



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

Republique Algerienne Democratique Et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة العربي التبسي - تبسة

Université Larbi Tébessi- Tébessa –

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de génie électrique



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de Master Académique

En : Electrotechnique

Spécialité : Electrotechnique industrielle

Par : AZIZI Houssameddine & DJEDOUANI Oqbi

Sujet

Détection des défauts de l'ensemble convertisseurs- machine asynchrone par logique floue

Présenté et soutenu publiquement, le 12/06/2022, devant le jury composé de :

M ^r Loudjani Abdelhak	MAA	Président
M ^{me} Bouguerne Abla	MCB	Rapporteur
M ^r Moussa Mohamed Amine	MCB	Examineur

Promotion : 2021/2022

Dédicace

Mes remerciements vont tout premièrement à dieu tout puissant pour la volonté, la santé et la patience qu'il m'a donnée pour terminer ce travail.

Je voudrais aussi remercier ma famille qui m'a soutenu et encouragé.

Mon cher père **AZIZI SMAIL** : aucune dédicace ne peut exprimer l'amour, l'estime, le dévouement et le respect que j'ai toujours eu pour toi. Rien au monde ne vaut les efforts fournis jour et nuit pour mon éducation et pour mon bien être. Ce travail est le fruit de tes sacrifices que tu as consentis mon éducation et ma formation.

A ma mère **BOUSBIR FADHILA** : tu représentes pour moi le symbole de la bonté par excellence, la source de tendresse et l'exemple du dévouement qui n'a pas cessé de m'encourager et de prier pour moi.

À tous mes frères TAHA ALI ,SOUHAIL ,KOSSAY

À ma chère sœur **AYA**.

À Mes Chère Amies,

Spécialement **À ZAKARIA DUIBI, A.BILLAL MEDNI , ISHAK, OKBI,
DHIA,NIDHAL**

Je te remercie pour tes chères amitiés à mon cœur et je te souhaite tout le bonheur du monde

Vous êtes toujours mes bras droit

A tous mes amis et collègues de l'université

D.AziziHoussameddine

Dédicace

Du profond de mon cœur, je dédie ce travail à tous ceux qui me sont
chers,

A MES CHERS PARENTS,

Que ce travail soit l'expression de ma reconnaissance pour vos
sacrifices

Consentis, votre soutien moral et matériel que vous n'avez cesse de
prodiguer.

Vous avez tout fait pour mon bonheur et ma réussite.

A Mes Chère Amies,

Spécialement **A AZIZI HOUSSAMEDDINE**

A tous mes amis et collègues de l'université

D.DJEDOUANI OQBI

Remerciements

Avant tout développement sur cette expérience professionnelle, il apparaît de commencer ce mémoire par des remerciements, à ceux qui m'ont beaucoup appris au cours de la préparation de ce mémoire, et même à ceux qui ont eu la gentillesse de faire de ce mémoire un moment très profitable.

Nous remercions notre encadreur Dr. Ablabouguerne C'est elle qui nous a dirigé pour réaliser ce mémoire. Nous remercions, aussi, l'ensemble des enseignants du département de génie électrique.

ملخص

الغرض من هذا العمل هو تشخيص ومحاكاة ارتباط موج الجهد ثنائي المستوى لتغذية آلة كهربائية غير متزامنة. يتم كشف الاعطال المختلفة للنظام موج-الآلة غير متزامنة بناءً على نمذجة الآلة في معلم بارك، يتم التشخيص في حالتين محتملتين: الحالة السليمة والحالة حيث يقدم النظام اعطال إما على مستوى المحرك غير المتزامن أو على مستوى الموج الجهد ثنائي المستوى الذي يتم تحليله بطريقتين مختلفتين سواء عن طريق التحليل الطيفي للتيار الثابت والمنطق المضرب، وهذا الأخير يعطي أداء أفضل ودقة جيدة للكشف عن العيوب وتشخيصها.

Résumé

L'objectif de ce travail étant de diagnostiquer et de simuler l'association onduleur de tension à deux niveaux alimentant une machine asynchrone. Nous détectons les différents défauts de l'association convertisseur- machine, on se basant sur la modélisation de la machine dans le repère de Park, puis la simulation de l'ensemble MAS -onduleur. Le diagnostic est effectué à deux états possibles : Etat sain et Etat où le système présente des défauts soit au niveau de la machine soit au niveau de l'onduleur qui est encore analysé par deux méthodes qu'il s'agit de l'analyse spectrale et logique floue, cette dernière donne une meilleure performance et bonne précision pour la détection et diagnostic des défauts.

Abstract

The purpose of this work is to diagnose and simulate the two-tier voltage inverter association supplying an asynchronous machine. We detect the various faults of the converter-machine association, based on the modelling of the machine in the Park landmark, then the simulation of the MAS-inverter assembly. The diagnosis is made in two possible states: Sound state and State where the system presents defects either at the machine level or at the level of the inverter which is still analyzed by two methods that it is the spectral and logical analysis blurred, the latter gives better performance and good accuracy for detection and diagnosis of defects.

Liste des figures

Figure.1.1 différents éléments d'un moteur à rotor à bagues	6
Figure.1.2 différents éléments d'un moteur à cage d'écureuil	6
Figure 1.3 Représentation des enroulements de la machine asynchrone triphasée dans le repère (abc)	7
Figure 1.4 Représentation du passage d'un système triphasé à celui biphasé	10
Figure 1.5 schéma bloc de machine asynchrone	14
Figure 1.6 tensions du réseau d'alimentation	14
Figure 1.7 Courants (i_d , i_q) du stator (Marche à vide : $C_r=0$)	15
Figure 1.8 Couple électromagnétique (Marche à vide : $C_r=0\text{Nm}$)	15
Figure 1.9 Vitesse de rotation de la machine (Marche à vide : $C_r=0\text{Nm}$)	15
Figure 1.10 Courants (i_d , i_q) du stator (Marche en charge : $C_r=10$ à 1s)	16
Figure 1.11 Couple électromagnétique (Marche en charge $C_r=10\text{Nm}$ à 1s)	16
Figure 1.12 Vitesse de rotation de la machine (Marche en charge $C_r=10\text{Nm}$ à 1s)	17
Figure 2.1 Schéma de principe de la conversion Continu - Alternative (DC – AC)	19
Figure 2.2 onduleur de courant triphasé à deux niveaux	20
Figure 2.3 onduleur de tension triphasé à deux niveaux	20
Figure 2.4 Structure d'un onduleur à deux niveaux	21
Figure 2.5 schéma de principe de la MLI sinus-triangle	23
Figure 2.6 Simulation de la porteuse et la modulante	23
Figure 2.7 Schéma bloc de la simulation d'un onduleur à deux niveaux avec charge RL	23
Figure 2.8 Tension simple de sortie d'un onduleur à deux niveaux	24
Figure 2.9 Spectre harmonique de la tension de sortie simple d'un onduleur à deux niveaux	24
Figure 2.10 Tension composée de sortie d'un onduleur à deux niveaux	25
Figure 2.11 Courant de sortie d'un onduleur à deux niveaux pour une charge RL	25
Figure 2.12 Spectre harmonique du courant de sortie d'un onduleur à deux niveaux pour une charge	26
Figure 2.13 Schéma bloc de la simulation d'un onduleur à deux niveaux avec machine Asynchrone	27
Figure 2.14 courants statoriques de la machine pour un onduleur à deux niveaux	27
Figure 2.15 courants rotoriques de la machine pour un onduleur à deux niveaux	28
Figure 2.16 Vitesse de rotation de la machine pour un onduleur à deux niveaux	28
Figure 2.17 Couple électromagnétique de la machine pour un onduleur à deux niveaux	28
Figure 3.1 Architecture d'un banc d'observateur.	32
Figure 3.2 Etapes du diagnostic industriel	34

Figure 3.3 Principe de l'estimation d'état	36
Figure 3.4 Principe Génération des résidus	37
Figure 3.5 Principe des techniques d'identification	38
Figure 4.1 Schéma block de l'association onduleur-MAS	47
Figure 4.2 Structure générale du l'onduleur de tension à deux niveaux	47
Figure 4.3 Analyse spectrale du courant I_a avec défaut c-c sur la phase (a)	48
Figure 4.4 Analyse spectrale du courant I_a avec défaut c-c entre deux phases (a) et (b).	48
Figure 4.5 résultats des autres cas de court-circuit en les phases.	49
Figure 4.6 Analyse spectrale du courant I_a avec défaut mécanique	49
Figure 4.7 Analyse spectrale du courant I_a avec défaut rotorique	50
Figure 4.8 Fonction caractéristique d'appartenance pour la logique booléenne et la logique floue.	51
Figure 4.9 Différentes formes de fonctions d'appartenance	52
Figure 4.10 Représentation des variables linguistiques	53
Figure 4.11 Univers de discours normalisé dans l'intervalle $[-1 +1]$	54
Figure 4.12 Schéma bloc d'un système de surveillance de l'état d'un moteur	55
Figure 4.13 Vitesse et le courant i_{sq} dans le cas sain	56
Figure 4.14 Vitesse et courant i_{sq} en cas des courts circuits dans les Interrupteurs	57
Figure 4.15 Vitesse et courant i_{sq} en cas d'ouverture des interrupteurs	58
Figure 4.16 Evolution de courant et la Vitesse du moteur avec défaut dans le rotor	59
Figure 4.17 Evolution de courant du moteur avec défaut (c.c entre les phases).	60
Figure 4.18 Évolution des courants statoriques du moteur avec défaut mécanique	61
Figure 4.19 Fonctions d'appartenances des variables d'entrées	62
Figure 4.20 Fonctions d'appartenances de la sortie (état du stator)	63
Figure 4.21 Structure de diagnostic des défauts par logique floue.	64
Figure 4.22 Diagramme d'inférence floue dans le cas sain	64
Figure 4.23 Diagramme d'inférence floue dans le cas d'ouverture des interrupteurs	65
Figure 4.24 Diagramme d'inférence floue dans le cas de fermeture des interrupteurs	65
Figure 4.25 Diagramme d'inférence floue pour défaut statorique (court circuit sur une phase)	66
Figure 4.26 Diagramme d'inférence floue pour défaut statorique (court circuit entre deux phases)	66
Figure 4.27 Diagramme d'inférence floue pour défaut rotorique	67
Figure 4.28 Diagramme d'inférence floue pour défauts mécaniques	67

Liste des tableaux

Tableau 4.1 résultats des autres cas de court-circuit en les phases.

49

SOMMAIRE

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

CHAPITRE 1 : ETUDE ET SIMULATION DE L'ASSOCIATION ONDULEUR-MACHINE ASYNCHRONE

1.1 Introduction.....	3
1.2 Constitution.....	3
1.2.1 Stator.....	3
1.2.2 Rotor	3
1.2.2.1 Moteur asynchrone à rotor bobiné.....	3
1.2.2.2 Moteur asynchrone à cage d'écureuil.....	4
1.3 Modélisation de la machine asynchrone.....	5
1.3.1 Hypothèses simplificatrices.....	5
1.3.2 Modélisation de la machine asynchrone dans le repère triphasé (abc).....	5
1.3.2.1 Équation de la machine asynchrone	6
1.3.2.1.1 Équations électriques (de tension)	6
1.3.2.1.2 Équations magnétiques (de flux)	6
1.3.2.1.3 Équations mécaniques	7
1.3.3 Modélisation dans le repère de Park (dq).....	8
1.3.3.1 Équations électriques dans le modèle de Park.....	8
1.3.3.2 Équations magnétiques dans le modèle de Park.....	9
1.3.3.3 Équations mécaniques dans le modèle de Park.....	9
1.3.3.4 Choix du repère de référence	9
1.3.4 Expression en modèle d'état.....	10

1.4 Simulation de la machine asynchrone.....	12
1.5 Conclusion.....	15

CHAPITRE 2 : ETUDE D'UNE ASSOCIATION ONDULEUR MACHINE ASYNCHRONE

2.1 Introduction.....	16
2.1.1 Définition de l'onduleur	16
2.2 Classification des onduleurs	16
2.2.1 Onduleur autonome	16
2.2.2 Onduleur non autonome	17
2.3 Type des onduleurs	17
2.3.1 Un onduleur de courant	17
2.3.2 Un onduleur de tension	17
2.4 Modélisation de l'onduleur de tension à deux niveaux	18
2.4.1 Stratégies de commande d'un onduleur à deux niveaux par MLI.....	19
2.4.2 Simulation de l'onduleur à deux niveaux avec charge RL.....	20
2.5 Simulation de association machine asynchrone avec onduleur à deux niveaux...24	
2.6 Conclusion.....	26

CHAPITRE 3: DETECTION, DIAGNOSTIC ET CLASSIFICATION DES DEFAUTS DES MOTEURS ASYNCHRONES

3.1 Introduction.....	27
3.2 Détection et localisation de défaut.....	27
3.2.1 Détection de défaut	27

3.2.2 Localisation de défaut	28
3.3 Diagnostic de la machine asynchrone	29
3.3.1 Différentes étapes du diagnostic	29
3.3.1.1 Acquisition des données	30
3.3.1.2 Étaped'élaboration d'indicateurs de défauts	30
3.3.1.3 Étape de détection	31
3.3.1. 4 Étape de localisation	31
3.3.1.5 Etape de prise de décision.....	31
3.3.2 Méthodes de diagnostic	31
3.3.2 1 Méthodes de diagnostic avec modèle analytique	31
3.3.2 2 Méthodes de diagnostic sans modèle analytique	36
3.4 Conclusion	40

CHAPITRE 4: DIAGNOSTIC DES DEFAUTS DE L'ASSOCIATION ONDULEUR- MOTEUR ASYNCHRONE

4.1 Introduction.....	41
4.2 Surveillance du moteur asynchrone	41
4.3 Analyse spectrale des défauts dans la machine asynchrone	42
a.Défaut statorique.....	43
b.Défauts mécaniques.....	44
c.Défauts rotoriques.....	45
4.4 La logique floue	45
4.5 Base générale de la logique floue	46
4.5.1 Ensembles flous	46
4.5.2 Fonction d'appartenance	46
4.5.3 Variable linguistique	47
4.5.4 Opérateurs	48

4.6 Étapes de contractions d'un modèle de logique flou	48
4.6.1 Fuzzification	48
4.6.2 Base de connaissances	48
4.6.2 1 Base de données	48
4.6.2 2 Base de règles	49
4.6.3 3 Logique de prise de décision (bloc d'inférence)	49
4.6.4 Défuzzification.....	50
4.7 Notion sur la RMS.....	50
4.8 Système de surveillance et de détection.....	50
4.9 Simulation et Extraction des défauts.....	50
4.9.1 Cas sain	51
4.9.2 Défaillances du convertisseur (onduleur)	51
4.9.2.1 Cas d'un défaut Court-circuit sur des interrupteurs.....	51
4.9.2.2 Cas d'un défaut d'ouvertures des interrupteurs.....	52
4.9.3 Défaillances à la machine asynchrone.....	53
4.9.3.1 Défaillances au rotor.....	53
4.9.3.2 Défaillances au Stator	54
a.Cas de défaut de court-circuit dans une seul phase.....	55
b.Cas de défaut de court-circuit entre deux phases.....	55
c.Défaillances mécaniques.....	55
4.9.4Variables d'entrée-sortie de système de la logique floue.....	57
4.9.5 Simulation d'un système de diagnostic association onduleur-MAS.....	59
4.10 Conclusion.....	63
Conclusion générale.....	70
Bibliographie.....	71

Introduction générale

La sécurité, la fiabilité, la performance et la continuité de service constituent, aujourd'hui, des préoccupations majeures dans le domaine d'entraînement électrique industriel. Les défauts du système d'entraînement électrique, peuvent provoquer de graves dysfonctionnements du système. Si le défaut n'est pas rapidement détecté et compensé, il peut dans certain moment mettre en danger le système et par conséquent provoque un arrêt de la chaîne de production.

La production en milieu industriel est caractérisée par une complexité toujours plus croissante. Ceci entraîne une conception de systèmes de plus en plus complexes qui ne peuvent être exempts de perturbation et de défaillances de plusieurs types.

Les entraînements électriques utilisent de plus en plus les moteurs asynchrones à cause de leur robustesse, deviennent donc un enjeu économique. Malheureusement, les contraintes nouvelles et l'intégration de ces machines dans des systèmes de conversion d'énergie de plus en plus complexes rendent le diagnostic plus difficile. Il existe plusieurs procédures de diagnostic. Le choix d'une approche est lié à la connaissance que l'on souhaite acquérir sur le système, mais aussi à la complexité de ce système.

Ces pannes peuvent être liées à la structure du moteur et d'origine mécanique (excentricité du rotor, défaut sur accouplement, usure des roulements ...) ou électrique et magnétique (court circuit du bobinage statorique, rupture de barre ou d'anneau ...).

Afin d'empêcher la propagation de défauts aux autres composants et assurer la continuité de service en toute circonstance en présence d'un défaut dans le système, des méthodes efficaces et rapides de diagnostic et de surveillance des défauts doivent être mises en œuvre.

Sur ce s'inscrit notre sujet de fin d'études et qui a pour objectif de surveillance, détection, et localisation les défauts onduleur à deux niveaux appliqué dans la commande du moteur asynchrone à cage d'écureuil.

Le travail dans ce mémoire de fin d'études est structuré en quatre chapitres :

Le premier chapitre présente un rappel sur la constitution de la machine asynchrone à cage d'écureuil, ses avantages et ses domaines d'application, ainsi que sa modélisation triphasée, en mettant en exergue la complexité et le non linéarité du modèle. Afin de réduire la complexité et la difficulté pour l'exploitation du modèle triphasé, nous avons fait appel aux transformations de Park. Les résultats des simulations des grandeurs électrique et mécanique de la machine.

Le deuxième chapitre réservé à la modélisation de l'association convertisseur statique-machine asynchrone. Nous présentons aussi une étude sur la modélisation de l'onduleur deux niveaux triphasé. Le modèle de l'association onduleur- MAS est validé par une simulation numérique des grandeurs électrique et mécanique sur Matlab/Simulink.

Le troisième chapitre présente un état de l'art sur le diagnostic et un étude générale des différents types défauts interne et externe de la machine asynchrone ainsi que de l'onduleur, les méthodes de diagnostic qui peuvent être utilisées, ainsi que un rappel sur technique de traitement des défauts.

Le quatrième chapitre, comporte deux parties, premier partie consacré à l'étude du comportement du système, proposé, aux présences de défauts des machines telle que les défauts statoriques, rotoriques ou mécanique et les défauts d'un interrupteur ou d'un bras de l'onduleur puisque il ya deux types de défauts sont considérés, le défaut circuit-ouvert et le défaut court-circuit. Les scénarios de défauts interrupteurs seront créés a fin d'analyser les conséquences de ces défauts et voir le comportement du système associer onduleur-machine. Les réponses des grandeurs électriques et mécaniques en présence de défaut vont être simulés et présentés par la technique d'analyse fréquentielle.

Dans la deuxième partie une méthode à base de la logique floue est proposée pour surveiller les défauts prévus de système onduleur-machine. La méthode proposée est basée sur la surveillance des défauts de court-circuit des interrupteurs de l'onduleur.

Enfin, ce travail s'achève par une conclusion générale qui résume tout le travail et qui donne une synthèse des différents résultats faites dans cette étude.

1.1 Introduction

La machine asynchrone triphasée transforme l'énergie électrique en énergie mécanique. Grâce à sa robustesse et sa simplicité de commande, la machine asynchrone dont le fonctionnement moteur est la machine la plus utilisée dans les applications industrielles, dans ce chapitre nous présenterons une étude détaillée sur la constitution ainsi que sur la modélisation et la simulation de la machine à fonctionnement à vide et en charge.

1.2 Constitution de la machine asynchrone

La machine asynchrone est constituée de deux parties :

1.2.1 Stator

Représente la partie fixe du moteur. Il est constitué d'une carcasse sur la quelle est fixée une couronne de tôle d'acier, de qualité spéciale ; munie d'encoques. Des trois bobinages de section appropriée sont repartis dans ces derniers et forment un ensemble d'enroulement qui comporte autant de circuits qu'il y a de phases sur le réseau d'alimentation [1] [2].

1.2.2 Rotor

Représente la partie mobile du moteur, il est placé à l'intérieur du stator et constitué d'un empilage de tôle d'acier formant un cylindre callé sur l'arbre du moteur. On distingue deux types du rotor de la machine asynchrone.

- ✓ moteur asynchrone à rotor bobiné.
- ✓ moteur asynchrone à rotor à cage d'écureuil (rotor en court-circuit).

1.2.2.1 Moteur asynchrone à rotor bobiné

Les enroulements rotoriques sont bobinés de manière à obtenir un enroulement triphasé à «p» paires de pôle. Les bobinages rotoriques sont toujours couplés en étoile, et les trois bornes accessibles sont reliées à la carcasse du stator à l'aide d'un système constitué de trois bagues tournantes et de trois balais fixes, la figure 1.1 représente les différents éléments de la machine asynchrone à rotor bobiné [3].

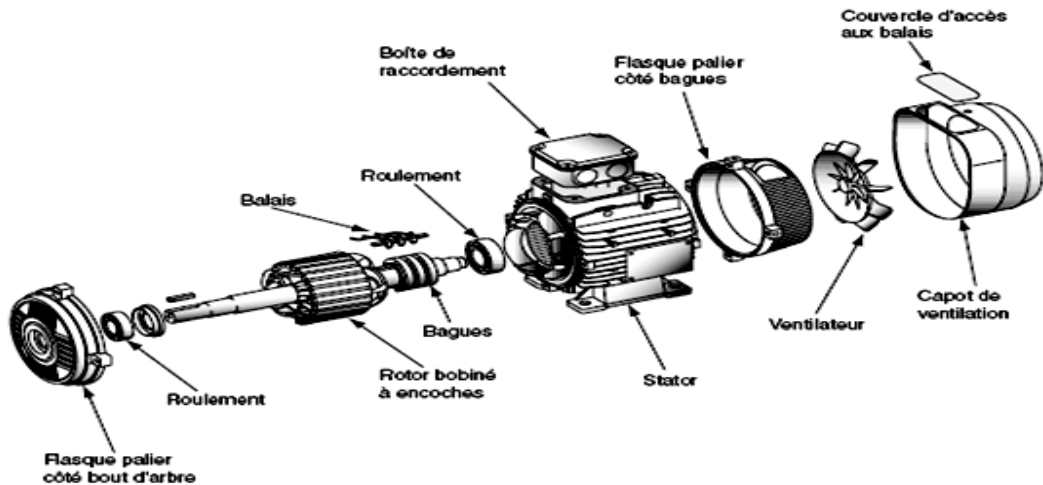


Figure.1.1 différents éléments d'un moteur à rotor à bagues

1.2.2.2 Moteur asynchrone à cage d'écureuil

La plus part des moteurs asynchrone utilisé dans le secteur industriel sont à cages d'écureuil, supérieur de 80% des machines électriques. Dans ce type de machines, chaque encoche rotorique est placée une barre. Ces barres sont en cuivre pour les moteurs de forte puissance, et en alliage d'aluminium pour les machines de faible et moyenne puissance. Ces barres sont réunies à chaque extrémité du rotor par des anneaux réalisant le court-circuit. La figure 1.2, illustre les différents éléments de la machine asynchrone à cage d'écureuil.

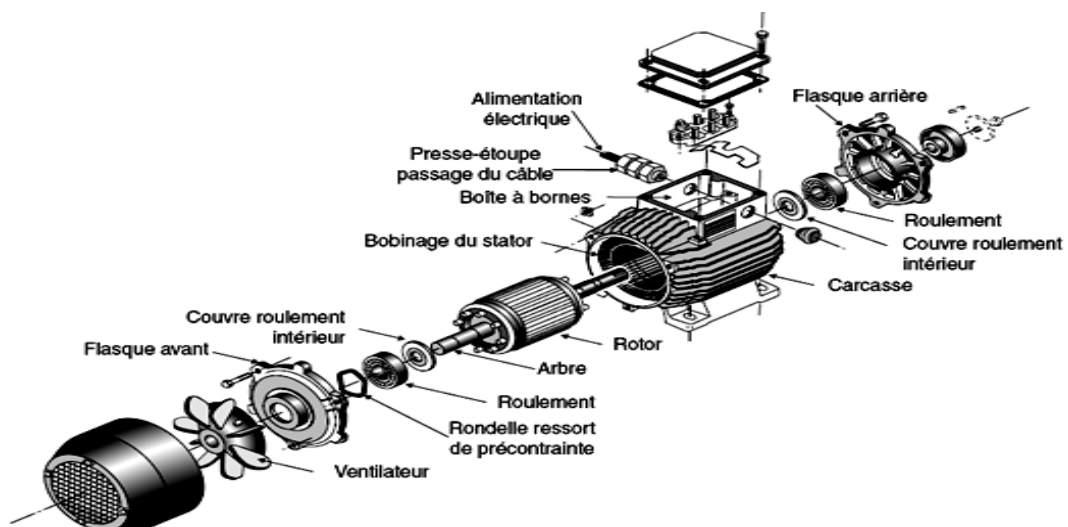


Figure.1.2 différents éléments d'un moteur à cage d'écureuil

1.3 Modélisation de la machine asynchrone

La modélisation de la machine asynchrone nécessite à trouver les équations différentielles des grandeurs (tensions, courants, couple et vitesse) qui caractérisent cette machine.

1.3.1 Hypothèses simplificatrices

- ü La machine est non saturée
- ü La machine asynchrone triphasée comporte un stator fixe et un rotor mobile autour de l'axe de symétrie de la machine asynchrone. Dans des encoches régulièrement réparties sur la face interne du stator sont logés trois enroulements identiques. Leurs axes sont distants entre eux d'un angle égal à $(\frac{2\pi}{3})$.
- ü Les enroulements du stator sont alimentés par un réseau triphasé de tensions sinusoïdales, à fréquence et amplitude constantes au par un onduleur de tension ou courant à fréquence et amplitude réglables. Les enroulements du rotor sont court-circuités.

1.3.2 Modélisation de la machine asynchrone dans le repère triphasé (abc)

La figure 1.3 présente les trois enroulements statorique et les trois enroulements rotoriques de la machine asynchrone triphasée dans le repère (abc).

