

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



Université KASDI Merbah Ouargla
Faculté Des sciences appliquées
Département de Génie mécanique



Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de master en génie mécanique

OPTION

Master en maintenance industrielle

PAR

Bouchareb Khaled & Chelghoum Abdelmouiz

THEME

Etude, modélisation et simulation d'une Machine asynchrone

Soutenu le : 20 / 09 / 2020

Devant le jury :

<u>Président :</u>	ROUAGDIA Karim	MCB	<i>U. Ouargla</i>
<u>Rapporteur :</u>	KOURAS Sid Ali	MAA	<i>U. Ouargla</i>
<u>Examineurs :</u>	KHETABI Rim	MAA	<i>UKM. Ouargla</i>
			<i>U. Ouargla</i>

Remerciements

Notre premier remerciement va à Allah Soubhanou watahala.

*Nous tenions à remercier vivement notre encadreur, Monsieur
< KOURAS Sid-Ali >, pour sa gentillesse, sa
disponibilité et sa contribution générale à L'élaboration
de ce travail.*

*Nous souhaiterions également remercier nos enseignants de la
faculté des sciences appliquées*

*Et toutes les équipes de la faculté des hydrocarbures et sciences
appliquées.*

*Enfin, nous adressons nos plus sincères remerciements à tous
nos proches et amis qui nous ont toujours soutenu et encouragé
pour la réalisation de ce mémoire.*

Dédicace

Je dédie ce modeste travail

A mes très chers parents

Je trouve ici l'occasion de leur exprimer ma gratitude la plus

sincère

A mes frères

A ma sœur

A mon encadreur

A l'ensemble des enseignants

A tous mes collègues et amis

A tous ceux qui me sont chers

Abdelmouix

Dédicace

Je dédie ce modeste travail

A mes très chers parents

Je trouve ici l'occasion de leur exprimer ma gratitude la plus

sincère

A mes frères

A mes sœurs

A mon encadreur

A l'ensemble des enseignants

A tous mes collègues et amis

A tous ceux qui me sont chers

Khaled

Abstract

The present work presents a developed analytical model for fault detection and diagnosis of the asynchronous machine. An asynchronous machine is well-considered by its qualities and robustness. However, it requires very little maintenance to avoid dysfunction, heavy and expensive maintenances. The proposed model based on the detection instantaneous by using an analytical method called the technique of "spectral analysis by ensuring the prevention of expensive and heavy maintenance, including the ability to detect and monitor the mechanical and the electrical problems in asynchronous machine, fault detection at rotor's level, as the bar break or ring segment crack of the squirrel cage.

Key words:

- Induction machine.
- Diagnosis.
- Modified winding function.
- Static eccentricity.
- Space harmonics.
- Spectral analysis.

Résumé

Le présent travail présente un modèle analytique développé pour la détection des défauts et le diagnostic de la machine asynchrone. Une machine asynchrone est bien considérée par ses qualités et sa robustesse. Cependant, il nécessite très peu d'entretien pour éviter les dysfonctionnements, les maintenances lourdes et coûteuses. Le modèle proposé repose sur la détection instantanée en utilisant une méthode analytique appelée la technique de « l'analyse spectrale en assurant la prévention des maintenances coûteuses et lourdes, y compris la capacité à détecter et surveiller les problèmes mécaniques et électriques en machine asynchrone, détection de défaut à niveau du rotor, comme la rupture de la barre ou la fissure du segment d'anneau de la cage d'écureuil.

Mots clés :

- Machine asynchrone.
- Diagnostic.
- Fonction d'enroulement modifiée (MWF).
- Excentricité statique.
- Harmoniques d'espaces.
- Analyse spectrale.

Table des matières

Remerciement	
Dédicaces	
Abstract	
Résumé	
Table des matières	
Notation et Symboles	
Listes des Figures	
Listes des tableaux	
Introduction Générale.....	1
<u>Chapitre I : généralité sur les machines asynchrones</u>	
<i>I.1</i> Introduction.....	3
<i>I.2</i> Constitution de la machine asynchrone.....	3
<i>I.2.1</i> Le stator.....	4
<i>I.2.2</i> Le rotor à cage.....	4
<i>I.2.3</i> Organes mécaniques.....	5
<i>I.3</i> Principe de fonctionnement de la machine asynchrone.....	6
<i>I.4</i> Modèle de la machine asynchrone.....	7
<i>I.4.1</i> Transformation triphasée / diphasée.....	7
<i>I.4.2</i> Transformation de Park.....	9
<i>I.4.3</i> Choix du référentiel.....	10
<i>I.5</i> Les défaillances dans la machine asynchrone	11
<i>I.5.1</i> Défauts internes et externes	11
<i>I.5.2</i> Défaillance d'ordre mécanique	14
<i>I.5.2.1</i> Défaillances du flasque	15
<i>I.5.2.2</i> Défaillances de l'arbre	15

I.5.2.3 Défaillances des roulements mécaniques.....	15
I.5.2.4 Autres défaillances mécaniques.....	17
I.5.3 Défaillances d'autres origines.....	17
I.5.3.1 Défaut de la charge.....	17
I.5.4 Défaillances au stator.....	18
I.5.4.1 Défauts d'isolant dans un enroulement	18
I.5.4.2 Un court-circuit entre spires de la même phase.....	19
I.5.4.3. Un court-circuit entre phases.....	19
I.5.4.4 Défaillances de circuit magnétique.....	20
I.5.5 Défaillances au rotor.....	20
I.5.5.1 Excentricité.....	21
I.5.5.2 Rupture de barres et d'anneau de court-circuit.....	22
I.5.6 Les défauts au niveau de l'onduleur [WAL-06].....	23
I.5.6.1 Les schémas des défauts au niveau de l'onduleur.....	24
I.5.7 Conclusion.....	24

Chapitre II: Observation et diagnostic de la machine asynchrone

II.1 Introduction.....	25
II.2 Diagnostic de la machine asynchrone.....	25
II.2.1 Approche modèle.....	25
II.2.2 Le diagnostic à l'aide d'observateur.....	26
II.3 Détection et localisation de défaut.....	26
II.3.1 Détection de défaut.....	26
II.3.2 Localisation de défaut.....	27
II.4 Comparaison entre résidu en boucle fermée et en boucle ouverte.....	28
II.5 types des Observateurs.....	28
II.5.1 Observateurs déterministes.....	28

II .5.2 Observateurs stochastiques.....	29
II .5.3 Observateurs linéaires.....	29
II .5.4 Observateurs non linéaires.....	29
II .6 Observateur adaptatif.....	29
II .6.1 Modèle de la MAS dans le repère (α, β).....	30
II .6.2 Observateur de Luenberger.....	31
II .6.3 Détermination de la matrice de gain K.....	31
II .6.4 Observateur de Luenberger basé sur le mécanisme d'adaptation de la vitesse.....	33
II .7 Caractéristiques souhaitables d'un système de diagnostic.....	35
II .7.1 Rapidité et sensibilité de détection.....	35
II .7.2 Robustesse.....	35
II .7.3 Identification de nouveaux défauts.....	35
II .7.4 La localisation.....	36
II .7.5 Adaptabilité.....	36
II .7.6 Identification des défauts multiple.....	36
II .7.7 Estimation d'erreur de classification.....	37
II .7.8 Facilité d'explication.....	37
II .8 Transformation des mesures dans un système de diagnostic.....	37
II .9 Classification des méthodes de diagnostic.....	39
II .9.1 Approche à base de modèle qualitatif.....	39
II .9.2 Approche à base de modèle quantitatif.....	39
II .9.3 Approche à base d'extraction de caractéristiques qualitatives.....	39
II .9.4 Approche à base d'extraction de caractéristiques quantitatives.....	40
II .9.4.1 La méthode statistique.....	40
II .9.4.2 Les méthodes non statistiques.....	40
II .10 Le modèle ' bon fonctionnement ' pour le contrôle et la surveillance.....	41

II .11 Conclusion.....42

Chapitre III: modélisation et simulation de la machine asynchrone

III.1 Objectifs et contexte du COVID19.....43

III.2 Introduction.....44

III.3 Définition du model.....45

III .4 Outils de simulation MATLAB/SIMULINK.....47

III.4.1. Matlab47

III.4.2. Simulink.....48

III.5 Modélisation numérique.....49

III .6 Présentation du modèle et aspects numériques.....50

III.7 Le moteur asynchrone.....52

III.7.1 Boîte de dialogue et paramètres.....54

III.7.2 Modèle prédéfini.....54

III.7.3 Entrée mécanique.....55

III.7.4 Limites.....56

III.8 Résultat des simulation.....57

III.9 CONCLUSION.....64

Conclusion générale.....65

Bibliographie

Notation et Symboles

Symbole	Nom	Unité
MAS	Machine Asynchrone.	.
MCC	Moteur a courant continue.	.
d, q, 0	Les indices de repère de Park.	.
a, b, c	Les indices de repère triphasé	.
R_s	Résistance statorique	Ω
R	Resistance d'une phase.	.
P	Puissance active	W
f	Fréquence d'alimentation	Hz
G	Glissement d'une machine asynchrone	.
p	Représente le nombre de paires de pôles	.
N_s	Vitesse de rotor	Tr/s
$V_{s\alpha,\beta}, V_{r\alpha,\beta}$	Tension statorique (respectivement rotorique) suivant l'axe α (ou β)	.
$V_{sd,q}, V_{rd,q}$	Tension statorique (respectivement rotorique) suivant l'axe d (ou q)	.
R_s, R_r	Résistance par phase statorique, respectivement rotorique	.
$i_{s\alpha,\beta}, i_{r\alpha,\beta}$	Courant statorique (respectivement rotorique) suivant l'axe α (ou β)	.
$i_{sd,q}, i_{rd,q}$	Courant statorique (respectivement rotorique) suivant l'axe d (ou q)	.
[C]	Matrice de Concordia (repère diphasé de Park fixe lié au stator)	.
C_{em}	Couple électromagnétique	N.m
[T]	Matrice de transformation de Park	.
T_s, T_r	Constante de temps électrique du stator, respectivement du rotor	.
$\varphi_{sd,q}, \varphi_{rd,q}$	Flux statorique (respectivement rotorique) suivant l'axe d (ou q)	.
$\varphi_{s\alpha,\beta}, \varphi_{r\alpha,\beta}$	Flux statorique (respectivement rotorique) suivant l'axe α (ou β)	.
σ	Coefficient de fuite total ($\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r}$)	.
C_r	Couple résistant imposé par la charge du moteur	.
f_t	Coefficient de frottement	.
f_s	Fréquence des courants statoriques $f_s = \frac{\omega_s}{2\pi}$.
f_r	Fréquence de rotation du rotor $f_r = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{(1-g)f_s}{p}$.
L_s	Inductance propre cyclique du stator	.
L_r	Inductance propre cyclique du rotor	.
L_m	Inductance mutuelle entre le stator et le rotor	.
J	Moment d'inertie	.
ω_s	Pulsation des courants statoriques	.
ω	Vitesse angulaire du rotor	.
ω_r	Pulsation des courants rotoriques $\omega_r = \frac{\omega_s}{p} - \omega$.
θ_s	Angle électrique entre le stator et l'axe d	.
θ_r	Angle électrique entre le rotor et l'axe d	.
C_f	Couple résistant de frottement.	.
C_e	couple électromagnétique du moteur.	.

Ω	Vitesse mécanique de rotation.	.
f_v	coefficient des frottements visqueux.	.
[P]	Matrice de passage direct de Park.	.
$[P]^{-1}$	Matrice de passage inversede Park.	.
[A]	Matrice fondamentale qui caractérise le système.	.
[X]	Vecteur d'état.	.
[U]	Entrée de la machine.	.
[Y]	Sortie de la machine.	.
L_f	l'inductance de fuite au stator.	.
n_{cck}	Nombre de spires en court-circuit sur la K^{eme} phase.	.
n_s	Nombre de spires sur une phase saine.	.
$i_{\alpha\beta cck}$	courant de court-circuit de la K^{eme} phase.	.
k_1	constante de MCC.	.
k_2	constante de MSA.	.
K_p	Constante de proportionnalité.	.
K_i	Constante d'intégration.	.
Ti	constante de temps d'intégration.	.
ε_y	Residé.	.
\acute{e}	L'erreur d'estimation.	.
v	fonction de Lyapunov.	.
λ	Une constante positive.	.
M	inductance mutuelle cyclique entre stator et rotor	.
S,r	Indice stator et rotor,respictivements.	.
X	Vecteur d`état d`un système	.
Y	Vecteur de sortie d`un système	.

Liste des figures

Chapitre I : généralité sur les machines asynchrones

Figure I.1 : Eléments de constitution d'une machine asynchrone.....	3
Figure I.2 : Vue schématique en perspective du stator.....	4
Figure I.3 : Vue schématique en perspective du rotor.....	5
Figure I.4 : <i>Photo d'une machine asynchrone 5,5 kW avec le stator et le rotor qui la constituent.....</i>	7
Figure I.5 : <i>Représentation schématique des enroulements de la machine dans le plan a, b, c.....</i>	8
Figure I.6 : Causes externes de défauts de la machine asynchrone triphasée à cage	12
Figure I.7 : Causes internes de défauts de la machine asynchrone triphasée à cage	13
Figure I.8 : Structure d'un roulement à billes	16
Figure I.9 : Types d'excentricité : (a) rotor concentré ; (b) excentricité statique ; (c) excentricité dynamique.....	22
Figure I.10: Schémas des défauts au niveau de l'onduleur.....	24

Chapitre II : Observation et diagnostic de la machine asynchrone

Figure II.1 : Principe de la méthode de diagnostic à l'aide d'observateur.....	26
Figure II.2 : Architecture d'un banc d'observateur.....	27
Figure II.3 : <i>Schéma de principe d'un observateur.....</i>	28
Figure II.4 : Principe de l'observateur adaptatif.....	30
Figure II.5 : Transformations de mesures dans un système de diagnostic.....	38
Figure II.6 : Les différentes méthodes de diagnostic.....	41

Chapitre III : modélisation et simulation de la machine asynchrone

Figure III.1 : Librairie Simulink.....	49
Figure III.2 Modèle Simulink d'un moteur asynchrone.....	49
Figure III.3 : Bloc de transformation triphasée-biphasé.....	50

Figure III.4 : Modèle final Simulink de notre moteur asynchrone.....	51
Figure III.5 : Le bloc Machine asynchrone implémente dans Simulink.....	52
Figure III.6 interconnexion d'arbre rigide dans un groupe électrogène.....	56
Figure III.7 : Différente alimentations du bloc Asynchrone Machine.....	56
Figure III.8 : Modèle Simulink du moteur asynchrone et scope.....	57
Figure III.9 : Résultats de la simulation du processus de démarrage du moteur asynchrone.....	60
Figure III.10 : Résultats de la simulation couple puissance du moteur asynchrone.....	60
Figure III.11 : Résultats de la simulation courant rotorique et statorique du moteur asynchrone.....	61
Figure III.12 La simulation power_asm_sat illustre l'effet de la saturation du bloc Asynchrone Machine.....	62
Figure III.13 : Résultats de la simulation de la vitesse en fonction du courant rotorique du moteur asynchrone.....	63

Liste des tableaux

Chapitre III : modélisation et simulation de la machine asynchrone

Tableau III.1 : liste des fonctionnalité Matlab Simulink.....	49
Tableau III.2 : Les paramètres du bloc Machine asynchrone.....	54

Introduction Générale

Introduction générale

Durant ces dernières années, le domaine de l'énergétique a connu un développement remarquable. Ceci étant le résultat de trois facteurs principaux qui ont à la fois vivement animé la recherche dans ce domaine et fortement incité à développer les performances. Le premier de ces facteurs est le besoin très vif en énergie. Le second facteur est lié à la recherche de nouvelles sources d'énergies plus respectueuses de l'environnement (énergie renouvelable). Quant au troisième facteur il est purement économique, à cause de l'intrusion récente et en force de produit électrique et électronique portable (téléphone, ordinateur, tablette, etc..) grand consommateur d'électricité et utilisant des batteries et autres dispositifs qui emmagasinent de l'énergie, il est impératif de chercher de nouvelles méthodes de production d'électricité ou de transformation de cette énergie, de régulation, et de stockage afin de parer aux pertes et satisfaire la demande mondiale.

Le moteur asynchrone ou moteur d'induction est actuellement le moteur électrique dont l'usage est le plus répandu dans l'industrie. Son principal avantage réside dans l'absence de contacts électriques glissants, ce qui conduit à une structure simple et robuste facile à construire. Le domaine de puissance va de quelques watts à plusieurs mégawatts. Relié directement au réseau industriel à tension et fréquence constantes, il tourne à vitesse variable peu différente de la vitesse synchrone ; c'est lui qui est utilisé pour la réalisation de la quasi-totalité des entraînements à vitesse constante. Le moteur asynchrone permet aussi la réalisation d'entraînements à vitesse variable et la place qu'il prend dans ce domaine ne cesse de croître.

Dans les pays industrialisés, plus de 60% de l'énergie électrique consommée est transformée en énergie mécanique par des entraînements utilisant les moteurs électriques.

Dans ce mémoire nous nous intéressons à l'intégration des structures d'électronique de puissance, les recherches se portent principalement sur l'amélioration des caractéristiques des composants actifs et passifs de puissance ainsi que sur l'environnement de ces derniers et la commande etc.

La simulation est un moyen efficace et économique, utilisé pour faire des études préliminaires et/ou comparatives, tant au stade du développement (conception), qu'au cours du fonctionnement normal des systèmes. Plusieurs outils (spécialisés ou non) de simulation sont utilisés dans le domaine de l'électronique de puissance ou de la commande des machines électriques : ATOSEC5, EMTP, SPICE, SIMNON, MATLAB, SIMULINK, etc. La difficulté de simulation du moteur asynchrone provient de sa structure fortement non-linéaire. Le modèle contient plusieurs blocs prédéterminés.

Ce mémoire s'articulera autour de trois grands axes :

Le premier chapitre est un travail de recherche bibliographique portant sur les machines asynchrone, aillant la réputation d'être robuste, des défaillances d'ordre électrique et ou mécanique sont remarquées. Nous avons présenté les équations du modèle ainsi que les caractéristiques des composants lors de l'évaluation de leurs performances.

Dans le deuxième chapitre nous avons étudié quelques méthodes et techniques de modélisation : méthodes analytiques, approximatives et les méthodes numériques. Nous avons ensuite présenté l'outil de simulation SIMULINK de MATLAB utilisé dans notre travail pour la résolution de systèmes d'équations non linéaires, en particulier le système d'équations tridimensionnel non linéaire tel que les équations d'électromagnétisme, représenté en sous-systèmes SIMULINK.

Le troisième chapitre présente la méthodologie de développement de notre modèle numérique afin d'étudier et de modéliser la variation de courant, de tension, de température etc., ainsi que les interfaces entre les différents composants. Les résultats de simulation seront présentés et interprétés dans ce chapitre.

Nous terminerons notre travail par une conclusion générale et les perspectives éventuelles à la continuation de notre travail de recherche.

**Chapitre I: Généralités sur les machines
asynchrones**

I.1 Introduction :

Le moteur asynchrone est la machine la plus utilisée dans le domaine des puissances supérieures à quelques kilowatts car il présente de nombreux avantages tels que sa puissance massique, sa robustesse, sa facilité de mise en œuvre, son faible coût, etc.... L'apparition dans les années 1980 des variateurs permettant de faire varier la fréquence de rotation dans une large gamme a grandement favorisé son développement. En effet, il entre dans la conception de nombreux procédés industriels associant des convertisseurs statiques et des machines électriques (traction électrique, laminoirs, levage, pompage, etc...).

Bien que la machine asynchrone ait la réputation d'être robuste, elle peut présenter comme toute autre machine électrique, des défaillances d'ordre électrique ou mécanique. Ainsi, en raison des conséquences importantes et coûteuses que peut engendrer l'apparition d'un défaut sur les processus industriels, le diagnostic des défauts fait l'objet d'un engouement prononcé depuis les deux dernières décennies.

I.2 Constitution de la machine asynchrone :

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. Le stator est fixe ; on y trouve les enroulements reliés à la source. Le rotor est monté sur un axe de rotation. Selon que les enroulements du rotor sont accessibles de l'extérieure ou sont fermés sur eux-mêmes en permanence, on définit deux types de rotor : bobiné ou à cage d'écureuil. Toutefois, nous admettrons que sa structure est électriquement équivalente à celle d'un rotor bobiné dont les enroulements sont en court-circuit. Dans ce travail, nous nous intéressant à la machine asynchrone.



Figure I.1 Eléments de constitution d'une machine asynchrone [01]

Les éléments de constitution d'une machine asynchrone à cage d'écureuil sont illustrés Dans la figure I.1.

I.2.1 Le stator :

Il est constitué d'un enroulement bobiné réparti dans les encoches du circuit magnétique. Ce circuit magnétique est constitué d'un empilage de tôles dans lesquelles sont découpées des encoches parallèles à l'axe de la machine (figure I.2). Le bobinage statorique peut se décomposer en deux parties : les conducteurs d'encoches et les têtes de bobines [02].

Les conducteurs d'encoches permettent de créer dans l'entrefer le champ magnétique à l'origine de la conversion électromagnétique. Les têtes de bobines permettent, quant à elles, la fermeture des courants en organisant la circulation judicieuse des courants d'un conducteur d'encoche à l'autre. L'objectif est d'obtenir à la surface de l'entrefer une distribution de courant la plus sinusoïdale possible, afin de limiter les ondulations du couple Électromagnétique.

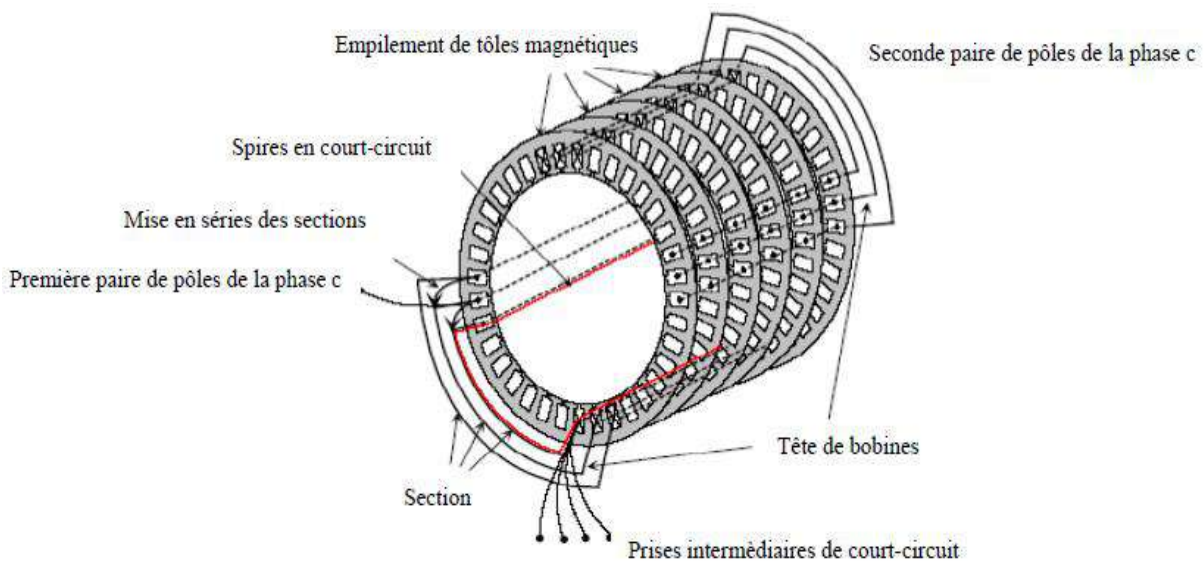


Figure I.2 Vue schématique en perspective du stator [03]

I.2.2 Le rotor à cage :

Dans le rotor à cage, les anneaux de court-circuit permettent la circulation des courants d'un conducteur d'encoche (barre rotoriques) à l'autre. Ces barres conductrices sont régulièrement réparties, et constituent le circuit du rotor (figure I.3). Cette cage est insérée à

l'intérieur d'un circuit magnétique constitué de disques en tôles empilés sur l'arbre de la machine analogue à celui du moteur à rotor bobiné.

