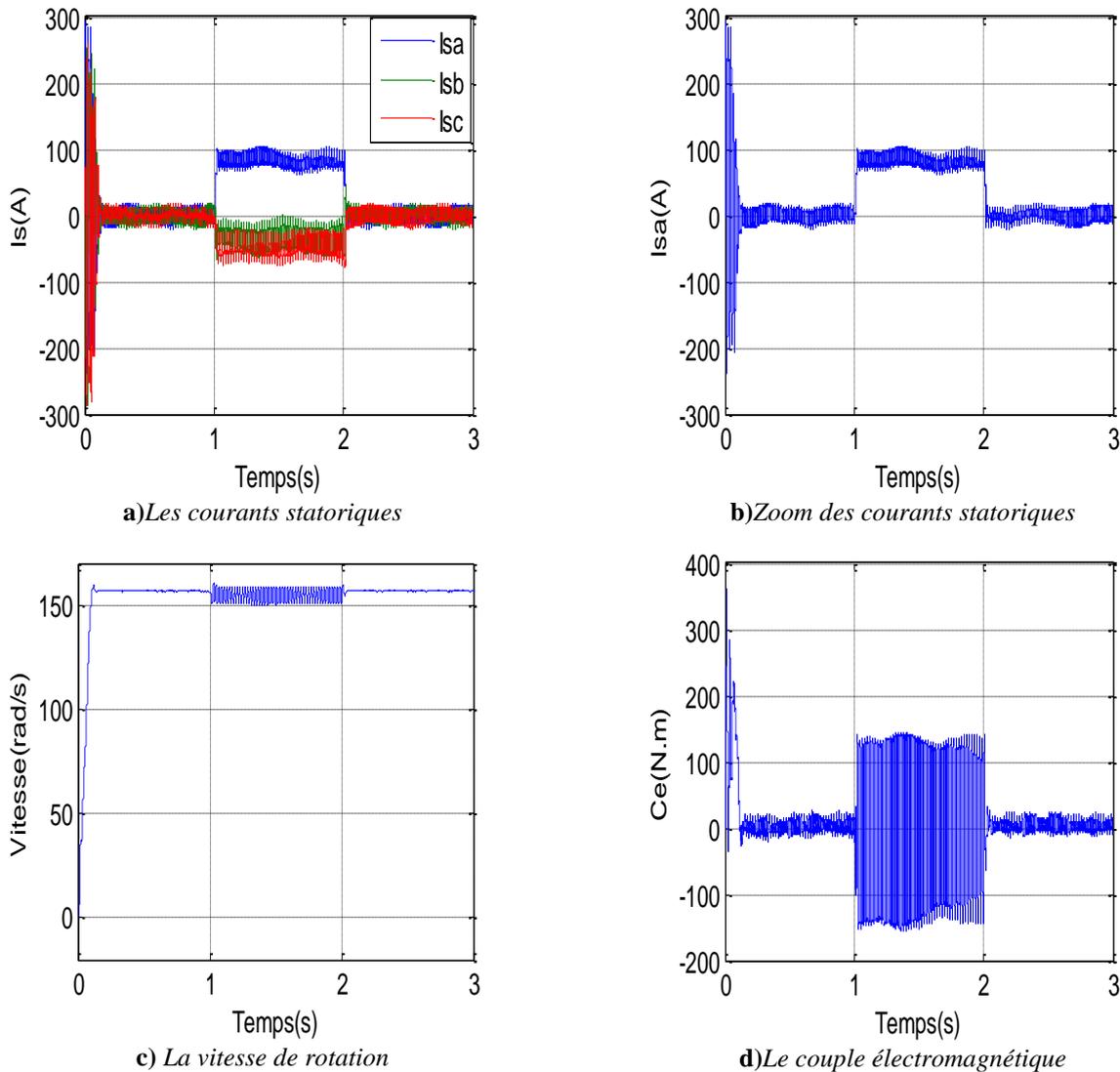


Figure III.14 : Réponses du système après reconfiguration en présence de défauts court-circuit pour un convertisseur avec un bras redondant

➤ **Interprétation**

Les résultats de simulation illustrés dans la figure précédente montrent clairement les points suivants :

- Le système de diagnostic de défauts (C-O et C-C) répond quel que soit le type de défauts,
- Ce système permet la détection, la localisation et la reconfiguration de défauts onduleur pendant un temps acceptable par rapport aux exigences dynamique du système d'entraînement (la période de la reconfiguration T_{rec} doit inférieure à la période électrique de fonctionnement c'est-à-dire $T_{\text{rec}} < T_s$).