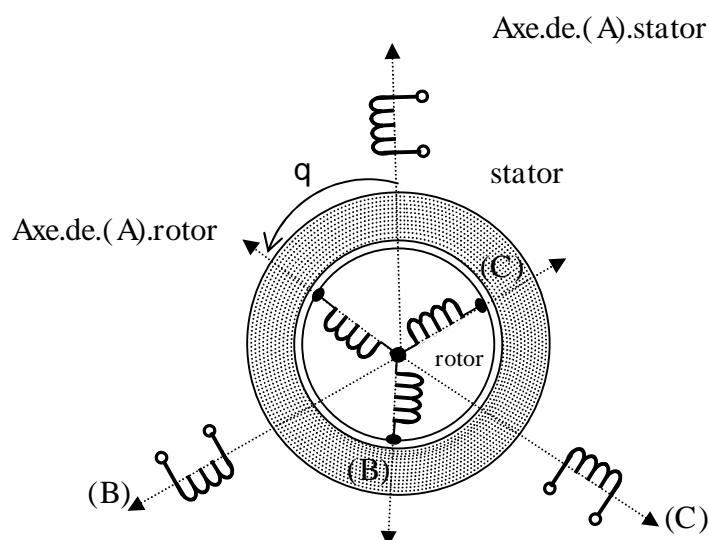


Figure 1.3 Représentation des enroulements de la machine asynchrone triphasée dans le repère (abc)

1.3.2.1 Equations de la machine asynchrone

Les deux comportements statique et dynamique de la machine asynchrone sont entièrement définis par les trois types d'équations suivantes :

- Les équations électriques (tensions, courants);
- Les équations magnétiques (flux);
- Les équations mécaniques (couple, vitesse) ;

1.3.2.1.1 Equations électriques

Les équations électriques des tensions du stator (V_{sabc}) et des tensions du rotor (V_{rabc}) sous la forme matricielle sont données par :

$$\begin{bmatrix} \hat{e}V_{sa} \\ \hat{e}V_{sb} \\ \hat{e}V_{sc} \\ \hat{e}V_{ra} \\ \hat{e}V_{rb} \\ \hat{e}V_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{e}R_s & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \hat{e}R_s & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \hat{e}R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \hat{e}R_r & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \hat{e}R_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \hat{e}R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{e}i_{sa} \\ \hat{e}i_{sb} \\ \hat{e}i_{sc} \\ \hat{e}i_{ra} \\ \hat{e}i_{rb} \\ \hat{e}i_{rc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \hat{e}F_{sa} \\ \hat{e}F_{sb} \\ \hat{e}F_{sc} \\ \hat{e}F_{ra} \\ \hat{e}F_{rb} \\ \hat{e}F_{rc} \end{bmatrix} \quad (1.1)$$

Ou sous la forme suivante :

$$[V_{sabc}] = [R_s][i_{sabc}] + (d/dt)[F_{sabc}] \quad (1.2)$$

$$[V_{rabc}] = [R_r][i_{rabc}] + (d/dt)[F_{rabc}] \quad (1.3)$$

1.3.2.1.2 Équations magnétiques

Les grandeurs magnétiques du flux dans le stator et le flux dans le rotor définis par la matrice suivante:

$$\begin{bmatrix} \hat{e}F_{sa} \\ \hat{e}F_{sb} \\ \hat{e}F_{sc} \\ \hat{e}F_{ra} \\ \hat{e}F_{rb} \\ \hat{e}F_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{e}L_s & M_s & M_s & M_1 & M_3 & M_2 \\ \hat{e}M_s & L_s & M_s & M_2 & M_1 & M_3 \\ \hat{e}M_s & M_s & L_s & M_3 & M_2 & M_1 \\ \hat{e}M_1 & M_3 & M_2 & L_r & M_r & M_r \\ \hat{e}M_2 & M_1 & M_3 & M_r & L_r & M_r \\ \hat{e}M_3 & M_2 & M_1 & M_r & M_r & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{e}i_{sa} \\ \hat{e}i_{sb} \\ \hat{e}i_{sc} \\ \hat{e}i_{ra} \\ \hat{e}i_{rb} \\ \hat{e}i_{rc} \end{bmatrix} \quad (1.4)$$

On peut définir les inductances au stator :

$$[L_{ss}] = \begin{bmatrix} \hat{e}L_s & M_s & M_s \\ \hat{e}M_s & L_s & M_s \\ \hat{e}M_s & M_s & L_s \end{bmatrix} \begin{matrix} \dot{u} \\ \dot{u} \\ \dot{u} \end{matrix} \quad (1.5)$$

L_s : est l'inductance propre du stator

M_s : l'inductance mutuelle au stator

De la même manière, les inductances au rotor sont données par :

$$[L_{rr}] = \begin{bmatrix} \hat{e}L_r & M_r & M_r \\ \hat{e}M_r & L_r & M_r \\ \hat{e}M_r & M_r & L_r \end{bmatrix} \begin{matrix} \dot{u} \\ \dot{u} \\ \dot{u} \end{matrix} \quad (1.6)$$

L_r : est l'inductance propre du rotor

M_r : l'inductance mutuelle au rotor

Et pour les inductances mutuelles entre stator et rotor M_{sr} et entre rotor et stator M_{rs} , on peut écrire :

$$[M_{sr}] = [M_{rs}]^t = M_{sr} \begin{bmatrix} \hat{e} \cos(a) & \cos(a + 2p/3) & \cos(a - 2p/3) \\ \hat{e} \cos(a - 2p/3) & \cos(a) & \cos(a + 2p/3) \\ \hat{e} \cos(a + 2p/3) & \cos(a - 2p/3) & \cos(a) \end{bmatrix} \begin{matrix} \dot{u} \\ \dot{u} \\ \dot{u} \end{matrix} \quad (1.7)$$

Finalement, nous avons :

$$[V_{sabc}] = [R_s][i_{sabc}] + (d/dt)([L_{ss}][i_{sabc}] + [M_{sr}][i_{rabc}]) \quad (1.8)$$

$$[V_{rabc}] = [R_r][i_{rabc}] + (d/dt)([L_{rr}][i_{rabc}] + [M_{rs}][i_{sabc}]) \quad (1.9)$$

1.3.2.1.3 Équations mécaniques

L'équation électromécaniques qui liée le couple électromagnétique avec la vitesse rotorique est donnée par le système d'équations différentielle suivante :

$$J \cdot \frac{dW_r}{dt} = C_e - C_r - f \cdot W_r \quad (1.10)$$

Avec :

$$w_r = p \cdot W_r \quad (1.11)$$

ω_r est la pulsation du vitesse électrique du rotor,

1.3.3 Modélisation dans le repère de Park (dq)

La transformation de Park est la transformation d'un système triphasé dans le repère abc en système biphasé dans le repère qd. Nous avons classiquement le choix entre trois repères. Dans cette transformation, les équations de phase en un système équivalent biphasé sont effectuées grâce à la matrice de transformation de Park [4].

Dans la transformation de Park, on utilise la matrice suivante

$$[P] = \begin{matrix} \begin{matrix} \hat{e} \\ \hat{e} \\ \hat{e} \\ \hat{e} \\ \hat{e} \end{matrix} & \begin{matrix} \cos q & \cos(q - \frac{2p}{3}) & \cos(q - \frac{4p}{3}) \\ \sin q & -\sin(q - \frac{2p}{3}) & -\sin(q - \frac{4p}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{matrix} & \begin{matrix} \hat{u} \\ \hat{u} \\ \hat{u} \\ \hat{u} \\ \hat{u} \end{matrix} \end{matrix} \quad (1.12)$$

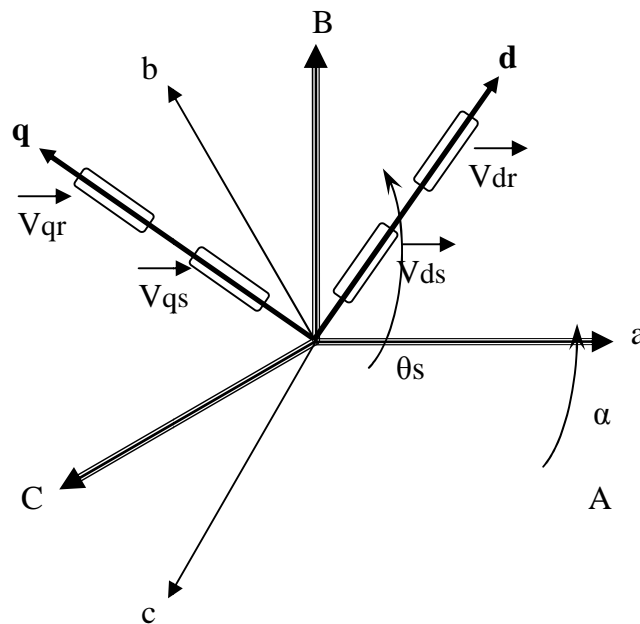


Figure 1.4 Représentation du passage d'un système triphasé à celui biphasé

1.3.3.1 Équations électriques dans le modèle de Park

$$V_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{dF_{ds}}{dt} - \omega_s F_{qs} \quad (1.13)$$

$$V_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{dF_{qs}}{dt} + \omega_s F_{ds} \quad (1.14)$$

$$V_{dr} = R_r \cdot i_{dr} + \frac{dF_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega_r) \cdot F_{qr} = 0. \quad (1.15)$$

$$V_{qr} = R_r \cdot i_{qr} + \frac{dF_{qr}}{dt} + (\omega_s - \omega_r) \cdot F_{dr} = 0 \quad (1.16)$$

1.3.3.2 Equations magnétiques dans le modèle de Park

$$F_{ds} = L_s \cdot i_{ds} + M \cdot i_{dr}. \quad (1.17)$$

$$F_{dr} = L_r \cdot i_{dr} + M \cdot i_{ds}. \quad (1.18)$$

$$F_{qs} = L_s \cdot i_{qs} + M \cdot i_{qr}. \quad (1.19)$$

$$F_{qr} = L_r \cdot i_{qr} + M \cdot i_{qs}. \quad (1.20)$$

1.3.3.3 Equations mécaniques dans le modèle de Park

$$J \cdot \frac{dW_r}{dt} = C_e - C_r - f \cdot W_r$$

$$C_e = (3/2) \cdot p \cdot M \cdot (i_{rd} \cdot i_{sq} - i_{sd} \cdot i_{rq}). \quad (1.21)$$

$$w_r = p \cdot W_r.$$

1.3.3.4 Choix du repère de référence

Il existe donc, trois choix important concernant l'orientation du repère d'axes (d-q) qui dépendent de l'objectif de l'application, et de la commande.

▼ Référentiel (d-q) lié au stator (α - β):

Caractériser $\frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s = 0$, et par conséquent $\frac{d\theta_r}{dt} = -\omega$. Ce référentiel est immobile par rapport au stator, ce référentiel est utilisé pour l'étude du démarrage et freinage des machines à courant alternatif ainsi que l'observation et la commande non linéaire, le système d'équations est donné par :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s \cdot I_{ds} + \frac{d\phi_{ds}}{dt} - \omega_s \phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s \cdot I_{qs} + \frac{d\phi_{qs}}{dt} + \omega_s \phi_{ds} \end{cases} \quad (1.22)$$

▼ Référentiel (d-q) lié au rotor

Caractérisé par $\omega_r = 0$ donc $\omega_s = \omega$, Ce référentiel est utilisé pour l'étude des régimes transitoires dans les machines asynchrones et synchrones. Le système d'équations (1.22) est donné par :

$$\begin{cases} V_{dr} = 0 = R_r \cdot I_{dr} + \frac{d\phi_{dr}}{dt} - (\omega_s - p\omega) \phi_{qr} \\ V_{qr} = 0 = R_r \cdot I_{qr} + \frac{d\phi_{qr}}{dt} + (\omega_s - p\omega) \phi_{dr} \end{cases} \quad (1.23)$$

▼ Référentiel (d-q) lié au champ tournant

Dans ce cas, la vitesse de repère (**d-q**) est la vitesse du synchronisme ($\omega = \omega_s$), est utilisé pour réaliser le contrôle vectoriel du fait que les grandeurs de réglage deviennent continues.

$$\frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s \quad \Rightarrow \quad \omega = \omega_s - \omega_r = \omega_s - p\Omega \quad (1.24)$$

1.3.4 Expression en modèle d'état :

Les équations de la machine en modèle d'état en vue de sa commande en variable d'état.

Les courant rotorique:

$$\begin{cases} I_{dr} = \frac{1}{L_r} (\phi_{dr} - M I_{ds}) \\ I_{qr} = \frac{1}{L_r} (\phi_{qr} - M I_{qs}) \end{cases} \quad (1.25)$$

Le courant dans une phase statorique se calcule en fonction des courant I_{ds}, I_{qs} a partir de la transformée de Park de la façon suivante :

$$I_{as} = \sqrt{\frac{2}{3}} (I_{ds} \cos(\theta_s) - I_{qs} \sin(\theta_s)) \quad (1.26)$$

Les flux statorique :

$$\begin{cases} \phi_{ds} = \frac{M}{L_r} \cdot \phi_{dr} - \left(L_s - \frac{M^2}{L_r} \right) \cdot I_{ds} \\ \phi_{qs} = \left(L_s - \frac{M^2}{L_r} \right) \cdot I_{qs} + \frac{M}{L_r} \cdot \phi_{qr} \end{cases} \quad (1.27)$$

En rapportant ces dernières relations dans (1.21) et (1.22), on aboutira aux systèmes d'équations d'états suivant :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dI_{ds}}{dt} = -\frac{1}{\delta L_s} \left[-\left(R_s + \left(\frac{M}{L_r} \right)^2 \cdot R_r \right) I_{ds} + \delta L_s I_{qs} \omega_s + \frac{R_r M}{L_r^2} \cdot \phi_{dr} + \frac{M}{L_r} + \omega_r \phi_{qr} + V_{ds} \right] \\ \frac{dI_{qs}}{dt} = -\frac{1}{\delta L_s} \left[-\delta L_s I_{ds} \omega_s - \left(R_s + \left(\frac{M}{L_r} \right)^2 \cdot R_r \right) I_{qs} + \frac{R_r M}{L_r^2} \cdot \phi_{qr} + \frac{M}{L_r} + \omega_r \phi_{dr} + V_{qs} \right] \\ \frac{d\phi_{dr}}{dt} = \frac{M R_r}{L_r} I_{ds} - \frac{R_r}{L_r} \phi_{dr} + (\omega_s - \omega_r) \phi_{qr} \\ \frac{d\phi_{qr}}{dt} = \frac{M R_r}{L_r} I_{qs} - \frac{R_r}{L_r} \phi_{qr} + (\omega_s - \omega_r) \phi_{dr} \end{array} \right. \quad (1.28)$$

$$\frac{d}{dt} \omega_r = \frac{1}{j L_r} \cdot P^2 M (I_{qs} \phi_{dr} - I_{qr} \phi_{ds}) - \frac{f_v}{j} \omega_r - P \frac{C_r}{j}$$

Sachant que : $\delta = 1 - \frac{M^2}{L_r L_s}$: est le coefficient de dispersion (1.29)

Le flux rotorique calcule comme suit :

$$\phi_r = \sqrt{\phi_{dr}^2 + \phi_{qr}^2} \quad (1.30)$$

En identifiant le système (I.30) à la forme

$$\frac{dx}{dt} = \mathbf{AX} + \mathbf{BU} \quad (1.31)$$

Avec :

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \\ \phi_{dr} \\ \phi_{qr} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{U} = \begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\delta L_s} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \frac{1}{\delta L_s} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{\delta L_s} \left(R_s + \frac{M^2}{L_r L_r} \right) & \omega_s & \frac{1}{\delta L_s} \cdot \frac{M}{L_r L_r} & \frac{1}{\delta L_s} \frac{M}{L_r} \omega \\ -\omega_s & -\frac{1}{\delta L_s} \left(R_s + \frac{M^2}{L_r L_r} \right) & -\frac{1}{\delta L_s} \frac{M}{L_r} \omega & \frac{1}{\delta L_s} \cdot \frac{M}{L_r L_r} \\ \frac{M}{L_r} & \mathbf{0} & -\frac{1}{L_r} & \omega_s - \omega \\ \mathbf{0} & \frac{M}{L_r} & -(\omega_s - \omega) & -\frac{1}{L_r} \end{bmatrix}$$

Avec :

$T_r = \frac{L_r}{R_r}$: est la constant de temps rotorique[5]:

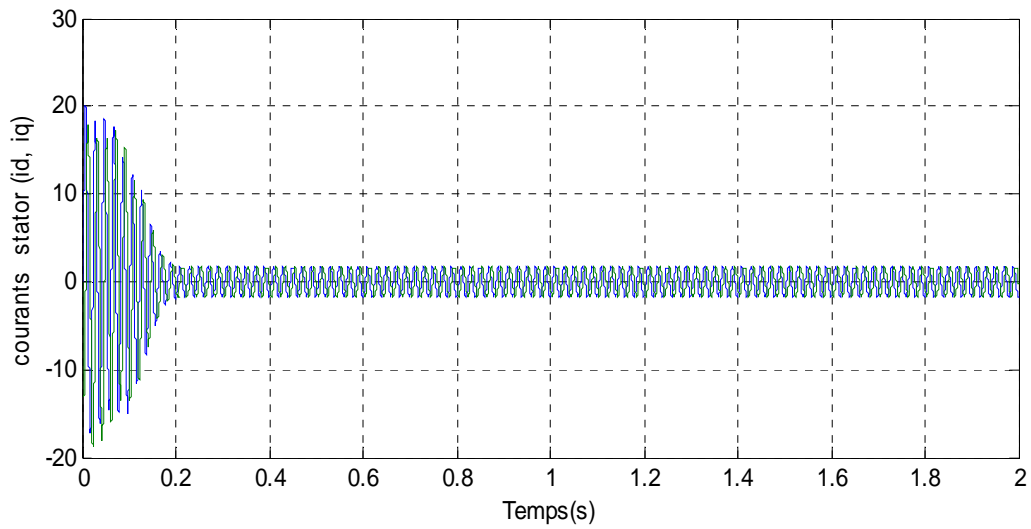


Figure 1.7 Courants (i_d , i_q) du stator (Marche à vide : $C_r=0$)

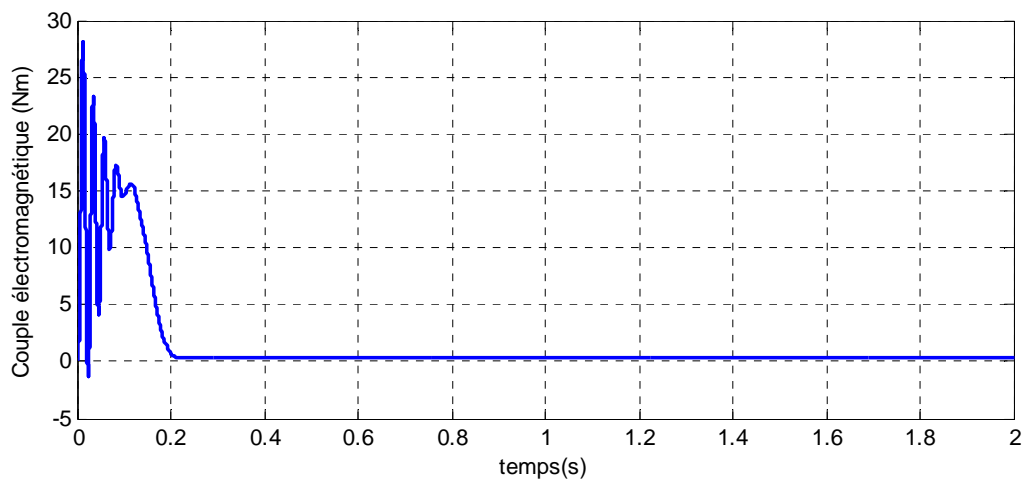


Figure 1.8 Couple électromagnétique (Marche à vide : $C_r=0$ Nm)

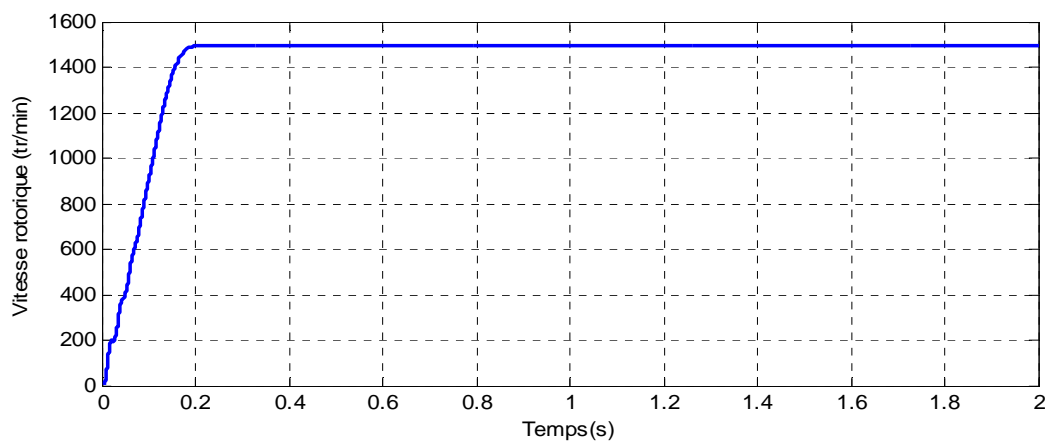


Figure 1.9 Vitesse de rotation de la machine (Marche à vide : $C_r=0$ Nm)

Lors du démarrage de la machine asynchrone à vide, les courants statoriques atteignent une valeur crête de 20 A, cela est dû au fort appel du courant de démarrage afin de générer un couple suffisant pour vaincre l'inertie de la machine, puis les courants restent sinusoïdaux et constants après le régime transitoire de 0,2s. On constate aussi, un régime transitoire du couple atteint la valeur supérieure de 25 N.m. cela est justifié par le bruit engendré lors des démarrages des machines asynchrones ainsi que l'inertie importante que la machine doit vaincre pour démarrer. Après 0,2s la machine atteint le régime permanent et le couple électromagnétique à une valeur nulle, la vitesse croît d'une manière quasi linéaire, après 0,2 s la machine atteint son régime permanent et la vitesse se stabilise à la vitesse de synchronisme (1500 tr/min).

- **Fonctionnement en charge**

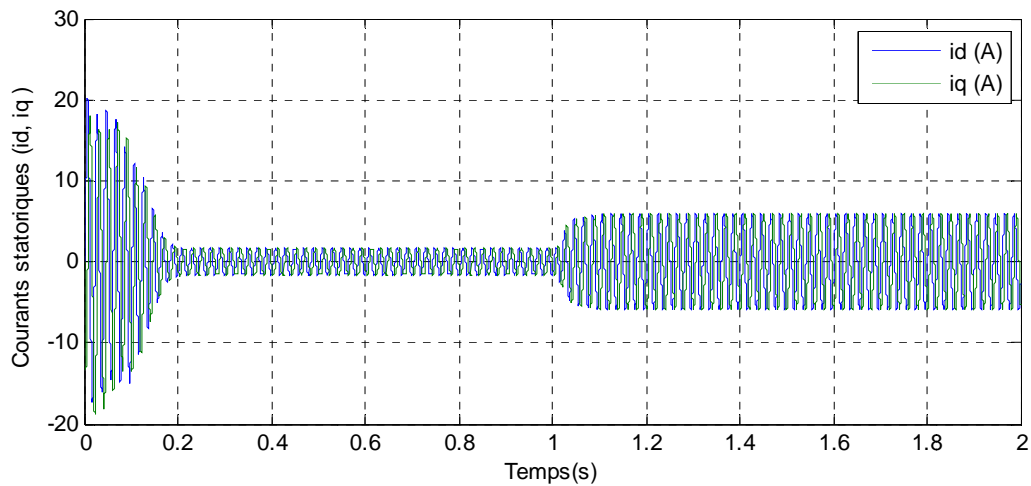


Figure 1.10 Courants (i_d , i_q) du stator (Marche en charge : $C_r=10$ à 1s)

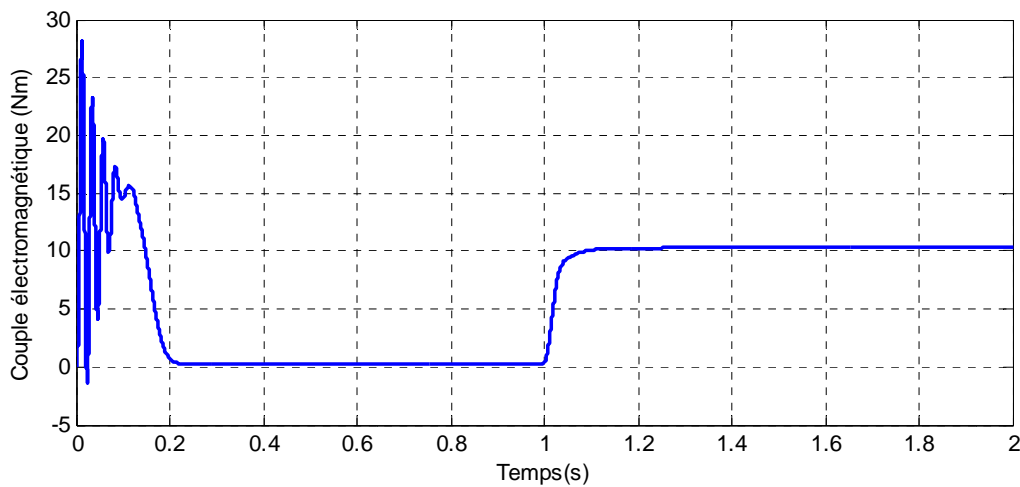


Figure 1.11 Couple électromagnétique (Marche en charge $C_r=10$ Nm à 1s)

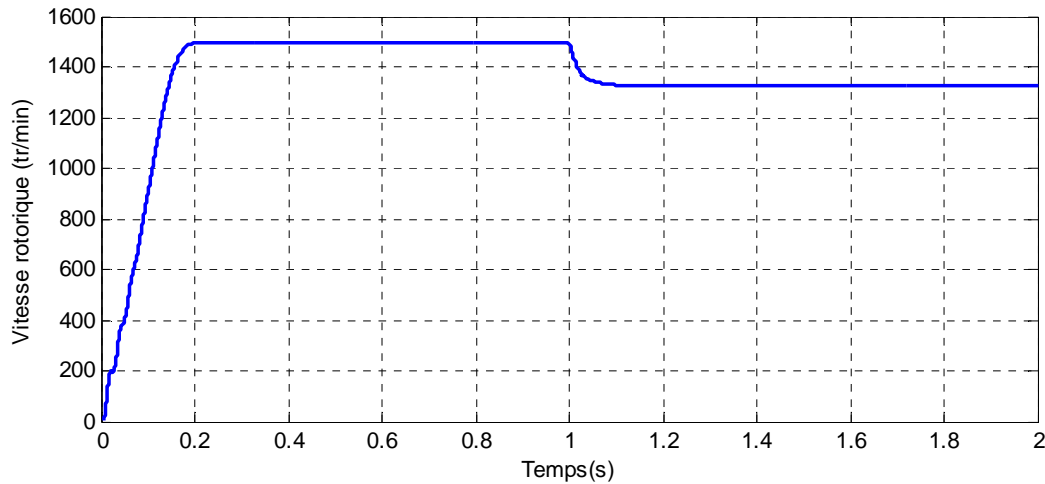


Figure 1.12 Vitesse de rotation de la machine (Marche en charge $C_r=10\text{Nm}$ à 1s)

On impose un couple de charge d'une valeur $C_r=10\text{Nm}$ à l'instant de 1s des, se qui nous permettra de visualiser les résultats de simulation en charge. On constate à l'instant de 1s que les courants statoriques augmentent et oscillent en sinusoïdaux, cette augmentation peut être expliquée par l'augmentation de l'appel de la machine en fonction du couple résistant de 10Nm appliqué à la machine, la vitesse chute et elle se stabilise à une valeur inférieure de 1400 tr/min, par conséquent, le couple électromagnétique C_{em} augmente à 10 N.m.