Dans le cas de rotors à cage d'écureuil, les conducteurs sont réalisés par coulage d'un alliage d'aluminium, ou par des barres massives de cuivre préformées et frettés dans les tôles du rotor. Il n'y a généralement pas, ou très peu, d'isolation entre les barres rotoriques et les tôles magnétiques, mais leur résistance est suffisamment faible pour que les courants de fuite dans les tôles soient négligeables, sauf lorsqu'il y a une rupture de barre [04].

Le moteur à cage d'écureuil est beaucoup plus simple à construire que le moteur à rotor bobiné et, de ce fait, son prix de revient est inférieur. De plus, il dispose d'une plus grande robustesse. Il constitue la plus grande partie du parc de moteurs asynchrones actuellement en service.

Son inconvénient majeur est qu'il a, au démarrage, de mauvaises performances (courant élevé et faible couple). C'est pour remédier à cette situation qu'ont été développés deux autres types de cages (rotor à double cage et rotor à encoches profondes).

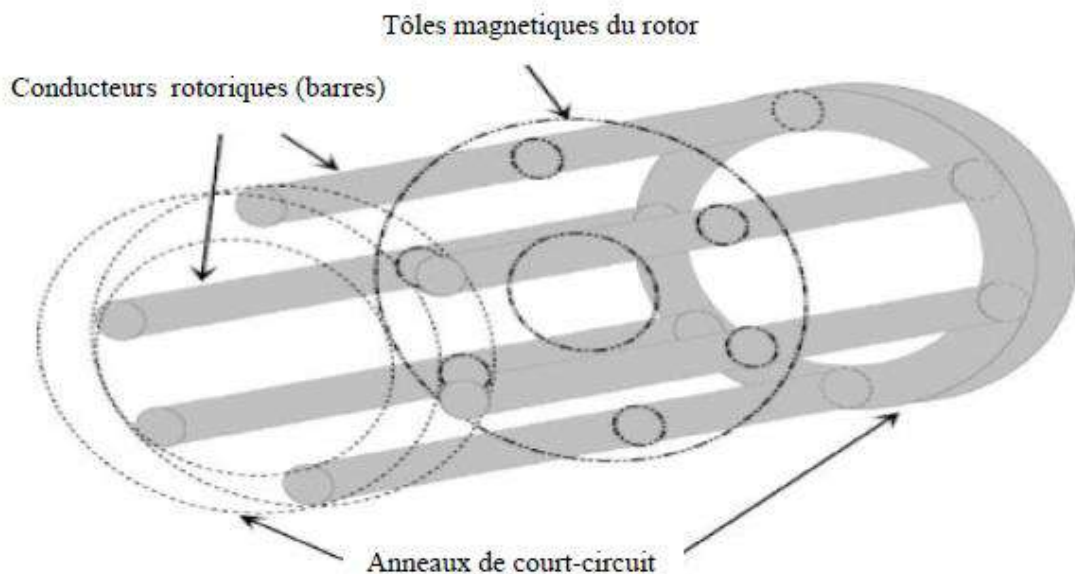


Figure I.3 Vue schématique en perspective du rotor [03]

I.2.3 Organes mécaniques :

La carcasse sert de support. Elle joue le rôle d'enveloppe et assure la protection contre l'environnement extérieur. L'arbre est un organe de transmission. Il comprend une partie centrale qui sert de support au corps du rotor et un bout d'arbre sur lequel est fixé un demi accouplement.

Il est, généralement, constitué en acier moulé ou forgé. Son dimensionnement est fonction des plusieurs efforts :

- Efforts de flexion (force centrifuge qui s'exerce sur lui, attraction magnétique radiale...etc.).
- Efforts radiaux et tangentiels dus aux forces centrifuges.
- Efforts de torsion (couple électromagnétique transmis en régime permanent et transitoire). Il est supporté par un ou plusieurs paliers. Ces paliers soutiennent le rotor et assurent la libre rotation. Le second palier est libre pour assurer les dilatations thermiques de l'arbre. Une isolation électrique de l'un des paliers assure l'élimination des courants dans l'arbre dus aux dissymétries des réluctances du circuit magnétique. Ils sont, généralement, à roulements pour les machines de petites et moyennes puissances [02].

Afin d'assurer la variation de vitesse des moteurs électriques mais aussi la conversion de l'énergie, de nombreuses machines se voient associer à un convertisseur. Ainsi, de nos jours, on trouve dans un grand nombre de procédés industriels, des associations entre des convertisseurs statiques et des machines électriques (pompage, levage...etc.). Cela permet de fournir aux moteurs des tensions et des courants de fréquence variable servant à commander la machine en couple ou en vitesse [02].

1.3 Principe de fonctionnement de la machine asynchrone :

Le principe de fonctionnement de la machine asynchrone est basé entièrement sur les lois de l'induction ; la machine asynchrone est considérée comme un transformateur à champ magnétique tournant dont le stator étant comparable à l'enroulement primaire et le rotor à l'enroulement secondaire en court-circuit.

Ce fonctionnement est reposé sur le principe de l'interaction électromagnétique du champ tournant, créé par le courant triphasé fourni à l'enroulement statorique par le réseau, et des courants induits dans l'enroulement rotorique lorsque les conducteurs de ce dernier sont coupés par le champ tournant.

Lorsque le rotor tourne à une vitesse N_s différente du synchronisme, l'application de la loi de FARADAY à un des roulements rotoriques montre que celui-ci devient le siège d'une force électromotrice qui étant court-circuité sur les enroulements va donner naissance à un courant dont l'intensité est limitée par l'impédance de ce dernier. L'interaction entre ce courant

et le champ glissant va donner naissance à des forces s'exerçant sur les brins du rotor dont le moment par rapport à l'axe de rotation constituera le couple de la machine. Lorsque le champ est sinusoïdal, sa vitesse de rotation est {05} :

$$N_s = \frac{f}{p} \text{ en tr/s} \quad \text{ou} \quad N_s = \frac{60f}{p} \text{ en tr/min} \quad (I.1)$$

Où f : est la fréquence d'alimentation.

P : représente le nombre de paires de pôles.

L'interaction électromagnétique des deux parties de la machine n'est possible que lorsque la vitesse du champ tournant (n_1) diffère de celle du rotor (n), c'est à dire lorsque $n \neq n_1$, car dans le cas contraire, c'est-à-dire lorsque $n = n_1$, le champ serait immobile par rapport au rotor et aucun courant ne serait induit dans l'enroulement rotorique.

$$\text{Le rapport } g = \frac{n_1 - n}{n_1} \text{ est appelé glissement de la machine asynchrone [05]} \quad (I.2)$$

I.4 Modèle de la machine asynchrone :

I.4.1 Transformation triphasée / diphasée :

Les photographies suivantes (figure I.4) présentent la machine asynchrone et ses deux principales composantes que sont le stator et le rotor.

La machine asynchrone est constituée de trois enroulements logés symétriquement dans l'encoche du stator et de la cage conductrice intégrée au rotor. Ce dernier est assimilable à trois enroulements identiques parfaitement symétriques et en court-circuit.

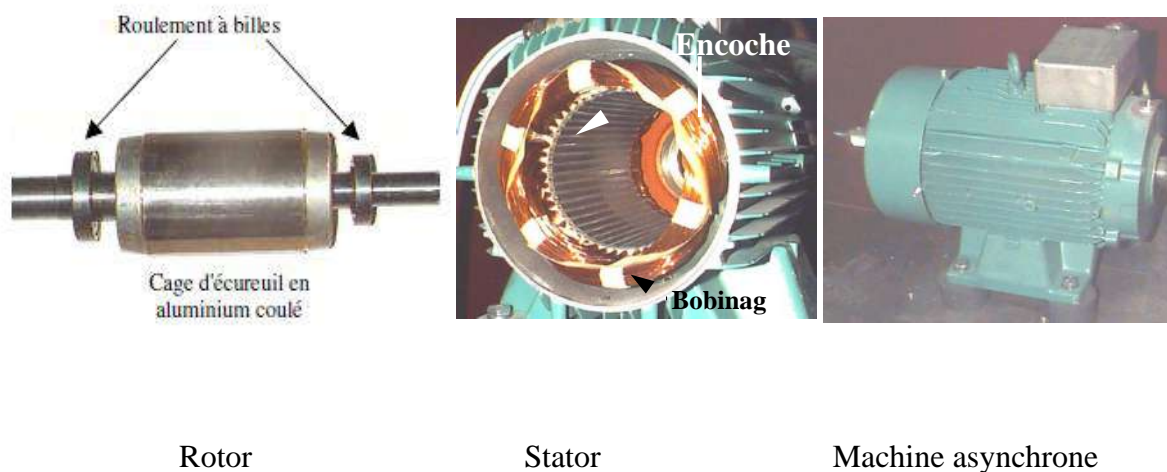


Figure I.4 Photo d'une machine asynchrone 5,5 kW avec le stator et le rotor qui la constituent

On schématise la disposition de ces enroulements (notés a, b, c) sur la figure I.5 dans un plan perpendiculaire à l'axe de rotation.

On modélise la machine asynchrone à cage, en fonctionnement sain, dans le repère a, b, c selon les équations (1. 1) en émettant les hypothèses simplificatrices suivantes :

- Le circuit magnétique est linéaire, non saturé, ce qui signifie que les flux sont des fonctions linéaires des courants.
- L'induction dans l'entrefer a une répartition spatiale sinusoïdale.
- La densité surfacique des courants dans les conducteurs est uniforme.

Les équations électriques au stator et au rotor sont alors données par :

$$[V_s] = R_s \cdot [I_s] + \frac{d[\phi_s]}{dt}$$

$$[V_s] = R_s \cdot [I_s] + \frac{d[\phi_s]}{dt} \quad (I. 3)$$

$$\text{Avec : } [I_{s,r}] = \begin{bmatrix} i_{s,ra} \\ i_{s,rb} \\ i_{s,rc} \end{bmatrix}, [V_{s,r}] = \begin{bmatrix} V_{s,ra} \\ V_{s,rb} \\ V_{s,rc} \end{bmatrix} \text{ et } [\phi_{s,r}] = \begin{bmatrix} \phi_{s,ra} \\ \phi_{s,rb} \\ \phi_{s,rc} \end{bmatrix}$$

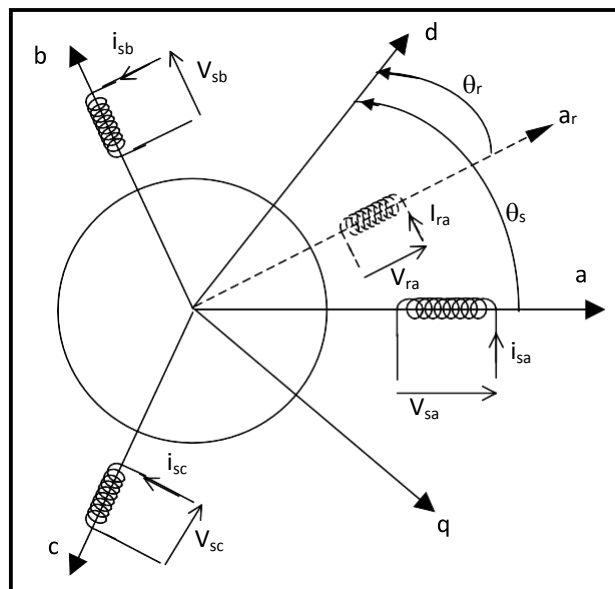


Figure I.5 Représentation schématique des enroulements de la machine dans le plan a, b, c.

I.4.2 Transformation de Park :

C'est la transformation des enroulements de phase a, b, c de la machine originelle en des enroulements disposés selon deux axes appelés d et q et équivalents du point de vue électrique et magnétique.

Une matrice unique de transformation est définie pour les courants, les tensions et les flux :

$$[T] = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} \cos \theta_s & \cos(\theta_s - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_s - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin \theta_s & -\sin(\theta_s - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_s - \frac{4\pi}{3}) \\ \sqrt{\frac{1}{2}} & \sqrt{\frac{1}{2}} & \sqrt{\frac{1}{2}} \end{bmatrix} \quad (I.4)$$

Ainsi :

$$[i_{s,r_{dq0}}] = [T] \cdot [i_{s,r_{abc}}]$$

$$[V_{s,r_{dq0}}] = [T] \cdot [V_{s,r_{abc}}]$$

$$[\varphi_{s,r_{dq0}}] = [T] \cdot [\varphi_{s,r_{abc}}] \quad (I.5)$$

θ_s Est l'angle électrique entre le stator et l'axe d. L'indice 0 désigne les composantes homopolaires (ces composantes sont égales à zéro dans le cas d'un système triphasé équilibré). Si θ_s est nul alors on obtient la matrice [C], appelée matrice de Concordia telle que :

$$[C] = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} \\ 0 & \sqrt{\frac{3}{2}} & -\sqrt{\frac{3}{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (I.6)$$

Dans ce cas les axes d et q sont appelés α et β .

Le coefficient $\sqrt{\frac{2}{3}}$ est lié au changement de base et la puissance est conservée lors de cette transformation.

I.4.3 Choix du référentiel :

Les équations de la machine peuvent être réécrites dans le repère d - q à condition de choisir le référentiel. Pour un référentiel immobile par rapport au stator, la convention utilisée est :

$$\frac{d\theta_s}{dt} = 0 \text{ et } \frac{d\theta_r}{dt} = \omega$$

Il vient :

$$\text{Au stator : } \begin{cases} V_{sd} = R_s \cdot i_{sd} + \frac{d\varphi_{sd}}{dt} \\ V_{sq} = R_s \cdot i_{sq} + \frac{d\varphi_{sq}}{dt} \end{cases} \quad (I.7)$$

$$\text{Au rotor : } \begin{cases} V_{rd} = 0 = R_r \cdot i_{rd} + \frac{d\varphi_{rd}}{dt} - \omega \cdot \varphi_{rq} \\ V_{rq} = 0 = R_r \cdot i_{rq} + \frac{d\varphi_{rq}}{dt} + \omega \cdot \varphi_{rd} \end{cases} \quad (I.8)$$

D'autres référentiels peuvent être choisis :

- Référentiel lié au rotor avec :

$$\frac{d\theta_s}{dt} = \omega \text{ et } \frac{d\theta_r}{dt} = 0$$

- Référentiel lié au champ tournant avec :

$$\frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s \text{ et } \frac{d\theta_r}{dt} = \omega_r$$

Les flux s'expriment en fonction des courants de la manière suivante :

$$\begin{bmatrix} \varphi_{sd} \\ \varphi_{rd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & L_m \\ L_m & L_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{rd} \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad \begin{bmatrix} \varphi_{sq} \\ \varphi_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & L_m \\ L_m & L_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{sq} \\ i_{rq} \end{bmatrix} \quad (I.9)$$

Le coefficient de fuite total et les constantes de temps statorique et rotorique sont définis respectivement par :

$$\sigma = 1 - \frac{L^2_m}{L_s \cdot L_r} \quad T_s = \frac{L_s}{R_s} \quad \text{et} \quad T_r = \frac{L_r}{R_r} \quad (I.10)$$

Pour tous les modèles de la machine décrits ci-dessus, l'expression du couple électromagnétique est donnée par l'équation (1.9) :

$$C_{em} = p \cdot (\varphi_{sd} \cdot i_{sq} - \varphi_{sq} \cdot i_{sd}) \quad (I. 11)$$

Où p est le nombre de paires de pôles.

L'évolution de la vitesse de rotation en fonction du couple électromagnétique et de la charge de la machine caractérisée par le couple résistant C_r , est décrite par l'expression suivante (relation fondamentale de la dynamique) :

$$C_{em} - C_r = J \cdot \frac{d\omega}{dt} + f_t \cdot \omega \quad (I. 12)$$

J et f_t sont respectivement le moment d'inertie et le coefficient de frottement visqueux de la Machine.

I.5 Les défaillances dans la machine asynchrone :

Nous rappelons brièvement les différents défauts de la machine asynchrone triphasée à cage ainsi que leurs origines sans pour autant prétendre à l'exhaustivité. Ces défauts apparaissent dans les différentes parties constituant la machine.

I.5.1 Défauts internes et externes :

Il existe deux types de défauts principaux : internes et externes. Nous pouvons ainsi remarquer que les défauts internes de la machine sont causés par les constituants de la machine (circuits magnétiques rotorique et statorique, bobinages statoriques, entrefer mécanique, cage rotorique...) alors que les défauts externes sont provoqués, soit par les tensions d'alimentation et la charge mécanique, soit par l'environnement de l'utilisation de la machine.

D'après les organigrammes des figure I.6 et figure I.7, les origines des défauts sont diverses ; nous citerons à titre indicatif des origines de type :

- Mécaniques: mauvaise fabrication, vibrations de la machine, force électromagnétiques déséquilibrées, force centrifuge, fluctuations de la charge.
- Electricques: dégradations d'isolement, décharges partielles, étincelles.
- Thermiques: pertes dans le cuivre, manque de refroidissement général ou localisé.

- Environnementales: humidité, ozone, poussière.

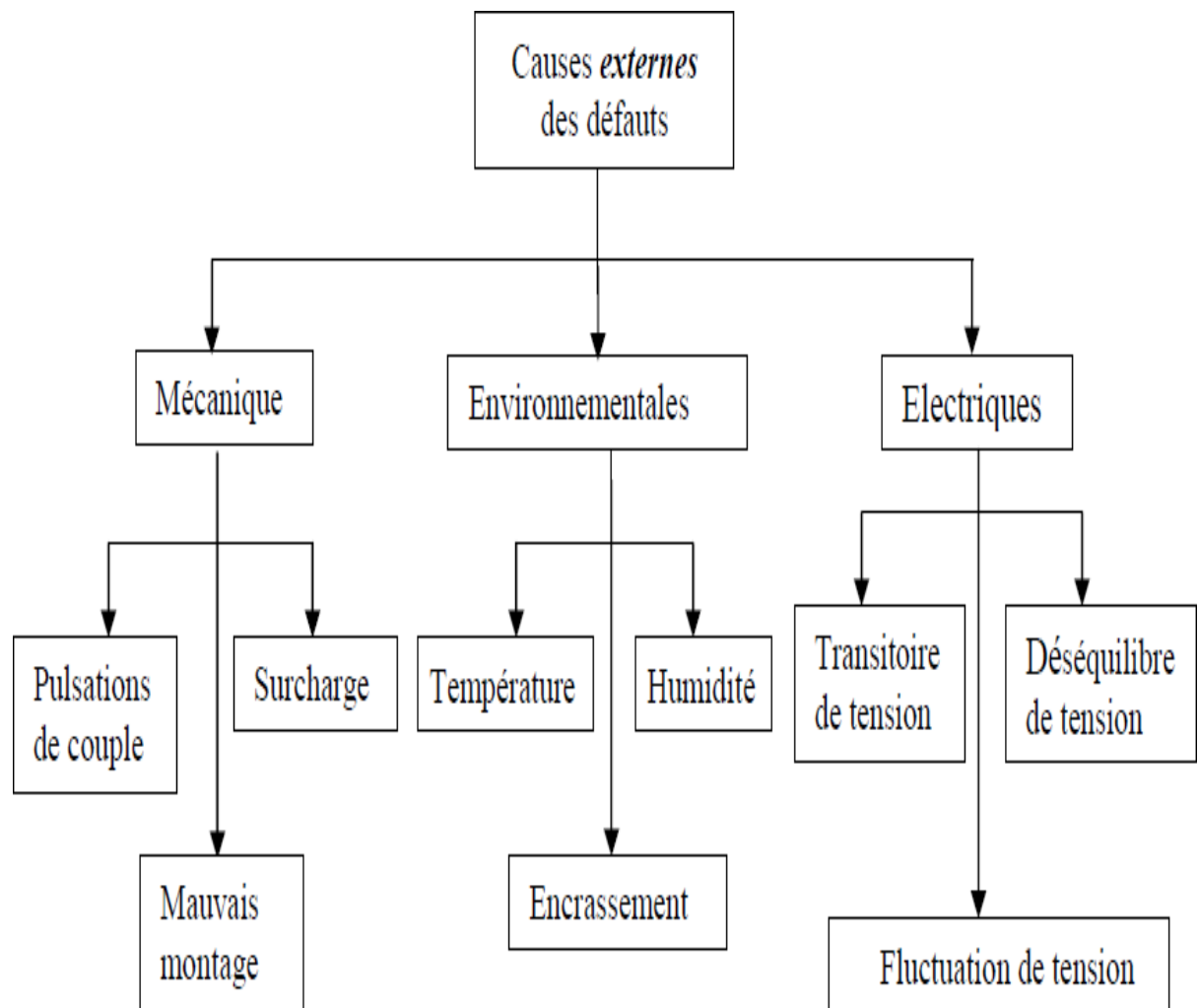


Figure I.6 Causes externes de défauts de la machine asynchrone triphasée à cage [06]

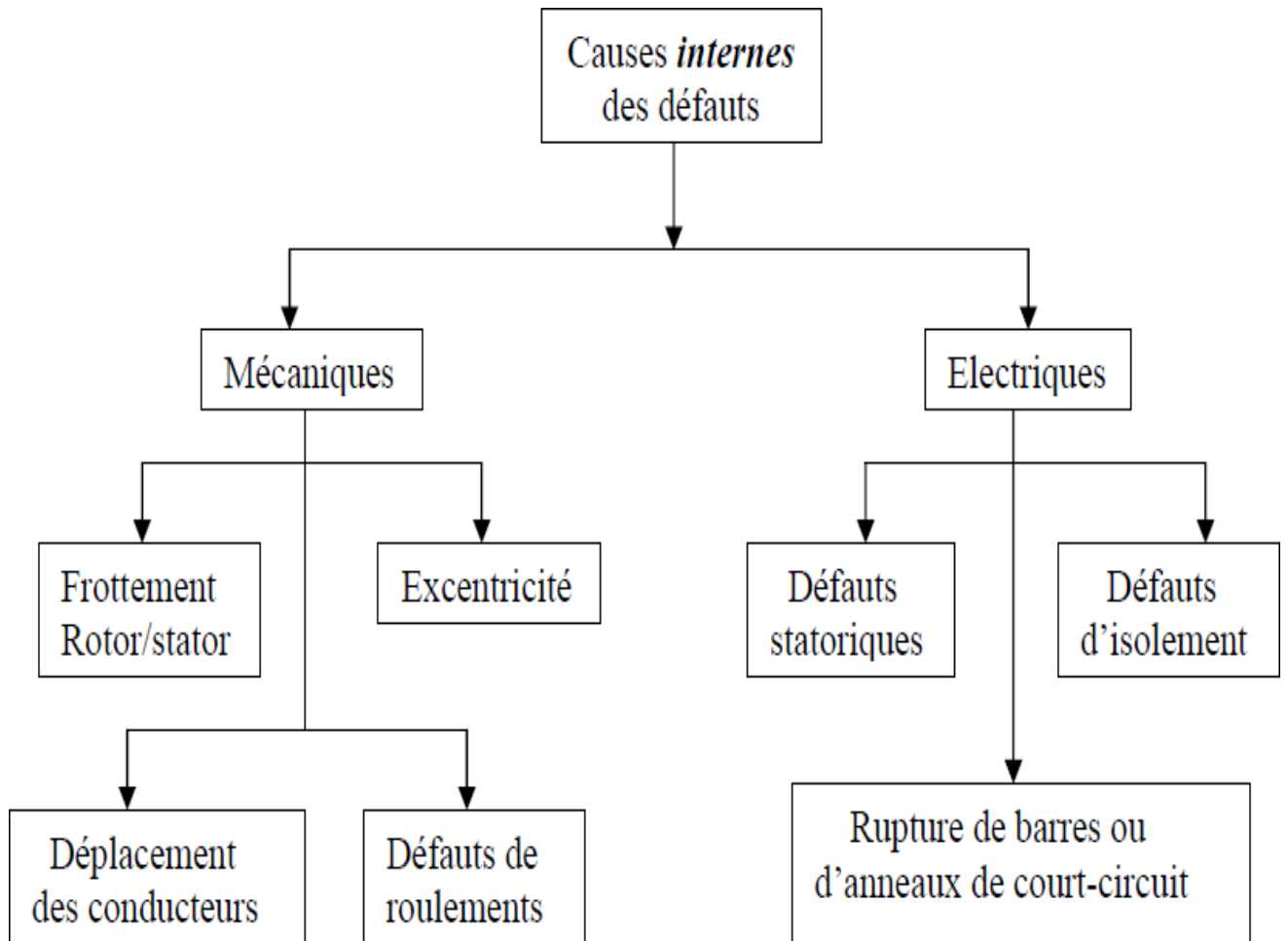


Figure I.7 Causes internes de défauts de la machine asynchrone triphasée à cage [06]

Réputée pour être robuste, la machine asynchrone n'est jamais à l'abri des défaillances, ces anomalies donnent lieu à un comportement anormal de la machine et peuvent à court ou à long terme provoquer son endommagement. Les défaillances peuvent être d'origines diverses, électriques, mécaniques ou bien encore magnétiques. Leurs causes sont multiples et peuvent être classées en trois groupes [07] :

- **Les générateurs de pannes ou initiateurs de défauts** : surchauffe du moteur, défaut électrique (court-circuit), survoltage d'alimentation, problème d'isolation électrique, usure des éléments mécaniques (roulements à billes), rupture de fixations,
- **Les amplificateurs de défauts** : tel que ; surcharge fréquente, vibrations mécaniques, environnement humide, échauffement permanent, mauvais graissage, vieillissement.
- **Les vices de fabrication et les erreurs humaines** : défauts de fabrication, défectuosité des composants, protections inadaptées, mauvais dimensionnement de la machine,

Dans ce contexte, plusieurs études statistiques ont été effectuées sur la fiabilité des machines électriques réalisées par différents groupes industriels, où les machines fonctionnant dans différentes applications et dans différentes branches de l'industrie, parmi ces études on peut citer sans être exhaustif : l'étude réalisée par la compagnie "General Electric", publiée dans EPRI (Electric Power Research Institute) [08], l'étude de Thorsen et Dalva [09] et Allianz [10].