- Les grandeurs électriques et mécaniques (courants statoriques, vitesse & couple) présentent des perturbations et des dépassements en amplitudes acceptables pendant un temps maîtrisable par le système de reconfiguration.
- Les dégâts prévus à cause des perturbations enregistrées sur le système sont limités et éliminés par le mécanisme de reconfiguration.

III.10 Conclusion

La conception de systèmes de fonctionnement sûr nécessite d'une part, l'implantation d'un système de diagnostic pour réaliser la détection et la localisation de fautes (fault detection and isolation) ou FDI et d'autre part la mise en œuvre de traitement tolérant aux fautes (fault tolerant control) ou FTC.

Ce chapitre a pour objet la présentation des principaux concepts de synthèse de commande tolérante aux défauts. La classification des méthodes résultantes, permet d'effectuer un état de l'art de l'ensemble des méthodes de Commandes Tolérantes aux Défauts (Fault Tolerant Control) afin de synthétiser des systèmes tolérants aux défauts.

Conclusion

générale

Dans les applications industrielles, les entraînements électriques, nécessitent une détection rapide de leurs défaillances à cause de leurs utilisations fréquentes dans la plupart des domaines industriels. La maintenance de ces machines justifie l'accent mis sur la recherche dans le diagnostic de défauts des entraînements électriques, notamment en vitesse variable.

Dans ce travail, nous avons commencé à considérer les défauts éventuels dans un entraînement électrique à vitesse variable et nous avons choisi comme type de défaut le court-circuit et le circuit ouvert au niveau des bras d'un onduleur.

Les systèmes tolérants aux défauts se déclinent en deux grandes familles avec d'une part, une approche passive et d'autre part l'approche voie active incluant un module de diagnostic. Un grand nombre de publications traite du domaine de la commande tolérante aux défauts mais la plupart traite des systèmes linéaires ou des systèmes évoluant dans un domaine restreint. Notre objectif a été de développer des lois de commandes tolérantes aux défauts en considérant des systèmes représentés par des Brekers contrôleurs.

La direction que nous proposons dans ce mémoire est tout autre puisqu'elle vise à porter cet effort de conception de la sûreté de fonctionnement plus en amont et plus circonscrite à l'échelle même des cellules de commutation et des structures génériques de conversion.

En perspective de ce travail, d'autres points pourraient être envisagés pour mettre en exergue certains aspects théoriques et pratiques.

Une première étude serait de développer des algorithmes de commandes tolérantes aux défauts en temps réel des entraînements électriques à vitesse variable en tenant compte de la majorité des défauts qui peuvent survenir dans le système complet (défauts source alimentation, défauts convertisseurs statiques, défauts câblage, défauts machine, défauts capteurs et défauts commande...) tout en assurant que le diagnostic puisse être fait dans un délais très court.

L'utilisation des convertisseurs multi-niveaux (3 ou 5 niveaux pour ne pas compliquer la commande) dans les systèmes d'entraînements à vitesse variable. Ce type de convertisseurs est plus robuste aux défauts interrupteurs (IGBTs). Sans compensation de défauts le système est capable de fonctionner avec des performances dégradées. Le multiple des interrupteurs pour un bras de convertisseur garantir la réduction de l'effet de défauts en comparaison avec un convertisseur classique à deux niveaux.