1.5 Conclusion

Ce chapitre présente la modélisation et la simulation d'un moteur asynchrone à cage en utilisant le logiciel MATLAB/SIMULINK. Ce type de moteur s'est imposé dans l'industrie grâce à sa robustesse et sa simplicité de construction. Dans ce chapitre, le processus de démarrage du moteur, suivi de l'application d'une charge entraînée a été modélisé et simulé. Les résultats obtenus montrent justesse du modèle développé.

2.1 Introduction

L'onduleur de tension est le convertisseur le plus utilisé pour l'alimentation des machines alternatives dans les entraînements à vitesse variable. Leur fonctionnement vise à modifier séquentiellement les liaisons entre l'alimentation et la charge. Cette modification dite commutation est réalisée par un circuit à commande adaptée qui fournit des ordres temporels de déclenchement des interrupteurs.

Dans ce chapitre nous commençons par présenter les structures ainsi que le modèle de commande des onduleurs à deux niveaux puis trois niveaux et ensuite multi-niveaux à diodes flottantes, avec ces différentes configurations possibles. En plus la mise en simulation du chaque types de l'onduleur avec une charge RL.

2.1.1 Définition de l'onduleur

Un onduleur est un convertisseur statique assurant la conversion d'énergie électrique de la forme continue (DC) à la forme alternative (AC) de tension réglable en fréquence et en valeur efficaces. La figure 2.1 montre le schéma de principe d'un onduleur.

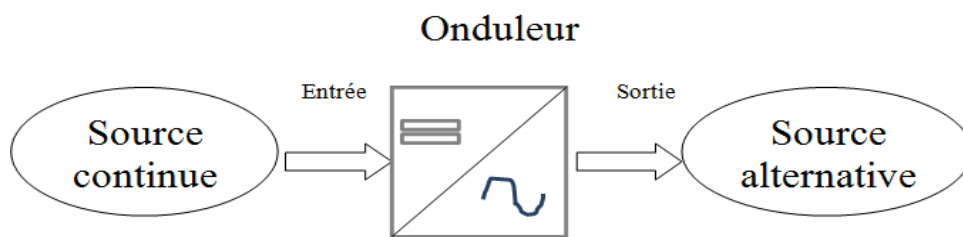


Figure 2.1 Schéma de principe de la conversion Continu - Alternative (DC – AC)

2.2 Classification des onduleurs

Les onduleurs sont en général classés selon les modes de commutation de leurs interrupteurs :

2.2.1 Onduleur autonome

C'est un système qui nécessite des composants commandés à la fois à la fermeture et à l'ouverture, de fréquence variable, dont les instants de commutations sont imposés par des circuits externes la charge est quelconque cet onduleur n'est pas réversible [6].

2.2.2 Onduleur non autonome

Dans ce cas, les composants utilisés peuvent être de simples thyristors commandés uniquement à la fermeture et la commutation est «naturelle » contrairement à l'onduleur autonome.

L'application principale de ce type d'onduleur se trouve dans les variateurs pour des moteurs synchrones de très forte puissance où les thyristors sont souvent les seuls composants utilisables [7].

2.3 Type des onduleurs

2.3.1 Un onduleur de courant

Un onduleur de courant est alimenté par un générateur à courant continu du type source de courant, la source de courant du générateur est obtenue en plaçant en série avec ses bornes d'accès une inductance de forte valeur, figure(2.2).

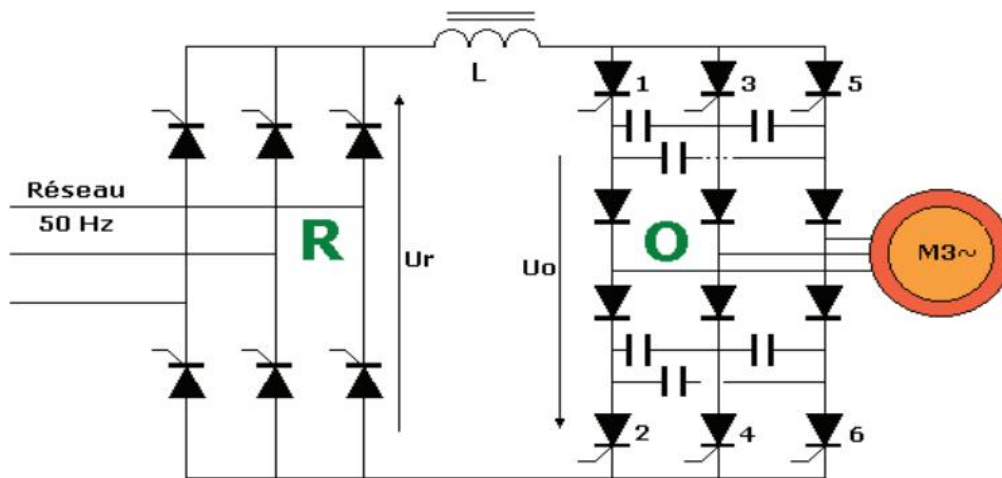


Figure 2.2 onduleur de courant triphasé à deux niveaux

2.3.2 Un onduleur de tension

Un onduleur de tension est alimenté par un générateur à courant continu du type source de tension, la source de tension du générateur est obtenue en plaçant en parallèle avec ses bornes d'accès un condensateur C de forte valeur ou un filtre L-C, figure (2.3)[8].

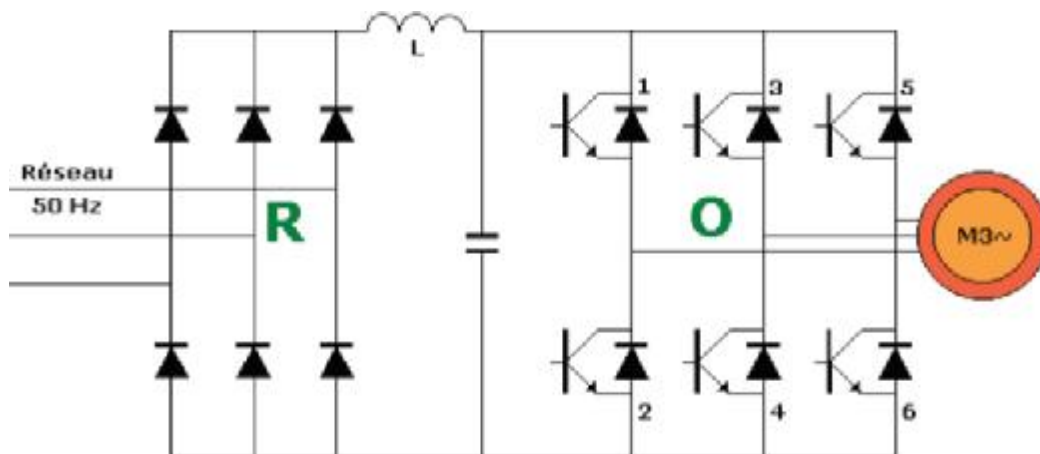


Figure 2.3 onduleur de tension triphasé à deux niveaux

2.4 Modélisation de l'onduleur de tension à deux niveaux

On considère que l'onduleur est un convertisseur idéal figure (2.4).

Chaque transistor K_i est modélisé par un interrupteur idéal K_i associé à une diode D_i montée en antiparallèle.

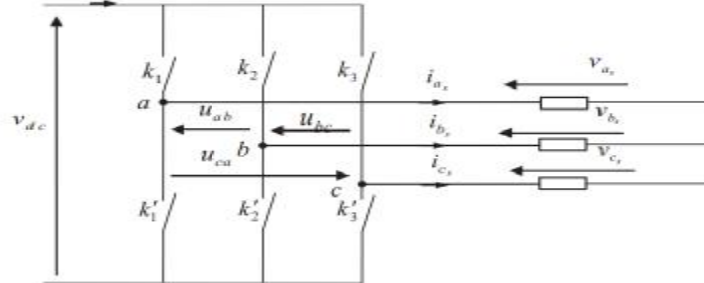


Figure 2.4 Structure d'un onduleur à deux niveaux

Cependant :

L'état $S_i = 1$ représente le mode passant de K_i ($i=a, b, c$)

L'état $S_i = 0$ représente le mode bloqué de K_i ($i=a, b, c$).

$$S = \begin{cases} 1 & \text{si } K_i \text{ est fermé} \\ 0 & \text{si } K_i \text{ est ouvert} \end{cases} \quad (2.1)$$

Pour simplifier l'étude, on supposera que :

- ✓ la commutation des interrupteurs est instantanée ;
- ✓ la chute de tension aux bornes des interrupteurs est négligeable.
- ✓ la charge triphasée est équilibrée, couplée en étoile avec neutre isolé.

Les tensions composées, et U_{ca} sont obtenues à partir de ces relations.

$$\begin{cases} U_{ab} = V_{a0} - V_{b0} \\ U_{bc} = V_{b0} - V_{c0} \\ U_{ca} = V_{c0} - V_{a0} \end{cases} \quad (2.2)$$

Tel que, et V_{c0} sont les tensions d'entrée de l'onduleur. Elles sont référencées par rapport à un point milieu « o » d'un diviseur fictif d'entrée.

$$\begin{cases} V_{a0} = V_{an} + V_{n0} \\ V_{b0} = V_{bn} + V_{n0} \\ V_{c0} = V_{cn} + V_{n0} \end{cases} \quad (2.3)$$

V_{an} , V_{bn} et V_{cn} sont les tensions simple de la machine. Et V_{n0} est la tension fictive entre le neutre de la MAS et le point fictif « o ».

$$V_{j0} = V_{j0} - V_0 = \begin{cases} \frac{U_{dc}}{2} \text{ si } K_j \text{ fermé} (S_j = 1) \\ -\frac{U_{dc}}{2} \text{ si } K_j \text{ ouvert} (S_j = 0) \end{cases} \quad j = a ; b ; c \quad (2.4)$$

Après redressement, la tension continue filtrée U_{dc} est appliquée à l'onduleur.

Le système V_{an} , V_{bn} et V_{cn} étant équilibré, donc : $V_{an}+V_{bn}+V_{cn}=0$

On peut écrire :

$$V_{n0} = \frac{1}{3}(V_{ao}+V_{bo}+V_{co}) \quad (2.5)$$

On obtient :

$$\begin{cases} V_{an} = \frac{2}{3}V_{ao} - \frac{1}{3}V_{bo} - \frac{1}{3}V_{co} \\ V_{bn} = -\frac{1}{3}V_{ao} + \frac{2}{3}V_{bo} - \frac{1}{3}V_{co} \\ V_{cn} = -\frac{1}{3}V_{ao} - \frac{1}{3}V_{bo} + \frac{2}{3}V_{co} \end{cases} \quad (2.6)$$

Nous avons exprimés V_{an} , V_{bn} et V_{cn} considérées comme des tensions de sortie de l'onduleur en fonction de V_{ao} , comme tensions d'entrée, et par conséquent la modélisation de l'onduleur par la matrice [T].

On obtient les tensions aux bornes de la charge en fonction des valeurs booléennes des états des interrupteurs :

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = U_{dc} \begin{bmatrix} \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} \\ -\frac{1}{3} & \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} \\ -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} & \frac{2}{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} ; [V_{jn}] = U_{dc}[T][S_j] \quad (2.7)$$

2.4.1 Stratégies de commande d'un onduleur à deux niveaux par MLI

La modulation de largeur d'impulsions (MLI) consiste à adopter une fréquence de commutation supérieure à la fréquence des grandeurs de sortie et à former une succession de créneaux de largeurs convenables [11].

La MLI utilise le principe d'intersection entre une référence sinusoïdale de fréquence f_m appelé modulante, et un signal triangulaire de haute fréquence f_p appelé la porteuse, afin de déterminer les instants de commutation [12].

Les paramètres essentiels de la MLI sont :

Ø **L'indice de modulation (m)** égal au rapport de la fréquence de la porteuse à la fréquence du modulante. $m=f_p/(2.8)$

Ø **Le coefficient de réglage en tension (r)** égal au rapport de l'amplitude de la tension de référence (V_m) à la valeur crête de l'onde de la porteuse V_p . $r=V_m/V_p(2.9)$

Le schéma de principe et les signaux de commande sont donnés par les figures suivantes :

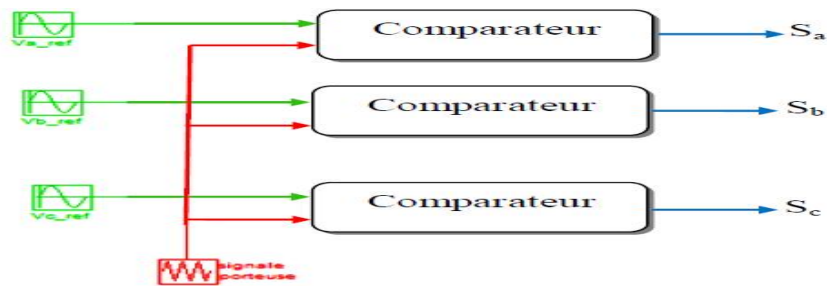


Figure 2.5 schéma de principe de la MLI sinus-triangle

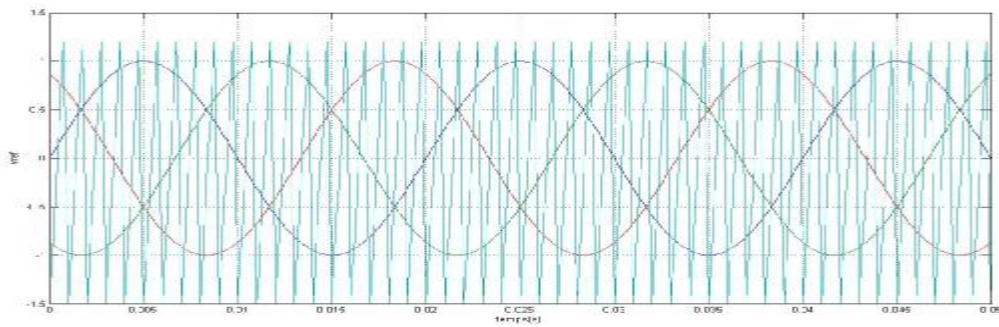


Figure 2.6 Simulation de la porteuse et la modulante

2.4.2 Simulation de l'onduleur à deux niveaux avec charge RL

Dans ce cas, on associe l'onduleur de tension à deux niveaux avec charge RL, comme montre la figure 2.7.

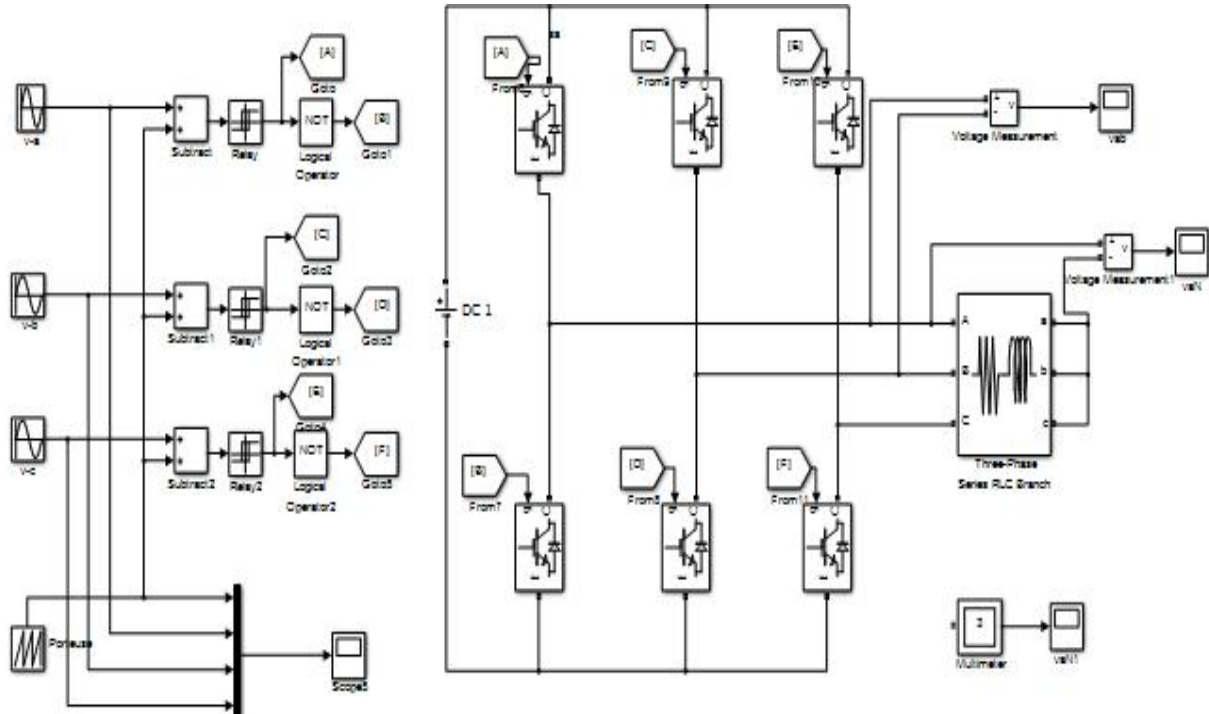


Figure 2.7 Schéma bloc de la simulation d'un onduleur à deux niveaux avec charge RL

Les figures 2.8 et 2.9 présentent l'allure de la tension simple à la sortie de la phase a du convertisseur ainsi que son spectre harmonique. On remarque que la forme de la tension est sinusoïdale et que son spectre harmonique est de 108.41.

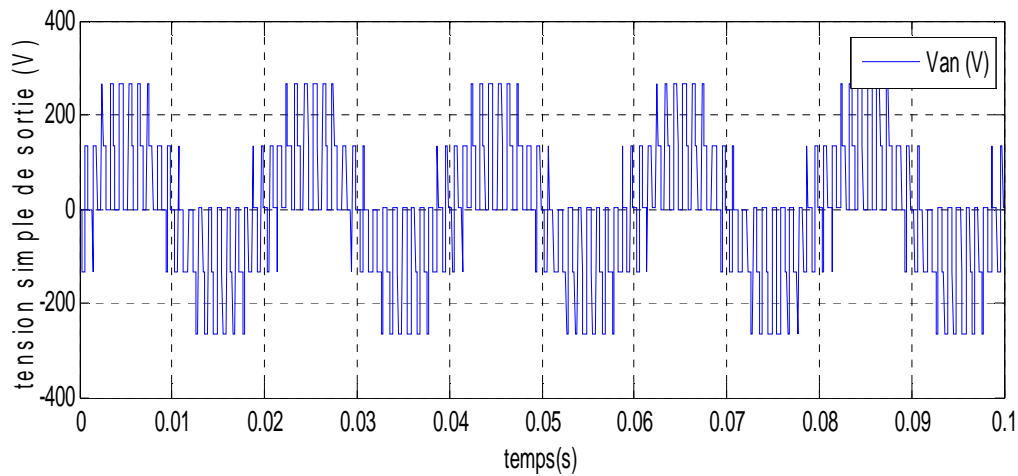


Figure 2.8 Tension simple de sortie d'un onduleur à deux niveaux

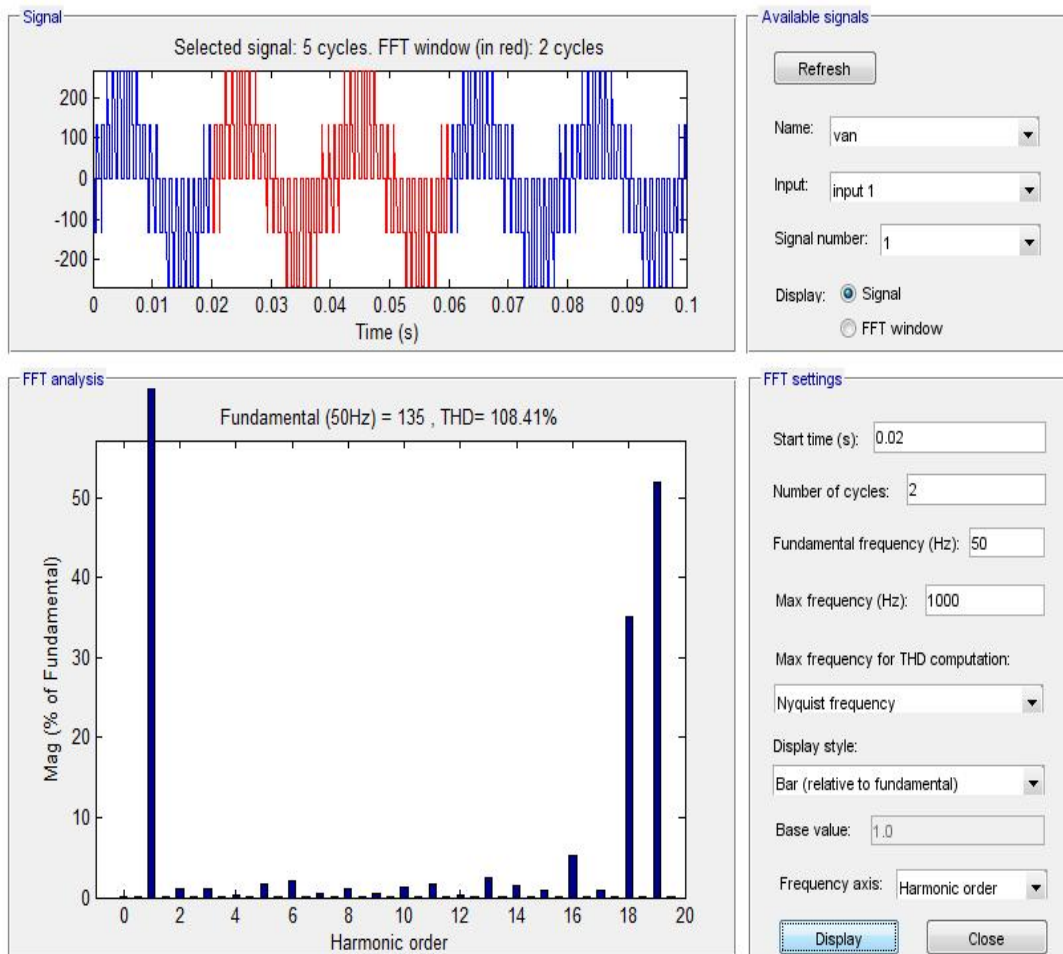


Figure 2.9 Spectre harmonique de la tension de sortie simple d'un onduleur à deux niveaux

La figure 2.10 illustre l'allure de la tension composée, on remarque aussi que la forme de tension est à deux niveaux, et à une forme sinusoïdale symétrique.