A partir de ces travaux, il apparaît clairement que l'occurrence d'un type spécifique de défaut dépend principalement de l'application spécifique de la machine et de l'environnement de fonctionnement. Ainsi, la gamme de puissance des machines asynchrones joue un rôle très considérable, par exemple on trouve que le taux des pannes dues aux roulements est très élevé dans les machines de grande puissance (de 100 KW à 1 MW), par contre pour les machines de moyenne puissance (de 50 KW à 200 KW) les défauts statoriques et rotoriques sont les plus apparus.

D'autre part, Il est connu que l'occurrence d'un type quelconque de défauts dépend fortement de l'application typique de la machine. Par exemple, il a été constaté que ; dans des machines asynchrones à cage, les défauts de la cage rotorique sont plus élevés que les défauts d'enroulement statorique pour les applications où la machine est fréquemment arrêtée et remise en marche sous une charge importante (machines à outils et les industries minières) [11].

L'environnement semble donc jouer un rôle prépondérant dans le type de défauts et leurs fréquences. Ainsi, il a été établi que le taux de panne pour des moteurs utilisés en extérieur, où l'environnement est humide (aux usines terrestres et en mer par exemple), peut-être 2,5 fois plus grand que le taux d'échec pour des moteurs utilisés à l'intérieur.

I .5.2 Défaillance d'ordre mécanique :

Les défaillances d'ordre mécanique, en général, les plus souvent rencontrées parmi tous les défauts que compte la machine asynchrone. Ces défauts peuvent apparaître au niveau des roulements à billes, des flasques ou encore de l'arbre moteur. On énumèrera par la suite certains de ces défauts.

I .5.2.1 Défaillances du flasque :

Les défauts créés par les flasques de la machine asynchrone sont le plus généralement causés à l'étape de fabrication. En effet, un mauvais positionnement des flasques provoque un désalignement des roulements à billes, ce qui induit une excentricité au niveau de l'arbre de la machine. Il est possible de détecter ce type de défaillance par une analyse vibratoire ou une analyse harmonique des courants absorbés par la machine.

I .5.2.2 Défaillances de l'arbre :

L'arbre de la machine peut laisser apparaître une fissure due à l'utilisation d'un mauvais matériau lors de sa construction. A court ou long terme, cette fissure peut mener à une fracture nette de l'arbre provoquant ainsi un arrêt immédiat de la machine asynchrone. Les milieux corrosifs peuvent aussi affaiblir la robustesse de l'arbre de la machine. Une excentricité statique, dynamique ou mixte peut induire des efforts considérables sur l'arbre moteur, amenant ainsi à une fatigue supplémentaire. Une analyse fréquentielle des courants absorbés ou simplement une analyse visuelle de l'arbre de la machine permet de détecter ce type de défaillance [12].

I .5.2.3 Défaillances des roulements mécaniques :

Le roulement à billes est un organe de base dans la machine asynchrone qui joue le rôle d'interface mécanique entre le stator et le rotor. En plus, il représente l'élément de maintien de l'axe de la machine permettant de garantir une bonne rotation du rotor. La majorité des machines électriques utilisent les roulements à billes ou à rouleaux. Le roulement à billes est le plus utilisé dans le monde industriel parce qu'il a le meilleur rapport performance-prix [11].

Le roulement est composé des éléments suivants [11] :

- Deux bagues concentriques en acier, appelées bague intérieure et bague extérieure, comportant des chemins de roulement (surfaces sur lesquelles "roulent" les corps roulants).
- Des corps roulants, billes ou rouleaux généralement en acier, permettant le mouvement des deux bagues avec un frottement minimal.
- Une cage séparant et guidant les corps roulants (en polyamide, tôle acier, laiton ou résine).

La figure I.8 montre la construction typique d'un roulement à billes.

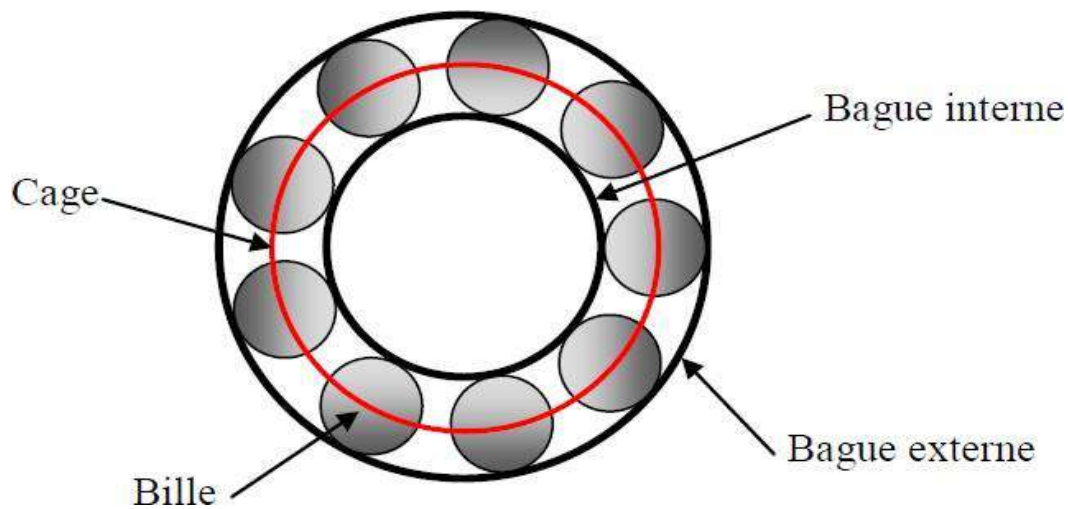


Figure I.8 Structure d'un roulement à billes [11]

Suivant l'emplacement géométrique du défaut dans le roulement, nous pouvons distinguer les types de défauts suivants [13] :

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

D'après des études statistiques [14], les défauts de roulement représentent à eux seuls entre 40% et 50% des défauts des machines asynchrones triphasées. Ils constituent donc les défauts les plus fréquents sur les machines asynchrones notamment les machines de fortes puissances. Les roulements peuvent être endommagés par les causes suivantes [11, 13, 15] :

- Contamination du roulement par des particules extérieures : poussière, grains de sable, etc.
- Corrosion engendrée par la pénétration d'eau, d'acides,
- Lubrification inadéquate qui peut causer un échauffement et l'usure du roulement.
- Mauvais alignement du rotor.
- Une température de fonctionnement élevée.
- Courant qui traverse le roulement et qui cause des arcs électriques.
- Installation inexacte du roulement ; en forçant incorrectement le roulement sur l'arbre du rotor ou dans les flasques (dû au désalignement), des entailles seront formées sur les chemins de roulement.

Sur le système, ce type de défaut se traduit par des oscillations du couple de charge, une apparition de pertes supplémentaires et un jeu entre la bague interne et la bague externe du roulement entraînant des vibrations par les déplacements du rotor autour de l'axe longitudinal de la machine. Dans le cas, le plus défavorable, la présence d'un roulement défectueux peut amener au blocage du moteur. Par conséquent, le traitement de ce type de défaut prend une place prépondérante et constitue une piste privilégiée dans le domaine de diagnostic des défauts de la machine asynchrone [16, 17].

I .5.2.4 Autres défaillances mécaniques :

Au stator, il n'y a pas de pièces mobiles donc à priori pas de défaillances mécaniques. Cependant, il peut apparaître des phénomènes d'oxydation liés à l'environnement de la machine et plus précisément au taux de salinité qui influe sur l'étanchéité et les contacteurs [02].

I .5.3 Défaillances d'autres origines :

I .5.3.1 Défaut de la charge :

Les travaux menés dans ce domaine ont surtout concerné l'influence de la dynamique de la charge sur la détection et le diagnostic d'autres défauts tels que la rupture d'une barre ou l'excentricité du rotor. Ces études ont montré que l'introduction de perturbations ou d'oscillations par la charge pouvait masquer l'apparition des défauts du moteur.

Pour maîtriser l'étude des défauts de la charge, une connaissance parfaite de cet élément s'avère nécessaire. Pour ce faire, on peut procéder tout d'abord à une classification des différents types de charge les plus rencontrés :

- Charge à couple constant : le couple n'est pas fonction de la vitesse (Ex : traction, convoyeur, tapis roulant...).
- Charge à couple variable : le couple varie en fonction de la vitesse (ex : pompe centrifuge, ventilateur...).
- Charge à puissance constante : tels que les broyeuses, les affûteuses, les bobineurs.....

La charge peut donc être le siège de mauvaises conditions de fonctionnement qui aboutissent à l'apparition de défauts tels que :

- Sur couples accidentels.
- À-coups de couple accidentels.

- Perturbations mécaniques dues aux vibrations et phénomènes de résonance mécanique liés à la construction de la machine ou introduites par l'environnement extérieur.

Tous ces défauts de la charge vont naturellement avoir une influence dégradante sur les grandeurs mécaniques mises en jeu au niveau de l'entraînement, à savoir le couple électromagnétique et la vitesse de rotation.

I .5.4 Défaillances au stator :

Les défaillances au stator représentent environ de 40 ÷ 60% des défauts des machines à induction [10]. La majeure partie de défauts statoriques est attribuée à la dégradation d'isolants. L'enroulement statorique d'une machine électrique est soumis à des efforts induits par une variété de facteurs, parmi les plus importants, une surcharge thermique, les vibrations mécaniques, les pics de tension provoqués par le réglage de fréquence, etc. Les causes les plus fréquentes des défauts d'enroulements statoriques sont [11], [15], [17] :

- Vieillesse naturelle des isolants. Tous les matériaux isolants ont une durée de vie limitée. Même dans une utilisation normale, l'isolant finit naturellement par se dégrader.
- Échauffement excessif du noyau et des enroulements du stator.
- Fissures dans la tôle, de fixation, et des jonctions.
- Mauvaise connexion des têtes des enroulements.
- Fonctionnement dans un environnement sévère, contamination provoquée par l'humidité et la saleté.
- Courant élevé dans l'enroulement dû à un court-circuit, un défaut du convertisseur, une surcharge.
- Décharges électriques.
- Tension de l'enroulement supérieure à la limite du matériau d'isolation.
- Fuites dans les systèmes de refroidissement.

Les défauts qui sont les plus récurrents, localisés au niveau du stator, peuvent être définis comme suit : défaut d'isolant, court-circuit entre spires, court-circuit entre phases, court-circuit entre phase et armature, déséquilibre d'alimentation, défaut de circuit magnétique.

I .5.4.1 Défauts d'isolant dans un enroulement :

La dégradation des isolants dans les enroulements peut provoquer des courts-circuits. En effet, les différentes pertes (Joule, fer, mécanique...) engendrent une augmentation de la température des différents constituants du moteur. Or, les matériaux d'isolation ont une limite mécanique, de température et de tension. Dans ce cas, un court-circuit peut apparaître dans l'enroulement concerné.

Lorsque le défaut de l'isolant se crée sur une spire, le courant de défaut circule entre le cuivre de cette spire et la tôle du stator (défaut phase - masse). Il peut aussi circuler entre deux spires d'une même phase si l'isolant qui les sépare est détérioré (défaut entre-spires). Dans le cas des bobinages à deux couches, une même encoche peut contenir des conducteurs de deux phases différentes. La détérioration simultanée et dans une même zone, des isolants de ces deux bobines provoque un contact électrique entre deux spires de deux phases différentes (défaut phase-phase). Ce type de défaut peut aussi exister dans les bobinages à une couche au niveau des têtes de bobines où les conducteurs de deux phases différentes peuvent entrer en contact. La topologie du circuit électrique est ainsi influencée par ces défauts [15], [17].

I.5.4.2 Un court-circuit entre spires de la même phase :

Le chauffage excessif provoqué par le court-circuit entre spires est la raison pour laquelle les moteurs tombent en panne presque toujours en quelques minutes, si ce n'est quelques secondes. Ainsi, chaque 10°C additionnel augmente la détérioration de l'enroulement deux fois plus rapidement que dans un fonctionnement à température normale [11]. Le défaut de court-circuit entre spires de la même phase est assez fréquent dans la machine asynchrone, ce défaut a pour origine un ou plusieurs défauts d'isolant dans l'enroulement concerné. Il entraîne une augmentation des courants statoriques dans la phase affectée, une légère variation de l'amplitude sur les autres phases, modifie aussi le facteur de puissance et amplifie les courants dans le circuit rotorique [18], [19]. Donc, la conséquence est une augmentation de la température au niveau du bobinage et, de ce fait, une dégradation accélérée des isolants, pouvant encourager l'apparition d'un 2ème court-circuit, alors un défaut en chaîne. Par contre, le couple électromagnétique moyen délivré par la machine reste sensiblement identique hormis une augmentation des oscillations de couple liées au déséquilibre des courants de phases engendré par le défaut [15].

I .5.4.3 Un court-circuit entre phases :

Ce défaut peut arriver en tout point du bobinage, mais les plus fréquents apparaissent dans les têtes de bobines, puisque c'est dans celles-ci que les conducteurs de phases différentes se

côtoient [15]. L'influence de ce type de défaut sur le fonctionnement de la machine dépend de la localisation du défaut (de la partie affectée). Si le court-circuit est proche de l'alimentation entre phases, il induit des courants très élevés qui conduisent à la fusion des conducteurs d'alimentation ce qui provoque un arrêt net de la machine [19]. Si le court-circuit est proche du neutre entre deux phases, il engendre un déséquilibre des courants de phases avec un risque moindre de fusion des conducteurs. L'apparition de ce type de défaut dans le cas des machines asynchrones, provoque une augmentation des courants dans les barres ainsi que dans les anneaux du rotor à cage.

I .5.4.4 Défaillances de circuit magnétique :

Les tôles du circuit magnétique sont feuilletées et isolées entre elles, cependant elles peuvent se retrouver court-circuitées. Les causes les plus fréquentes de défaut de circuit magnétique sont généralement liées à un défaut sévère d'excentricité statique et/ou dynamique qui peut conduire à un contact front entre le stator et le rotor ce qui détruit le circuit magnétique, ou bien court-circuit des conducteurs qui peut également provoquer un échauffement local intense dans les tôles, ainsi la projection des corps étrangers dans l'entrefer peut entraîner l'abrasion des tôles et ainsi les court-circuitées [20].

I .5.5 Défaillances au rotor :

Dans les machines asynchrones à cage, les défaillances qui peuvent atteindre le rotor sont considérées comme plus variées et plus complexes que celles affectant le stator. Ceci est particulièrement vérifié pour les machines de faibles et moyennes puissances. Plusieurs facteurs manifestent l'apparition des défaillances au niveau du rotor de la machine asynchrone, parmi eux, on cite [15] :

- Thermique (surcharge, ...).
- Electromagnétique (force en $B^2(t)$...).
- Dynamique (arbre de transmission, ...).

Les défauts qui sont les plus répétitifs, localisés au niveau du rotor sont : l'excentricité statique et dynamique, la rupture de barres rotoriques et la rupture d'une portion d'anneau de court-circuit.

I .5.5.1 Excentricité :

Les effets des défauts mécaniques se manifestent généralement au niveau de l'entrefer par des défauts d'excentricité. L'excentricité d'une machine électrique est un phénomène qui évolue dans le temps et qui existe dès sa fabrication. La présence d'un certain niveau d'excentricité est normale dans les machines électriques. Des fabricants et utilisateurs spécifient un niveau admissible maximum de 5%, tandis que dans d'autres cas, un niveau maximum de 10% de la largeur d'entrefer est toléré [21].

Par conception, l'entrefer d'une machine asynchrone est considérablement plus petit que dans d'autres types de machines ayant les mêmes grandeurs et performances, la machine asynchrone sera la plus sensible aux excentricités. En outre, Lors du fonctionnement de la machine, deux causes principales aggraveront l'excentricité [22] :

- La première est inhérente à la chaîne cinématique dans laquelle la machine intervient et qui peut imposer une force radiale sur l'arbre de cette machine, qui va engendrer une usure des roulements et une amplification du décentrement.
- Le deuxième phénomène risquant d'aggraver l'excentricité est quant à lui inhérent au fonctionnement de la machine, en effet, le décentrement génère un déséquilibre dans la distribution des efforts radiaux entre le stator et le rotor. L'effort radial est maximal à l'endroit où se situe l'épaisseur minimale de l'entrefer et va tendre à diminuer encore plus la valeur de l'entrefer minimum et augmenter par conséquent encore plus le déséquilibre des efforts radiaux. Le point extrême de l'excentricité est le frottement du stator sur le rotor, qui est synonyme de destruction rapide de la machine.

Trois catégories d'excentricité sont généralement distinguées, [23] :

- L'excentricité statique : généralement due à un désalignement de l'axe de rotation du rotor par rapport à l'axe du stator. Elle résulte d'un défaut de centrage des flasques et se manifeste même dans des machines fabriquées récemment en raison des méthodes de fabrication et d'assemblage [22] (voir figure I.7.b).
- L'excentricité dynamique : ce type d'excentricité est causé par une déformation du cylindre rotorique, une déformation du cylindre statorique ou la détérioration des roulements à billes. Elle correspond au décalage du centre de rotation du rotor par rapport au centre géométrique du stator, avec en plus, une rotation du centre du rotor autour du centre géométrique de ce stator [22] (voir figure I.7.c).

- (a) L'excentricité mixte : en réalité, les excentricités statiques et dynamiques ont tendance à co-exister, [24]. Un niveau inhérent d'excentricité statique existe toujours, même dans des machines de fabrication récentes. Cela provoque des efforts réguliers d'attraction magnétique non compensés dans une seule direction [25], et avec le temps cela peut conduire à la flexion d'un arbre et la dégradation de roulement ..., tout cela entamant une excentricité dynamique. Sans détection précoce, l'excentricité devient suffisamment grande pour développer des forces radiales déséquilibrées qui peuvent créer un frottement entre le stator et le rotor, ce qui mène à une panne très grave de la machine.

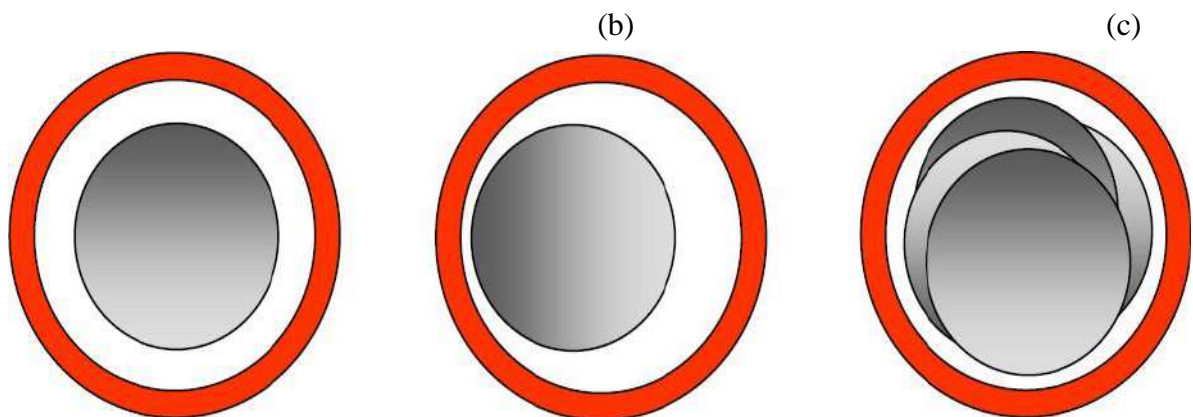


Figure I.9 Types d'excentricité : (a) rotor concentré ; (b) excentricité statique ; (c) excentricité dynamique

Ce défaut modifie les comportements magnétique et mécanique de la machine. En effet, l'augmentation de l'excentricité dans l'entrefer induit une augmentation des forces électromagnétiques qui agissent directement sur l'armature statorique ainsi que l'enroulement correspondant, ce qui engendre une dégradation de son isolation. D'autre part, cette augmentation peut avoir comme conséquence des frottements entre le stator et le rotor en raison des forces d'attraction magnétique qui déséquilibrent le système. Ceci donne naissance à des niveaux de vibration considérables dans les enroulements [15].

I .5.5.2 Rupture de barres et d'anneau de court-circuit :

Pour une machine asynchrone à cage d'écureuil, les défauts se résument à la rupture de barres ou à la rupture d'anneaux de court-circuit. La cassure ou rupture de barre est un des défauts les plus fréquents au rotor. Elle peut se situer soit au niveau de son encoche soit à l'extrémité qui la relie à l'anneau de court-circuit. Les ruptures de barres ou de portions d'anneau peuvent être dues, par exemple, à une surcharge mécanique (démarrages fréquents, etc.), à un échauffement local excessif ou encore à un défaut de fabrication (bulles d'air ou

mauvaises soudures) [18]. La détérioration des barres réduit la valeur moyenne du couple électromagnétique et augmente l'amplitude des oscillations, qui elles-mêmes provoquent des oscillations de la vitesse de rotation, ce qui engendre des vibrations mécaniques et donc, un fonctionnement anormal de la machine. La grande amplitude de ces oscillations accélère la détérioration de la machine [26], [27]. 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 [28].

