



الجمهورية الجزائرية

قراطية الشعبية

Republique Algerienne Democratique Et Populaire

رة التعلیم العالی والبعث

العالمی

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة العربیة

التبسی - تبسی

Université Larbi Tébessi- Tébessa –

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de Genie Électrique

MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme de Master Académique**

En : **Électrotechnique**

Spécialité : **Électrotechnique Industrielle**

Par : BELAID Abdellah
NOUARI Soufiane

Sujet

Diagnostic des défauts dans une association onduleur-machine asynchrone triphasée

Présenté et soutenu publiquement, le 22/06/2021 , devant le jury composé de :

DJEBBAR Mohamed Salah
BOUGUERNE Abla
NEHAL Wasila

MCB
MCB
MAA

Président
Rapporteur
Examineur

Dédicace

Avant tout, je remercie Allah le tout puissant de m'avoir donné le courage et la patience pour réaliser ce travail

Je dédie ce modeste travail :

A ma mère pour l'éducation qu'ils m'a prodigué, avec tout les moyens et au prix de toutes les sacrifices qu'elle a consenti à mon égard,

❖ A mon père qui nous a quitte depuis quelques années , j'espère qu' Allah lui fasse sa miséricorde

❖ A tous mes frères Reda , anis, Anwer

*❖ A mon frère Toufik et sa femme sans oublier leurs merveilleux enfant
Mirou*

❖ Enfin, a tous les amis d'études surtout ceux d'électrotechnique et de génie électrique en générale qui m'ont apporté un soutien moral, une amitié inoubliable et précieuse, et un dévouement qui fut particulièrement indispensable.

ABDALLAH

Remerciements

Remerciements

Au nom d'Allah, le Tout Miséricordieux le Très Miséricordieux. Tout d'abord je remercie Allah le Tout Puissant, Celui Qui nous a accordé la réussite d'accomplir ce mémoire.

Je tiens à remercier ma directrice de mémoire enseignante **BOUGUERNE Abia** docteure à l'université de Tébessa pour son suivi continu ainsi que sa bonne orientation du travail.

Je remercie également les membres de jury nôtres professeurs:
DJABAR Med Saleh & NEHAL Oussila
D'avoir acceptés d'honorer par leur présence la soutenance de notre mémoire de master.

En fin je remercie tous ceux qui m'ont aidés de près ou de loin afin d'achever ce travail.

Symboles

<i>MAS</i>	<i>Machine Asynchrone</i>
<i>DC</i>	<i>Direct Curent</i>
<i>Cr</i>	<i>Couple mécanique résistant</i>
<i>Cf</i>	<i>Le coefficient de frottement</i>
Ω	<i>Vitesse mécanique de rotation du rotor</i>
<i>fs</i>	<i>Fréquence des courants statoriques</i>
<i>fr</i>	<i>Fréquence des courants rotoriques</i>
θ	<i>Angle entre les deux phases as et ar</i>
θ_s, θ_r	<i>Angles électriques statorique et rotorique</i>
<i>isa, isb, isc</i>	<i>Les courants statoriques suivants les axes as, bs et cs</i>
<i>ira, irb, irc</i>	<i>Les courants rotoriques suivants les axes ar, br et cr</i>
<i>id,qs, id,qr</i>	<i>Courant statorique (respectivement rotorique) suivant l'axe (d, q)</i>
<i>ia,βs, ia,βr</i>	<i>Courant statorique (respectivement rotorique) suivant l'axe (α, β)</i>
<i>vd,qs, vd,qr</i>	<i>Tension statorique (respectivement rotorique) suivant l'axe (d, q)</i>
<i>v α,βs, v α,βr</i>	<i>Tension statorique (respectivement rotorique) suivant l'axe (α, β)</i>
$\phi_{d,qs}, \phi_{d,qr}$	<i>Flux statorique (respectivement rotorique) suivant l'axe (d, q)</i>
$\phi_{\alpha,\beta s}, \phi_{\alpha,\beta r}$	<i>Flux statorique (respectivement rotorique) suivant l'axe (α, β)</i>
<i>[P]</i>	<i>Matrice de passage pour la transformation de Park</i>
<i>[T]</i>	<i>Matrices de rotation directe et inverse</i>
ω_s, ω_r	<i>Vitesses angulaires électriques statorique et rotorique</i>
θ_s, θ_r	<i>Angles électriques statorique et rotorique</i>
<i>Vred</i>	<i>Tension de redressée</i>
<i>Ired</i>	<i>Courant redressé</i>
<i>E</i>	<i>La tension filtrée « tension continu »</i>
<i>Idc</i>	<i>Courant continu</i>
$[V_s]$	<i>Tensions instantanées aux bornes des enroulements statoriques,</i>
$[V_r]$	<i>Tensions instantanées aux bornes des enroulements rotoriques,</i>
$[I_s]$	<i>Courants instantanés dans les phases des enroulements statoriques,</i>
$[I_r]$	<i>Courants instantanés dans les phases des enroulements rotoriques,</i>

$[\Phi_s]$ Flux totalisés instantanés traversant les enroulements statoriques,
 $[\Phi_r]$ Flux totalisés instantanés traversant les enroulements rotoriques.
 L_s Inductance propre d'une phase statorique.
 L_r Inductance propre d'une phase rotorique.
 M_s Inductance mutuelle entre deux phases statoriques.
 M_r Inductance mutuelle entre deux phases rotoriques.
 M Inductance entre deux phases statoriques et rotoriques lorsque ces deux coïncident.
 θ Écart angulaire entre stator et rotor.
 J représente le moment d'inertie de la machine étudiée.
 C_e représente le couple moteur.
 C_r représente le couple résistant (couple de charge).
 f représente le coefficient de frottement.
 Ω_r la vitesse angulaire de la machine.
 C_e Le couple électromagnétique développé s'écrit :
 θ_s l'angle de la transformation de Park
 L_s Inductance cyclique statorique.
 L_r Inductance cyclique rotorique.
 V_{an}, V_{bn} et V_{cn} représentent les tensions de la phase de charge (valeur alternative),
 V_{no} représente la tension de neutre de la charge par rapport au point fictif $\{o\}$.
 k température, pression, débit, fréquence de bruit sonore, etc. q : la taille du vecteur forme
 $y(t)$ la valeur efficace de la composante de rang h .
 φ_h Phase de la composante h lorsque $t = 0$.
 y_0 Valeur moyenne ou composante continue du signal $y(t)$.
 ω Pulsation fondamentale ($2\pi.f = 2\pi/T$).

h Rang de l'harmonique.

V_h Tension harmonique de rang h ;

Z_h Impédances harmoniques de rang h ;

I_h Courant harmonique de rang h .

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.

sain l'association machine-onduleur sans défaut ;

DO-O l'onduleur a un défaut d'ouverture ;

DO-F l'onduleur a un défaut de fermeture ;

DS défaut dans le stator ;

DR défaut dans le rotor ;

DM default mecanique ;

Liste des tableaux

Chapitre III

Tableau III.1 : résultats des autres cas de court-circuit des interrupteurs..... 54

Tableau III.2 : résultats des autres cas de circuit ouvert des interrupteurs..... 55

Tableau III.3 : résultats des autres cas de court-circuit en les phases..... 57

Chapitre IV

Tableau IV.1 : les valeurs du courant et de vitesse dans les autres cas du court-circuit des interrupteurs66

Tableau IV.2 : les valeurs du courant et de vitesse dans les autres cas du circuit ouvert des interrupteurs 68

Tableau IV.3 : la décision par logique floue des défaillances de l'association onduleur – machine 78

CHAPITRE I

ETUDE DE L'ASSOCIATION MACHINE ASYNCHRONE – ONDULEUR

Figure I.1 Éléments de constitution d'une machine asynchrone à cage d'écureuil	3
Figure I.2 Photo du stator d'une machine asynchrone.....	4
Figure I.3 Structure interne du rotor bobiné	4
Figure I.4 Rotor à cage d'écureuil	5
Figure I.5 Principe de fonctionnement d'un moteur asynchrone à cage.....	6
Figure I.6 Représentation des enroulements d'une machine asynchrone.....	6
Figure I.7 Modélisation de la machine asynchrone dans le repère de Park.....	10
Figure I.8 Repérage angulaire des systèmes d'axe	10
Figure I.9 Circuits équivalents (d, q):(a) circuit d'axe d, (b) circuit d'axe q	11
Figure I.10 Bloc de simulation de la machine asynchrone connectée au réseau.....	14
Figure I.11 courant statorique et rotorique (A).....	14
Figure I.12 courant statorique Id et Iq (A)	14
Figure I.13 Vitesse rotorique (tr/min) et Couple électromagnétique (N.m).....	15
Figure I.14 Schéma de principe de la conversion Continu - Alternative (DC – AC).....	16
Figure I.15 Réglage de la vitesse de rotation d'un moteur synchrone.....	18
Figure I.16 Alimentation de secours	18
Figure I.17 Transfert de l'énergie entre deux réseaux de fréquences différentes.....	19
Figure I.18 Structure d'un onduleur triphasé.....	20
Figure I.19 schéma de principe de la technique triangle-sinusoïdale.....	22
Figure I.20 Association onduleurs – machine asynchrone	23
Figure I.21 Schéma de simulation de l'association l'onduleur avec une MAS	23
Figure I.22 Courant statorique et rotorique (A)	24
Figure I.23 Courant statorique Id et Iq (A).....	24
Figure I.24 Vitesse rotorique (tr/min) et couple electromagnetique (N.m).....	24

CHAPITRE II

DIAGNOSTIC ET IDENTIFICATION DES DEFAUTS

Liste des figures

Figure II.1 Différentes étapes du diagnostic industrie.....	27
Figure II.2 Représentation temporelle vers fréquentielle	29
Figure II.3 Représentation temporelle vers ondelette.....	29
Figure II.4 Principe de la reconnaissance des formes	32
Figure II.5 Principe de l'inférence flou	33
Figure II.6 Espace de Parité en Continue	34
Figure II.7 Méthodes de diagnostic à base des observateurs	35
Figure II.8 Principe de l'approche par estimation des paramètres	35
Figure II.9 Représentation des différents défauts statoriques possibl.....	36
Figure II.10 Ouverture d'une phase.....	38
Figure II.11 Court-circuit entre phases.....	38
Figure II.12 : Représentation de l'excentricité statique et dynamique dans la MA.....	39
Figure II.13 Court-circuit sur un interrupteur d'un des bras.....	40
Figure II.14 Circuit ouvert sur un interrupteur d'un des bras.....	41

CHAPITRE III :

DIAGNOSTIC PAR ANALYSE SPECTRALE

Figure III.1 présentation d'un courant avec les différents harmoniques.....	46
Figure III.2 spectres des harmoniques.....	46
Figure III.3 Principe de la surveillance par analyse spectral.	49
Figure III.4 Schéma block de l'association onduleur-MAS	51
Figure III.5 Structure générale du l'onduleur de tension à deux niveaux.....	51
Figure III.6 analyse spectrale (FFT) du courant statorique I_a dans le cas sain.....	52
Figure III.7 analyse spectrale (FFT) du courant statorique(I_a) en cas d'un court-circuit dans un seul interrupteur.....	53
Figure III.8 analyse spectrale (FFT) du courant statorique(I_a)en cas d'un défaut de court-circuit sur deux interrupteurs..	53
Figure III.9 Spectre du courant statorique (I_a) en cas d'un défaut de circuit ouvert sur un seul interrupteur..	54
Figure III.10 Analyse spectrale du courant I_a ... avec défaut de court circuit sur l'interrupteurs G1 et G5.....	55
Figure III.11 Analyse spectrale du courant I_a avec défaut c-c sur la phase (a).....	56
Figure III.12 Analyse spectrale du courant I_a avec défaut c-c entre deux phases (a) et (b).....	56
Figure III.13 Analyse spectrale du courant I_a avec défaut mécanique.....	57
Figure III.14 Analyse spectrale du courant I_a avec défaut rotorique.....	58

CHAPITRE IV :

DIAGNOSTIC DES DEFAUTS DE L'ASSOCIATION ONDULEUR MACHINE

ASYCHRONE PAR LOGIQUE FLOUE

Figure IV.1 Fonction caractéristique d'appartenance pour la logique Booléenne et la logique floue...	59
Figure IV.2 Différentes formes de fonctions d'appartenance	60
Figure IV.3 Représentation des variables linguistiques	61
Figure IV.4 Univers de discours normalisé dans l'intervalle $[-1 +1]$	62
Figure IV.5 Schéma bloc d'un système de surveillance de l'état d'un moteur	64
Figure IV.6 Vitesse et le courant isq en cas sain	64
Figure IV.7 Vitesse et courant isq en cas de fermeture des interrupteurs	65
Figure IV.8 Vitesse et courant isq en cas d'ouverture des interrupteurs	67
Figure IV.9 Evolution de courant et la Vitesse du moteur avec défaut dans le rotor.....	69
Figure IV.10 Évolution de courant et la vitesse du moteur avec défaut (c.c dans une phase).....	69
Figure IV.11 Evolution de courant du moteur avec défaut (c.c entre les phases).....	70
Figure IV.12 Évolution des courants statoriques du moteur avec défaut mécanique	71
Figure IV.13 Fonctions d'appartenances des variables d'entrées	72
Figure IV.14 Fonctionsd'appartenances de la sortie (état dustator)	72
Figure IV.15 Structure de diagnostic des défauts par logique floue.	73
Figure IV.16 Diagramme d'inférence floue dans le cas sain	74
Figure IV.17 Diagramme d'inférence floue dans le cas d'ouverture des interrupteurs	74
Figure IV.18 Diagramme d'inférence floue dans le cas de fermeture des interrupteurs.....	75
Figure IV.19 Diagramme d'inférence floue pour défaut statorique (c-c sur une phase).....	75
Figure IV.20 Diagramme d'inférence floue pour défaut statorique (c-c entre deux phases)	76
Figure IV.21 Diagramme d'inférence floue pour défaut rotorique.....	76
Figure IV.22 Diagramme d'inférence floue pour défauts mécaniques	77

Sommaire

CHAPITRE I :

ETUDE ET SIMULATION DE L'ASSOCIATION ONDULEUR-MACHINE ASYNCHRONE

I.1 Introduction.....	3
I.2 Machine asynchrone	3
I.2.1 Constitution	3
I.2.1.1 Stator.....	4
I.2.1.2 Rotor	4
I.2.3 Principe de fonctionnement	5
I.2.4 Modélisation de la machine asynchrone	6
I.2.5 Équation de la machine asynchrone en régime quelconque	7
I.2.5.1 Équations électriques (de tension)	7
I.2.5.2 Équations magnétiques (de flux)	7
I.2.5.3 Équations mécaniques	8
I.2.6 Transformation de Park	8
I.2.6.1 Principe de la transformation de Park	9
I.2.6.2 Équations de la machine asynchrone dans le repère de Park	10
I.2.6.3 Choix de référentiel	12
I.2.7 Simulations et interprétations des résultats.....	13
I.3 Etude des onduleurs.....	16
I.3.1 Définition des onduleurs	16
I.3.2 Différents types d'onduleur	16
I.3.2.1 onduleur non autonome	16
I.3.2.2 onduleur autonome	16
I.3.3 Les applications des onduleurs	17
I.3.3.1 Réglage de la vitesse de rotation d'un moteur synchrone.....	17
I.3.3.2 Alimentation de secours	18
I.3.3.3 Transfert d'énergie entre deux réseaux de fréquences différentes.....	18
I.3.4 Structure de l'onduleur triphasé	19
I.3.4.1 Modélisation d'un onduleur triphasé	20

Sommaire

I.3.4.2 Commande d'un onduleur triphasé	21
I.4 Association onduleurs – machine asynchrone.....	22
I.4.1 Simulation de l'association convertisseurs – machine asynchrone.....	23
I.4.2 Interprétation des résultats.....	25
I.5 Conclusion.....	25

CHAPITRE II :

DIAGNOSTIC ET IDENTIFICATION DES DEFAUTS

II.1 Introduction.....	26
II.2 diagnostic..	26
II.2.1 élément de diagnostic.....	26
II.2.1 Étapes du diagnostic.....	26
II.3 Différent Méthodes de Diagnostic.....	27
II.3.1 Méthodes sans modèles.....	28
II.3.1.1 Méthodes basées sur le traitement de signal.....	28
II.3.1.2 Diagnostic par l'analyse des vibrations mécaniques.....	29
II.3.1.3 Diagnostic par l'analyse du flux magnétique axial de fuite.....	30
II.3.1.4 Diagnostic par l'analyse du couple électromagnétique.....	30
II.3.1.5 Diagnostic par mesure du courant statorique.....	30
II.3.1.6 Approche du Vecteur de Park.....	31
II.3.1.7 Méthodes basées sur l'intelligence artificielle.....	31
a) La reconnaissance des formes (RDF)	31
b) Les réseaux de neurones artificiels (RNA)	32
c) Les systèmes d'inférences floue (SIF)	32
3.2 Méthodes avec Modèle.....	33
a) Espace de parité.....	33
b) Diagnostic à base des observateurs.....	34
c) Diagnostic par estimation paramétrique.....	35
II.3 Défaillances des machines asynchrones triphasées.....	36
II.3.1 Défaits statoriques.....	36

Sommaire

a) Court-circuit dans une phase.....	36
b) Circuit ouvert sur une phase.....	37
c) Court-circuit entre deux phases.....	37
II.3.2 Défaits rotoriques.....	38
a) Ruptures de barres.....	38
b) Ruptures d'anneaux.....	38
II.3.3 Défaits mécaniques.....	39
II.4 Défaillances du convertisseur.....	40
II.4.1 Court-circuit sur un interrupteur.....	40
II.4.2 Circuit ouvert sur un interrupteur.....	41
II.4.3 Court-circuit de deux interrupteurs.....	41
II.4.4 Circuit ouvert de deux interrupteurs.....	42
II.4.5 Claquage du condensateur du bus continu.....	42
II.5 Conclusion.....	43

CHAPITRE III :

ANALYSE SPECTRALE DES DEFAUTS DE L'ASSOCIATION Onduleur- MACHINE ASYNCHRONE

III.1 Introduction.....	44
III.2 Spectre d'un signal	44
III.3 Étude des harmoniques	44
III.3.1 Harmonique de Courant et de tension	45
III.3.2 Taux individuel de distorsion	46
III.3.3 Taux global de distorsion.....	46
III.3.4 Propagation des armoniques	47
III.4 Technique de diagnostic	48
III.4.1 Analyse des Signatures du Courant Statorique (MCSA).....	48
III.4.2 Analyse spectrale du courant statorique	49
III.4.3 Technique de la FFT.....	49
III.5 Surveillance du moteur asynchrone basée sur la technique de la MCSA ..	50

Sommaire

III.5.1 Signatures spectrales des défauts dans le spectre du courant statorique ..	51
III.5.2 association onduleur – machine : sans défauts.....	52
III.5.3 association onduleur – machine : Défauts dans l’onduleur	52
III.5.4 Défauts dans la machine asynchrone.....	56
III.6 Conclusion	58

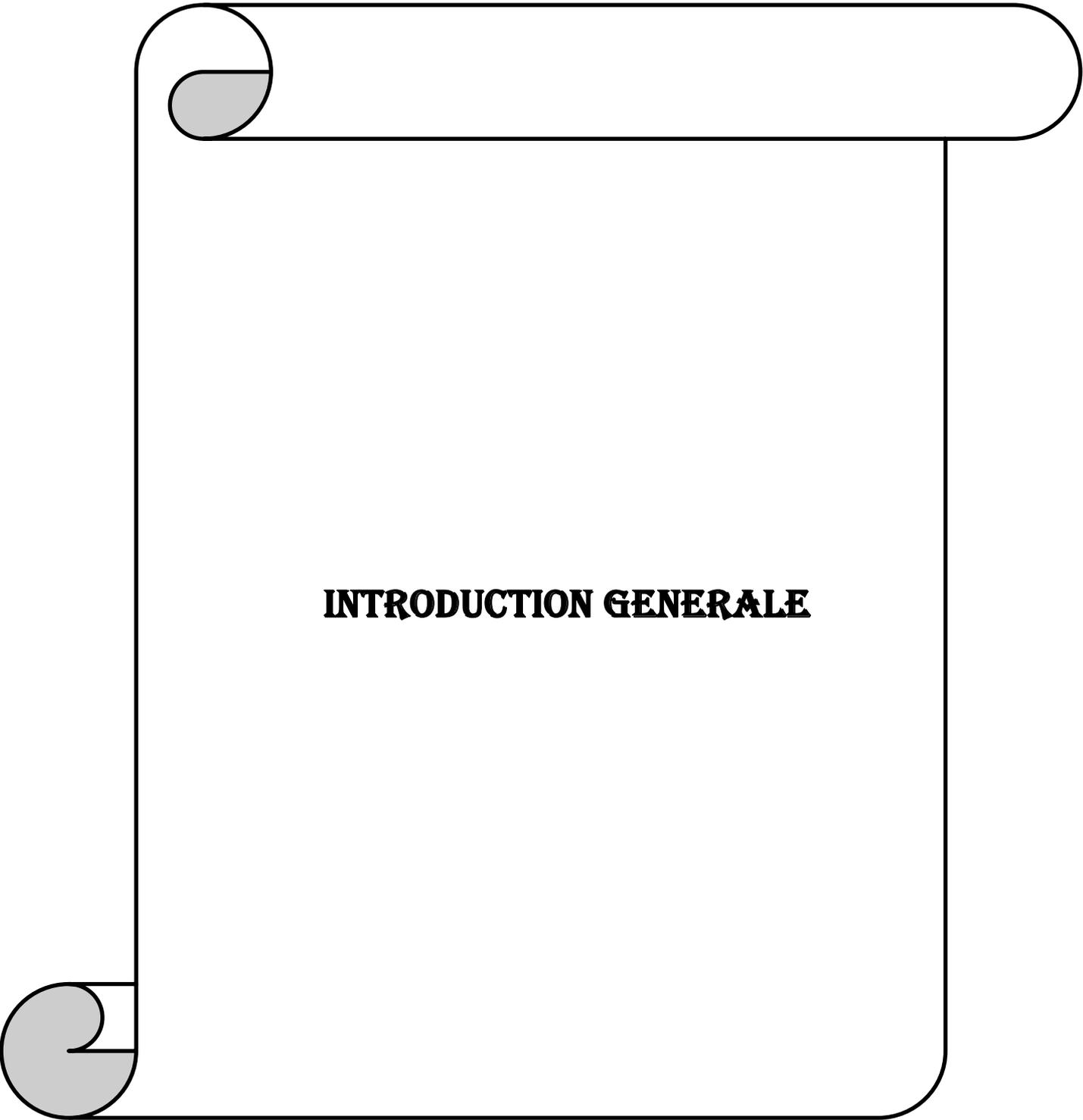
CHAPITRE IV :

DIAGNOSTIC DES DEFAUTS DE L’ASSOCIATION ONDULEUR -MACHINE ASYNCHRONE PAR LOGIQUE FLOUE

IV.1 Introduction	59
IV.2 Base générale de la logique floue	59
IV.2.1 Ensembles flous.....	59
IV.2.2 Fonction d’appartenance	60
IV.2.3 Variable linguistique.....	60
IV.2.4 opérateurs	61
IV.3 Étapes de contractions d’un modèle de logique flou	61
IV.3.1 Fuzzification	61
IV.3.2 Base de connaissances	62
IV.3.2.1 Base de données	62
IV.3.2.2 Base de règles.....	62
IV.3.3 Logique de prise de décision (bloc d’inférence)	63
IV.3.4 Défuzzification	63
IV.4 Notion sur la RMS	63
IV.5 Système de surveillance et de détection.....	63
IV.6 Simulation et Extraction de signatures de défauts	64
IV.6.1 Cas sain	64
IV.6.2 Défaillances du convertisseur	65
IV.6.2.1 Cas d’un défaut Court-circuit sur des interrupteurs.....	65
IV.6.2.2 Cas d’un défaut d’ouvertures des interrupteur.....	66

Sommaire

IV.6.3 Défaillances au MAS.....	68
IV.6.3.1 Défaillances au rotor.....	68
IV.6.3.2 Défaillances au Stator	69
a) Cas de défaut de court-circuit dans la phase.....	69
b) Cas de défaut de court-circuit entre deux phases.....	70
IV.6.3.3 Défaillances mécaniques.....	70
IV.6.4 Variables d'entrée-sortie de système flou.....	71
IV.6.5 Simulation d'un système de diagnostic.....	73
IV.7 Conclusion.....	78
 Conclusion générale	 79
Annexe	81



INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Les machines à courant alternatif notamment la machine asynchrone est largement utilisée dans les domaines de fortes puissances, jusqu'à l'avènement de l'électronique de puissance. La plus grande utilisation de cette machines est due à la standardisation, à sa grande robustesse et à son bas coût d'achat et d'entretien. En fait, elle est présente dans des nombreuses applications et en particulier dans les secteurs de pointe comme l'aéronautique, le nucléaire, les industries chimiques et dans le transport (métro, train,...) .

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.

D'importantes machines tournantes industrielles sont très souvent nécessairement présentes au cœur de ces systèmes industriels. Les défaillances inhérentes aux machines tournantes et pouvant amener à de pareilles situation sont très nombreuses.

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 ...).

Beaucoup de ces défaillances entraînent des vibrations de la machine défaillante. Les vibrations peuvent alors être comme des symptômes de défaillances qui permettraient de traduire l'état mécanique d'une machine tournante. Pour cela, ces vibrations doivent être traitées à travers d'outils d'aide à la détection et au diagnostic de défaillances. La terminologie d'usage pour qualifier ces interventions est riche : détection, localisation, diagnostic, surveillance etc. Dans ce contexte, le présent mémoire est articulé en quatre chapitres :

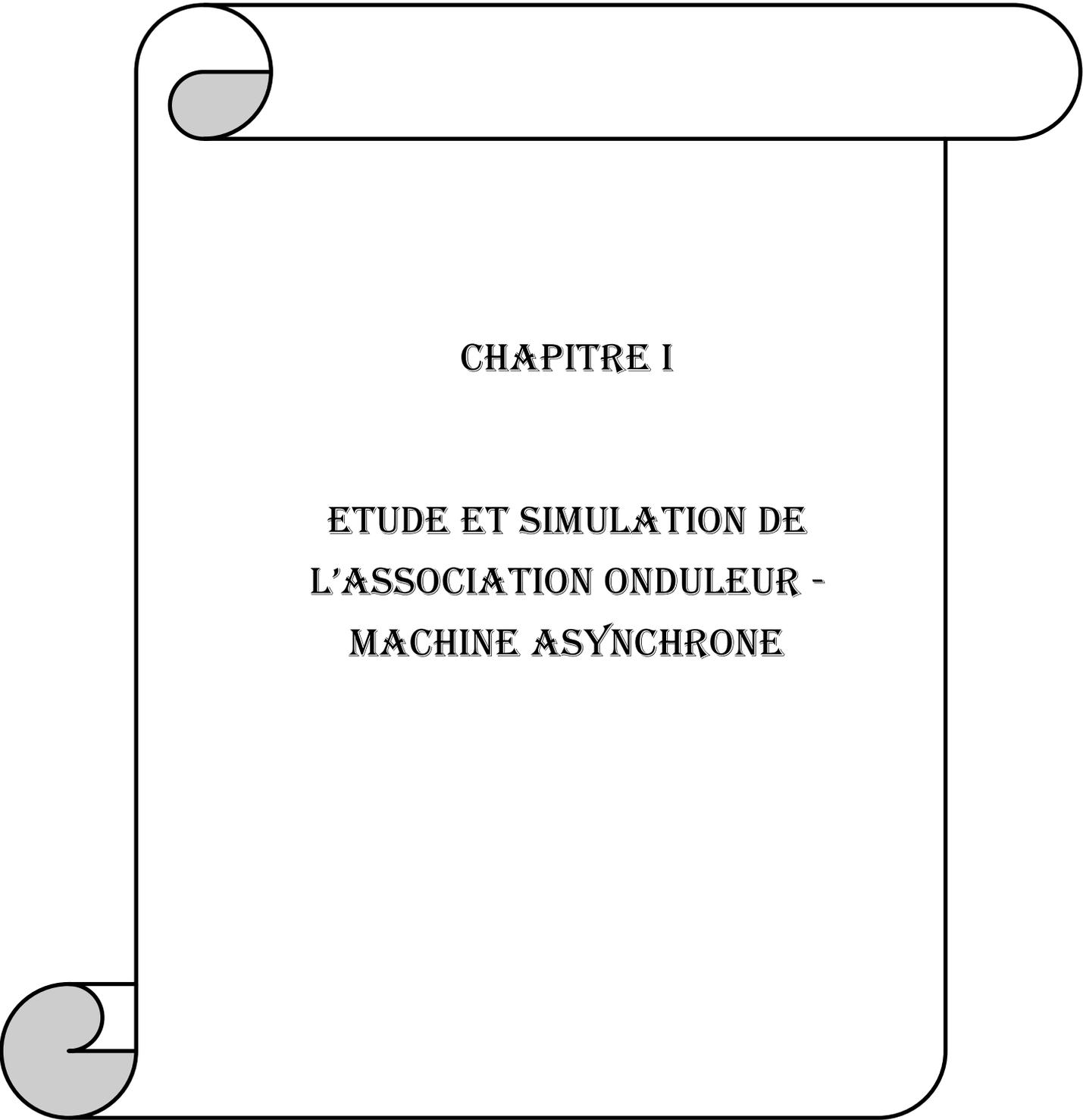
Le premier chapitre présente une modélisation et simulation de la machine asynchrone à cage d'écureuil. Le modèle de l'association onduleur-machine asynchrone est validé par une simulation numérique des grandeurs électrique et mécanique. Les résultats obtenus seront présentés et interprétés.

Le deuxième chapitre présente un état de l'art sur le diagnostic et les différents défauts internes et externes de la machine asynchrone et de l'onduleur, les méthodes de diagnostic qui peuvent être utilisées pour le traitement des défauts, en particuliers les techniques de diagnostic avancées.

Pour le troisième chapitre, une étude par l'analyse spectrale des harmoniques (FFT) sera présentée et validée sur les différents défauts internes et externes de l'association onduleur-machine asynchrone.

Le dernier chapitre porte sur une méthode proposée pour surveiller et localiser les défauts prévus de système onduleur-machine a base de la logique floue. La méthode proposée est basée sur le diagnostic et la surveillance des différents défauts internes et externes de l'association onduleur-machine asynchrone.

Nous terminerons notre travail par une conclusion générale.



CHAPITRE I

ETUDE ET SIMULATION DE L'ASSOCIATION ONDULEUR - MACHINE ASYNCHRONE

I.1 Introduction

La machine asynchrone occupe maintenant une grande place dans les applications industrielles, notamment dans les entraînements réglables de vitesse. Car il présente de nombreux avantages tels que sa puissance massique, sa robustesse, sa facilité de mise en œuvre, son faible coût, etc....

Dans autre coté, La plupart des récepteurs électriques dans le domaine industriel doivent être alimentés à partir de sources triphasées à courant alternatif à une fréquence fixe de 50 Hz, mais nous savons que les sources d'énergie produisent de l'électricité à une fréquence et une amplitude variables, et grâce aux progrès technologiques de l'électronique de puissance, ils ont été adaptés aux besoins de ces récepteurs.

Dans ce chapitre, il y'a deux parties, dans le premier partie on s'intéresse à l'étude de la modélisation et la simulation d'une machine asynchrone triphasée à cage d'écureuil. En fin, le deuxième partie est réservé à la simulation d'une machine asynchrone alimentée par un onduleur de tension à deux niveaux à commande MLI. Des résultats de simulation sur les grandeurs machines seront présentés et interprétés à la fin de ce chapitre.

I.2 Machine asynchrone

1.2.1 Constitution

La machine asynchrone, souvent appelée moteur à induction comprend un stator et un rotor, constitués de tôles d'acier au silicium et comportant des encoches dans lesquelles on place les enroulements (figure I.1).

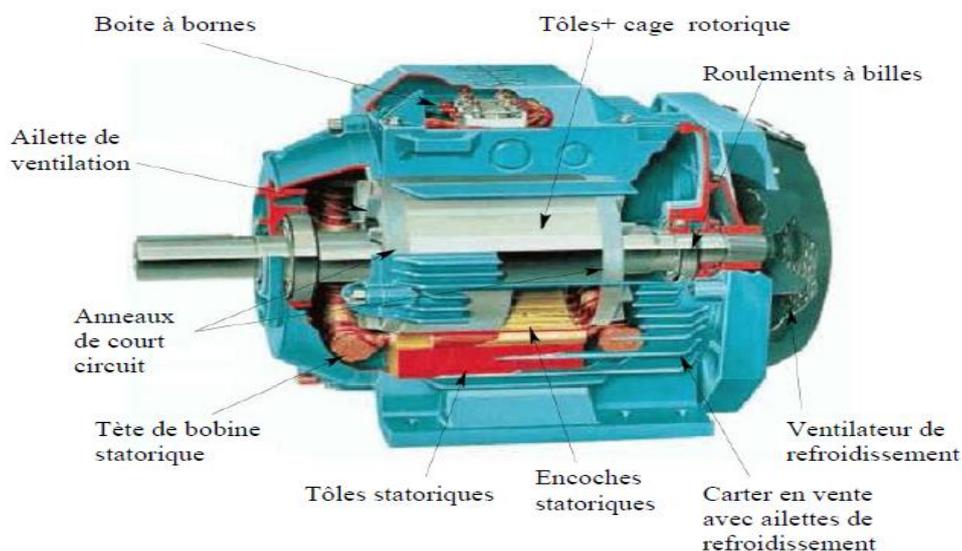


Figure I.1 Éléments de constitution d'une machine asynchrone à cage d'écureuil

1.2.1.1 Stator

Le stator représente la partie fixe de la machine, il joue le rôle d'inducteur. Son rôle est de créer un champ tournant qui tourne avec une vitesse de synchronisme n_s . Il comporte donc trois enroulements alimentés par un réseau triphasé de fréquence f .