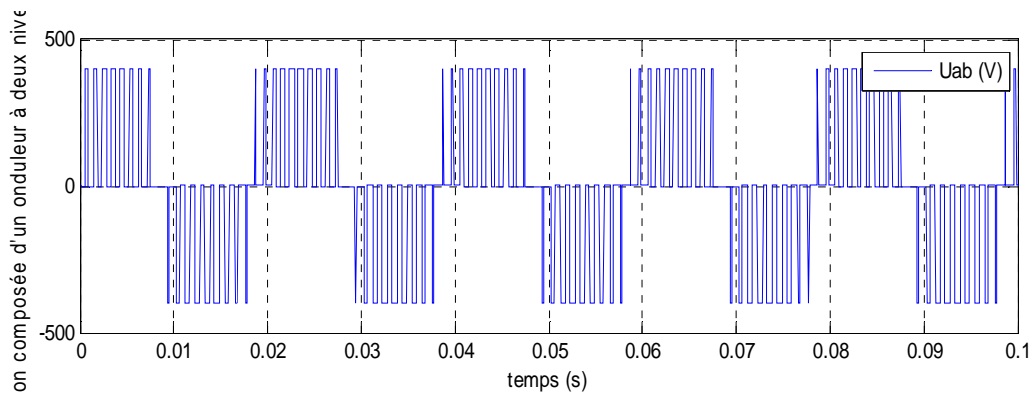


Figure 2.10 Tension composée de sortie d'un onduleur à deux niveaux

Les deux figures 2.11, 2.12 présentent la forme du courant de sortie de la phase à du convertisseur pour une charge RL ainsi que son spectre harmonique. Et remarque que le THD est d'une valeur de 6.9%

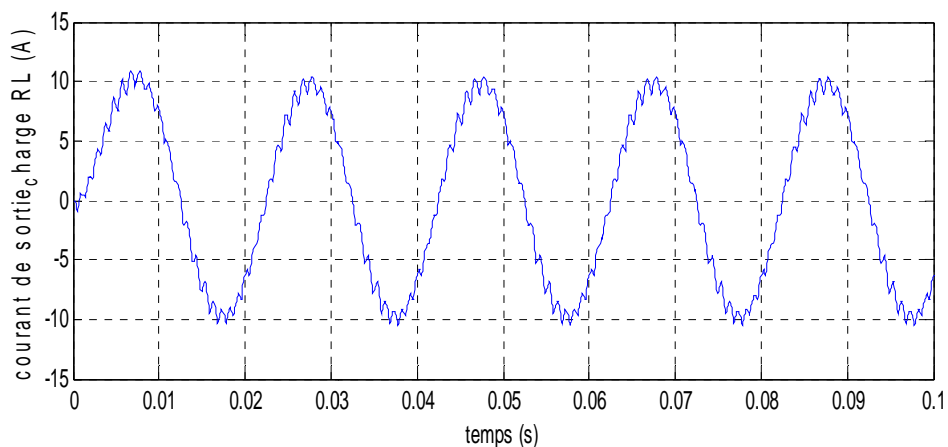


Figure 2.11 Courant de sortie d'un onduleur à deux niveaux pour une charge RL

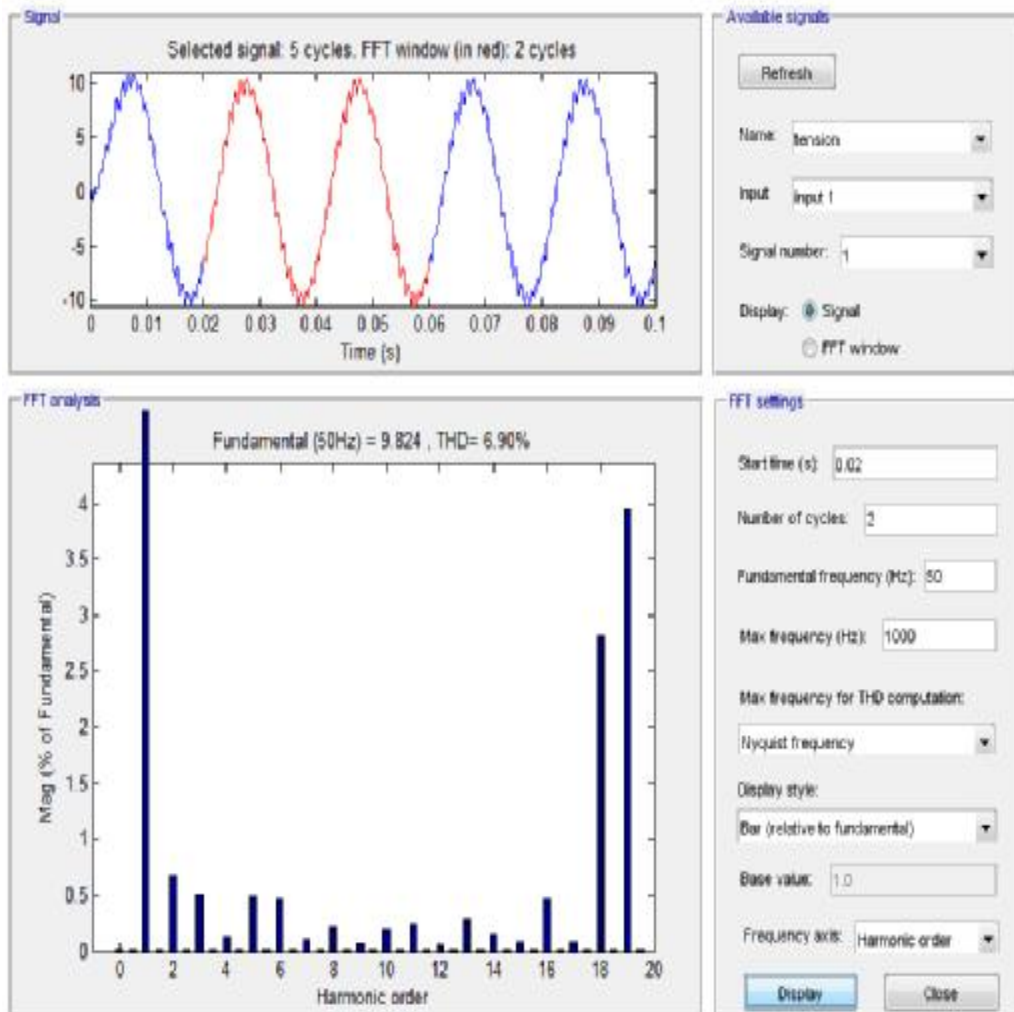


Figure 2.12 Spectre harmonique du courant de sortie d'un onduleur à deux niveaux pour une charge résistive

2.5 Simulation de association machine asynchrone avec onduleur à deux niveaux

Dans ce cas, nous avons associé à la machine asynchrone (MAS) avec l'onduleur de tension à deux niveaux, pour cela nous avons provoqué un couple de charge à l'instant $t=1.5$ de valeur $C_r=20$ N.m. comme montre la figure 3.8 ;

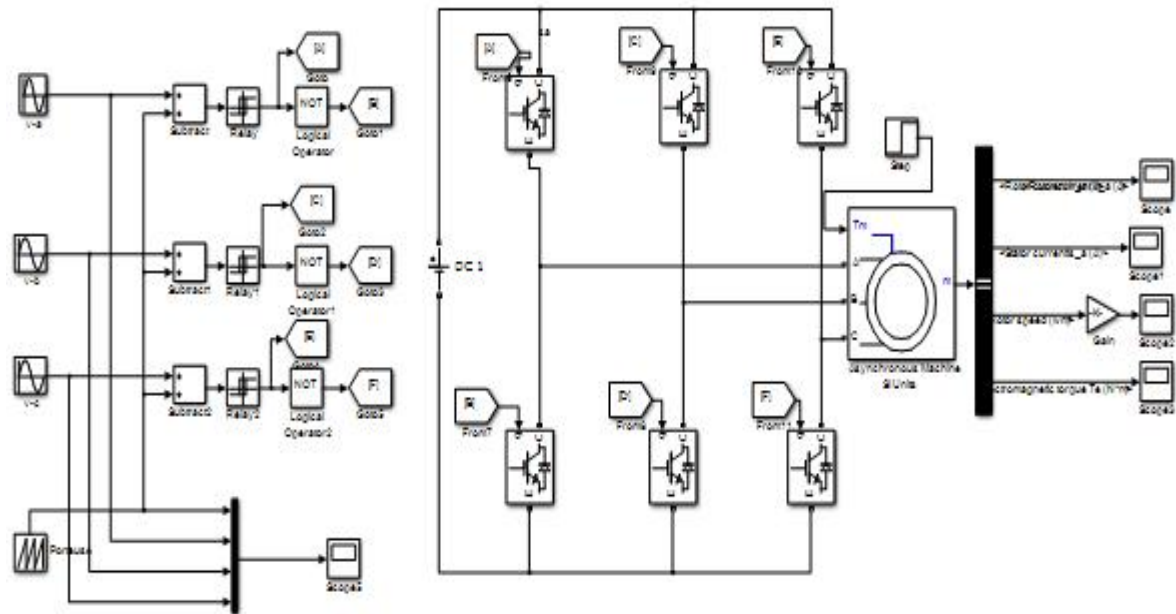


Figure 2.13 Schéma bloc de la simulation d'un onduleur à deux niveaux avec machine asynchrone

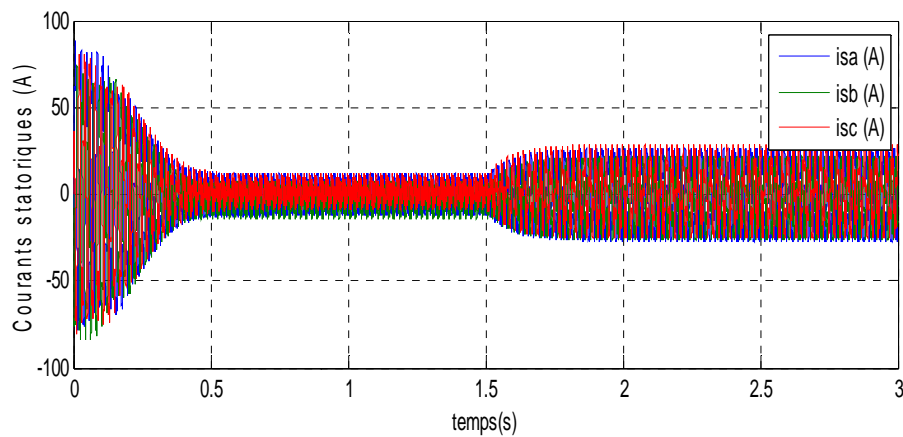


Figure 2.14 courants statoriques de la machine pour un onduleur à deux niveaux

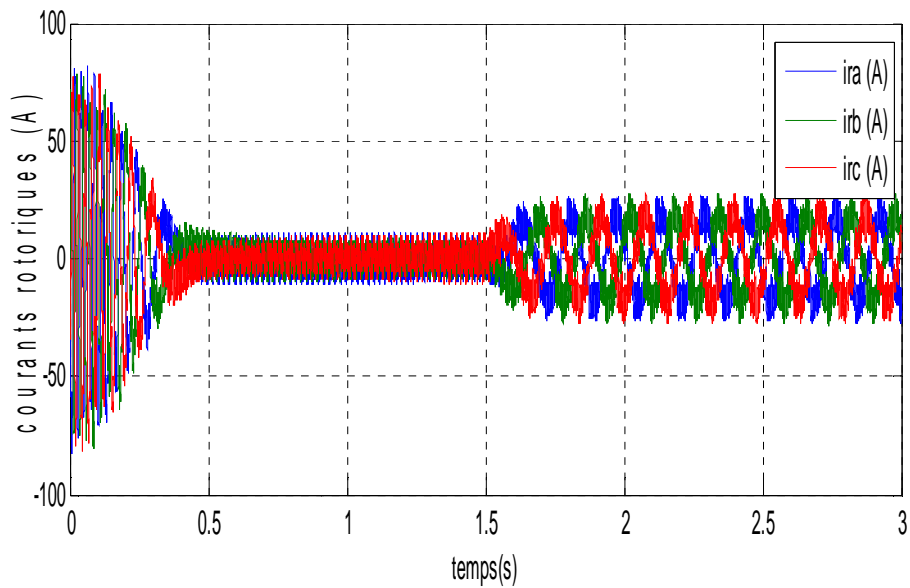


Figure 2.15 courants rotoriques de la machine pour un onduleur à deux niveaux

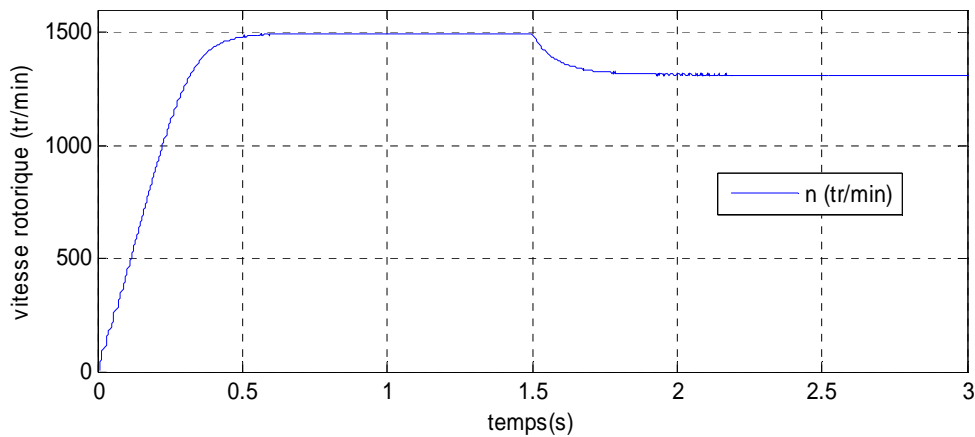


Figure 2.16 Vitesse de rotation de la machine pour un onduleur à deux niveaux

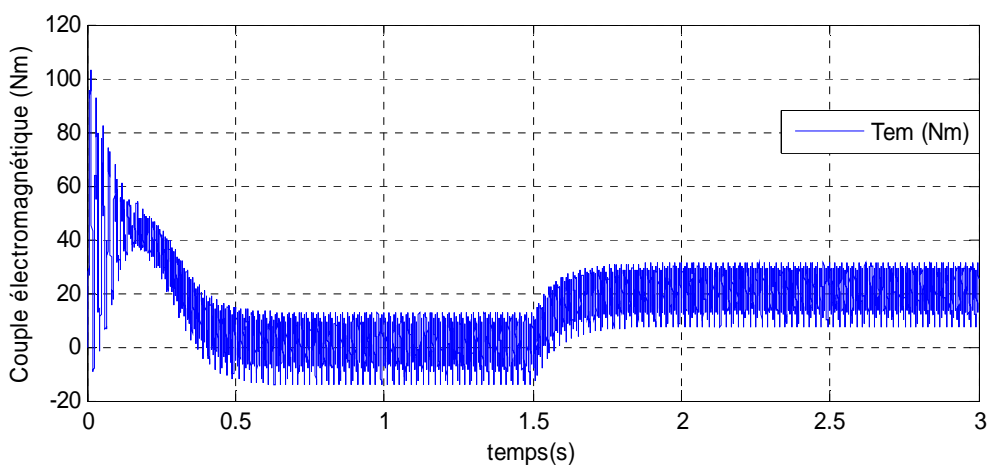


Figure 2.17 Couple électromagnétique de la machine pour un onduleur à deux niveaux

Dans les figures ci-dessous, on remarque que les grandeurs électriques de la machines dans la présence d'un onduleur à deux niveaux sont des bonnes performances, les courants

statoriques ainsi que les courants rotoriques sous formes purement sinusoïdales après un régime transitoire et fonctionnement à vide entre l'instant 0 et 1.5s. L'introduction d'un couple de charge de 20Nm à partir de 1.5s, les grandeurs électriques restent sous formes sinusoïdales avec une augmentation de leurs amplitudes. Les mêmes remarques enregistrés pour les grandeurs couple et vitesse, la vitesse se stabilise à 1500 pour un fonctionnement à vide et elle va diminuer lorsque la machine est chargée à l'instant 1.5s due à la présence du couple de charge. Le couple électromagnétique est nul lorsque la machine fonctionne à vide puis il est égale le couple de charge de 10Nm, dont le fonctionnement en charge de la machine.

2.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié la modélisation et la simulation des trois types des onduleurs de tension à deux niveaux et trois niveaux et multi-niveaux avec une charge RL. Les résultats obtenus montrent la validité du modèle, mettent en évidence la qualité de la forme des grandeurs électriques à la sortie de l'onduleur

C'est ainsi qu'on a introduit la notion de fonction de connexion des demi-bas par analogie à la fonction de connexion des interrupteurs. On a également défini pour l'onduleur à cinq niveaux, son unique commande complémentaire possible afin d'avoir un fonctionnement totalement commandable.

Le modèle de l'onduleur multi-niveaux à commande MLI élaboré dans ce chapitre a donné des satisfactions côté grandeurs électriques, les résultats obtenus confirment les performances électriques du modèle proposé.

3.1 Introduction

Les différentes applications industrielles des variateurs asynchrones nécessitent des performances statiques et dynamiques élevées. Pour assurer le bon fonctionnement de la commande, il faut disposer d'une excellente information provenant de la machine à contrôler. Le diagnostic de défauts des machines électriques a bénéficié d'un intérêt intense de recherche. 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.

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

3.2 Détection et localisation de défaut

3.2.1 Détection de défaut

La détection de défaut est une opération qui consiste à déterminer l'apparition et l'instant d'occurrence d'un défaut. Cette fonction peut être obtenue en utilisant le résidu $r(t)$ généré en comparant le comportement du modèle du système à celui du système réel. Idéalement un résidu est nul lorsque le système est en fonctionnement normal. Dans les méthodes de diagnostic à base d'observateurs, généralement, le résidu $r(t)$ est formé par la comparaison des sorties mesurées et estimées:

$$r(t) = y(t) - \hat{y}(t)$$

Le vecteur de résidu $r(t)$ permet la détection d'un défaut $f(t)$.

Dans des situations réelles, le résidu $r(t)$ en l'absence de défaut est à moyenne nulle à cause de la présence de bruit. Afin de pouvoir détecter un défaut le résidu $r(t)$ est comparé à un seuil J_s défini en fonction des erreurs de modélisation.

On choisit la logique de décision suivante:

- $r(t) < j_s$: pas de défaut détecté.
- $r(t) > j_s$: présence de défaut.

3.2.2 Localisation de défaut

Après la détection d'un défaut dans le système, il est important de pouvoir situer exactement le composant affecté. Cette étape s'appelle la localisation de défaut. Elle s'appuie fréquemment sur la génération de résidus de manière à ce qu'un ensemble de ces résidus soit sensible à certains défauts et insensible aux autres défauts, l'utilisation d'un banc d'observateurs est une autre méthode de localisation défauts ou le nombre d'observateurs à intégrer dans le banc dépend du nombre de défauts à détecter et à localiser.

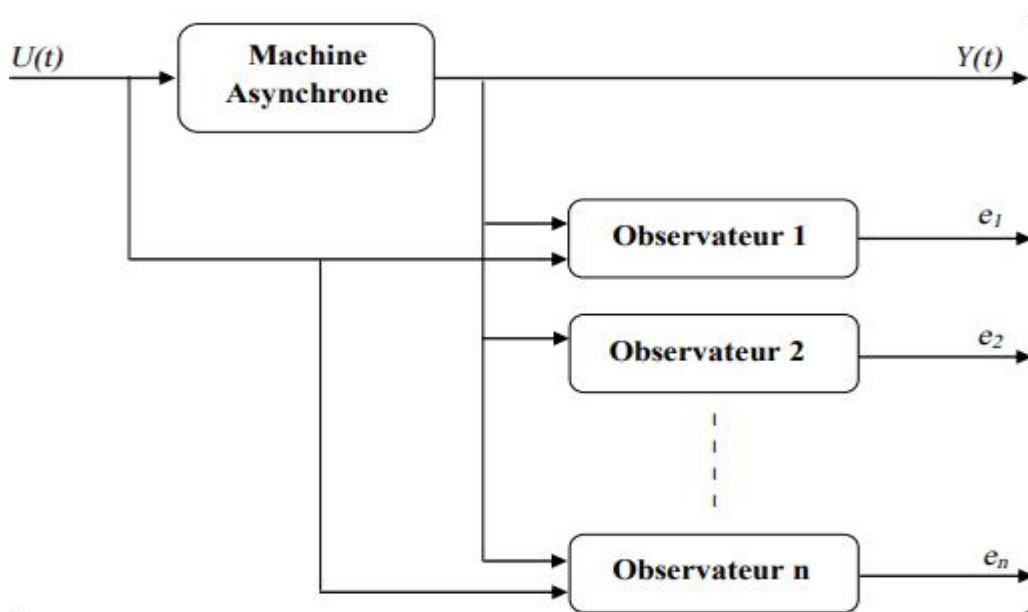


Figure 3.1 Architecture d'un banc d'observateur.

3.3 Diagnostic de la machine asynchrone

Les différents défauts présentés précédemment provoquent généralement des couples pulsatoires, des fluctuations de vitesse, l'augmentation du bruit et des vibrations, le changement des résidus de courants, l'échauffement de la machine asynchrone et la variation

des paramètres électriques, c'est pour cela que le diagnostic des machines asynchrones est souvent basé sur la surveillance de ces indicateurs.

Deux approches différentes peuvent être utilisées, le diagnostic basé sur des algorithmes d'observations (approche modèle) et celui basé sur le traitement des signaux mesurables. Dans cette section nous donnerons un aperçu sur l'état de l'art du diagnostic de la MAS par l'utilisation des observateurs.

3.3.1 Différentes étapes du diagnostic

La sélection de la méthode de diagnostic la plus appropriée à un système industriel donné ne peut se faire qu'après un recensement des besoins et des connaissances disponibles. L'inventaire des éléments à étudier est le suivant :

- Nature des causes de défaillances à localiser.
- Connaissance des symptômes associés aux défaillances induites par les causes,
- Maîtrise des moyens de mesure des symptômes.
- Maîtrise des moyens de traitement des symptômes.
- Connaissance des mécanismes physiques entre les causes et les effets.
- Inventaire du retour d'expérience.
- Recensement des expertises disponibles.
- Définition du niveau de confiance dans le diagnostic.
- Identification des utilisateurs finaux du diagnostic.

La procédure du diagnostic de défaillances et de dégradations susceptibles d'affecter les différentes entités d'un processus industriel, s'articule autour des étapes suivantes :

- L'extraction des informations à partir de moyens de mesures appropriées ou d'observations réalisées lors des rondes par les personnels de surveillance.
- L'élaboration des caractéristiques et des signatures associées à des symptômes.
- La détection d'un dysfonctionnement.
- La mise en œuvre d'une méthode de diagnostic de la défaillance ou de la dégradation à partir de l'utilisation des connaissances sur les relations de cause à effet.
 - La prise de décision (arrêt de l'installation ou reconfiguration).

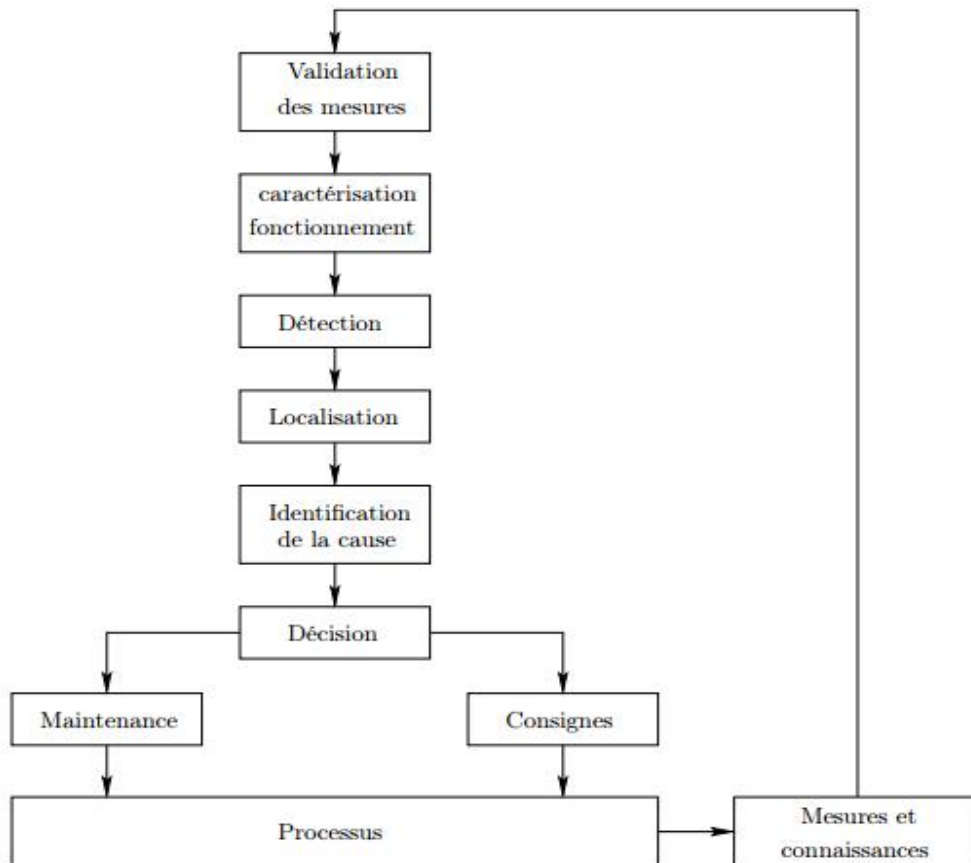


Figure 3.2 Etapes du diagnostic industriel

3.3.1.1 Acquisition des données

Cette fonction doit fournir une image du procédé. Les fonctions suivantes doivent être réalisées :

- Conditionnement et prétraitement du signal.
- Validation du signal de mesure.

3.3.1.2 Étape d'élaboration d'indicateurs de défauts

À partir des mesures réalisées et des observations issues des opérateurs en charge de l'installation, il s'agit de construire des indicateurs permettant de mettre en évidence les éventuels défauts pouvant apparaître au sein du système. Dans le domaine de diagnostic, les indicateurs de défauts sont couramment dénommés les résidus aux symptômes. Un résidu représente un écart entre une grandeur estimées et mesurées. Cet écart de comportement doit donc être idéalement nul en l'absence de défaut et différent de zéro dans le cas contraire.

3.3.1.3 Étape de détection

C'est l'opération qui permet de décider si le système est en fonctionnement normal ou non.

- Probabilité de fausse détection : conduit à des arrêts ou des reconfigurations inutiles,
- Probabilité de non détection : peut conduire à une panne, intolérable dans les systèmes à haut niveau de sécurité (aéronautique, nucléaire, ...etc.).

3.3.1.4 Étape de localisation

La localisation suit l'étape de détection ; elle attribue le défaut à un sous système particulier : capteur, actionneur, organe de commande, processus, ...etc.

3.3.1.5 Etape de prise de décision

Le fonctionnement incorrect du système étant constaté, il s'agit de décider de la marche à suivre afin de conserver les performances souhaité du système sous surveillance. Cette prise de décision doit permettre de générer, éventuellement sous le contrôle d'un opérateur humain, les actions correctrices nécessaires à un retour à la normale du fonctionnement de l'installation.

3.3.2 Méthodes de diagnostic

Dans cette partie, on présente quelques méthodes utilisées dans le domaine du diagnostic des systèmes. Le but n'est donc pas de faire une synthèse exhaustive de l'existant, mais de montrer la richesse et les possibilités qui s'offrent aux concepteurs de systèmes de diagnostic.

3.3.2.1 Méthodes de diagnostic avec modèle analytique

Ces méthodes de détection reposent sur des connaissances a priori du système. Elles supposent la connaissance des modèles et des paramètres représentant le processus physique à étudier. La comparaison des signaux expérimentaux représentant le fonctionnement du système et des signaux générés par les modèles (ou des paramètres estimés) permet la détection ainsi que l'identification de la défaillance susceptible de se produire. Ces techniques supposent la connaissance de la plage de variation de ces modèles et de ces paramètres selon les conditions de fonctionnement du système. Ces techniques peuvent être classées en trois catégories :

▼ Techniques d'estimation d'état

Les modèles analytiques font intervenir un nombre fini de variables internes, appelés aussi variables d'état. Ces variables sont généralement non mesurables pour des raisons d'inaccessibilité, elles peuvent être dépourvues de sens physique ou le coût d'installation de capteurs est trop élevé. Comme l'évolution temporelle du système est caractérisée par l'évolution de ces variables, on a souvent recours à des techniques d'estimation (capteurs logiciels) pour suivre l'évolution de leurs valeurs. La figure 3.3 présente le schéma de principe de l'estimation d'état à partir des grandeurs mesurées (les signaux d'entrée et les signaux de sortie du système).

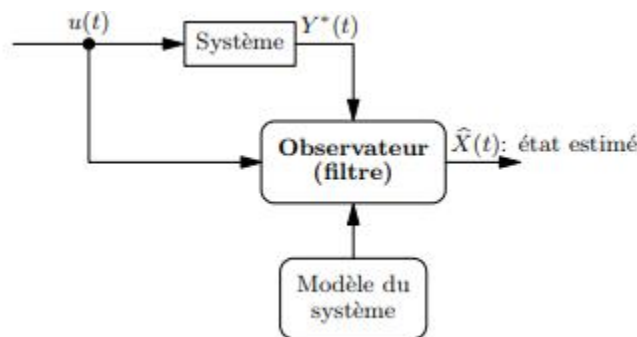


Figure 3.3 Principe de l'estimation d'état

Les travaux fondamentaux proposent deux manières différentes pour la reconstruction de l'état du système en connaissant son modèle mathématique. Les techniques qui découlent de ces deux concepts sont le filtre de Kalman et l'observateur de Luenberger. Des techniques se basant sur une représentation linéaire autour d'un point de fonctionnement du système, ont permis d'adapter ces techniques aux modèles non linéaires.