La cassure de portion d'anneau est un défaut qui apparaît aussi fréquemment que la cassure de barres dans une machine asynchrone à cage. Ces cassures sont dues soit à des bulles de coulées ou aux dilatations différentielles entre les barres et les anneaux, d'autant que les portions d'anneaux de court-circuit véhiculent des courants plus importants que ceux des barres rotoriques. Il convient de mentionner, qu'un mauvais dimensionnement des anneaux, conduit à une détérioration des conditions de fonctionnement ou une surcharge de couple et, donc, à des courants pouvant entraîner leur cassure [15], [22].

La rupture d'une portion d'anneau déséquilibre la répartition des courants dans les barres rotoriques et de ce fait, engendre un effet de modulation d'amplitude sur les courants statoriques similaire à celui provoqué par la cassure de barres [26].

I .5.6 Les défauts au niveau de l'onduleur [29] :

On peut distinguer les défauts selon leurs origines en deux parties : au niveau de la machine (statorique comme les courts circuits ou rotorique les excentricités) et au niveau de l'onduleur, les interrupteurs de l'onduleur doivent supporter de grandes variations de température (cycles thermiques). Pour les transistors bipolaires type IGBTs , la disparité entre le coefficient de dilatation thermique et les coefficients du fil en aluminium et de la puce de silicone est la cause d'efforts de cisaillement sur les interfaces de liaison qui peuvent mener à la rupture du fil. Afin de prévoir la durée de vie d'un IGBT, le nombre de cycles thermiques qu'il supporte lors du fonctionnement doit être correctement déterminé. Indépendamment des commutateurs d'inverseur, le condensateur C'est une pièce importante de l'onduleur et devrait être pris en considération en estimant la fiabilité de l'onduleur. Afin d'améliorer la fiabilité de l'onduleur, les IGBTs et les diodes correspondantes ainsi que les commandes de porte (et les circuits additionnels de commande) peuvent être fusionnés dans un module unique de puissance. De tels modules de puissance sont souvent désignés sous le nom de modules

intelligents de puissance (IPMs). Les circuits additionnels de commande peuvent fournir des fonctions de protection contre la surchauffe, le court-circuit, ...etc.

I.5.6.1 Les schémas des défauts au niveau de l'onduleur :

On peut présenter les différents d'un onduleur par les schémas suivants :

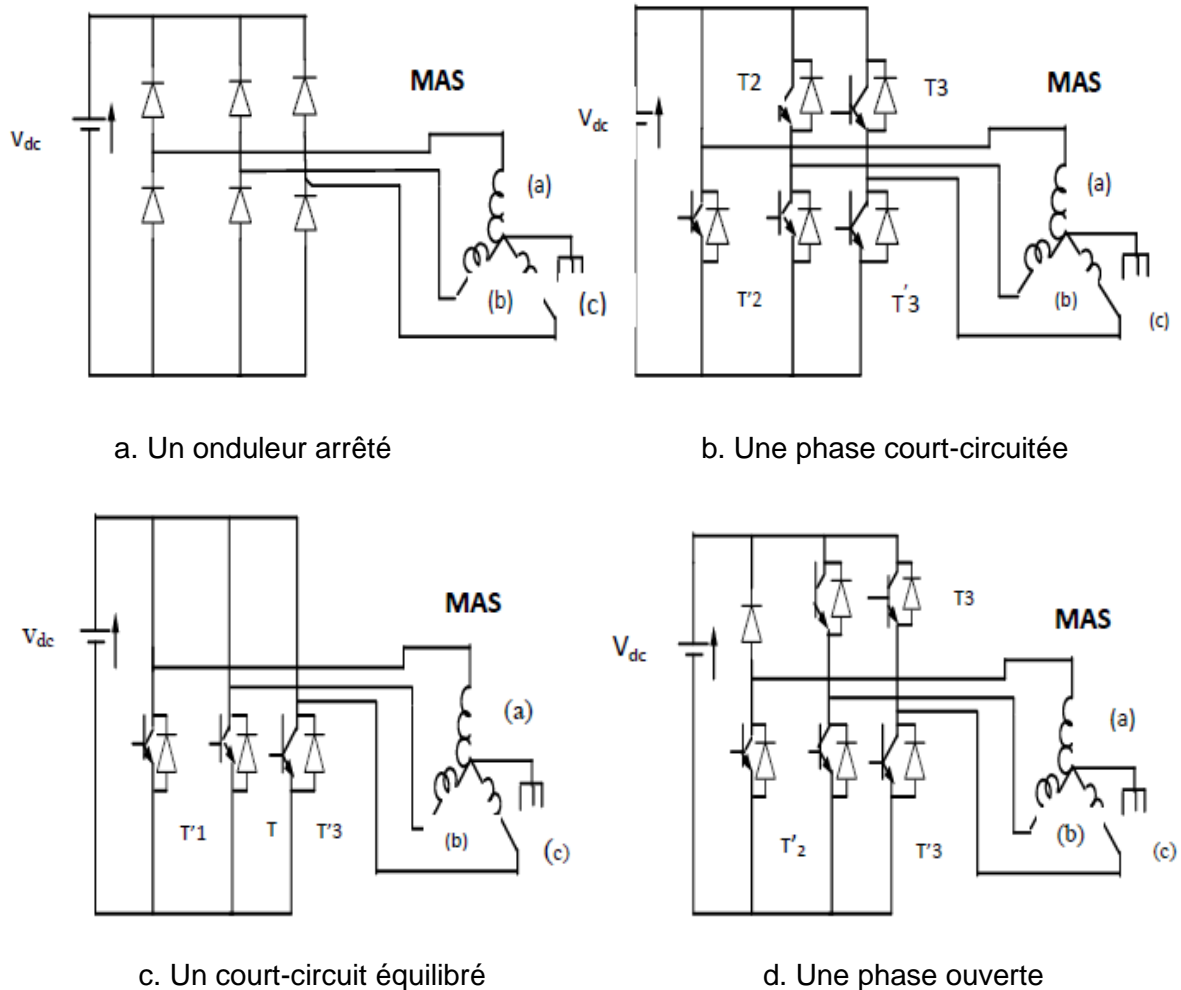


Figure I.10 Schémas des défauts au niveau de l'onduleur

I.5.7 Conclusion :

Ce premier chapitre est essentiellement consacré à l'état de l'art de la machine asynchrone et sur le diagnostic. Nous avons scindé ce chapitre en deux parties : la première concerne la constitution de la machine asynchrone; la deuxième partie traite les défaillances qui peuvent intervenir dans un ensemble électrique tournant.

Chapitre II : Observation et diagnostic de la machine asynchrone

II .1 Introduction :

Les différentes applications industrielles des variateurs asynchrones nécessitent des performances statiques et dynamiques élevées. Pour assurer le bon fonctionnement de la commande, il faut disposer d'une excellente information provenant de la machine à contrôler. Cette information exige entre autres des capteurs mécaniques qui sont des éléments coûteux et fragiles et qui demandent un traitement spécifique des signaux mesurés, dans ces conditions, la suppression de ces capteurs présente un intérêt certain, et dans le cas où certaines grandeurs internes de la machine ne sont ni accessibles ni mesurables directement, des observateurs sont développés pour reconstruire ces grandeurs afin d'estimer la vitesse par exemple, nous étudions dans ce chapitre un type d'observateur déterministe pour estimer les états de notre système ainsi que la vitesse, cet observateur est utilisé par la suite dans la commande sans capteur et le diagnostic des défauts de la machine asynchrone.

II .2 Diagnostic de la machine asynchrone :

Les différents défauts présentés précédemment provoquent généralement des couples pulsatoires, des fluctuations de vitesse, l'augmentation du bruit et des vibrations, le changement des résidus de courants, l'échauffement de la machine asynchrone et la variation des paramètres électriques, c'est pour cela que le diagnostic des machines asynchrones est souvent basé sur la surveillance de ces indicateurs [30].

Deux approches différentes peuvent être utilisées, le diagnostic basé sur des algorithmes d'observations (approche modèle) et celui basé sur le traitement des signaux mesurables.

Dans cette section nous donnerons un aperçu sur l'état de l'art du diagnostic de la MAS par l'utilisation des observateurs.

II.2.1 Approche du modèle :

Cette méthode est basée sur l'estimation des signaux non mesurables ou sur le suivi des paramètres durant le fonctionnement [30], elles supposent une connaissance approfondie du procédé sous forme de modèle numérique. Dans le cas de la machine asynchrone, une modélisation dans le référentiel triphasé ou biphasé équivalent est nécessaire. Des signaux ou des paramètres de ces modèles sont mesurés ou estimés pour avoir une signature de défauts. On teste la cohérence entre les mesures et les estimations par des grandeurs caractéristiques de l'état du procédé, appelées résidus, le vecteur des résidus nul en fonctionnement normal, est

comparé en ligne aux signatures de pannes. Selon ce mécanisme de diagnostic, on distingue [31] :

- Le diagnostic à l'aide d'observateurs [32].
- Le diagnostic par redondance analytique (espace de parité).
- Le diagnostic par estimation paramétrique [33].

II.2.2 Le diagnostic à l'aide d'observateur :

Le principe de cette méthode est d'utiliser les erreurs d'estimation sur les sorties comme résidus, l'objectif est de construire des résidus menant à la détection des défauts, dans certains cas l'utilisation de plusieurs observateurs peut être nécessaire pour garantir la localisation des défauts.

Figure :

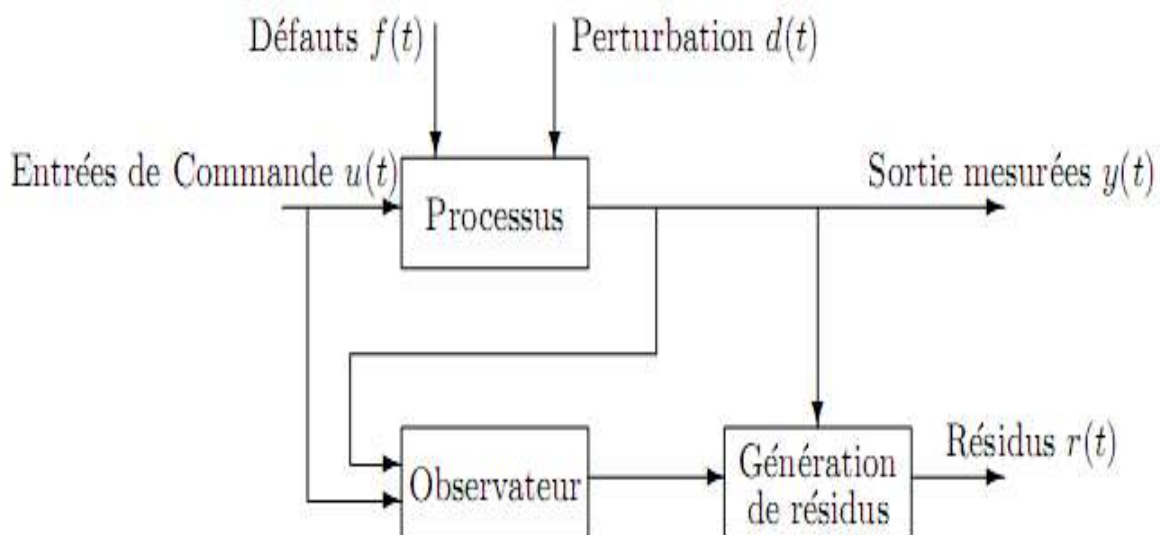


Figure II.1 Principe de la méthode de diagnostic à l'aide d'observateur

II .3 Détection et localisation de défaut :

II .3.1 Détection de défaut :

La détection de défaut est une opération qui consiste à déterminer l'apparition et l'instant d'occurrence d'un défaut. Cette fonction peut être obtenue en utilisant le résidu $r(t)$ généré en comparant le comportement du modèle du système à celui du système réel. Idéalement un résidu est nul lorsque le système est en fonctionnement normal. Dans les méthodes de diagnostic à

base d'observateurs, généralement, le résidu $r(t)$ est formé par la comparaison des sorties mesurées et estimé : $r(t)=y(t)-\hat{y}(t)$.

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

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

$r(t) < J_s$ pas de défaut détecté.

$r(t) > J_s$ présence de défaut.

II .3.2 Localisation de défaut :

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

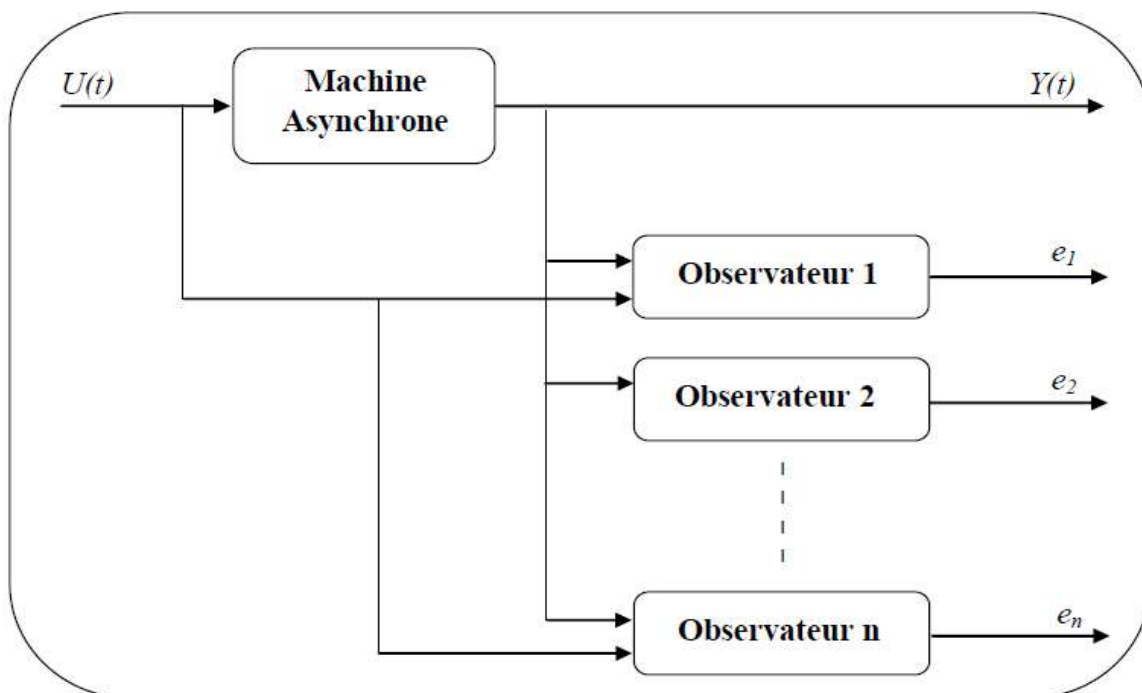


Figure II.2 Architecture d'un banc d'observateur.

II.4 Comparaison entre résidu en boucle fermée et en boucle ouverte :

Le but recherché est la mise en évidence de l'influence de la commande sur les résidus et donc l'influence de la commande sur la qualité du diagnostic, la démarche suivie consiste à comparer les résidus générés à partir du système en boucle ouverte avec les résidus du même système inséré dans une boucle de régulation.

II.5 types des Observateurs :

L'observateur est un système qui consiste à reconstituer les grandeurs non mesurables ou non accessibles du moteur asynchrone à partir des variables accessibles et mesurables du système. La figure suivante illustre le principe d'un observateur d'état.

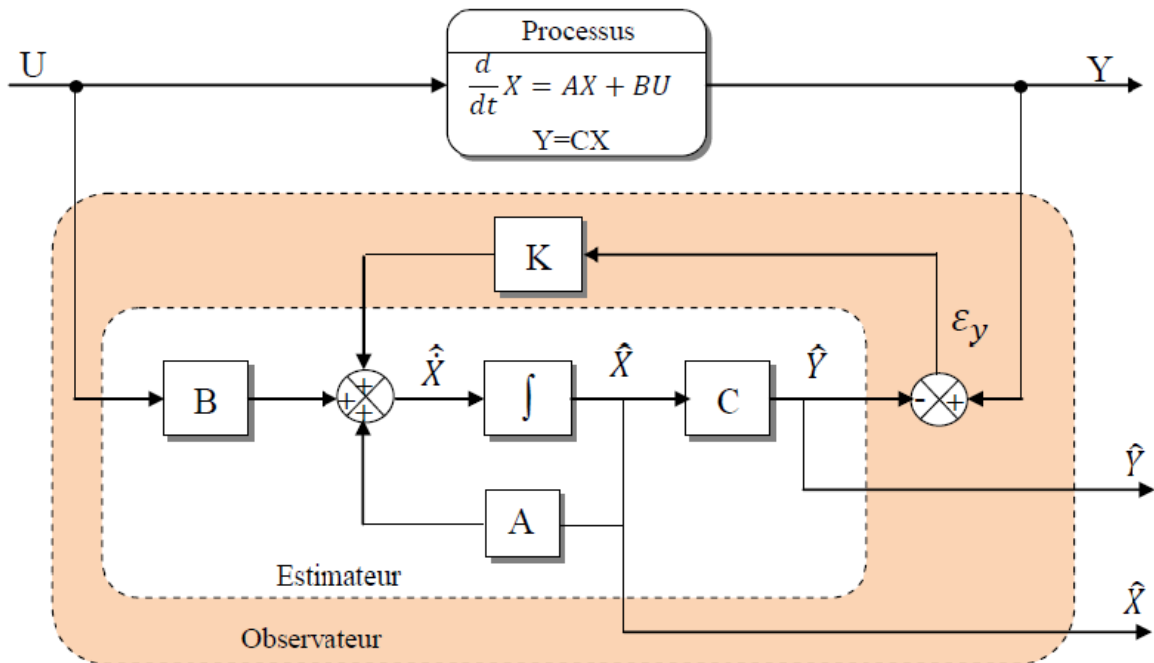


Figure II.3 Schéma de principe d'un observateur.

II.5.1 Observateurs déterministes :

Ce type d'observateur ne prend pas en compte les bruits de mesures et les fluctuations aléatoires des variables d'état. Dans cette famille, on trouve plusieurs observateurs comme celui de Kubota et l'observateur adaptatif.

II .5.2 Observateurs stochastiques :

Ces observateurs donnent une estimation optimale des états en se basant sur des critères stochastiques. Ils prennent en compte la présence du bruit d'état et de sortie dans le système. Dans cette famille on trouve par exemple le filtre de Kalman.

II .5.3 Observateurs linéaires :

Ce sont les observateurs dont la construction du gain est basée sur une matrice A du système qui est linéaire et invariante dans le temps. Les observateurs de Luenberger et le filtre de Kalman se basent sur cette approche.

II .5.4 Observateurs non linéaires :

Ce sont les observateurs utilisés pour observer des systèmes non linéaires comme les machines électriques. Il existe deux approches de développement de ces observateurs :

- La linéarisation autour du point de fonctionnement, le filtre de Kalman à état retardé fonctionne avec cette approche.
- La construction du gain d'observation sur la base de la non-linéarité du système : c'est le cas de l'observateur à Grand gain et l'observateur de Kalman, ces observateurs sont synthétisés en prenant en compte la modélisation non linéaire du système.

II .6 -Observateur adaptatif :

La méthode du MRAS (Model Référence Adaptive System) est basée sur le choix de deux modèles pour représenter un système. Le premier est appelé « modèle de référence », l'autre sera nommé « modèle adaptatif ». Le modèle de référence ne doit pas dépendre explicitement de la grandeur à estimer alors que le second en dépend explicitement. Un mécanisme d'adaptation, généralement un PI, fait tendre le comportement du modèle adaptatif vers le comportement du modèle de référence, conformément à la figure (II.4).

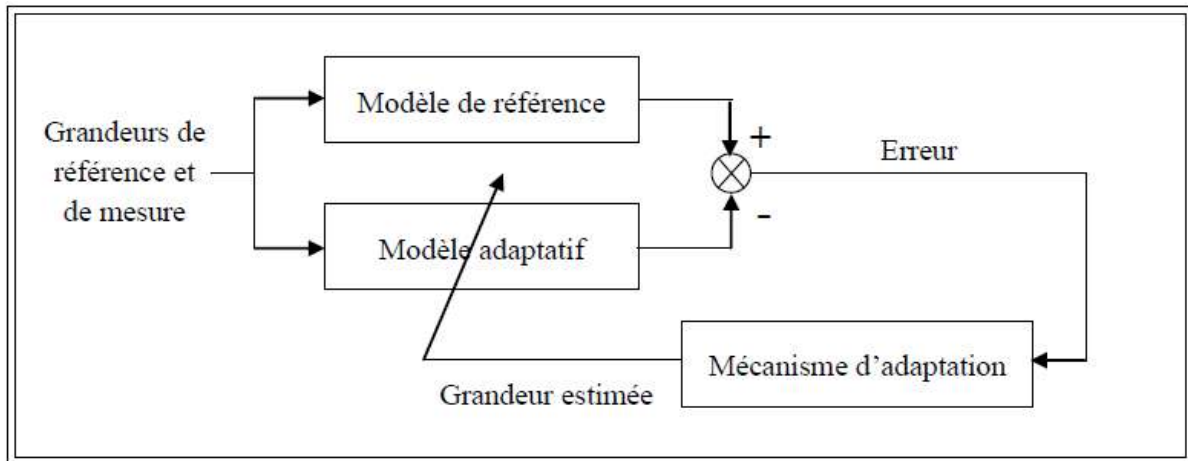


Figure II.4 Principe de l'observateur adaptatif.

Donc pour réaliser notre observateur nous devons choisir les grandeurs du système. Dans le cas de la commande vectorielle de la machine asynchrone on suppose que :

- Les paramètres du modèle sont connus et invariants (dans le cas sain).
- Les courants statoriques sont mesurés ainsi que les tensions statoriques.
- Les flux rotoriques sont estimés.
- La vitesse rotorique est estimée.