Références bibliographiques

- [1] **Kazzaz S.A.S.A., Singh G.K.**, « **Experimental investigations on induction machine condition monitoring and fault diagnosis using digital signal processing techniques**, *Electric Power Systems Research* » , vol. 65, p. 197-221, Elsevier, 2003.
- [2] **Bianchi Bolognani S., Pré M.D.**, « **Strategies for the fault-tolerant current control of a five-phase permanent-magnet motor**», *IEEE Transaction on industry Applications* », vol.43, no.4, p. 960-970, July- August 2007.
- [3] **E. Schaeffer**, « **Diagnostic des machines asynchrones modèles et outils paramétriques dédiés à la simulation et à la détection des défauts** », thèse de doctorat, université de Nantes, France,1999.
- [4] **T. Boumegoura**, «**Recherche de signature électromagnétique des défauts dans une machine asynchrone et synthèse d'observateurs en vue de diagnostic** », thèse de doctorat, école centrale de Lyon, France,2001.
- [5] **T. Achour**, «**Diagnostic des défauts électriques et mécaniques de la machine asynchrone à simple cage d'écureuil, mémoire** » mémoire d'ingénieur, école nationale polytechnique, 2008.
- [6] **.R. Fiser, S. Ferkolj**, "**Simulation of steady-state and dynamic performance of induction motor for diagnostic purpose**", *IEEE/IEMDC'97 Conference Proc.*,Milwaukee (U.S.A.), 18-21 Mai 1997, pp. WB3-10.1 - WB3-10.3.
- [7] **S. Duong, S. Raël, C. Schaeffer, J.F. De Palma**, "**Short circuit behavior for PT and NPT IGBT devices - Protection against explosion of the cases by fuses**", *EPE'95. Conference Proc.*, Sevilla (Spain), Vol. 1, 1995, pp. 249-254.
- [8] **R. S. Chokhawala, J. Catt, L. Kiraly**, "**A discussion on IGBT short circuit behavior and fault protection schemes**", *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 31, No. 2, Mm"ch/ApriI1995, pp. 256-263.
- [9] **1. Arnoult, P. Merle**, **Dispositifs de l'électronique de puissance**, Hennès, Paris, 1992.
- [10] **Schilling. O, D Scholz, H Seidelmann, R Keller, J.G Bauer,A Porst et R Roth**,«**6.5kV Press Pack IGBT for High Power Application**»,Proceedings of the 7th European Power Quality Conference.
- [11] **O.V. Thorsen, M. Dalva**, "**A survey of the reliability with an analysis of faults on variable frequency drives in industry**", *EPE*, pp. 1033–1038, 1995.
- [12] **BAZINE S.**, « **Conception et implémentation d'un Méta-modèle de machines asynchrones en défaut**», PhD thesis , University of Poitiers, Ecole nationale d'ingénieurs de Tunis, June 2009.
- [13] **J.P Caron, J.P Hautier**, « **Modélisation et commande de la machine asynchrone** », Edition Technique, Paris 1995.

- [14] **Bouraiou Ahmed** « **Diagnostic de défauts par logique floue** », mémoire de magister, Université Badji Mokhtar Annaba 2010.
- [15] **R. Abdessemed, M. Kadjoudj**,« **Modélisation des Machines Electriques** », Presse de l'Université de Batna, 2009.
- [16] **Yahiaoui Omar et Labza Tahar**: « **Etude et simulation d'association onduleur de tension-moteur asynchrone et réglage par mode glissant** ». Mémoire d'ingénieur, M'sila2006/2007.
- [17] **F. Berrezzek**, « **Etude des différentes techniques de commande des onduleurs à mli associés à une machine asynchrone** », Mémoire de Magister, Université de Bordj Badji Mokhtar,Annaba, 2006.
- [18] **F. Labrique, G. Séguier, et R. Bausière**, « **Les convertisseurs de l'électronique de puissance** », Volume 4, La conversion continu-alternatif, 2e éd. rev. Paris: Tec & Doc Lavoisier, 1995.
- [19] **B. Achour et A. Reguieg**, « **Réalisation d'une carte de commande d'un onduleur triphasé** », Mémoire de Master, Ibn Khaldoun de Tiaret., 2014.
- [20] **A. Bouafia**, « **Techniques de commande prédictive et floue pour les systèmes d'électronique de puissance: Application aux redresseurs a MLI** », Thèse de Doctorat, Ferhat Abbas - Setif, 2010.
- [21] **M. Pinard**, « **Convertisseurs et électronique de puissance** », Dunod/L'Usine Nouvelle. 2007.
- [22] **G. Séguier, F. Labrique, et R. Bausière**, « **Electronique de puissance. Structures, fonctions de base, principales applications** », cours et exercices résolus, 8e éd. 2004.
- [23] **N. Belhaouchet**, « **Fonctionnement à fréquence de commutation constante des convertisseurs de puissance en utilisant des techniques de commande avancées** », Thèse de Doctorat, Ferhat Abbas - Setif, 2011.
- [24] **A. Boukaroura**, « **Modélisation et diagnostic d'un onduleur triphasé par l'approche bond-graph** », Mémoire de magister, Ferhat Abbas de Sétif, 2009.
- [25] **B .BACHIR** « **Commande sans capteur de vitesse d'une machine à induction** », Mémoire d'ingénieur ,M'sila2006/2007.
- [26] **P. Tavner, L. Ran, J. Penman, and H. Sedding**, « **Condition Monitoring of Rotating Electrical Machines** », 2 ed. London, United Kingdom: Institution of Engineering and Technology, 2008.
- [27] **S. Bolognani, M. Zordan, M. Zigliotto**, "**Experimental fault-tolerant control of a PMSM drive**", IEEE Trans. on Industrial Electronics, vol. 47, issue 5, pp. 1134-1141, Oct. 2000.
- [28] **S. Nandi, H.A. Toliyat**, "**Fault diagnosis of electrical machines – A review**", Electric Machines and Drives Conference, pp. 219–221, Seattle, May 1999.