Nous pouvons citer comme exemple le filtre de Kalman étendu et l'observateur de Luenberger Étendu. Nous pouvons citer aussi d'autres techniques applicables pour les systèmes qui ne peuvent pas être linéaires par un changement de coordonnées, comme les observateurs à grand gain, les observateurs à gain adaptatif ou la combinaison des observateurs de type grand gain et du filtre de Kalman.

Le cas du Filtre de Kalman étendu, estimant des variables d'état et des paramètres, nous renvoie aux techniques d'identification. Comme exemple, dans le domaine de la surveillance et du diagnostic de la machine asynchrone, nous pouvons citer l'estimation des

courants rotoriques ou des flux, sur la base du modèle de Park de la machine asynchrone, qui peut nous renseigner sur la présence de certains types de défaut, ces estimations étant utilisées par ailleurs par les algorithmes de commande.

▼ Technique de génération de résidus :

Les résidus sont des signaux qui reflètent l'écart entre un modèle et le système à surveiller, comme indique la figure 3.4. Ces résidus dépendent de

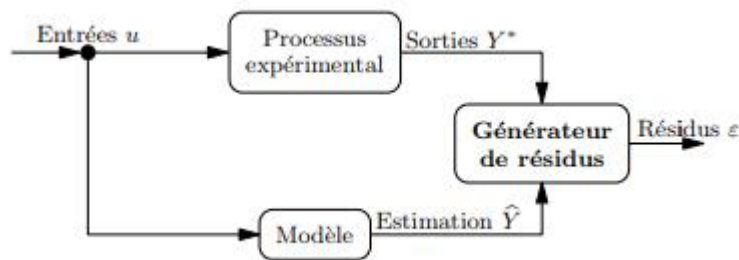


Figure 3.4 Principe génération des résidus

La technique avec laquelle ils ont été générés. Ces techniques d'extraction des résidus visent à fournir des signaux significatifs et exploitables pour détecter la présence d'une défaillance spécifique. En mode sain, ces résidus doivent s'approcher de zéro et refléter la présence d'un défaut en prenant des valeurs significatives.

Une autre technique de génération se base sur les relations de redondance analytique (ARR) [CHR 99] afin de fournir des résidus robustes aux variations des résistances statorique et rotorique de la machine, ce qui a permis de fournir un détecteur fiable de dysfonctionnement au niveau du stator ou du rotor.

Toutefois, plusieurs études ont montré que ces techniques de générations de résidus sont mieux adaptées à la détection de défauts d'actionneurs et surtout de capteurs [CHR 99]. En pratique, les défauts internes sont mieux détectés par des techniques d'identification.

▼ Techniques d'identification :

Les techniques d'identification ont pour objectif de déterminer un modèle dynamique du système à surveiller à partir de mesures expérimentales, d'entrée et de sortie. L'idée fondamentale est que les paramètres caractérisant ce modèle identifié vont être sensibles aux

défauts affectant la machine, et vont donc permettre par leurs variations de caractériser ces défauts ; on trouvera dans [ISE 93] une formalisation de ce principe.

L'estimation des paramètres du modèle est assurée par un algorithme de minimisation de l'erreur entre la sortie du modèle et celle de la machine, la figure 3.5 traduit cette procédure, appelée aussi méthode du modèle.

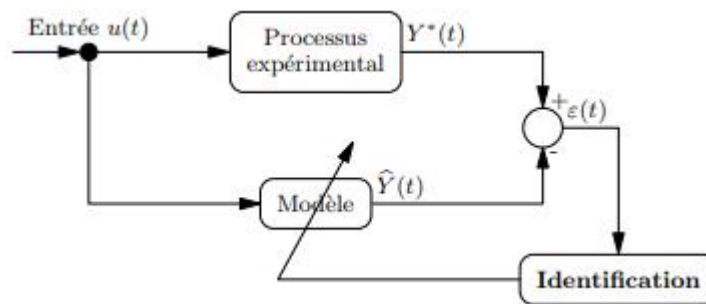


Figure 3.5 Principe des techniques d'identification

Plusieurs techniques d'identification basées sur la minimisation d'un critère quadratique sont utilisables ; on peut les classer selon :

- Techniques à erreur d'équation [LJU 87].
- Techniques à erreur de sortie [RIC 71, TRI 96, TRI 01].
- Filtre de Kalman étendu [LJU 87, LOR 98].

Les techniques à erreur d'équation sont les plus simples à mettre en œuvre ; de plus, elles s'adaptent parfaitement au temps réel, donc au suivi des variations paramétriques. Leur principal défaut est de fournir des estimations biaisées par les bruits affectant le système. De plus, il est nécessaire de les adapter au cas des systèmes à représentation continue [YOU 81, MEN 99].

Les techniques à erreur de sortie sont plus lourdes à mettre en œuvre et limitées au fonctionnement hors-ligne. Par contre, elles fournissent des estimations non biaisées, bien adaptées au diagnostic par suivi paramétrique, éventuellement avec connaissance a priori [MOR 99].

Le Filtre de Kalman étendu [LOR 98] combine la fonction observation d'état et estimation paramétrique. Ses estimations sont elles aussi non biaisées ; de plus, cet estimateur est parfaitement adapté au fonctionnement temps réel. Cependant, son fonctionnement optimal nécessite une bonne connaissance a priori des bruits affectant le système.

Les paramètres électriques caractérisant la machine asynchrone peuvent servir de très bons indicateurs de défaut. L'une des défaillances la plus couramment étudiée dans la machine asynchrone à cage d'écureuil est la rupture des barres rotoriques. Bien qu'elle soit identifiable à partir de l'analyse spectrale des courants statoriques le suivi de la résistance rotoriques peut être un bon indicateur de défaillance.

En effet, plusieurs travaux ont prouvé que la résistance R_r est très sensible aux défauts rotoriques, et que la variation de cette résistance est d'autant plus importante que le nombre de barres cassées est lui aussi plus important. Plusieurs techniques permettent d'estimer la valeur de cette résistance, nous pouvons citer par exemple l'estimation par erreur de sortie [MOR 99, BAC 02], l'estimation par filtre de Kalman étendu [SAi 00, BAZ 09a] ou par observateur grand gain non linéaire [BOU 01].

Toutefois, du fait que la valeur de cette résistance est aussi liée à la variation de température du rotor, il suffit d'une cause naturelle (par exemple fonctionnement à pleine charge) pour que cette résistance varie. La seule estimation de R_r ne permet pas de détecter la présence d'une ou plusieurs barres défectueuses. Cette ambiguïté peut être levée via la prise en compte de la température interne de la machine par les algorithmes d'identification à l'aide de l'information a priori [BAC 02].

Ces méthodes de diagnostic par identification sont généralement utilisées pour la surveillance et la détection des défaillances, le plus souvent à l'aide de modèles spécifiques [SCH 99, BAC 02] :

- De ruptures de barres ou de portions d'anneaux au rotor
- D'excentricité statique et dynamique
- De réduction de spires ou court-circuit entre spires d'une même phase au stator

La principale limitation des techniques par identification est la nécessité d'une excitation persistante, c'est à dire d'une entrée $u(t)$ (figure 3.5) qui perturbe suffisamment le

système pour générer des signaux exploitables par l'algorithme d'identification. Cette excitation persistante [LJU 87] est évidemment incompatible avec un fonctionnement en régulation (par exemple à vitesse constante).

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

3.3.2.2 Méthodes de diagnostic sans modèle analytique

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

- La rupture de barres ou de portions d'anneaux au rotor.
- L'excentricité statique et dynamique.
- La défaillance des paliers.
- Le court-circuit entre spires au stator.

✓ Méthode par traitement de signal

Pour des raisons de simplicité et d'efficacité, l'approche signal est très utilisée actuellement en diagnostic. Cette approche repose sur la connaissance du comportement du système sain, elle est ensuite comparée avec les signaux mesures. Les méthodes courantes d'analyse des signaux de diagnostic en régime transitoire et en régime permanent sont l'analyse spectrale, le spectrogramme, l'analyse temporelle et la distribution de Wigner-Ville [AND 94].

Les approches basées sur l'analyse de la signature spectrale sont les plus couramment rencontrées pour détecter la présence d'une anomalie. Le principal défaut de l'analyse

spectrale est qu'elle est très sensible à la qualité de la mesure, ainsi qu'à la fréquence d'échantillonnage et au nombre d'échantillons. Les procédures de surveillance de fonctionnement sont généralement orientées vers des défaillances spécifiques intervenant sur l'une des trois parties de la machine : le stator, le rotor ou les paliers.

Pour extraire de manière précise les informations relatives aux défauts, les recherches ont été particulièrement dirigées vers le spectre des courants statoriques pour deux raisons. Les courants sont faciles à mesurer, ils fournissent des informations sur de nombreux défauts. Mais la mesure des signaux puis leurs traitements dans le domaine spectral « FFT » ne peuvent servir, en terme d'identification, que si les composantes fréquentielles définies pour chaque défaut [BEN 00, KAZ 03, SAH 08] sont connues. Outre cette limitation, cette méthode nécessite un nombre suffisant de points d'acquisition pour garantir une précision fréquentielle minimale. Cette technique est généralement utilisée durant le régime permanent de la machine [DID 04].

La technique de spectrogramme permet d'effectuer des analyses fréquentielles des signaux en régime dynamique de fonctionnement du système. Cette technique consiste à effectuer un calcul répétitif de la FFT sur une fenêtre temporelle glissante, ce qui rend cette technique sensible à la longueur de la fenêtre, au type de fenêtrage, à la durée totale de supervision et au pas de glissement de la fenêtre [FLA 93]. Bien que cette technique permette d'analyser des signaux en régime dynamique, la rapidité du régime dynamique des machines asynchrones de l'ordre de 150ms réduit significativement la précision de cette technique.

Il faut également citer l'analyse temporelle, qui consiste à comparer les signaux temporels issus d'un fonctionnement sain du système aux signaux temporels du fonctionnement courant [CAS 03, KRA 04, OND 06]. Le déphasage introduit par les instruments de mesure rend la comparaison directe de ces signaux non significative, ainsi il est courant d'effectuer des transformations sur les signaux avant de les comparer. Malgré cette transformation, cette méthode ne permet pas d'identifier efficacement les défaillances pouvant affecter les machines électriques.

Les méthodes temps-fréquence, basées sur l'analyse de Wigner-Ville, combinent l'analyse temporelle et l'analyse fréquentielle. [AND 94] a prouvé que cette technique permet

d'extraire des informations du régime dynamique d'un système, et que ce régime est plus riche que le régime stationnaire du processus en question.

✓ **Méthode par intelligence artificielle (IA)**

L'intelligence artificielle est de plus en plus utilisée dans le domaine de la supervision et du diagnostic, elle a permis d'augmenter l'efficacité et la fiabilité du diagnostic. Dans le domaine de la supervision des machines électriques, les industriels et les chercheurs ont de plus en plus recours à ce genre de technique pour augmenter l'efficacité du système [ALT 99, AWA 03].

En fait, le terme « Intelligence Artificielle » comprend diverses techniques telles que les systèmes experts, les réseaux de neurones, la logique floue, qui peuvent être utilisés de manière indépendante ou combinés pour améliorer leur efficacité. Ces méthodes sont intéressantes même si elles nécessitent une phase d'apprentissage initial qui est critique pour un fonctionnement optimal. La phase d'apprentissage nécessite un ensemble important d'exemples comme elle peut être trompeuse ou peut produire des résultats limités à un ensemble de systèmes.

Une fois la phase d'apprentissage accomplie, ces techniques se montrent efficaces et simples, et elles peuvent être adoptées avec succès pour le diagnostic des défaillances des systèmes électriques. Les techniques d'intelligence artificielle peuvent contribuer à accélérer le processus de décision avec une intervention humaine réduite. Mais elles ne peuvent pas être une panacée capable de résoudre tout problème de diagnostic.

Ces techniques d'intelligence artificielle cherchent à imiter et à acquérir le raisonnement humain de manières différentes :

✓ **Les réseaux de neurones artificiels**

Imitent la structure neuronale d'un cerveau humain ; ils sont formés par un réseau complexe de blocs arithmétiques simples. Ils peuvent facilement représenter les systèmes non linéaires multi-entrées/multi-sorties. Cette technique a largement été utilisée dans le domaine du diagnostic des machines électriques [SAL 00, AWA 03] selon plusieurs démarches et techniques :

- Apprentissage à partir de signaux temporels ou fréquentiels issus de simulation ou d'expérimentation.
- Diagnostic en temps réel et autonome.
- Mise à jour dynamique de la structure du réseau.
- Filtrage des transitoires, des perturbations et du bruit.
- Détection des défauts dès leur naissance.

✓ La logique floue

Traduit la perception humaine des valeurs, elle ne se limite pas à des valeurs « vrai, faux » comme la logique traditionnelle. Elle offre une large fourchette de valeurs intermédiaires. Les systèmes flous sont capables de traiter des variables naturelles via des conditions floues « si alors ». Les systèmes flous adaptatifs exploitent les facultés d'apprentissage des réseaux de neurones ou la robustesse des algorithmes génétiques dans le domaine de l'optimisation des paramètres du système à étudier, afin de prendre en considération les connaissances a priori et l'expertise humaine dans le domaine. Nous pouvons trouver dans la littérature [ALT 99, BAL 07, ZID 08] plusieurs articles exploitant cette technique dans le domaine du diagnostic et de la surveillance des machines électriques, avec des objectifs variés :

- Détection d'un fonctionnement anormal et localisation de la défaillance.
- Evaluation des indices de performance.
- Construction de bases de données issues de l'expertise humaine, et formulation sous forme de règles conditionnelles « si-alors ».
- conception de systèmes adaptatifs pour le diagnostic.

✓ La technique neuro-floue

Est la combinaison des deux techniques précédentes. [ALT 99] et [BAL 07] ont montré que cette combinaison est très intéressante pour le diagnostic et la surveillance de machines asynchrones. En effet, les réseaux de neurones adaptatifs peuvent générer le système flou correspondant d'une manière autonome. Cette génération des règles est faite à partir des exemples d'apprentissage, en minimisant ainsi l'intervention de l'expert lors de la formulation des règles conditionnelles.

L'application de l'IA est d'une grande aide dans l'automatisation de la procédure du diagnostic, elle permet de profiter de l'expertise humaine dans le domaine en question.

3.4 Conclusion

Le diagnostic des machines électriques a été (et il est encore) un thème de recherche très important depuis plusieurs décennies, tel que rapporté dans la bibliographie (non exhaustive) citée dans ce chapitre. L'avènement de la surveillance a révolutionné 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.

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

Nous avons essayé de présenter un aperçu des méthodes et des techniques de surveillance et de diagnostic de machines électriques. Deux grandes familles de méthodes ont été passées en revue : celles basées sur un modèle analytique de la machine (avec un accent particulier sur l'approche d'identification) et les méthodes sans modèle, basées sur l'analyse de Fourier et sur une approche heuristique.

4.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons présenter des notions de base concernant l'une des méthodes couramment appliquée au diagnostic des défauts des associations onduleur - machines asynchrones : c'est l'analyse spectrale par FFT des grandeurs machines dans le cas d'un défaut.

Et d'autre méthode est la logique floue. Cette technique avancée nouvelle pour le traitement des problèmes de réglage et de prise de décision des systèmes, établit en 1965 par le professeur LOTFI A ZADEH.

Initialement, cette théorie était appliquée aussi dans le domaine de diagnostic dans le domaine de la surveillance le diagnostic des machines électriques tournantes, notamment dans l'association onduleur machine asynchrone. Dans ce chapitre nous présenterons une étude des défauts de l'association onduleur machine asynchrone par l'analyse spectrale et logique floue

Des résultats de simulation pour les différents cas de défauts de l'onduleur (court-circuit, ouverture d'un interrupteur) ainsi que les défauts de court-circuit de la machines asynchrone (défauts statorique, rotorique) et les défauts mécanique seront présentés et interprétés.

4.2 Surveillance du moteur asynchrone

D'après la littérature, les principaux signaux du moteur utilisés et utilisables pour obtenir des informations sur l'état de santé de la machine sont les suivants :

- Ø Couple électromagnétique.
- Ø Puissance instantanée statorique.
- Ø Vibration mécanique.
- Ø Courant statorique.

Parmi tous ces signaux utilisable, le courant statorique s'est avéré être l'un des plus intéressants et ce pour deux raisons :

- Ü La surveillance du courant statorique permet de détecter voire de diagnostiquer aussi bien des défauts électromagnétiques (déséquilibre de phase, court-circuit entre spire, excentricités d'entrefer, rupture de barres....) que des défauts purement mécaniques (dégradation des roulements à bille, désalignement).
- Ü Le courant statorique est très facile d'accès puisqu'il est utilisé pour la commande de la machine et qu'il peut être mesuré directement au poste d'alimentation.

4.3 Analyse spectrale des défauts dans la machine asynchrone

Dans cette partie, nous avons traité les défaillances dans l'onduleur qui les plus affecté notamment les courts circuits dans les interrupteurs et les circuits ouverts et d'autre part les défauts dans la machine asynchrone comme les défauts statoriques, rotoriques et mécanique. Nous avons utilisé la méthode d'Analyse spectrale du courant statorique pour traité chaque cas de défaut.

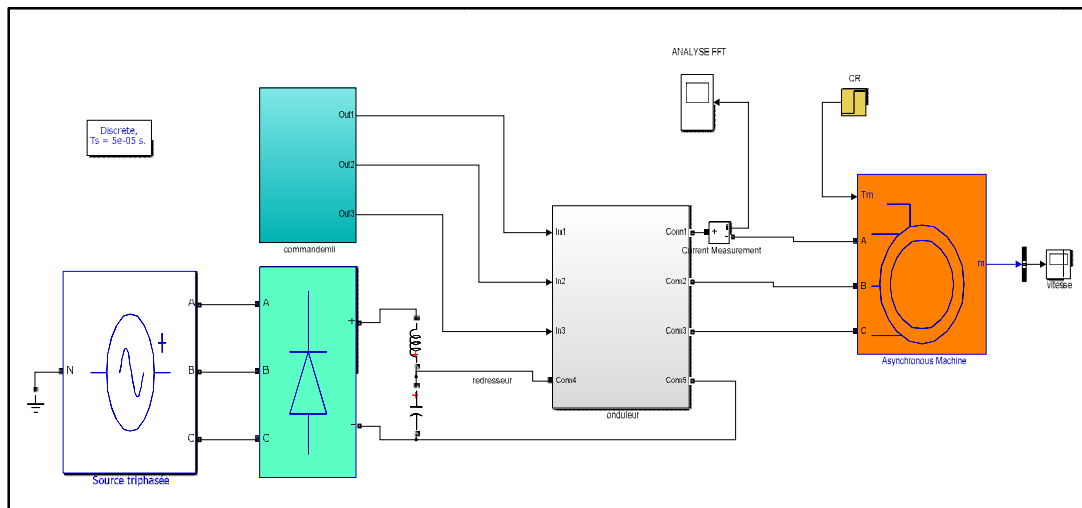


Figure 4.1 Schéma block de l'association onduleur-MAS

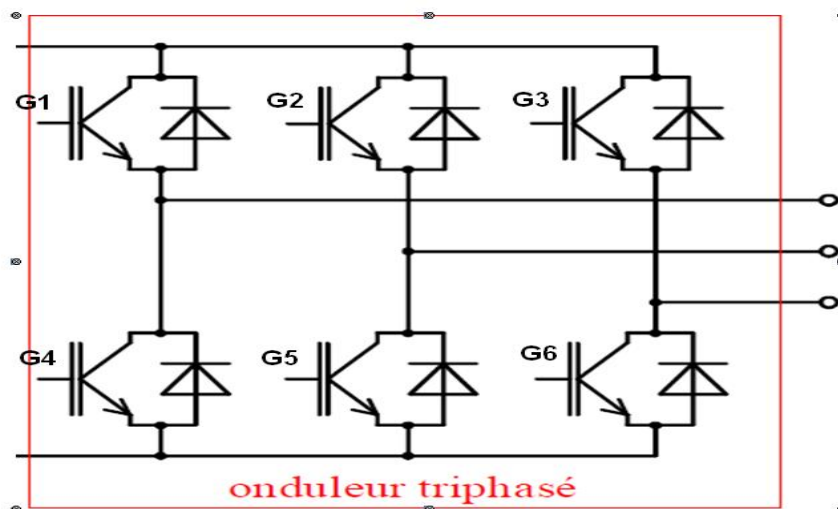


Figure 4.2 Structure générale de l'onduleur de tension à deux niveaux

a) Défaut statorique

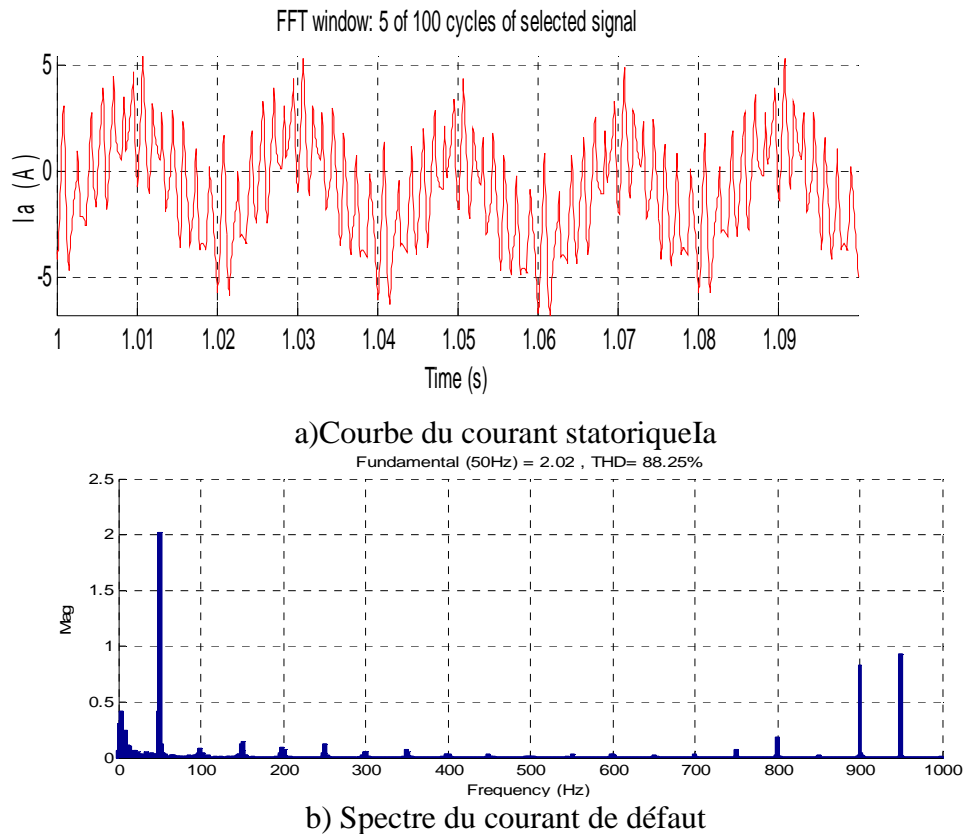


Figure 4.3 Analyse spectrale du courant I_a avec défaut c-c sur la phase (a)

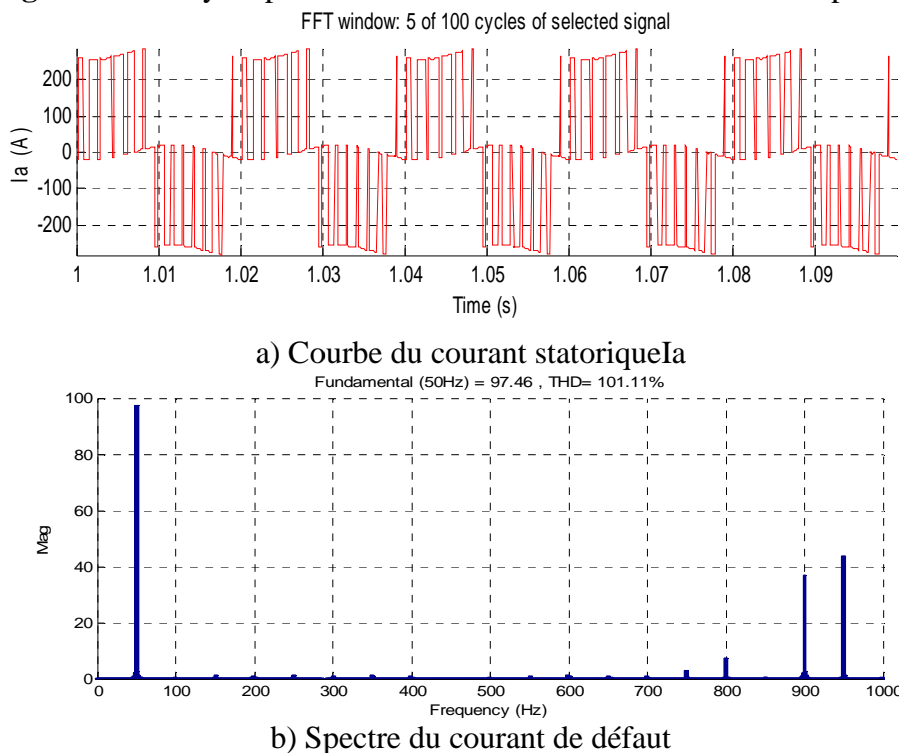


Figure 4.4 Analyse spectrale du courant I_a avec défaut c-c entre deux phases (a) et (b).