II .6.1 Modèle de la MAS dans le repère (α, β) :

Pour établir un bon compromis entre la stabilité et la simplicité de l'observateur, il convient de [34] choisir le modèle de la MAS dans le repère (α, β) lié au stator et donné par la représentation d'état suivante :

$$\begin{cases} [\dot{X}] = [A(\omega)]. [X] + [B]. [U] \\ [Y] = [C]. [X] \end{cases} \quad (II.1)$$

Tel que :

$$[X] = \begin{bmatrix} I_{s\alpha} \\ I_{s\beta} \\ \phi_{r\alpha} \\ \phi_{r\beta} \end{bmatrix}; \quad [U] = \begin{bmatrix} V_{s\alpha} \\ V_{s\beta} \end{bmatrix}; \quad [Y] = \begin{bmatrix} I_{s\alpha} \\ I_{s\beta} \end{bmatrix}$$

Avec

$$A = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 & 0 \\ 0 & a_1 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} a_2 a_4 & a_2 \omega_{est} \\ a_2 \omega_{est} & a_2 a_4 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} a_3 & 0 \\ 0 & a_3 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} a_4 & -\omega_{est} \\ \omega_{est} & a_4 \end{bmatrix} \end{bmatrix}; [B] = \begin{bmatrix} b & 0 \\ 0 & b \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}; [C] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Où

$$a_1 = -\frac{R_s + R_r}{L_f} ; a_2 = \frac{1}{L_f} ; a_3 = R_r ; a_4 = \frac{R_r}{L_r} ; b = \frac{1}{L_f}$$

II.6.2 Observateur de Luenberger :

Cet observateur permet de reconstituer l'état d'un système observable à partir de la mesure des entrées et des sorties. Il est utilisé lorsque tout ou une partie du vecteur d'état ne peut être mesuré. Il permet l'estimation des paramètres variables ou inconnus d'un système [32]. L'équation de l'observateur de Luenberger peut être exprimée par :

$$\begin{cases} \dot{\hat{X}} = A(\omega) \cdot \hat{X} + B \cdot U + K \varepsilon_Y \\ \hat{Y} = C \cdot \hat{X} \end{cases} \quad (\text{II.2})$$

Tel que :

$$\varepsilon_Y = Y - \hat{Y} \quad (\text{II.3})$$

II.6.3 Détermination de la matrice de gain K :

L'équation (II.3) intervient dans (II.2), on a alors :

$$\begin{cases} \dot{\hat{X}} = A(\omega) \cdot \hat{X} + B \cdot U + KY \\ \hat{Y} = C \cdot \hat{X} \end{cases} \quad (\text{II.4})$$

Avec :

$$A_0 = A - KC \quad (\text{II.5})$$

La matrice A ne dépend que de la vitesse et elle est constituée de quatre sous matrices dont chacune est antisymétrique. La matrice A_0 détermine la dynamique de l'observateur, ce qui impose une certaine structure à la matrice gain K qui peut s'écrire [35] :

$$K = \begin{bmatrix} k_1 & -k_2\omega_{est} \\ k_2\omega_{est} & k_1 \\ k_3 & -k_4\omega_{est} \\ k_4\omega_{est} & k_3 \end{bmatrix} \quad (\text{II.6})$$

On doit définir les gains de l'observateur en respectant les conditions de la théorie de Popov. La matrice P n'intervenant pas dans la réalisation de l'observateur, elle sert à prouver la stabilité du système et elle est choisie de manière à faciliter les calculs par exemple :

$$P = \begin{bmatrix} x_1 I & x_3 I - x_4 J \\ x_3 I - x_4 J & x_1 I \end{bmatrix} \quad (\text{II.7})$$

$$I = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}; J = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix}$$

La matrice Q devient :

$$Q = \begin{bmatrix} a.I & b.I + c.\omega.J \\ b.I - c.\omega.J & d.I \end{bmatrix} \quad (\text{II.8})$$

$$a = 2(a_1 + k_1).x_1 + 2(a_3 + k_3)x_3 + 2.k_4.\omega x_4$$

$$b = (a_1 + k_1 + a_4).x_3 + ((1 - k_2)\omega)x_4 + a_2 a_4 x_1 + (a_3 + k_3).x_2$$

$$c.\omega = a_2 \omega x_1 + \omega(1 - k_2).x_3 - (a_1 + k_1 + a_4).x_4 - k_4.\omega.x_2$$

$$d = 2(a_2.a_4.x_3) - 2a_2\omega x_4 + 2a_4.x_2$$

(II.9)

Ensuite on démontre que Q est définie négative et P positive.

II.6.4 Observateur de Luenberger basé sur le mécanisme d'adaptation de la vitesse :

D'après notre système, on peut représenter l'observateur par le système d'état suivant :

$$\begin{bmatrix} \hat{I}_{s\alpha} \\ \hat{I}_{s\beta} \\ \hat{\vartheta}_{r\alpha} \\ \hat{\vartheta}_{r\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 & 0 & a_2 a_4 & a_2 \omega_{est} \\ 0 & a_1 & a_2 \omega_{est} & a_2 a_4 \\ a_3 & 0 & a_4 & -\omega_{est} \\ 0 & a_3 & \omega_{est} & a_4 \end{bmatrix} \hat{X} + \begin{bmatrix} b & 0 \\ 0 & b \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{s\alpha} \\ V_{s\beta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 & k_2 \omega_{est} \\ k_2 \omega_{est} & k_1 \\ k_1 & k_2 \omega_{est} \\ k_2 \omega_{est} & k_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{s\alpha} - \hat{I}_{s\alpha} \\ I_{s\beta} - \hat{I}_{s\beta} \end{bmatrix} \quad (\text{II.10})$$

Cette représentation peut prendre la forme suivante :

$$\hat{X} = A(\omega) \cdot \hat{X} + B \cdot U + K(I_s - \hat{I}_s) \quad (\text{II.11})$$

Avec :

$$(I_s - \hat{I}_s) = \begin{bmatrix} I_{s\alpha} - \hat{I}_{s\alpha} \\ I_{s\beta} - \hat{I}_{s\beta} \end{bmatrix} \quad (\text{II.12})$$

Supposons maintenant que la vitesse Ω est un paramètre constant inconnu. Il est nécessaire de chercher une loi pour estimer ce paramètre.

Le mécanisme d'adaptation de la vitesse sera déduit par la théorie de Lyapunov. L'erreur d'estimation sur le courant statorique et le flux rotorique, qui n'est autre que la différence entre l'observateur et le modèle du moteur, est donnée par :

$$\dot{e} = (A - KC)e + (\Delta A)\hat{X} \quad (\text{II.13})$$

Avec :

$$\Delta A = A(\Omega) - A(\hat{\Omega}) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & a_2 p \Delta \Omega \\ 0 & 0 & a_2 p \Delta \Omega & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -p \Delta \Omega \\ 0 & 0 & p \Delta \Omega & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{II.14})$$

Où :

$$\Delta \Omega = \Omega - \hat{\Omega} \quad (\text{II.15})$$

$$e = X - \hat{X} = \begin{bmatrix} e_{I_{s\alpha}} \\ e_{I_{s\beta}} \\ e_{\phi_{r\alpha}} \\ e_{\phi_{r\beta}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.16})$$

Maintenant considérons la fonction de Lyapunov suivante :

$$v = e^T e + \Delta \Omega^2 / \lambda \quad (\text{II.17})$$

Sa dérivée par rapport au temps est :

$$\frac{dv}{dt} = \left\{ \frac{d(e^T)}{dt} \right\} e + e^T \left\{ \frac{de}{dt} \right\} + \frac{1}{\lambda} \frac{d}{dt} \Delta \Omega^2 \quad (\text{II.18})$$

$$\frac{dv}{dt} = e^T \{ (A - KC)^T + (A - KC) \} e - 2a_2 \Delta \Omega (e_{I_{s\alpha}} \hat{\phi}_{r\beta} - e_{I_{s\beta}} \hat{\phi}_{r\alpha}) + \frac{2}{\lambda} \Delta \Omega \frac{d}{dt} \Delta \Omega^2 \quad (\text{II.19})$$

De cette équation, on peut déduire la loi d'adaptation pour l'estimation de la vitesse rotorique en égalisant le deuxième terme et le troisième de l'équation (II.19). On obtient [36] :

$$\hat{\Omega} = \lambda \cdot a_2 \int_0^t (e_{I_{s\alpha}} \hat{\phi}_{r\beta} - e_{I_{s\beta}} \hat{\phi}_{r\alpha}) dt \quad (\text{II.20})$$

Où λ est une constante positive.

Cependant cette loi d'adaptation est établie pour une vitesse constante et afin d'améliorer la réponse de l'algorithme d'adaptation, on estime la vitesse par un régulateur PI décrit par cette relation :

$$\hat{\Omega} = k_p (e_{I_{s\alpha}} \hat{\phi}_{r\beta} - e_{I_{s\beta}} \hat{\phi}_{r\alpha}) + k_i \int (e_{I_{s\alpha}} \hat{\phi}_{r\beta} - e_{I_{s\beta}} \hat{\phi}_{r\alpha}) dt \quad (\text{II.21})$$

Avec (k_p) et (k_i) des constantes positives.

II .7 Caractéristiques souhaitables d'un système de diagnostic [05] :

Afin de pouvoir comparer diverses approches de diagnostic, il est utile d'identifier un ensemble de caractéristiques souhaitables qu'un système de diagnostic devrait posséder. Bien que ces caractéristiques ne soient habituellement possédées par aucune méthode de diagnostic particulière, elles sont utiles pour évaluer diverses méthodes en termes d'information à priori qui doit être fournie, de rapidité, de robustesse, d'adaptabilité, etc. Chaque fois qu'une anomalie se produit dans un procédé, un système de diagnostic fournit un ensemble d'hypothèses de défauts qui explique les observations. L'efficacité d'un système de diagnostic demande que le défaut réel soit un sous-ensemble de l'ensemble des défauts suspectés. La résolution d'un système de diagnostic demande que l'ensemble des défauts fournis soit aussi minimal que possible. Les paragraphes suivants présentent un ensemble de caractéristiques souhaitables qu'un système de diagnostic doit posséder

II .7.1 Rapidité et sensibilité de détection :

Un système de diagnostic devrait répondre rapidement en détectant et en diagnostiquant les mauvais fonctionnements du procédé. Cependant, les réponses rapides du diagnostic et les performances tolérables durant un fonctionnement normal sont deux buts différents. Un système qui est conçu pour détecter un défaut rapidement sera sensible aux influences de toutes les erreurs (bruit, incertitudes...). Ceci rend le système sensible au bruit et peut déclencher fréquemment des fausses alarmes pendant un fonctionnement normal.

II .7.2 Robustesse :

On voudrait que le système de diagnostic soit robuste aux divers bruits et incertitudes. On voudrait que ses performances se dégradent lentement au lieu d'échouer totalement et abruptement. La robustesse est incompatible avec les systèmes très sensibles aux seuils. En présence du bruit, ces seuils doivent être choisis raisonnablement. Ainsi, les besoins de robustesse doivent être équilibrés avec ceux de sensibilité.

II .7.3 Identification de nouveaux défauts :

Une des fonctionnalités minimales qu'un système de diagnostic doit posséder, est de pouvoir décider, étant donné des conditions courantes de fonctionnement, si le procédé fonctionne normalement ou anormalement, et s'il est anormal, si la cause est un défaut de fonctionnement connu ou un inconnu. Ce critère est connu comme identification de nouveauté

(nouveaux événements). En général, on dispose de données suffisantes pour décrire le comportement normal du procédé. Cependant, typiquement on n'a pas de tels historiques de données disponibles pour modéliser les modes de fonctionnement anormaux d'une manière satisfaisante. Seuls quelques gabarits de données peuvent être disponibles pour couvrir une partie du fonctionnement anormal. Ainsi, il est possible qu'une grande partie de la région de dysfonctionnement ne puisse avoir été modélisée. Ceci posera des défis sérieux pour l'identification de nouvelles situations. Même dans ces conditions difficiles, on voudrait que le système de diagnostic puisse identifier l'occurrence des nouveaux défauts et ne les classifie pas comme d'autres défauts de fonctionnement connus ou comme fonctionnement normal.

II .7.4 La localisation :

La localisation est la capacité du système de diagnostic à distinguer entre différents défauts. Dans des conditions idéales exemptes de bruit et d'incertitudes de modélisation, ceci revient à dire que le système de diagnostic devrait pouvoir générer un ensemble d'hypothèses qui ne contient pas les défauts absents. Naturellement la capacité de concevoir de tels systèmes dépend en grande partie de la connaissance de la structure et des caractéristiques du procédé.

II .7.5 Adaptabilité :

En général les procédés évoluent en raison des changements des entrées externes ou des changements structurels. Les conditions de fonctionnement du procédé peuvent changer non seulement en raison des perturbations mais également en raison des changements des conditions environnementales telles que les changements des quantités de production avec des demandes variantes, des changements de qualité de matière première, etc. Ainsi le système de diagnostic devrait être adaptable aux changements. Il devrait être possible de développer graduellement la portée du système pendant que les nouvelles situations émergent grâce à la disponibilité d'informations supplémentaires.

II .7.6 Identification des défauts multiple :

La capacité d'identifier les défauts multiples est un objectif important, mais difficile, à cause de l'influence simultanée de la plupart des défauts. Dans un système non linéaire général, des interactions se manifestent, et par conséquent un système de diagnostic ne peut pas employer les différents modèles de chaque défaut pour modéliser l'effet combiné des défauts. Par ailleurs, l'énumération des différentes combinaisons de défauts multiples et l'analyse de leurs effets deviennent combinatoires pour des procédés de grande échelle.

II .7.7 Estimation d'erreur de classification :

Une condition pratique importante pour un système de diagnostic, est l'établissement des niveaux de confiance. Ceci pourrait être considérablement facilité si le système de diagnostic pouvait fournir une évaluation a priori sur l'erreur de classification qui peut se produire. De telles mesures d'erreur seraient utiles pour projeter des niveaux de confiance sur les décisions produites par le système donnant à l'utilisateur une meilleure sensation à propos de la fiabilité des recommandations proposées par le système de diagnostic.

II .7.8 Facilité d'explication :

En dehors de la capacité d'identifier la source d'un défaut de fonctionnement, un système de diagnostic devrait également fournir des explications sur la façon dont le défaut a commencé et a évolué vers la situation actuelle. C'est un facteur très important lorsque l'on conçoit des systèmes interactifs d'aide à la décision en ligne. Ceci exige la capacité de raisonner au sujet de la cause et des effets dans un procédé. Un système de diagnostic doit justifier ses recommandations de sorte que l'opérateur puisse en conséquence évaluer et agir en utilisant son expérience. On voudrait que le système de diagnostic justifie non seulement pourquoi certaines hypothèses ont été proposées, mais expliquer également pourquoi certaines autres hypothèses n'ont pas été proposées.

II .8 Transformation des mesures dans un système de diagnostic :

Généralement, le processus de diagnostic peut être défini comme un processus décisionnel. La décision finale est constituée de l'ensemble des défauts possibles. La figure II.5, montre les diverses transformations que les données du procédé subissent pendant le processus de diagnostic.

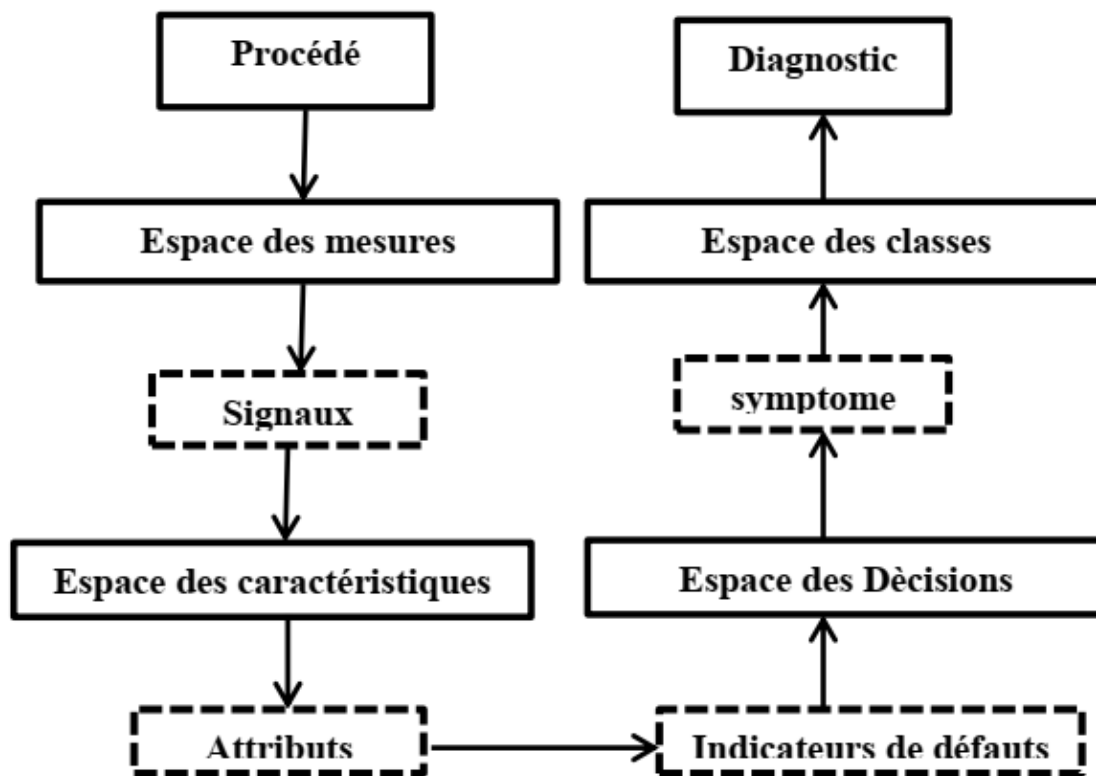


Figure II.5 Transformations de mesures dans un système de diagnostic

L'**espace des mesures** est défini par les sorties du système, ces sorties peuvent avoir subi des prétraitements (élimination de données aberrantes, filtrage...). Ce sont les entrées du système de diagnostic.

L'**espace des caractéristiques** est l'espace obtenu en fonction des mesures en utilisant une connaissance a priori du problème. Ici, les mesures sont analysées et combinées à l'aide d'une connaissance a priori du procédé pour extraire les caractéristiques utiles concernant le comportement du procédé, pour faciliter le diagnostic. Il y a deux manières de développer l'espace des caractéristiques à partir de l'espace des mesures, à savoir, la sélection et l'extraction des caractéristiques. L'extraction de caractéristiques est un procédé qui facilite, par l'utilisation de la connaissance antérieure du problème, une transformation de l'espace de mesure dans un espace de dimension inférieure.

Le passage de l'espace des caractéristiques à l'espace des décisions est habituellement fait pour satisfaire une certaine fonction objective (telle que réduire au minimum la non détection). Cette transformation est réalisée en employant une fonction discriminante, dans certains cas en employant des fonctions simples de seuil.

L'espace des décisions est l'espace correspondant au nombre de variables de décision obtenu par des transformations appropriées de l'espace des caractéristiques.

L'espace des classes correspond au nombre de classes de défaut. En classant les défauts, nous indiquons catégoriquement à quelle classe un défaut appartient. L'espace des classes est ainsi l'interprétation finale du système de diagnostic fourni à l'utilisateur.

II .9 Classification des méthodes de diagnostic :

II .9.1 Approche à base de modèle qualitatif :

C'est une connaissance qui s'exprime avec des symboles et peut être traitée, en simulant la façon dont un humain raisonne logiquement, par des techniques informatiques relevant de l'intelligence artificielle. Pour construire des représentations qui permettent une meilleure compréhension des phénomènes physiques mis en jeu dans un procédé, l'intelligence artificielle s'intéresse au milieu des années 1980 au raisonnement qualitatif. Le développement de techniques de représentation qualitative du monde pour en comprendre schématiquement le fonctionnement est une idée très naturelle et par conséquent très ancienne. On trouve dans la proche qualitative (Modèles causaux, Abstractions hiérarchiques).

II .9.2 Approche à base de modèle quantitatif :

L'utilisation de modèle mathématique pour le diagnostic est très largement répandue. Les méthodes de surveillance à base de modèle (Model-based-FDI : Fault Detection and Isolation) utilisent un modèle et reposent sur la génération et l'étude d'un signal particulier appelé "indicateur de défaut" ou "résidu".

II .9.3 Approche à base d'extraction de caractéristiques qualitatives :

Ces méthodes ont l'avantage de ne pas nécessiter la connaissance d'un modèle mathématique ou structurel du procédé, contrairement aux méthodes à base de modèles. Seulement, la disponibilité de grandes quantités de données historiques du procédé est nécessaire. Il y a diverses façons de traiter ces données et de les présenter en tant que connaissance a priori pour le diagnostic. Ceci est connu comme l'extraction de caractéristiques. Parmi les méthodes d'extraction de caractéristiques qualitatives, se trouvent les méthodes à base de règles (systèmes experts), et les méthodes de représentation et analyse qualitative des tendances.

II .9.4 Approche à base d'extraction de caractéristiques quantitatives :

Dans la section précédente, on a vu la méthode basée sur l'extraction de caractéristiques qualitatives. Dans cette section, on va évoquer la méthode qui extrait les caractéristiques quantitatives. On peut analyser les signaux issus de l'instrumentation et proposer pour chacun de ces signaux un modèle.

II .9.4.1 La méthode statistique :

Comme tests d'hypothèses, classification probabilistes, analyse en composante principales moindres carrés partiels, cette méthode est, en fait, une référence du comportement d'un signal, qui peut être représentative de l'état normal de l'installation ou d'un défaut particulier.

II .9.4.2 Les méthodes non statistiques :

On peut citer la classification floue, réseaux de neurones, méthodes de signature, méthodes fréquentielles, temps-fréquence et temps-échelle. La méthode non statistique est une autre méthode de représentation pour un signal qui peut très bien être utilisée comme référence pour le diagnostic, est sa représentation par un spectre de fréquences, une signature graphique, ou encore l'extraction d'attributs (ou caractéristiques), à partir des données suivie de leur classification, qui permettent, pour des procédés dont on veut analyser plusieurs signaux liés entre eux, de discriminer divers modes de fonctionnement, dont le mode normal et certains modes de défaillance.

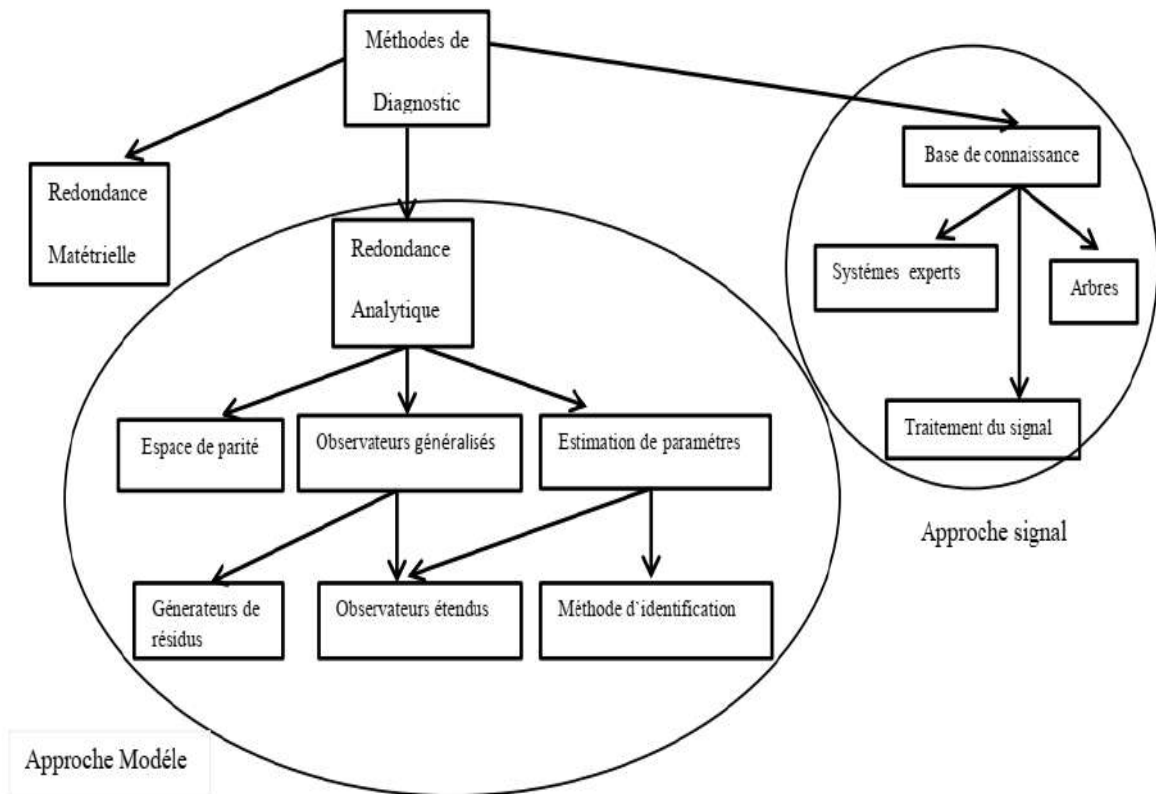


Figure II.6 Les différentes méthodes de diagnostic

II .10 Le modèle ‘ bon fonctionnement’ pour le contrôle et la surveillance :

Des modèles sont nécessaires pour concevoir et affiner les contrôleurs. Ils sont communément équilibrés. On passe du référentiel (abc) fixe, au référentiel fixe (α, β) par la transformation de Concordia [37].

$$\begin{cases} pX = A_c X + B_c U \\ Y = C_c X \end{cases} \tag{II.22}$$

Avec

$$[i_{s\alpha} \ i_{s\beta} \ \varphi_{r\alpha} \ \varphi_{r\beta}]^T$$

Où :

$$A_c = \begin{bmatrix} -y & 0 & \frac{k}{\tau} & k\omega \\ 0 & -y & -k\omega & \frac{K}{\tau} \\ \frac{L_m}{\tau} & 0 & -\frac{1}{\tau} & -\omega \\ 0 & \frac{L_m}{\tau} & \omega & -\frac{1}{\tau} \end{bmatrix} \quad B_c = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sigma L_s} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sigma L_s} & 0 & 0 \end{bmatrix}^T \quad C_c = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Et

$$y = \frac{R_s}{\sigma L_s} + \frac{1 - \sigma}{\sigma \tau}, \tau = \frac{L_r}{R_r}, k = \frac{L_m}{\sigma L_s L_r}, \sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r}$$

II.11 Conclusion :

Dans ce chapitre un type d'observateur de flux et de la vitesse a été étudié. Les résultats Des simulations sont satisfaisantes, la convergence est acquise et la stabilité est également Garantie. On a utilisé cet observateur pour la commande sans capteur mécanique de vitesse. L'introduction des défauts de court-circuit statorique et rupture de barres rotorique prouve la robustesse de ce type d'observateur.