Chaque enroulement comprend un nombre des bobines en série pour faire apparaître $2p$ pôles. Pour limiter les pertes magnétiques généralement le circuit magnétique du stator est feuilleté.

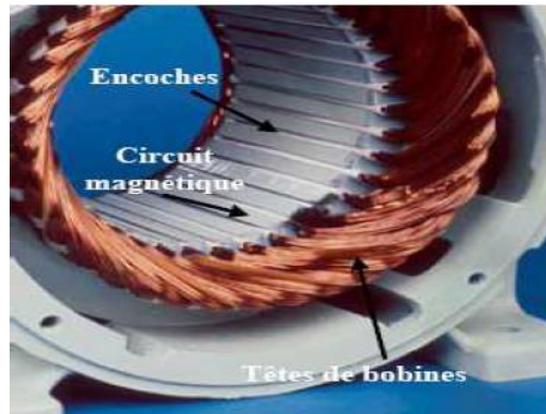


Figure I.2 Photo du stator d'une machine asynchrone

1.2.2.2 Le rotor

Le rotor est la partie mobile de la machine, joue le rôle de l'induit.

Il existe deux types de rotor :

A. Rotor bobiné

Il s'agit d'un enroulement triphasé, logé dans des encoches à la périphérie du rotor, dont le nombre de pôles ($2p$) est le même que celui du stator, et dont les phases sont couplées en étoile. Les extrémités de l'étoile sont reliées à trois bagues en cuivre calées sur l'arbre. Ces bagues frottent sur des balais fixes ce qui permet l'insertion d'un rhéostat triphasé en série avec le rotor.

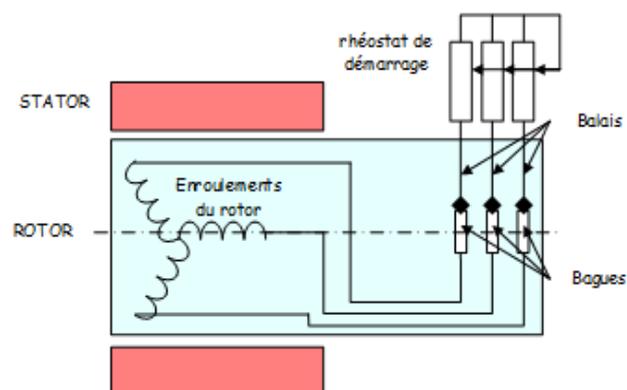


Figure I.3 Structure interne du rotor bobiné

Avantage :

- ✓ possibilité de modifier la résistance des enroulements rotoriques

Inconvénient :

- ✓ fragilité des contacts glissants
- ✓ Balais frottant sur des bagues
- ✓ Coût élevé...etc.

A. Rotor à cage d'écureuil

Il est constitué de barres conductrices parallèles entre elles et réunies par deux couronnes également conductrices.

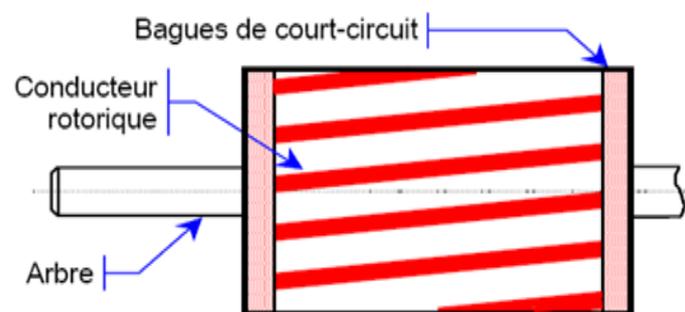


Figure I.4 Rotor à cage d'écureuil

Avantage :

- ✓ Il dispose une grande robustesse et peu coûteux.

Inconvénient

- ✓ au démarrage, de mauvaises performances (courant élevé et faible couple).
- ✓ Pas de possibilité d'agir sur les caractéristiques mécaniques.

I.2.3 Principe de fonctionnement

Les bobinages du stator alimentés en triphasé créent un champ tournant. Ce champ induit dans le rotor des courants de Foucault qui s'opposent à la cause qui les a engendrés c'est à dire la variation du champ magnétique. Les enroulements du rotor étant court circuits, ils sont donc le siège de courants induits.

Ces courants créent un champ magnétique dans le rotor qui tend à s'aligner avec celui du stator (tournant à la vitesse dite de synchronisme). Si le rotor tournait à la même

vitesse que le champ tournant créé par le stator, le rotor ne verrait pas de variation de champ magnétique et les courants induits disparaîtraient. C'est pourquoi le rotor tourne forcément à une vitesse différente du champ tournant d'où le nom de moteur asynchrone (asynchrone : différence de vitesse). Le coefficient de glissement g quantifie cette différence de vitesse mise en rapport de la vitesse de synchronisme.

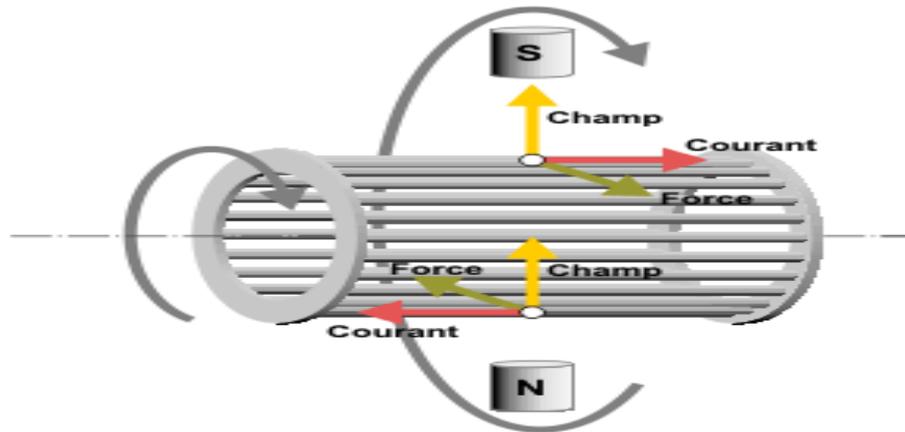


Figure I.5 Principe de fonctionnement d'un moteur asynchrone à cage

I.2.4 Modélisation de la machine asynchrone

La machine asynchrone est composée de deux parties :

- ✓ d'un primaire qui est généralement le stator, le plus souvent triphasé, relie à la source d'alimentation.
- ✓ d'un secondaire, généralement le rotor, qui est en court circuit.

Les enroulements des trois phases statoriques et des trois phases rotoriques dans le repère triphasé 'abc' peuvent être représentés comme indique sur la figure I.6. Les phases rotoriques sont court circuitées sur elles mêmes. θ est l'angle électrique entre l'axe de la phase à statorique et la phase à rotorique.

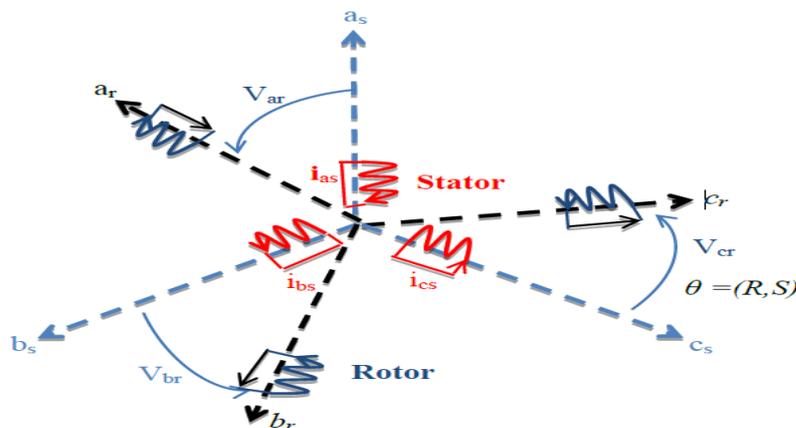


Figure I.6 Représentation des enroulements d'une machine asynchrone

I.2.5 Équation de la machine asynchrone en régime quelconque :

I.2.5.1 Équations électriques (de tension) :

La loi de Faraday permet d'écrire :

$$V = Ri + \frac{d\varphi}{dt}. \quad (\text{I.1})$$

En tenant compte des hypothèses simplificatrices citées auparavant, les équations des tensions des trois phases statoriques et des trois phases rotoriques s'écrivent :

$$\begin{cases} V_s = R_s I_s + \frac{d}{dt} \Phi_s \\ V_r = R_r I_r + \frac{d}{dt} \Phi_r \end{cases} \quad (\text{I.2})$$

Où les indices représentent respectivement les grandeurs relatives au stator et au rotor.

$$[V_s] = \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix}; [I_s] = \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix};$$

$$[\Phi_s] = \begin{bmatrix} \Phi_{sa} \\ \Phi_{sb} \\ \Phi_{sc} \end{bmatrix} \quad (\text{I.3})$$

$$[V_r] = \begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix}; [I_r] = \begin{bmatrix} I_{ra} \\ I_{rb} \\ I_{rc} \end{bmatrix}; [\Phi_r] = \begin{bmatrix} \Phi_{ra} \\ \Phi_{rb} \\ \Phi_{rc} \end{bmatrix} \quad (\text{I.4})$$

Avec :

$[V_s]$: Tensions instantanées aux bornes des enroulements statoriques,

$[V_r]$: Tensions instantanées aux bornes des enroulements rotoriques,

$[I_s]$: Courants instantanés dans les phases des enroulements statoriques,

$[I_r]$: Courants instantanés dans les phases des enroulements rotoriques,

$[\Phi_s]$: Flux totalisés instantanés traversant les enroulements statoriques,

$[\Phi_r]$: Flux totalisés instantanés traversant les enroulements rotoriques.

I.2.5.2 Équations magnétiques (de flux) :

Dans le même contexte, les relations linéaires entre les flux et les courants. Elles sont

Exprimées sous forme matricielle comme suit :

$$\begin{cases} \Phi_s = L_{ss} I_s + M_{sr} I_r \\ \Phi_r = L_{rr} I_r + M_{rs} I_s \end{cases} \quad (\text{I.5})$$

Les quatre matrices d'inductances sont données par les relations suivantes :

$$[L_{SS}] = \begin{bmatrix} L_S & M_S & M_S \\ M_S & L_S & M_S \\ M_S & M_S & L_S \end{bmatrix}; [L_{rr}] = \begin{bmatrix} L_r & M_r & M_r \\ M_r & L_r & M_r \\ M_r & M_r & L_r \end{bmatrix} \quad (I.6)$$

L_S : Inductance propre d'une phase statorique.

L_r : Inductance propre d'une phase rotorique.

M_S : Inductance mutuelle entre deux phases statoriques.

M_r : Inductance mutuelle entre deux phases rotoriques.

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

$$[M_{sr}] = [M_{rs}]^T = M \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\theta & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\theta \end{bmatrix} \quad (I.7)$$

M : Inductance entre deux phases statoriques et rotoriques lorsque ces deux coïncident.

θ : Écart angulaire entre stator et rotor.

1.2.5.3 Équations mécaniques

Les équations mécaniques de la machine asynchrone peuvent se mettre sous la forme :

$$J \frac{d\Omega_r}{dt} = C_i = C_e - C_r - f\Omega_r \quad (I.8)$$

Avec :

J : représente le moment d'inertie de la machine étudiée.

C_e : représente le couple moteur.

C_r : représente le couple résistant (couple de charge).

f : représente le coefficient de frottement.

Ω_r : la vitesse angulaire de la machine.

Le couple électromagnétique développé s'écrit :

$$C_e = p [I_s]^T \frac{d[M_{sr}]}{d\theta} [I_r] \quad (I.9)$$

La résolution analytique de ces équations dans ce repère est très difficile, car le system d'équation est à coefficients variables en fonction de l'angle θ .

1.2.6 Transformation de Park :

➤ Lors de l'élaboration des équations électriques de la machine asynchrone, on s'est rendu compte que les grandeurs statoriques sont liées aux grandeurs

rotoriques a travers l'angle θ , alors on a procédé a simplifier ces équations en appliquant des transformations orthogonaux.

- La transformation de Park est une transformation triphasée-biphasée suivie d'une rotation. Elle permet de passer du repère abc vers le repère $\alpha\beta$ puis vers le repère dq .
- Le repère $\alpha\beta$ est toujours fixe au repère abc , par contre le repère dq est mobile. Cette transformation a pour effet de rendre les inductances mutuelles du modèle de la machine indépendante de la rotation, c'est à dire de l'angle θ .

I.2.6.1 Principe de la transformation de Park :

La transformation de PARK permet le passage du système triphasé au système biphasé en faisant correspondre aux variables réelles (a, b, c) leurs composantes homopolaire, directe et en quadrature ($d, q, 0$). Cette dernière, assure l'invariance de la puissance instantanée entre les repères triphasés et « dqo ».

Dans la théorie de Park, on utilise la transformation unique pour les courants, tensions et flux, ce qui rend les deux modèles identiques du point de vue électrique et magnétique.

La transformation de PARK est définie par sa matrice de transformation) $[P(\theta_e)]$. Elle s'exprime comme suit:

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \sin\theta & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{I.10})$$

Le changement de variables est défini par l'expression suivante :

$$[X_{d,q,o}] = [P][X_{a,b,c}] \quad (\text{I.11})$$

Pour le stator: $\theta_e = \theta_s$ et pour le rotor: $\theta_e = \theta_r$.

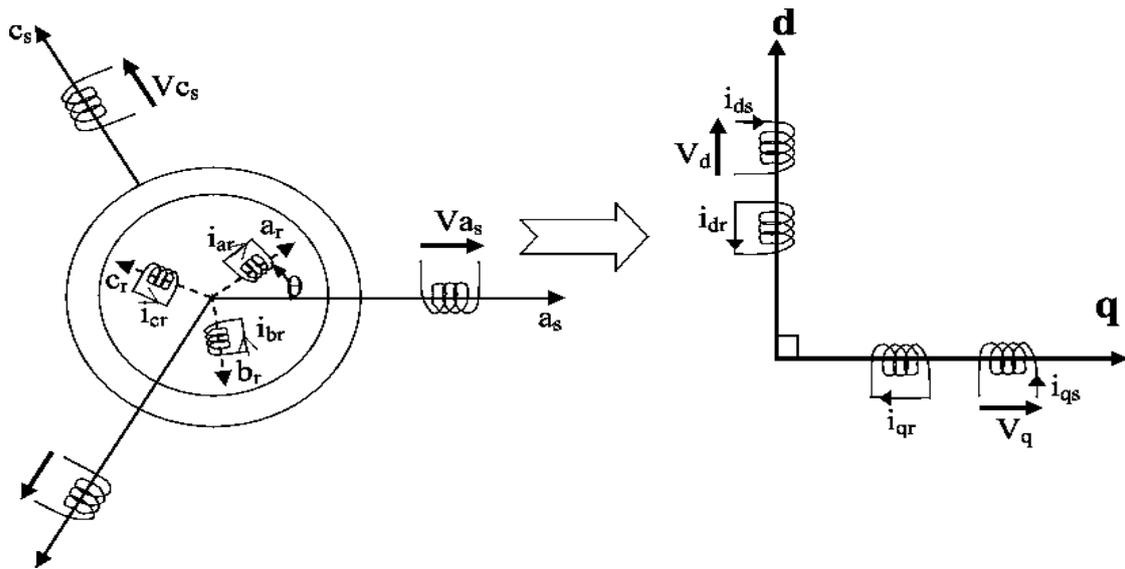


Figure I.7 Modélisation de la machine asynchrone dans le repère de Park

I.2.6.2 Équations de la machine asynchrone dans le repère de Park :

On applique la transformation de Park aux courants, tensions et flux. Un changement de variables fait intervenir l'angle entre l'axe des enroulements et les axes d et q. Si l'on note par θ_s l'angle de la transformation de Park des grandeurs statoriques et par θ_r , celui des grandeurs rotoriques, il existe une relation qui les lie et qui simplifie les équations et par la même le modèle final.

Les repères de la transformation de Park des grandeurs statoriques et celles des grandeurs rotoriques doivent coïncider pour simplifier ces équations. Ceci se fait en liant les angles θ_s et θ_r par la relation suivante : $\theta_s = \theta + \theta_r$

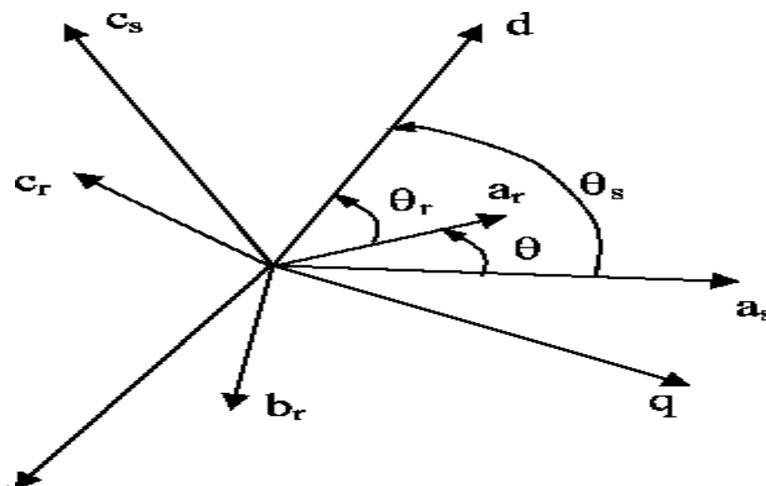


Figure I.8 Repérage angulaire des systèmes dans le repère de Park

a) Équations électriques

Dans le repère de Park tournant à la vitesse ω_a par rapport au stator, les équations des tensions s'écrivent après l'application de la transformation de Park aux grandeurs comme suit :

➤ Pour le stator :
$$\begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{d}{dt} \Phi_{ds} - \omega_a \Phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + \frac{d}{dt} \Phi_{qs} + \omega_a \Phi_{ds} \end{cases} \quad (I.12)$$

➤ Pour le rotor :
$$\begin{cases} V_{dr} = R_r I_{dr} + \frac{d}{dt} \Phi_{dr} - (\omega_a - \omega_m) \Phi_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \frac{d}{dt} \Phi_{qr} + (\omega_a - \omega_m) \Phi_{dr} \end{cases} \quad (I.13)$$

Les circuits équivalents des systèmes d'équations (I.12) et (I.13) sont représentés dans le repère tournant (dq) par la figure (I.9).

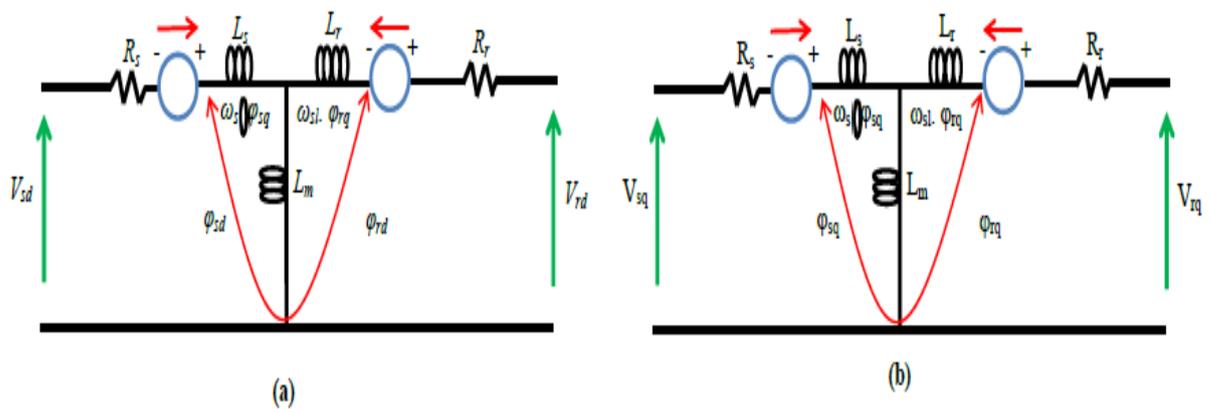


Figure I.9 Circuits équivalents (d, q):(a) circuit d'axe d, (b) circuit d'axe q

b) Équations magnétiques :

Les différentes expressions des flux statoriques et rotoriques s'écrivent dans le modèle de Park sous la forme qui suit :

$$\begin{cases} \Phi_{ds} = L_s I_{ds} + L_m I_{dr} \\ \Phi_{qs} = L_s I_{qs} + L_m I_{qr} \\ \Phi_{dr} = L_r I_{dr} + L_m I_{ds} \\ \Phi_{qr} = L_r I_{qr} + L_m I_{qs} \end{cases} \quad (I.14)$$

L_s, L_r et L_m sont des inductances cycliques et ont pour expression :

$L_s = I_s - m_s$: Inductance cyclique statorique.

$L_r = I_r - m_r$: Inductance cyclique rotorique.

$L_r = \frac{3}{2} m_{sr}$: Inductance mutuelle cyclique entre rotor et stator.

c) Équations du couple électromagnétique instantané

Divers manipulations de l'équation fondamentale du couple, procédant d'un choix d'élimination de certaines variables des équations des flux conduisent à l'établissement d'autres expressions du couple qui seront autant de points de départ dans la recherche d'une stratégie de sa commande. On trouve :

$$\begin{aligned}
 C_e &= pL_m(i_{sq} i_{rd} - i_{sd} i_{rq}) \\
 C_e &= p(\varphi_{sq} i_{sd} - \varphi_{sd} i_{sq}) \\
 C_e &= p(\varphi_{rq} i_{rd} - \varphi_{rd} i_{rq}) \\
 C_e &= p \frac{L_m}{L_r L_s \sigma} (\varphi_{rd} \varphi_{sq} - \varphi_{rq} \varphi_{sd}) \quad (I.15)
 \end{aligned}$$

I.2.6.3 Choix de référentiel :

Il existe différentes possibilités concernant le choix de l'orientation du repère d'axes (d, q) qui dépendent des objectifs de l'application, il y a Trois types de référentiels sont intéressants :

- ✓ *Référentiel lié au stator.*
- ✓ *Référentiel lié au rotor.*
- ✓ *Référentiel lié au champ tournant.*

a) Référentiel lié au stator

les grandeurs électriques évoluent en régime permanent électrique à la pulsation statorique ω_s . Cette méthode sera retenue très souvent dans l'étude des estimateurs et des observateurs des flux, de la vitesse et des variations importantes de la vitesse de rotation, associée ou non avec des variations de la fréquence d'alimentation. Ce système d'axe est immobile par rapport au stator. Il se traduit par les conditions :

$$\frac{d}{dt}\theta_s = \omega_s = 0 ; \frac{d}{dt}\theta_r = \omega_r = -\omega_m$$

Les équations électriques prennent la forme suivante :

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s I_{sd} + \frac{d}{dt} \varphi_{sd} \\ V_{sq} = R_s I_{sq} + \frac{d}{dt} \varphi_{rq} \end{cases} \quad (I.16)$$

$$\begin{cases} V_{sd} = R_r I_{rd} + \frac{d}{dt} \varphi_{rq} + \omega_r \varphi_{rq} \\ V_{sq} = R_s I_{sq} + \frac{d}{dt} \varphi_{rd} - \omega_r \varphi_{rd} \end{cases} \quad (I.17)$$

b) Référentiel lié au rotor

Les grandeurs évoluent en régime permanent électrique à la pulsation des courants rotoriques. Elles sont de faible fréquence (fréquence de glissement). La position du repère est déterminée généralement par intégration de la vitesse du moteur. Ce système d'axe est immobile par rapport au rotor. Il se traduit par les conditions :

$$\frac{d}{dt}\theta_s = 0 \quad ; \quad \frac{d}{dt}\theta_r = \omega_r$$

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s I_{sd} + \frac{d}{dt}\varphi_{sd} - \omega_r \varphi_{rq} \\ V_{sq} = R_s I_{sq} + \frac{d}{dt}\varphi_{rq} + \omega_r \varphi_{rd} \end{cases} \quad (\text{I.18})$$

Au rotor :

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r I_{rd} + \frac{d}{dt}\varphi_{rd} \\ V_{rq} = R_s I_{sq} + \frac{d}{dt}\varphi_{rq} \end{cases} \quad (\text{I.19})$$

c) Référentiel lié au champ tournant

Le modèle est simplifié par l'utilisation d'équations plus simples. En régime permanent électrique les grandeurs du modèle sont continues, puisque la pulsation du champ tournant est égale à la pulsation des tensions statoriques. Cette méthode est souvent utilisée dans l'étude des commandes vectorielles par orientation du flux. Ce système d'axe tourne avec la vitesse du champ électromagnétique crée par les enroulements du stator. Il se traduit par les conditions : $\frac{d}{dt}\theta_s = \omega$; $\frac{d}{dt}\theta_r = g \cdot \omega$

Avec :

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s I_{sd} + \frac{d}{dt}\varphi_{sd} - \omega_r \varphi_{rq} \\ V_{sq} = R_s I_{sq} + \frac{d}{dt}\varphi_{rq} + \omega_r \varphi_{rd} \end{cases} \quad (\text{I.20})$$

Au rotor :

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r I_{rd} + \frac{d}{dt}\varphi_{rd} + g\omega_s \varphi_{rq} \\ V_{rq} = R_s I_{sq} + \frac{d}{dt}\varphi_{rq} - g\omega_s \varphi_{rd} \end{cases} \quad (\text{I.21})$$

I.2.7 Simulations et interprétations des résultats

On note que les paramètres de simulation utilisés sont donnés dans l'annexe.

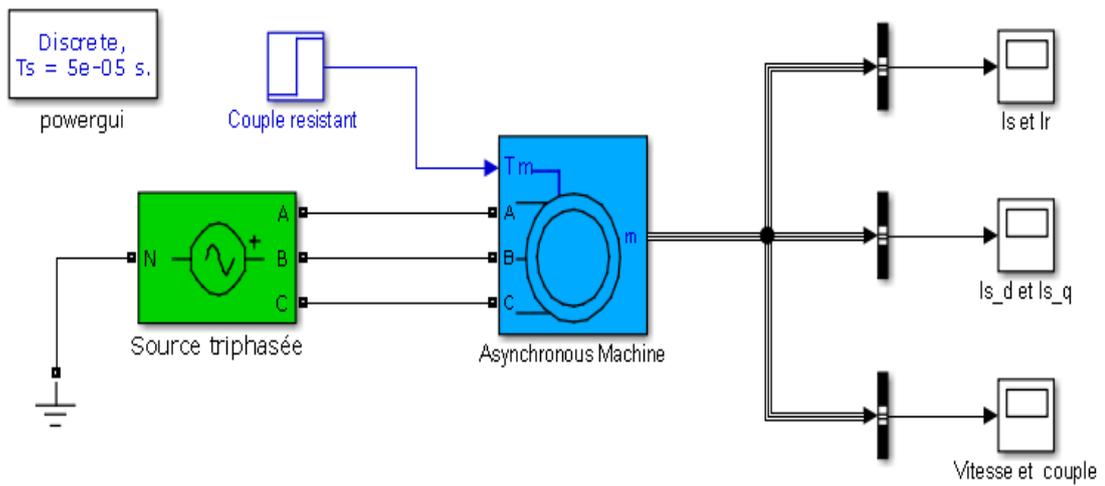


Figure I.10 Bloc de simulation de la machine asynchrone connectée au réseau

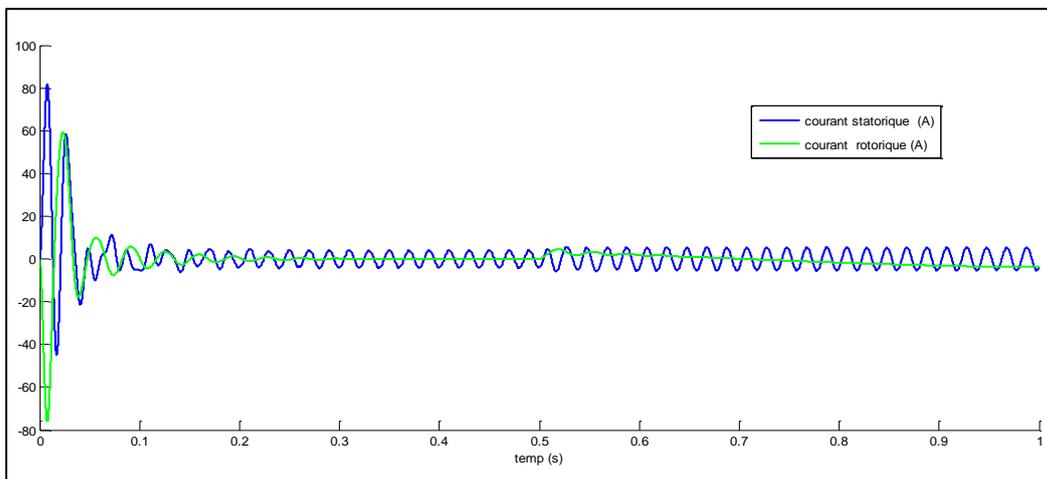


Figure I.11 courant statorique et rotorique (A)

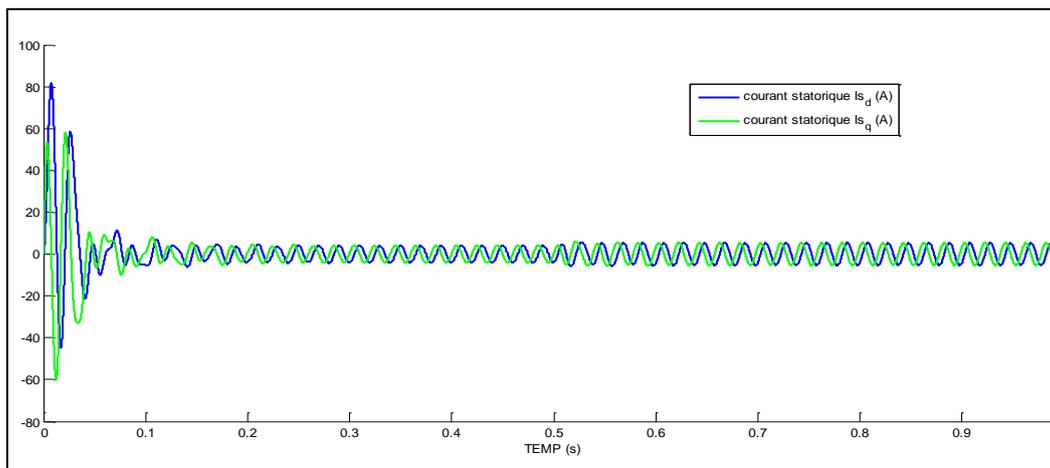


Figure I.12 courant statorique Id et Iq (A)

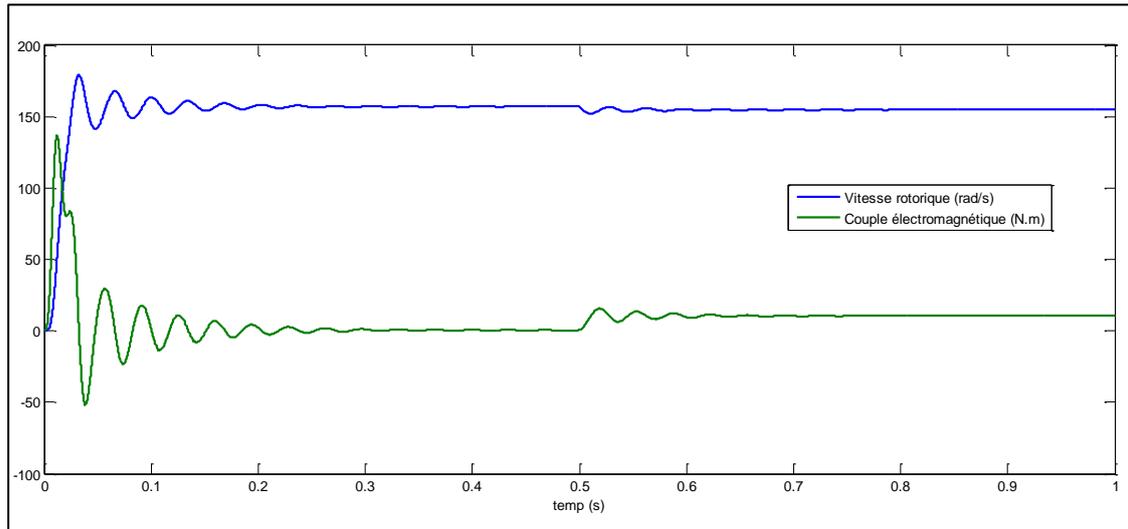


Figure I.13 Vitesse rotorique (tr/min) et Couple électromagnétique (N.m)

Dans la figure I.10, on va simuler numériquement le fonctionnement de la machine asynchrone alimenté directement par le réseau standard 230/400V, 50HZ. Entre l'instant 0 et 0.5s, les résultats de simulation permet de constater que le démarrage à vide avec une tension nominale permet d'avoir: Aux premiers instants, les courants statoriques et rotoriques présentent des oscillations successives autour de zéro qui montre le régime transitoire de la machine, une fois le régime permanent est atteint, les courants statoriques rendent sous la forme sinusoïdale et se stabilisent à une valeur fixe (inférieur à 20A), par contre les courants rotoriques s'annule, Figures I.11, I.12. La vitesse atteint très rapidement le régime permanent ceci étant due à la faible inertie de la machine. Ce qui impose un temps de réponse très court. En régime permanents la vitesse est constante et égale à la vitesse de synchronisme ($1500\text{tr/min} = 157\text{rad/s}$), Figure I.13. On note aussi que le couple électromagnétique élevé pendant le démarrage, une fois le régime permanent atteint, ce dernier sa nul et suit la valeur de zéro du à l'absence de la charge. On applique un couple de charge $C_r = 40\text{N.m}$ à l'instant de 0.5s. Lors de l'application de la charge, le couple électromagnétique rejoint sa valeur de référence qu'est égale à la valeur du couple de charge avec une réponse très rapide, par conséquent, on constate une décroissance de vitesse rotorique qui se traduit par le glissement très fort. Les courants statoriques évoluant selon la charge appliquée à l'arbre du moteur ainsi que les courants rotoriques.