D'autres cas de différent court circuit dans le stator sont résumés de cette information dans le tableau :

Type de défaut	phases	THDi	Amplitude (50Hz)
Court circuit dans une phase	a	88.25	2.02
	b	87.86	2.03
	c	96.2	1.849
Court circuit entre deux phase	a-b	101.11	97.46
	a-c	87.13	112.8
	b-c	6.23	18.85

Tableu4.1 résultats des autres cas de court-circuit en les phases.

b) Défaits mécaniques

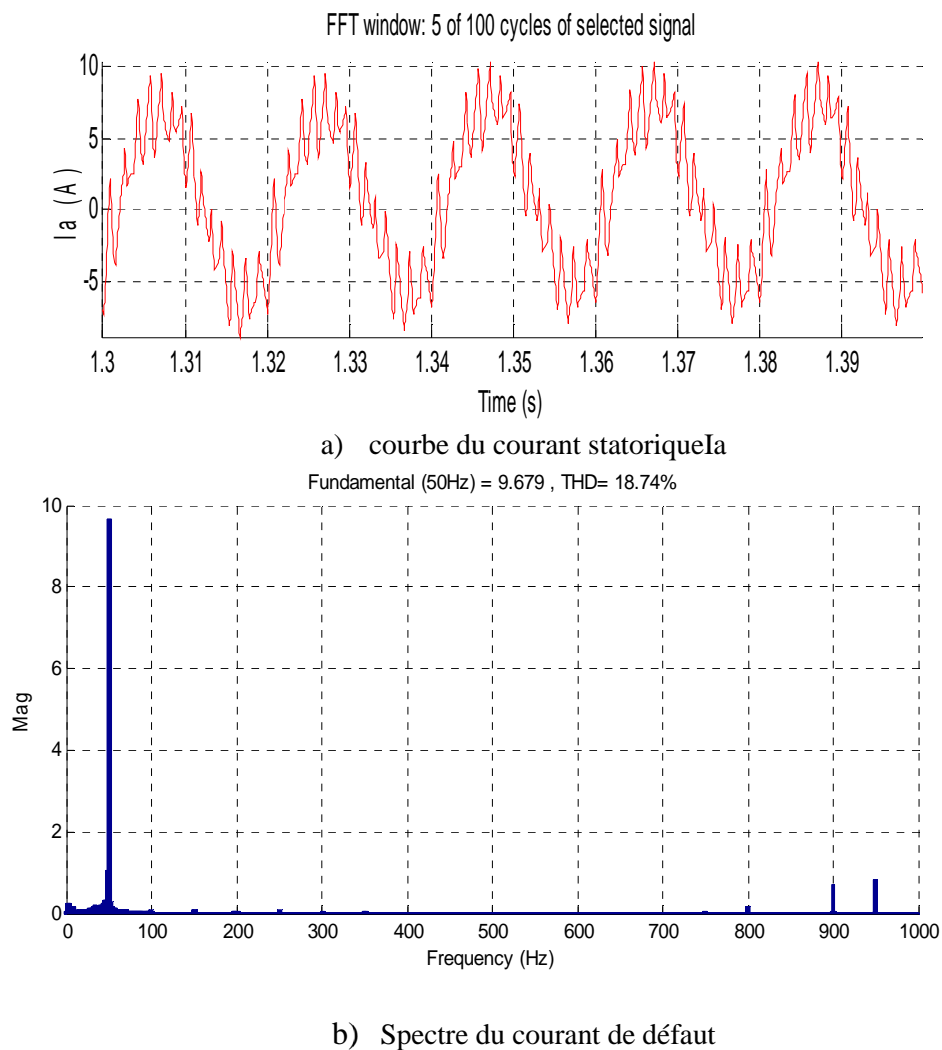


Figure 4.5 Analyse spectrale du courant I_a avec défaut mécanique

c) Défauts rotoriques

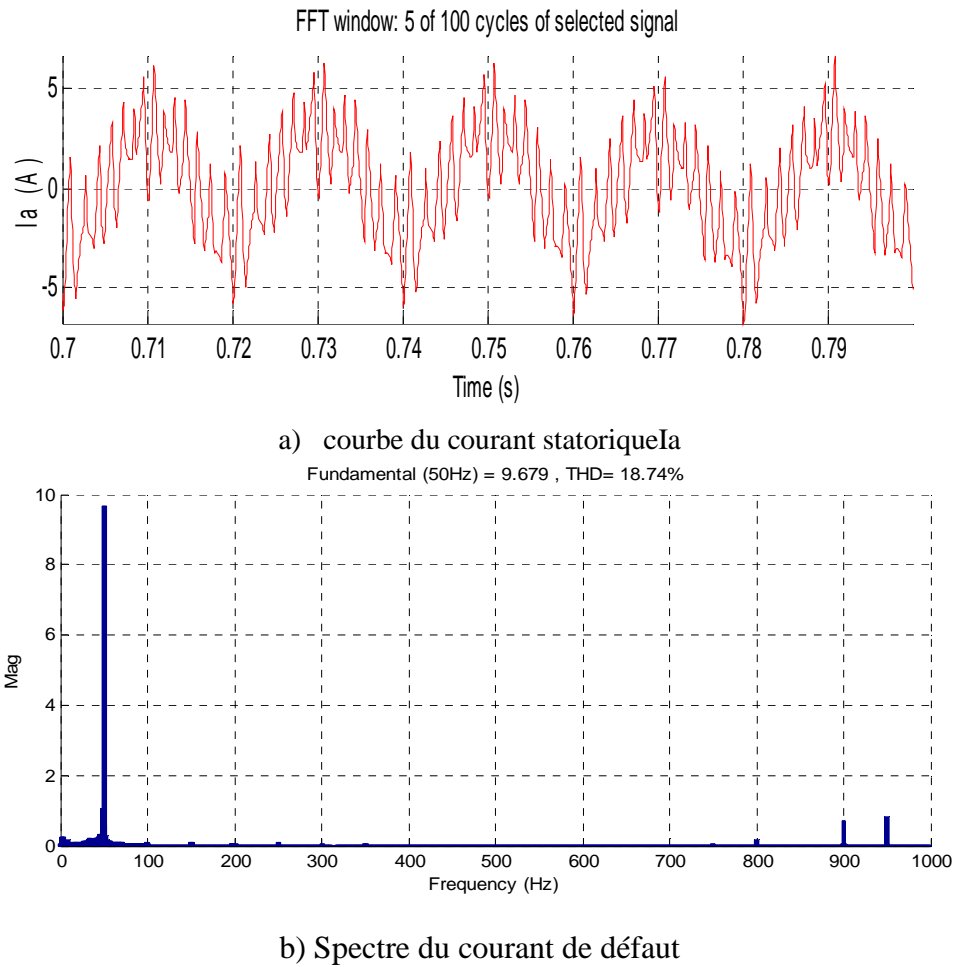


Figure 4.6 Analyse spectrale du courant I_a avec défaut rotorique

4. 4 La logique floue

La logique floue est une nouvelle technique de traitement des problèmes et prendre une décision de manière intelligente, le premier qui l'utilise c'est le professeur iranien LOTFI A ZADEH. Cette méthode est utilisée récemment pour le diagnostic des différents défauts des machines tournantes.

Dans ce chapitre nous présenterons une étude des défauts de l'association onduleur machine asynchrone par logique floue.

4.5 Base générale de la logique floue

Les éléments de base générale de la logique floue sont :

4.5.1 Ensembles flous

Si on désigne par F un ensemble flou dans un univers de discours U , cet ensemble flou est caractérisé par une fonction d'appartenance μ_F qui prend des valeurs entre 0 et 1 à la différence pour l'ensemble booléen qui prend deux valeurs 0 ou 1 (figure 4.7).

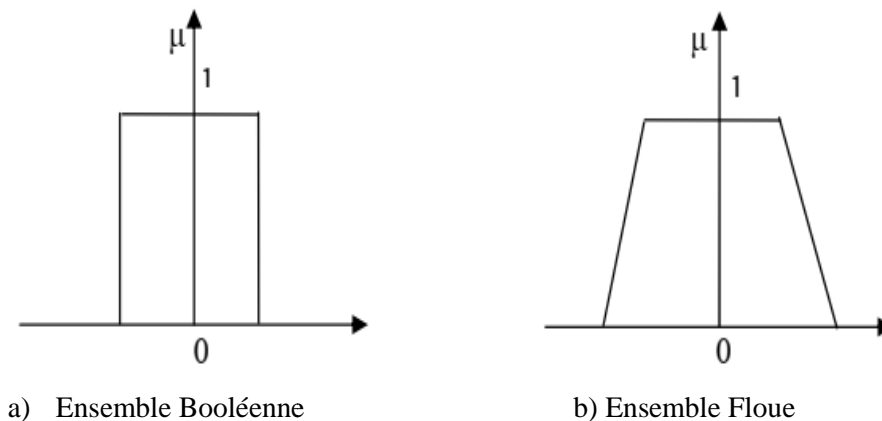


Figure 4.7 Fonction caractéristique d'appartenance pour la logique booléenne et la logique floue.

- ✓ **Support** : Le support de l'ensemble flou F est l'ensemble numérique de tous les points u dans U tel que $\mu_F(u) = 0$.
- ✓ **Singleton flou** : Si le support de l'ensemble flou contient un seul pointon dit qu'il est un singleton flou.

4.5.2 Fonction d'appartenance [1]

La fonction d'appartenance μ comprise entre 0 et 1 est associée au sous ensemble $E1$ de $T(X)$ et à la variable X , dont l'ensemble des valeurs possible est $T(X)$. Elle s'appelle aussi, degré d'appartenance ou coefficient d'appartenance ou degré de possibilité, qui est la possibilité que la variable u ait la qualité associée au sous-ensemble $E1$.

Elle est utilisée pour faire le traitement mathématique des variables linguistiques dans le but de traiter des déductions floues par ordinateur.

On attribue à chaque valeur de la variable linguistique des fonctions d'appartenances μ , une valeur déterminée pour la variable X sera désignée par un degré d'appartenance.

En général, la forme de fonction d'appartenance dépend de l'application, et peut être triangulaire, trapézoïdale ou gaussienne comme le montre la figure ci-dessous:

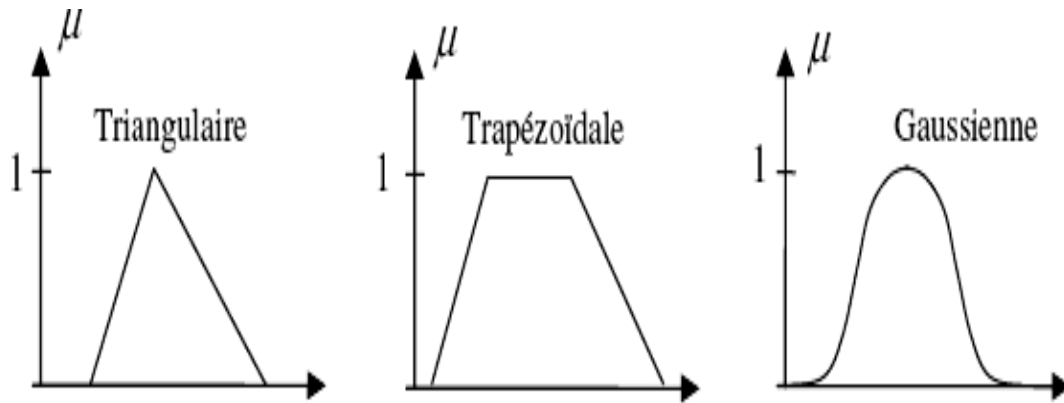


Figure 4.8 Différentes formes de fonctions d'appartenance

4.5.3 Variable linguistique [1]:

Une variable linguistique représente un état dans le système flou, sa valeur est définie dans des termes linguistiques qui peuvent être des mots ou des phrases d'un langage naturel ou artificiel. Chaque variable linguistique est caractérisée par un ensemble tel que :

$(x, T(x), u)$.

Où :

x : le nom de variable

$T(x)$: ensemble de termes de variable, c'est l'ensemble des noms des valeurs linguistiques de x dont chaque valeur est un sous-ensemble flou défini dans U .

U : l'univers de discours.

Comme exemple de variable linguistique, on prend la vitesse de rotation du moteur. Son ensemble de termes T (vitesse) peut être :

T (vitesse) = {lente, moyenne, rapide,... }

Où chaque termes dans T (vitesse) est caractérisé par un ensemble flou dans un univers de discours $U = [0, 200]$ par exemple.

Pour les vitesses inférieures ou égales à 80 intervient la variable linguistique (lent), et pour les vitesses supérieures ou égales à 150 intervient la variable linguistique (rapide). Ces deux termes peuvent être caractérisés comme des ensembles flous dont les fonctions d'appartenances sont montrées.

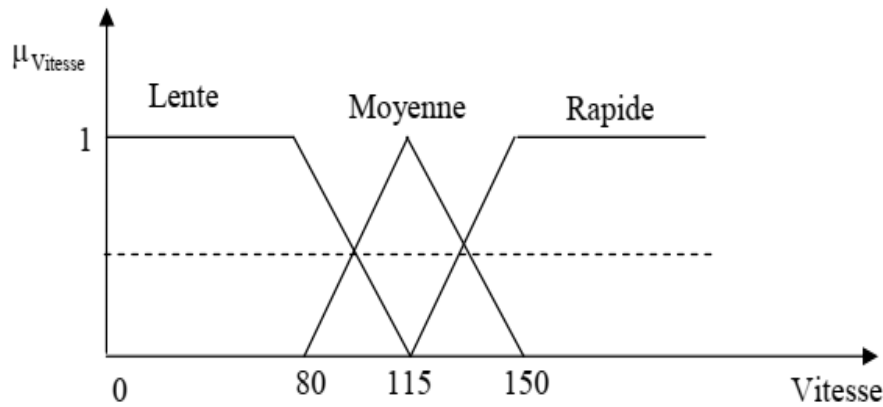


Figure 4.9 Représentation des variables linguistiques

NB : L'univers de discours représente l'intervalle de variation des grandeurs d'entrée du système flou.

4.5.4 Opérateurs

Les variables linguistiques sont liées entre elles au niveau des règles d'inférence par des opérateurs ET ou OU. Il s'agit d'opérateurs de la logique floue qui interviennent sur les fonctions d'appartenance représentant les variables linguistiques. De plus, il existe l'opérateur NON qui s'appelle (complément, négation, inverse) .

4.6 Étapes de contractions d'un modèle de logique flou[1]

4.6.1 Fuzzification

L'interface de fuzzification est un bloc qui consiste à :

- Mesurer les valeurs numériques des variables d'entrées.
- Les projeter dans l'univers de discours en utilisant un facteur d'échelle.
- Transformer ces valeurs numériques en valeurs linguistiques en utilisant des fonctions d'appartenances qui ont pour but de subdiviser l'espace d'entrée de l'univers de discours en sous ensembles flous.

4.6.2 Base de connaissances

Elle contient les informations du domaine d'application. Elle est définie par les deux bases suivantes:

4.6.2.1 Base de données

Elle fournit des informations nécessaires qui sont utilisées pour l'exploration des règles de système flou.

4.6.2.2 Base de règles

On appelle règles d'inférence (ou base de règles) l'ensemble des différentes règles reliant les variables floues d'entrée d'un système aux variables floues de sortie de ce système à l'aide de différents opérateurs. Ces règles se présentent sous la forme:

Si condition 1 et/ou condition 2(et/ou...) alors action sur les sorties.

Dans le cas de diagnostic, ces règles doivent regrouper les défaillances.

Il existe quatre possibilités pour l'exploration de la base de règles.

- ∅ la première est basée sur l'expertise humaine.
- ∅ la deuxième est fondée sur les actions de contrôle fournies par un opérateur.
- ∅ la troisième est l'utilisation du modèle flou du processus.
- ∅ la quatrième et la dernière qui est la plus récente, est basée sur un algorithme d'apprentissage pour l'élaboration des règles.

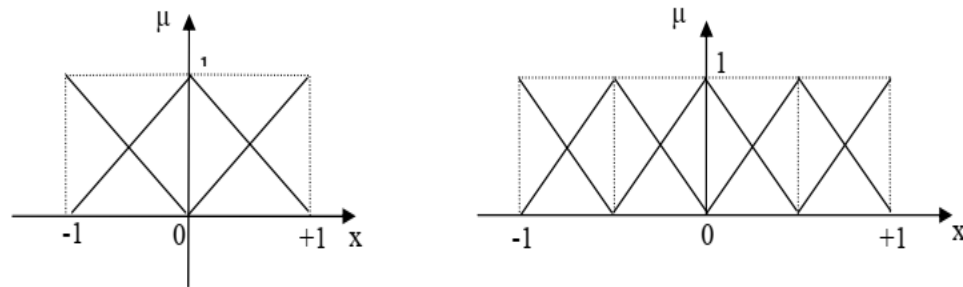


Figure 4.10 Univers de discours normalisé dans l'intervalle [-1 +1]

4.6.3 Logique de prise de décision (bloc d'inférence)

Ce bloc représente le noyau du système flou, qui est capable de simuler les décisions humaines basées sur le concept flou et d'inférer les actions de contrôle flou par intervention de l'implication floue et des règles d'inférence.

Après avoir établi toutes les règles d'inférence on peut les représenter par un tableau ou par une matrice. Un traitement numérique des inférences selon l'une des trois méthodes suivantes est à exécuter:

- ✓ Méthode d'inférence max-min;
- ✓ Méthode d'inférence max-prod;
- ✓ Méthode d'inférencesomme-prod.

4.6.4 Défuzzification

La défuzzification a pour but de Transformer les valeurs de la sortie situées dans l'univers du discours en valeurs réelles comprises dans le domaine de variation.

Il existe plusieurs stratégies de défuzzification dont les plus utilisées sont :

- Méthode du maximum;
- Méthode de la moyenne des maximums;
- Méthode du centre de gravité;
- Méthode des hauteurs pondérées ;

4.7 Notion sur la RMS

La RMS mesure la valeur efficace d'un signal instantané de courant ou de tension connecté à l'entrée du bloc, elle peut être calculé par :

$$\text{RMS}(f(t)) = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T f(t)^2 dt}$$

4.8 Système de surveillance et de détection

La structure du système de surveillance proposé pour le diagnostic est montrée par la figure 4.11.

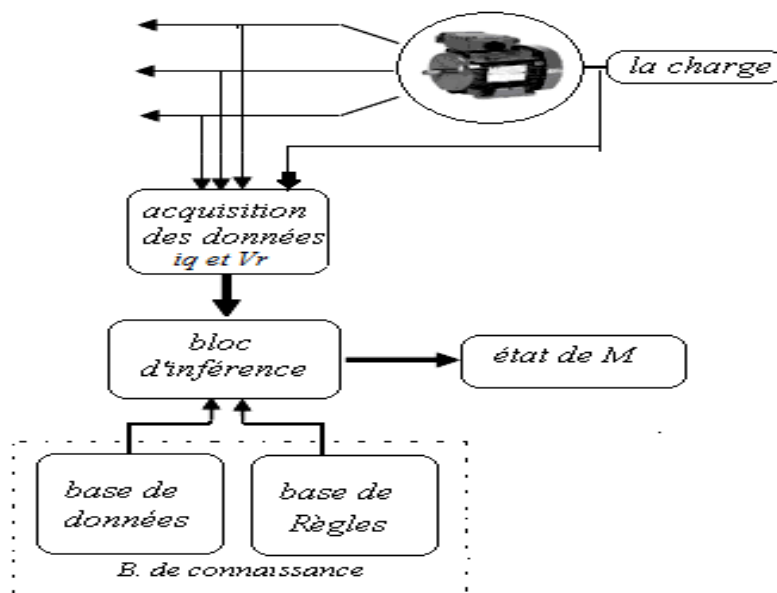


Figure 4.11 Schéma bloc d'un système de surveillance de l'état d'un moteur

4.9 Simulation et Extraction des défauts

Dans le but d'extraire les défauts de la machine asynchrone et de l'onduleur dans la présence de la logique floue. On a présentés des résultats de simulation. Il s'agit respectivement, de l'évolution temporelle des courants statoriques prisent au régime établi dans différents modes de fonctionnement considérés à savoir : à vide et en charge sans et avec défaut (déséquilibre de tension ou ouverture d'une phase).

4.9.1 Cas sain :

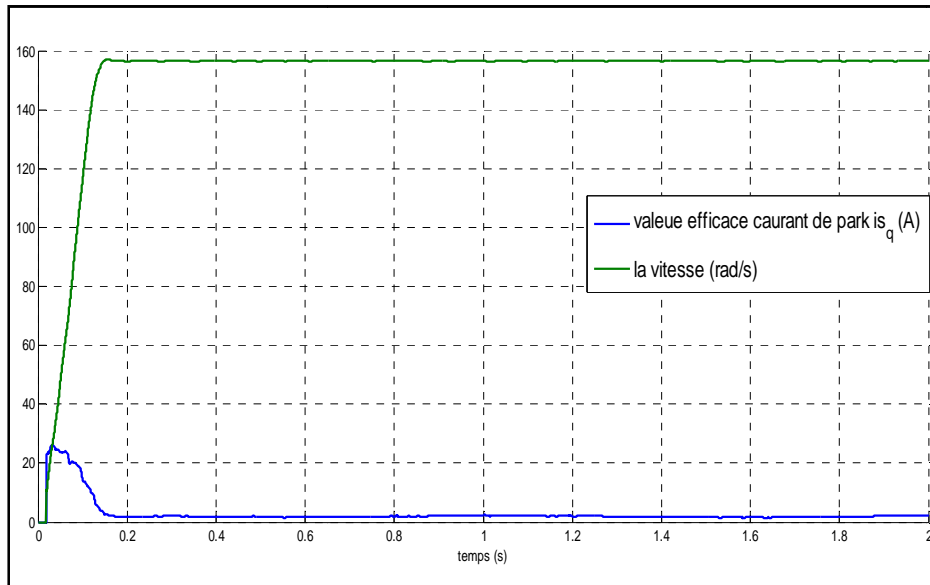
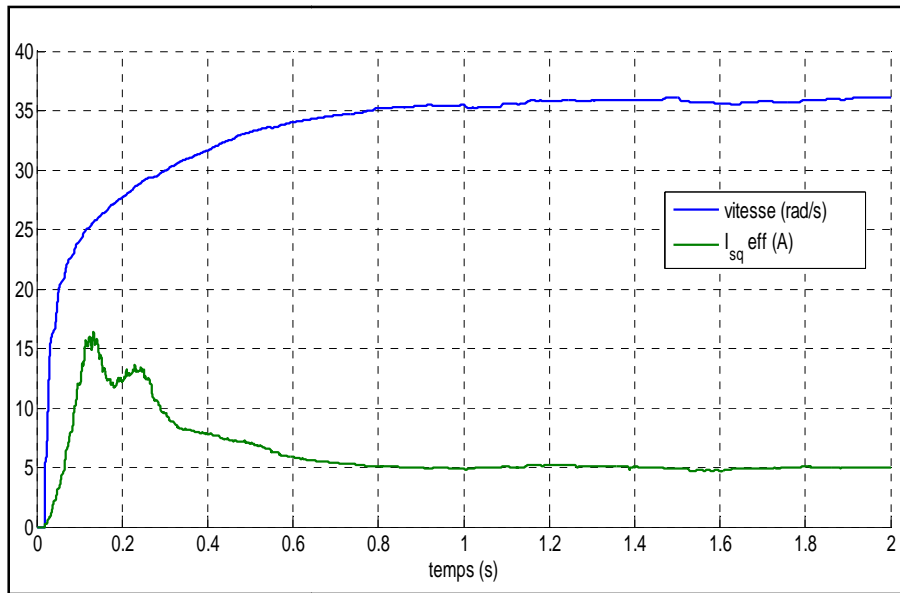


Figure 4.12 Vitesse et le courant i_{sq} dans le cas sain

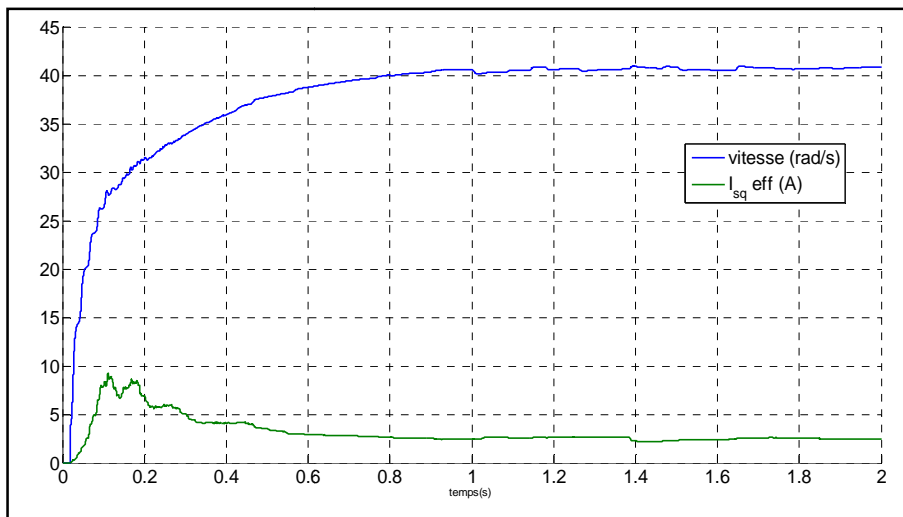
4.9.2 Défaillances du convertisseur (onduleur)

4.9.2.1 Cas d'un défaut Court-circuit sur des interrupteurs

Dans ce cas le défaut de court circuit de l'onduleur à ces interrupteurs, les résultats de simulation dans les deux figures 4.13.a et 4.13.b montrent l'évolution de la vitesse et du courant dans le cas de court-circuit d'un seul interrupteur et le cas de court circuit à deux interrupteurs.



