

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Mohamed Seddik Ben Yahia - Jijel
Faculté des Sciences et de la Technologie



جامعة محمد الصديق بن يحيى - جيجل
كلية العلوم والتكنولوجيا

Département D'Électrotechnique

Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du diplôme

Master en Electromécanique

Option : Electromécanique

Thème

Étude des défauts statoriques, rotoriques et déséquilibre de tension
Dans la machine asynchrone

Par :

Mr / Boucheloukh Taqiyeddine

Mr / Chiba Ishak

Tavail proposé et dirigé par :

Mr / Boukhenaf Messaoud

Promotion 2020

Université Mohamed Seddik Ben Yahia - Jijel
PB 98, Ouled Aissa. 18000. Algérie. Tél : +213 34 50 11 89
<http://www.univ-jijel.dz>

Remerciements

D'abord, nous devons grâce à Dieu qui nous a comblées de ses bienfaits et nous a données la force pour accomplir ce travail.

*J'exprime ma profonde gratitude et ma reconnaissance
envers Monsieur **boukhenaf Messaoud***

*Mon encadreur pour ses conseils précieux, sa disponibilité
et sa patience.*

*J'aurais également le plaisir de présenter mes chaleureux
remerciements au membre du jury*

*D'avoir bien voulu assister à la soutenance de mémoire et
d'accepter de juger mon travail.*

A mes chers parents
A toute ma famille
Mes amis

Sommaire

Introduction Générale	1
Chapitre I -Les défauts des machines électriques	3
I.1 Introduction.....	4
I.2 Constitution de la machine asynchrone	4
a) Le stator	5
b) Le Rotor.....	6
c) Organes mécaniques.....	7
I.3 Etude statistique	7
I.4. Les défauts externes de la machine asynchrone	9
I.4.1 Déséquilibre de la tension d'alimentation	10
a. Causes & effets	11
b. Les indices de déséquilibre.....	12
I.5. Les défauts internes de la machine asynchrone	14
I.5.1. Défaut d'ordre mécanique.....	15
I.5.1.1 Défaillances du flasque.....	15
I.5.1.2 Défaillances de l'arbre.....	16
I.5.1.3 Défaillances des roulements mécaniques.....	16
I.5.1.4 Excentricité.....	18
I.5.2 Défauts d'ordre électriques.....	22
I.5.2.1 Défauts statoriques	22
I.5.2.1.1 Signature fréquentielle de court-circuit au niveau du stator.....	24

1.5.2.2 Défaits rotoriques	25
1.5.2.2 Signature de rupture de barre rotorique.....	26
I.6 CONCLUSION.....	28
Chapitre II- Modèles de la Machine à Induction.....	29
II.1 Introduction.....	30
II.2 Généralité sur la Modélisation des machines asynchrones.....	31
II.2.1 Méthodes de modélisation des machines asynchrone.....	31
II.2.1.1 Modèles physiques.....	31
II.2.1.1.1 Méthode des éléments finis (MÉF)	31
II.2.1.1.2 Méthode des réseaux de perméances (RNM)	32
II.2.1.1.3 Modélisation analytique par CEMC (CEMC-A)	32
II.2.1.1.4 Modélisation de Modèle à circuits internes équivalents (CIE)	33
II.2.1.1.5 Méthode des circuits électriques magnétiquement couplés (CEMC)	33
II.2.1.2 Les modèles comportementaux.....	33
II.2.1.2.1 Modèles basés sur l'estimation paramétrique	34
II.2.1.2.2 Modèle basé sur la reconnaissance des formes.....	34
II.2.2 Comparaison des méthodes de modélisation	34
II.3 Modélisation de la machine asynchrone.....	36
II.3.1 Hypothèse simplificatrices	36
II.3.2 Modélisation de la MAS dans le plan triphasé abc.....	37
II.3.3 Équations générales de la machine asynchrone triphasée.....	37
II.3.5 Transformation de Park appliquée à la Machines asynchrone.....	41
II.3.6 Transformation des grandeurs statoriques et rotorique.....	42
II.3.7 Modèle de la machine dans le repère qd0.....	43
II.3.8 Réduction de la matrice des inductances.....	44

II.5	Modèle de la machine en présence de défaut des barres cassées.....	48
II.6	Modèle de la machine en présence de défaut de stator (court-circuit)...	50
II.7	déséquilibre de la tension.....	53
II.7.1	Commission électrotechnique internationale (CEI).....	54
II.7.2	Approximation du déséquilibre dans un réseau.....	54
II.7.3	Niveaux de compatibilité.....	55
II.8	Conclusion.....	55
 Chapitre III-Simulation de la machine asynchrone		56
III.1	Introduction.....	57
III.2	Paramètre de la machine étudiée	57
III.3	Schéma bloc du model dans l'environnement Matlab Simulink.....	57
III.4	la machine asynchrone à l'état sain.....	59
	a) La vitesse.....	59
	b) Couple électromagnétique	59
	c) Les courants statoriques	60
III.5	la machine asynchrone en présence de défaut.....	61
III.5.1	Courbe de la vitesse en fonction du temps durant le régime transitoire.....	61
	a) Cas de défaut de déséquilibre de tension.....	61
	b) Cas de défaut de court-circuit entre spire	64
	c) Cas de défaut des barres cassées.....	65
III.5.2	sélection des défauts d'après la courbe de la vitesse en régime transitoire.....	66
III.6	Conclusion.....	67
Conclusion générale.....		68

Bibliographie..... 70

Symboles et notations

Symboles et notations

MAS	Machine asynchrone
f	Fréquence d'alimentation
i_s^{dq0}	Courant statorique suivant l'axe q, d ou o
r_s	Désigne les résistances par phase du stator
r_r	Désigne les résistances par phase du rotor
V_s^{abc}	Le vecteur de tension statorique
V_r^{abc}	Le vecteur de tension rotoriques
ϕ_s^{abc}	Le vecteur de flux statorique
ϕ_r^{abc}	Le vecteur de flux rotoriques
i_s^{abc}	Le vecteur de courant rotoriques
i_r^{abc}	Le vecteur de courant rotoriques
L_{ss}^{abc}	L'inductance propre d'une phase statorique
L_{rr}^{abc}	L'inductance propre d'une phase rotoriques
L_{sm}	L'inductance mutuelle entre phase statorique
L_{rm}	L'inductance mutuelle entre phase rotoriques
L_{sr}	L'inductance mutuelle entre phase statorique et rotoriques
L_{ls}	La réactance de fuite du stator
L_{lr}	La réactance de fuite du rotor
Lm	La réactance magnétique du stator en ohm
P_{in}	La puissance à l'entrée de la machine
P_{em}	Puissance électromagnétique transmis au rotor
P_{loss}	La puissance de perte dans le cuivre
P_{mm}	Taux d'échange d'énergie du champ magnétique entre les Enroulements
θ	Position angulaire du stator
ω	Pulsation électrique du système d'axe dqo
ω_r	Pulsation électrique rotorique
T_{load}	Le couple mécanique applique par la charge
T_{qd0}	La matrice de transformation $qd0$
$\frac{d\phi}{dt}$	Taux d'échange du champ magnétique entre les enroulements
ω_{rm}	La vitesse de rotation mécanique et électrique du rotor
p	Le nombre de pair de pôles

Symboles et notations

f_{cc}	Fréquence de court-circuit
g	Le glissement
f_s	Fréquence statorique
f_r	Fréquence rotorique
l_{ss}^{abc}	Matrice d'inductance propre du stator
l_{rr}^{abc}	Matrice d'inductance propre du rotor
l_{sr}^{abc}	Matrice d'inductance Mutuelle stator-rotor
l_{rs}^{abc}	Matrice d'inductance Mutuelle rotor-stator
V_{moy}	Tension moyenne de ligne
k_v	Facteur de déséquilibre de tension
H	Constant d'inertie
N_b	Le nombre de barres total
n_{bb}	Le nombre de barres cassées
g_s^{abc}	Pourcentage des enroulements restants de stator non court-circuité en phase statoriques abc
N_s :	Nombre de spire équivalent d'enroulements statoriques
V_n et V_p	Tension de séquence négative et positive respectivement
V_r , V_b et V_y	tension de ligne du déséquilibre de tension

Liste des figures

<i>N°</i>	<i>Nom de figure</i>	<i>Page</i>
01	Fig. I. 1. <i>Eléments de constitution d'une machine asynchrone.....</i>	5
02	Fig. I. 2. <i>Photo d'une machine asynchrone avec le Stator et le Rotor qui la constituent.....</i>	5
03	Fig. I. 3. <i>Photo du stator d'une machine asynchrone.....</i>	6
04	Fig. I. 4. <i>Vu schématique du rotor.....</i>	7
05	Fig. I. 5. <i>Pourcentage des défauts par Thomson.....</i>	8
06	Fig. I. 6. <i>Pourcentage des défauts par bonnet</i>	8
07	Fig. I. 7. <i>Organigramme des défauts externes de la machine asynchrone triphasée à cage.....</i>	9
08	Fig. I. 8. <i>Les huit différents cas du déséquilibre de tension dans les machines asynchrones triphasé.....</i>	10
09	Fig. I. 9. <i>Forme d'onde des trois tensions statoriques avec un déséquilibre de tension de 20% sous tension-phase A (résultat de simulation).....</i>	11
10	Fig. I. 10. <i>Organigramme des défauts internes de défauts de la machine asynchrone triphasée à cage.....</i>	15
11	Fig. I. 11. <i>Vue d'un flasque de machine sans et avec bague.....</i>	16
12	Fig. I. 12 : <i>Vue éclatée des éléments constitutifs d'un roulement à billes.....</i>	17
13	Fig. I. 13. <i>Types d'excentricité : (a) statique ; (b) dynamique ; (c) mixte.....</i>	19
14	Fig. I. 14. <i>Spectre du courant statorique de l'excentricité statique avec $n = 1$, machine sain (gauche), machine excentrée (droite).....</i>	21
15	Fig. I. 15. <i>Spectre du courant statorique de l'excentricité statique avec $n = 3$, machine sain (gauche), machine excentrée (droite).....</i>	22
16	Fig. I. 16. <i>Différents court-circuit entre phases.....</i>	23

17	Fig. I. 17. <i>Différents court-circuit entre spires.....</i>	24
18	Fig. I. 18. <i>Les spectres du courant statorique à vide avec tension déséquilibré</i>	24
19	Fig. I. 19. <i>Défaut d'un rotor à cage d'écureuil :</i> <i>(a) rupture de barres ; (b) rupture d'anneau de Court-circuit.....</i>	25
20	Fig. I. 20. <i>Défaut de rupture de barres.....</i>	26
21	Fig. I. 21. <i>Analyse spectrale du courant statorique pour différentes cassures de barres.....</i>	27
22	Fig.II.1 <i>Les différentes méthodes de modélisation de la MAS.....</i>	31
23	Fig.II.2 <i>Comparaison entre Les différentes méthodes de modélisation.....</i>	35
24	Fig. II.3 <i>Comparaison entre les différentes approche de modélisation en fonction de précision et le temps d'exécution</i>	36
25	Fig. I.4 <i>Représentation schématique d'une machine asynchrone triphasée.....</i>	37
26	Fig. II.5 <i>Relation entre abc et qdo.....</i>	41
27	Fig. II.7 <i>Disposition générale d'un modèle de simulation du système électrique.....</i>	53
28	Fig. III.1 <i>schéma bloc de modèle de moteur.....</i>	58
29	Fig. III.2 <i>vitesse de rotation d'une machine asynchrone sain.....</i>	59
30	Fig.III.3 <i>couple électromagnétique d'une machine asynchrone sain.....</i>	59
31	Fig. III.4 <i>le courant statoriques i_{as} de la machine asynchrone sain.....</i>	60
32	Fig.III.5 <i>les courant statoriques i_{as} i_{bs} i_{cs} de la machine asynchrone sain.....</i>	60
33	Fig.III.6 <i>Tension d'alimentation triphasée avec $Kv=0$, $Kv=1\%$ et $Kv=5\%$.....</i>	62
34	Fig. III.7 <i>Variation de la Vitesse de rotation en fonction de déséquilibre de tension $kV=1\%$ (sous-tension et surtension)</i>	62
35	Fig. III.8 <i>variation de la Vitesse en fonction de déséquilibre de tension $kV=3\%$(sous-tension et surtension).....</i>	63
36	Fig. III.9 <i>variation de la Vitesse en fonction de déséquilibre de tension $kV=5\%$(sous-tension et surtension).....</i>	63

37	Fig. III.10 (a) <i>variation de la Vitesse de rotation en fonction de défaut de Court-circuit entre spire</i> (b) <i>zoom de la vitesse de rotation en régime transitoire</i>	64
38	Fig. III.11 (a) <i>Variation de la Vitesse de rotation en fonction de défaut des Barres Cassées au rotor</i> (b) <i>zoom de la vitesse de rotation en régime transitoire</i>	65
39	Fig. III.12. <i>Variation de la Vitesse de rotation en fonction des 3 défauts</i>	66

Liste des tableaux

N°	Nom du tableau	page
01	Tableau II.1 <i>Niveaux de compatibilité sur les réseaux industriels basse et moyenne tension.....</i>	55
02	Tableau III.1 <i>paramètres de la machine.....</i>	57
03	Tableau III.2 <i>Niveau de déséquilibre de tension.....</i>	61
04	Tableau.III.3 <i>Les type de défaut étudié avec leur niveau.....</i>	66

Introduction générale

Ces dernières années, la surveillance et le diagnostic des machines tournantes sont devenus un outil efficace pour détecter de façon précoce les défauts et en suivre l'évolution dans le temps. La maintenance des machines nécessite une bonne compréhension des phénomènes liés à l'apparition et au développement des défauts. Détecter l'apparition d'un défaut à un stade précoce et suivre son évolution présente un grand intérêt industriel. En effet, il existe un vaste choix de techniques de traitement de signal appliquées au diagnostic des machines mais l'opinion générale est que ces techniques ne sont pas suffisamment efficaces et fiables. L'intérêt économique de mettre en place une méthode automatique de maintenance prévisionnelle favorise les programmes de recherche en techniques de traitement du signal. L'analyse du spectre d'un signal peut nous aider à détecter l'apparition d'un défaut tandis que la décomposition de ce signal dans le temps peut nous fournir la nature et la position de ce défaut. Bien que ces techniques s'avèrent très utiles dans des cas simples et permettent la formulation rapide d'un pré-diagnostic, elles présentent par contre un certain nombre d'inconvénients qui peuvent conduire souvent à la formulation de diagnostics erronés. En pratique, les signatures vibratoires mesurées à l'aide de capteurs de vibration contiennent plusieurs composantes qui sont plus ou moins utiles à la caractérisation du signal, et rendent difficile l'interprétation des résultats issus de ces analyses. Face à cette complexité grandissante, la recherche scientifique s'est orientée vers l'utilisation des méthodes intelligentes qui permettent de représenter l'état de la machine dans un espace de grande dimension, pour faciliter la détermination de l'état de cette machine.