I.3 Etude des onduleurs

I.3.1 Définition des onduleurs

Un onduleur est un convertisseur statique assurant la conversion d'énergie électrique de la forme continue (DC) à la forme alternative (AC). En fait, cette conversion d'énergie est satisfaite au moyen d'un dispositif de commande. Il permet d'obtenir aux bornes du récepteur une tension alternative réglable en fréquence et en valeur efficace, en utilisant ainsi une séquence adéquate de commande.

Cette tension peut comporter un ou plusieurs créneaux par alternance suivant qu'il s'agit d'une commande à un créneau par alternance ou d'une commande par Modulation de Largeur d'Impulsions (Pulse Wit Modulation).

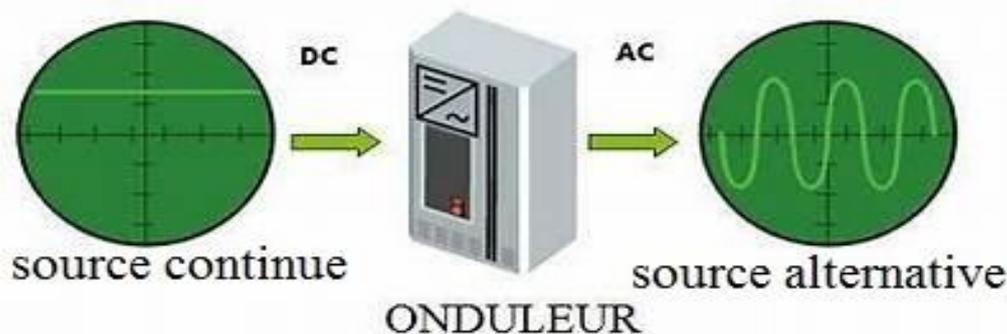


Figure I.14 Schéma de principe de la conversion Continu - Alternative (DC – AC)

I.3.2 Différents types d'onduleur

Les onduleurs sont classés en deux grandes catégories :

I.3.2.1 Onduleur non autonome

C'est le nom donné au montage redresseur tous les thyristors qui, en commutation naturelle assistée par le réseau auquel il est raccordé, permet un fonctionnement en onduleur.

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].

I.3.2.2 Onduleur autonome

Un onduleur est dit autonome s'il utilise l'énergie d'un circuit auxiliaire propre à lui pour la commutation des thyristors ou l'autre semi conducteurs dans ce cas nous commandons la fréquence la forme d'onde de la tension de sortie.

On distingue deux types d'onduleurs autonomes.

a) **Onduleur de courant**

L'onduleur de courant transforme un courant continu en courants triphasés dans les enroulements de la machine.

Il peut fonctionner en commutation naturelle, c'est le cas des machines synchrones. La commutation forcée est réalisée pour toutes les autres machines. Ce type d'onduleur ne permet que le réglage de la fréquence des grandeurs de sortie, l'amplitude de celle-ci doit être réalisée par ajustement de la grandeur d'entrée.

b) **Onduleur de la tension**

Les onduleurs de tension constituent une fonction incontournable de l'électronique de puissance. Les deux grands domaines d'application classiques des onduleurs de tension sont les alimentations de secours et les entraînements à vitesse variable, la forte évolution des onduleurs de tension s'est appuyée, d'une part, sur le développement des composants semi-conducteurs contrôlables, puissants, robustes, et rapides, et d'autre part, sur l'utilisation quasi généralisée des techniques dites de modulation de largeur d'impulsion.

I.3.3 Les applications des onduleurs

Parmi les nombreux domaines d'emploi des onduleurs autonomes, on trouve principalement

- Les onduleurs à fréquence fixe à commutation forcée : Alimentés le plus souvent par une batterie d'accumulateur, ils jouent d'ordinaire le rôle d'alimentation de sécurité,
- Les onduleurs à fréquence variable à commutation forcée : Alimentés à partir du réseau industriel par l'intermédiaire d'un montage redresseur, ils délivrent une tension de fréquence et de valeur efficace nécessaires pour faire tourner à vitesse variable un moteur à courant alternatif ;

Les applications sont :

I.3.3.1 Réglage de la vitesse de rotation d'un moteur synchrone

La vitesse d'un moteur synchrone est fixée par la pulsation des courants statiques. Pour changer de vitesse il faut donc changer la fréquence des tensions d'alimentation. Il faut donc redresser la tension du réseau puis l'onduler à la fréquence désirée.

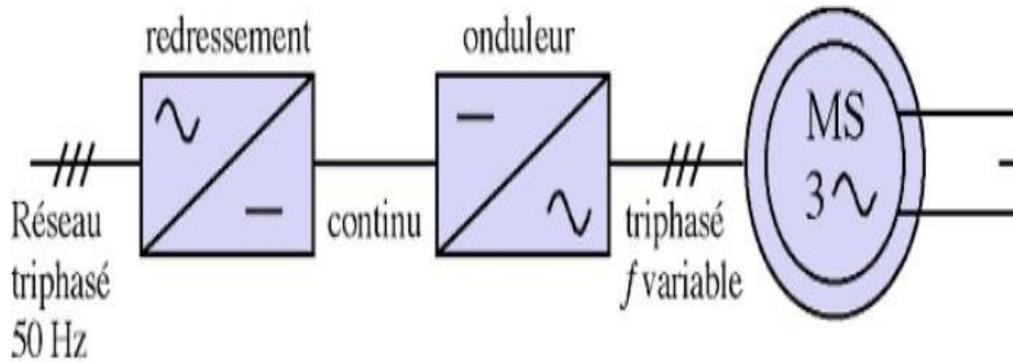


Figure I.15 Réglage de la vitesse de rotation d'un moteur synchrone

I.3.3.2 Alimentation de secours

Lors d'une panne d'électricité, un onduleur assure la continuité de l'alimentation des machines à partir de batteries.

En informatique professionnelle, un onduleur est indispensable pour éviter la perte d'informations en cas de panne du secteur.

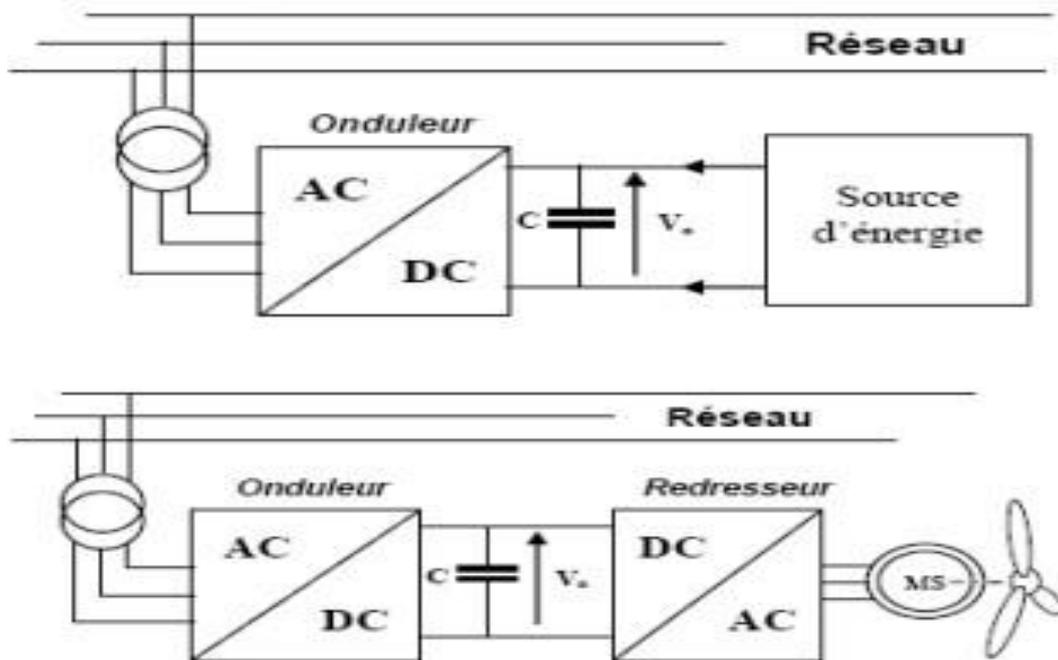


Figure I.16 Alimentation de secours

I.3.3.3 Transfert d'énergie entre deux réseaux de fréquences différentes :

La France fournit de l'énergie électrique à la Grande-Bretagne, mais la fréquence du réseau anglais est 60 Hz. Il faut donc adapter la fréquence.

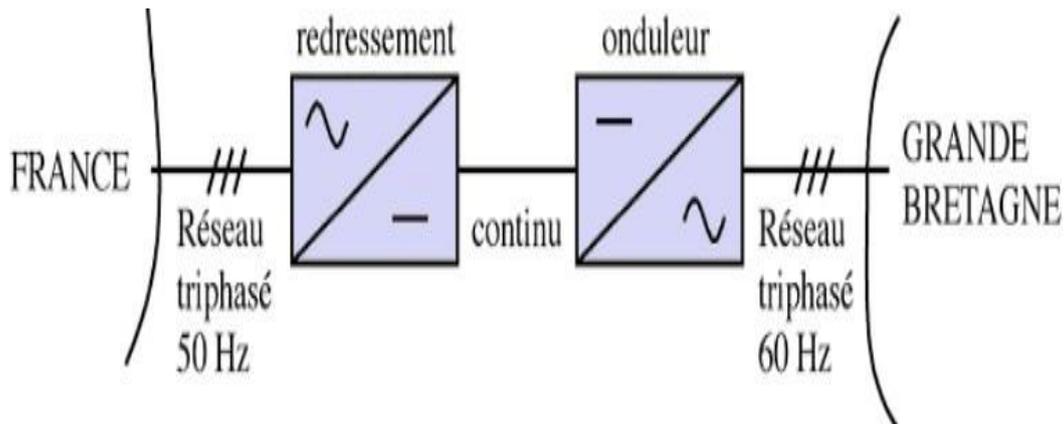


Figure I.17 Transfert de l'énergie entre deux réseaux de fréquences différentes.

I.3.4 Structure de l'onduleur triphasé

L'onduleur est composé de six transistors avec une diode anti parallèle pour chacun. Les transistors K_a et $K'a$ comme K_b et $K'b$ et K_c et $K'c$ sont complémentaires en théorie c'est-à-dire que lorsque l'un deux est ouvert l'autre est fermé et inversement. Dans la théorie seulement car les commutations réelles des interrupteurs de puissance ne sont pas instantanées. La configuration la plus dangereuse est celle où les deux transistors sont fermes, car la tension de bus (de l'ordre de plusieurs centaines de volts) est mise en court circuit. Un courant très important se déverse alors dans les transistors entraînant leur destruction. C'est donc cette configuration que l'on va éviter. On ouvrira donc l'un des transistors avant de fermer l'autre. Le temps de sécurité entre l'ouverture de l'un et la fermeture de l'autre est appelé « temps mort ». Il doit être parfaitement calibré pour un fonctionnement optimal de l'onduleur. Le moteur étant un circuit inductif qui n'apprécie pas les discontinuités de courants, c'est pour cela que chaque transistor possède une diode en antiparallèle. Pour laisser passer le courant pendant les phases où les deux transistors sont ouverts.

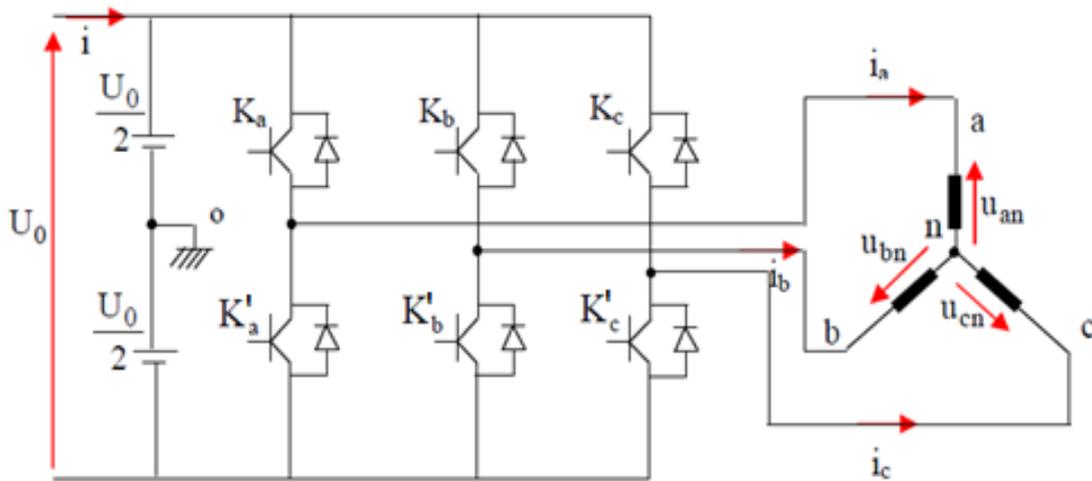


Figure 1.18 Structure d'un onduleur triphasé

I.3.4.1 Modélisation d'un onduleur triphasé :

Pour la simplification de l'étude, on suppose que :

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

On a, donc:

$I_{Kci}=0$, $V_{Kci} \neq 0$; interrupteur ouvert

$I_{Kci} \neq 0$, $V_{Kci} = 0$; interrupteur fermé

Les tensions composés V_{ab} , V_{bc} , V_{ca} sont obtenues par des relations :

$$\begin{cases} V_{ab} = V_{ao} + V_{ob} = V_{ao} - V_{bo} \\ V_{bc} = V_{bo} + V_{oc} = V_{bo} - V_{co} \\ V_{ca} = V_{co} + V_{oa} = V_{co} - V_{ao} \end{cases} \quad (I.22)$$

Tels que les tensions V_{ao} , V_{bo} et V_{co} sont les tensions d'entrée de l'onduleur ou tensions continues. Leurs références par rapport au point milieu {o} d'un diviseur fictif d'entr d'un diviseur fictif d'entrée.

L'écriture des relations de Charles est comme suit:

$$\begin{cases} V_{ao} = V_{an} + V_{no} \\ V_{bo} = V_{bn} + V_{no} \\ V_{co} = V_{cn} + V_{no} \end{cases} \quad (I.23)$$

V_{an} , V_{bn} et V_{cn} représentent les tensions de la phase de charge (valeur alternative),

V_{no} : représente la tension de neutre de la charge par rapport au point fictif {o}.

Le système V_{an} , V_{bn} et V_{cn} étant équilibré, il en découle:

$$V_{an} + V_{bn} + V_{cn} = 0 \quad (I.24)$$

La substitution de (1.3) dans (1.2) aboutit à :

$$V_{no} = \frac{1}{3}(V_{ao} + V_{bo} + V_{co}) \quad (I.25)$$

En remplaçant (I.24) dans (I.25)

$$\begin{aligned} V_{an} &= \frac{2}{3} V_{ao} - \frac{1}{3} V_{bo} - \frac{1}{3} V_{co} \\ V_{bn} &= -\frac{1}{3} V_{ao} + \frac{2}{3} V_{bo} - \frac{1}{3} V_{co} \\ V_{cn} &= -\frac{1}{3} V_{ao} - \frac{1}{3} V_{bo} + \frac{2}{3} V_{co} \end{aligned} \quad (I.26)$$

Donc l'onduleur de tension peut être modélisé par une matrice [T] assurant le passage du continu-alternatif.

$$[V_{AC}] = [T] \cdot [V_{dc}]$$

$$[V_{AC}] = [V_{an} \ V_{bn} \ V_{cn}]^T \quad (I.27)$$

$$[V_{dc}] = [V_{ao} \ V_{bo} \ V_{co}]^T \quad (I.28)$$

$$[V_{dc}] = U_{dc} \cdot [S_1 \ S_2 \ S_3]^T \quad (I.29)$$

Donc, pour chaque bras il a deux états indépendants. Ces deux états peuvent être considérés comme des grandeurs booléennes.

La commutation supposée idéale: $S_i = (1 \text{ ou } 2) \ i = \{1, 2, 3\}$

La matrice de transfert est la suivante :

$$[T] = \begin{bmatrix} \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} \\ -\frac{1}{3} & \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} \\ -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} & \frac{2}{3} \end{bmatrix} \quad (I.30)$$

I.3.4.2 Commande d'un onduleur triphasé

Donc il y a plusieurs méthodes pour commander les interrupteurs d'un onduleur, Par exemple:

- La commande en pleine onde (dite 180°)
- La commande décalée : (dite 120°)
- La commande modulation de largeur d'impulsion (dite MLI)

Dans notre travail nous allons étudier la Commande MLI.

Commande à modulation de largeur d'impulsion (MLI)

Le principe de cette technique consiste à comparer un signal triangulaire (P) d'amplitude fixe et de fréquence nettement supérieure appelée porteuse, au trois signaux sinusoïdaux (r_1, r_2, r_3), d'amplitude variable et de fréquence f appelée référence. L'intersection de ces deux signaux donne les instants de commutation des interrupteurs.

En triphasé, trois références sinusoïdale déphasées de $2\pi/3$ à la même fréquence f_s .

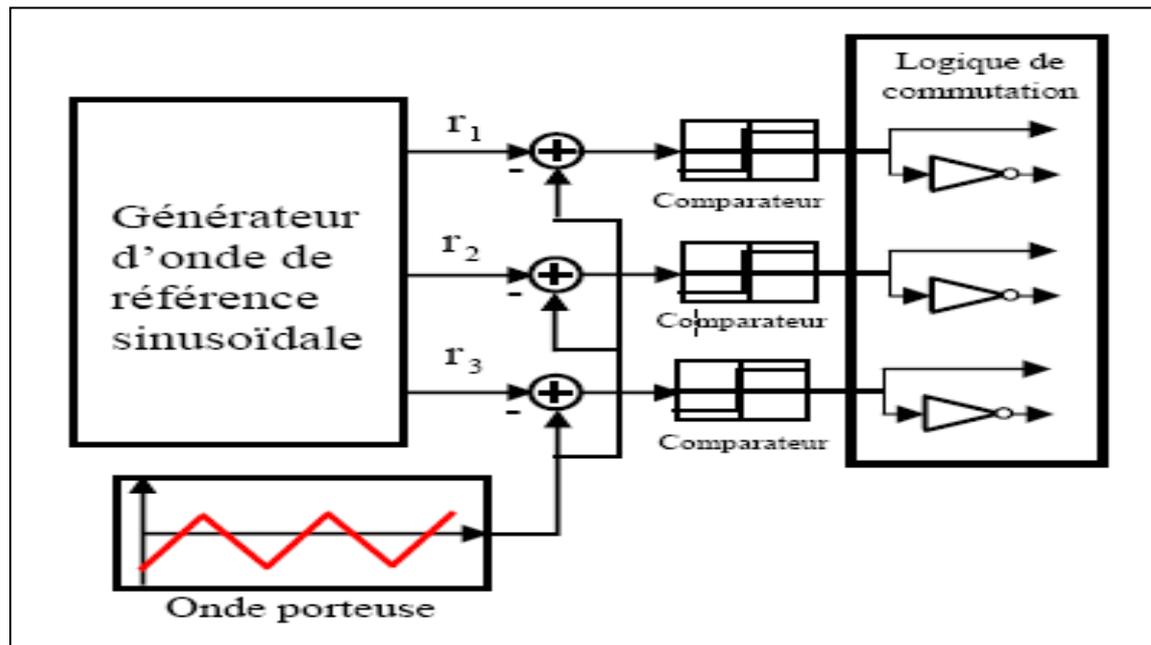


Figure I.20 schéma de principe de la technique triangle-sinusoïdale

Dans le cas d'une référence sinusoïdale, deux paramètres caractérisent la modulation :

- Indice de modulation m égale au rapport de la fréquence f_c de la porteuse à la fréquence f_m de la référence $m=f_c/f_m$
- Taux de modulation ou coefficient de réglage de tension r égal au rapport de l'amplitude de la tension de référence A_m à celle de la porteuse A_c ; $r = A_m/ A_c$

Cette -MLI- sert à remédier ces problèmes et elle à comme avantages :

- Variation de la fréquence de la tension de sortie.
- Elle repousse les harmoniques vers des fréquences plus élevées.

I.4 Association onduleurs – machine asynchrone

Les machines électriques alimentées par des convertisseurs statiques dont le schéma de principe est représenté par la figure II.21. L'alimentation continue de l'onduleur est fournie à partir du source alternative triphasée via un redresseur à diodes et un filtre LC.

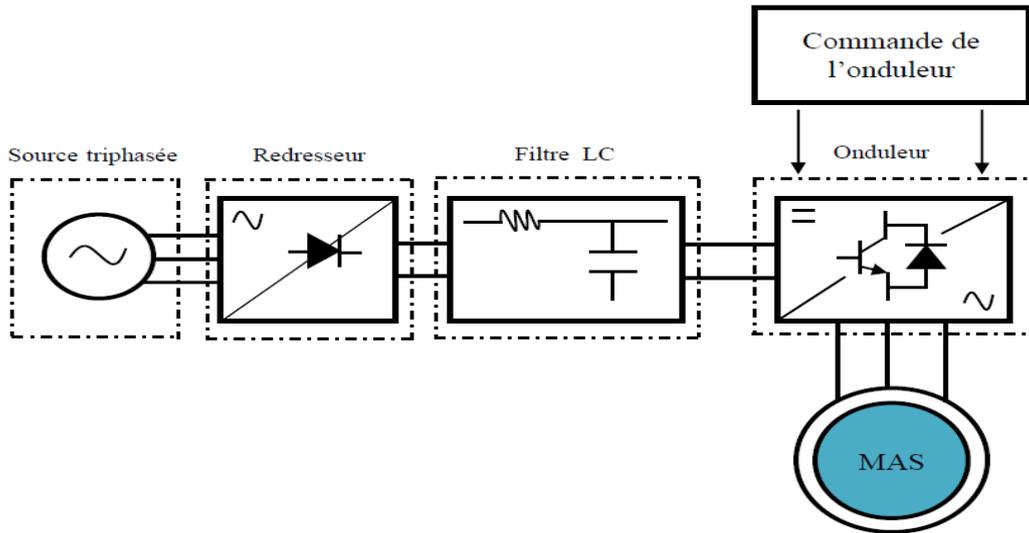


Figure I.21 Association onduleurs – machine asynchrone

I.4.1 Simulation de l'association convertisseurs – machine asynchrone

La simulation de l'association d'un onduleur de tension à deux niveaux à commande MLI avec une machine asynchrone à cage d'écureuil est donnée par la figure I.22:

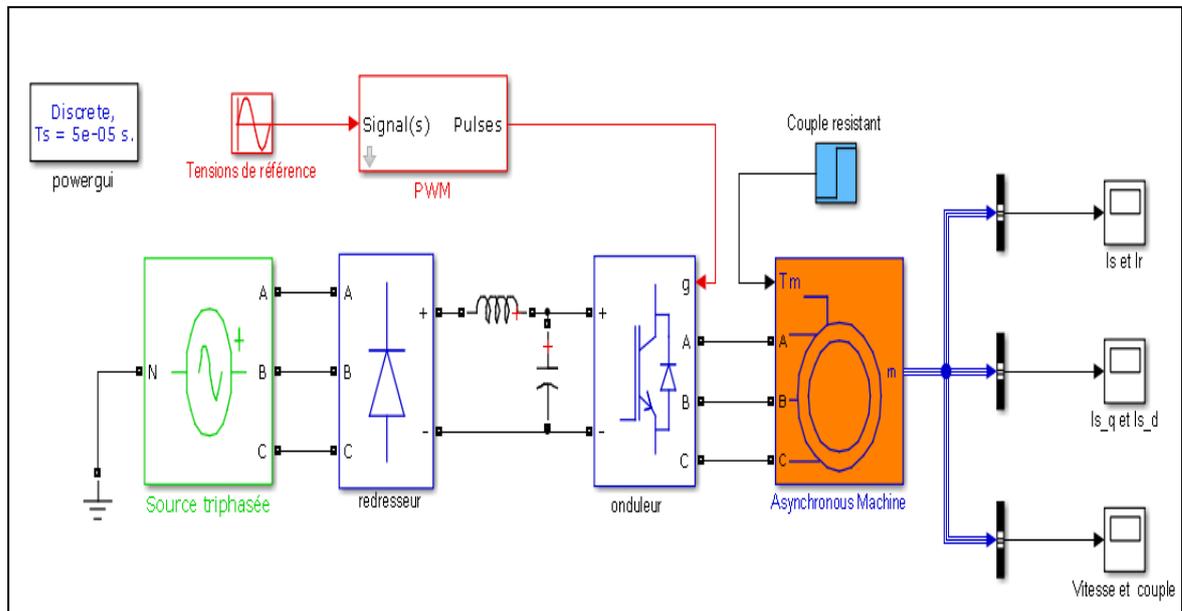


Figure I.22 Schéma de simulation de l'association l'onduleur avec une MAS

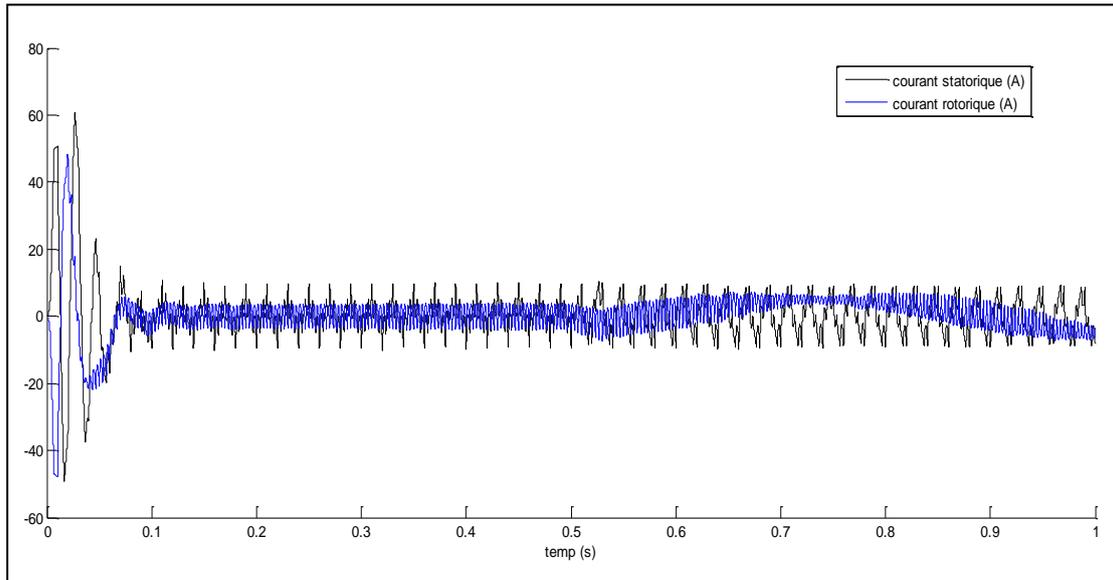


Figure I.23 Courant statorique et rotorique (A)

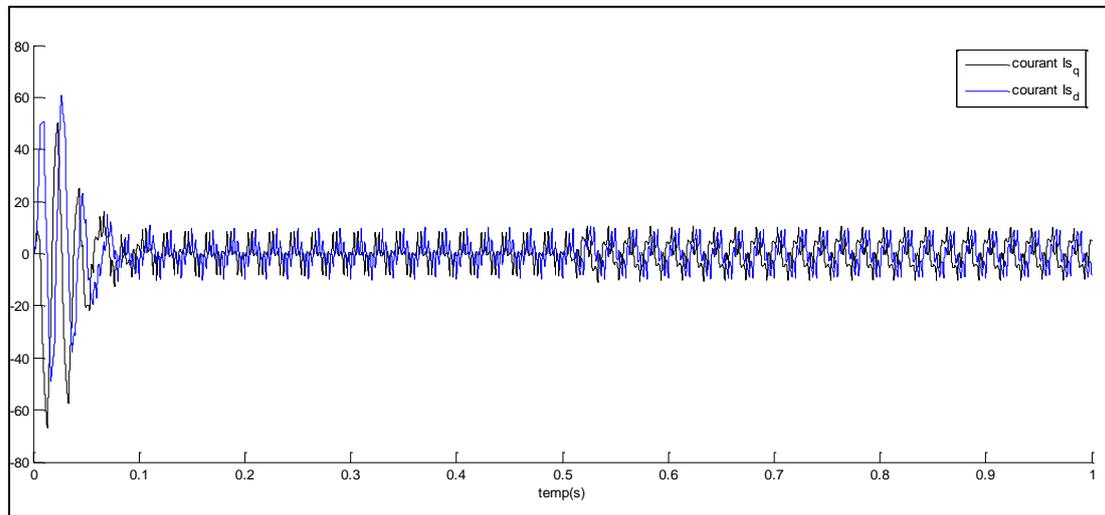


Figure I.24 Courant statorique I_d et I_q (A)

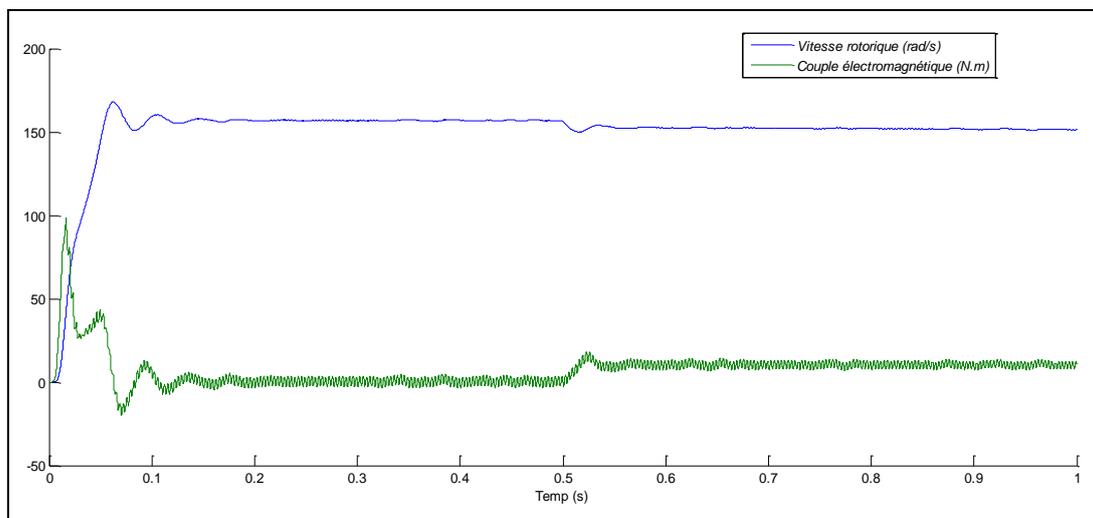


Figure 1.25 Vitesse rotorique (tr/min) et Couple électromagnétique (N.m)

I.4.2 Interprétation des résultats

Essai à vide de 0 à 0.5s

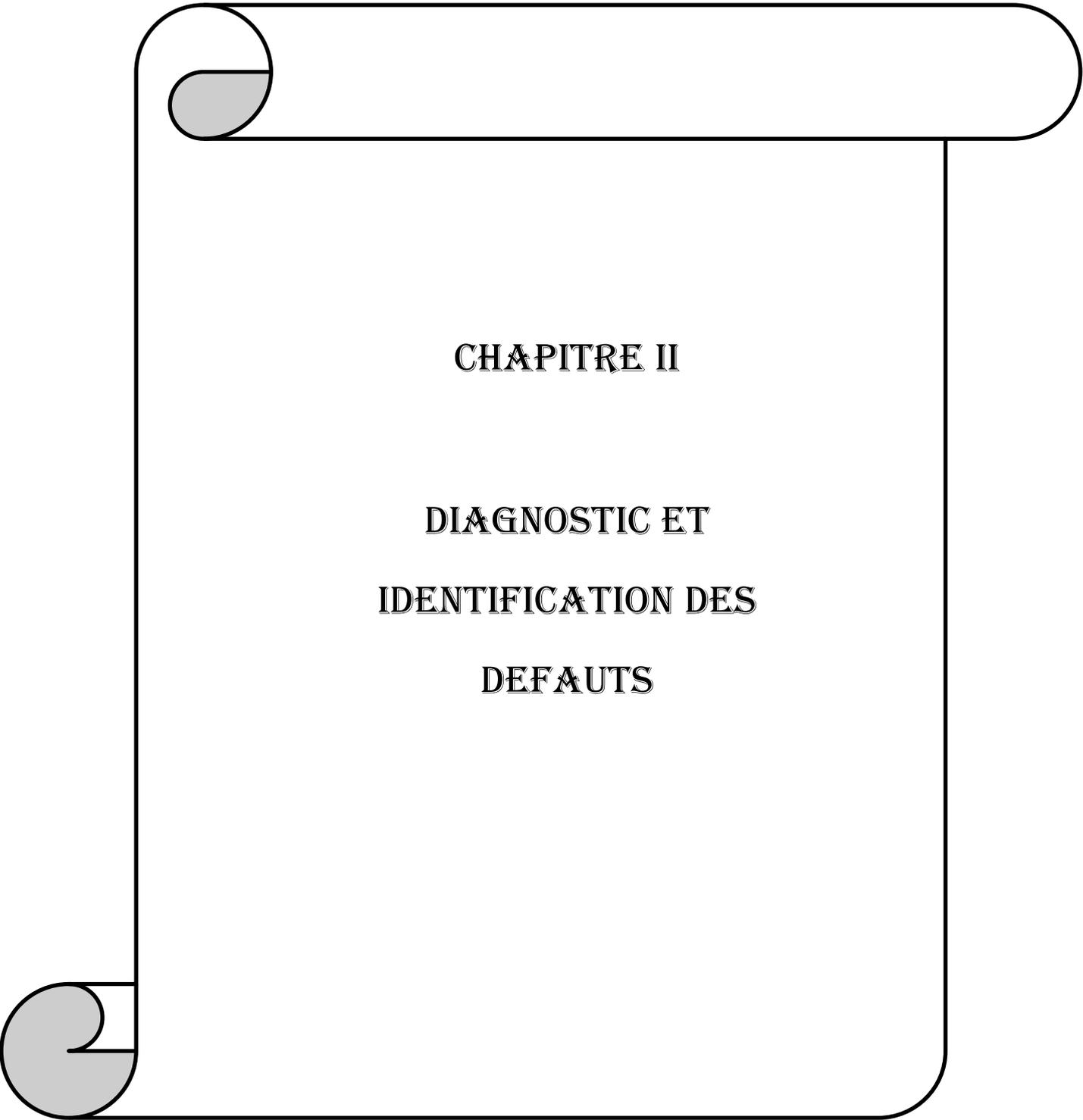
- La vitesse débute de zéro pour se stabiliser de 156.9 rad/s, qui est la vitesse en régime établie. La courbe à une forme exponentielle, ce qui correspond à la présence de phénomènes transitoires dans les enroulements de la machine, Figure I.23.
- Le moteur démarre avec un courant de démarrage très élevée de l'ordre 53.1A, puis le courant passe du régime transitoire au régime établi pour se stabiliser autour de 3.1A, Figure1.24.
- Le couple de démarrage est très important de l'ordre 98N.m, puis le couple passe du régime transitoire au régime établi pour se stabiliser autour de 0.6N.m, Figure 1.25.