(4.13.a) court circuit dans un interrupteur G1

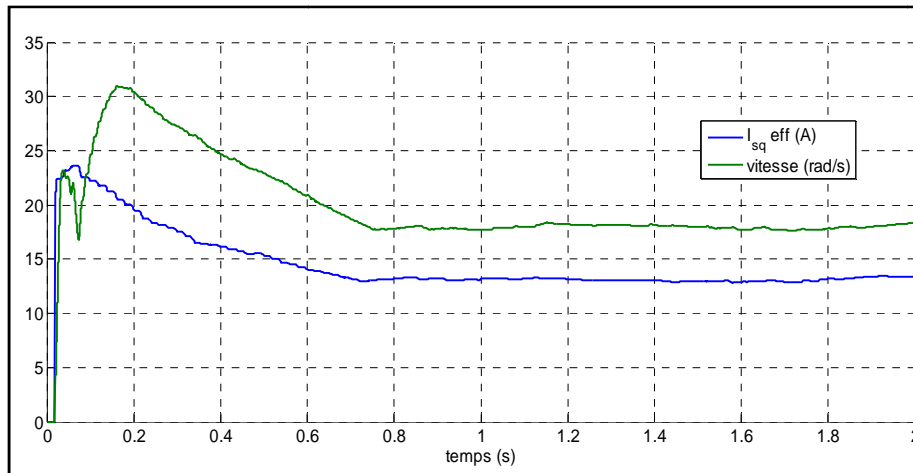


(4.13.b) court circuit dans deux interrupteurs G1 et G5

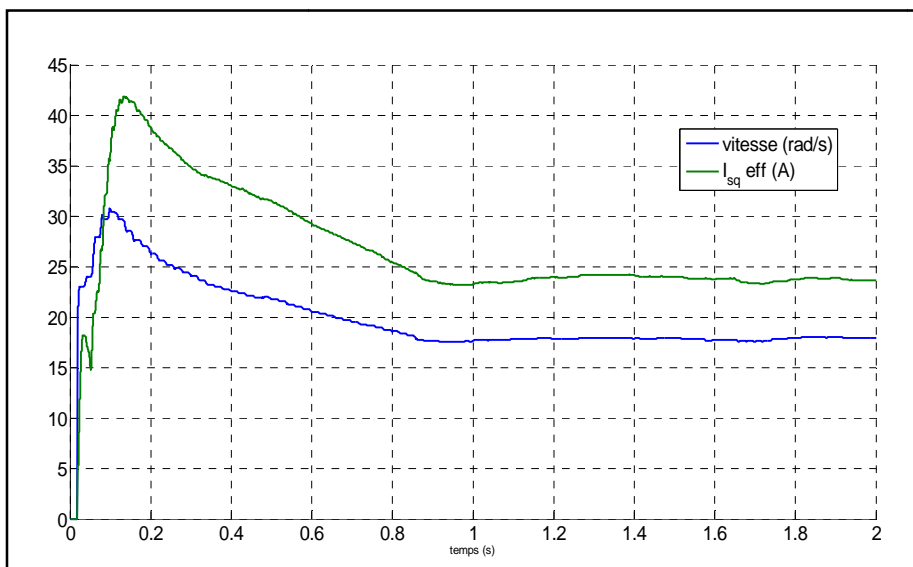
Figure 4.13 Vitesse et courant i_{sq} en cas des courts circuits dans les interrupteurs

4.9.2.2 Cas d'un défaut d'ouvertures des interrupteurs

Dans le cas de l'ouverture d'un seul interrupteur où de l'ouverture des deux interrupteurs, les résultats obtenus pour l'allure de vitesse et du courant sont donnés par les figures 4.14.a et 4.14.b suivantes.



a) cas d'ouverture d'un seul interrupteur G1



(b) cas d'ouverture G1 et G5

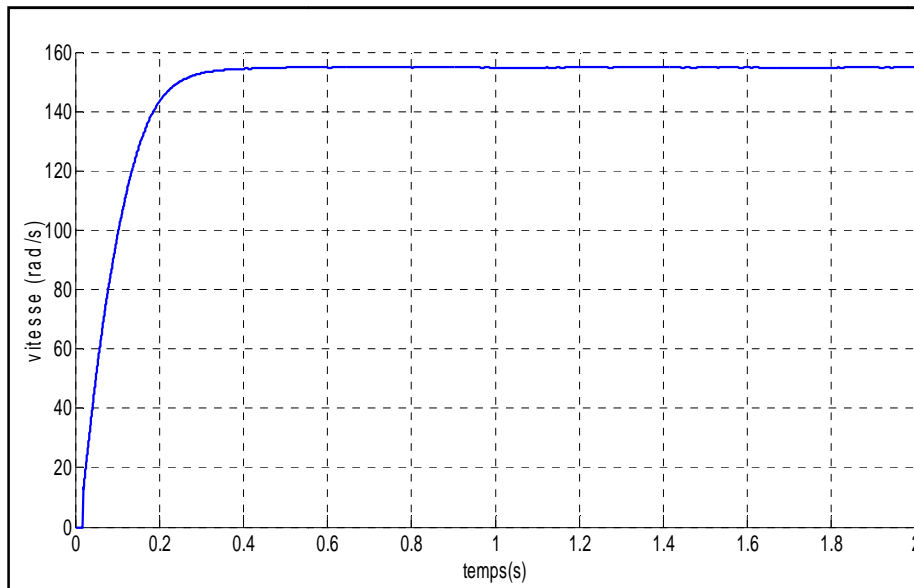
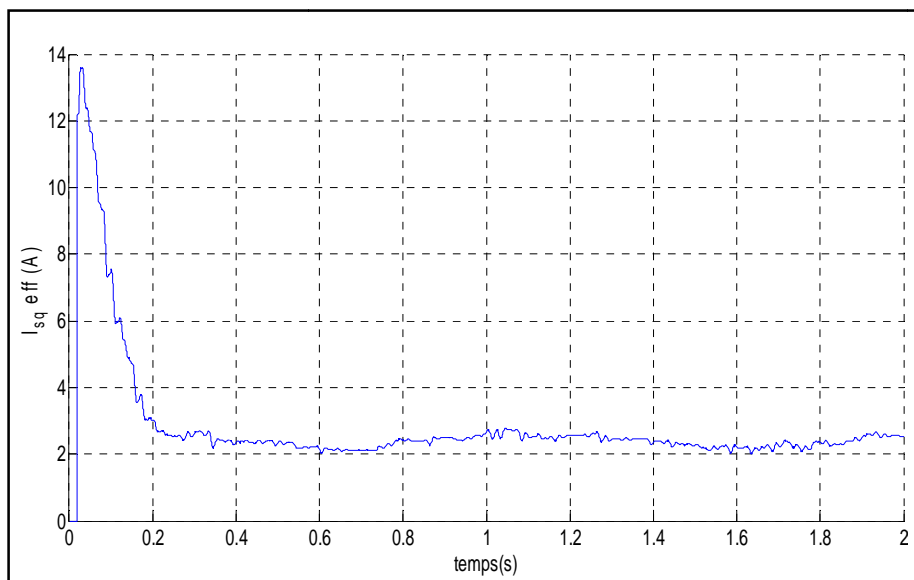
Figure 4.14 Vitesse et courant i_{sq} en cas d'ouverture des interrupteurs

4.9.3 Défaillances à la machine asynchrone

Les défaillances couramment affecté la machine asynchrone sont les défaillances au rotor, stator et mécanique.

4.9.3.1 Défaillances au rotor

Dans ce cas, cette défaillance a été simulée en contrôlant l'impédance du rotor en augmentant sa valeur autant que possible.

(a) vitesse rotorique V_m (rad/s)(b) courant statorique I_q (A)**Figure 4.15** Evolution de courant et la Vitesse du moteur avec défaut dans le rotor

4.9.3.2 Défaillances au Stator

Dans ce cas, la défaillance est des dommages à l'isolant entre les spires adjacents. Cette défaillance a été simulée en contrôlant la résistance d'un seul enroulement du stator en minimisant autant que possible sa valeur.

a) Cas de défaut de court-circuit dans une seule phase

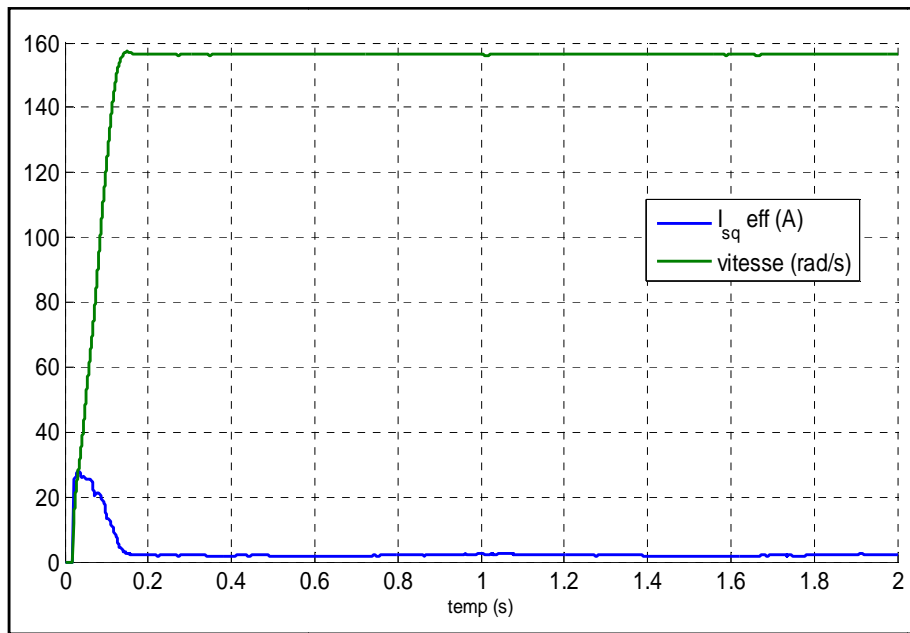


Figure 4.16 Évolution de courant et la vitesse du moteur avec défaut (c.c dans une phase).

b) Cas de défaut de court-circuit entre deux phases

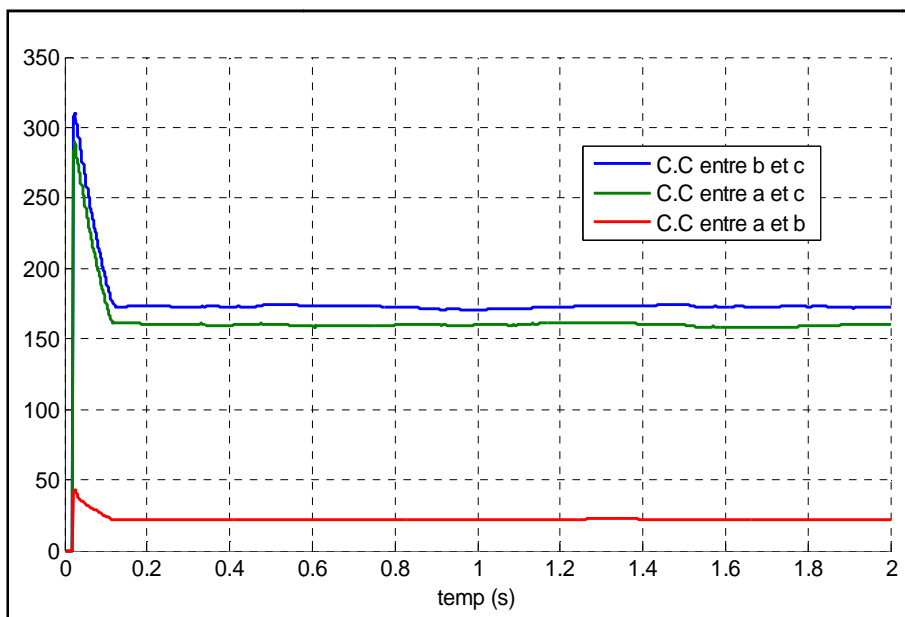
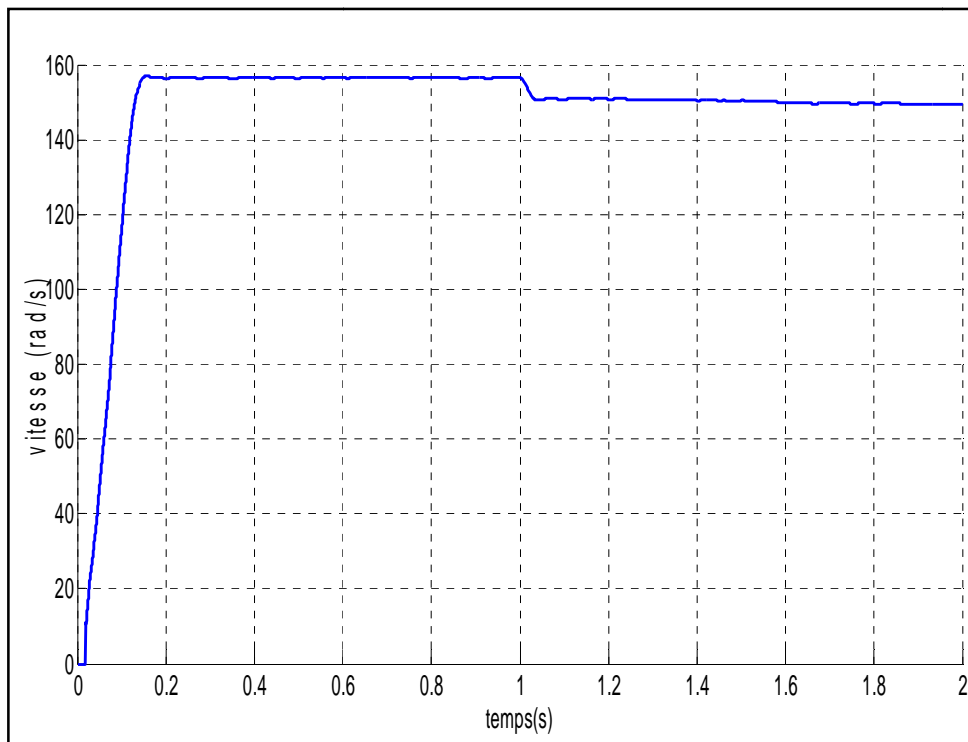
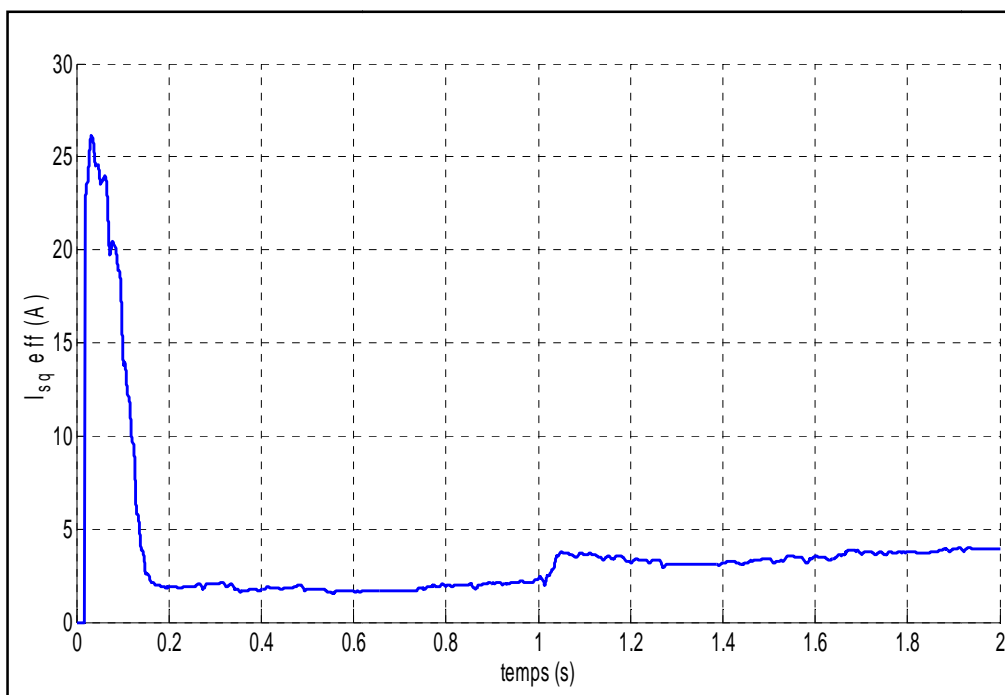


Figure 4.17 Evolution de courant du moteur avec défaut (c.c entre les phases).

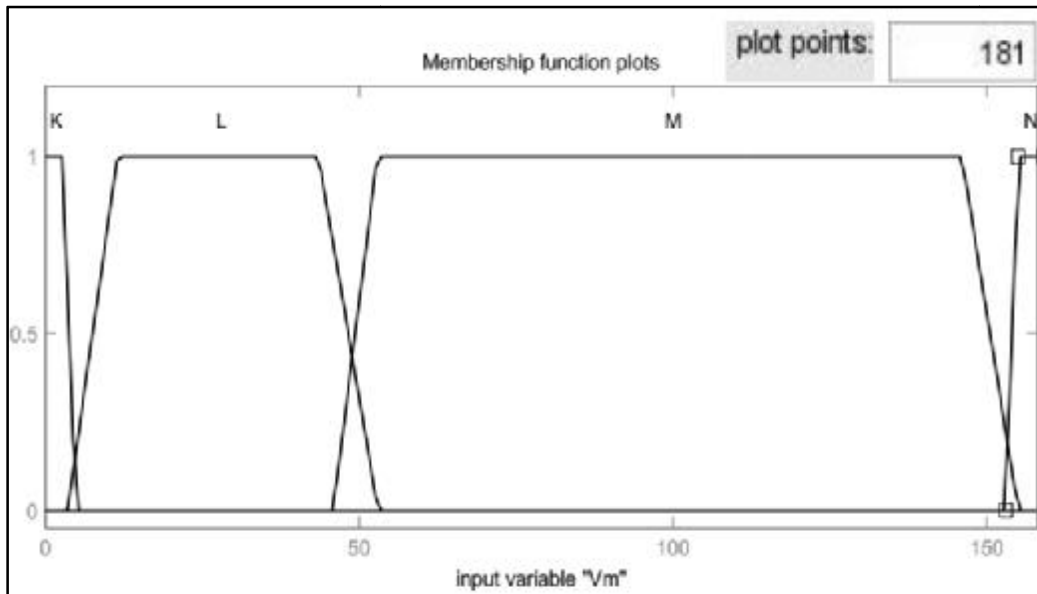
c) Défaillances mécaniques

Dans ce cas, on suppose des valeurs aléatoires du couple mécanique pour représenter le défaut mécanique :

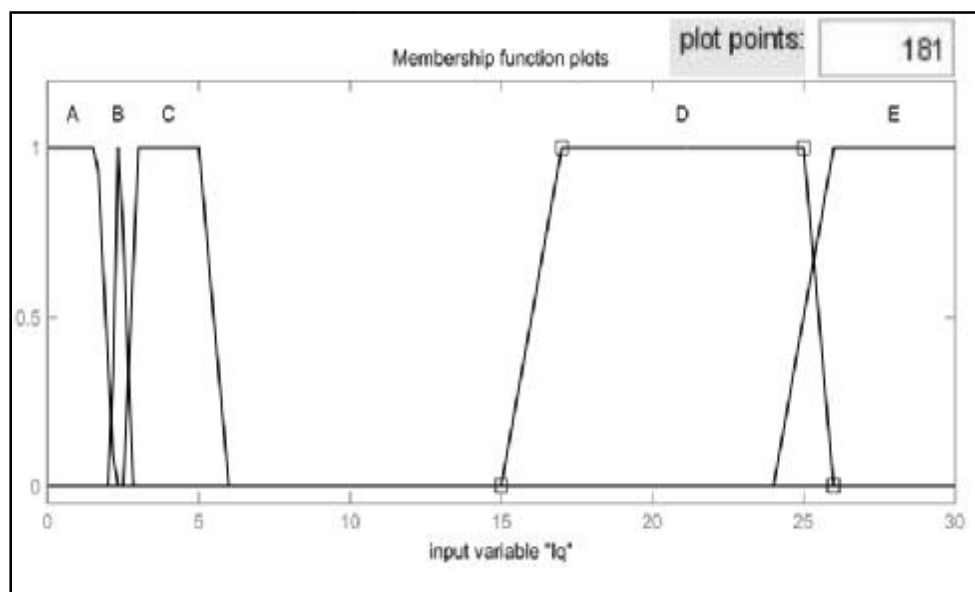
(a) vitesse rotorique V_m (rad/s)(b) courant statorique I_q (A)**Figure 4.18** Évolution des courants statoriques du moteur avec défaut mécanique

4.9.4 Variables d'entrée-sortie de système de la logique floue

Les amplitudes de courant i_{sq} et la vitesse v_m sont, respectivement, choisis le domaine d'évolution de comme des variables des fonctions d'appartenances d'entrées et de sorties du système flou. Ces variables est défini en utilisant la théorie des ensembles flous. Les fonctions d'appartenance des variables d'entrées/sortie sont illustrées par les figures suivantes :



(a) Vitesse 'Vm'



(b) Courant 'Iq'

Figure 4.19 Fonctions d'appartenances des variables d'entrées

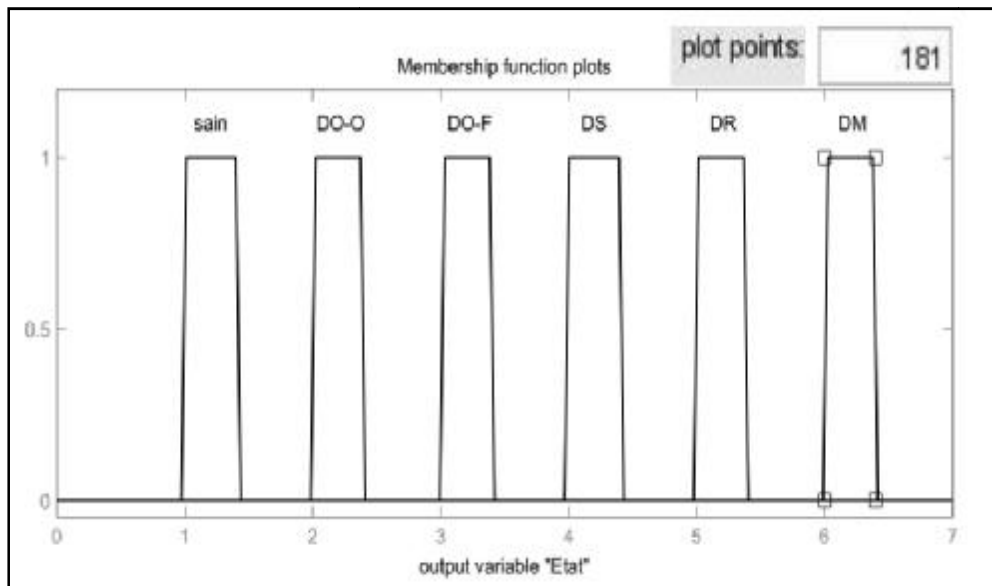


Figure 4.20 Fonctions d'appartenances de la sortie (état du stator)

On note que:

- ∅ État = interprète que l'état de défaillance de l'association onduleur-machine.
- ∅ État 1 : le cas sain = l'association machine-onduleur sans défaut .
- ∅ État 2 : l'onduleur a un défaut d'ouverture des interrupteurs DO-O .
- ∅ État 3 : l'onduleur a un défaut de court circuit dans les interrupteurs DO-F.
- ∅ État 4 : défaut dans le stator de la machine DS.
- ∅ État 5 : défaut dans le rotor de la machine DR.
- ∅ État 6 : default mécanique dans la machine DM.

Les inférences :

L'ensemble des règles utilisées dans notre cas d'étude se résume ainsi :

Règle (1) : if Iq is A and Vm is N Then Etat is Sain

Règle (2) : if Iq is B and Vm is M Then Etat is DR

Règle (3) : if Iq is C and Vm is L Then Etat is DO-O

Règle (4) : if Iq is C and Vm is M Then Etat is DM

Règle (5) : if Iq is D and Vm is L Then Etat is DO-F

Règle (6) : if Iq is E and Vm is K Then Etat is DS

Règle(7): if Iq is A and Vm is M Then Etat is DS

4.9.5 Simulation d'un système de diagnostic association onduleur-MAS

Le système de diagnostic ainsi développé est testé sur le moteur asynchrone pour les deux modes de fonctionnement considérés (sain et avec défauts).

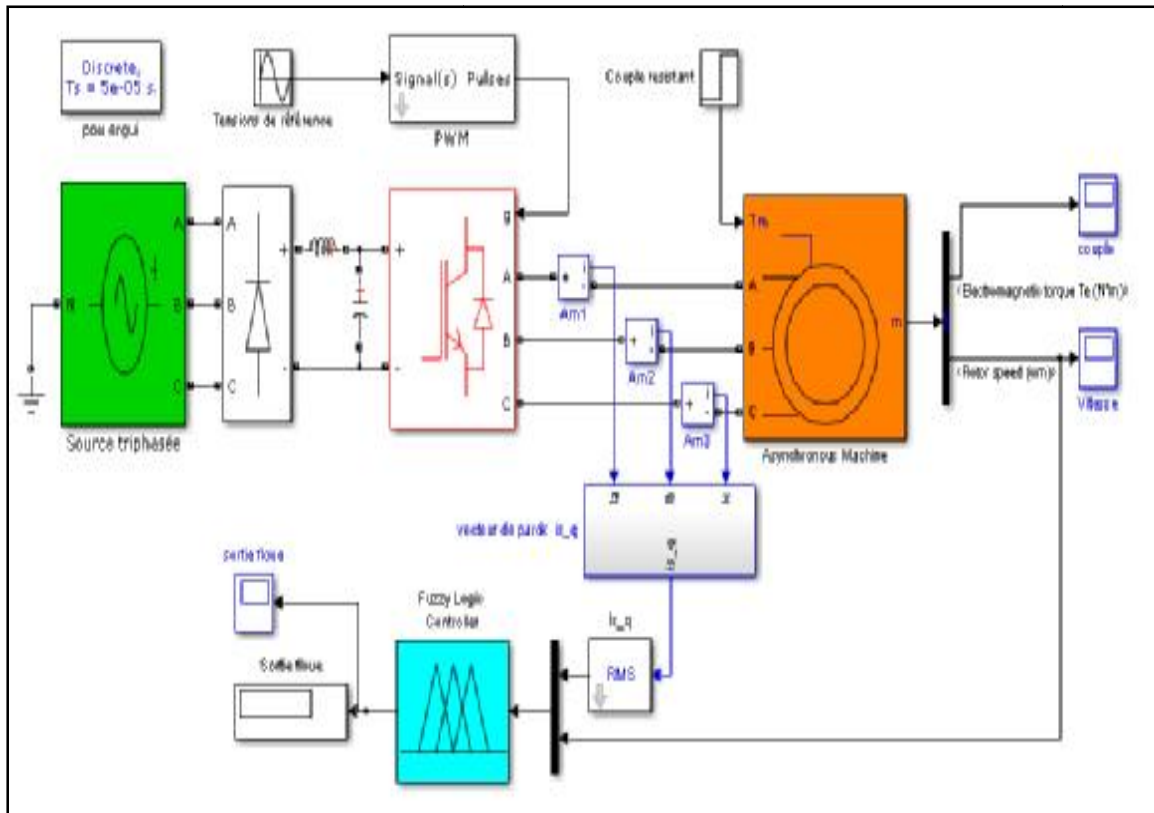


Figure 4.21 Structure de diagnostic des défauts par logique floue.