A la fin du chapitre, on a montré que la commande risque de masquer l'effet des défauts qui influe sur le diagnostic de ces défauts.

Chapitre III : modélisation et simulation de la machine asynchrone

III.1 Objectifs et contexte du COVID19

Le but de ce travail été donc de réaliser un dispositif de détection des défauts dans les machines asynchrones, aillant un capteur tachymétrique et un détecteur piézoélectrique, offrant une isolation élevée et fonctionnant sous faible tension et faible puissance. Cette réalisation doit permettre d'atteindre une précision dans un encombrement réduit tout en garantissant un rendement acceptable avec une fréquence normale, ceci afin de pouvoir utiliser des composants passifs souhait s. L'impact des éléments parasites entre les différents composants, est négliger.

Malheureusement, vue le contexte que travers notre pays ainsi que le monde entier, contexte du covid19 bien sur, il nous a été difficile de nous procurer des pièces et composants électroniques nécessaires pour la réalisation de notre dispositif, nous avons optés pour une simulation avec un logiciel du dispositif, avec l'espérance qu'un autre étudiant continuera ce travail en réalisant le dispositif en s'appuyant sur notre humble contribution.

III.2 Introduction

Nous commençons dans ce troisième chapitre par un rappel du modèle de la machine asynchrone présenté au deuxième chapitre. Ensuite, nous introduisons une transformation non linéaire qui met ce modèle sous une forme appropriée sur laquelle nous pouvons appliquer la technique de commande. Nous présenterons par la suite la simulation utilisée ici pour faire des études préliminaires et comparatives, tant au stade du développement (conception), qu'au cours du fonctionnement normal des systèmes dont nous avons la perspective de réaliser. Plusieurs outils de simulation sont utilisés dans ce travail SIMNON, MATLAB, SIMULINK, etc. La difficulté que nous avons rencontré lors de la simulation du moteur asynchrone provient de sa structure fortement non-linéaire. Le modèle contient plusieurs blocs non linéaires.

III.3 Définition du model :

Les équations générales (III.1) décrivant le fonctionnement des moteurs à courant alternatif dans un référentiel d-q se retrouvent dans la littérature technique consacrée aux machines électriques.

$$\begin{aligned}
 u_{ds} &= R_s i_{ds} + \frac{d\psi_{ds}}{dt} + \omega_a \psi_{qs} \\
 u_{qs} &= R_s i_{qs} + \frac{d\psi_{qs}}{dt} + \omega_a \psi_{ds} \\
 u_{dr} &= R_r i_{dr} + \frac{d\psi_{dr}}{dt} + (\omega_a - \omega_r) \psi_{qr} \\
 u_{qr} &= R_r i_{qr} + \frac{d\psi_{qr}}{dt} + (\omega_a - \omega_r) \psi_{dr}
 \end{aligned}
 \tag{III .1}$$

Le modèle de la machine asynchrone dans un repère (α, β) lié au stator est donné par

$$\begin{cases}
 \dot{i}_s = KF(\omega)\psi_r - y i_s + \frac{1}{\sigma L_s} u_s \\
 \dot{\psi}_r = -F(\omega)\psi_r + \frac{M}{T} i_s \\
 \dot{\omega} = \frac{pM}{JL_r} i_s^T J_{2\psi r} - \frac{1}{J} T_L
 \end{cases}
 \tag{III .2}$$

En réécrivant les équations précédentes dans un référentiel stationnaire d-q ($\omega_a=0$), on obtient le modèle de la partie électrique du moteur asynchrone :

$$\begin{aligned}
 u_{ds} &= R_s i_{ds} + \frac{d\psi_{ds}}{dt} \\
 u_{qs} &= R_s i_{qs} + \frac{d\psi_{qs}}{dt} \\
 0 &= R_r i_{dr} + \frac{d\psi_{dr}}{dt} + \omega_r \psi_{qr} \\
 0 &= R_r i_{qr} + \frac{d\psi_{qr}}{dt} + \omega_r \psi_{dr}
 \end{aligned}
 \tag{III .3}$$

Le rotor du moteur asynchrone à cage étant fermé sur lui-même (court-circuité), on prend u_{dr} et u_{qr} égales à zéro.

Les flux couplés statoriques et rotoriques sont obtenus à partir des inductances propres et mutuelles :

$$\begin{aligned}\psi_{ds} &= L_s i_{ds} + L_{sr} i_{dr} \\ \psi_{qs} &= L_s i_{qs} + L_{sr} i_{qr} \\ \psi_{dr} &= L_r i_{dr} + L_{sr} i_{ds} \\ \psi_{qr} &= L_r i_{qr} + L_{sr} i_{qs}\end{aligned}\tag{III .4}$$

L'équation du couple électromagnétique du moteur est :

$$C_{em} = \frac{3}{2} p [\psi_{ds} i_{qs} - \psi_{qs} i_{ds}] = \frac{3}{2} p L_{sr} (i_{qs} i_{dr} - i_{ds} i_{qr})\tag{III .5}$$

L'équation du mouvement, reliant les parties électrique et mécanique s'écrit comme suit :

$$J \frac{d\Omega_m}{dt} = C_{em} - C_r\tag{III .6}$$

Les tensions biphasées dans l'équation (7) sont obtenues comme suit :

$$\begin{aligned}u_{ds} &= \sqrt{\frac{2}{3}} \left(u_{as} - \frac{1}{2} u_{bs} - \frac{1}{2} u_{cs} \right) \\ u_{qs} &= \sqrt{\frac{2}{3}} \left(\frac{\sqrt{3}}{2} u_{bs} - \frac{\sqrt{3}}{2} u_{cs} \right)\end{aligned}\tag{III .7}$$

Les équations de transformation inverse des courants statoriques sont :

$$\begin{aligned}i_{as} &= \sqrt{\frac{2}{3}} i_{ds} \\ i_{bs} &= \sqrt{\frac{2}{3}} \left(-\frac{1}{2} i_{ds} + \frac{\sqrt{3}}{2} i_{qs} \right) \\ i_{cs} &= \sqrt{\frac{2}{3}} \left(-\frac{1}{2} i_{ds} - \frac{\sqrt{3}}{2} i_{qs} \right)\end{aligned}\tag{III .8}$$

III .4 Outils de simulation MATLAB/SIMULINK

III.4.1. Matlab

Un système interactif et convivial de calcul numérique et de visualisation graphique, destiné aux ingénieurs et scientifiques. Il possède un langage de programmation à la fois puissant et simple d'utilisation. Il permet d'exprimer les problèmes et solutions d'une façon aisée, contrairement à d'autres langages de programmation. Il intègre des fonctions d'analyse numérique, de calcul matriciel, de traitement de signal, de visualisation graphique 2D et 3D, etc. Il peut être utilisé de façon interactive ou en mode programmation. En mode interactif, l'utilisateur a la possibilité de réaliser rapidement des calculs sophistiqués et d'en présenter les résultats sous forme numérique ou graphique. En mode programmation, il est possible d'écrire des scripts (programmes) comme avec d'autres langages. L'utilisateur peut aussi créer ses propres fonctions pouvant être appelées de façon interactive ou par des scripts. Ces fonctions fournissent à MATLAB un atout inégalable : son extensibilité. Ainsi, l'environnement MATLAB peut facilement être étendu. Dans MATLAB, l'élément de base est la matrice. L'utilisateur ne s'occupe pas des allocations de mémoire ou de redimensionnement comme dans les langages classiques. Les problèmes numériques peuvent être résolus en un temps record, qui ne représente qu'une infime partie du temps à passer avec d'autres langages comme le Basic, C, C++ ou le Fortran. MATLAB s'est imposé dans les milieux universitaire et industriel comme un outil puissant de modélisation, de simulation et de visualisation de problèmes numériques. Dans le monde universitaire, MATLAB est utilisé pour l'enseignement de l'algèbre linéaire, le traitement du signal, l'automatique, etc., ainsi que dans la recherche scientifique. Dans le domaine industriel, il est utilisé pour la résolution et la simulation de problèmes d'ingénierie et de prototypage. MATLAB est une abréviation de MATrix LABoratory. Écrit à l'origine, en Fortran, par Cleve Moler, MATLAB était destiné à faciliter l'accès au logiciel matriciel développé dans les projets LINPACK et EISPACK. La version actuelle est écrite en C. Sa disponibilité est assurée sur plusieurs plates-formes : Sun, Bull, HP, IBM, Compatibles PC, Macintosh, et plusieurs machines parallèles. MATLAB est conforté par une multitude de boîtes à outils (tool boxes) spécifiques à des domaines variés. Un autre atout de MATLAB, est sa portabilité ; la même portion de code peut être utilisée sur différentes plates-formes sans la moindre modification.

III.4.2. Simulink

Simulink est un programme pour la simulation des systèmes dynamiques linéaires et non linéaires ; une extension de matlab, dans laquelle la définition des modèles se fait par schémas blocs (diagramme structurel). Le diagramme structurel permet la représentation graphique d'un système d'équations linéaires et non linéaires. Il met en évidence la structure du système et permet de visualiser les interactions entre les différentes grandeurs internes et externes. On distingue alors particulièrement bien les contre-réactions, les couplages réciproques, les non-linéarités, etc. Les éléments qui composent le diagramme structurel représentent des opérations mathématiques, à savoir addition, soustraction, multiplication avec un coefficient, intégration et différentiation, ainsi que la multiplication et la division de deux variables et la fonction non linéaire d'une variable. Simulink possède une interface graphique pour visualiser les résultats sous forme de graphiques ou de valeurs numériques en cours de simulation. Les paramètres régissant le fonctionnement des systèmes peuvent être modifiés en ligne, c'est à dire en cours de simulation, et l'on peut observer leur effet immédiatement. Simulink est bâti autour d'une bibliothèque de blocs (bibliothèques) classés par catégories. Les principales bibliothèques sont montrées dans le tableau 1.

Librairie	Contenu
Sources	Différents types de signaux d'entrée
Sinks	Appareils virtuels de visualisation
Continuous	Systèmes et opérateurs continus
Discrete	Blocs représentant les systèmes discrets
Math	Opérateurs mathématiques
Fonctions et tables	Fonctions et tables de valeurs
Nonlinear	Systèmes et opérateurs non linéaires
Signals et systems	Blocs de connexion et sous-systèmes

Tableau III.1 liste des fonctionnalités Matlab Simulink

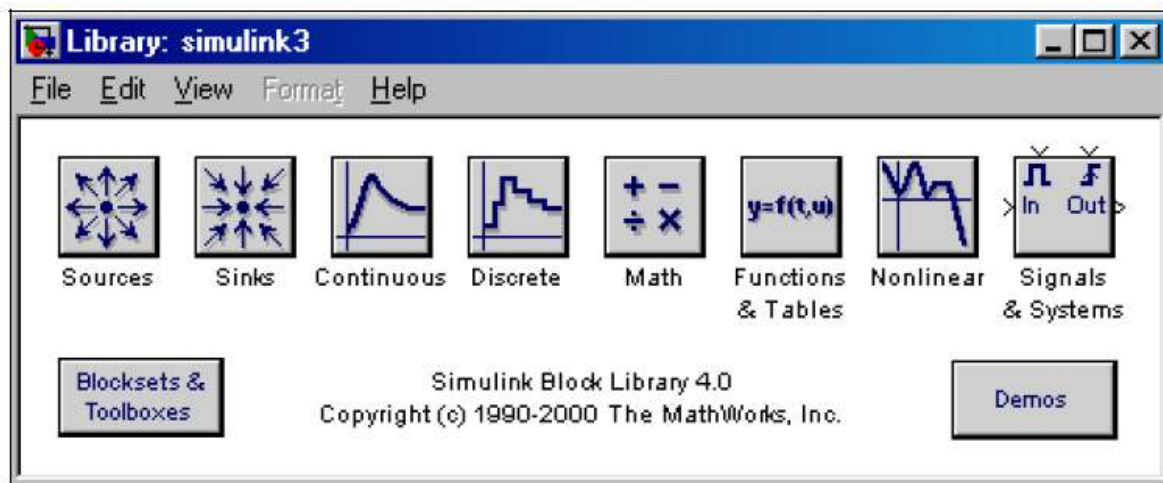


Figure III.1 Librairie Simulink

III.5 Modélisation numérique :

La figure III.2 représente le modèle Simulink du moteur asynchrone décrit par les équations (2) à (7). Chaque bloc de la figure est issu d'une équation. Ainsi, le bloc « Transformation abc \rightarrow dq » est réalisé à partir de l'équation (6). Le contenu du bloc est représenté à la figure 3.

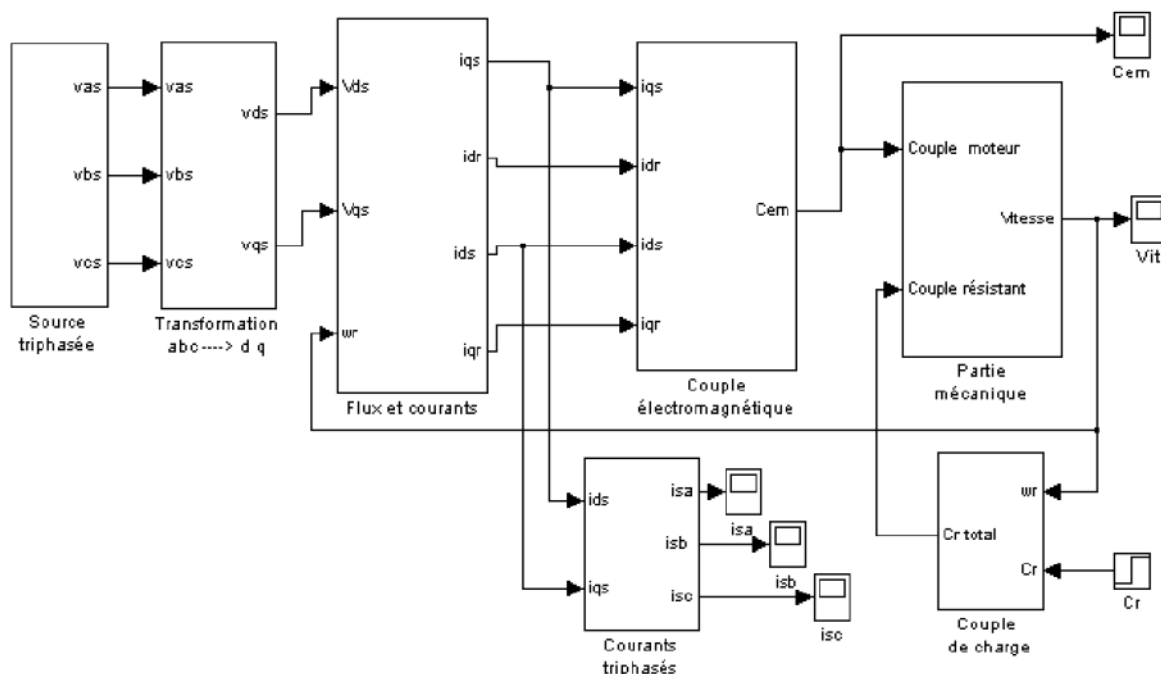


Figure III.2 Modèle Simulink d'un moteur asynchrone

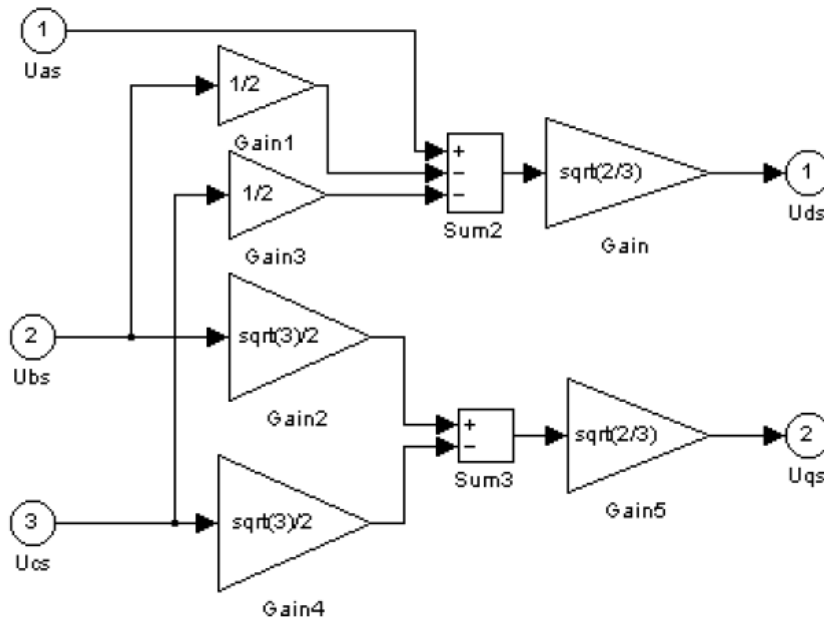


Figure III.3 Bloc de transformation triphasée-biphasé

Les caractéristiques de la machine asynchrone comme celles de la plupart des dispositifs électrique peuvent être simulées numériquement sur ordinateur et ces simulations sont basées sur la résolution des équations qui régissent les différents phénomènes entrants en vigueur.

Ici la simulation est de plus en plus précise pour la modélisation des différents phénomènes qui régissent notre système, cela est due à la prise en compte des interactions entre les réactions des différentes composant entre eux par exemple l'effet de la chaleur (effet Joule), le magnétisme .. Ext.

III .6 Présentation du modèle et aspects numériques :

Un moteur triphasé de 3 CV, 220 V, 1725 tr / min est alimenté par un onduleur PWM sinusoïdal. La fréquence de base de l'onde de référence sinusoïdale est de fréquence 60 Hz tandis que la fréquence de l'onde porteuse triangulaire est fixée à 1980 Hz. L'onduleur PWM est entièrement construit avec des blocs Simulink standard. Sa sortie passe par des blocs de source de tension contrôlée avant d'être appliquée aux enroulements de stator du bloc de machine asynchrone. Le rotor de la machine est court-circuité. Son inductance de fuite statorique L_{ls} est réglée à deux fois sa valeur réelle pour simuler l'effet d'un réacteur de lissage placé entre l'onduleur et la machine. Le couple de charge appliqué à l'arbre de la machine est constant et réglé à sa valeur nominale de 11,9 N.m Le moteur démarre à partir du calage. La consigne de vitesse est réglée sur 1,0 pu, ou 1725 tr / min. Cette vitesse est atteinte après 0,9 s.

Simulation Regardez les paramètres de simulation. Le pas de temps maximum a été limité à 10 microsecondes. Ceci est nécessaire en raison de la fréquence de commutation relativement élevée (1980 Hz) de l'onduleur. Notez que les courants rotorique et statorique sont assez bruyants malgré l'utilisation d'un dispositif de lissage. Le bruit introduit par l'onduleur PWM est également observé dans la forme d'onde de couple électromagnétique T_e . Cependant, l'inertie du moteur empêche ce bruit d'apparaître dans la forme d'onde de vitesse du moteur. La valeur RMS de la composante fondamentale de la tension de ligne aux bornes du stator de la machine est extraite avec un bloc de Fourier, qui se trouve dans le groupe Mesures des Extras Enfin, observez la sortie du variateur PWM. Utilisez le zoom sur l'oscilloscope v_{ab} pour zoomer sur la forme d'onde.

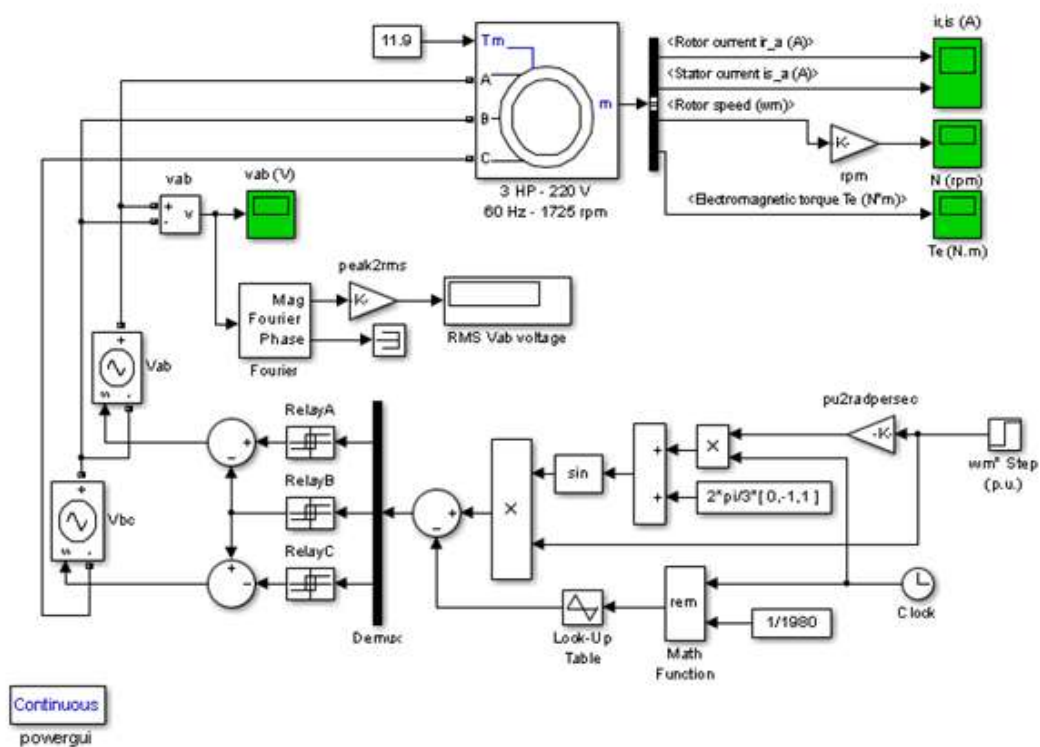


Figure III.4 Modèle final Simulink de notre moteur asynchrone

III.7 Le moteur asynchrone

Le modèle mathématique sur Simulink pour le moteur asynchrone est :

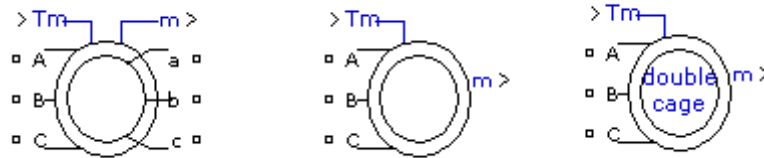


Figure III.5 Le bloc Machine asynchrone implémenté dans Simulink

Le bloc Machine asynchrone implémente une machine asynchrone triphasée (rotor bobiné, cage d'écureuil simple ou cage d'écureuil double). Il fonctionne en mode générateur ou en mode moteur. Le mode de fonctionnement est dicté par le signe du couple mécanique :

- Si T_m est positif, la machine agit comme un moteur.
- Si T_m est négative, la machine fait office de générateur.