Essai en charge entre à partir de 0.5s

On appliqué une charge de 10 Nm à l'instant 0.5s et une fréquence de commutation de 12 KHz, cette dernière provoque une diminution en vitesse (152.5 rad/s) , et l'intensité du courant (5.9 A) et couple électromagnétique (10.6 N.m) à cause de couple résistive de cette charge .

I.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une étude théorique sur l'ensemble machine asynchrone, onduleurs. Nous avons consacré notre étude aux onduleurs de tension et principalement ceux en pont triphasé, nous avons discuté aussi sur le type de commande notamment la commande MLI. L'association machine convertisseur est simulée avec alimentation en tension pour mettre en exergue les impacts de ce convertisseur sur la machine, avec et sans l'application d'une charge. Les résultats montrent les meilleures performances statiques et dynamiques de l'association onduleur machine à synchrone à commande MLI.



CHAPITRE II

**DIAGNOSTIC ET
IDENTIFICATION DES
DEFAUTS**

II.1 Introduction

L'étude des défauts dans les dispositifs électriques est un domaine qui a pris une place importante depuis que les exigences de fiabilité, de sûreté et de disponibilité sont devenues assez sévères dans les systèmes industriels. En effet, la continuité de service est une qualité importante et incontournable que doit avoir tout système de nos jours pour satisfaire les exigences de l'utilisateur. Ce chapitre, présente un état de l'art sur le diagnostic ainsi que les défaillances les plus courantes pouvant apparaître dans les machines asynchrones et les onduleurs. Ces défaillances peuvent provoquer des pannes et par conséquent des arrêts intempestifs du système.

II.2 diagnostic

Le diagnostic est un ensemble des actions destinées à identifier les causes probables de la défaillance. Les deux principales tâches de diagnostic sont: la détection et la localisation des défauts. La détection consiste à signaler l'existence du défaut, tandis que la localisation ait pour objet d'identifier le type de défaut. Donc, le diagnostic a pour objectif de détecter d'une manière précoce un défaut avant qu'il conduise à une défaillance totale dans l'installation industrielle.

II.2.1 élément de 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.*

II.2.2 Étapes du diagnostic

La procédure de 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

- l'observation réalisée 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,
 - ❖ la prise de
 - ❖ d'un processus décision (arrêt de l'installation ou reconfiguration).

La figure II.1, représente l'ensemble des tâches à réaliser pour assurer un fonctionnement satisfaisant industriel. Elles seront détaillées dans les paragraphes suivants:

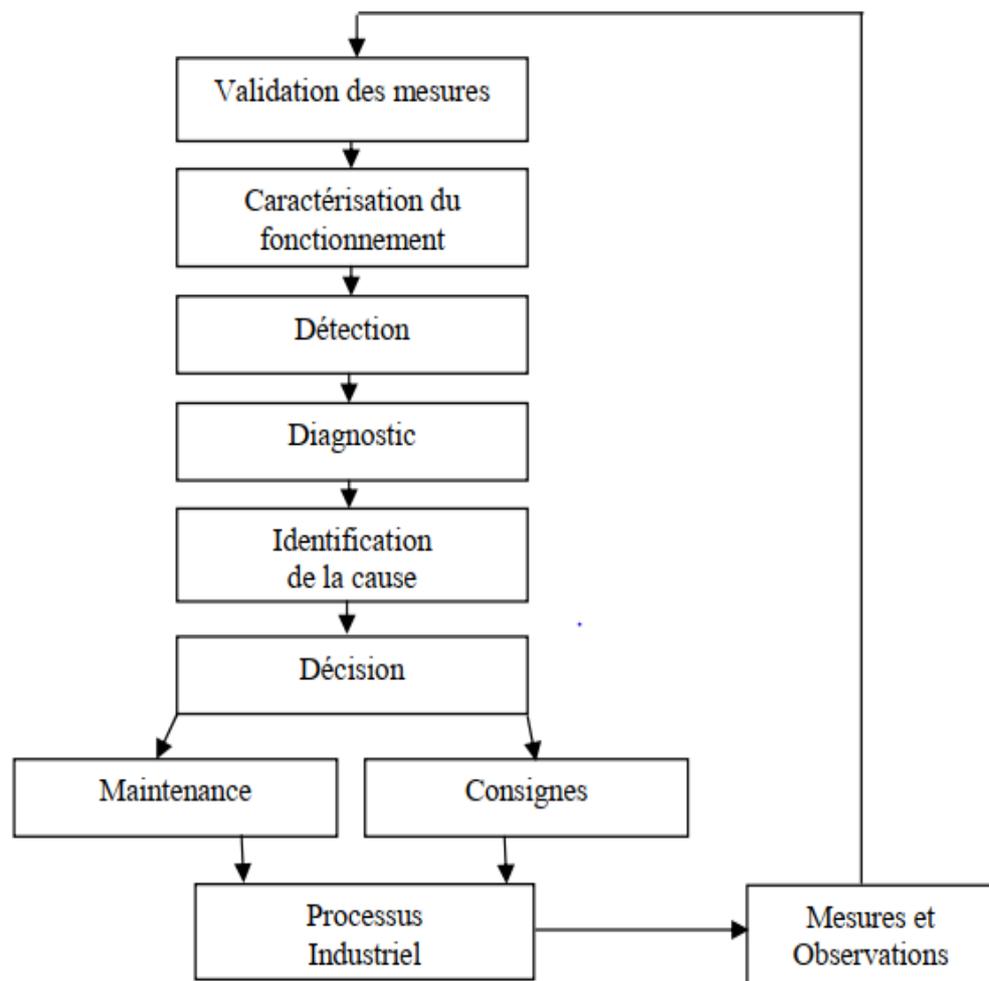


Figure II.1 Différentes étapes du diagnostic industriel

II.3 Différent Méthodes de Diagnostic

Afin de bien classer notre travail, il est très important de prendre une idée générale sur les différentes méthodes utilisées pour le diagnostic des anomalies dans les machines

électriques. Puisque beaucoup de chercheurs travaillent sur cet axe depuis longtemps, il existe par conséquent, plusieurs approches et techniques qui sont présentées dans un très grand nombre des travaux. Dans cette partie, nous allons décrire seulement les méthodes les plus connues en citant également beaucoup de références pour bien orienter les lecteurs. Il est important de savoir que les différentes méthodes du diagnostic sont classées selon l'approche qu'ils leur appartiennent.

En effet, il existe deux approches:

- approches sans modèle,
- approches avec modèle.

II.3.1 Méthodes sans modèles

Cette méthode suppose que les connaissances du processus se limitent à son observation passée et présente. Elle repose sur l'expertise humaine. L'historique de ce système constitue une base de données qui sert à l'extraction de descripteurs dans divers modes de fonctionnement du processus.

II.3.1.1 Méthodes basées sur le traitement de signal

A ce jour, c'est l'analyse fréquentielle des grandeurs mesurables qui est la plus utilisée pour le diagnostic de défaut, car la plupart des défauts connus peuvent être détectés avec ce type d'approche.

Pour effectuer le diagnostic d'une installation industrielle, les opérateurs de maintenance analysent un certain nombre de signaux issus de la machine.

En effet, l'évolution temporelle et le contenu spectral de ces signaux, peuvent être exploités pour détecter et localiser les anomalies qui affectent le bon fonctionnement de la machine. Elles font toute partie de la famille des méthodes d'estimation spectrale non-paramétriques.

Les méthodes courantes d'analyse des signaux de diagnostic en régime transitoire et en régime permanent sont le spectrogramme, l'analyse temporelle et la distribution de Wigner-Ville, l'analyse spectrale par FFT et les ondelettes.

a) Transformée de Fourier rapide (FFT)

Le diagnostic des défauts en utilisant la technique du traitement du signal basée sur l'analyse spectrale par la transformée de Fourier rapide (FFT) se base sur les composantes spectrales des courants statoriques dans l'état sain et l'état avec défaut. En prenant comme exemple, le défaut de court-circuit de spires qui est à

l'origine de déséquilibre des enroulements statoriques induisant un champ inverse en plus du champ direct principal, tournant avec les fréquences de $\pm fs$.

Ces nouvelles composantes entraînent des pics de fréquence $k.fs$ dans les courants statoriques de la machine.

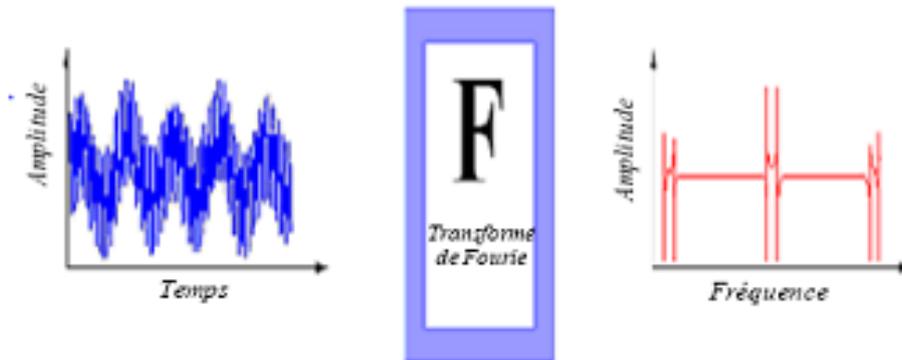


Figure II.2 Représentation temporelle vers fréquentielle

b) Analyse par les Ondelettes

En 1980, J.Morlet proposa une nouvelle analyse peu différente de celle de Gabor « la transformée en Ondelette ». La transformée en Ondelette est un outil récent de traitement de signal. Son principe repose sur la décomposition d'un signal dans une base de fonctions particulière. De ce point de vue, elle est tout à fait comparable à l'analyse de Fourier. Cependant, les ondelettes sont des fonctions oscillantes au sens large, rapidement amorties, contrairement aux fonctions sinusoïdales de l'analyse de Fourier. Par ailleurs, les ondelettes possèdent la propriété de pouvoir être bien localiser en temps ou en fréquence, ce qui les différencie principalement de l'analyse Temps-Fréquence classique.

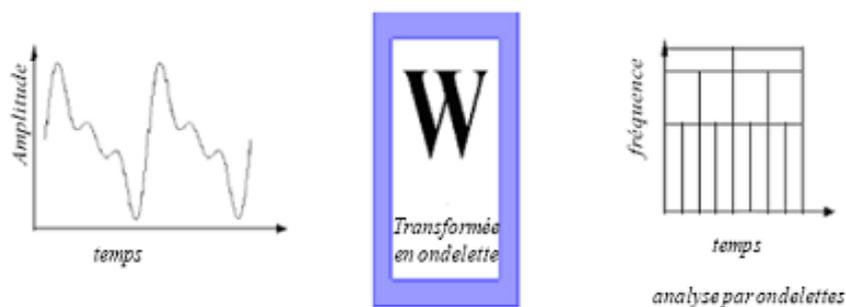


Figure II.3 Représentation temporelle vers ondelette

II.3.1.2 Diagnostic par l'analyse des vibrations mécaniques

Le diagnostic des défauts par utilisation des vibrations mécaniques est la méthode la plus utilisée dans la pratique. Les forces radiales, créées par le champ d'entrefer,

provoquent des vibrations dans la MI. Ces forces sont proportionnelles au carré de l'induction magnétique, la distribution de l'induction magnétique dans l'entrefer, est le produit de la F.m.m (F_m) et de la perméance (P).

Les vibrations de la machine peuvent être captées par des accéléromètres placés sur les paliers selon les directions axiale, verticale et radiale. Les spectres des signaux de vibrations, issus du moteur avec défaut, sont comparés avec ceux de références enregistrées lorsque le moteur était en bon état.

Cette méthode permet la détection aussi bien des défauts électriques que mécaniques, puisque la force magnétomotrice contient les effets des asymétries du stator ou du rotor et la perméance dépend de la variation de l'entrefer (à cause des ouvertures des encoches statoriques et rotoriques, l'excentricité).

Cependant, le coût des capteurs de vibration qui est relativement élevé, ainsi que les difficultés rencontrées dans la connexion de ces capteurs (problème d'accessibilité) représentent les limites et les inconvénients de cette méthode.

II.3.1.3 Diagnostic par l'analyse du flux magnétique axial de fuite

La présence d'un défaut quelconque, provoque un déséquilibre électrique et magnétique au niveau du stator et du rotor, ce qui affecte la répartition du champ magnétique dans et hors la machine. Plusieurs auteurs se sont penchés à l'exploitation du flux axial. En fait, si on place une bobine autour de l'arbre de la machine, elle sera le siège d'une force électromotrice induite. Le contenu spectral de cette tension induite, peut être exploité pour détecter les différents défauts statorique ou rotorique.

II.3.1.4 Diagnostic par l'analyse du couple électromagnétique

Le couple électromagnétique développé dans les machines électriques, provient de l'interaction entre le champ statorique et rotorique. Par conséquent, tout défaut, soit au niveau du stator ou au rotor, affecte directement le couple électromagnétique. L'analyse spectrale de ce signal, donne des informations pertinentes sur l'état du moteur. Cependant, la nécessité d'un équipement assez coûteux pour l'acquisition de cette grandeur représente l'inconvénient major de cette méthode.

II.3.1.5 Diagnostic par mesure du courant statorique

L'analyse du courant statorique du moteur et l'une des techniques qui permet de détecter la présence des anomalies mécaniques et électriques, non seulement dans le moteur, mais également dans la charge. Des améliorations considérables

sont apportées à cette technique qui est dénommée dans la littérature l'analyse des signatures du courant du moteur (ASCM). Des composantes fréquentielles ont été déterminées pour chaque type de défaut. Il est important de noter, que l'amplitude de la composante fréquentielle augmente avec la sévérité du défaut.

II.3.1.6 Approche du Vecteur de Park

Deux versions d'analyse par cette méthode à savoir :

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

La deuxième est appelée Vecteur de Park Étendu, qui est basée sur l'analyse spectrale du module du vecteur de Park. Elle présente beaucoup d'avantages quant à la détection des défauts statorique ou rotorique et même les défauts de roulement.

II.3.1.7 Méthodes basées sur l'intelligence artificielle

a) La reconnaissance des formes (RDF)

Les méthodes de diagnostic qui utilisent la reconnaissance des formes ne sont pas nombreuses [25]. Elle s'intéresse au problème de reconnaissance de situations significatives d'un système dans un environnement complexe ou noyé dans le bruit. Le principe de la RDF repose sur la représentation numérique du $k^{\text{ème}}$ objet observé par le vecteur $x_k = [x_{k1}, \dots, x_{kq}]^k$ Appelé **vecteur forme**, où : x_{kj} indique la $j^{\text{ème}}$ caractéristique associée à l'objet ; k : température, pression, débit, fréquence de bruit sonore, etc. q : la taille du vecteur forme .

Un vecteur de forme est extrait de nombreuses mesures. Les règles de décisions permettent de classer les observations décrit par le vecteur de forme par rapport aux autres fonctionnements avec ou sans défaut. Pour les classer, il faut être en mesure de donner pour l'un ou l'autre un mode de fonctionnement. Il faut avoir une base de données pour construire la classe correspondant au défaut créé. Une autre méthode consisterait à calculer le vecteur de forme en effectuant les simulations numériques. Dans la dernière configuration, il faut un modèle comportemental précis pour avoir des paramètres proches de la réalité.

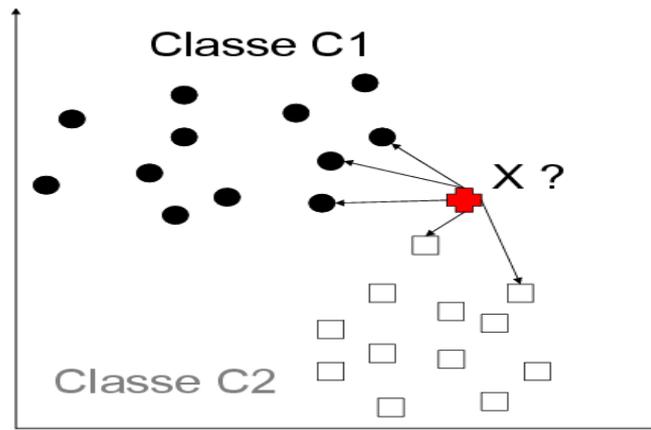


Figure II.4 Principe de la reconnaissance des formes

b) Les réseaux de neurones artificiels (RNA)

C'est un modèle de calcul, sa conception est inspirée de vrais neurones humains, c'est l'intelligence artificielle qui permet de prendre des décisions en s'appuyant sur la précipitai que sur le raisonnement logique formel.

Cette approche fait l'objet de recherches dans beaucoup de domaines tels que la compréhension et la synthétisation de la langue naturelle, la classification, le diagnostic, etc. Cette technique comporte des caractéristiques très intéressantes comme la faculté d'apprentissage et d'auto-organisation. Un réseau de neurones peut être considéré comme une boîte noire.

Pour identifier des défauts dans un système, le diagnostic réalisé par réseaux de neurones doit disposer d'un nombre suffisant d'exemples de bon fonctionnement et de défauts pour pouvoir les apprendre.

La synthèse du réseau est réalisée et comprend plusieurs étapes : le choix du type de réseau, du type de neurones, du nombre de couches, des méthodes d'apprentissage. Pendant la phase d'apprentissage qui consiste à ajuster de façon incrémentale les poids, ou forces des connexions entre neurones, les exemples sont présentés au réseau en entrée avec les diagnostics correspondants à la sortie.

Après l'apprentissage, le réseau ne reconnaît pas seulement les exemples appris mais également des paradigmes leur ressemblant, ce qui correspond à une certaine robustesse par rapport aux déformations de signaux par le bruit.

c) Les systèmes d'inférences floue (SIF)

Les systèmes d'inférence floue (SIF) sont une des applications les plus courantes de la logique floue. Ils implémentent des concepts, sous la forme de variables linguistiques, ainsi qu'un raisonnement déductif, à l'aide de règles floues.

La structure de base d'un SIF est constituée de :

- ✓ Un univers de discours qui contient les fonctions d'appartenance des variables d'entrée et de sortie à des classes. Ces fonctions peuvent avoir différentes formes, les plus usuelles étant les formes triangulaires, trapézoïdales et gaussiennes.
- ✓ Une base de connaissances qui regroupe les règles liant les variables d'entrée et de sortie sous la forme « SI...ALORS ».
- ✓ Un mécanisme de raisonnement qui base son fonctionnement sur la logique du modus Ponens généralisée.

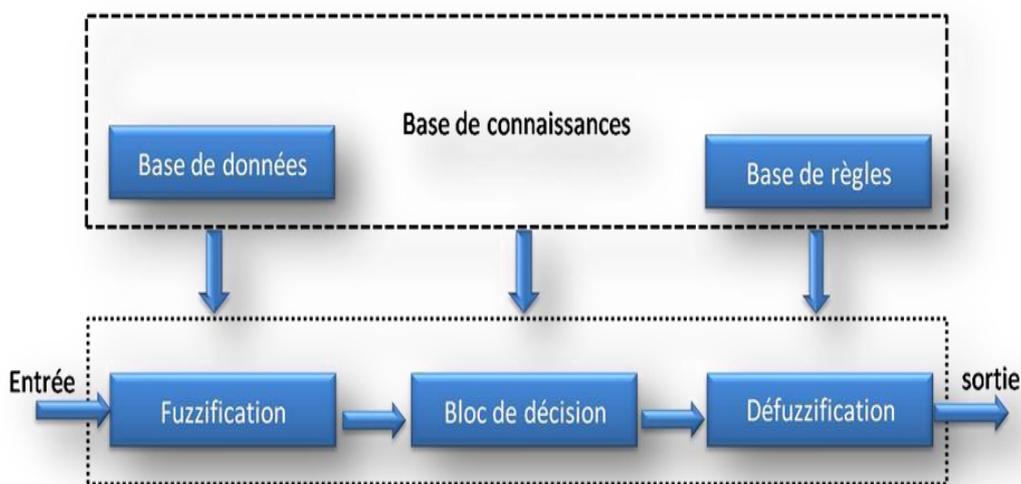


Figure II.5 Principe de l'inférence floue

3.2 Méthodes avec Modèle

L'approche de diagnostic à base de modèles permet le suivi et la supervision en ligne du système. Elle consiste à embarquer un modèle du système permettant l'estimation de son état. Une faute est alors détectée par comparaison, en temps réel, de l'état prédit et des mesures issues des capteurs.

Le diagnostic est ensuite établi en déterminant l'état (de faute) du système qui est cohérent avec les mesures et qui permet d'expliquer la faute.

On distingue trois grandes approches selon la connaissance:

a) Espace de parité

Le terme « parité » a été emprunté au vocabulaire employé pour les systèmes logiques où la génération de bits de parité à partir d'une relation de redondance analytique, permet la détection d'erreur. Une relation de redondance analytique (RRA) est une

équation dans laquelle toutes les variables sont connues. Elle doit être sensible aux défauts et insensible aux perturbations.

La génération de telles relations permet d'engendrer des résidus en projetant les données mesurées dans un espace. Elle est souvent définie comme l'orthogonale de la matrice d'observabilité, ce qui revient à éliminer l'influence de l'état sur le résidu. L'objet de cette méthode est d'explicitier son utilisation pour la détection et la localisation des défauts.

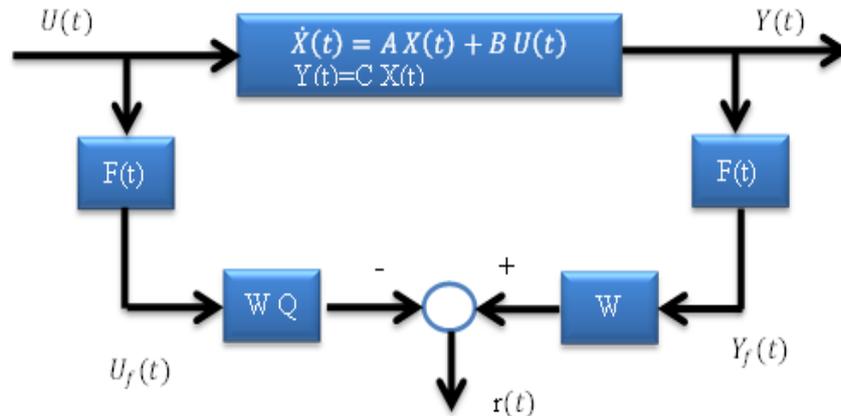


Figure II.6 Espace de Parité en Continu

Le principe est d'analyser la consistance des mesures et détecter les défauts en cherchant à établir des relations de parité qui sont indépendantes des grandeurs inconnues mais qui restent sensibles aux défauts. Cette approche conduit à une réécriture des équations d'état et de mesure, dans laquelle seules des variables connues (commandes et sorties) sont autorisées à figurer. Le principe de l'espace de parité repose sur la représentation numérique du vecteur de parité $r(t)$ projection du vecteur des mesures $y(t)$. Qui est présenté dans le cas général par l'équation de mesure.

b) Diagnostic à base des observateurs

Le principe de cette méthode se base sur l'utilisation des erreurs d'estimation des vecteurs sorties. L'objectif est de construire des résidus structurés c'est-à-dire menant à la localisation des défauts. Dans certains cas l'utilisation de plusieurs observateurs, mis en batterie, peut être nécessaire pour garantir la localisation des défauts.

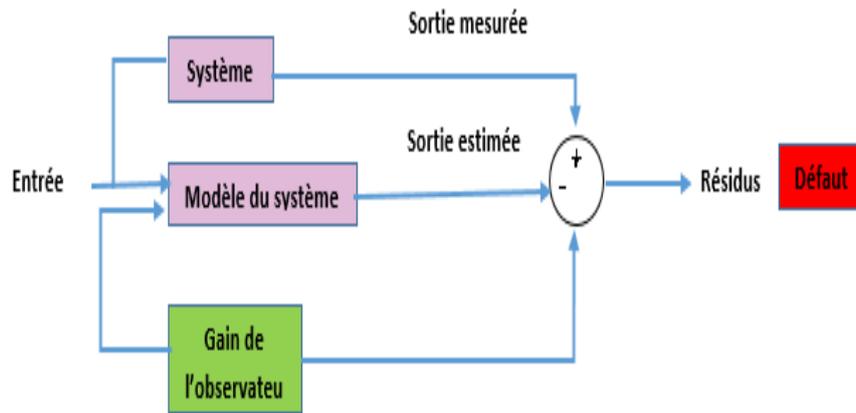


Figure II.7 Méthodes de diagnostic à base des observateurs

c) Diagnostic par estimation paramétrique

La détection et la localisation des défaillances par estimation paramétrique, consiste à identifier les paramètres physiques (ou structuraux lorsque les grandeurs physiques ne sont pas accessibles), contenus dans le modèle de connaissance du système.

Ce modèle mathématique doit contrairement au cas précédent, pouvoir caractériser les fonctionnements sains et en présence de défaut.

Un défaut étant à l'origine d'une variation paramétrique, l'estimation des paramètres du modèle permet d'indiquer la présence d'un déséquilibre dans la machine. Quant aux algorithmes d'identification paramétrique, ils doivent respecter deux contraintes très restrictives et fortement corrélées :

- ✓ une excitation persistante très riche, difficilement compatible avec un procédé en fonctionnement;
- ✓ un nombre limité de paramètres à estimer.

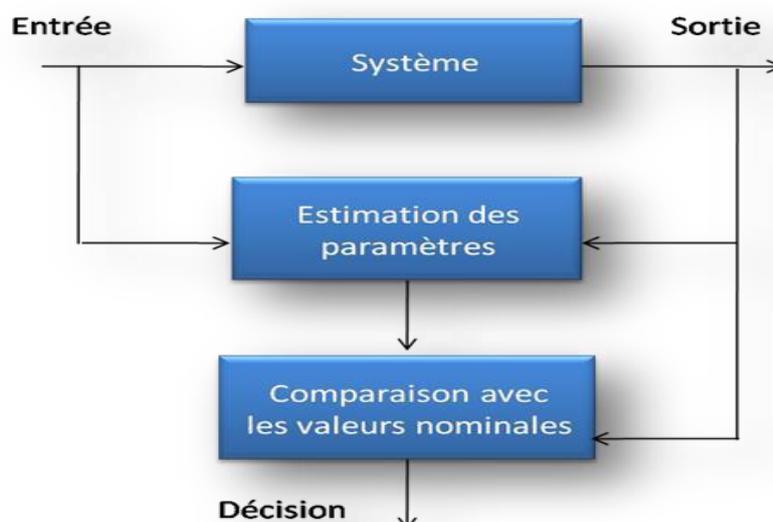


Figure II.8 Principe de l'approche par estimation des paramètres

II. 3 Défaillances des machines asynchrones triphasées

Malgré sa robustesse, la machine asynchrone à cage d'écureuil peut parfois présenter différents types de défauts, qui peuvent être soit d'origine électrique, ou mécanique. Cependant, les contraintes de différentes natures auxquelles ces machines sont sollicitées, sont les principales causes des défauts structurels et fonctionnels qui selon leur nature, peuvent endommager totalement la machine et causer inévitablement l'arrêt du processus, donc une perte conséquente de la production. La machine asynchrone peut présenter différents types de défauts qui peuvent être classifiées comme suit :

II.3.1 Défauts statoriques

La principale source de défauts dans un moteur électrique provient des bobinages. Les effets d'usure comme les frottements ou le vieillissement des matériaux ont un effet sur l'intégrité des fils et de leur isolant. Si cet isolant est trop endommagé, ces bobinages peuvent alors se mettre en court-circuit ou alors, lorsque le fil lui-même est endommagé, en circuit ouvert. Il peut y avoir différents types de défauts dont les conséquences sont différentes. Ces différentes fautes sont données sur la figure II.9.

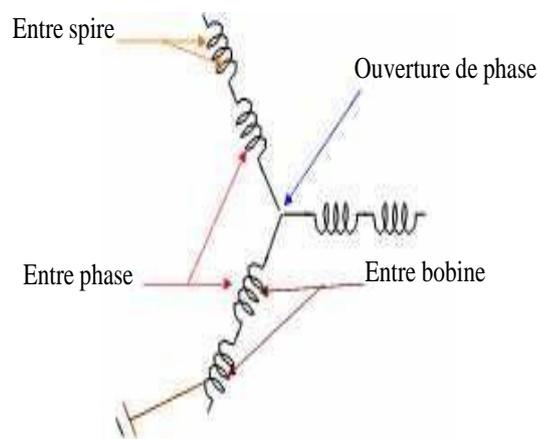


Figure II.9 Représentation des différents défauts statoriques possible

a) Court-circuit dans une phase :

Un court-circuit dans une phase est un des problèmes les plus difficiles à tolérer . Dans ce cas, la littérature présente la phase concernée comme perdue . Sur une machine triphasée avec un onduleur à 3 bras, cela implique l'arrêt de la machine à cause des conséquences physiques sur le moteur en cas de maintien de l'alimentation. La conséquence la plus importante est l'apparition des courants de court-circuit, le principal problème étant l'échauffement important pouvant propager la faute.

L'importance des courants de faute dépend directement du nombre de spires en court-circuit.

Il faut aussi prendre en compte le fait que des spires en court-circuit engendrent un couple résistant dû aux courants induits par le flux d'excitation circulant et les mutuelles de la machine en fonctionnement. Ce couple résistant est une valeur à caractériser pour en prévoir les conséquences sur le fonctionnement suite à la panne de la machine.

b) Circuit ouvert sur une phase

Un circuit ouvert dans une phase a des conséquences moins graves qu'un court-circuit. L'ouverture d'une des phases ne fait pas circuler de courant de faute et ne pose donc pas de problème d'échauffement pouvant détériorer le reste de la machine. De même, un circuit ouvert ne crée pas de couple résistant lorsqu'un champ variable est appliqué à la bobine. Le seul problème est donc la perte d'une phase et donc de production de couple.