Ce mémoire s'articule autour de trois chapitres :

L'objectif de ce mémoire était Le premier chapitre est une entrée en la matière du diagnostic, commençant par un bref rappel sur la constitution technologique de la machine asynchrone à cage d'écuriel, l'étude statistique des défauts puis une exposition de classification des différents défauts internes et externes pouvant affecter chaque élément de cette machine. Nous terminons ce chapitre par une présentation bref d'une méthode et technique utilisées pour la détection de défauts.

Le deuxième chapitre traite la construction du modèle de la machine asynchrone à cage, afin de pouvoir rendre compte de son comportement, comprendre les phénomènes physiques régissant son fonctionnement. Et par la suite, nous introduisons les paramètres de disfonctionnement tels que déséquilibre de tension, les ruptures de barres rotoriques et le court-circuit entre spire.

Le troisième chapitre est dédié à l'exploitation du modèle par la simulation numérique dans l'environnement Matlab et par le traitement de ces résultats pour différentes conditions de fonctionnement, à l'état sain et défectueux, qui est l'objectif de notre travail.

Nous terminons ce mémoire par une conclusion générale portant sur l'ensemble du travail effectué et la proposition de perspectives de recherche pouvant être envisagées.

Chapitre I -Les défauts des machines électriques

I.1 INTRODUCTION

La présence de défauts entraîne des changements dans le comportement des machines. La surveillance de ces changements, à l'aide de signaux outils de traitement, permet d'évaluer la source et l'évolution d'une défaillance. En général, ce traitement est effectué dans des signaux de flux thermographique, vibratoire, acoustique, magnétique, de courant et de la tension. Une procédure très courante de détection des défauts dans les machines à induction est l'analyse de la signature du courant moteur(MCSA). Grâce à l'utilisation de technique(s) de traitement du signal, il permet de détecter différents types de défauts, tels que les casseurs barres du rotor, les Court-circuites dans les enroulements du stator et le désalignement des arbres, entre autres. Certaines techniques telles que la méthode de transformée de Fourier, transformée de Fourier de courte durée, densité spectrale de puissance, la transformée en ondelettes, le vecteur de Park et les composantes symétriques sont plus courantes pour la détection des défauts à l'aide de la méthode MCSA

Dans ce chapitre est une entrée en la matière du diagnostic, commençant par un bref rappel sur la constitution technologique de la machine asynchrone à cage d'écureuil, l'études statistiques des défauts puis une exposition de classification des différents défauts pouvant affecter chaque élément de cette machine (causes, effets). Nous terminons ce chapitre par une méthode et norme de détection de défauts.

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 intéressent de la machine asynchrone. Les éléments de constitution d'une machine asynchrone à cage d'écureuil sont illustrés dans la figure I.1 [1].

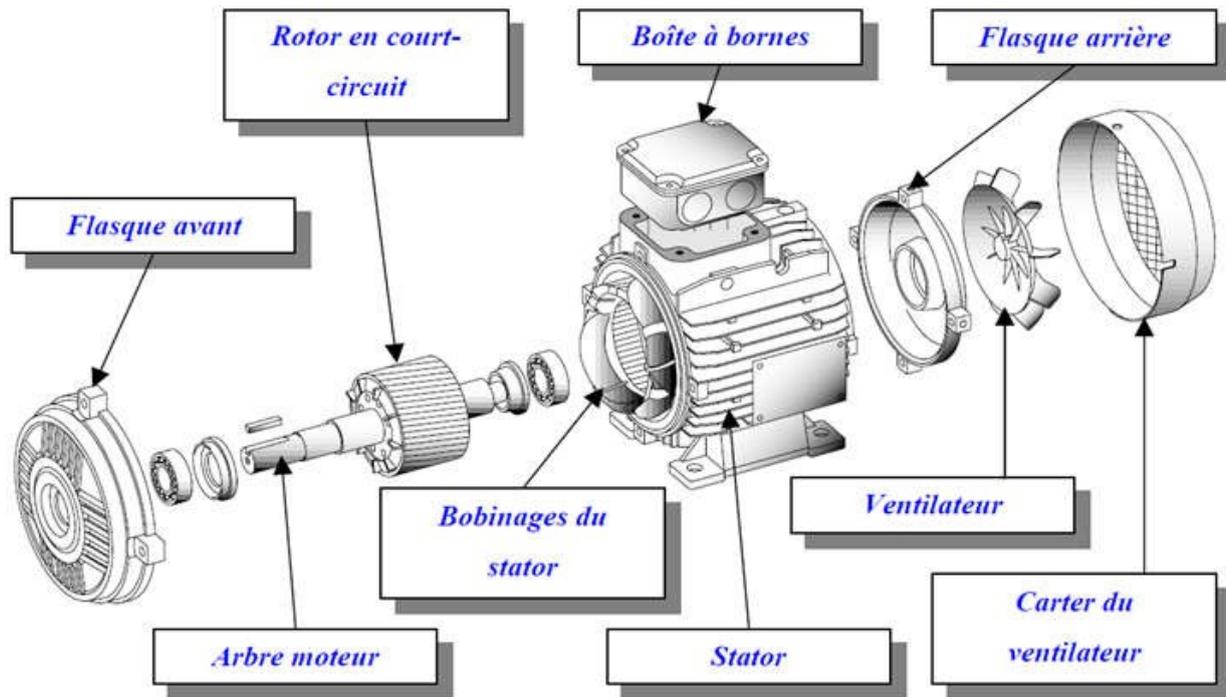


Fig. I. 1. Eléments de constitution d'une machine asynchrone

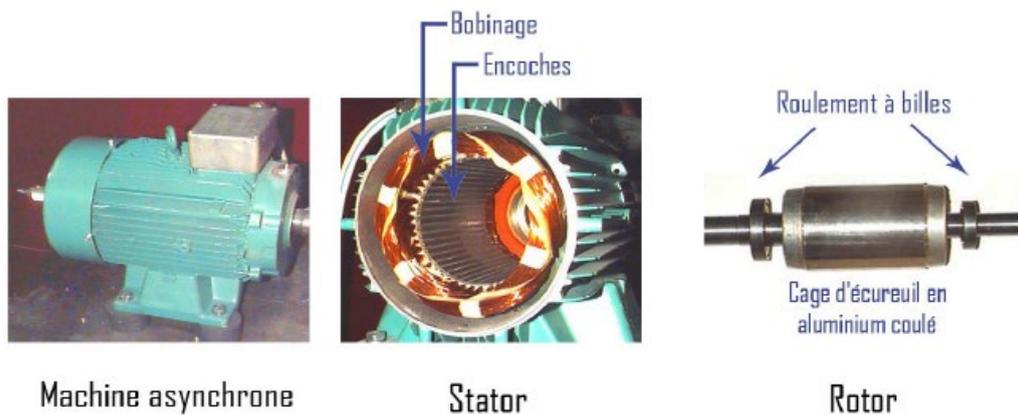


Fig. I. 2. Photo d'une machine asynchrone avec le Stator et le Rotor qui la constituent

a) Le stator

Le circuit magnétique est un empilement de tôles d'acier découpées, faisant apparaître les différentes encoches statoriques, on isole habituellement les tôles d'une mince couche Vernis ou de silicate de soude (figure I. 3).

Le bobinage statorique est constitué de deux Parties : les conducteurs d'encoches et les têtes de bobines. Les conducteurs d'encoches Permettent de créer dans l'entrefer le champ magnétique à l'origine de la conversion électromagnétique. Quant aux têtes de bobines elles permettent la fermeture des courants en organisant leur circulation, l'objectif étant d'obtenir une répartition des forces magnétomotrices et du flux la plus sinusoïdale possible dans l'entrefer, pour limiter les oscillations du couple électromagnétique

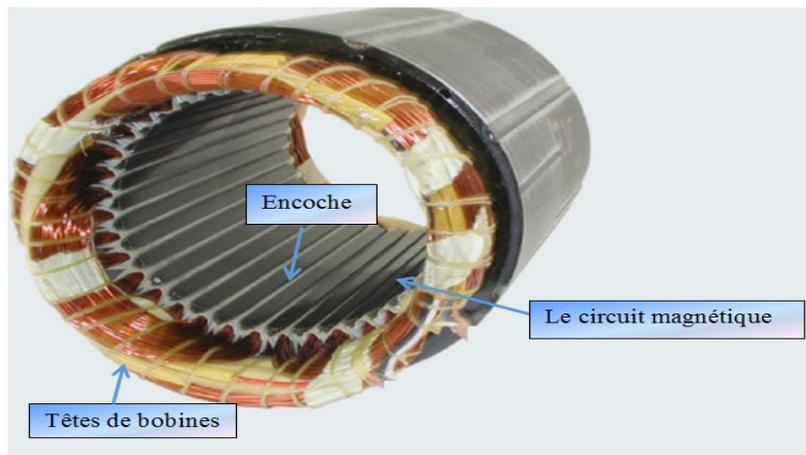


Fig. I. 3. Photo du stator d'une machine asynchrone

b) Le Rotor

Le circuit magnétique du rotor est constitué d'un assemblage de tôles ferromagnétiques rainurées. Dans les petits moteurs, les tôles sont découpées dans une seule pièce et assemblées sur un arbre. Dans les plus gros moteurs, chaque lamination est constituée de plusieurs sections montées sur un noyau.

Le circuit du rotor est constitué de barres conductrices régulièrement réparties entre deux couronnes métalliques formant les extrémités, le tout rappelant la forme d'une cage d'écureuil. Bien entendu, cette cage est insérée à l'intérieur d'un circuit magnétique analogue à celui du moteur à rotor bobiné. Ce type de moteur, beaucoup plus aisé à construire que le moteur à rotor bobiné, est d'un prix de revient inférieur et a une robustesse intrinsèquement plus grande. Il n'est donc pas étonnant qu'il constitue, et de loin, la plus grande partie du parc des moteurs asynchrones en service. Son inconvénient majeur est qu'il ne permet pas d'insérer un rhéostat et qu'il a, au démarrage, de mauvaises performances (courant élevé et couple faible).

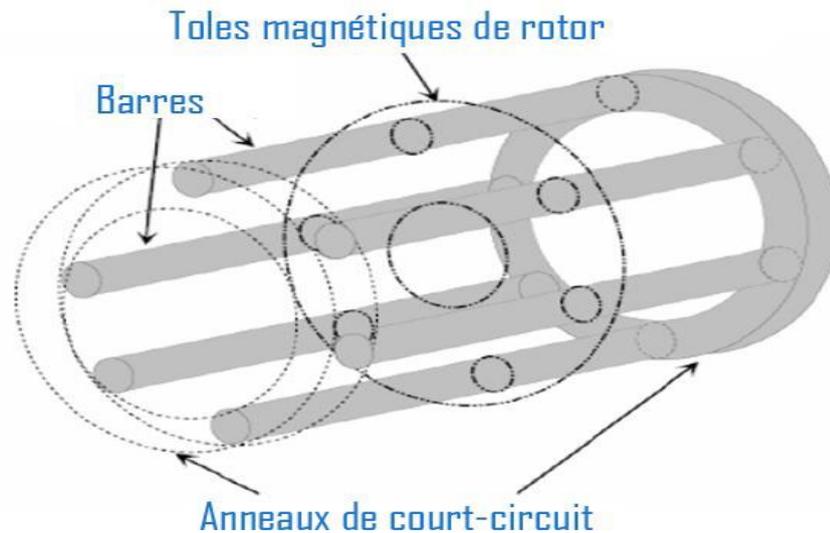


Fig. I. 4. *Vu schématique du rotor*

c) 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.

I.3. Etude statistique

Statistiquement, il est difficile de donner une répartition exacte des défaillances de machines électriques puisque le recensement des pannes et défauts n'est pas automatique dans l'ensemble des parcs d'exploitation et des ateliers de maintenance. Des multiples études statistiques sur des machines ont été effectuées depuis les années 80. Toutes ces statistiques mentionnées dans concernent les machines asynchrones de moyenne et grande puissance exploitées dans l'industrie [2].

Les études effectuées sur des machines asynchrones de grande puissance (de 100 kW à 1 MW) dans les années 90 par Thomsen, mentionnées après par Thomson, ont montré que sur cette gamme de puissance certaines pannes sont plus fréquentes que d'autres et les pannes le plus fréquentes sont du type mécanique (voir Figure I.5). La majorité d'entre elles se situent sur les roulements (41 %) et le stator (37 %), Les moins fréquentes sont les pannes au rotor (10 %) et les autres types constituent 12 %.