- [29] **F. Richardeau**, "Sûreté de fonctionnement en électronique de puissance", Habilitation à Diriger des Recherches, Toulouse, 2004.
- [30] **B.A. Welchko, T.A. Lipo, T.M. Jahns, S.E. Schulz**, "Fault tolerant three-phase AC motor drive topologies; a comparison of features, costs, and limitations", IEEE Trans. on Power Electronics, vol. 19, pp. 1108-1116, July 2004.
- [31] **J.MAVIER**, " Convertisseurs génériques à tolérance de panne Applications pour le domaine aéronautique ", thèse de Doctorat de l'Institut national polytechnique, Toulouse, 2007.

Annexe

Paramètres et grandeurs du moteur asynchrone :

| | |
|--|------------------------|
| Puissance | 15KW(20 HP) |
| La tension | 400V |
| La fréquence | 50HZ |
| <i>Résistance d'une phase rotorique</i> | 0.2147 Ω |
| Résistance d'une phase statorique | 0.000991 Ω |
| Résistance d'une barre rotorique | 0.22051 Ω |
| Inductance de fuit d'une barre rotorique | 0.000991H |
| Inductance mutuel | 0.06419H |
| Moment d'inertie | 0.102Kg.m ² |
| Friction factor | 0.009541(N.m.s) |
| Nombre de paire de pole | 2 |

Résumé

Dans cette thèse nous avons étudié les différentes stratégies de commande tolérante aux défauts d'onduleur à quatre bras alimenté d'une machine asynchrone. Les défaillances d'onduleur, qu'elles proviennent d'un des composants de puissance commandables peuvent provoquer de graves dysfonctionnements du système.

Afin d'empêcher la propagation de défauts aux autres composants et assurer la continuité de service en présence de défaut, des méthodes efficaces et rapides d'isolation et de reconfiguration de la commande en cas de défauts de court-circuit et circuit ouvert d'un IGBT de l'onduleur et de compensation de défauts doivent être mises en oeuvre. Pour cela, plusieurs stratégies de commande en mode dégradé sont proposées. Les résultats de simulation permettent de valider l'efficacité des méthodes proposées.

Afin d'améliorer les performances de la commande en mode dégradé, une commande par un interrupteur de contrôle a été proposée et validée par la simulation. La comparaison de ses performances avec celles d'autres commandes est également effectuée.

Mots clés : Défaut d'IGBT, Mode dégradé, Commande Tolérante aux Défauts,

المخلص

يهدف هذا العمل الى انجاز تحكم تصحيحي للأعطال مغير السرعات للماكنة الكهربائية اللامتزامنة مغذات بمموج ثلاثي الطور ذو اربعة اذرع و لقد قمنا بإنجاز طرق فعالة و سريعة لعزل العطب في المموج سواء كان دائرة مفتوحة او دائرة قصيرة كما قمنا بإنجاز تحكم تصحيحي باستخدام عدة استراتيجيات تحكم من اجل العمل بمردود جيد.

ومن اجل تحسين مردود التحكم استخدمنا التحكم بالقاطعة المراقبة التي اثبتت فعاليتها بالمقارنة مع انواع التحكمات المدروسة

الكلمات المفتاحية: عطل، تحكم تصحيحي للأعطال، القاطعة المراقبة