Dans le cas d'un moteur triphasé alimenté par un onduleur à trois bras, la seule manière de pouvoir assurer un minimum le fonctionnement est de piloter les deux phases restantes, c'est-à-dire avec un fonctionnement équivalent à une machine à une phase. Le problème vient alors des ondulations de couple importantes et du fait de ne pas pouvoir assurer un service nécessitant des changements de sens de rotation et des phases marche/arrêt fréquentes (passage par une vitesse nulle).

c) Court-circuit entre deux phases

Un court-circuit entre deux phases est une faute grave qui peut avoir de lourdes conséquences sur une machine. La première est la perte de ces deux phases pour la production du couple.

Dans une machine triphasée, cela implique l'arrêt de la machine devenue impossible à commander. La seconde est qu'un court-circuit entraîne des courants de défaut provoquant des échauffements pouvant engendrer des détériorations supplémentaires. De même que pour le cas du court-circuit dans une phase, ces spires en court-circuit engendrent un couple résistant en s'opposant aux variations du flux d'excitation.



Figure II.10 Ouverture d'une phase



Figure II.11 Court-circuit entre phases

II.3.2 Défaits rotoriques

Les défauts rotoriques se situent au niveau de la cage ou au niveau de l'entrefer.

- Au niveau de la cage les défauts se résument à la rupture de barres de la cage ou à la rupture d'anneaux de court-circuit.
- Au niveau de l'entrefer les défauts se manifestent par une excentricité statique, dynamique ou mixte.

a. Ruptures de barres

Cassure ou la rupture de barre est l'une des défauts les plus fréquents au rotor. Elle peut se situer au niveau de son encoche soit à l'extrémité qui la relie à l'anneau rotorique.

La détérioration des barres réduit la valeur moyenne du couple électromagnétique et augmente l'amplitude des oscillations, qui elles-mêmes provoquent des oscillations de la vitesse de rotation. La grande amplitude de ces oscillations accélère la détérioration de la machine.

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

b. Ruptures d'anneaux

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

Comme il est difficile de le détecter, ce défaut est généralement groupé, voire confondu, avec la rupture de barres dans les études statistiques.

Ces portions d'anneaux de court-circuit véhiculent des courants plus importants que ceux des barres rotoriques. De ce fait, un mauvais dimensionnement des anneaux, une

détérioration des conditions de fonctionnement (température, humidité,...) ou une surcharge de couple et donc de courants, peuvent entraîner leur cassure.

La rupture d'une portion d'anneau déséquilibre la répartition des courants dans les barres rotoriques et de ce fait, engendre un effet de modulation d'amplitude sur les courants statoriques

II.3.3 Défauts mécaniques

La machine électrique peut être soumise à un décentrement du rotor, se traduisant par des oscillations de couple (décalage entre le centre de rotation de l'arbre et le centre du rotor).

Ce phénomène est appelé excentricité (statique et dynamique) son origine peut être liée à un positionnement incorrect des paliers lors de l'assemblage, à un défaut de roulement (usure), à un défaut de charge ou à un défaut de fabrication. Trois cas d'excentricités sont généralement distingués :

- L'excentricité statique : le rotor est déplacé du centre de l'alésage mais tourne toujours autour de son axe.
- L'excentricité dynamique : le rotor est positionné au centre de l'alésage maisne tourne plus autour de son axe.
- L'excentricité mixte : associant les deux cas, statique et dynamique.

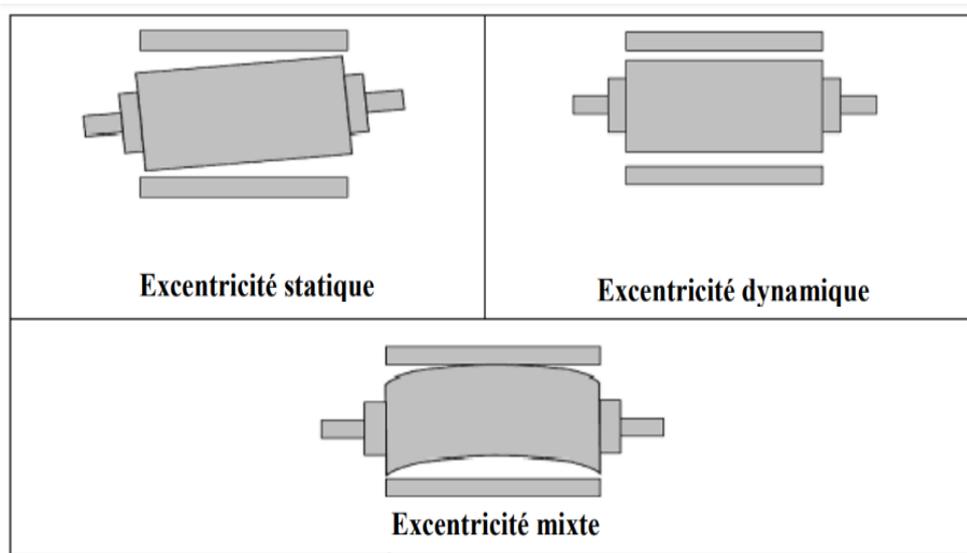


Figure II.12 Représentation de l'excentricité statique et dynamique dans la MAS

Ce défaut modifie le comportement magnétique et mécanique de la machine.

En effet, l'augmentation de l'excentricité dans l'entrefer induit une augmentation des forces électromotrices, ce qui agit directement sur le noyau statorique ainsi que l'enroulement correspondant, ce qui engendre une dégradation de son isolation.

D'autre part, cette augmentation peut avoir comme conséquences des frottements entre le stator et le rotor en raison des forces d'attraction magnétique qui déséquilibrent le système. Ceci donne naissance à des niveaux de vibration considérables dans les enroulements.

II.4 Défaillances du convertisseur

L'onduleur de tension qui alimente la machine asynchrone triphasée a trouvé la plus grande application dans le domaine des variateurs de vitesse.

Toutefois, comme cela est courant avec la plupart des variateurs de vitesse des machines électriques, la fiabilité de ce type de système souffre surtout de la défaillance des dispositifs semi-conducteurs de l'onduleur.

Dans la plupart des cas, la défaillance se traduirait par l'arrêt du système d'entraînement.

II.4.1 Court-circuit sur un interrupteur

Sur un onduleur triphasé à trois bras, un court-circuit sur un interrupteur empêche tout fonctionnement. Ce court-circuit rend inutilisable un des bras car si le deuxième interrupteur de ce même bras est commandé, la source serait alors court-circuitée.

La conséquence principale de la mise en court-circuit d'un des transistors sur le fonctionnement de l'onduleur est l'apparition de deux chemins de circulation incontrôlable du courant, ceux-ci passant par les diodes contenues dans les interrupteurs (Figure. II.13).

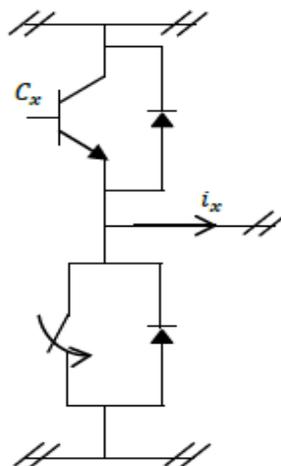


Figure II.13 Court-circuit sur un interrupteur d'un des bras

Lorsque la configuration des courants rend une de ces diodes passante, un couple de freinage non négligeable est créé, empêchant la création d'un couple utile significatif. Un onduleur classique, ne présentant donc pas de structure tolérante à cette faute, ne peut plus assurer sa fonction.

II.4.2 Circuit ouvert sur un interrupteur

Un interrupteur bloqué en ouverture (Fig. 3.5) n'a pas les mêmes conséquences qu'un interrupteur en court-circuit. Un tel scénario peut arriver par exemple si l'interrupteur ne reçoit plus les commandes de fermeture. Ce cas présente l'avantage de ne pas court-circuiter la diode mise en parallèle dans l'interrupteur, n'empêchant donc pas complètement le fonctionnement du moteur. Il est rapidement possible d'imaginer les conséquences de cette faute sur la production de couple si les autres interrupteurs sont toujours commandés normalement.

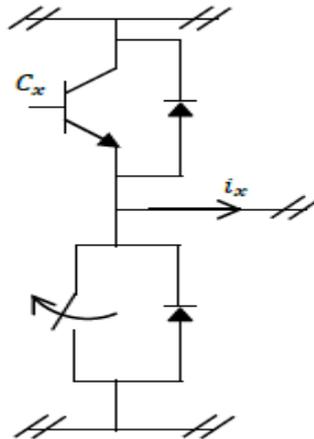


Figure II.14 Circuit ouvert sur un interrupteur d'un des bras

Le courant de la phase présentant le défaut est tronqué soit de sa partie négative, soit de sa partie positive suivant l'interrupteur touché, modifiant la forme des courants des autres phases. Une chute du couple apparaît alors dans cette zone, et donc une discontinuité dans la production. Ces discontinuités rendent le contrôle du moteur très difficile voire impossible à cause des passages par zéro du couple global produit.

II.4.3 Court-circuit de deux interrupteurs

Ce cas est spécifique par rapport aux précédents cas cités. En effet, pour que ce cas apparaisse, il faut que l'onduleur soit victime d'une double faute. Il faut différencier deux cas pour ces doubles fautes.

Le premier concerne deux courts-circuits sur deux bras différents. Pour une machine pilotée sur trois phases avec un onduleur à trois bras, cela signifie l'arrêt inévitable du

moteur qui ne peut plus être alimenté. Si de plus les courts-circuits concernent un interrupteur connecté au positif du bus continu et l'autre connecté au négatif, un courant continu de défaut est créé passant par les deux phases concernées et pouvant aller jusqu'à la détérioration du moteur, la résistance des bobines étant faible.

Le second cas est plus grave car il concerne les courts-circuits de deux interrupteurs sur un même bras. La source se trouve alors en court-circuit, ce qui pourrait, en plus de neutraliser la machine électrique, détériorer une autre partie du système. Pour cette faute, et de manière générale pour toute faute entraînant un court-circuit de la source, un système de déconnexion de l'alimentation doit être prévu pour isoler au moins la partie défectueuse. Cette double faute peut donc être critique, causant l'impossibilité d'utiliser un moteur classique, et une problématique importante pour la tolérance d'une telle double faute.

II.4.4 Circuit ouvert de deux interrupteurs

Ce mode de défaut correspond à la perte de la commande d'un bras, ses deux interrupteurs restant ouverts. La phase n'est plus connectée qu'à travers les diodes antiparallèles de la cellule de commutation, la conduction spontanée d'une des diodes du bras en défaut dépend des forces électromotrices développées par la machine et des commandes des bras restants. Le courant dans la phase concernée est assez faible, voire quasiment nul, selon la commande effectuée et les courants dans les phases saines ont leurs fondamentaux en opposition de phase. Si la défaillance survient à haute vitesse, la durée de conduction des diodes se trouve augmentée. Comme les diodes restituent de l'énergie vers le bus continu, la valeur moyenne du couple produit s'en trouve réduite.

II.4.5 Claquage du condensateur du bus continu

Deux cas doivent être séparés pour les modes de défaillance du condensateur.

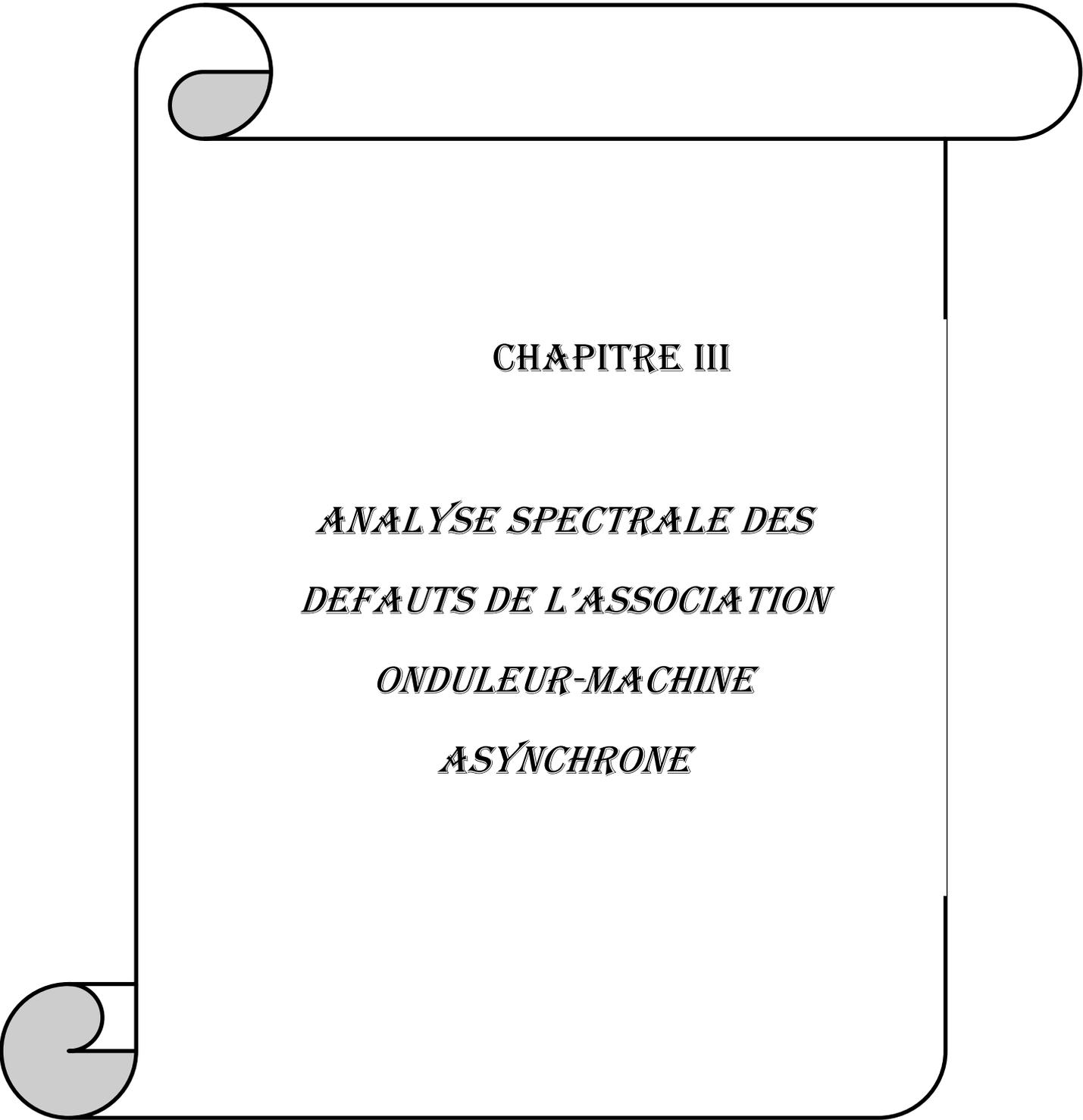
Dans le cas où celui-ci est mis en court-circuit, c'est alors la source même qui est mise en court-circuit. La remarque du paragraphe précédent sur la déconnexion nécessaire de la source est donc aussi valable ici.

Dans le second cas où le condensateur se met en circuit ouvert, alors le système perd le filtrage de la tension. L'onduleur verra alors les surtensions et les creux de tension jusqu'alors retenus par le condensateur. Suivant le dimensionnement de l'onduleur, celui-ci pourra plus ou moins résister à ces variations. Les conséquences directes sur

le fonctionnement du moteur sont difficiles à prévoir et mériteraient une étude plus poussée.

II.5 Conclusion

Notre travail dans ce chapitre présente un état de l'art sur le diagnostic et les défaillances, dans ce contexte, nous avons présenté les différents types de défauts qui peuvent affecter la machine asynchrone, nous avons cité les principaux défauts au niveau du stator et du rotor ainsi que de l'alimentation. Enfin, nous avons introduit quelques méthodes de diagnostic des défauts surtout ceux basées sur les techniques : la transformée de Fourier rapide (FFT), la transformée en ondelette et l'intelligence artificielle. Le suivant chapitre sera traité les défauts de l'onduleur à base de la logique floue.

A decorative border resembling a scroll, with rounded corners and a grey shaded area on the left side, framing the text.

CHAPITRE III

*ANALYSE SPECTRALE DES
DEFAUTS DE L'ASSOCIATION
ONDULEUR-MACHINE
ASYNCHRONE*

III.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 et onduleurs dans le cas sain et dans le cas d'un défaut. 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 interprètes.

III.2 Spectre d'un signal

Le signal correspond à la mesure d'une grandeur physique. Mesures de grandeur physique : signal sismique, mesure du pouls, déplacement, voltage, intensité, etc ...

La plupart des grandeurs physiques sont aujourd'hui converties en signaux électriques puis codées en signal numérique binaires. Il existe très peu de mesures totalement analogiques. Le spectre d'un signal est la représentation en fonction de la fréquence des amplitudes des différentes composantes présentes dans le signal.

Dans le domaine d'électrotechnique, L'analyse spectrale du courant statorique est une méthode de contrôle qui consiste à analyser le spectre du courant statorique sachant que dans un spectre d'un moteur sans défaut, apparait la composante du fondamental à la fréquence du réseau d'alimentation en régime permanent, accompagnée des composantes à faibles et hautes fréquences qui sont dues à la géométrie de la machine considérée.

Un bon équipement d'analyse de spectre (grande de sensibilité) et la comparaison entre les spectres du courant d'un moteur avec défaut et celui de la référence (le spectre du courant d'un moteur sans défaut), permet d'avoir une bonne analyse et obtenir la maximum d'information sur l'état de moteur.

Cette méthode est utilisée lors de fonctionnement normale du moteur (moteur en marche) ce qui facilite beaucoup la surveillance de la machine et indique à chaque instant l'état de leur fonctionnement.

III.3 Etude des harmoniques

Un harmonique est défini comme étant une composante sinusoïdale d'un signal périodique, ayant une fréquence multiple de l'onde fondamentale. Le domaine des fréquences qui correspond à l'étude des harmoniques est généralement compris entre

100 Hz et 2000 Hz (entre les harmoniques de rangs $h=2$ et $h=40$). Mais, on peut observer des sous-harmoniques ou des inter-harmoniques à des fréquences non multiples entières de la fréquence fondamentale [9,10]. Toute fonction périodique peut être représentée par une série de fourier sous la forme :

$$y(t) = y_0 + \sum_{h=1}^{\infty} y_h \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(h\omega t - \varphi_h) \quad (\text{III.1})$$

$y(t)$: la valeur efficace de la composante de rang h .

φ_h : Phase de la composante h lorsque $t = 0$.

y_0 : Valeur moyenne ou composante continue du signal $y(t)$.

ω : Pulsation fondamentale ($2\pi \cdot f = 2\pi/T$).

h : Rang de l'harmonique.

III.3.1. Harmonique de Courant et de tension

Les harmoniques présents sur les réseaux électriques proviennent de l'utilisation de charges non linéaires. Quand elles sont connectées au réseau d'une certaine fréquence, elles absorbent un courant non sinusoïdal mais de même fréquence [9].

Ces charges se comportent comme des sources de courant harmonique, c'est-à-dire que le courant est fixé par la charge et non par la tension du réseau. Ces courants provoquent, dans le réseau, des chutes de tensions harmoniques selon la loi d'Ohm :

$$V_h = Z_h I_h \quad (\text{III.2})$$

V_h : Tension harmonique de rang h ;

Z_h : Impédances harmoniques de rang h ;

I_h : Courant harmonique de rang h .

Soit par exemple la figure suivante représentant la forme de l'onde d'un courant pollué avec, en même temps, l'image des différents courants harmoniques le constituant qu'on peut exprimer grâce à une représentation en série de Fourier du courant global :

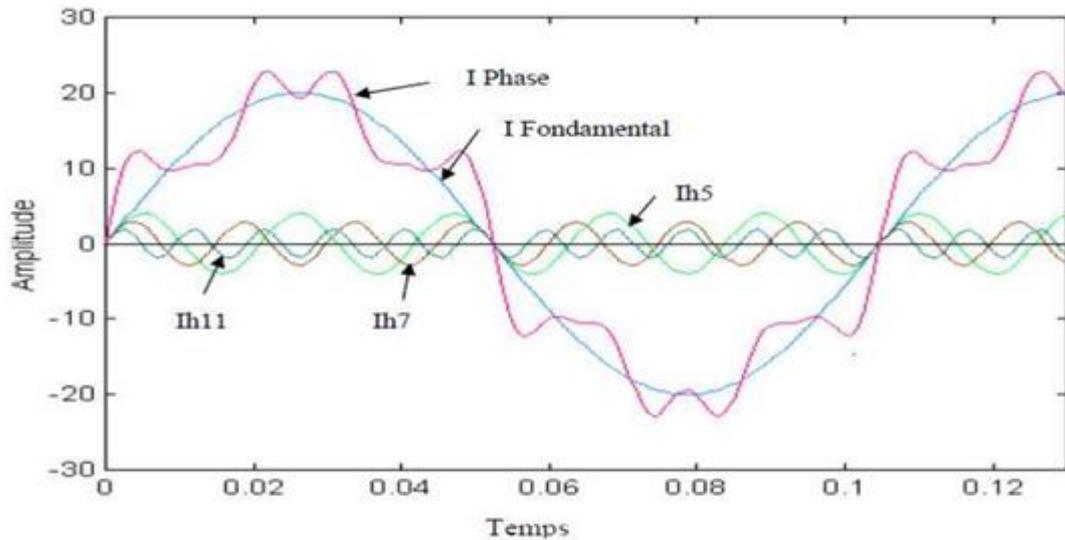


Figure III.1 : présentation d'un courant avec les différents harmoniques

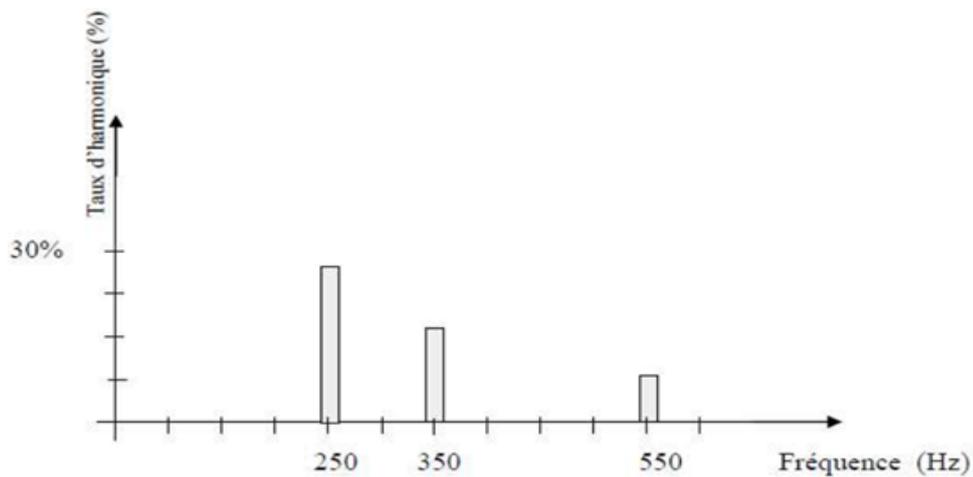


Figure III.2 spectres des harmoniques

III.3.2 Taux individuel de distorsion

Mesure l'importance de chaque rang par rapport au fondamental.

$$D(\%) = \frac{Y_h}{Y_1} \cdot 100 \quad (\text{III.3})$$

III.3.3 Taux global de distorsion

Le taux global de distorsion en courant ou THDI (Total Harmonic Distorsion - I pour courant), mesure l'importance des harmoniques de tous les rangs par rapport au fondamental.

$$THD(\%) = \frac{\sqrt{\sum_2^{\infty} Y_h^2}}{Y_1} \quad (\text{III.4})$$

Il faut préciser s'il s'agit d'un THD de courant : THDI ou de tension : THDV. Contrairement au niveau de courant, le niveau de tension est une valeur fixe et prédéfinie pour un réseau. On définit donc les contraintes en termes de THDV. Le fait d'exprimer l'amplitude de chaque harmonique en valeur efficace, permet de quantifier l'effet thermique de l'ensemble. En effet, supposons que ce courant $i(t)$ traverse une résistance R , la puissance dissipée par effet Joule est :

$$P_j = R * I^2 = R * I_1^2 + R * I_3^2 + R * I_5^2 + R * I_7^2 + R * I_{11}^2 + \dots$$

Ce qui permet de calculer :

$$I_{eff} = \sqrt{\sum_1^{\infty} I_h^2} \quad (\text{III.5})$$

III.3.4 Propagation des harmoniques

La susceptibilité de la plupart des équipements à la distorsion harmonique, dépend de la tension harmonique à ses bornes. Cette tension est obtenue par le produit du courant harmonique et de l'impédance harmonique du réseau à la fréquence du courant injecté (rang h).

$$V_h = Z_h \cdot I_h \quad (\text{III.6})$$

De ce fait, la tension harmonique peut atteindre un niveau élevé si le courant harmonique rencontre à une fréquence donnée, une impédance élevée ou un niveau faible dans le cas contraire [10,20].

Les ouvrages qui composent les réseaux de distribution (lignes, transformateurs) sont très souvent inductifs aux fréquences harmoniques de rang faible ($= < 7$), comme à la fréquence fondamentale. Le problème de propagation des harmoniques vers l'amont se ramène à l'état d'un simple diviseur de courant. La charge non linéaire génératrice d'harmoniques apparaît comme une source de courant, celui-ci se répartit entre les charges voisines et les lignes conduisant au poste source.

Sur les réseaux de transport, l'étude de la propagation des harmoniques est plus complexe, car les lignes ne sont plus inductives. De plus, elles sont disposées selon une structure maillée. Généralement, les tensions s'atténuent lorsque l'on remonte vers les

niveaux de tensions élevées et s'atténuent très peu dans l'autre sens. Dans certains cas cependant, on peut observer localement des amplifications de tensions harmoniques à des fréquences particulières. Ces amplifications sont généralement dues à des résonances entre l'inductance qui représente le réseau et les condensateurs de compensation implantés, soit en réseau, soit chez les clients. Dans ce cas, l'impédance Z_h du réseau devient élevée à cette fréquence particulière appelée de résonance [9,21].

III.4 Technique de diagnostic

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.

III.4.1 Analyse des Signatures du Courant Statorique (MCSA)

La méthode de la MCSA est l'abréviation des mots Moteur Curent Signal Analysés qui a l'abréviation française ASCS qui signifie : Analyse des Signatures du Courant Statorique (Analyse Spectrale du Courant Statorique en anglais). L'analyse spectrale est utilisée depuis de nombreuses années pour détecter des défaillances dans les machines électriques, essentiellement les ruptures de barres au rotor des machines asynchrones à cage, la dégradation des roulements, les excentricités et les courts-circuits dans le bobinage. Ces cas se prêtent bien à cette approche dans la mesure où de nombreux phénomènes se traduisent par l'apparition de fréquence directement liées à la vitesse de rotation ou à des multiples de la fréquence d'alimentation. La surveillance par analyse spectrale de la MAS consiste donc à effectuer une simple transformée de Fourier des grandeurs affectées par le défaut et à visualiser les fréquences parasites constituant la signature d'un défaut dans la machine.

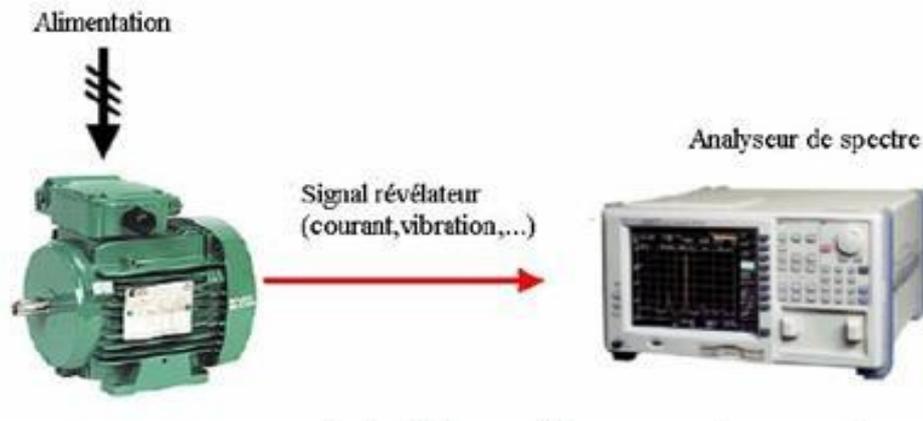


Figure III.3 Principe de la surveillance par analyse spectral.

III.4.2 Analyse spectrale du courant statorique

L'analyse du courant statorique est un outil puissant pour détecter la présence d'anomalies mécaniques et électriques, non seulement dans le moteur, mais également dans la charge. Des améliorations considérables sont apportées à cette technique qui est dénommée dans la littérature.

- ✓ Les signaux de courants présentent l'avantage d'être facilement mesurable, et à moindre cout.
- ✓ Des composantes fréquentielles ont été déterminées pour chaque type de défaut.
- ✓ Il est important de noter, que l'amplitude de la composante fréquentielle augmente avec la sévérité du défaut.
- ✓ Parmi tout les signaux utilisables, le courant statorique s'est avéré être l'un des plus intéressant, car il est facile à mesurer et nous permet de détecter les défauts électriques, y compris les défauts purement mécaniques.

Les défauts de la machine asynchrone se traduisent dans le spectre du courant statorique par:

- L'apparition des raies spectrales dont les fréquences sont directement liées à la fréquence de rotation de la machine, aux paramètres physiques de la machine (nombre de barres rotoriques et nombre des paires de pôles).
- La modification de l'amplitude des raies spectrales, déjà présents dans le spectre du courant.

- La surveillance via le courant statorique, nécessite une bonne connaissance des défauts et de leurs signatures. Elles sont utilisées pour le moment dans le contexte de machines alimentées par le réseau et pour la recherche de fréquences caractéristiques de défauts.
- la présence d'harmoniques caractérisant les défauts de la MAS.

Cette méthode qui est connue sous le nom "Moteur Curent Signature Analysés" (MCSA), se base sur les phénomènes électro magnétiques qui se transforment, par influence à une information dans le courant statorique.

Elle est appuyée par un algorithme de calcule rapide appelée Transformée de Fourier Rapide ou bien en Anglais : Faste Fourier Transforme (FFT).

III.4.3 Technique de la FFT

La FFT est un moyen efficace qui réduit le nombre d'opérations arithmétiques nécessaire à la transformée discrète, son importance augmente aussi avec l'évolution du traitement numérique des signaux, de même avec la possibilité de pouvoir l'utiliser pour des signaux analogiques ou plus généralement pour des fonctions continues dans des nombreux domaines scientifiques

L'utilisation de cette méthode est très simple car elle ne nécessite pas l'introduction d'appareillage de mesure à l'intérieur de la machine électrique, mais consiste à analyser le courant statorique du moteur.

III.5 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 :

- *Couple électromagnétique*
- *Puissance instantanée statorique*
- *Vibration mécanique*
- *Courant statorique*

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

- ✓ 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)

- ✓ 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

III.5.1 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.