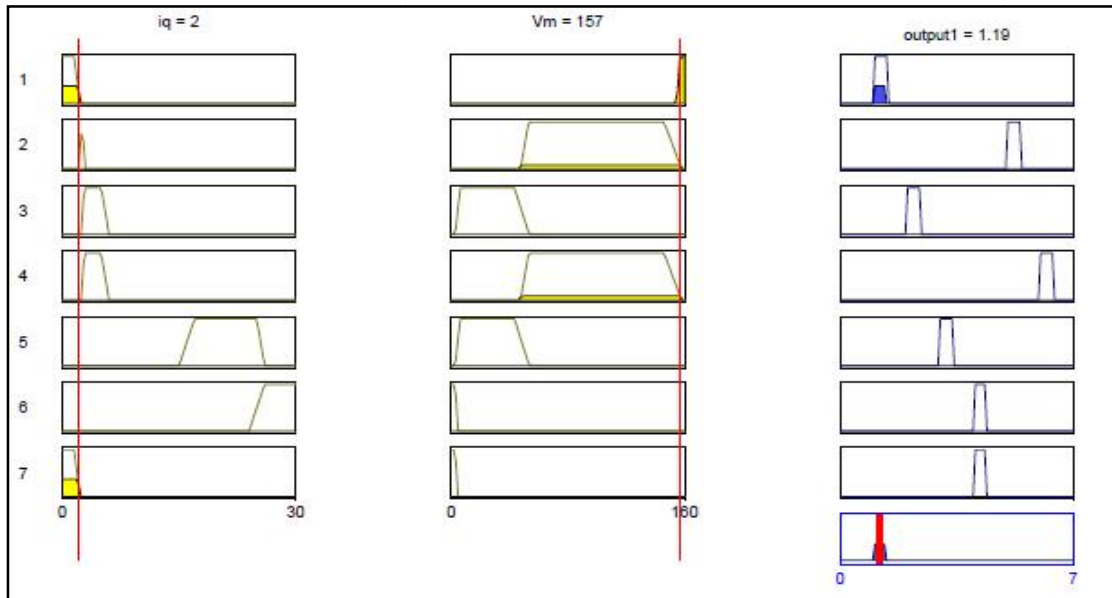


Figure 4.22 Diagramme d'inférence floue dans le cas sain

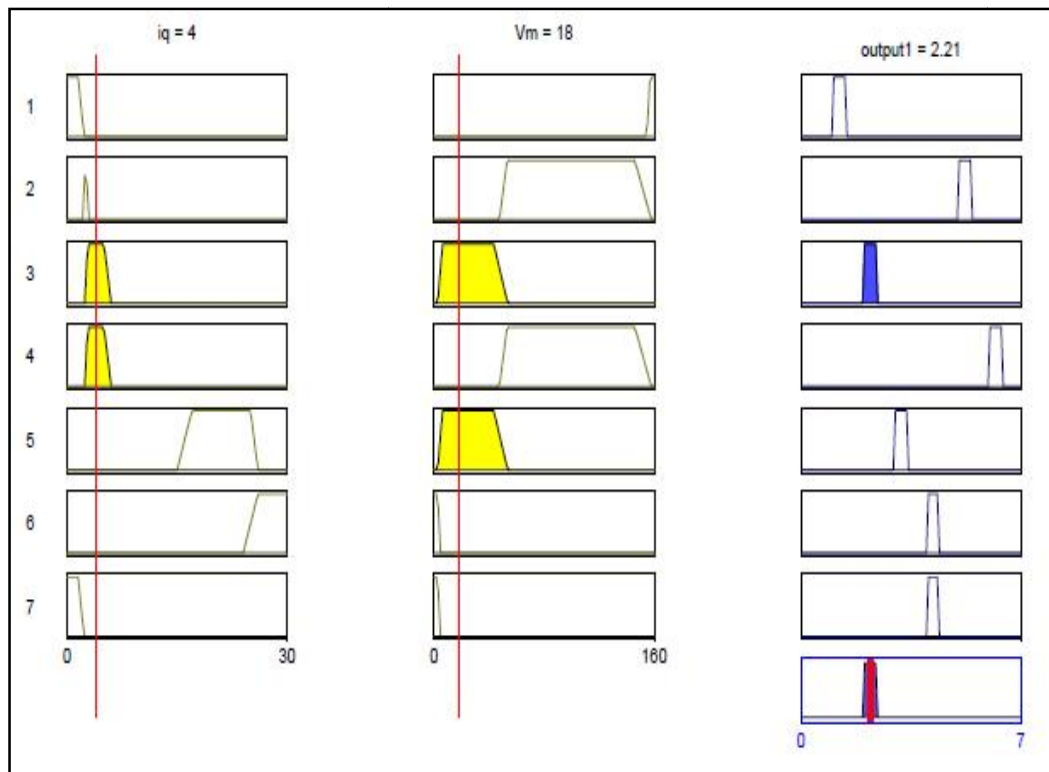


Figure 4.23 Diagramme d'inférence floue dans le cas d'ouverture des interrupteurs

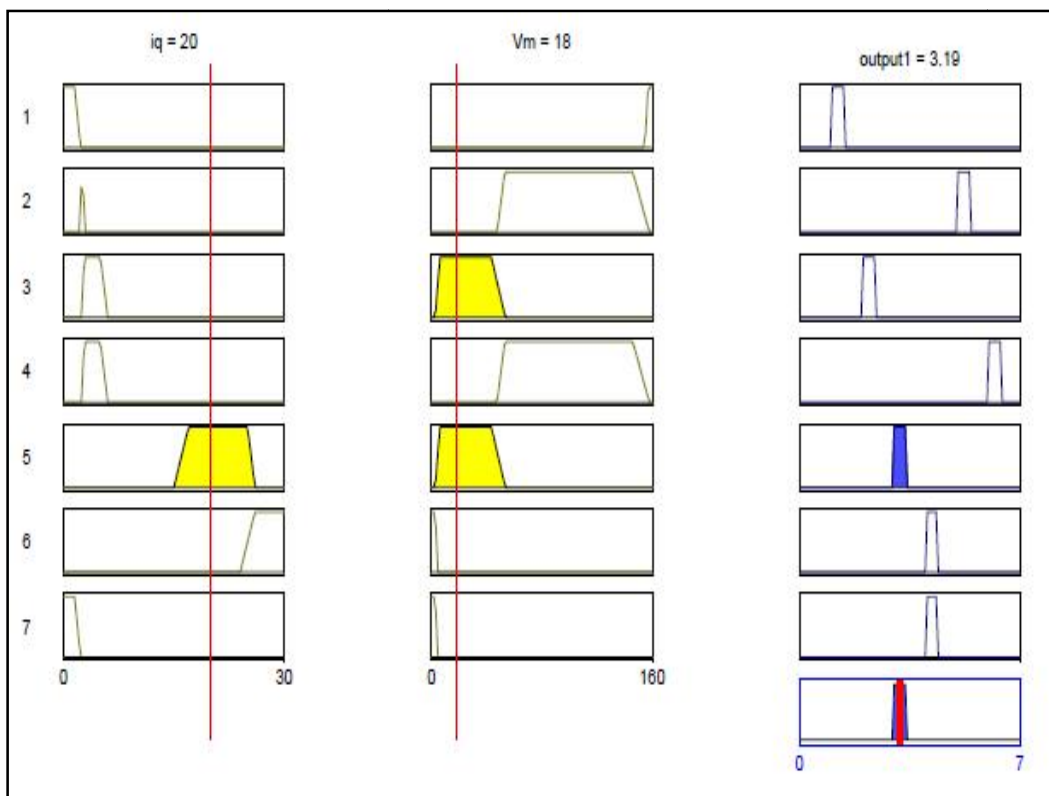


Figure 4.24 Diagramme d'inférence floue dans le cas de fermeture des interrupteurs

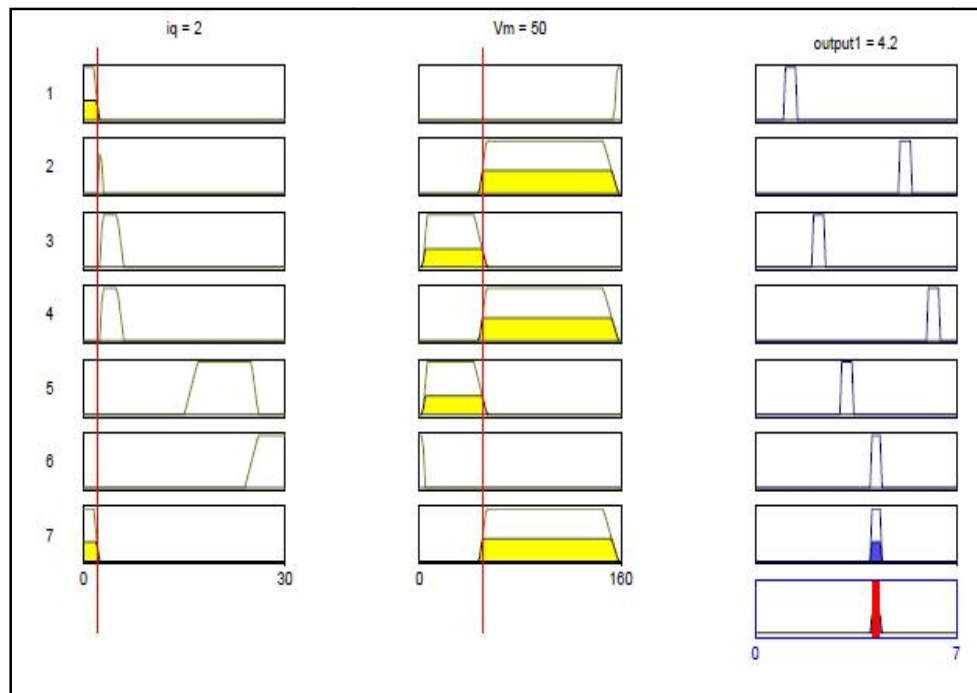


Figure 4.25 Diagramme d'inférence floue pour défaut statorique (court circuit sur une phase)

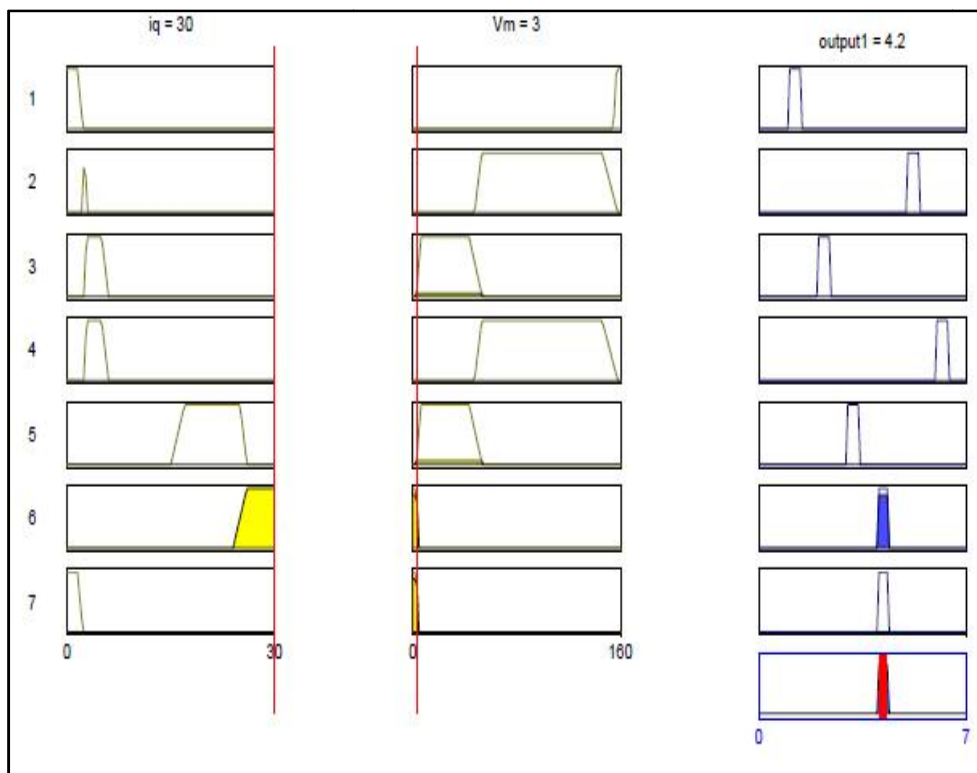


Figure 4.26 Diagramme d'inférence floue pour défaut statorique
(court circuit entre deux phases)

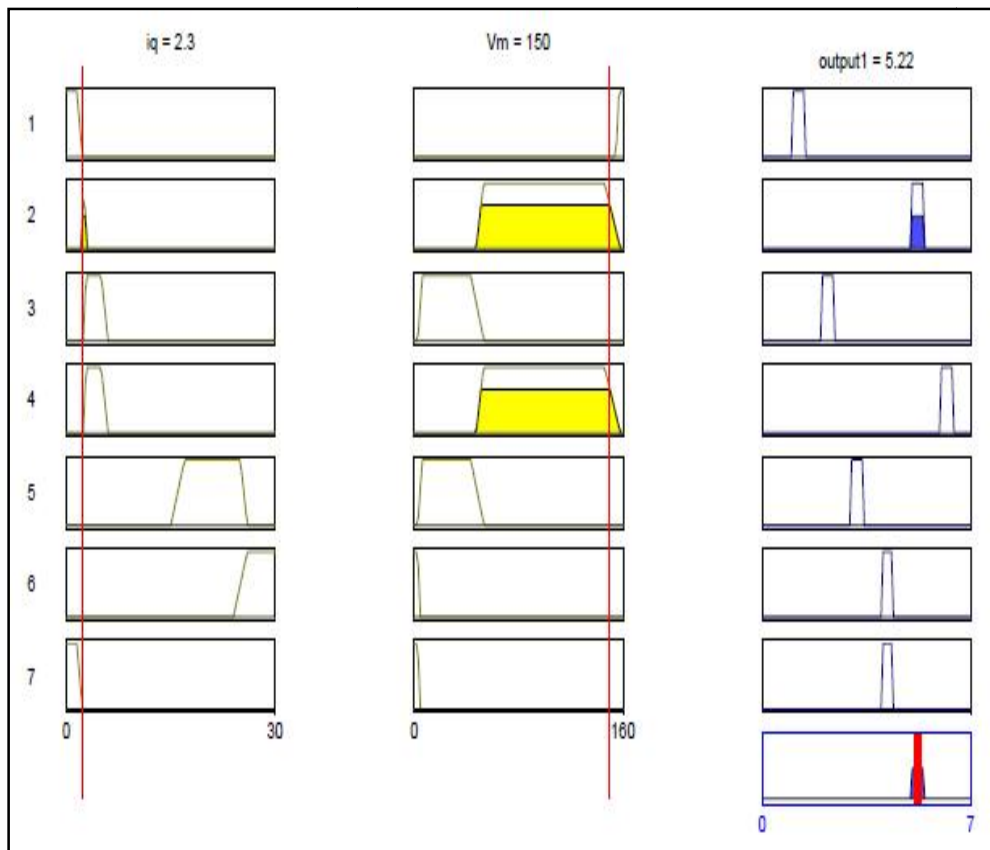


Figure 4.27 Diagramme d'inférence floue pour défaut rotorique

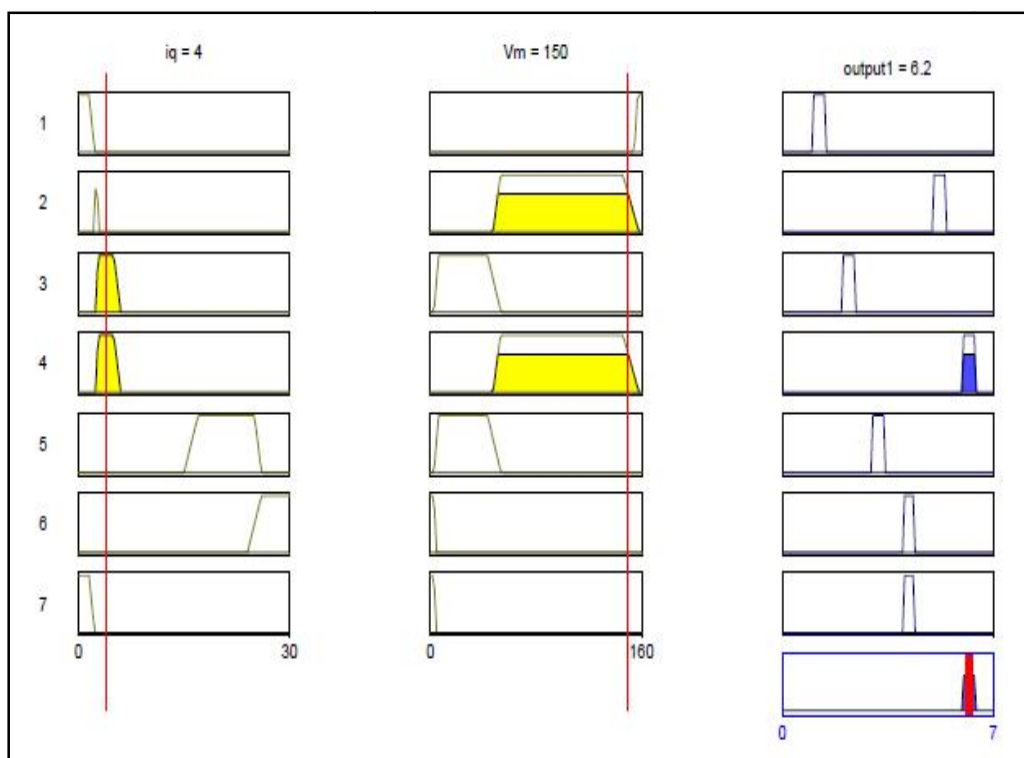


Figure 4.28 Diagramme d'inférence floue pour défauts mécaniques

4.10 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons fait de méthode de diagnostic de défauts l'une est l'analyse spectrale du courant statorique en régime permanent. Ce dernière se base sur le diagnostic des défauts dans les association ONDULEUR - MACHINE dans le cas sain et avec défaut en utilisant la technique de la FFT. Cette approche est la plus utilisée pour le diagnostic surtout pour la sensibilité des harmoniques.

L'autre c'est la technique logique floue, nous avons exposé un bref théorique de la logique floue, ensuite nous avons traité les différents défauts de l'association onduleur-machine telles que les défauts de court circuit et les défauts d'ouverture de interrupteurs. La présence de la logique floue permet d'identifier et localisation du défaut à quelle position soit à l'onduleur, du stator, du rotor ou mécanique.

Conclusion générale

Le travail que nous avons présenté dans ce mémoire, est consacré à l'étude de diagnostic des défauts dans l'association onduleur-machines asynchrones on utilisant deux techniques telles que l'analyse spectrale par la FFT des courants statoriques et la technique de la logique floue.

Nous avons présenté de nombreuses défaillances de l'association onduleur-machines asynchrones à savoir;

- les défauts de l'onduleur tel que les défauts de court-circuit et les défauts de l'ouverture des interrupteurs
- défaut du stator de la machine
- défaut du rotor de la machine
- défaut mécanique de la machine

Le modèle de diagnostic utilisé permet de simuler plusieurs défauts envisageables dans les circuits électriques et magnétiques des machines asynchrones ainsi que l'onduleur.

Les grandeurs de la machine (courants statorique et rotorique, vitesse et couple) son utilisés pour faire le diagnostic des défauts de la machine.

Nous avons utilisé l'analyse spectrale du courant statorique de la machine pour identifier et localiser les différents défauts dans l'association onduleur –machine.

Nous avons également utilisé la logique floue pour identifier et localiser les différents défauts dans l'association onduleur –machine d'une manière plus précise.

Les résultats de simulation que nous avons obtenus montre l'efficacité et les performances des ces approches (FFT et la logique floue) pour le diagnostic des défauts de l'association onduleur-machine asynchrone.

On constate que la technique de la logique floue donne une meilleure performance et bonne précision pour localisation des défauts (onduleur, stator, rotor et mécanique).

En perspectives, Chercher des méthodes et des techniques avancées de diagnostic appliquées aux énergies renouvelables.

Références Bibliographiques

Chapitre I

- [1] Grelet G. Clerc G. " Actionneurs électriques, principes modèles command", Editions Eyrolle, 1997.
- [2] B.de Fornel, " machines asynchrones (alimentation et caractéristique) ", technique d'ingénieur D3620, Toulouse 2008.
- [3] J.Chatelin, "machine électrique tom1", Edition Dunod, paris 1983.
- [4] Bousseksou Radouian, " Modélisation analytique des machines Asynchrone application au diagnostic," Thèse Magister, Université Mentouri Constantine Algérie, 2007.
- [5] L.baghli,"modélisation et commande de la machine asynchrone" IUFM de Lorraine.
- [6] S. Guy, B. Robert, Labrique Francis, " Les convertisseurs de l'électronique de puissance la conversion alternatif (volume 4) ". Edition tec&doc, 1995
- [7] Onduleur de tension: mise en œuvre et Structures-principes-applications. Techniques d'ingénieur, Traité de génie électrique D.3176-3177.
- [8] A. Khoudir, "Techniques de commande avancées appliquées aux machines de type asynchrone", Thèse de doctorat en Sciences en Electrotechnique de l'université de Constantine, 2010

Chapitre II

- [1] Zhou KZ and Wang D, "Relationship between space vector modulation and three-phase carrier based PWM: A comprehensive analysis", IEEE Transact, Indus, Elect, 2002.
- [2] Li L. Czarkowski D, Liu Y. Pillay P. "Multilevel space vector PWM technique based on phase-shifted harmonic suppression", in Conf. Rec. IEEE APEC.
- [3] H. Denoun, N. Benamrouche, S. Haddad, S. Meziani, S. Ait mamar,"ADSP (TMS320LF2407), based implementation of PWM for single phase AC/DC bipolar converter with unity power factor ", WSEAS Transactions en circuits, Issue 4, Vol.5, pp 354-360 June 2011.

- [4] S.Benrabia; A.Bendib,"Simulation numérique d'un moteur asynchrone à double étoile commande par onduleur multi niveaux "Mémoire d'ingénieur de l'Université Mohamed Boudiaf de Msila, Algérie Juin 2005.
- [5] J.P.Plateau,"Sur la conception d'un redresseur triphasé à modulation de largeur d'impulsion à faible pollution harmonique", Mémoire CNAM, Paris 1994.
- [6] Jean-Paul Louis,"Modélisation des machines électriques en vue de leur commande"
- [7] L .BAGHLI," modélisation et commande de la machine asynchrone ",2005

Chapitre III

- [1]A. ABED, "Contribution à l'Étude et au Diagnostic de la Machine Asynchrone", Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy-1,mars 2002.
- [2] H+.LALLOUANI,"Diagnostic des défauts dans l'association convertisseur machine à Induction"Mémoiremagistère,Electrotechnique,l'UniversitédeM'sila,2016.
- [3]D.MaquinandJ.Ragot,"Diagnosticdessystèmeslinéaires",EditionsHermes,2000.
- [4]M. Sahraoui, S. E. Zouzou, A. Menacer, A. Aboubou et A. Derghal,
"Diagnostic des défauts dans les moteurs asynchrones triphasés à cage, partie II: Méthodes dédiées à la détection des cassures de barres dans les moteurs asynchrones triphasés à cage", Courier du savoirN°5,pp.57-61, Juin 2004.
- [5] G. Didier, "Modélisation et diagnostic de la machine asynchrone en présence de défaillances," These Dr. l'université Henri Poincaré, Nancy-I, 2004.
- [6] khenfer Riad « Détection et isolation de défauts combinant des méthodes à base de données appliquées aux systèmes électro-énergétiques » thèse de Docteur en Sciences Université Ferhat Abbas - Setif-1.le 05 Mars 2015.
- [7] M. Benkaci, "Surveillance des systèmes mécatronique d'automobile par des méthodes d'apprentissage." Université de Toulouse, Université Toulouse III-Paul Sabatier, 2011.
- [8] O. Ondel, "Diagnostic par reconnaissance des formes: Application à un ensemble convertisseur-machine asynchrone." Ecole Centrale de Lyon, 2006.
- [9] A. O. Molina, "Méthodologie pour le placement des capteurs à base de méthodes de classification en vue du diagnostic." INSA de Toulouse, 2005.

[10] H. Hacene, "Identification et surveillance de processus dynamiques complexes par logique floue. Application à un échangeur de chaleur." Université M'hamed Bougara de Boumerdès, 2007.

[11] C. Christophe, "Surveillance des systèmes non linéaires: Application aux machines électriques." 2001.

- [12] Dilek Düstegör, Vincent Cocquempot, Marcel Staroswiecki et Erik Frisk « Isolabilité structurelle des défaillances Application à un modèle de vanne » RS, JESA.

Volume 38 – n° 1-2/2004, pages 103 à 123.

[13] S. Bachir, S. Tnani, J.C. Trigeassou, et G. Champenois «Diagnosis by parameter estimation of stator and rotor fault occurring in induction machines ».EPE'01,Graz,Autriche,Août 2001.

[14] T. Boumegoura.«Recherche de signature électromagnétique des défauts dans une machine asynchrone et synthèse d'observateurs en vue de diagnostic». Thèse Doctorat Ecole centrale de Lyon .Mars 2001.

Chapitre IV

[1] T. Deflandret P. Mauras 'Les Harmoniques sur les réseaux électriques Edition EYROLLES' 1998 . .

[2] A. Ressayd 'Problème et impacts des harmoniques sur les réseaux d'énergie électrique Sonelgaz Conférences sur les perturbations harmoniques'. Avril 2000

[3] R. Azouaou, « Ecoulement de puissance harmonique dans les réseaux arborescents et maillés » Sonelgaz Conférence sur les perturbations harmoniques. Avril 2001.

[4] A. Khaled, "Modélisation d'un Moteur Asynchrone pour le suivi de la sévérité des défauts rotorique par l'approche de la fonction d'enroulement", Mémoire de Magistère en électrotechnique, Université, d'Oran Mohamed Boudiaf, 2011.

[5] M. Sahraoui " Contribution au Diagnostic d'une Machine Asynchrone Triphasée à Cage "Mémoire de Magistère, Université de Biskra, Algérie, 2003.

[6] M. E. H. Benbouzid and G. B. Kliman, "What Stator Current Processing-Based Technique to Use for Induction Motor Rotor Faults Diagnosis" IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 18, no. 2, pages 238-244, June 2003.

[7] A. Ibrahim " Contribution au diagnostic de machines électromécaniques "Thèse de doctorat, université de saint Etienne Mars 2009.

[8] G. Didier, "Modélisation et diagnostic de la MAS en présence de défaillance" Thèse de doctorat, 2004, Université D'Henri Poincaré, Nancy-I, France.

[9] S. Emmanuel, "Diagnostic des MAS : Modèles et outils paramétriques dédiés à la simulation et à la détection de défauts ",Thèse de doctorat,1999, Ecole central de Nantes France.

[10] : Idées nettes sur la logique floue .presses polytechniques et universitaires Romandes

Annexe

Paramètres de la machine (moteur à cage) :

No.	Specification Parameter	
1.	1-HP(load 3-phase induction motor)	4000w
2.	V_{rated} (rated line to line voltage)	400 v
3.	P(number of poles)	2
4.	f_{rated} (rated frequency)	50Hz
5.	P_f (Power factor)	0.8
6.	V_r (rotational speed)	1430 rpm
7	r_s (stator wdg resistance)	1.405 ohms
8	X_{ls} (stator leakage reactance)	0.005839mH
9	X_{lr} (rotor leakage reactance)	0.005839mH
10	X_{lm} (stator magnetizing reactance)	172.2mH
11	r_r (rotor wdg resistance)	1.395
12	J (rotor inertia in $kg\ m^2$)	0.0131 kgm^2