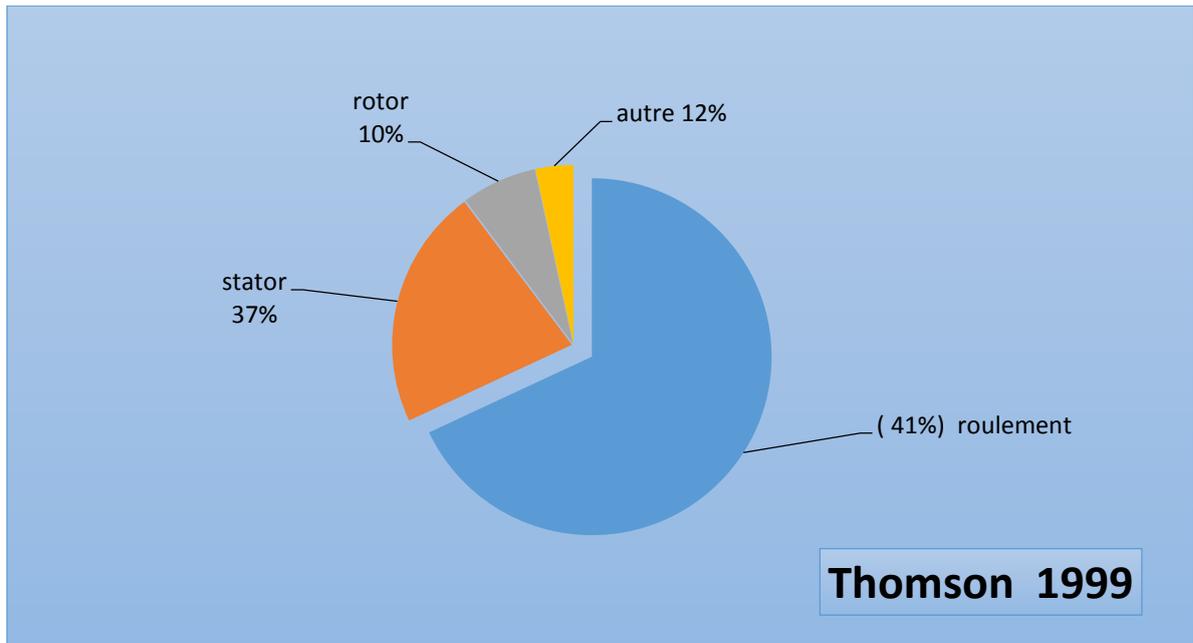


Fig. I. 5. Pourcentage des défauts par thomson

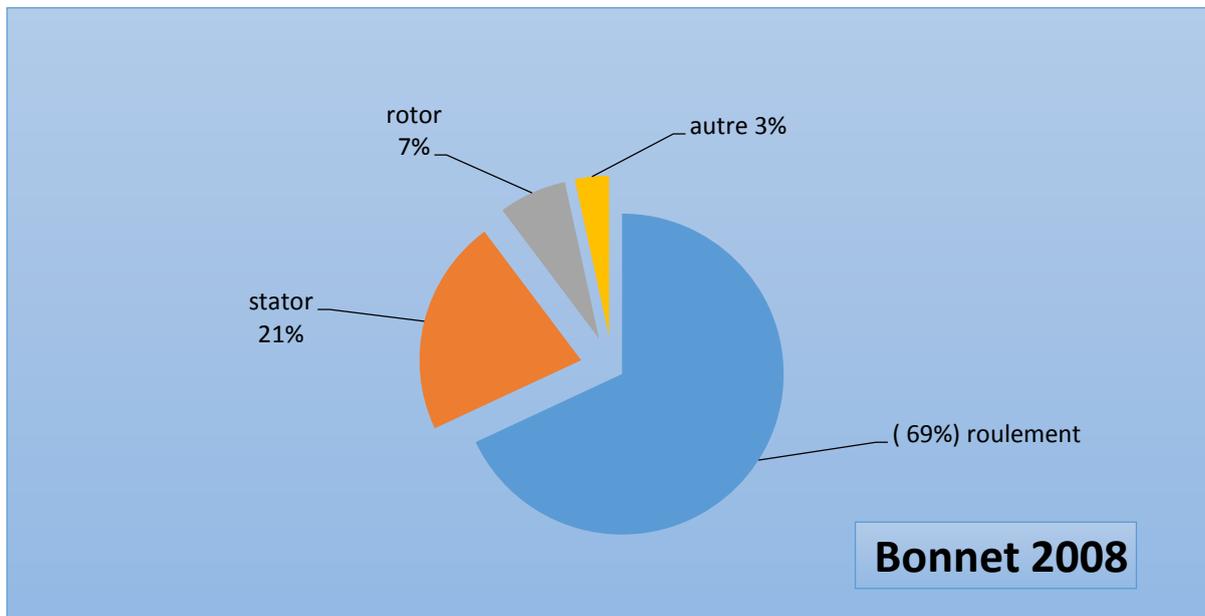


Fig. I. 6. Pourcentage des défauts par bonnet

Une étude statistique récente faite par Bonnet sur les machines asynchrones de grande puissance, exploitées dans l'industrie pétrochimique, montre que 69 % de pannes se situent sur les roulements, 21 % au stator, 7 % au rotor et 3 % dans les autres régions de la machine (voir Figure I.6).

Comme cela a été déjà mentionné dans cette l'étude, la répartition présentée confirme que les défauts des machines de grande puissance proviennent principalement de roulements et du bobinage statoriques (voir Figure I.5, I.6). D'autre part, ces études montrent que pendant une décennie la répartition du pourcentage de ces défauts a changé, les défauts de roulements sont passés de 41 % à 69%, les défauts au stator sont passés de 37% à 21 % et celles au rotor de 10% à 7%. On constate que les défauts dans le stator et le rotor sont de moins en moins fréquents. Cela est dû à l'amélioration de la technique de fabrication de machines électriques (par exemple, l'amélioration des isolants). La principale source de défaillance reste les roulements.

I.4. Les défauts externes de la machine asynchrone

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 [3].

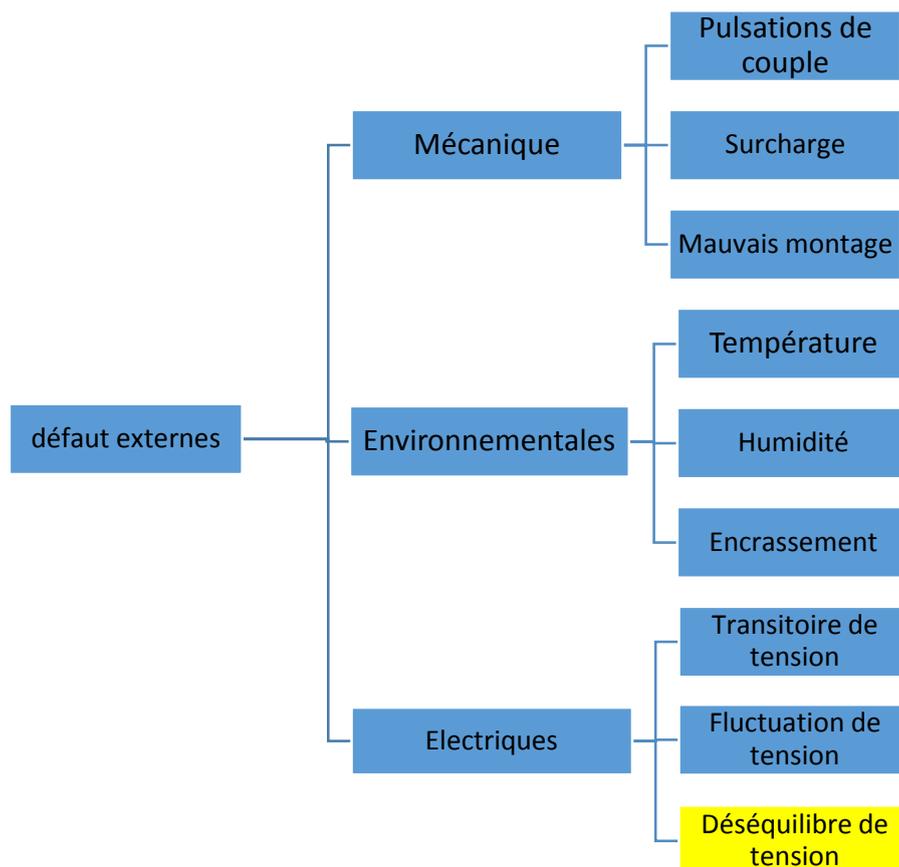


Fig. I. 7. Organigramme des défauts externes de la machine asynchrone triphasée à cage

D'après l'organigramme de (figure I.7), les origines des défauts sont diverses ; nous citerons à titre indicatif des origines de type :

- Mécaniques : mauvais montage, surcharge, fluctuation du couple
- Environnementales : température, humidité, poussière.
- Electriques : transitoire de la tension, fluctuation de la tension, déséquilibre de tension

I.4.1 Déséquilibre de la tension d'alimentation

Dans un réseau triphasé, on a idéalement des amplitudes égales de la tension et du courant respectivement sur chacune des trois phases et un angle de phase de 120 degrés. Lorsque les tensions ou les courants présentent une différence d'amplitude, il y a déséquilibre et cela peut causer des problèmes pour les équipements triphasés branchés au réseau. L'impact le plus courant du déséquilibre est la surchauffe des équipements et, par conséquent, la dégradation de l'isolation électrique et la réduction de la durée de vie.

La figure suivante résume les différents cas de déséquilibre [4] :

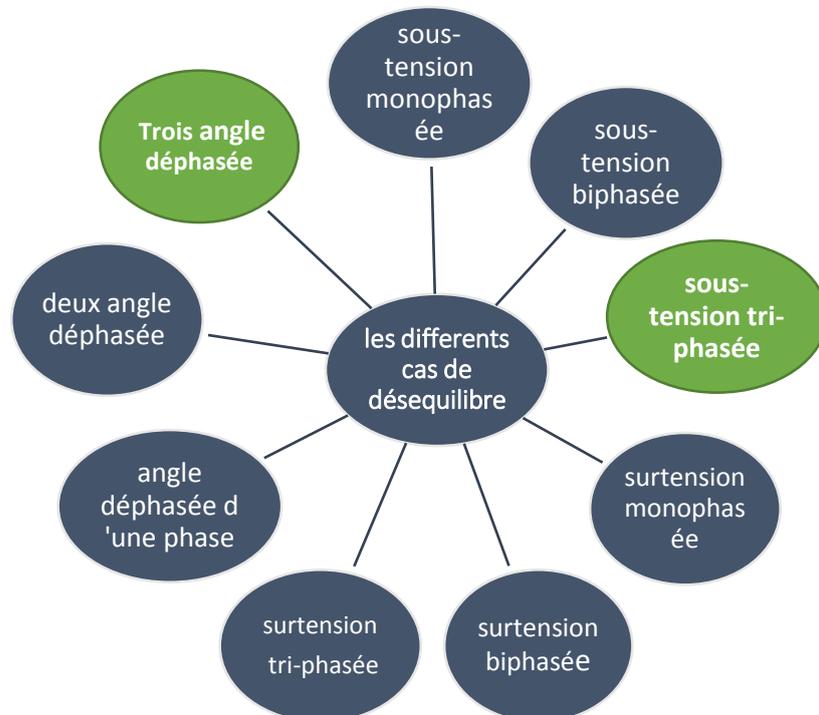


Fig. I. 8. Les différents cas du déséquilibre de tension dans les machines asynchrones triphasées

La figure suivante présente la forme d'onde de tension des trois phases en cas de 20%, sous tension phase A.

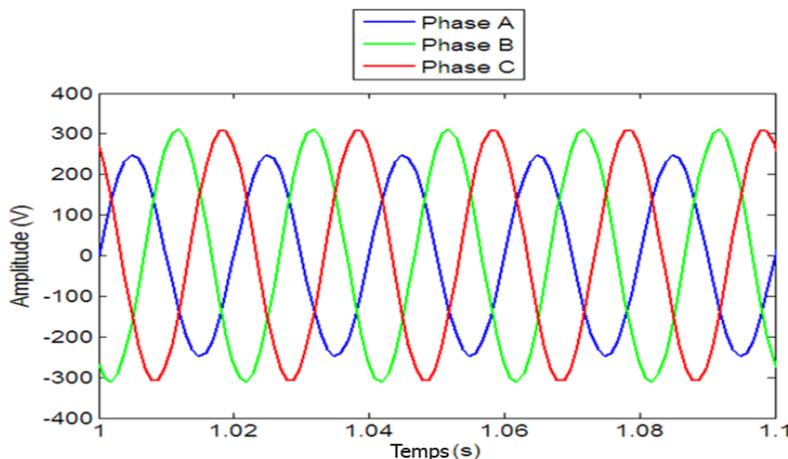


Fig. I. 9. *Forme d'onde des trois tensions statoriques avec un déséquilibre de tension de 20% sous tension-phase A (résultat de simulation)*

a) Causes & effets

L'impédance des constituants d'un réseau électrique n'est pas exactement la même pour chaque phase. Mais en général, ces différences sont très faibles et leur effet peut être négligé. Dans la plupart des cas pratiques. Des conditions anormales d'exploitation causent également un déséquilibre de phase. Des courts circuits entre phases et des circuits ouverts sur l'une des phases sont des exemples typiques ; même les charges monophasées causent le déséquilibre des courants. Le comportement du système est alors déséquilibré.

Les problèmes dus au déséquilibre et qui touchent les machines asynchrones sont : La machine ne peut pas atteindre son couple maximal par l'existence d'un couple de freinage produit par le champ magnétique inverse. De plus les dommages matériels au niveau des paliers. Les problèmes d'échauffement excessif au niveau du stator et encore plus du rotor, ce qui conduit éventuellement à un vieillissement thermique prématuré, et aussi un dysfonctionnement de protection.

b) Les indices de déséquilibre

Dans cette section, différents les indices de déséquilibre de tension prescrits dans différents les normes sont discutées [5].

➤ **Association nationale des fabricants d'équipement (NEMA)**

La rigidité du déséquilibre de la tension d'alimentation a été mesurée par le taux de déséquilibre de la tension de ligne (LVUR) de NEMA et donné comme :

$$LVUR(\%) = \frac{\text{ecart de tension maximal par rapport de ligne moyenne}}{\text{la tension de ligne moyenne}}$$
$$LVUR = \frac{\max\left[|V_a - V_{moy}|, |V_b - V_{moy}|, |V_c - V_{moy}|\right]}{V_{moy}} \times 100\% \quad (I.1)$$

Où

$$V_{moy} = \frac{V_a + V_b + V_c}{3}$$

Dans cette définition, seules les tensions de lignes (V_a, V_b, V_c) ont été considérés Pour mesurer la tension déséquilibre. Les tensions de ligne sont simples à mesurer sur le terrain, ce qui rend cette interprétation bien reconnue par les ingénieurs industriels. L'inconvénient Majeur de cette définition est à valeur fixe de LVUR, il y a une infinité ensembles de tensions Aux bornes et chacun a influencé la performance du moteur à induction différemment. Par Conséquent, NEMA définition est inappropriée pour fournir une précision de l'évaluation du moteur qui fonctionne avec une alimentation en déséquilibre.

➤ **Définitions IEEE pour l'analyse du déséquilibre de tension**

L'interprétation spécifiée par IEEE std. Quantifier la gravité du déséquilibre en termes de taux de déséquilibre de tension de phase (PVUR), qui est donné comme :

$$PVUR(\%) = \frac{\text{ecart de tension maximal par rapport de phase moyenne}}{\text{la tension de phase moyenne}}$$

$$PVUR = \frac{\max \left[|V_1 - V_{moy}|, |V_2 - V_{moy}|, |V_3 - V_{moy}| \right]}{V_{moy}} \times 100\% \quad (I.2)$$

Où

$$V_{moy} = \frac{V_1 + V_2 + V_3}{3}$$

Des équations L'IEEE exploite une définition analogue pour la quantification de déséquilibre de tension donné par NEMA, la différence de base étant que l'IEEE utilise la magnitude des tensions de phase plutôt que des tensions ligne à ligne. Comme cette l'interprétation est basée uniquement sur la tension de phase, elle ne convient pas pour évaluation des moteurs triphasée à partir de données de terrain. De plus, l'effet de l'angle de déséquilibre est complètement passé inaperçu.

➤ **Commission électrotechnique internationale (CEI)**

Le facteur de déséquilibre de tension (VUF) est le degré de déséquilibre classées par la CEI et également connues sous le nom de définition exacte par rapport à la définition NEMA.

La valeur de VUF est définie comme :

$$VUF = \frac{|V_n|}{|V_p|} \times 100\% = K_v \quad (I.3)$$

Où

V_p et V_n sont les séquences positive et négative composant des tensions en p.u.

VUF transmet des meilleures informations sur la cause et l'effet du déséquilibre de tension sur le moteur directement reflète par la composante de séquence négative. Mais cette définition seule n'est pas jugée appropriée pour une évaluation précise de la performance du moteur sous tension d'alimentation déséquilibre comme pour la valeur fixe VUF. La prédiction précise de la performance du moteur n'est possible que lorsque les

Conditions de sous ou la surtension est également disponible avec le degré de tension déséquilibre.

➤ **Définitions non standard**

Comme dans les interprétations NEMA, IEEE et IEC, seules les amplitudes du déséquilibre est prise en compte et les implications d'angle sont complètement inaperçus. Dans, un nouveau complexe appelée facteur de déséquilibre de tension complexe (CVUF) initié et spécifie l'angle avec l'amplitude de VUF. Le facteur d'angle de déséquilibre choisit la tension exacte réglée sous le degré de déséquilibre fixé. La CVUF est exprimée en

$$CVUF = \frac{V_n}{V_p} = K_v \angle \theta_v \quad (I.4)$$

Dans [5], on affirme que l'efficacité, le facteur de puissance, l'entrée des pertes de Puissance dans le rotor et dans le cuivre du stator sont indépendantes de l'angle déséquilibre, la définition de la CEI a donc été prise en compte pour mettre en avant la prévision précise de la performance du moteur instantanée fonctionne sous déséquilibre.