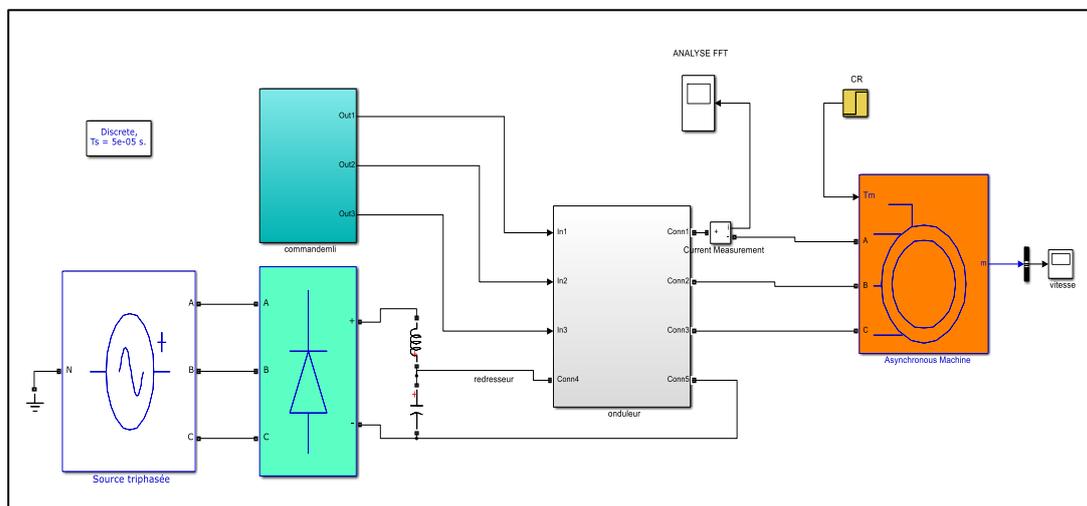


Figure III.4 Schéma block de l'association onduleur-MAS

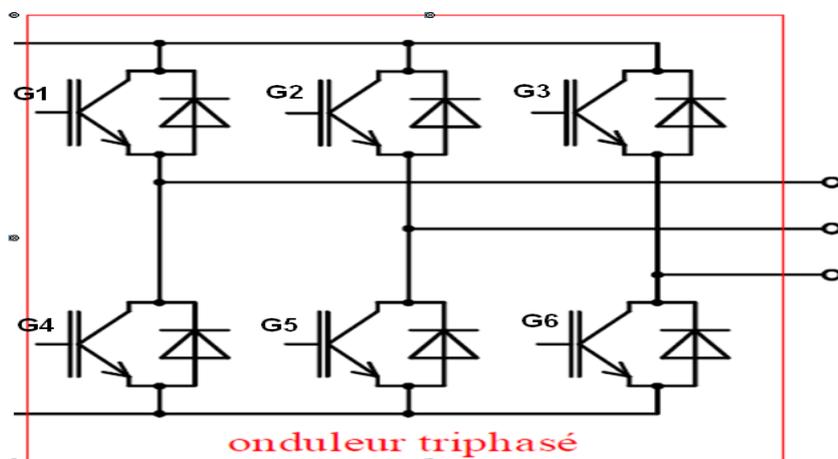


Figure III.5 Structure générale de l'onduleur de tension à deux niveaux

III.5.2 Association onduleur – machine asynchrone : cas sain (sans défauts)

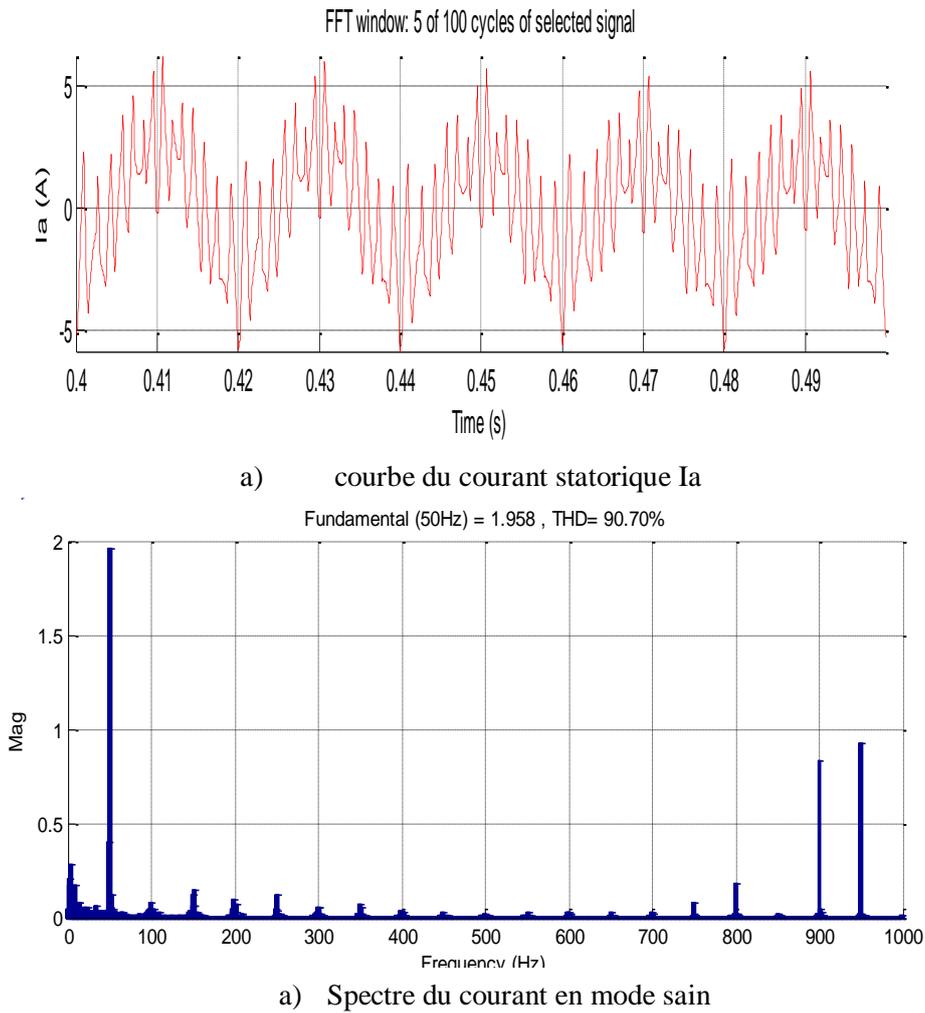
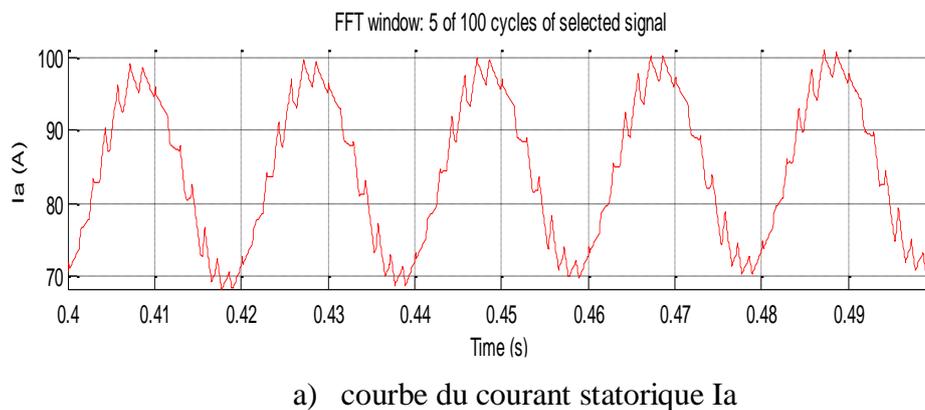


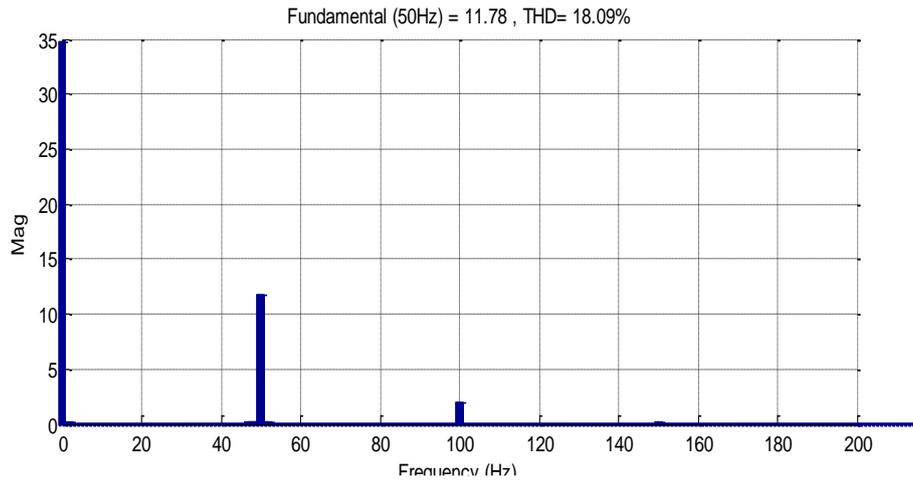
Figure III.6 analyse spectrale (FFT) du courant statorique I_a dans le cas sain

III.5.3 association onduleur – machine : Défauts dans l'onduleur

a) Défaut de court-circuit dans un seul interrupteur

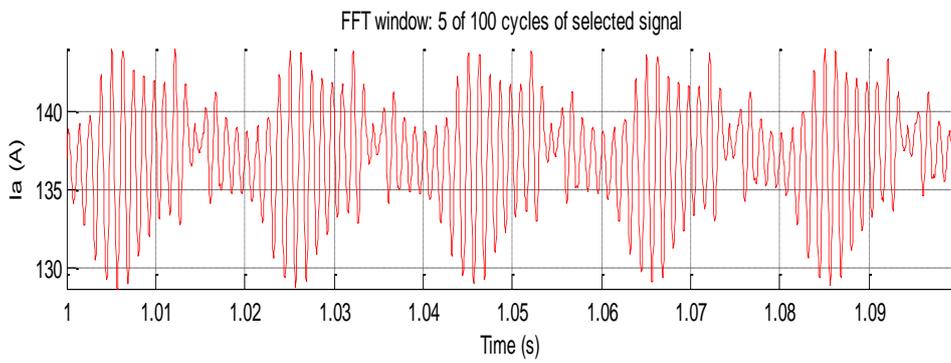


a) courbe du courant statorique I_a

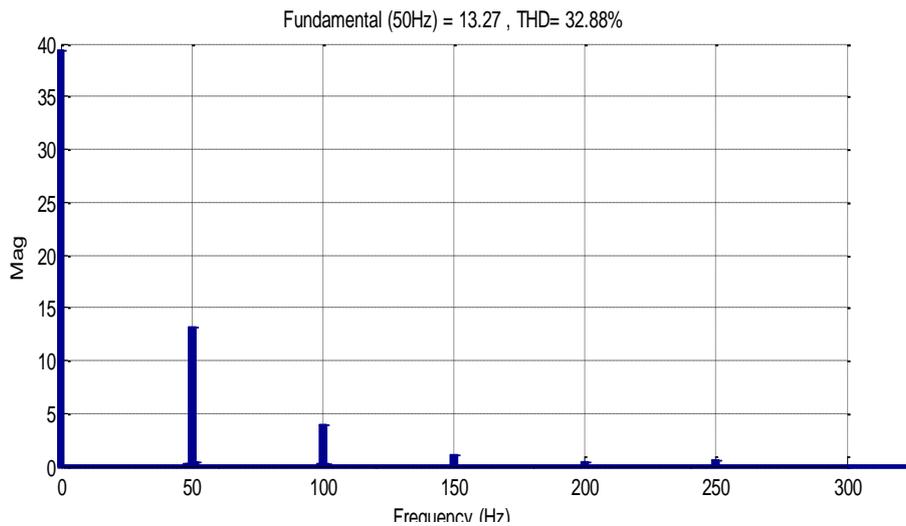


b) spectre du courant statorique Ia

Figure III.7 Analyse spectrale (FFT) du courant statorique Ia en cas d'un court-circuit dans un seul interrupteur



a) courbe du courant statorique Ia



b) Spectre du courant statorique Ia

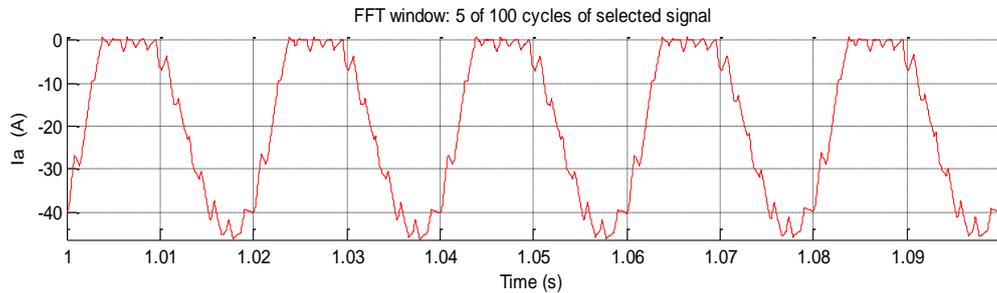
Figure III.8 analyse spectrale (FFT) du courant statorique Ia en cas d'un défaut de court-circuit sur deux interrupteurs

Autres cas de défauts de court-circuit dans un onduleur de tension à deux niveaux sont résumés dans le tableau suivant :

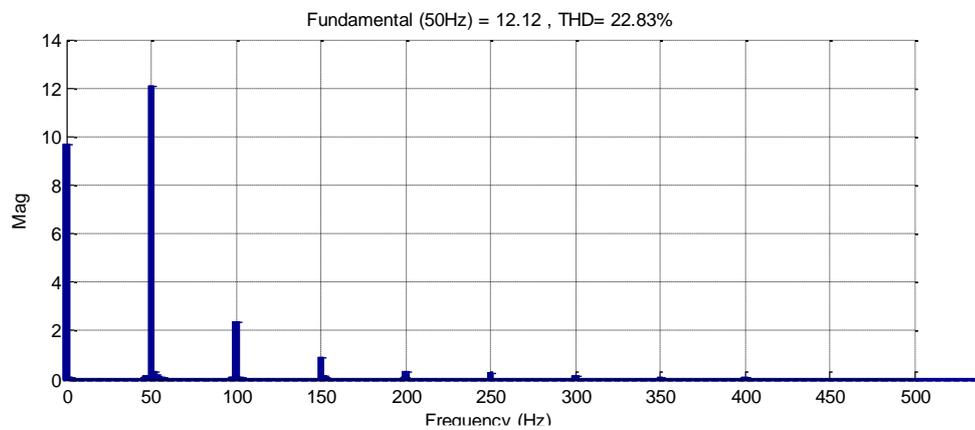
Type de défaut	Interrupteur	Amplitude (50Hz)	THD (Ia)
Court circuit d'un seul interrupteur	G1	1.958	90.7
	G2	5.653	50.02
	G3	5.99	36.45
	G4	19.23	24.12
	G5	8.324	30.84
	G6	10.97	10.97
Court circuit des deux interrupteurs	G1 et G5	13.27	32.88
	G1 et G6	32.79	33.49
	G4 et G2	15.336	32.09
	G2 et G6	1.493	123.12
	G3 et G4	14.75	31.02
	G5 et G3	1.248	172.32

Tableau III.1 Autres cas de défauts de court-circuit d'un onduleur

b) défaut d'un circuit ouvert

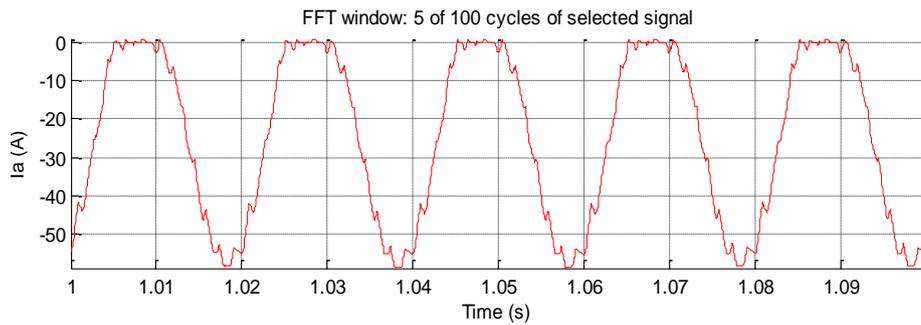
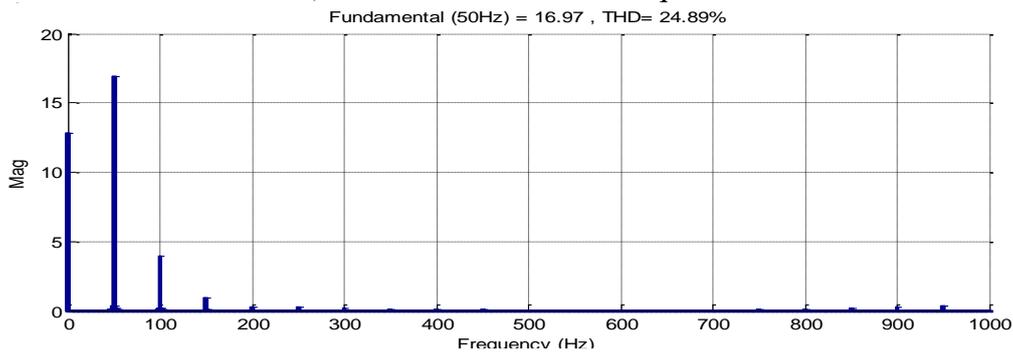


a) courbe du courant statorique Ia



b) Spectre du courant de défaut

Figure III.9 Spectre du courant statorique Ia en cas d'un défaut de circuit ouvert sur un seul interrupteur

a) courbe du courant statorique I_a 

b) Spectre du courant de défaut

Figure III.10 Analyse spectrale du courant I_a avec défaut de court circuit sur l'interrupteurs G1 et G5

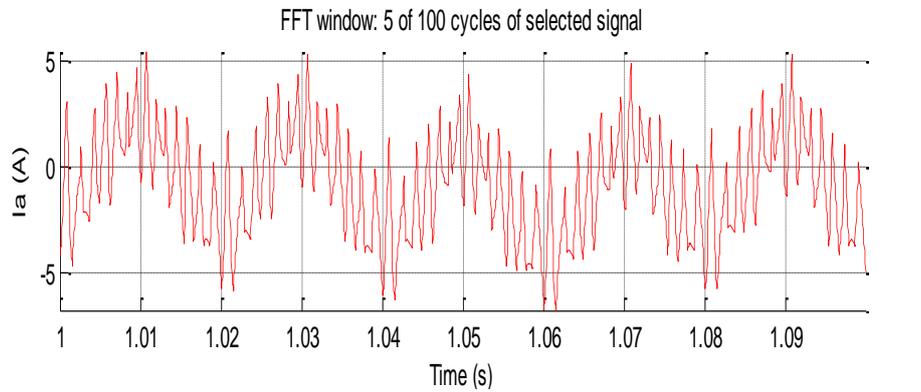
D'autres cas de circuits ouverts sont résumés de cette information dans le tableau

Type de défaut	Interrupteur	Amplitude (50Hz)	THD (I_a)
Circuit ouvert sur un interrupteur	G1	12.12	22.83
	G2	26.51	6.7
	G3	23.94	8.46
	G4	12.2	22.92
	G5	26.47	6.89
	G6	23.97	8.05
Circuit ouvert de deux interrupteurs	G1 et G5	16.97	24.89
	G1 et G6	10.86	18.88
	G4 et G2	17	24.75
	G2 et G6	26.74	12.04
	G3 et G4	10.97	19.5
	G5 et G3	26.79	12.16

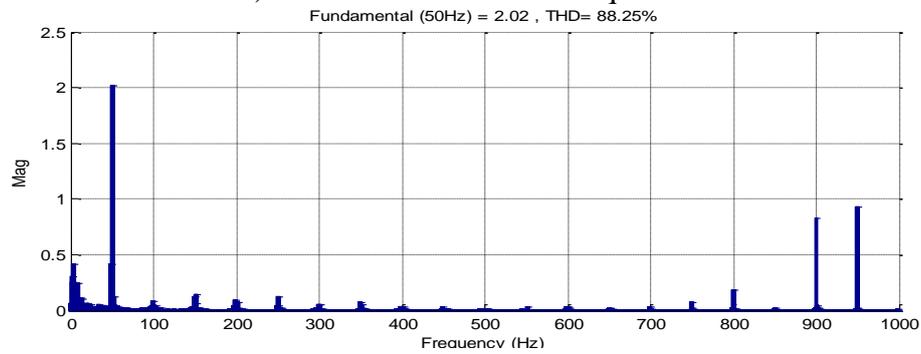
Tableau (III.2) Résultats des autres cas de circuit ouvert des interrupteurs.

III.5.4 Défaits dans la machine asynchrone

a) Défaut statorique

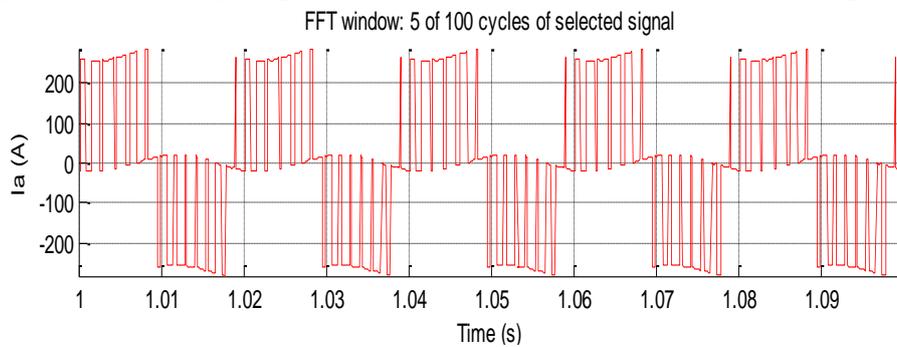


a) Courbe du courant statorique Ia

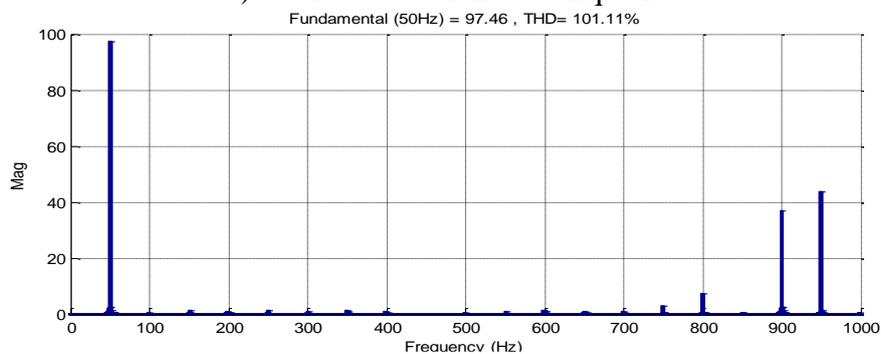


b) Spectre du courant de défaut

Figure III.11 Analyse spectrale du courant Ia avec défaut c-c sur la phase (a)



a) Courbe du courant statorique Ia



b) Spectre du courant de défaut

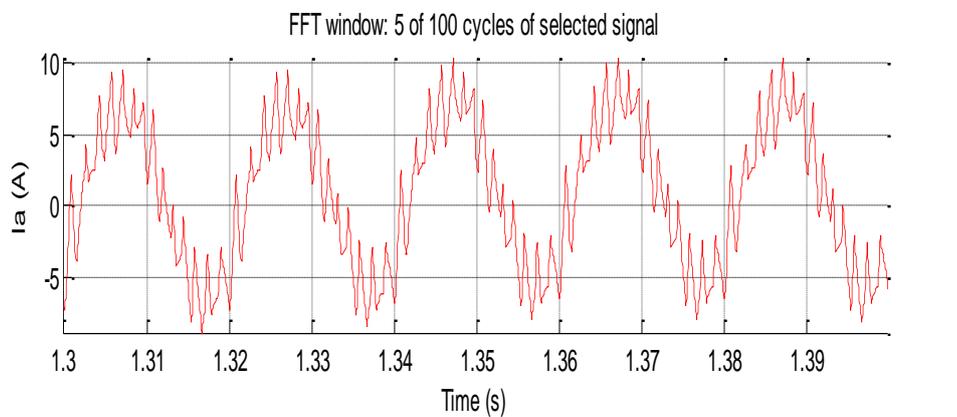
Figure III.12 Analyse spectrale du courant Ia avec défaut c-c entre deux phases (a) et (b).

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

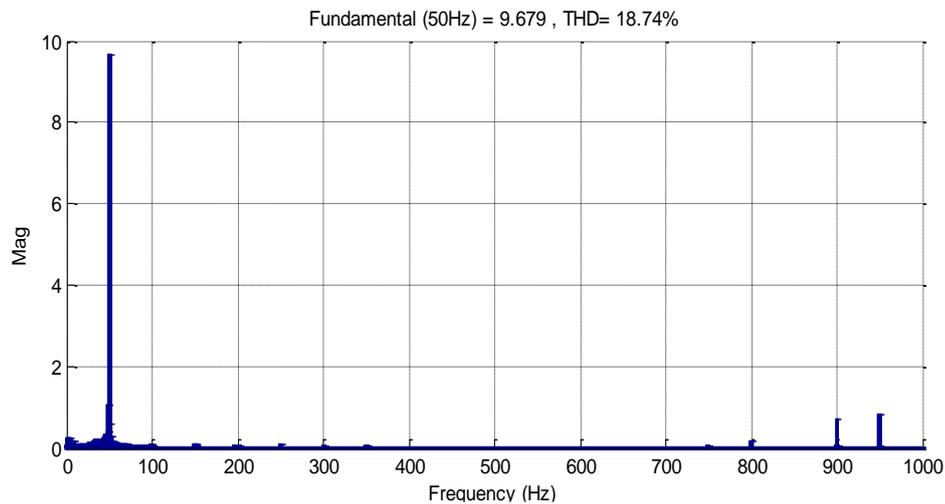
Type de défaut	phases	THDi	Amplitude (50Hz)
Court circuit dans une phase	a	88.25	2.02
	b	87.86	2.03
	c	96.2	1.849
Court circuit entre deux phase	a-b	101.11	97.46
	a-c	87.13	112.8
	b-c	6.23	18.85

Tableau (III.3) résultats des autres cas de court-circuit en les phases.

b) Défaits mécaniques



a) courbe du courant statorique Ia



b) Spectre du courant de défaut

Figure III.13 Analyse spectrale du courant Ia avec défaut mécanique

c) Défaits rotoriques

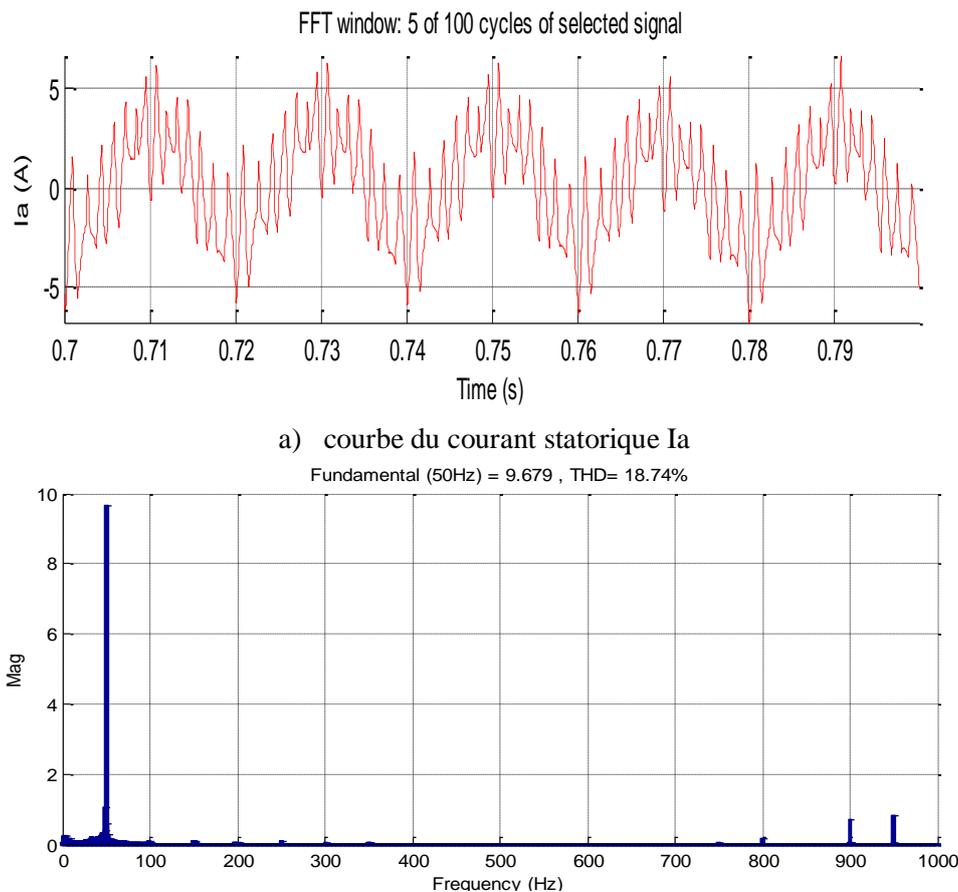
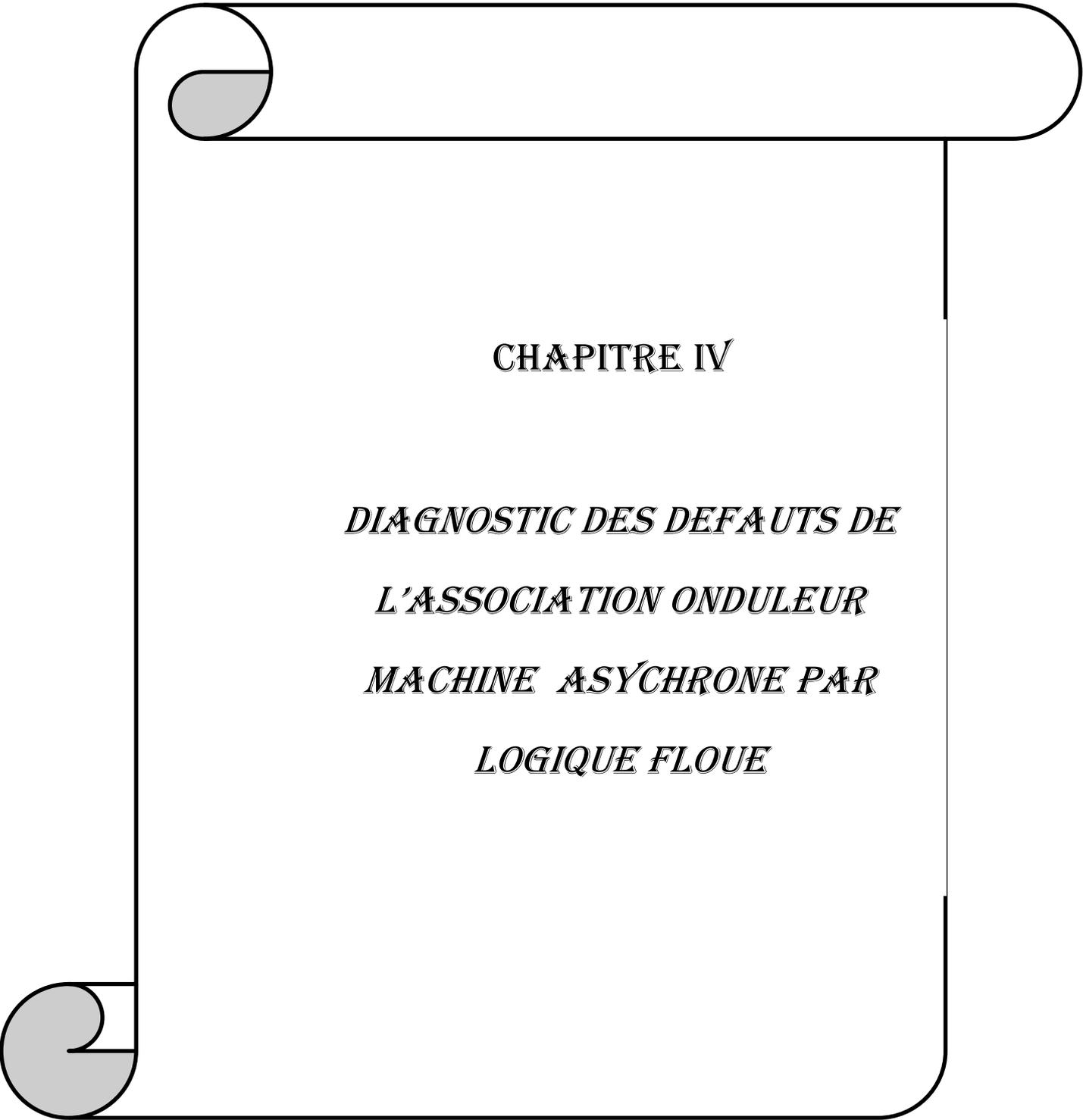


Figure III.14 Analyse spectrale du courant Ia avec défaut rotorique

III.6 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons fait un diagnostic de défauts par 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.

A decorative border resembling a scroll, with rounded corners and a grey shaded area at the top-left and bottom-left corners.

CHAPITRE IV

*DIAGNOSTIC DES DEFAUTS DE
L'ASSOCIATION ONDULEUR
MACHINE ASYNCHROME PAR
LOGIQUE FLOUE*

IV.1 Introduction

La logique floue est une 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 présentons une étude des défauts de l'association onduleur machine asynchrone par logique floue

IV.2 Base générale de la logique floue

Les éléments de base générale de la logique floue sont :

IV.2.1 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 (IV.1)).

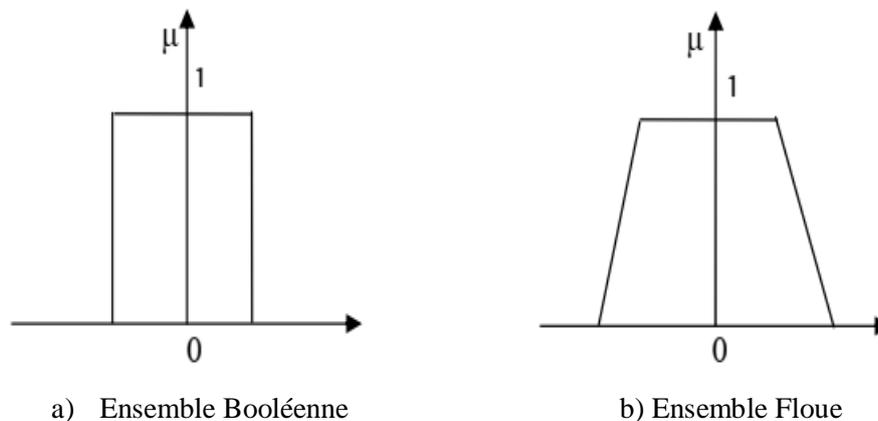


Figure IV.1 Fonction caractéristique d'appartenance pour la logique booléenne et la logique floue.

- ❖ **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 point on dit qu'il est un singleton flou.