La partie électrique de la machine est représentée par un modèle d'espace d'état du quatrième ordre (ou sixième ordre pour la machine à double cage d'écureuil), et la partie mécanique par un système du second ordre. Toutes les variables et paramètres électriques sont référés au stator, indiqués par les signes premiers dans les équations de la machine suivantes. Toutes les quantités de stator et de rotor sont dans le cadre de référence arbitraire à deux axes (image dq). Les indices utilisés sont définis dans ce tableau.

Les paramètres du bloc Machine asynchrone sont définis comme suit (toutes les grandeurs sont référées au stator).

Paramètres Commun	Définition
R_s, L_{ls}	Stator résistance and leakage inductance
L_m	Magnetizing inductance
L_s	Total stator inductance
V_{qs}, i_{qs}	q axis stator voltage and current
V_{ds}, i_{ds}	d axis stator voltage and current

Paramètres Commun	Définition
ϕ_{qs}, ϕ_{ds}	Stator q and d axis fluxes
ω_m	Angular velocity of the rotor
Θ_m	Rotor angulaire position
P	Numbers of pole pairs
ω_r	Electrical angular velocity ($\omega_m \times p$)
Θ_r	Electrical rotor angular position ($\Theta_m \times p$)
T_e	Electromagnetic torque
T_m	Shaftmechanical torque
J	Combined rotor and load inertia coefficient. Set to infinite to simulate locked rotor.
H	Combined rotor and load inertia constant. Set to infinite to simulate locked rotor.
F	Combined rotor and load viscous friction coefficient

Parameters Specific to Single-Cage or Wound Rotor	Definition
L'_r	Total rotor inductance
R'_r, L'_{lr}	Rotor resistance and leakage inductance
V'_{qr}, i'_{qr}	q axis rotor voltage and current
V'_{dr}, i'_{dr}	d axis rotor voltage and current
ϕ'_{qr}, ϕ'_{dr}	Rotor q and d axis fluxes

Parameters Specific to Double-Cage Rotor	Définition
R'_{r1}, L'_{lr1}	Rotor resistance and leakage inductance of cage 1
R'_{r2}, L'_{lr2}	Rotor resistance and leakage inductance of cage 2
L'_{r1}, L'_{r2}	Total rotor inductances of cage 1 and 2
i'_{qr1}, i'_{qr2}	q axis rotor current of cage 1 and 2
i'_{dr1}, i'_{dr2}	d axis rotor current of cage 1 and 2
ϕ'_{qr1}, ϕ'_{dr1}	q and d axis rotor fluxes of cage 1
ϕ'_{qr2}, ϕ'_{dr2}	q and d axis rotor fluxes of cage 2

Tableau III.2 Les paramètres du bloc Machine asynchrone

III.7.1 Boîte de dialogue et paramètres

Nous pouvons choisir entre deux blocs Machine asynchrone pour spécifier les paramètres électriques et mécaniques du modèle, en utilisant la boîte de dialogue Unités pu ou la boîte de dialogue SI. Les deux blocs modélisent le même modèle de machine asynchrone.

III.7.2 Modèle prédéfini

Pour les machines à cage d'écureuil unique, fournit un ensemble de paramètres électriques et mécaniques prédéterminés pour diverses puissances nominales de machine asynchrone (HP), tension phase-phase (V), fréquence (Hz) et vitesse nominale (tr / min). Pour rendre ce paramètre disponible, définissez le paramètre Type de rotor sur Cage d'écureuil et cliquez sur Appliquer.

Sélectionnez l'un des modèles prédéfinis pour charger les paramètres électriques et mécaniques correspondants dans les entrées de la boîte de dialogue. Les modèles prédéfinis n'incluent pas de paramètres de saturation prédéterminés.

Sélectionnez Non si vous ne souhaitez pas utiliser de modèle prédéfini ou si vous souhaitez modifier certains des paramètres d'un modèle prédéfini.

Lorsque vous sélectionnez un modèle prédéfini, les paramètres électriques et mécaniques de l'onglet Paramètres de la boîte de dialogue deviennent non modifiables (non disponibles). Pour partir d'un modèle prédéfini donné puis modifier les paramètres de la machine :

1. Sélectionnez le modèle prédéfini dont vous souhaitez initialiser les paramètres.
2. Changez la valeur du paramètre de modèle prédéfini sur Non. Cela ne change pas les paramètres de la machine. Ce faisant, vous rompez simplement la connexion avec le modèle prédéfini particulier.
3. Modifiez les paramètres de la machine comme vous le souhaitez, puis cliquez sur Appliquer.

III.7.3 Entrée mécanique

Le couple appliqué à l'arbre ou la vitesse du rotor comme entrée Simulink du bloc, pour représenter l'arbre de la machine par un port mécanique rotatif Simscape.

Torque T_m pour spécifier une entrée de couple, en N.m ou en pu, et changez l'étiquetage de l'entrée de bloc en T_m . La vitesse de la machine est déterminée par l'inertie machine J (ou constante d'inertie H pour la machine pu) et par la différence entre le couple mécanique appliqué T_m et le couple électromagnétique interne T_e . La convention de signe pour le couple mécanique est la suivante : lorsque la vitesse est positive, un signal de couple positif indique le mode moteur et un signal négatif indique le mode générateur.

Vitesse w pour spécifier une entrée de vitesse, en rad / s ou en pu, et changez l'étiquetage de l'entrée de bloc en w . La vitesse de la machine est imposée et la partie mécanique du modèle (Inertie J) est ignorée. L'utilisation de la vitesse comme entrée mécanique permet de modéliser un couplage mécanique entre deux machines.

La figure suivante indique comment modéliser une interconnexion d'arbre rigide dans un groupe électrogène lorsque le couple de frottement est ignoré dans la machine 2. La sortie de vitesse de la machine 1 (moteur) est connectée à l'entrée de vitesse de la machine 2 (générateur), tandis que la machine La sortie de couple électromagnétique T' est appliquée à l'entrée de couple mécanique T_m de la machine 1. Le facteur KW prend en compte les unités de vitesse des deux machines (pu ou rad / s) et le rapport de boîte de vitesses w_2 / w_1 . Le facteur KT prend en compte les unités de couple des deux machines (pu ou N.m) et les valeurs nominales de la

machine. De plus, comme l'inertie J_2 est ignorée dans la machine 2, J_2 référencé à la vitesse de la machine 1 doit être ajouté à l'inertie de la machine 1 J_1 .

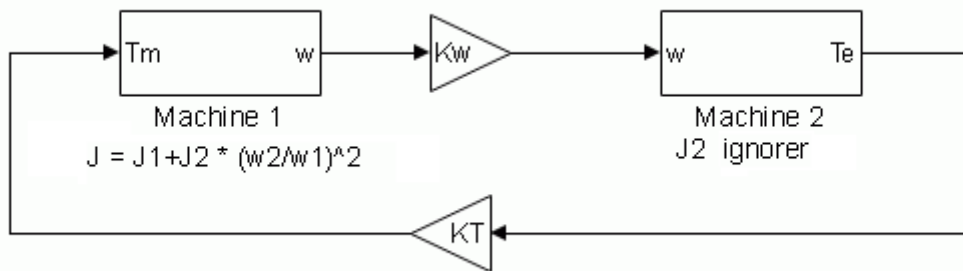


Figure III.6 interconnexions d'arbre rigide dans un groupe électrogène

III.7.4 Limites

Le bloc Asynchrone Machine n'inclut pas de représentation de la saturation des flux de fuite. Vous devez être prudent lorsque vous connectez des sources idéales au stator de la machine. Si vous choisissez d'alimenter le stator via une source de tension infinie triphasée connectée en Y, vous devez utiliser trois sources connectées en Y. Cependant, si vous choisissez de simuler une connexion source triangle, vous ne devez utiliser que deux sources connectées en série.

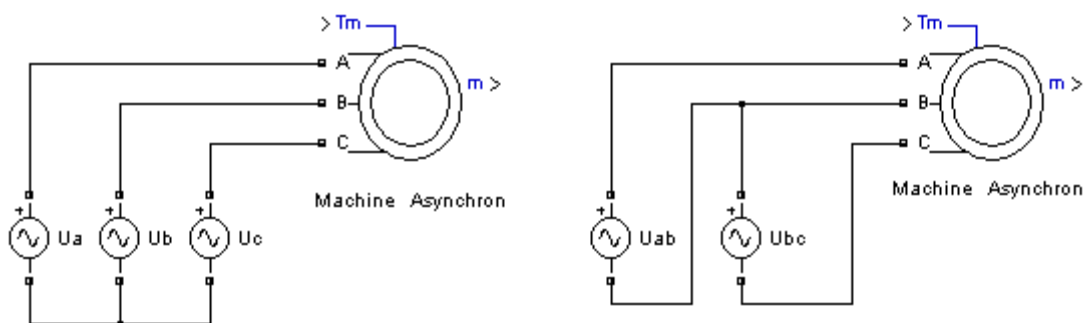


Figure III.7 Différente alimentations du bloc Asynchrone Machine

Lorsque on utilise des blocs de machine asynchrone dans des systèmes discrets, vous devrez peut-être utiliser une petite charge résistive parasite, connectée aux bornes de la machine, pour éviter les oscillations numériques. Des temps d'échantillonnage importants nécessitent des charges plus importantes. La charge résistive optimale est proportionnelle au

temps d'échantillonnage. Rappelez-vous qu'avec un pas de temps de $25 \mu\text{s}$ sur un système 60 Hz, la charge minimale est d'environ 2,5% de la puissance nominale de la machine. Par exemple, une machine asynchrone de 200 MVA dans un réseau électrique discrétisé avec un temps d'échantillonnage de $50 \mu\text{s}$ nécessite environ 5% de charge résistive ou 10 MW. Si le temps d'échantillonnage est réduit à $20 \mu\text{s}$, une charge résistive de 4 MW est suffisante.

III.8 Resultat des simulation

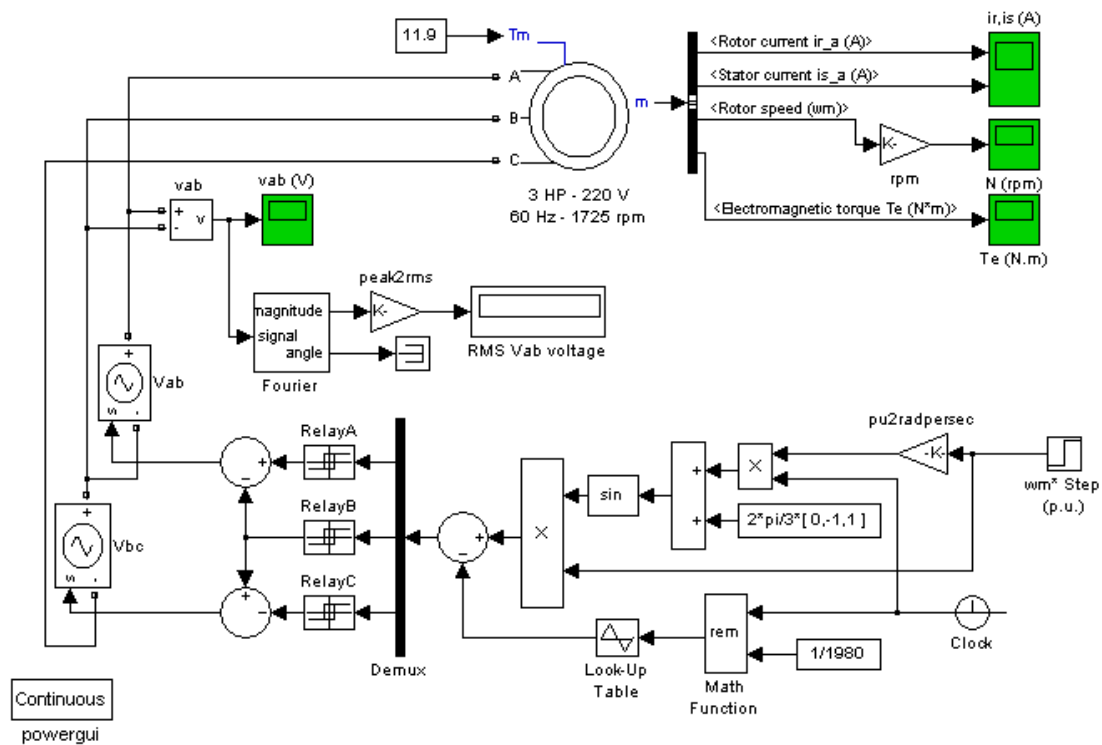
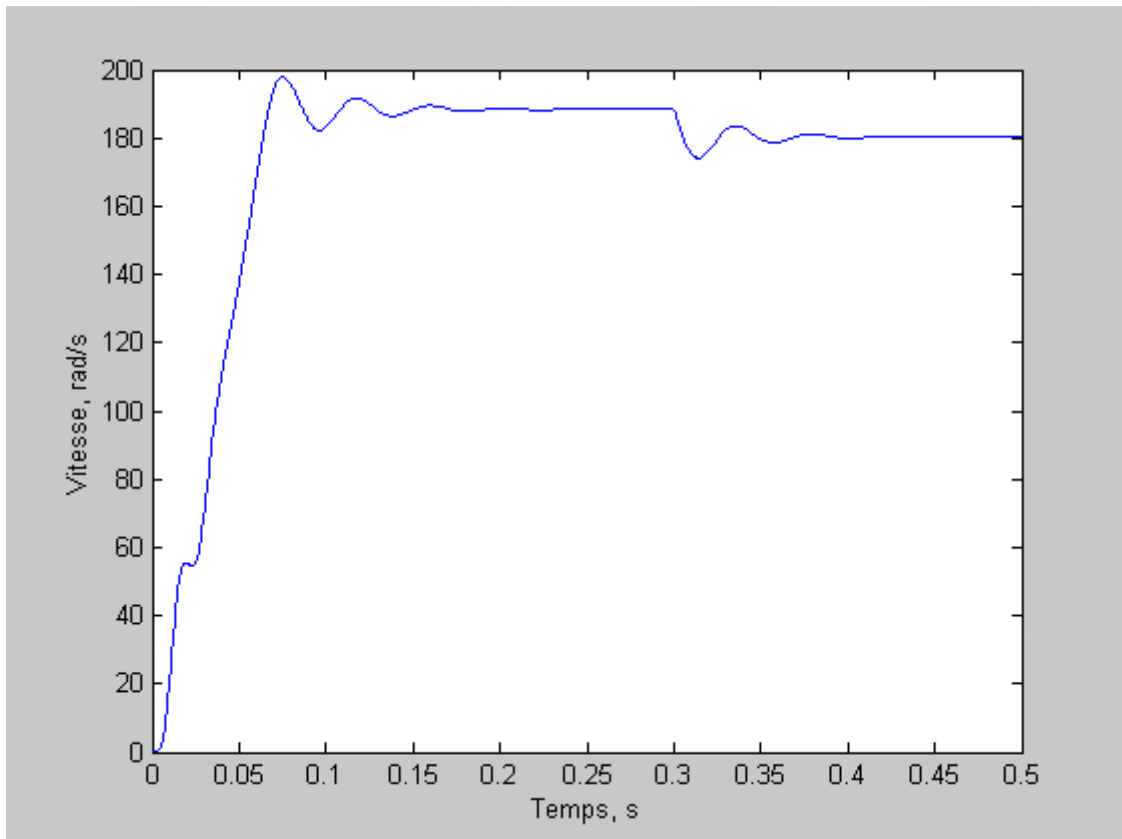
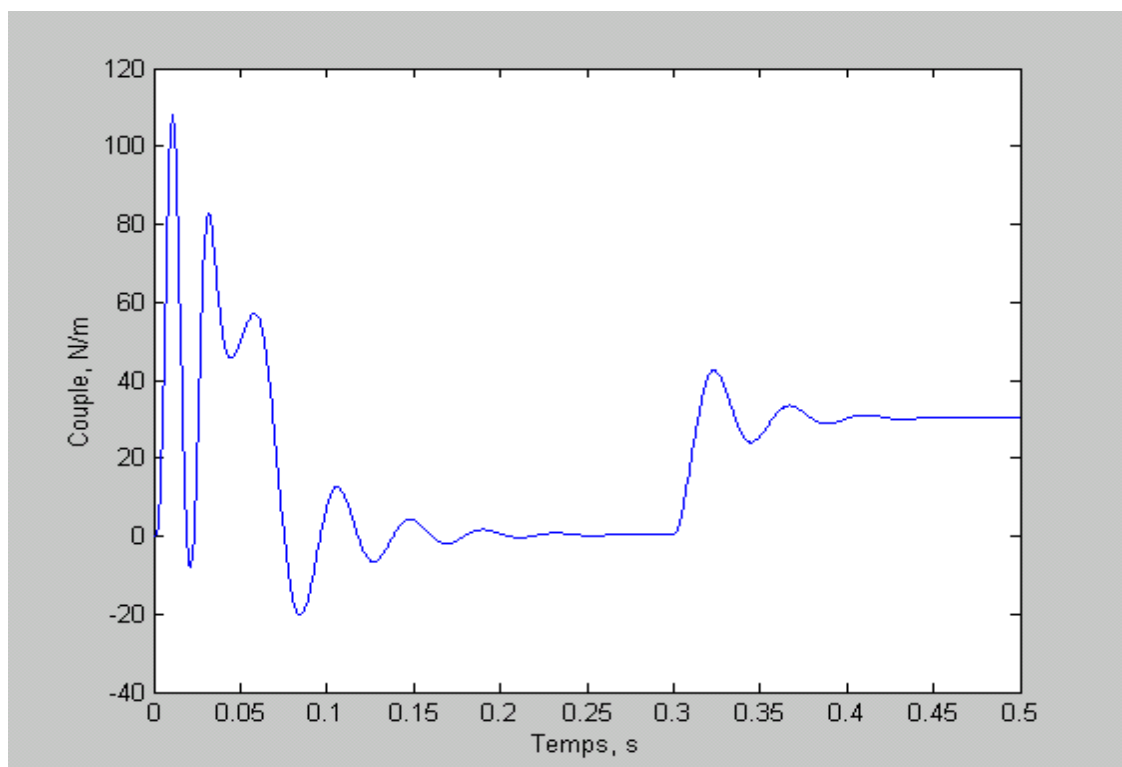


Figure III.8 Modèle Simulink du moteur asynchrone et des différentes sorties de visualisation des résultats

Dans les paramètres de simulation, une petite tolérance relative est requise en raison de la vitesse de commutation élevée de l'onduleur. La simulation est exécutée et observée ainsi que la vitesse et le couple de la machine.

La figure 8 montre les résultats de la simulation du processus de démarrage à vide du moteur asynchrone suivi de l'application d'une charge de 30 Nm à l'instant 0.3 s. Les figures 4.a,4b,4c,4d, représentent respectivement les courbes de la vitesse, le couple électromagnétique, du courant statorique et de la tension statorique.

**Figure III.a** Vitesse**Figure III.b** Couple électromagnétique

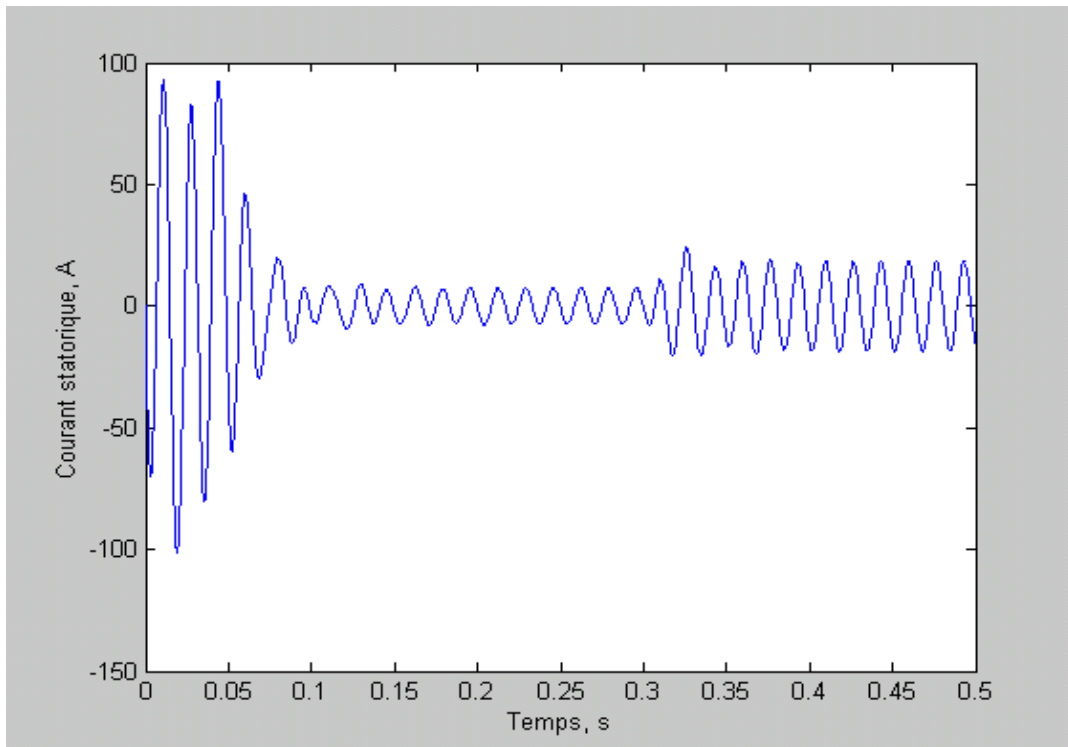


Figure III.c Courant statorique

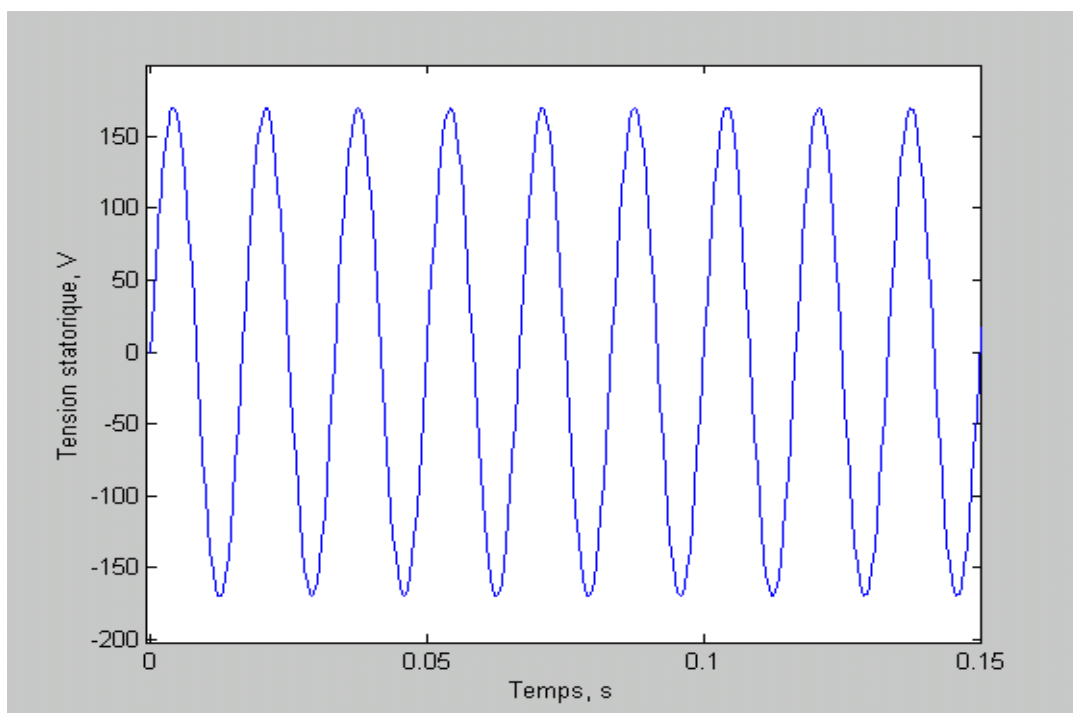


Figure III.d Tension statorique

Figure III.9 (les figure a, b, c ,d) Résultats de la simulation du processus de démarrage du moteur asynchrone