I.5. Les défauts internes de la machine asynchrone

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, ...)

Dans le but d'une présentation synthétique, nous avons classé ces défauts en deux familles principales : les défauts mécaniques et les défauts électriques. Ces défauts sont donc rappelés brièvement dans l'organigramme de (figure I.10). L'étude des défauts des machines asynchrones à un double objectif [3] :

- Comprendre leur genèse de manière à prévoir leur gravité et leur développement.
- Analyser leur impact sur le comportement de la machine et en déduire les signatures permettant, a posteriori, de remonter jusqu'à la cause de la défaillance.

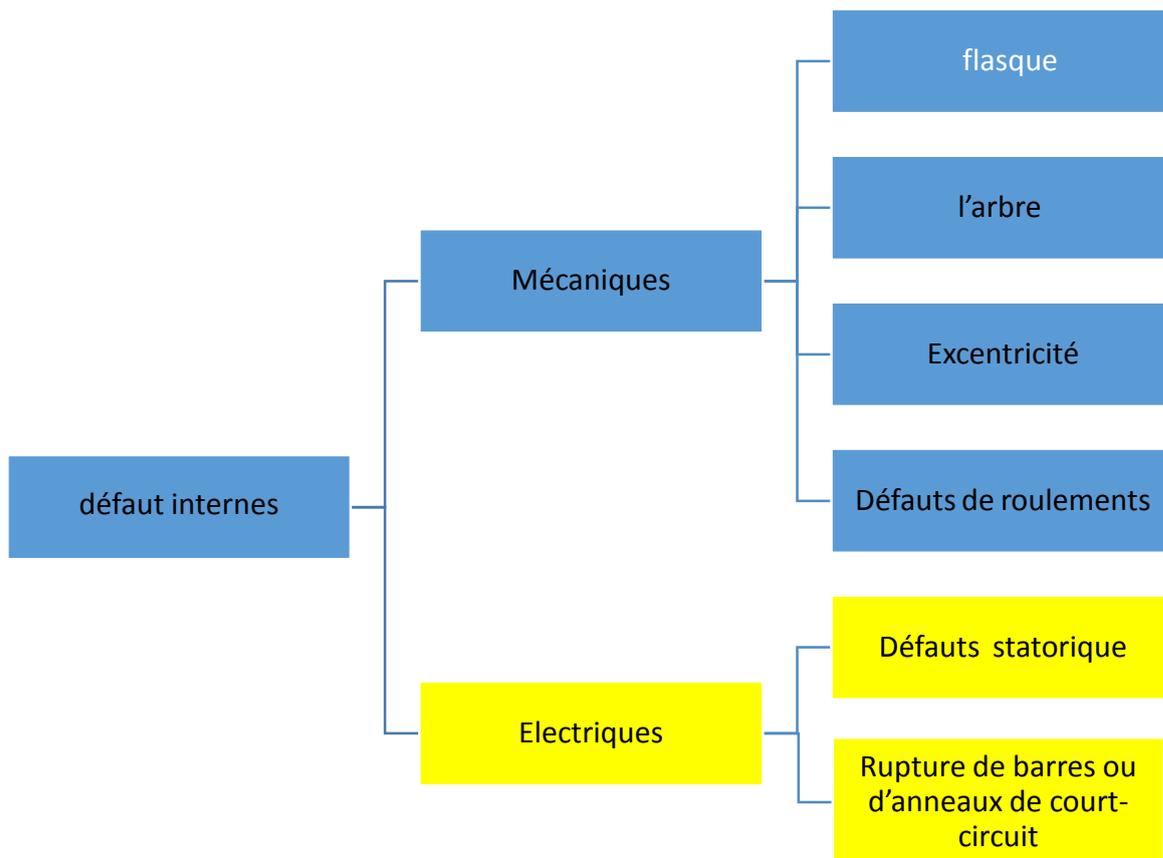


Fig. I. 10. *Organigramme des défauts internes de défauts de la machine asynchrone triphasée à cage*

I.5.1 Défaut d'ordre mécanique

Plus de 40% de défauts de moteurs asynchrones sont des défauts mécaniques.

Ces défauts peuvent être des défauts de roulements, des défauts d'excentricité, . . .

I.5.1.1 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.

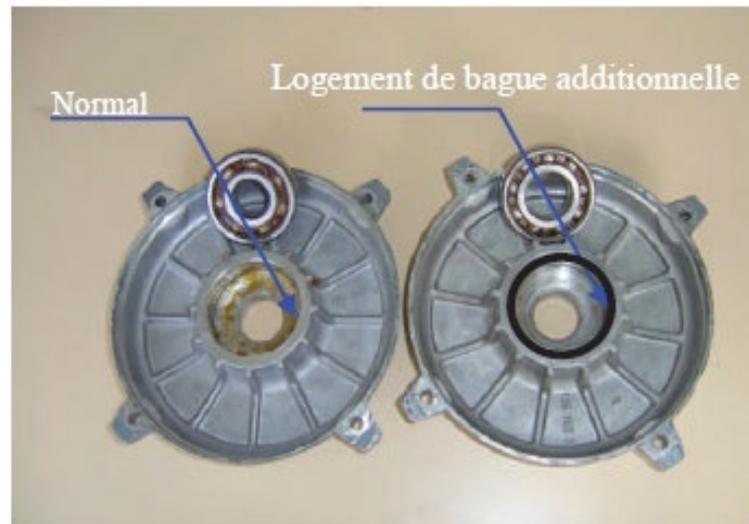


Fig. I. 11. *Vue d'un flasque de machine sans et avec bague*

I.5.1.2 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 absorbé ou simplement une analyse visuelle de l'arbre de la machine permet de détecter ce type de défaillance

I.5.1.3 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 [6,7].

Les roulements se composent généralement de deux bagues, une intérieure et une autre extérieure entre lesquelles existe un ensemble de billes ou de rouleaux tournants (figure I.12).

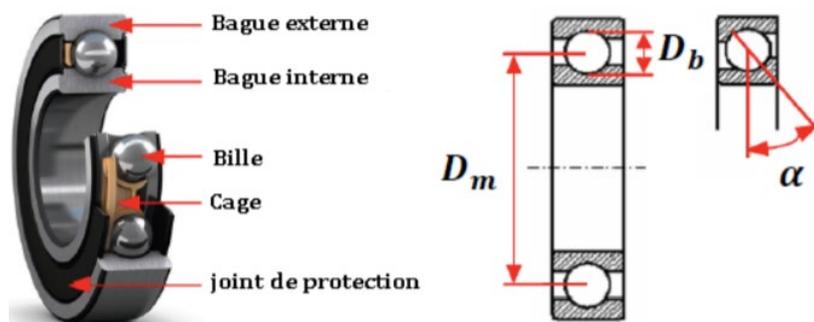


Fig. I. 12 : Vue éclatée des éléments constitutifs d'un roulement à billes

En fonctionnement normal, la défaillance due à la fatigue commence par des petites fissures situées au-dessous des surfaces du chemin de roulement et de l'élément roulant, qui se propage Graduellement sur la surface. Tout changement de l'uniformité du roulement produit des vibrations qui génèrent dans le courant statorique des raies spectrales de fréquences [8].

$$f_{roul} = |f_s - kf_v| \quad (I.5)$$

d'où: $k=1,2,3,\dots$, et f_v est l'une des fréquences caractéristiques des vibrations les fréquences caractéristiques des vibrations dépendent de l'élément du roulement affecté par un défaut et sont liées aux paramètres du roulement.

Les fréquences des vibrations qui caractérisent les défauts des roulements à bille sont :

- Défaut de la cage

$$f_{cage} = \frac{1}{2} \left[1 - \frac{D_b}{D_m} \cos \alpha \right] f_{rot} \quad (I.6)$$

- Défauts au niveau d'une bille

$$f_b = \frac{D_m}{2D_b} \left[1 - \left(\frac{D_b}{D_m} \cos \alpha \right)^2 \right] f_{rot} \quad (I.7)$$

- Défauts sur la bague intérieure

$$f_{b.int} = \frac{n_b}{2} \left[1 + \left(\frac{D_b}{D_m} \cos \alpha \right) \right] f_{rot} \quad (I.8)$$

- Défauts sur la bague extérieure

$$f_{b.ext} = \frac{n_b}{2} \left[1 - \left(\frac{D_b}{D_m} \cos \alpha \right) \right] f_{rot} \quad (I.9)$$

Avec

D_b : le diamètre d'un élément roulant,

D_m : la distance entre les centres des billes diamétralement opposées,

n_b : Le nombre d'éléments roulants,

α : angle de contact des billes avec les bagues du roulement.

f_{rot} : La fréquence de rotation du rotor.

I.5.1.4 Excentricité

Les conséquences des défauts mécaniques se manifestent généralement au niveau de l'entrefer par des défauts d'excentricité [9]. L'excentricité d'une machine électrique est un phénomène qui évolue dans le temps et qui existe de sa fabrication. Celle-ci passe en effet par différentes étapes d'usinage et de montage qui induisent un décentrement du rotor par rapport au stator. Lors du fonctionnement de la machine, deux causes principales aggraveront l'excentricité. 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 [10, 11]. 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 ultime 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 [12, 13] :

Un défaut d'excentricité dans une machine électrique correspond à un décentrement du rotor par rapport au stator, entraînant une variation de l'entrefer. Il existe trois types de défaut d'excentricité :

- a) **L'excentricité statique** (Figure I. 13a) correspondant au cas où l'axe de rotation du rotor reste fixe mais ne coïncide pas avec l'axe de symétrie du stator,
- b) **L'excentricité dynamique** (Figure I. 13b) correspondant au cas où l'axe de rotation du rotor n'est pas fixe mais tourne autour de l'axe de symétrie du stator,
- c) **L'excentricité mixte** (Figure I. 13c) qui est une combinaison d'excentricités statique et dynamique.

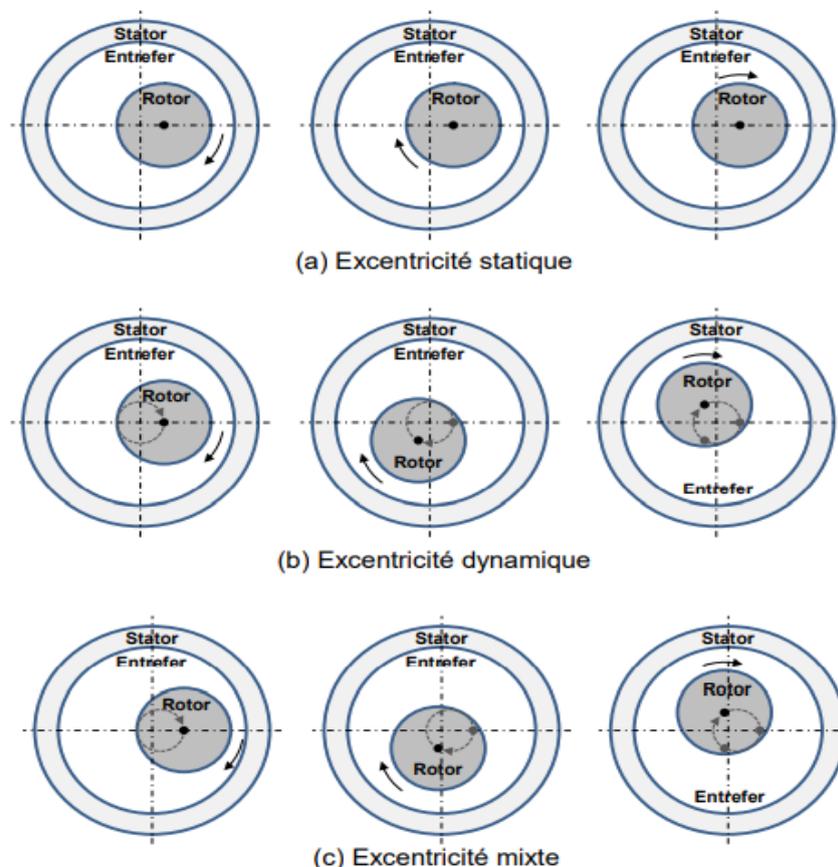


Fig. I. 13. Types d'excentricité : (a) statique ; (b) dynamique ; (c) mixte.

Dans [14], proposent de détecter l'excentricité du rotor par la surveillance de la variation spectrale des harmoniques du courant de ligne. Il peut être facilement vu que l'harmonique d'encoche rotorique augmente avec l'excentricité d'où le fait que les harmoniques dépendent principalement du nombre d'encoches rotoriques et du nombre de paires de pôles de la machine asynchrone.

$$f_{s,ecc} = \left[kn_b \left(\frac{1-g}{p} \right) \pm 1 \right] f_s \quad (\text{I.10})$$

Avec $k=1, 2, 3, \dots$

En considérant l'influence des harmoniques de temps sur les tensions d'alimentation, la fréquence des courants induits dans le stator peut être exprimée comme suit :

$$f_{s,ecc} = \left[kn_b \left(\frac{1-g}{p} \right) \pm n \right] f_s$$

(I.11)

n : l'ordre des harmoniques de temps ($n = 1, 3, 5, \dots$)

En présence d'une excentricité mixte, les fréquences apparaissent également aux bas harmoniques dans le spectre du courant statorique. L'existence de ces fréquences est due à l'interaction entre les deux excentricités statique et dynamique, elle est donnée par l'équation suivante [15, 16] :

$$f_{mix} = \left(1 \pm k \frac{1-g}{p} \right) f_s \quad (\text{I.12})$$

Évidemment, n'importe quelle oscillation dans le couple de charge à un multiple de la fréquence de rotation f_r , induira les fréquences correspondantes dans le spectre du courant statorique à :

$$f_{charge} = f_s \pm k f_r = \left(1 \pm k \frac{1-g}{p} \right) f_s \quad (I.13)$$

Avec f_r : fréquence de rotation, $k = 1, 2, 3 \dots$

Cependant, vu la similitude entre les équations (I.12) et (I.13) il est difficile de distinguer entre ces deux défauts [17].

La variation dans les différents spectres des courants vient en concordance avec les Formules signalées précédemment (Figures I.14 et I.15).

En synthèse, (les figures I.14 et I.15) montrent les fréquences caractéristiques de L'excentricité statique donnée par l'équation (I.11), d'où on peut remarquer que la variation dans les amplitudes des différents RSH introduit par la présence de l'excentricité statique est difficilement différenciable.