IV.2.2 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:

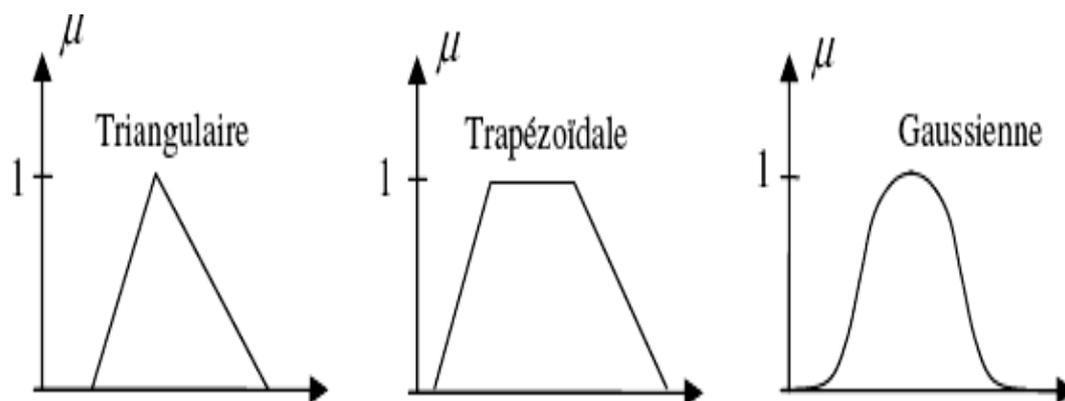


Figure IV.2 Différentes formes de fonctions d'appartenance

IV.2.3 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.

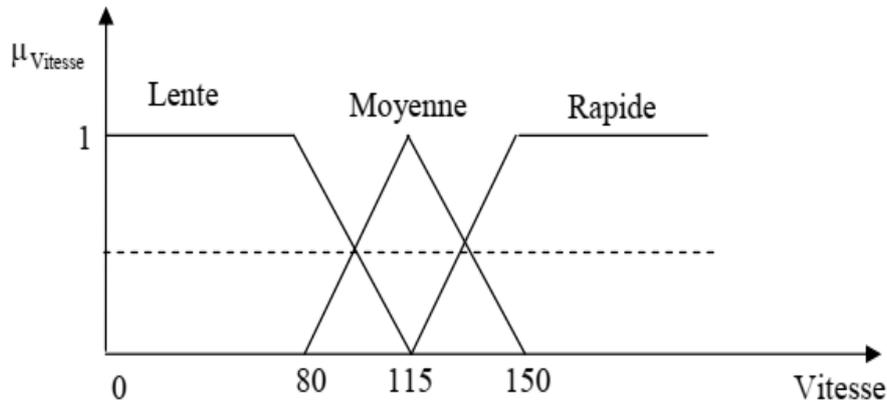


Figure IV.3 Représentation des variables linguistiques

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

IV.2.4 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)

IV.3 Étapes de contractions d'un modèle de logique flou [1]

IV.3.1 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.

IV.3.2 Base de connaissances

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

IV.3.2.1 Base de données

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

IV.3.2.2 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.

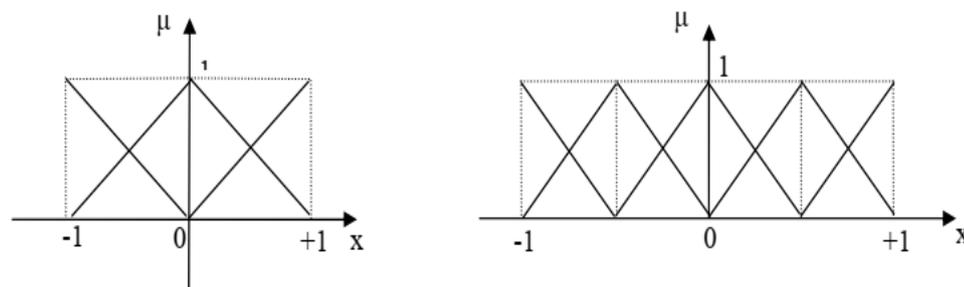


Figure IV.4 Univers de discours normalisé dans l'intervalle [-1 +1]

IV.3.3 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'inférence somme-prod.*

IV.3.4 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 ;*

IV.4 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 :

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

IV.5 Système de surveillance et de détection

La structure du système de surveillance proposé pour le diagnostic est montrée par la figure IV.5.

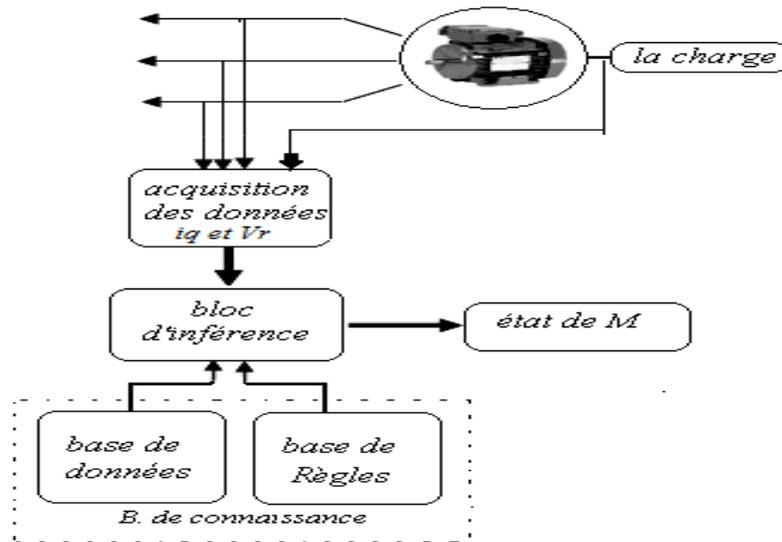


Figure IV.5 Schéma bloc d'un système de surveillance de l'état d'un moteur

IV.6 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 présent 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).

IV.6.1 Cas sain :

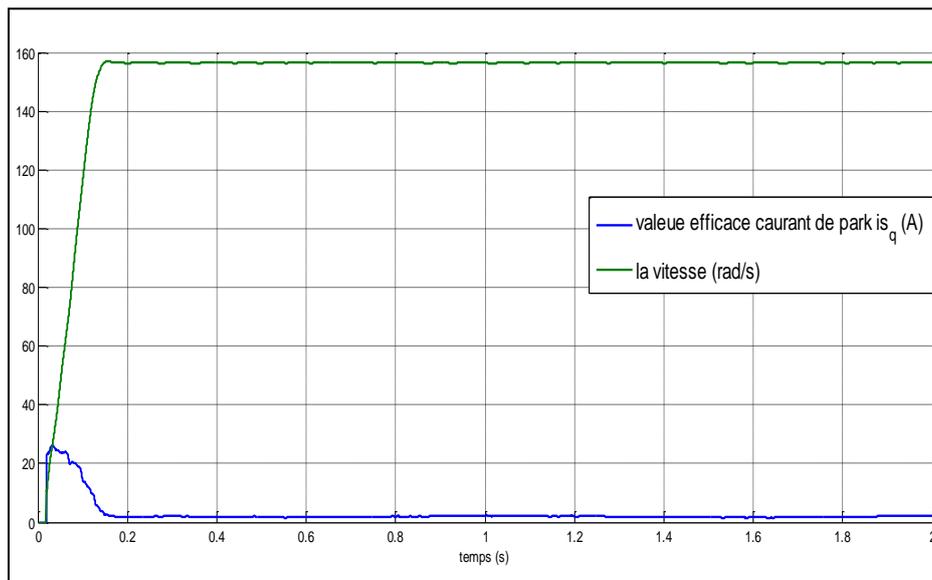
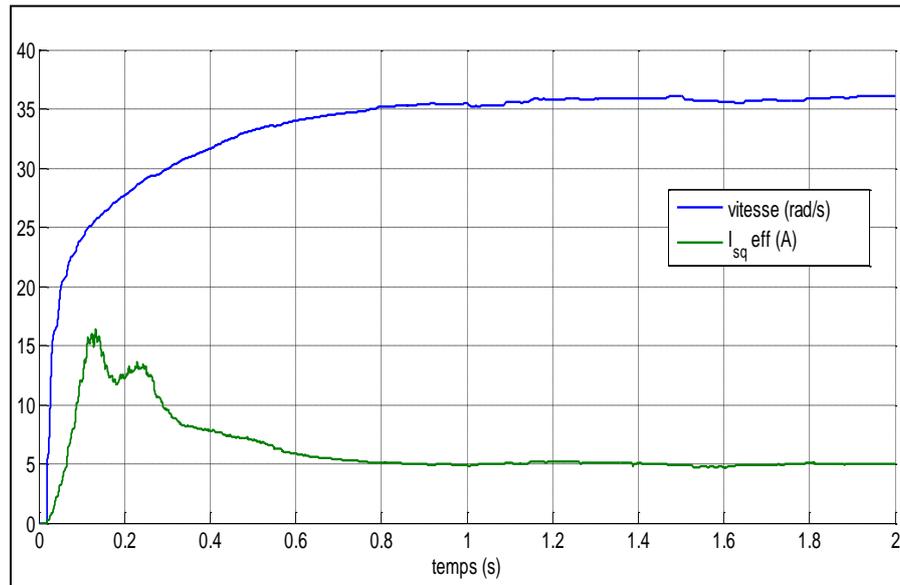


Figure IV.6 Vitesse et le courant i_{sq} dans le cas sain

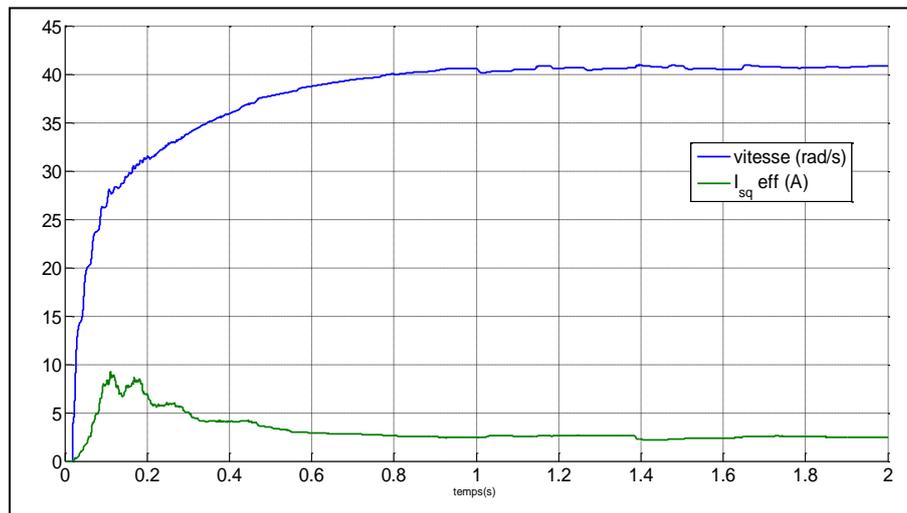
IV.6.2 Défaillances du convertisseur (onduleur)

IV.6.2.1 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 IV.8a et IV.8b 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.



(a) court circuit dans un interrupteur G1



(b) court circuit dans deux interrupteurs G1 et G5

Figure IV.7 Vitesse et courant i_{sq} en cas des courts circuits dans les interrupteurs

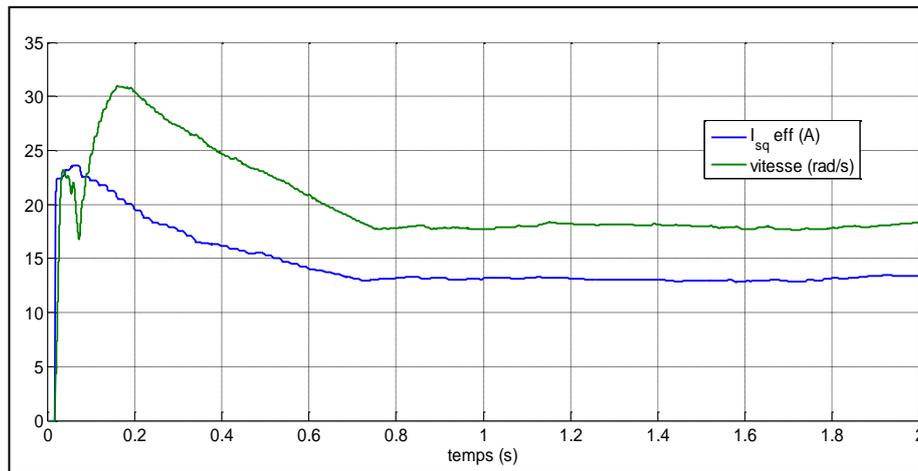
Dans les autres cas d'ouverture, les valeurs de courant et de vitesse ont été mesurées et placées dans le tableau suivant :

Type de défaut	interrupteurs	$i_{sq}(A)$	$V_r(\text{rad/s})$
Court-circuit sur un interrupteur	G1	5	[35.9, 36.1]
	G2	[4.9, 5.0]	[16.0, 18.0]
	G3	[4.6, 5.0]	[18.0, 19.2]
	G4	[3.6, 3.2]	[48.0, 50.0]
	G5	[3.2, 3.7]	[22.0, 21.1]
	G6	[3.4, 3.7]	[26.5, 27.7]
Court-circuit de deux interrupteurs	G1 et G5	[2.4, 2.5]	[40.6, 41.0]
	G1 et G6	[2.7, 2.75]	[42.1, 42.4]
	G4 et G2	[2.4, 2.6]	[45.0, 46.5]
	G2 et G6	[2.5, 2.7]	[3.8, 4.1]
	G3 et G4	[2.0, 2.8]	[45.0, 41.0]
	G5 et G3	[2.5, 3.0]	[3.8, 4.6]

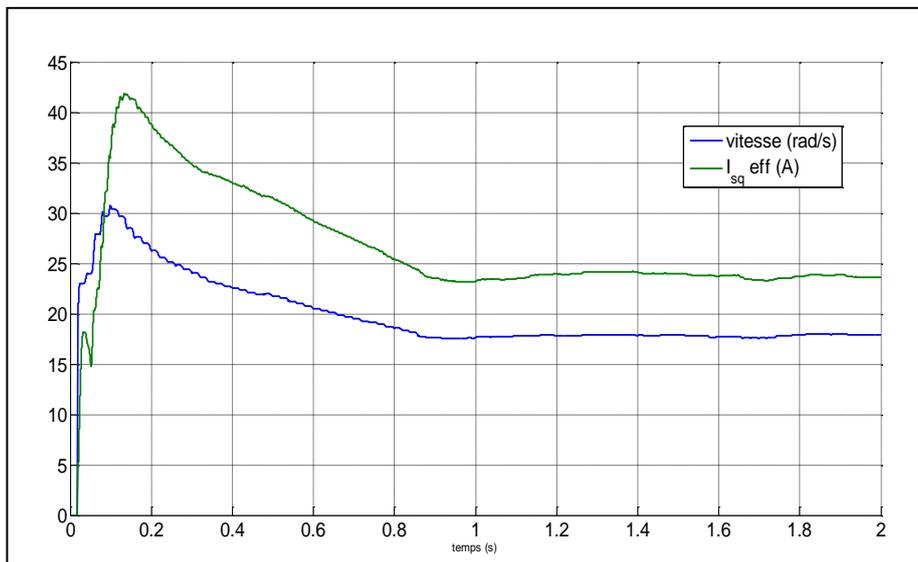
Tableau (IV.1) les valeurs du courant et de vitesse dans les autres cas du court-circuit des interrupteurs

IV.6.2.2 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 IV.8a et IV.8b suivantes.



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



(b) cas d'ouverture G1 et G5

Figure IV.8 Vitesse et courant i_{sq} en cas d'ouverture des interrupteurs

Dans les autres cas d'ouverture, les valeurs de courant et de vitesse ont été mesurées et placées dans le tableau suivant :

Type de défaut	interrupteurs	$i_{s_q}(A)$	$V_r(\text{rad/s})$
Circuit ouvert sur un interrupteur	G1	[17.5, 18.5]	[12.8 ,13.5]
	G2	[17.5, 18.5]	[19.0, 20.0]
	G3	[17.7, 18.0]	[17.8, 18.0]
	G4	[17.5, 18.5]	[19.0, 20.0]

	G5	[17.2, 18.4]	[12.6, 13.4]
	G6	[18.0, 18.2]	[17.8, 18.0]
Circuit ouvert de deux interrupteurs	G1 et G5	[23.0, 24.5]	[17.5, 18.2]
	G1 et G6	[23.4, 24.4]	[12.2, 12.6]
	G4 et G2	[23.4, 24.0]	[17.5, 18.0]
	G2 et G6	[23.0, 24.4]	[19.0, 19.8]
	G3 et G4	[23.4, 24.2]	[12.0, 12.6]
	G5 et G3	[23.2, 24.5]	[19.0, 20.0]

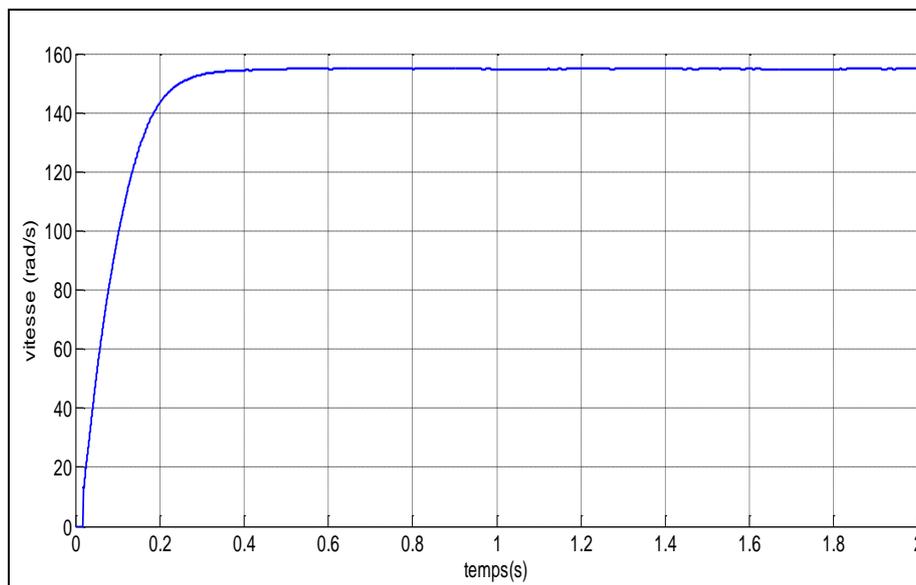
Tableau (IV.2) les valeurs du courant et de vitesse dans les autres cas du circuit ouvert des interrupteurs

IV.6.3 Défaillances à la machine asynchrone

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

IV.6.3.1 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)

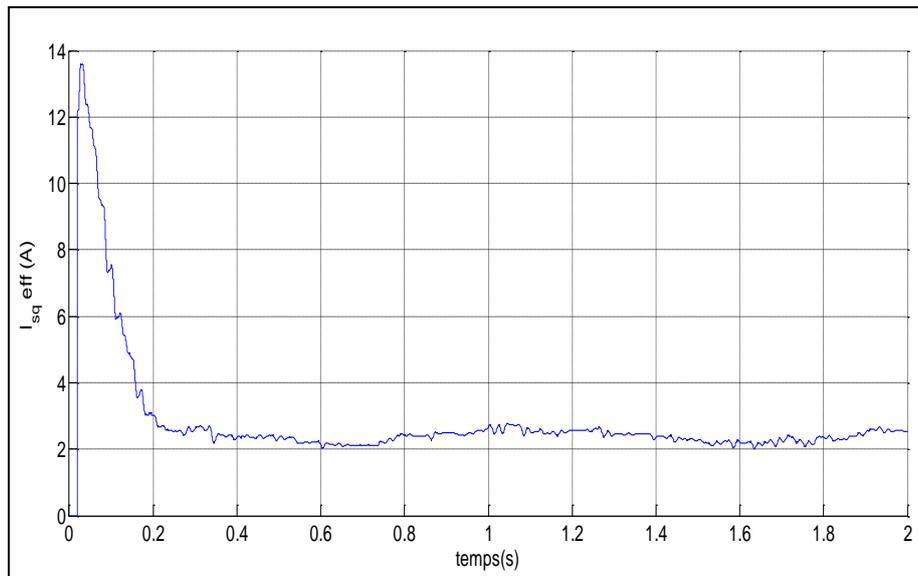
(b) courant statorique I_q (A)

Figure IV.9 Évolution de courant et la Vitesse du moteur avec défaut dans le rotor

IV.6.3.2 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 seul phase

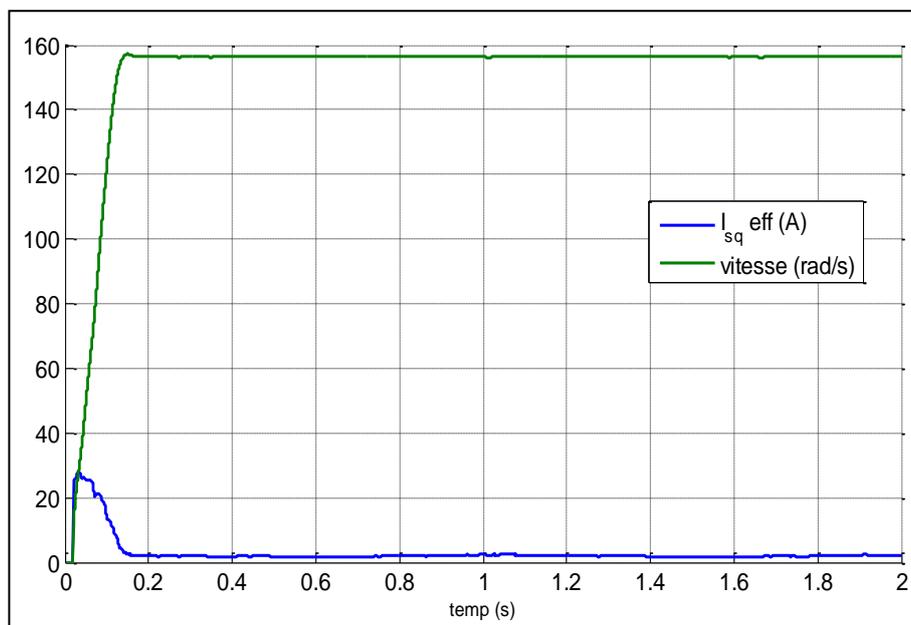


Figure IV.10 Évolution de courant et la vitesse du moteur avec défaut (c.c dans une

phase).

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

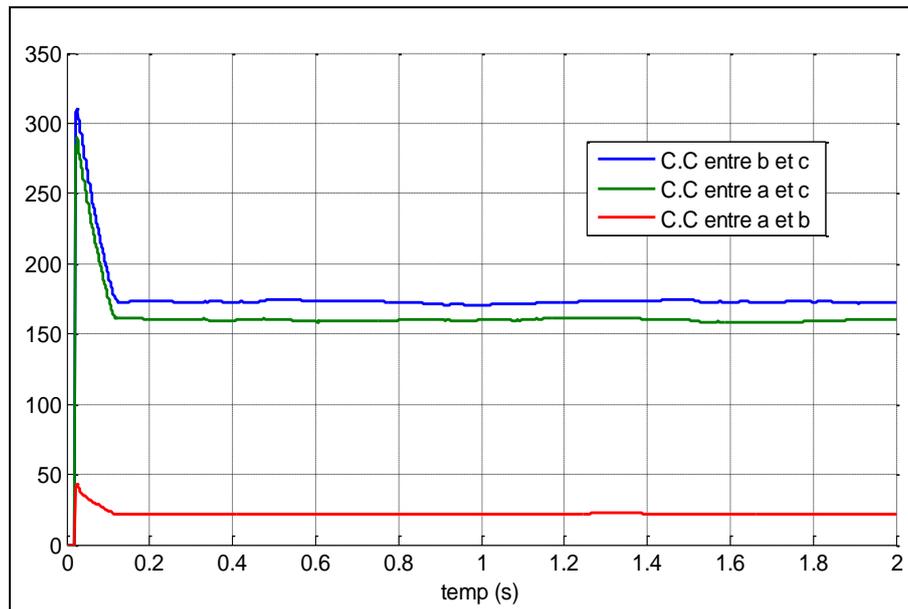
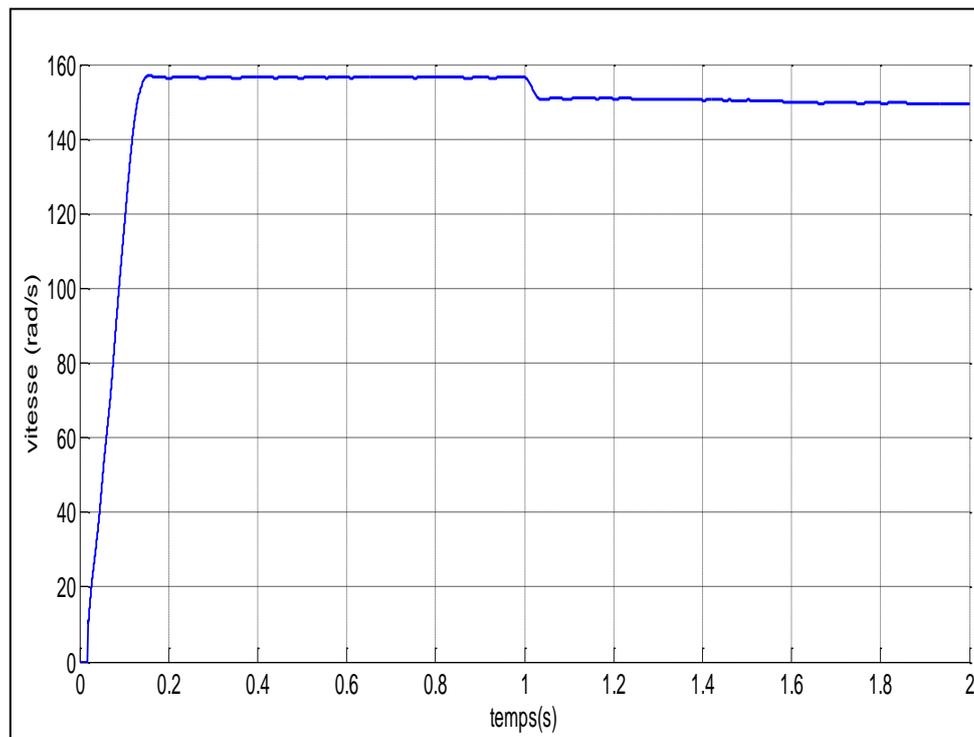


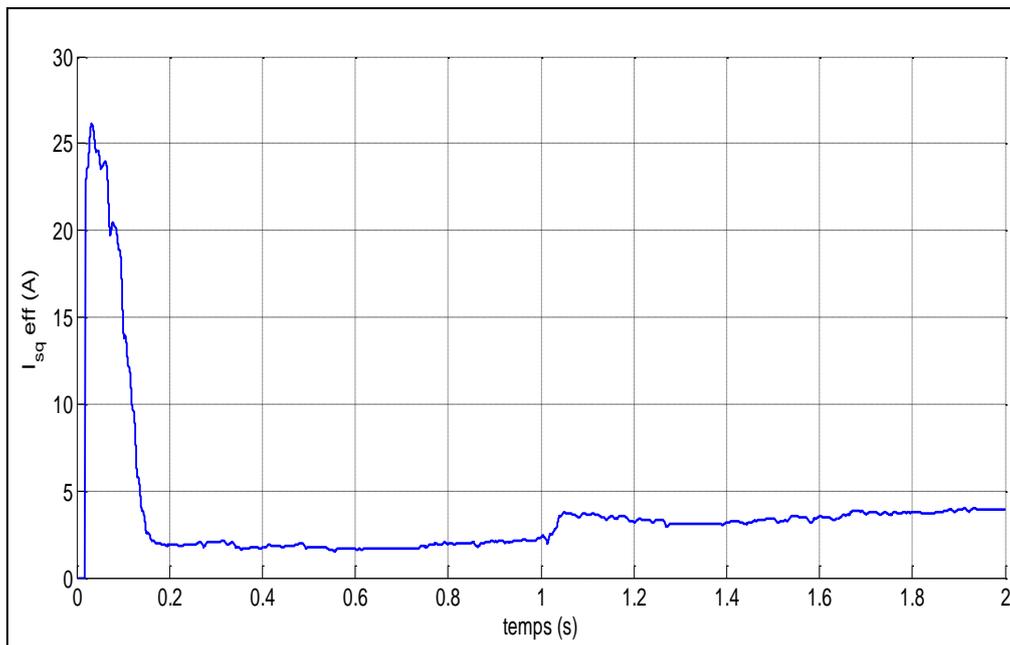
Figure IV.11 Evolution de courant du moteur avec défaut (c.c entre les phases).

c) Défaillances mécaniques

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



(a) vitesse rotorique Vm (rad/s)

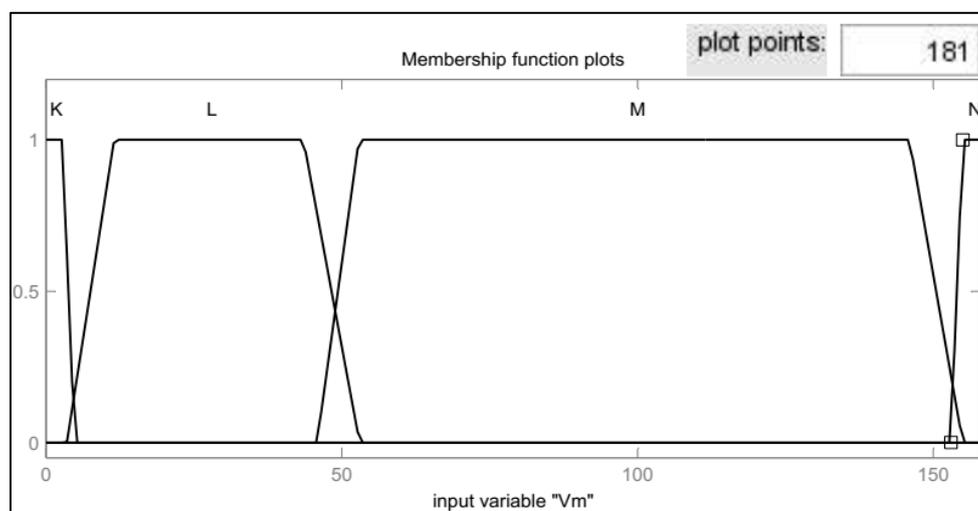


(b) courant statorique Iq (A)

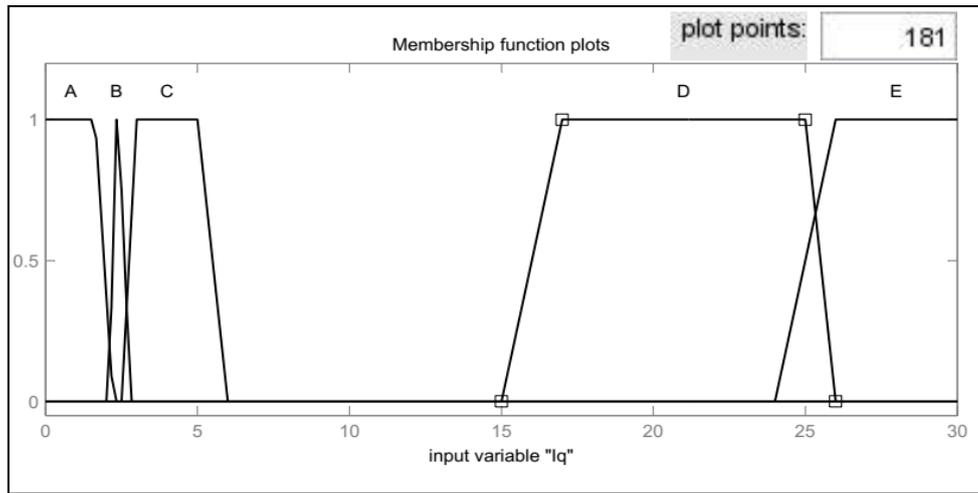
Figure IV.12 Évolution des courants statoriques du moteur avec défaut mécanique

IV.6.4 Variables d'entrée-sortie de système de la logique floue

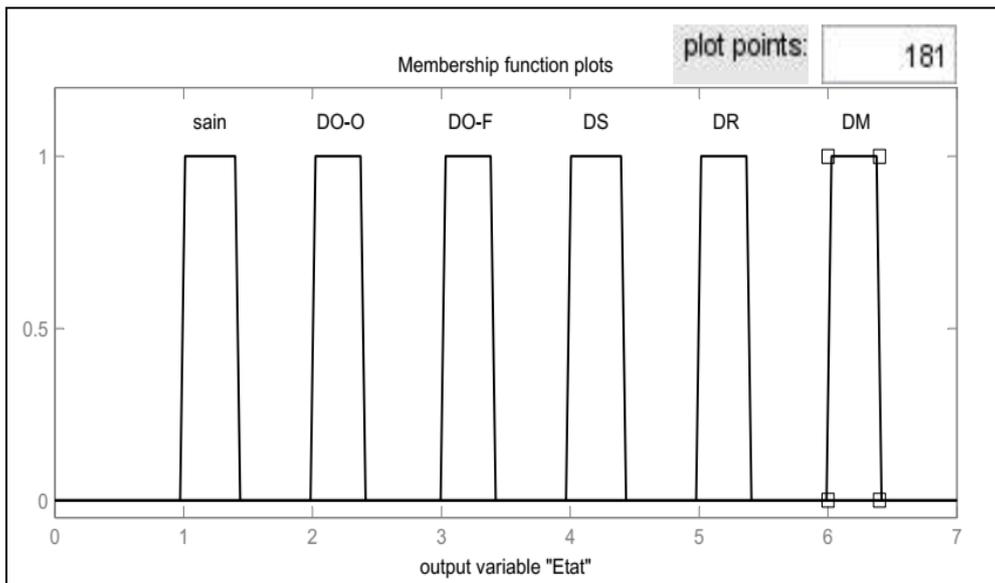
Les amplitudes de courant i_{sq} et la vitesse v_m sont, respectivement, choisis le domaine d'évolution de comme des variables des fonctions d'appartenances d'entrées et de sorties du système flou. Ces variables est défini en utilisant la théorie des ensembles flous. Les fonctions d'appartenance des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



(a) Vitesse 'Vm'



(b) Courant 'Iq'

Figure IV.13 Fonctions d'appartenances des variables d'entrées**Figure IV.14** 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 ;

- Etat 3 : l'onduleur a un défaut de court circuit dans les interrupteurs DO-F;
- Etat 4 : défaut dans le stator de la machine DS;
- Etat 5 : défaut dans le rotor de la machine DR;
- Etat 6 : défaut 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

IV.6.5 Simulation d'un système de diagnostic

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

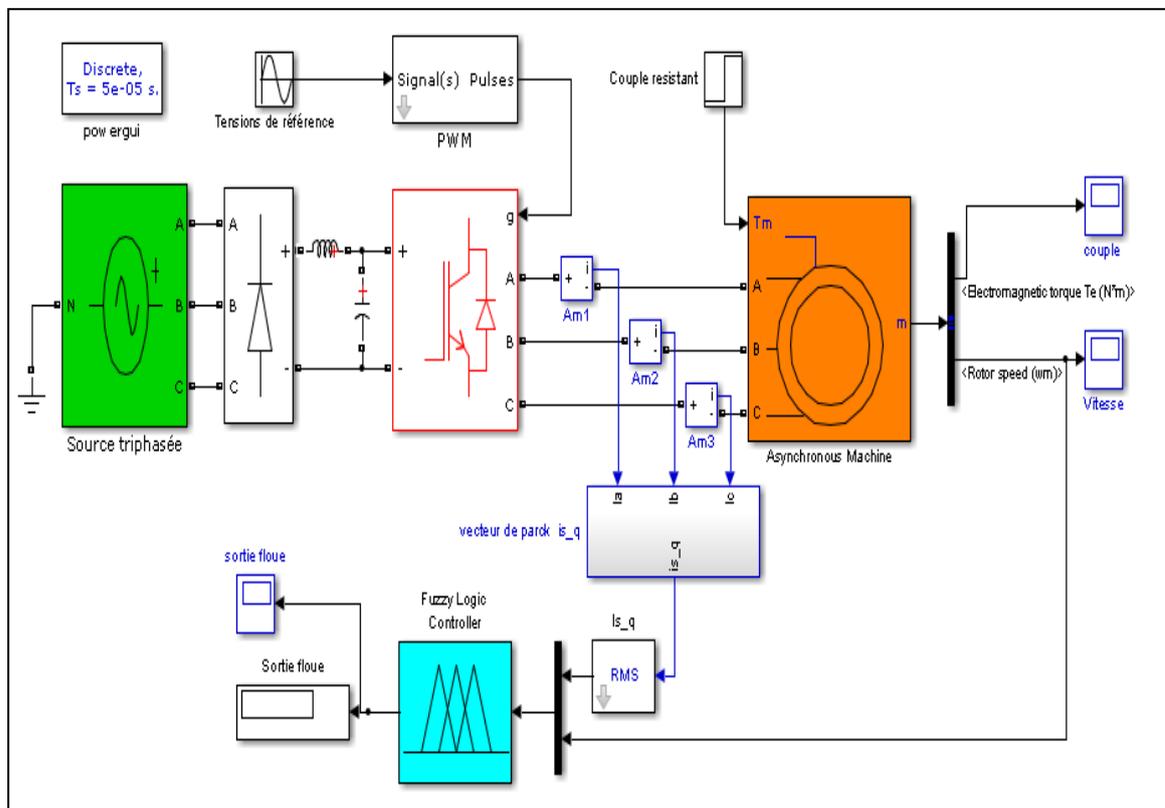


Figure IV.15 Structure de diagnostic des défauts par logique floue.