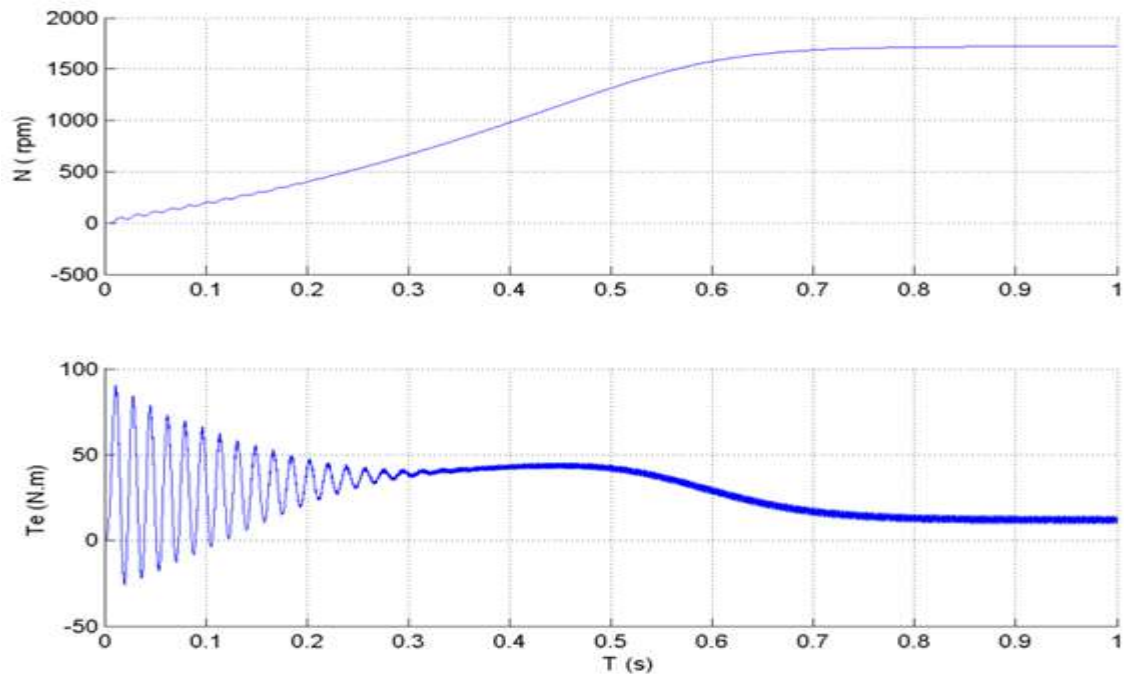


Figure III.10 Résultats de la simulation couple puissance du moteur asynchrone

Le premier graphique montre la vitesse de la machine allant de 0 à 1725 tr / min (1,0 pu). Le deuxième graphique montre le couple électromagnétique développé par la machine. Le stator étant alimenté par un onduleur PWM, un couple bruyant est observé. Cependant, ce bruit n'est pas visible dans la vitesse car il est filtré par l'inertie de la machine, mais il est visible dans les courants statoriques et rotoque

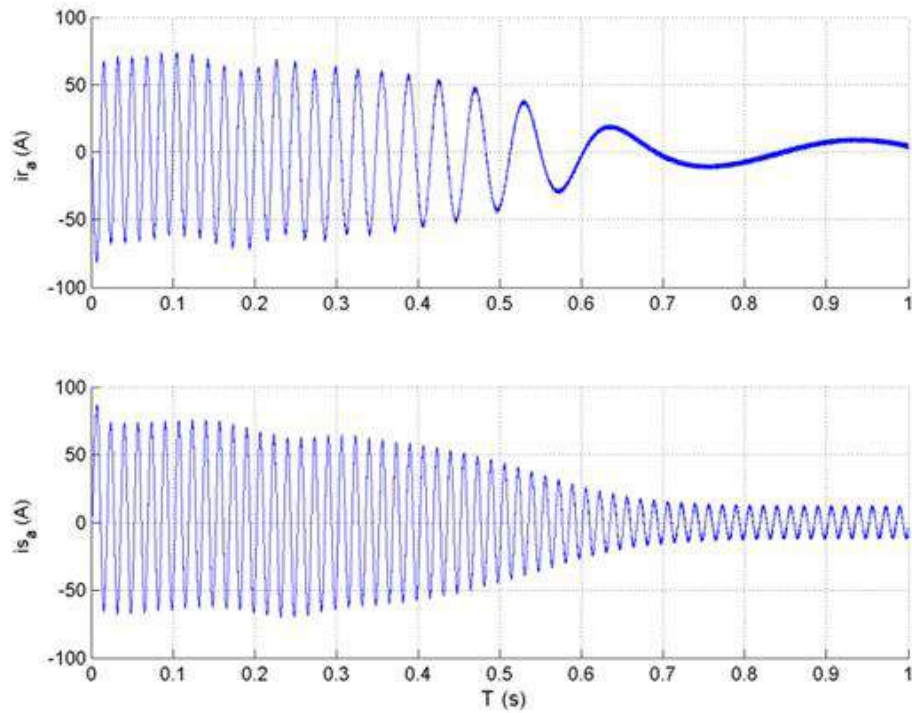


Figure III.11 Résultats de la simulation courant rotorique et statorique du moteur asynchrone

Regardez la sortie de l'onduleur PWM. Comme rien d'intéressant ne peut être vu à l'échelle de temps de simulation, le graphique se concentre sur les derniers instants de la simulation.

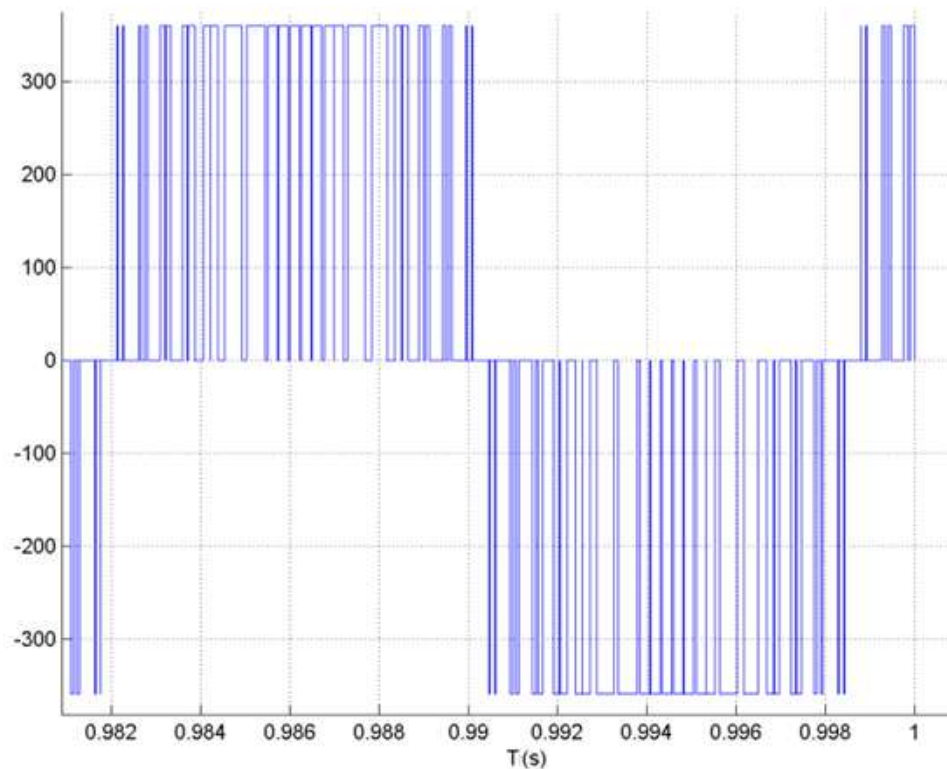


Figure III.12 La simulation `power_asm_sat` illustre l'effet de la saturation du bloc Asynchrone Machine.

Deux moteurs triphasés identiques (50 CV, 460 V, 1800 tr / min) sont simulés, avec et sans saturation, pour observer les effets de saturation sur les courants statoriques. Deux simulations différentes sont réalisées dans l'exemple.

La première simulation est le test en régime permanent sans charge. Ce tableau contient les valeurs des paramètres de saturation et les mesures obtenues en simulant différents points de fonctionnement sur le moteur saturé (à vide et en régime permanent).

Le graphique suivant (III.13) illustre ces résultats et montre la précision du modèle de saturation. Les points de fonctionnement mesurés correspondent bien à la courbe tracée à partir des données des paramètres de saturation.

Vous pouvez observer les autres effets de la saturation sur les courants statoriques en exécutant la simulation avec un rotor bloqué ou avec de nombreuses valeurs différentes de couple de charge

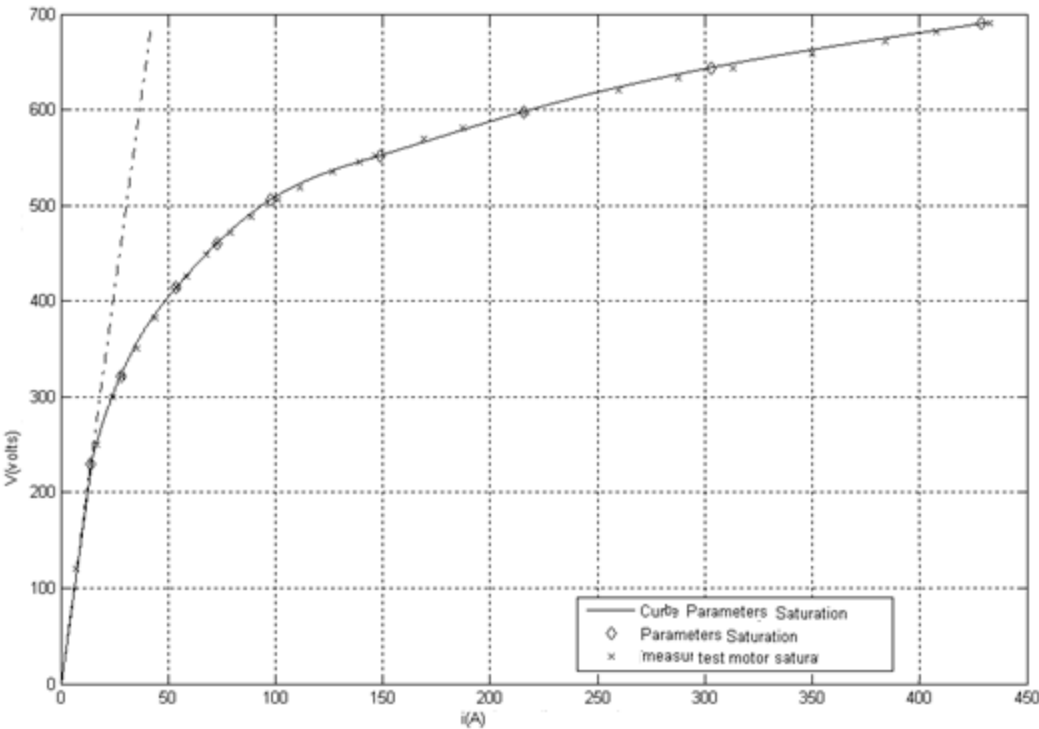


Figure III.13 Résultats de la simulation de la vitesse en fonction du courant rotorique du moteur asynchrone

III.9 CONCLUSION

Nous avons présenté à travers ce chapitre, la modélisation et la simulation d'un moteur asynchrone à cage par le logiciel MATLAB/SIMULINK. Ceci a nécessité d'une part la modélisation numérique de différents composants déterminés dans SIMULINK, et d'autre part les effets de l'interaction de ces derniers les uns sur les autres. Un intérêt particulier a été consacré à l'étude de la saturation du bloc machine et les spécifications des propriétés définies par notre volonté afin de voir les défauts résultants, puisque le modèle est fortement non linéaire.

Actuellement, la disponibilité de puissants outils informatiques de calcul permet de surmonter cette difficulté. Le processus de démarrage du moteur, suivi de l'application d'une charge entraînée a été modélisé et simulé. Les résultats obtenus démontrent la justesse du modèle développé. D'autres régimes de fonctionnement du moteur peuvent être facilement étudiés.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

L'objectif de notre étude était de modéliser et de simuler un moteur asynchrone à cage par le logiciel MATLAB/SIMULINK. Ce type de moteur s'est imposé dans l'industrie grâce à sa robustesse et sa simplicité de construction ; par contre sa simulation est difficile, car le modèle est fortement non linéaire. Actuellement, la disponibilité de puissants outils informatiques de calcul permet de surmonter cette difficulté. Le processus de démarrage du moteur, suivi de l'application d'une charge entraînée a été modélisé et simulé.

Ainsi les travaux présentés dans ce mémoire ont consisté aux développements d'un modèle décrivant les interactions entre les différents composants du système, pour cela il était nécessaire de coupler entre plusieurs équations régissant les phénomènes d'électrique et magnétique. Nous avons par la suite étudié le choix du raccordement.

Nous nous sommes intéressés principalement à l'élaboration des modèles numériques basés sur la méthode des plateformes de simulation permettant l'étude de la variation des caractéristiques courant tension et même de l'influence de la température. Au dernier lieu, nous avons présenté les résultats de la simulation du circuit de la commande et le circuit de puissance sous SIMULINK. Des tests expérimentaux ont montré un bon accord entre la simulation et la réalisation. Les résultats obtenus démontrent la justesse du modèle développé. D'autres régimes de fonctionnement du moteur peuvent être facilement étudiés.

L'élaboration de ce travail nous a permis d'approfondir nos connaissances théoriques dans le domaine de l'énergie électrique et sa production ainsi que l'énergie renouvelable, et acquérir des expériences au niveau de la modélisation et la simulation de ces systèmes. Acquérir une bonne expérience au niveau de la réalisation pratique dans le domaine des machines en général, mais aussi d'électronique de puissance et à la fin améliorer le fonctionnement du moteur asynchrone triphasé en utilisant la carte ARDUINO pour la commande MLI. Comme perspective nous proposons la réalisation d'un onduleur assisté, ainsi que la réalisation d'un onduleur triphasé en association avec des moteurs en vue de leur commande.

Bibliographie

[01] DidierG.

``Modélisation et diagnostic de la machine asynchrone en présence de défaillances``
Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy-I, France, 2004

[02] Ondel O.

`` Diagnostic par reconnaissance des formes : Application a un ensemble convertisseur – machine asynchrone``
Thèse de Doctorat, Ecole centrale de Lyon, France, 2006

[03] E. Schaeffer.

`` Diagnostic des machines asynchrones : modèles et outils paramétriques dédiés à la simulation et à la détection des défauts ``
Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Nantes, 1999

[04] L. Kerszenbaum et C. F. Landy.

`` The existence of large inter bar currents in the three phase squirrel cage motors with rotor-bar and en-ring faults``
IEEE Transactions on Power ApparatusSystems, Vol. PAS-103, n°7, pp.1854-1862, July 1984

[05] AbdelghaniChahmi.

``Identification paramétrique de la machine asynchrone dédiée au diagnostic`` .
Energie électrique. université des sciences et technologie d'Oran -MB 2017. Français.

[06] A.Khatir.

`` Etude comparative des modèles des MAS utilisé en diagnostic des pannes``
Mémoire de magister, université Ferhat Abbas-Sétif ,20008

[07] P.O'Donnell.

`` Report of Large Reliability Survey of Industrial and Commercial Installations``
IEEE Transaction on Industry Applications, Vol. IA-21, Part 1, N°4, PP. 853-864, 1985

[08] EPRI.

`` Improved Motors for Utility Applications``
Final report Publication EL-2678, Vol. 1, EPRI, 1763-1, 1982

[09] O. V. Thorsen, M. Dalva.

`` Failure Identification and Analysis for High Voltage Induction Motors in the PetrochemicalIndustry ``
IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 35, N°4, PP. 810-818, August 1999

[10] Allianz.

``Présentation des Avaries. Machines Electriques Tournantes``
Cahier des préventions, CP2, 1988

[11] A. Ibrahim.

``Contribution au Diagnostic de Machines Electromécaniques: Exploitation des Signaux Electriques et de la Vitesse Instantanée``
Thèse de Doctorat, Université de Saint Etienne, France, 2009

[12] M.E. Tabbache.

``Détection des défauts mécaniques par l'analyse des Signaux d'alimentation des moteurs asynchrones``
Thèse de doctorat, Nancy, Juillet 2002

[13] A. H. Bonnett.

``Cause and Analysis of Anti-Friction Bearing Failures in AC Induction Motors``
IEEE Conference Publications, Pulp and Paper Industry Technical Conference, PP. 36-46, 1993

[14] O. V. Thorsen, M. Dalva.

``A Survey of Fault on Induction Motors in Offshore Oil Industry, Petrochemical Industry, Gas Terminals, and Oil Refineries``
IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 31, N°5, PP. 1186-1196, September 1995

[15] B. Vaseghi.

``Contribution à l'Etude des Machines Electriques en Présence de Défaut Entre-Spires Modélisation-Réduction du Courant de Défaut``
Thèse de Doctorat, Université de Nancy, France, 2009

[16] M. Blödt, P. Granjon, B. Raison, G. Rostaing.

``Models for Bearing Damage Detection in Induction Motors Using Stator Current Monitoring``
IEEE Transactions on Industry Electronics, Vol. 55, N°4, PP. 1813-1822, 2008

[17] E. T. Esfahani, S. Wang, V. Sundararajan.

``Multisensor Wireless System for Eccentricity and Bearing Fault Detection in induction Motors``
IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol. 19, N°3, PP. 818-826, 2014

[18] A. H. Bonnett, G.C. Soukup.

``Cause and Analysis of Stator and Rotor Failures in Three-Phase Squirrel-Cage Induction Motors``
IEEE Trans. On industry Applications, Vol. 28, No. 4, July/ August 1992, pp.921-937, 1992

[19] M. Bouzid, G. Champenois.

``An Efficient, Simplified Multiple-Coupled Circuit Model of the Induction Motor Aimed to Simulate Different Types of Stator Faults``
Elsevier, Journal of Mathematics and Computers in Simulation, Vol. 90, PP 98-115, 2013

[20] M. Sahraoui.

`` Etude Comparative des Méthodes de Diagnostic des Machines Asynchrones``
Thèse de Doctorat, Université de Biskra, Algérie, 2010

[21] T. M. Wolbank, P. Macheiner.

`` Comparison of Different Methods to Detect Static Air Gap Asymmetry in Inverter Fed Induction Machines``
IEEE Conference Publications, 7th International Conference on Power Electronics and Drive Systems PEDS'07, 27-30 Nov. 2007 Bangkok, Thailand, PP. 675-680, 2007

[22] A. Ceban.

`` Méthode Globale de Diagnostic des Machines Electriques``
Thèse de Doctorat, Université d'Artois, Laboratoire Systèmes Électrotechniques et Environnement, France, 2012

[23] U. Werner.

`` FE-Analysis of a Soft-Mounted Two-Pole Induction Motor Regarding Relative Shaft Vibration Caused by Static Rotor Eccentricity ``
IEEE Conference Publications, International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM), Sorrento, Italy, PP. 1448-1445, 2012

[24] J. Faiz, B. M. Ebrahimi, H. A. Toliyat.

`` Effect of Magnetic Saturation on Static and Mixed Eccentricity Fault Diagnosis in Induction Motor``
IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 45, N°8, PP. 3137- 3144, 2009

[25] D. G. Dorrell, W. T. Thomson, S. Roach.

"Analysis of Airgap Flux, Current, and Vibration Signals as a Function of the Combination of Static and Dynamic AirgapEccentricityin 3-Phase Induction Motors"
IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 33, N°1, PP. 24-34, 1997

[26] H. A. Toliyat, T. A. Lipo.

`` Transient Analysis of Cage Induction Machines under Stator, Rotor Bar and Ring Faults``
IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 10, N°2, PP. 241-247, 1995

[27] M. Y. Kaikaa, M. Hadjami.

``Effects of the Simultaneous Presence of Static Eccentricity and Broken Rotor Bars on the Stator Current of Induction Machine``
IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 61, N°5, PP. 2452-2463, 2014

[28] F. Filippetti, G. Franceschini, C. Tassoni, P. Vas.

`` AI Techniques in Induction Machines Diagnosis Including the Speed Ripple Effect``
IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 34, N°1, PP. 98-108, 1998

[29] O.Wallmark.

`` Control of Permanent-Magnet Synchronous Machines in Automative ``
Thèse Doctorat, Goteborg, Sweden 2006

[30] A. Bouzida and M.A. Boumaza.

`` Diagnostic de défauts au rotor par l'approche de l'estimation paramétrique ``.
PFE, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, 2005.

[31] Boumegoura.

`` Recherche de signature électromagnétique des défauts dans une machine asynchrone et synthèse d'observateurs en vue du diagnostic »
Thèse, Ecole centrale de Lyon, France, 2001.

[32] D. Ichalal.

`` Estimation et diagnostic de systèmes non linéaires ``
Thèse de doctorat, INPL Nancy, 2009.

[33] S. Moreau.

`` Contribution à la modélisation et l'estimation paramétrique des machines électriques à courant alternatif : Application au diagnostic ``
Thèse de doctorat ENSIP Poitiers, 1999.

[34] F. Morand.

`` Techniques d'observation sans capteur de vitesse en vue de la commande des machines asynchrone ``
Thèse de doctorat, Ecole doctorale de Lyon, 2005.

[35] T. B. De Fornel, J. Louis.

`` Identification et observation des actionneurs électriques 2 ``,
Edition Hermès-Lavoisier, 2007.

[36] A. Benchaib.

`` application des modes de Glissement pour la Commande en Temps réel de la machine Asynchrone ``
Thèse de doctorat, Université de Picardie Jules Vernes 1998.

[37] R. Fiser, S. Ferkolj.

`` Modelling of dynamic performance of induction machine with rotor faults ``
ICEM Proceedings, No. 1, 10-12 September 1992, pp. 17-22, 1996