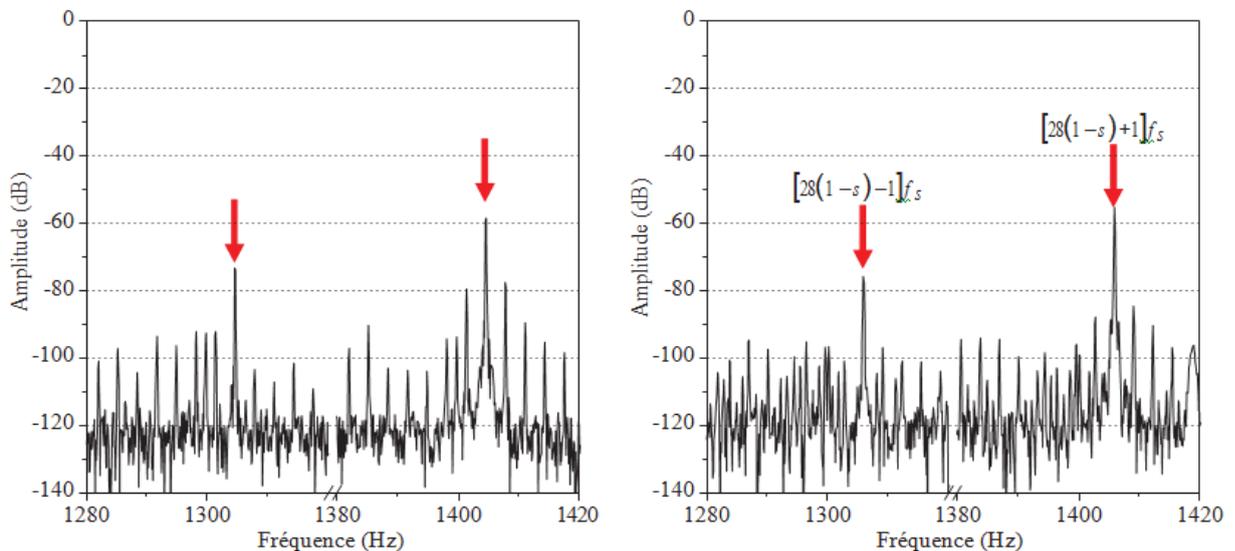


Fig. I. 14. Spectre du courant statorique de l'excentricité statique avec $n = 1$, machine sain (gauche), machine excentrée (droite)

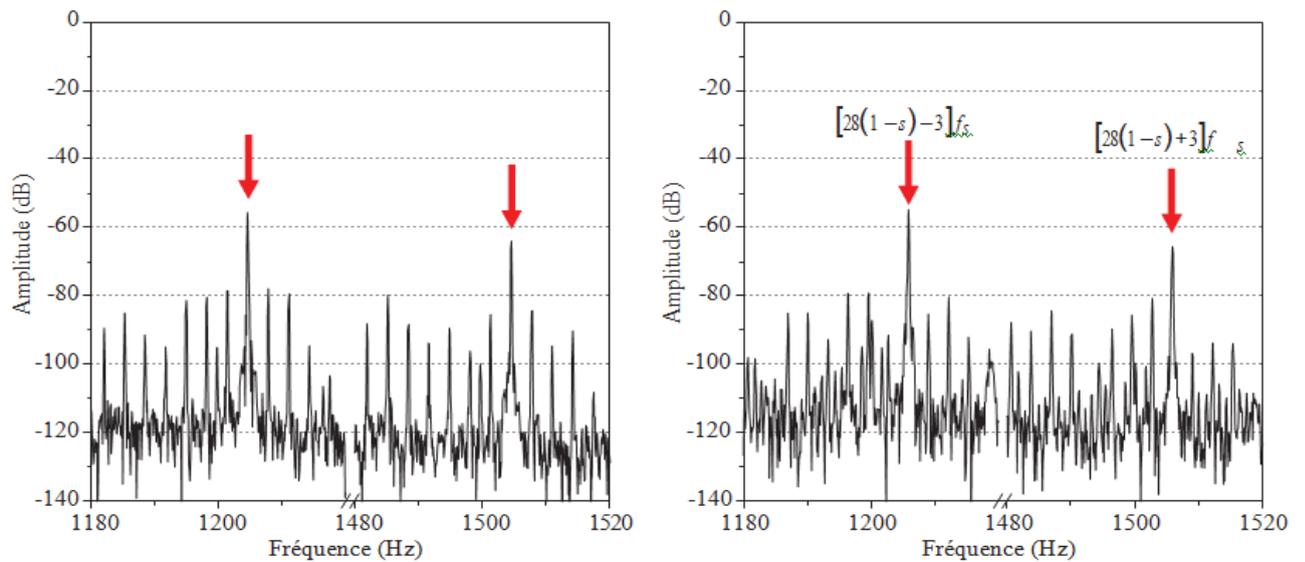


Fig. I. 15. Spectre du courant statorique de l'excentricité statique avec $n=3$, machine saine (gauche), machine excentrée (droite)

I.5.2 Défauts d'ordre électriques

Les défaillances d'origine électrique peuvent dans certain cas être la cause d'un arrêt de la machine, ces défaillances étudiées se séparent en trois catégories bien distinctes, on peut citer les défauts qui apparaissent au niveau des circuits électriques d'alimentations (statoriques et rotoriques).

I.5.2.1 Défauts statoriques

L'apparition d'un défaut au niveau des circuits électriques statorique de la machine asynchrone peut avoir des origines diverses. On peut citer à titre d'exemple, les défauts de type court-circuit inter-spires qui apparaissent à l'intérieur des encoches statoriques. Ce type de défauts peut être causé par une dégradation des isolants des spires du bobinage statorique [18].

On peut citer aussi le court-circuit qui apparaît entre une phase et le neutre, entre une phase et la carcasse métallique de la machine ou entre deux phases statoriques :

➤ Court-circuit entre phases

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

circuit proche de l'alimentation entre phases, induirait des courants très élevés qui conduiraient à la fusion des conducteurs d'alimentation et/ou à la disjonction par les protections. D'autre part, un court-circuit proche du neutre entre deux phases a de moins graves conséquences ; il engendre un déséquilibre des courants de phases avec un risque moindre de la fusion des conducteurs.

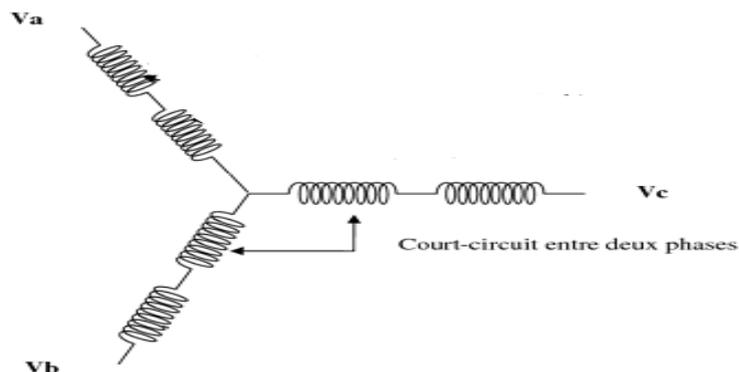


Fig. I. 16. *court-circuit entre phases*

➤ **Court-circuit entre spires**

Un court-circuit entre spires de la même phase est un défaut assez fréquent. Il a pour origine des défauts liés à l'isolant dans l'enroulement concerné (séparant les spires et la carcasse) ou bien à cause d'une surchauffe de la machine qui endommagera ces mêmes isolants. Il entraîne une augmentation des courants statoriques dans la phase affectée, une légère variation de l'amplitude sur les autres phases, qui modifie le facteur de puissance et amplifie les courants dans le circuit rotoriques de la MAS.



Fig. I. 17. Différents court-circuit entre spires

I.5.2.1.1 Signature fréquentielle de court-circuit au niveau du stator

Les courts circuits qui apparaissent entre une phase et le neutre, entre une phase et la carcasse métallique de la machine ou entre deux phases statoriques. Les courts circuits entre spires sont donc le défaut le plus fréquemment rencontré au stator, la fréquence caractéristique de ce défaut est [19] :

$$f_{cc} = f_s \left[\frac{n}{p} (1 - g) \pm k \right] \tag{I.14}$$

Avec $k \in \mathbb{R}^{**}$ et impair en $\epsilon \in \mathbb{R}^{**}$ p : nombre paire de pôle.

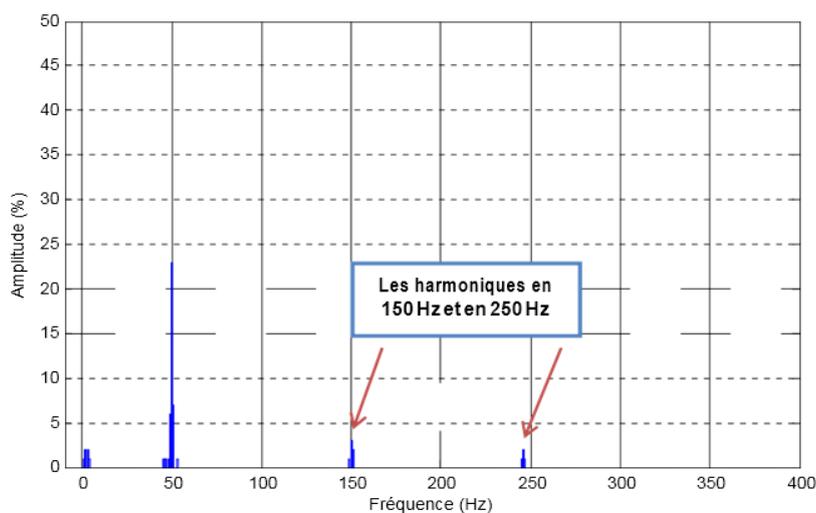


Fig. I. 18. Les spectres du courant statorique à vide avec tension déséquilibré

I.5.2.2 Défauts rotoriques

➤ Rupture de barres et court-circuit d'anneau

Dans les machines asynchrones à cage à faible et à moyenne puissance, les défauts concernant le rotor sont plus complexes de celle du stator. Les défaillances les plus répétitifs au niveau du rotor sont : la rupture de barres et la rupture d'une portion d'anneaux de court-circuit. (Figure I .19) [20].

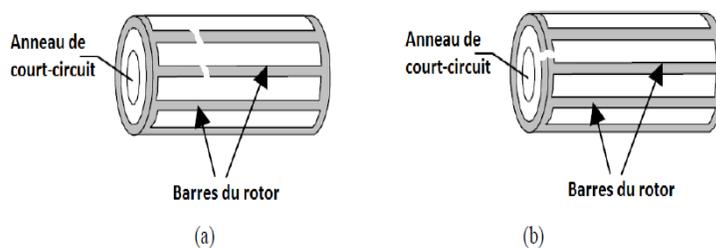


Fig. I. 19. *Défaut d'un rotor à cage d'écureuil :*
(a) rupture de barres ; (b) rupture d'anneau de Court-circuit

Les ruptures de barres ou de portions d'anneau peuvent être dues, 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) [21]. Cela fait apparaître des oscillations sur les Courants et le couple électromagnétique d'autant plus apparentes que l'inertie est très grande (vitesse Constante) [22, 23]. Si l'inertie de l'entraînement est plus faible, des oscillations apparaissent sur la Vitesse mécanique et sur l'amplitude des courants statoriques.

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 rotorique [16]. 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 [16, 17].

L'apparition d'un défaut de rupture de barres n'induit pas à un arrêt de la machine, du fait que le courant qui traversait la barre cassée se répartit sur les barres adjacentes [17]. Ces barres sont alors Surchargées, et les contraintes thermiques et électromécaniques engendrées peuvent conduire à leur Rupture, et ainsi de suite jusqu'à la rupture d'un nombre suffisamment important de barres pour Provoquer l'arrêt de la machine.

Devant la multitude des défauts envisageables et les conséquences de leurs apparitions, les Techniques de surveillance se sont rapidement imposées auprès des utilisateurs des machines Electriques. Elles commencent également à intéresser les concepteurs.



Fig. I. 20. *Défaut de rupture de barres*

I.5.2.2 Signature de rupture de barre rotorique

Ce sont les défauts les plus fréquents qui apparaissent au niveau du rotor (figure I.21). Ils se présentent par des ruptures totales ou partielles d'une barre au niveau de la cage d'écureuil, ils se traduisent par une augmentation de la résistance équivalente d'un enroulement rotorique, ces pannes rotoriques engendrent malheureusement des ondulations dans le couple électromagnétique qui elles-mêmes provoquent des oscillations de la vitesse de rotation de la machine, ce qui génère des défauts mécaniques en plus dans la machine [19].

Une asymétrie rotorique générée par la présence de barres rotoriques cassées produit des raies spectrales autour de la fréquence fondamentale f_s telle que

$$f_{rb} = (1 \pm 2kg) f_s \quad (\text{I.15})$$

avec

$$k = 1, 2, \dots$$

f_s : Fréquence du réseau d'alimentation,

g : Glissement.

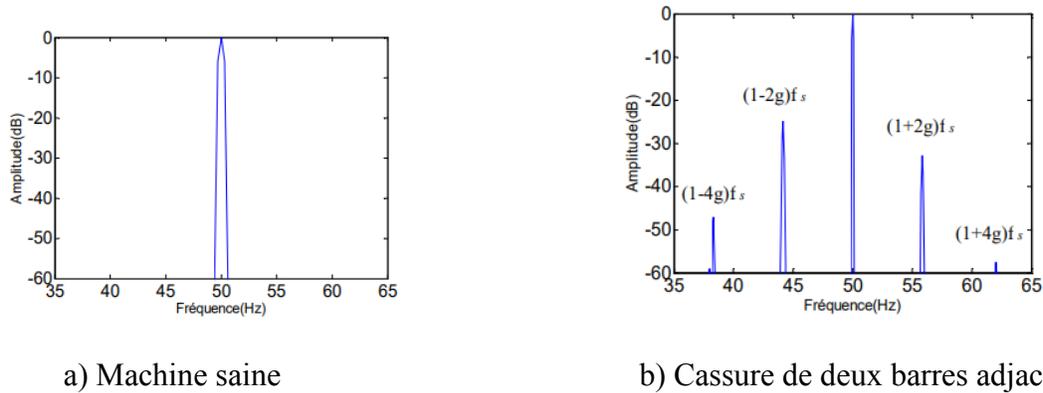


Fig. I. 21. Analyse spectrale du courant statorique pour différentes cassures de barres

En fonctionnement sain de la machine (figure. I.21a), aucune raie latérale autour de la fondamentale n'a été observée. En fonctionnement avec défaut de deux cassures de barres adjacentes (figure. I.21b), y a une apparition des raies latérales au voisinage du fondamental correspondant aux raies de défaut.

I.6 CONCLUSION

Après quelque rappel sur la machine asynchrone nous avons devisé ce chapitre en deux parties : la première concerne la constitution de la machine asynchrone et les statistiques des défauts. La deuxième partie nous avons présenté une synthèse des méthodes de diagnostic de la machine asynchrone basée sur le traitement du signal des grandeurs mesurables, à savoir le courant, la vibration.

Dans le chapitre suivant nous choisissons un modèle mathématique suffisamment précis pour étudier le comportement des machines électriques en présence de l'un des trois défauts (déséquilibre de tension, court-circuit entre spires et rupture de barre) afin de déduire les signatures pertinentes pour la détection chaque type de défaut.

Chapitre II- Modèles de la Machine à Induction

II.1 Introduction

La modélisation et la simulation des machines électriques constituent une étape primordiale en matière de diagnostic. Elles permettent la compréhension du fonctionnement défectueux et la vérification des algorithmes de détection des défauts. Elles nous permettent aussi, de construire des bases de données sur les manifestations électriques et magnétiques de ces défauts. Il est important donc, de synthétiser un modèle adapté au problème à traiter, décrivant le comportement de la machine d'une façon la plus fine possible.