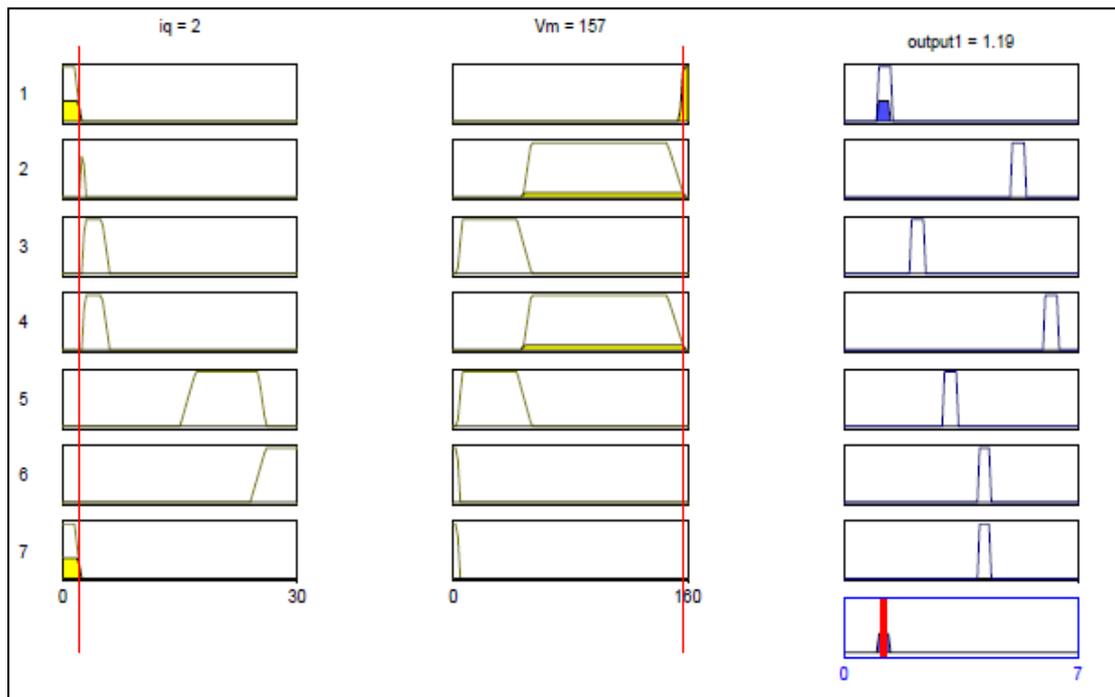


Figure IV.16 Diagramme d'inférence floue dans le cas sain

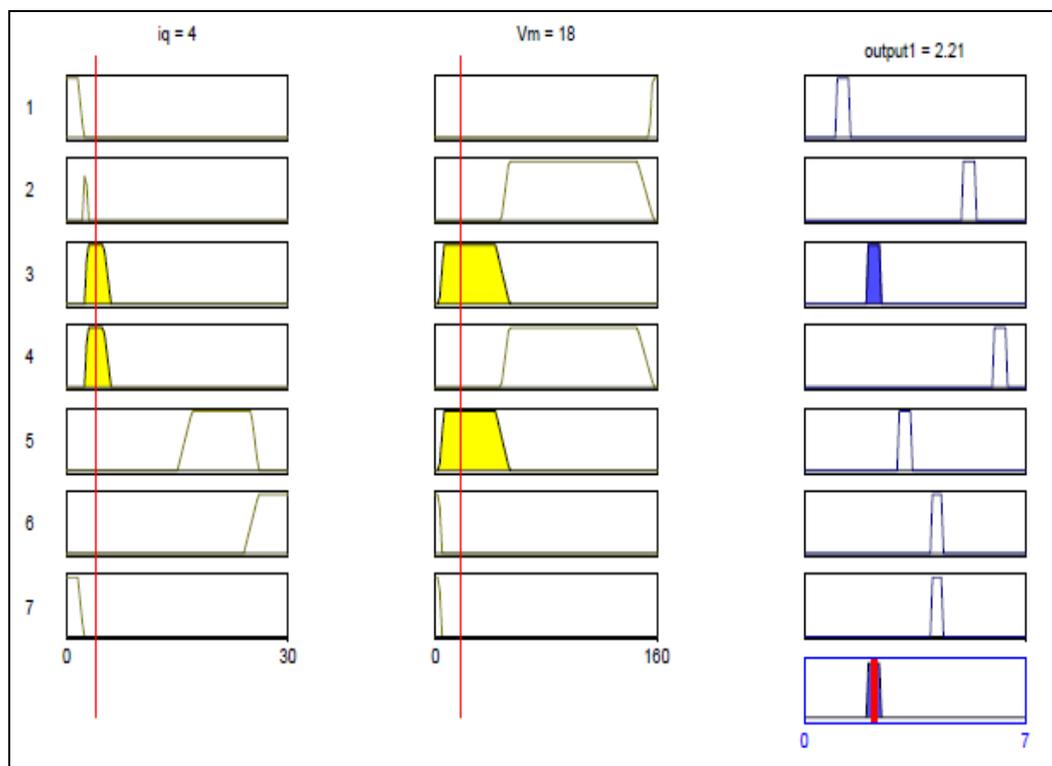


Figure IV.17 Diagramme d'inférence floue dans le cas d'ouverture des interrupteurs

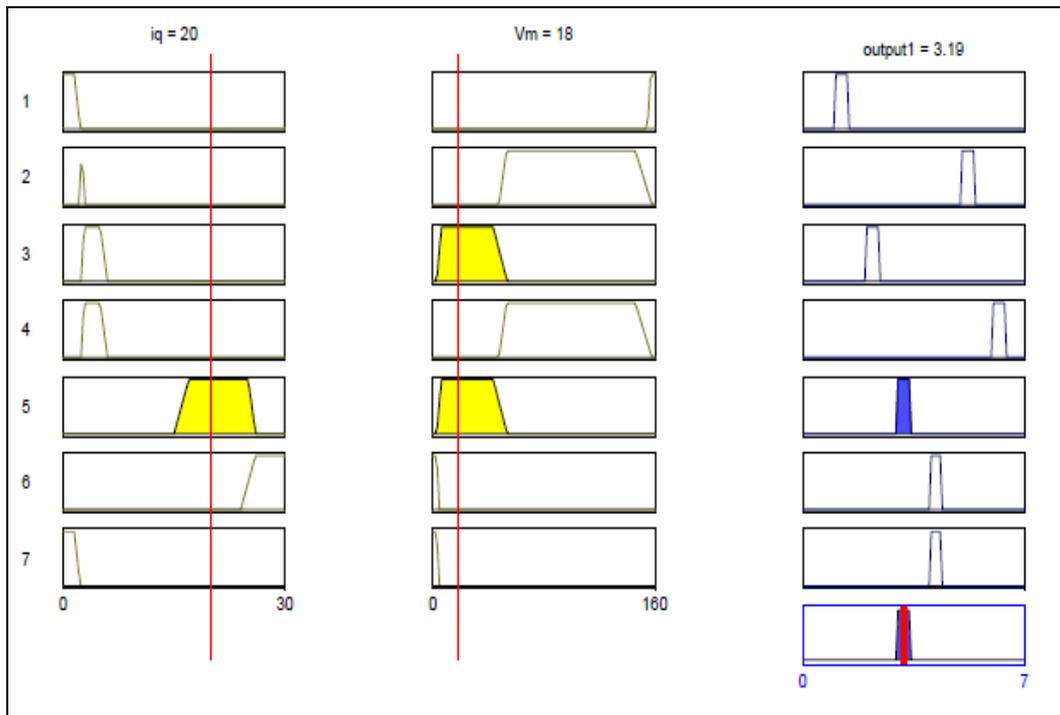


Figure IV.18 Diagramme d'inférence floue dans le cas d'ouverture des interrupteurs

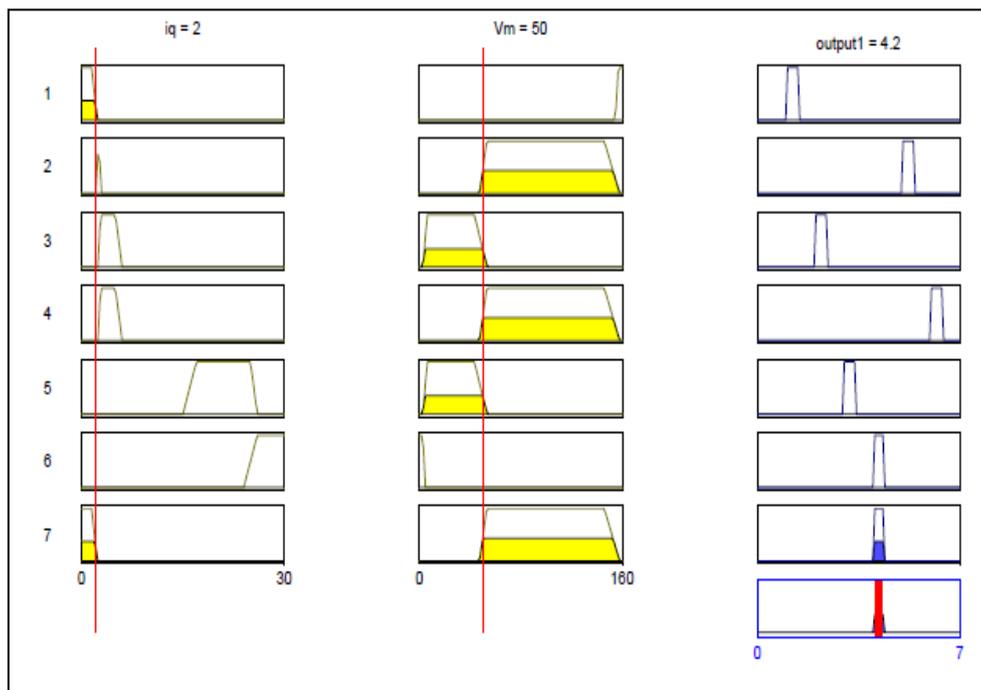


Figure IV.19 Diagramme d'inférence floue pour défaut statorique
(court circuit sur une phase)

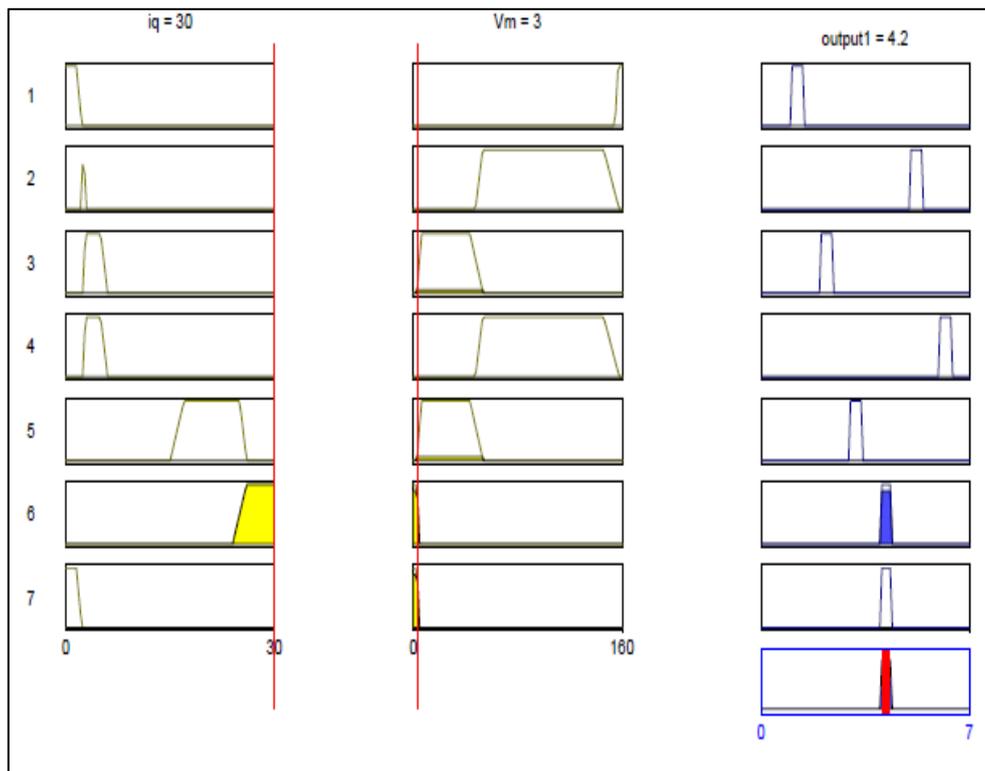


Figure IV.20 Diagramme d'inférence floue pour défaut statorique
(court circuit entre deux phases)

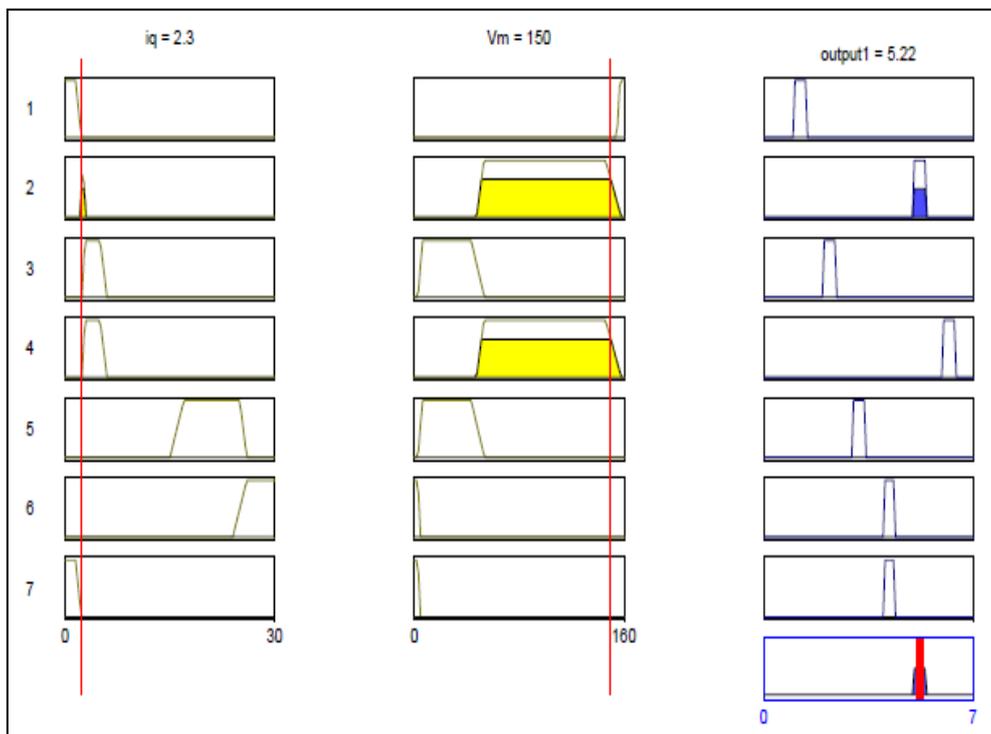


Figure IV.21 Diagramme d'inférence floue pour défaut rotorique

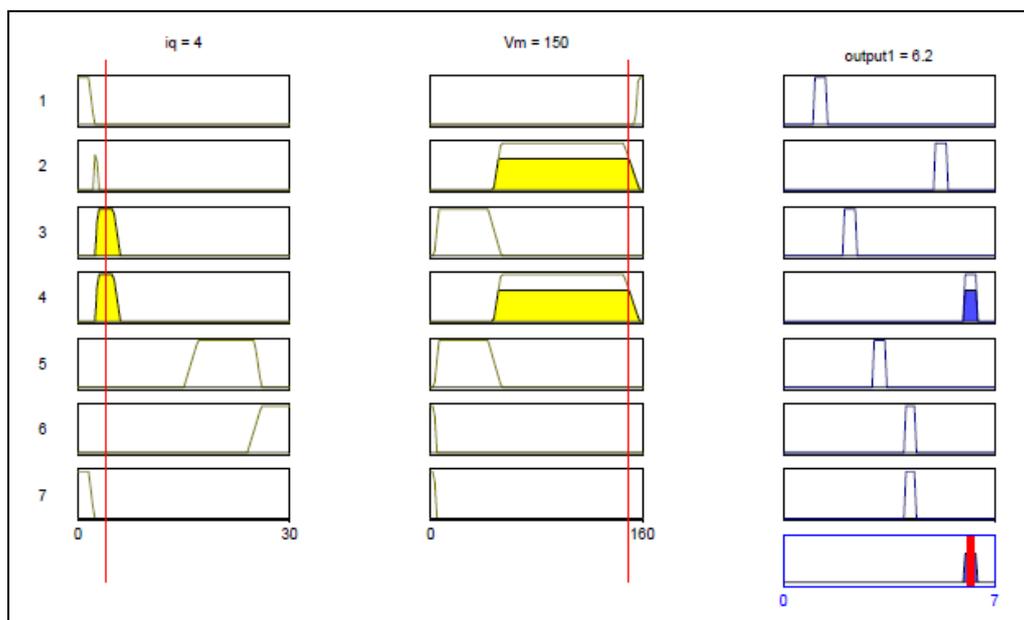


Figure IV.22 Diagramme d'inférence floue pour défauts mécaniques

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

- Le premier teste effectué sur la machine en question dont le résultat d'inférence floue est donnée par la figure (VI.16), montre l'implication de la règle (1) lorsque $I_q=2A$ et $V_m=257$ rad/s. Selon la valeur de la sortie (Etat =1.19), ce qui implique que la décision:

Etat 1 : l'association MAS-Onduleur est à l'état sain (pas de défaut)

- pour la figure (17), c'est la règle (5), $I_a = 4$ A et $V_m=18$ rad/s , ce qui implique que la décision:

Etat 2 : le défaut dans l'onduleur DO-O (circuit ouvert des interrupteurs)

- pour la figure (18), c'est la règle (3) $I_a = 20$ A et $V_m=18$ rad/s Selon la valeur de la sortie (Etat = 4.2) , ce qui implique que la décision:

Etat =3 : le défaut dans l'onduleur DO-F (court-circuit des interrupteurs)

- pour la figure (19)et (20)), la règle (6) lorsque $I_a =2A$ et $V_m=50$ rad/s ou la règle (7) si $I_a = 3A$ et et $V_m=30$ rad/s. Selon la valeur de la sortie

Etat 4 : ce qui implique que le stator est endommagé DS.

- pour la figure (21), c'est la règle (1) $I_a = 2.3$ A $V_m=150$ rad/s Selon la valeur de la sortie (Etat = 5.22), ce qui implique que la décision:

Etat 5 : le rotor dans ce cas est sérieusement endommagé DR.

- pour la figure (22), c'est la règle (1) $I_a = 4$ A $V_m=150$ rad/s Selon la valeur de la sortie (Etat = 6.2), ce qui implique que la décision:

Etat 6 : le défaut dans ce cas défaut mécanique DM.

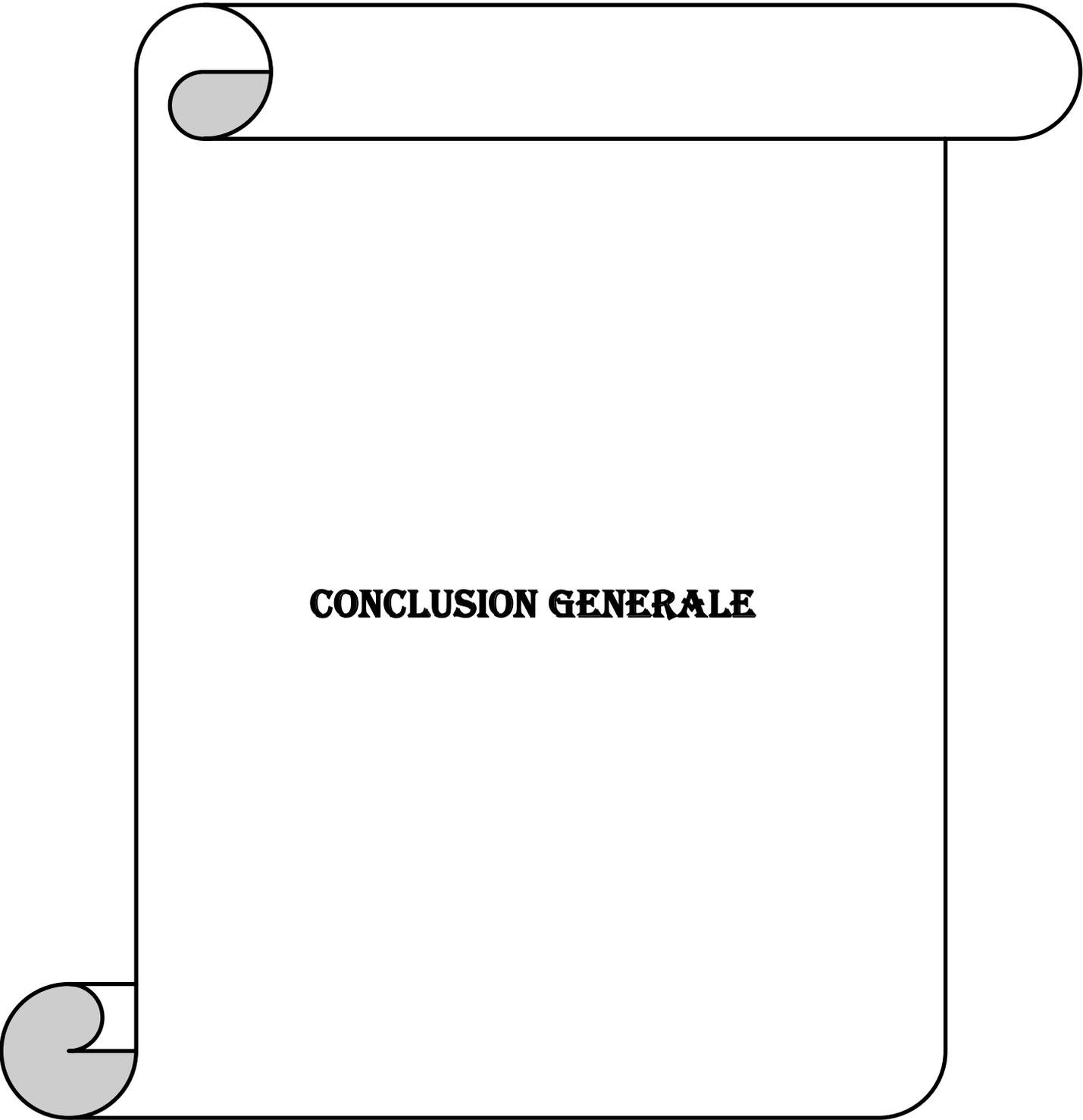
D'après ces information, On peut relève le tableau suivant :

Vm(rad/s)	Ia(A)	sortie	Décision (état)	Type de défaut
157	2	1.19	1	cas sain
18	4	2.21	2	ouverture des interrupteurs
18	20	4.2	3	court circuit dans les interrupteurs
50	2	4	4	défaut statorique
30	3	4	4	
150	2.3	5.22	5	défaut rotorique
150	4	6.2	6	défaut mécanique

Tableau (IV. 3) la décision par logique floue des défaillances de l'association onduleur –machine

IV.7 Conclusion

Dans ce chapitre 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 GENERALE

CONCLUSION GENERALE

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.

Des méthodes de diagnostic des défauts permettent une classification de ces défauts en deux grandes familles : les méthodes dites internes et les méthodes dites externes. 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 performance 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
- [9] Zhou KZ and Wang D, "Relationship between space vector modulation and three-phase carrier based PWM: A comprehensive analysis", IEEE Transact, Indus, Elect, 2002.
- [10] Li L. Czarkowski D, Liu Y. Pillay P. "Multilevel space vector PWM technique based on phase-shifted harmonic suppression", in Conf. Rec. IEEE APEC.
- [11] 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.
- [12] 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.

[13] J.P.Plateau, "Sur la conception d'un redresseur triphasé à modulation de largeur d'impulsion à faible pollution harmonique", Mémoire CNAM, Paris 1994.

[16] Jean-Paul Louis, "Modélisation des machines électriques en vue de leur commande"

[17] L .BAGHLI, "modélisation et commande de la machine asynchrone ",2005

Chapitre II

[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, patrie II: Méthodes dédiées à la détection des cassures de barres dans les moteurs asynchrones triphasés à cage", Courier du savoir N°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 Abbes - 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] DilekDü ,stegör. 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 soccurring 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.

[15] Bonn, «Cause and Analysis of Stator and Rotor Failures in Three-Phase Squirrel-Cage Induction Motors,» IEEE Transactions on Industry Applications, pp. Vol. 28, n°4, pp. 921-937, 92.

[16]Haylock, «Operation of fault tolerant machines with winding failures,» IEEE Transactions on Energy Conversion, pp. Vol. 14, n°4, pp. 1490-1495, 99. 22 Diagnostic et identification des défauts de la machine asynchrone

Chapitre I

[17] Welchko, «IPM Synchronous Machine Drive Response to Symmetrical and Asymmetrical Short Circuit Faults,» IEEE Transactions on Energy Conversion, pp. Vol. 18, n°2, pp. 291-298, 03.

[18] Ondel, Diagnostic par reconnaissance des formes : application à un ensemble convertisseur machine asynchrone, Lyon, 06.

[19] Birolleau.D, Etude d'actionneurs électriques pour La toléranceaux fautes, Grenoble,Institut polytechnique de Grenoble,08.

Chapitre III

- [1] T.Deflandreet P.Mauras 'Les Harmoniques sur les réseaux électriques Edition EYROLLES' 1998.
- [2] A.Ressad 'Problème et impacts des harmoniques sur les réseaux d'énergie électriqueSonelgazConférencesurlesperturbationsharmoniques'.Avril2000
- [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 Asynchrones 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.

Chapitre 4

- [1] : 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

Sujet

Diagnostic des défauts dans une association onduleur-machine asynchrone triphasée

ملخص

يفضل بساطتها في التحكم والقوة وانخفاض التكلفة، تستخدم الآلة غير المتزامنة على نطاق واسع في مجال أنظمة الدافع الكهربائي، ولهذا الغرض تم تطوير أنظمة مراقبة ورصد وتشخيص للسيطرة على هذه الآلة. وقد تطورت الدراسات في هذا المجال في السنوات الأخيرة، ولكن على الرغم من كل هذه التطورات لا يوجد نظام محصن ضد الفشل. ولذلك، من المهم بدلاً من ذلك الكشف عن مختلف العيوب التي قد تظهر في هذه الآلة، بغية إيجاد السبل التي تمكننا من رصد تشغيلها واتخاذ إجراءات وقائية لتفادي حدوث كسور متكرر. وتحقيقاً لهذه الغاية، نعرض في هذا الموجز نتائج محاكاة تشخيص أخطاء الآلة غير المتزامنة المتصلة بعاكس الجهد (الموج) باستخدام تقنية المنطق الغامض، حيث نقدم وصفا مفصلاً للأخطاء المختلفة التي يقوم بها المحرك مع عاكس الجهد، باستخدام طريقة بسيطة لاستخراج الخصائص من أجل الكشف عن هذه الأخطاء وتشخيصها.

كلمات مفتاحية:

عاكس الجهد، آلة لا تزامنية، تشخيص، اعطال، المنطق الغامض، الكشف، القرارات.

Résumé

Grâce à sa simplicité de commande, sa robustesse et le faible coût, la machine asynchrone est largement utilisée dans le domaine des systèmes d'entraînement électriques, à cet effet des systèmes de commande, surveillance et diagnostic ont été développés afin de contrôler cette machine. Des études ont évolué dans ce domaine dans ces dernières années, mais malgré tous ces développements il n'y a pas de système à l'abri de l'échec. Donc il est important de détecter plutôt les différents défauts qui peuvent apparaître dans cette machine, afin de trouver des moyens pour nous permettre de surveiller son fonctionnement et l'action préventive pour éviter des pannes fréquentes. À cette fin, dans ce mémoire nous présentons les résultats de simulation du diagnostic de défaillances de la machine asynchrone liée à un onduleur de tension en utilisant technique de la logique floue, où nous fournissons une description détaillée des différents défauts que le moteur et l'onduleur de tension, en utilisant une méthode simple d'extraction des propriétés afin de détecter et de diagnostiquer ces défauts.

Mots clés:

Onduleur de tension, Moteur asynchrone, Diagnostic, Défauts, Logique floue, détection, décisions.

Abstract

Thanks to its simplicity of control, robustness and low cost, the asynchronous machine is widely used in the field of electrical drive systems, for this purpose control, monitoring and diagnostic systems have been developed to control this machine. Studies have evolved in this area in recent years, but despite all these developments there is no system immune to failure. Therefore it is important to detect instead the various defects that may appear in this machine, in order to find ways to allow us to monitor its operation and preventive action to avoid frequent breakdowns. To this end, in this brief we present the results of simulation of asynchronous machine fault diagnosis related to a voltage inverter using fuzzy logic technique, where we provide a detailed description of the various faults that the motor and voltage inverter, using a simple method of extracting properties in order to detect and diagnose these faults.

Keywords:

Voltage inverter, Asynchronous motor, Diagnostic, Faults, Fuzzy logic, detection, decisions.