Plusieurs voies de modélisation existent. Elles sont actuellement utilisées pour examiner des problèmes tels que la commande, la conception ou la surveillance. En ce qui nous concerne, nous nous intéressons aux modèles simulant le comportement électromagnétique de la machine asynchrone en vue de faire le diagnostic.

La mise au point d'une procédure de diagnostic, à base de modèles analytiques pour les machines asynchrones, nécessite la synthèse d'un modèle capable tenir compte de sa structure et rendre compte du comportement transitoire de celle-ci. Pour ce faire, il faut s'orienter vers l'approche des circuits électrique magnétiquement couplés (CEMC) afin de pouvoir représenter une description mieux adaptée aux défauts. Cette approche offre un bon compromis entre de précision et le temps d'exécution.

II.2 Généralité sur la Modélisation des machines asynchrones

II.2.1 Méthodes de modélisation des machines asynchrones

Les modèles décrivant le fonctionnement de la machine asynchrone en présence des défauts peuvent être groupés en modèles physiques et en modèles comportementaux :

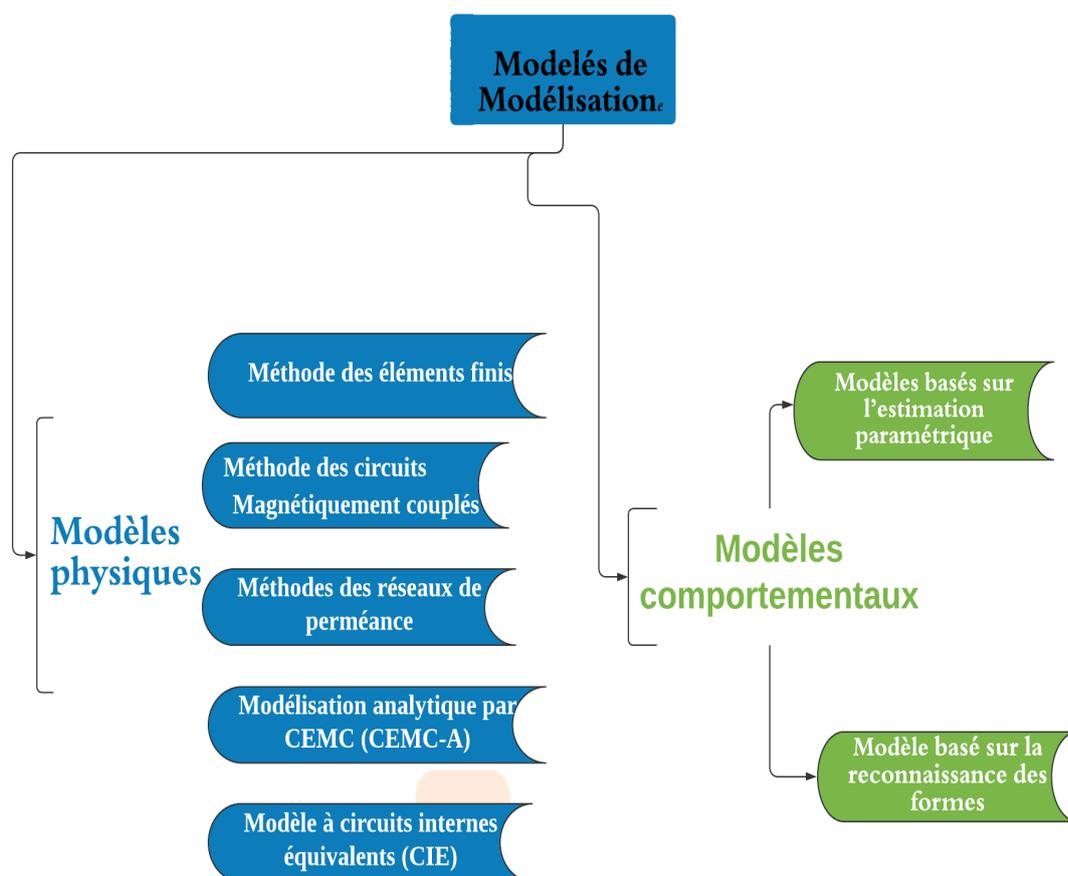


Fig.II.1. Les différentes méthodes de modélisation de la MAS

II.2.1.1 Modèles physiques

Se basent sur les lois de l'électromagnétisme pour décrire le fonctionnement de la machine. Ces modèles peuvent varier en complexité et/ou en précision selon la méthode de modélisation utilisée [24].

II.2.1.1.1 Méthode des éléments finis (MÉF)

La méthode des éléments finis est une manière numérique de résoudre certains des problèmes de physique. C'est une méthode qui permet de déterminer une solution approchée sur un domaine spatial, c'est-à-dire qui permet de calculer un champ (de scalaires, de vecteurs,

de tenseurs) qui correspond à certaines équations et à certaines conditions imposées. La méthode consiste à découper le domaine spatial en petits éléments, également appelés mailles, et à rechercher une formulation simplifiée du problème sur chaque élément, c'est-à-dire à transformer le système d'équations quelconque en un système d'équations linéaires. Chaque système d'équations linéaires peut se représenter par une matrice. Les systèmes d'équations pour tous les éléments sont ensuite rassemblés, ce qui forme une grande matrice ; la résolution de ce système global donne la solution approchée au problème. L'utilisation de méthode de calcul par éléments finis prend en compte la géométrie de la machine, la saturation des matériaux magnétiques, ainsi que l'effet de peau dans les barres rotorique [25].

II.2.1.1.2 Méthode des réseaux de perméances (RNM)

La méthode des réseaux de perméances est basée sur la décomposition du circuit magnétique étudié en tubes de flux, chaque tube étant caractérisé par sa perméance. A partir de cette décomposition, on construit un réseau de perméances, similaire à un circuit électrique, où les grandeurs mises en jeu sont le flux et les différences de potentiels magnétiques. Les sources de forces magnétomotrices (f.é.m.) sont obtenues par la modélisation des couplages avec les circuits électriques externes. Dans le cas particulier de la machine asynchrone, les sources de f.é.m. sont placées dans les dents statoriques et rotoriques et leurs valeurs dépendent directement du courant dans les bobinages concernés [24].

II.2.1.1.3 Modélisation analytique par CEMC (CEMC-A)

Dans cette méthode, les inductances sont calculées analytiquement, Cette approche permet de prendre en compte les harmoniques d'espace les plus importants tout en réduisant le temps de calcul, les inductances n'étant plus calculées par intégration numérique. La prise en compte de ces harmoniques d'espace est effectuée grâce à un développement en série de Fourier de l'induction dans l'entrefer de la machine. Il en résulte une écriture en série de Fourier des expressions des inductances propres et mutuelles. Ces quelques harmoniques D'espace pris en compte dans l'expression des inductances induisent des harmoniques d'espace équivalents dans les courants de phases et dont l'analyse apporte une information pertinente pour le diagnostic des barres cassées au rotor de la machine asynchrone, [24].

II.2.1.1.4 Modélisation de Modèle à circuits internes équivalents (CIE)

Cette méthode de modélisation est basée sur la représentation de la machine en fonction des éléments d'un circuit électrique avec des résistances, des bobines, des condensateurs et des sources de tension ou de courant. La représentation discrète des caractéristiques électriques d'un enroulement statorique ou d'une barre rotorique est étroitement liée à l'estimation des paramètres résistifs et inductifs. L'effet d'isolement entre spires est associé à l'effet capacitif que nous négligerons compte tenu du domaine de fréquence étudié. La modélisation du stator par un circuit électrique équivalent peut être obtenue à partir de la représentation de chaque spire du bobinage de manière indépendante. Pour ce faire, les paramètres tels que la résistance, l'inductance propre, l'inductance mutuelle par rapport aux autres spires du stator, l'inductance mutuelle par rapport aux mailles du rotor peuvent être obtenus en appliquant les lois élémentaires sur les circuits magnétiques. La représentation de la cage rotorique peut être obtenue à partir du modèle associé à chaque maille formée par deux barres et les segments d'anneau de court-circuit correspondants, [17] [26].

II.2.1.1.5 Méthode des circuits électriques magnétiquement couplés (CEMC)

Dans la modélisation par les équations des circuits électriques magnétiquement couplés (CEMC), les enroulements constituant le stator et le rotor sont représentés par un circuit électrique équivalent, forme par une inductance en série avec une résistance. Par ailleurs, même si la méthode des CEMC ne permet pas la prise en compte de certains phénomènes complexes (saturation, effet de peau, etc.), il est possible de corriger le modèle par le biais de coefficients globaux pouvant renseigner sur leur influence sur les grandeurs globales, [3]. Ainsi, malgré ses faiblesses, l'approche de modélisation par CEMC offre un bon compromis en termes de précision, de temps de calcul et d'adaptation à la modélisation de la plupart des défauts d'origine électromagnétique de la machine asynchrone.

I.2.1.2 Les modèles comportementaux

Quant à eux, modifient les modèles issus de la physique en y introduisant des paramètres supplémentaires qui permettent la détection et, dans certains cas, la localisation du défaut observé. Ces modèles comportementaux peuvent être directement utilisés dans les procédures de diagnostic, [24].

II.2.1.2.1 Modèles basés sur l'estimation paramétrique :

Ces modèles sont basés sur l'hypothèse qu'un défaut se traduit par la variation de l'état paramétrique de la machine (résistance statoriques pour le défaut des enroulements statoriques et la résistance rotorique pour le défaut de rupture de barres [27]).

II.2.1.2.2 Modèle basé sur la reconnaissance des formes :

La mémorisation de la forme des signaux captés aux niveaux des machines saines et en défaut, afin de l'exploiter ultérieurement pour le diagnostic par reconnaissance des formes. L'objectif du diagnostic par reconnaissance des formes est d'associer une observation du système (données fournies par des capteurs, par exemple), à un mode de fonctionnement, correspondant à une classe.

II.2.2 Comparaison des méthodes de modélisation

Au fil des paragraphes précédents, il apparaît que la méthode des éléments finis est celle qui offre la plus grande quantité d'information aussi bien au niveau local qu'au niveau des grandeurs globales en termes de précision. Ainsi, avec la MEF, il est possible d'obtenir une signature de défaut simulée assez proche des signaux réels. Cependant, ce niveau de précision doit être grandement modéré par des temps de calcul qui s'avèrent excessifs surtout dans le cas de l'étude de certains inter-harmoniques nécessitant des simulations sur des fenêtres temporelles assez longues. Tout en gardant les mêmes hypothèses que la MEF (même si le calcul de la perméance de l'entrefer doublement encoché reste peu précise), la méthode des réseaux de perméances apporte une amélioration en termes de temps de calcul par rapport à la MEF, cependant, la mise en œuvre de la RNM reste assez fastidieuse et le calcul des perméances du réseau doit être adapté (si ce n'est pas refait) pour chaque machine étudiée.

Si les méthodes basées sur les circuits électriques à constantes réparties manquent de précision à cause de certaines hypothèses fortes (perméabilité infinie, etc.), elles nécessitent des temps de calcul sensiblement plus courts que la RNM et la MEF.

Elles sont donc bien adaptées à l'étude et la simulation de la manifestation d'un défaut et ce, surtout quand ladite manifestation se traduit par l'apparition ou la disparition de certaines raies du spectre. A ce stade, il faut noter que la méthode des CIE et la méthode des CEMC-A sont plus rapides que la méthode CEMC, mais elles nécessitent le calcul analytique des inductances, ce dernier pouvant changer selon l'arrangement géométrique des constituants de la machine. Quant à la CEMC, le calcul numérique des inductances par le biais de la théorie des fonctions de bobinage et de distribution donne à cette méthode une assez grande

souplesse d'utilisation avec une définition minimale des arrangements géométriques des constituants de la machine à étudier. Enfin, les méthodes de type « circuits » peuvent être améliorées par l'utilisation de la MEF pour le calcul préalable de certains paramètres. En guise de synthèse [28].

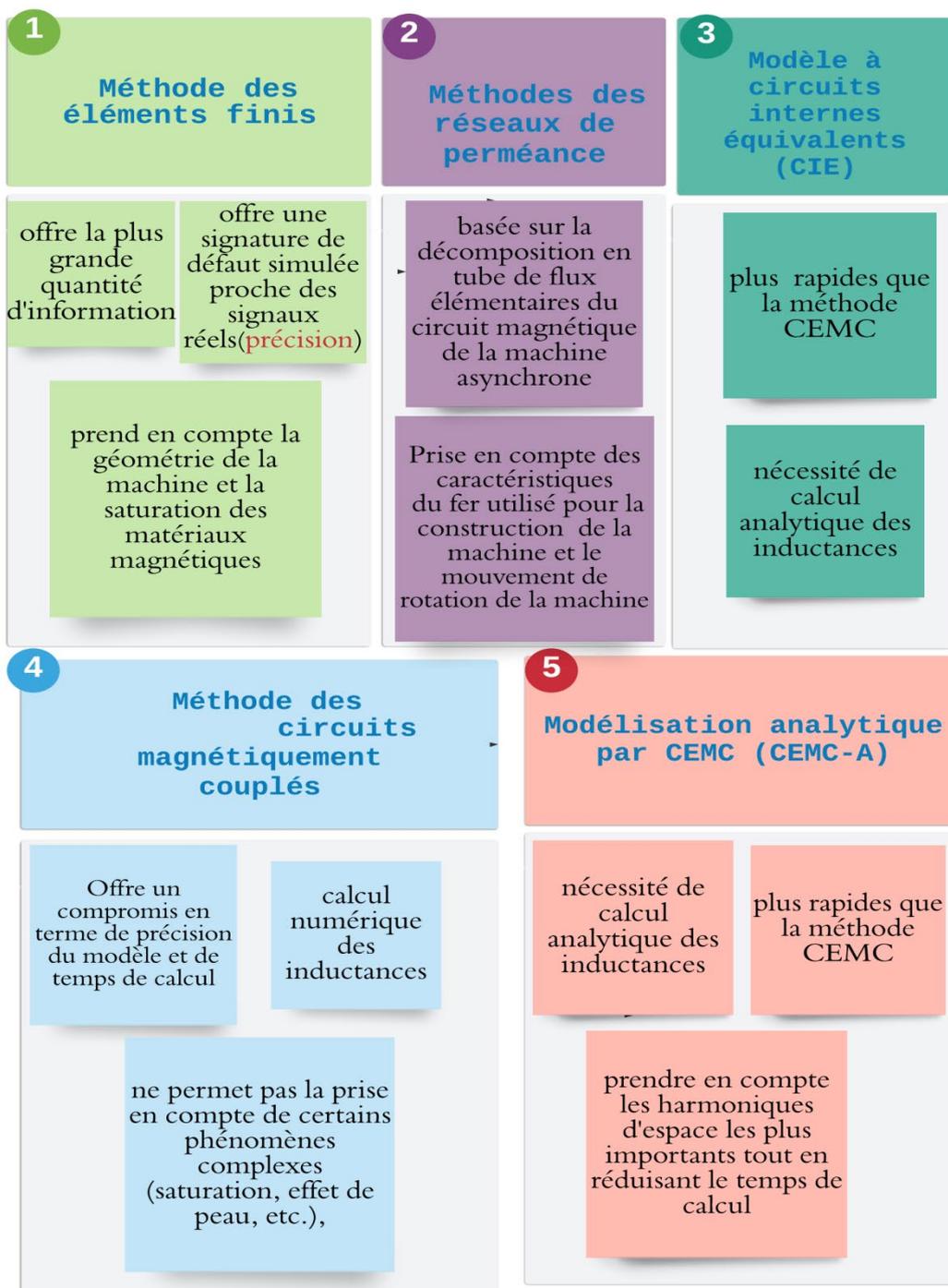


Fig. II.2: Comparaison entre les différentes méthodes de modélisation

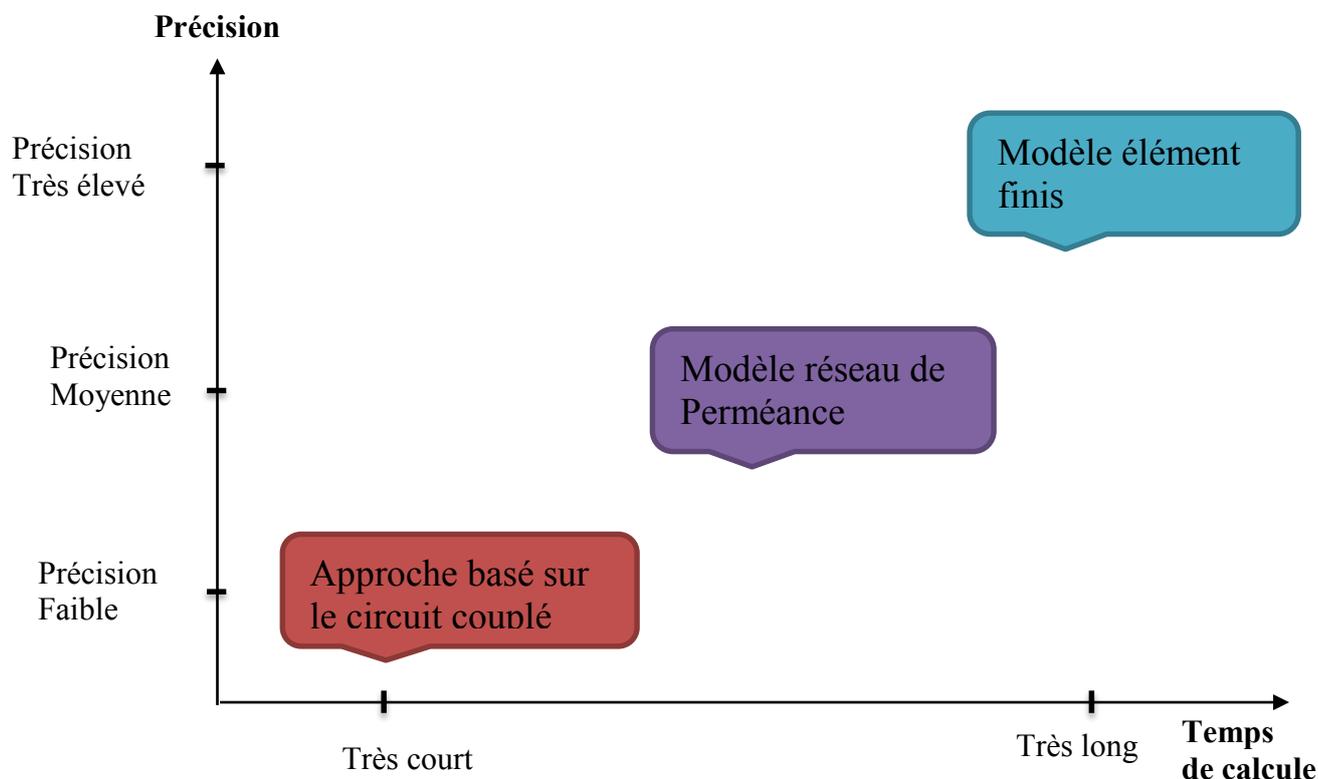


Fig. II.3 : Comparaison entre les différentes approches de modélisation en fonction de précision et le temps d'exécution

II.3 Modélisation de la machine asynchrone

II.3.1 Hypothèse simplificatrices :

Afin de simplifier la modélisation de la MAS, on va admettre les hypothèses simplificatrices suivantes :

- Entrefer constant.
- Effet des encoches négligé.
- Distribution spatiale sinusoïdale des forces magnétomotrices d'entrefer.
- Circuit magnétique non saturé et à perméabilité constante.
- Pertes ferromagnétiques négligeables.

II.3.2 Modélisation de la MAS dans le plan triphasé abc :

Le modèle de la MAS triphasé est illustré par le schéma de la Fig. (II.4) avec les armatures statoriques et rotoriques sont munies chacune d'un enroulement triphasé, sont trois enroulements du stator : S_a, S_b, S_c . Et pour les trois enroulements rotoriques R_a, R_b, R_c , et θ_r Angle entre l'axe de la phase statorique et la phase rotorique dans l'espace électrique

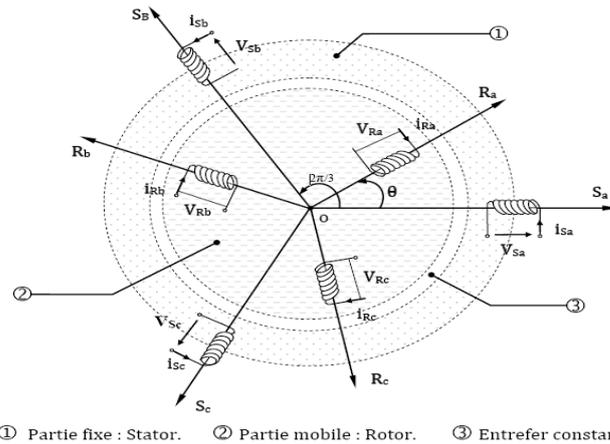


Fig. I.4 : Représentation schématique d'une machine asynchrone triphasée.

II.3.3 Équations générales de la machine asynchrone triphasée

Dans ces conditions, si on considère que le moteur à induction est triphasé au stator et au rotor. Les trois types d'équations traduisant le comportement du moteur sont [29] :

Loi de Faraday

La loi de Faraday dit que la force électromotrice induite dans un bobinage fermé placé dans un champ magnétique est proportionnelle à la variation au cours du temps du flux du champ magnétique qui entre dans le circuit

$$E = -\frac{d\phi}{dt} \quad (\text{II.1})$$

Le signe (-) correspond à la loi de Lenz qui dit que la tension induite s'oppose par ses effets à la cause qui lui donne naissance.

Donc d'après la loi de Faraday nous pouvons écrire :

$$V = ri + \frac{d}{dt}\phi \quad (\text{II.2})$$

En appliquant la loi de Faraday à chaque enroulement de la machine asynchrone et nous obtenons des équations de tension statoriques et rotoriques respectivement [29] :

$$V_s^{abc} = r_s i_s^{abc} + \frac{d\phi_s^{abc}}{dt} \quad (\text{II.3})$$

$$\begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} r_s & 0 & 0 \\ 0 & r_s & 0 \\ 0 & 0 & r_s \end{pmatrix} \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} + (d/dt) \begin{bmatrix} \phi_{as} \\ \phi_{bs} \\ \phi_{cs} \end{bmatrix}$$

$$V_r^{abc} = r_r i_r^{abc} + \frac{d\phi_r^{abc}}{dt} \quad (\text{II.4})$$

$$\begin{bmatrix} V_{ar} \\ V_{br} \\ V_{cr} \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} r_r & 0 & 0 \\ 0 & r_r & 0 \\ 0 & 0 & r_r \end{pmatrix} \begin{bmatrix} i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix} + (d/dt) \begin{bmatrix} \phi_{ar} \\ \phi_{br} \\ \phi_{cr} \end{bmatrix}$$

r_s : La résistance par phase du stator

r_r : La résistance par phase du rotor

$$\begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} \quad \text{Vecteur de tension statoriques.}$$

$$\begin{bmatrix} \phi_{as} \\ \phi_{bs} \\ \phi_{cs} \end{bmatrix} \quad \text{Vecteur de flux statoriques.}$$

$$\begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} \quad \text{Vecteur de courant statoriques.}$$

On définit de même, par changement d'indices les vecteurs rotoriques

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

$$\phi_s^{abc} = L_{ss}^{abc} i_s^{abc} + L_{sr}^{abc} i_r^{abc} \quad (II.5)$$

$$\phi_r^{abc} = L_{rr}^{abc} i_r^{abc} + L_{rs}^{abc} i_s^{abc}$$

$[L_{ss}]$ Représente la matrice d'inductance statorique

$[L_{rr}]$ Représente la matrice d'inductance rotorique

$[L_{sr}^{abc}]$ Représente la matrice des inductances mutuelles stator-rotor

Avec :

$$L_{ss}^{abc} = \begin{bmatrix} L_{ls} + L_{ss} & L_{sm} & L_{sm} \\ L_{sm} & L_{ls} + L_{ss} & L_{sm} \\ L_{sm} & L_{sm} & L_{ls} + L_{ss} \end{bmatrix} \quad (II.6)$$

$$L_{rr}^{abc} = \begin{bmatrix} L_{lr} + L_{rr} & L_{rm} & L_{rm} \\ L_{rm} & L_{lr} + L_{rr} & L_{rm} \\ L_{rm} & L_{rm} & L_{lr} + L_{rr} \end{bmatrix} \quad (II.7)$$

$$L_{sr}^{abc} = [L_{rs}^{abc}]^T = L_{sr} \begin{bmatrix} \cos(\theta_r) & \cos(\theta_r + 2\pi/3) & \cos(\theta_r - 2\pi/3) \\ \cos(\theta_r - 2\pi/3) & \cos(\theta_r) & \cos(\theta_r + 2\pi/3) \\ \cos(\theta_r + 2\pi/3) & \cos(\theta_r - 2\pi/3) & \cos(\theta_r) \end{bmatrix} \quad (II.8)$$

L_{ls} : Inductance de fuite statorique par phase.

L_{lr} : Inductance de fuite rotoriques par phase.

L_{ss} Et L_{rr} : Inductances statorique et rotorique.

L_{sm} : Inductance mutuelle statorique.

L_{rm} : Inductance mutuelle rotorique.

L_{sr} Et L_{rs} . Sont les valeurs maximales des inductances mutuelles, respectivement du stator-rotor et rotor-stator

θ_r : Angle entre la phase a du stator et le rotor

Les équations ci-dessus montrent que les équations de tension du stator et du rotor sont Couplés l'un à l'autre par les termes d'inductance mutuelle, qui sont une fonction de l'angle du rotor, En introduisant (II.7) dans (II.4) et (II.6), on obtient [29] :

$$\begin{cases} V_s^{abc} = r_s i_s^{abc} + \frac{d}{dt} (L_{ss} i_s^{abc} + L_{sr} i_r^{abc}) \\ V_r^{abc} = r_r i_r^{abc} + \frac{d}{dt} (L_{sr} i_s^{abc} + L_{rr} i_r^{abc}) \end{cases} \quad (\text{II.9})$$

Du fait des termes trigonométriques contenus dans la matrice des inductances mutuelles $[L_{sr}]$, les coefficients des équations différentielles sont des variables et la résolution analytique du système se heurte à des difficultés pratiquement insurmontables.

Pour un modèle complet, l'équation de couple est également nécessaire, qui est déduite en appliquant la conservation d'énergie, est donnée par l'équation (II.12) dans le cas d'une machine à Induction [29] :

$$p_{in} = p_{em} + p_{loss} + p_{mm} \quad (\text{II.10})$$

p_{in} : La puissance à l'entrée de la machine à induction

p_{em} : Puissance électromagnétique transmise au rotor.

p_{loss} : La puissance de perte dans le cuivre et

p_{mm} : Représente le taux d'échange de l'énergie du champ magnétique entre les enroulements.

$$c_{em} = \frac{P_{em}}{\omega_{rm}} \quad \text{Le couple électromécanique} \quad (\text{II.11})$$

ω_{rm} vitesse angulaire mécanique du rotor

II.3.5 Transformation de Park appliquée à la Machines asynchrone

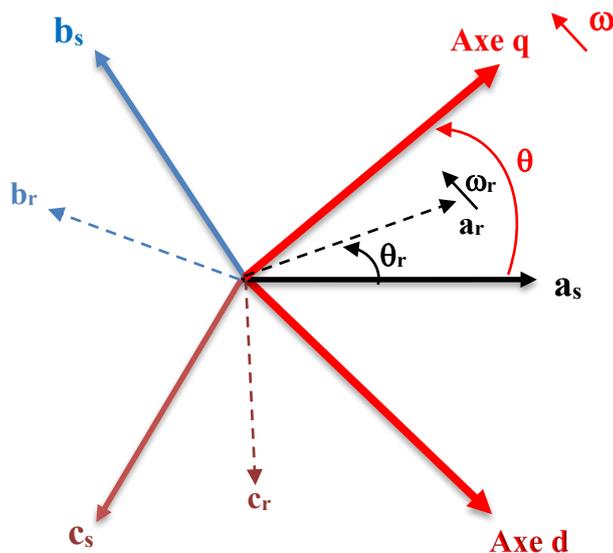


Fig. II.5. Relation entre abc et qdo

Il est difficile de simuler le système, pour obtenir un système d'équation à coefficients constants. La transformation de Park transforme les enroulements statoriques et rotoriques Naturelle en enroulements orthogonaux équivalant [29].

Les angles portés sur la figure désignent respectivement :

θ : Position angulaire du stator.

θ_r : L'angle entre le stator et le rotor.

ω : Pulsation électrique du système d'axe qd0.

ω_r : Pulsation électrique rotorique.

II.3.6 Transformation des grandeurs statoriques et rotoriques

Dans la théorie de Park, on utilise la transformation unique pour le courant, tension, et Flux [29].

$$[f_{qd0}] = [T_{qd0}(\theta)][f_{abc}] \quad (\text{II.12})$$

Les éléments des vecteurs de colonne f_{abc} et f_{abc} peuvent être les tensions de phase, des courants ou des flux de la machine, T_{qd0} est la matrice de transformation qd0.

$$T_{qd0}(\theta) = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta + 2\pi/3) \\ \sin(\theta) & \sin(\theta - 2\pi/3) & \sin(\theta + 2\pi/3) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (\text{II.13})$$

Cette matrice est orthogonale, c'est-à-dire $[T_{qd0}]^T = [T_{qd0}]^{-1}$

La fonction de transformation inverse de Park peut s'écrire

$$[f_{abc}] = [T_{qd0}]^{-1}(\theta)[f_{qd0}] \quad (\text{II.14})$$

Avec

$$T_{qd0}(\theta)^{-1} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) & 1 \\ \cos(\theta - 2\pi/3) & \sin(\theta - 2\pi/3) & 1 \\ \cos(\theta + 2\pi/3) & \sin(\theta + 2\pi/3) & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{II.15})$$

Les éléments de la vectrice colonne f_{qd0} et f_{abc} peuvent être les tensions, courants ou le flux de la machine,

$[T_{qd0}]$ Est la matrice de transformation $qd0$ La transformation inverse est utilisée pour retrouver les grandeurs triphasées correspondant

Remarque : On a ajouté les composantes homopolaires pour équilibrer la transformation (ces composantes sont égales à zéro dans le cas d'un système triphasé équilibré).

II.3.7 Modèle de la machine dans le repère qd0

Les fonctions de transformation (II.12) et (II.14) sont appliqués aux tensions, aux Courants et aux résistances dans l'équation. (II.3) et l'équation (II.4). Cela donne :

$$V_s^{qd0} = T_{qd0}(\theta) r_s T_{qd0}^{-1}(\theta) i_s^{qd0} + T_{qd0}(\theta) \frac{d}{dt} [T_{qd0}^{-1}(\theta) \phi_s^{qd0}] \quad (\text{II.16})$$

Le terme dérivé temporel suivant peut-être exprimé comme [9]:

$$\frac{d[T_{qd0}^{-1}(\theta) \phi_s^{qd0}]}{dt} = \frac{d[T_{qd0}^{-1}(\theta)]}{dt} \cdot \phi_s^{qd0} + T_{qd0}^{-1}(\theta) \cdot \frac{d(\phi_s^{qd0})}{dt} \quad (\text{II.17})$$

$$= \begin{bmatrix} -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & 0 \\ -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & 0 \end{bmatrix} \frac{d\theta}{dt} \cdot \phi_s^{qd0} + T_{qd0}^{-1}(\theta) \cdot \frac{d(\phi_s^{qd0})}{dt}$$

$$V_r^{qd0} = T_{qd0}(\theta - \theta_r) r_r T_{qd0}^{-1}(\theta - \theta_r) i_r^{qd0} + T_{qd0}(\theta - \theta_r) \frac{d}{dt} [T_{qd0}^{-1}(\theta - \theta_r) \phi_r^{qd0}] \quad (\text{II.18})$$

On obtient finalement le système des équations de Park qui constitue le modèle de la machine

$$V_s^{qd0} = r_s^{qd0} i_s^{qd0} + E_s^{qd0} + \frac{d\phi_s^{qd0}}{dt} \quad (\text{II.19})$$

$$V_r^{qd0} = r_r^{qd0} i_r^{qd0} + E_r^{qd0} + \frac{d\phi_r^{qd0}}{dt} \quad (\text{II.20})$$

Avec :

$$E_s^{qd0} = \omega \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \phi_s^{qd0} \quad E_r^{qd0} = (\omega - \omega_r) \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \phi_r^{qd0}$$

$$r_s^{qd0} = r_s \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad r_r^{qd0} = r_r \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \omega = \frac{d\theta}{dt} \quad \omega_r = \frac{d(\theta_r)}{dt}$$

Les termes i_r sont les tensions produisant des pertes de cuivre, les termes E Représentent le taux d'énergie converti en travail mécanique, les termes $\frac{d}{dt}$ Représentent le taux d'échange du champ magnétique entre les enroulements [29].

II.3.8 Réduction de la matrice des inductances

Les transformations établissent des relations entre les flux dans le repère qdo et les flux

Dans le repère abc :

Au stator :

$$\phi_s^{qd0} = T_{qd0}(\theta) \left(L_{ss}^{abc} i_s^{abc} + L_{sr}^{abc} i_r^{abc} \right) \quad (II.21)$$

En appliquant la transformation du Park aux équations de liaison ci-dessus, obtenir

$$\omega_r = \frac{d(\theta_r)}{dt}$$

$$\times \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 1 \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \\ \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i_{0s} \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned}
 & + \frac{2}{3} L_{sr} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \sin \theta & \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta_r & \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos \theta_r & \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos \theta_r \end{bmatrix} \\
 & \times \begin{bmatrix} \cos(\theta - \theta_r) & \sin(\theta - \theta_r) & 1 \\ \cos\left(\theta - \theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta - \theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \\ \sin\left(\theta - \theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta - \theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qr} \\ i_{dr} \\ i_{0r} \end{bmatrix} \\
 & = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \frac{3}{2}(L_{ls} + L_{ss} - L_{sn}) & 0 & 0 \\ 0 & \frac{3}{2}(L_{ls} + L_{ss} - L_{sn}) & 0 \\ 0 & 0 & \frac{3}{2}(L_{ls} + L_{ss}) + 3L_{sm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i_{0s} \end{bmatrix} + L_{sr} \begin{bmatrix} \frac{3}{2} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{3}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qr} \\ i_{dr} \\ i_{0r} \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

En raison de :

$$L_{sm} = L_{ss} \cos \frac{2\pi}{3} = -\frac{1}{2} L_{ss} \quad \text{L'équation ci-dessus peut être écrite comme}$$

$$\begin{bmatrix} L_{ls} + \frac{3}{2} L_{ss} & 0 & 0 \\ 0 & L_{ls} + \frac{3}{2} L_{ss} & 0 \\ 0 & 0 & L_{ls} \end{bmatrix} i_s^{qd0} + \begin{bmatrix} \frac{3}{2} L_{sr} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{3}{2} L_{sr} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} i_r^{qd0}$$

De même, nous pouvons obtenir les liens du rotor flux dans le cadre de référence qd0

$$\phi_r^{qd0} = \begin{bmatrix} \frac{3}{2} L_{sr} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{3}{2} L_{sr} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} i_s^{qd0} + \begin{bmatrix} L_{lr} + \frac{3}{2} L_{rr} & 0 & 0 \\ 0 & L_{lr} + \frac{3}{2} L_{rr} & 0 \\ 0 & 0 & L_{lr} \end{bmatrix} i_r^{qd0}$$

Alors équation (II.20) est obtenu en exprimant les deux équations ci-dessus ensemble de manière compacte

Au rotor :

$$\phi_r^{qd0} = T_{qd0}(\theta - \theta_r)(L_{rr}^{abc} i_r^{abc} + L_{rs}^{abc} i_s^{abc}) \quad (\text{II.22})$$

Après le calcul, on trouve :

$$\begin{bmatrix} \phi_{qs} \\ \phi_{ds} \\ \phi_{0s} \\ \phi'_{qr} \\ \phi'_{dr} \\ \phi'_{0r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{ls} + L_m & 0 & 0 & L_m & 0 & 0 \\ 0 & L_{ls} + L_m & 0 & 0 & L_m & 0 \\ 0 & 0 & L_{ls} & 0 & 0 & 0 \\ L_m & 0 & 0 & L'_{lr} + L_m & 0 & 0 \\ 0 & L_m & 0 & 0 & L'_{lr} + L_m & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & L'_{lr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{qs} \\ I_{ds} \\ I_{0s} \\ I'_{qr} \\ I'_{dr} \\ I'_{0r} \end{bmatrix} \quad (\text{II.23})$$

On constate :

D'une part, que la transformation de Park rend les coefficients de la matrice des Inductances indépendants du temps ;

D'autre part, que le nombre de paramètres électromagnétiques se réduit.

L_m : Inductance magnétisante liée au stator, nous pouvons exprimer cette inductance en fonction de nombre de spire : N_s et N_r [29]:

$$L_m = \frac{3}{2} L_{ss} = \frac{3}{2} \frac{N_s}{2N_r} L_{sr} = \frac{3}{2} \frac{N_s}{N_r} L_{rr} \quad (\text{II.24})$$

N_s et N_r sont le nombre de spires dans le stator et le rotor

On remplace l'équation (II.19) et (II.21) dans (II.23) pour former toutes les équations de tension de la machine dans le repère qd0.

$$P_{in} = V_{as} i_{as} + V_{bs} i_{bs} + V_{cs} i_{cs} + V'_{ar} i'_{ar} + V'_{br} i'_{br} + V'_{cr} i'_{cr} \quad (\text{II.25})$$

En appliquant la transformation de Park sur l'équation (II.12) on obtient [29]:

$$P_{in} = \frac{3}{2}(V_{qs}i_{qs} + V_{ds}i_{ds} + 2V_{0s}i_{0s} + V_{qr}'i_{qr}' + V_{dr}'i_{dr}' + 2V_{0r}'i_{0r}') \quad (II.26)$$

$$\begin{aligned} P_{in} &= \frac{3}{2} \left[r_s i_{qs}^2 + \omega \phi_{ds} i_{qs} + \frac{d}{dt}(\phi_{qs} i_{qs}) + r_s i_{ds}^2 - \omega \phi_{qs} i_{ds} + \frac{d}{dt}(\phi_{ds} i_{ds}) \right. \\ &+ 2r_s i_{0s}^2 + 2 \frac{d}{dt}(\phi_{0s} i_{0s}) + r_r' i_{qr}'^2 + (\omega - \omega_r) \phi_{dr}' i_{qr}' + \frac{d}{dt}(\phi_{qr}' i_{qr}') \\ &\left. + r_r' i_{dr}'^2 - (\omega - \omega_r) \phi_{qr}' i_{dr}' + \frac{d}{dt}(\phi_{dr}' i_{dr}') + 2r_r' i_{0r}'^2 + 2 \frac{d}{dt}(\phi_{0r}' i_{0r}') \right] \\ &= \frac{3}{2} (r_s i_{qs}^2 + r_s i_{ds}^2 + 2r_s i_{0s}^2 + r_r' i_{qr}'^2 + r_r' i_{0r}'^2) + \frac{3}{2} \left[\omega (\phi_{ds} i_{qs} - \phi_{qs} i_{ds}) + (\omega - \omega_r) (\phi_{dr}' i_{qr}' - \phi_{qr}' i_{dr}') \right] \\ &+ \frac{3}{2} \frac{d}{dt} (\phi_{qs} i_{qs} + \phi_{ds} i_{ds} + 2\phi_{0s} i_{0s} + \phi_{qr}' i_{qr}' + \phi_{dr}' i_{dr}' + 2\phi_{0r}' i_{0r}') \end{aligned}$$

Le $i^2 r$ terme est les pertes de cuivre,

$i \frac{d\phi}{dt}$ Sont le taux de l'échange de l'énergie magnétique entre les enroulements,

$\omega \phi i$ Termes représentent le taux d'énergie converti en travail mécanique.

Le couple électromécanique développé par la machine est donnée par la somme de $\omega \phi i$ termes divisés par la vitesse mécanique

vitesse angulaire mécanique du rotor $\omega_{rm} = \frac{2}{P} \omega_r$

$$T_{em} = \frac{3}{2} \frac{P}{\omega_r} \left[\omega (\phi_{ds} i_{qs} - \phi_{qs} i_{ds}) + (\omega - \omega_r) (\phi_{dr}' i_{qr}' - \phi_{qr}' i_{dr}') \right] \quad (II.27)$$

L'équation du couple électromécanique dans le repère qd0 est donnée par [29] :

Avec P est le nombre de pôles de la machine et ω_{rm} , ω_r respectivement les vitesses de rotation mécanique et électrique du rotor :

$$\omega_{rm} = \frac{2}{P} \omega_r \quad (II.28)$$

L'équation de couple peut également être exprimée en utilisant la relation de flux dans l'équation. (II.23)

$$T_{em} = \frac{3}{2} \frac{P}{2} (\phi_{ds} i_{qs} - \phi_{qs} i_{ds}) \quad (II.29)$$

Les paramètres de la machine sont toujours déterminés en fonction ψ et x , dans les expériences, ces quantités ont la relation suivante [29] :

$$\psi(pu) = \omega_b \phi \quad \text{et} \quad x(pu) = \omega_b L$$

L'équation de la vitesse du rotor

$$\frac{d\left(\frac{\omega_r}{\omega_b}\right)}{dt} = \frac{1}{2H} (T_{em} + T_{load} - T_{damp})$$

Où ω_b est la valeur de base de la fréquence angulaire calculée par $\omega_b = 2\pi f$, f est la fréquence d'alimentation. p est le nombre de pôles de la machine. T_{load} Est le couple mécanique appliqué par la charge, T_{damp} est le couple d'amortissement dans le sens opposé à la rotation du rotor, et H est la constante d'inertie [29].

II.5 Modèle en présence de défaut rotorique (rupture des barres)

Le rotor à barres cassées provoque une asymétrie de la résistance et de l'inductance dans les phases du rotor, ce qui entraîne une asymétrie de la rotation de champ électromagnétique dans l'entrefer entre le stator et le rotor. Par conséquent, cela induira des harmoniques de fréquence dans les courants statorique. L'impact des cassures des barres rotorique peut être modélisé en déséquilibrant la résistance du rotor, les changements d'inductance sont négligeable en raison de son influence insignifiante par rapport aux changements de résistance [30,31]. Pour plus de simplicité, pour un rotor à cage d'écureuil, la contribution de l'anneau en court-circuit est également négligée [30,31]. Les résistances et inductances du stator restent inchangées

La matrice de résistance r_r dans eq. (II.4) écrit comme suit

$$r_r^* = \begin{bmatrix} (r_r + \Delta r_{ra}) & 0 & 0 \\ 0 & (r_r + \Delta r_{rb}) & 0 \\ 0 & 0 & (r_r + \Delta r_{rc}) \end{bmatrix} \quad (\text{II.30})$$

$\Delta r_{ra}, \Delta r_{rb}$ et Δr_{rc} Représentent les variations de résistance du rotor dans la phase a, b et c, respectivement, en raison de défauts de barre cassés.

$$\Delta r_{ra,b,c} = \frac{3n_{bb}}{N_b - 3n_{bb}} r_r \quad (\text{II.31})$$

n_{bb} et N_b sont respectivement le nombre de barres cassées et le nombre total des barres au rotor. La résistance équivalente du rotor d'un moteur à induction sain est donnée par [30]

$$r_r = \frac{(2N_s)^2}{N_b / 3} \left[r_b + \frac{2}{N_b \left(2 \sin \frac{\alpha}{2} \right)^2} r_e \right] \quad (\text{II.32})$$

r_b Et r_e représentent respectivement les résistances de la barre du rotor et de l'anneau, et N_s est le nombre de tours de bobinage du stator équivalent, lorsque r_e est négligé,

r_r Simplifie alors :

$$r_r \approx \frac{(2N_s)^2}{N_b / 3} r_b \quad (\text{II.33})$$

Ensuite, la résistance d'un rotor per phase avec des barres de rotor brisées contiguës n_{bb} devient

$$r_r^* \approx \frac{(2N_s)^2}{N_b / 3 - n_{bb}} r_b \quad (\text{II.34})$$

Donc :

$$\Delta r_{ra,b,c} = r_r^* - r_r = \frac{(2N_s)^2}{N_b / 3 - n_{bb}} r_b - \frac{(2N_s)^2}{N_b / 3} r_b = \frac{3n_{bb}}{N_b - 3n_{bb}} r_r \quad (\text{II.35})$$

Ensuite, nous substituons la résistance de rotor modifiée à la matrice de résistance de rotor d'origine dans l'équation. (II.4), puis nous appliquons les étapes de la méthode précédemment décrites de transformation du cadre de référence abc en qd0, ce qui donne [32].

$$\Delta r_r^{*qd0} = \begin{bmatrix} r_{r11} & r_{r12} & r_{r13} \\ r_{r21} & r_{r22} & r_{r23} \\ r_{r31} & r_{r32} & r_{r33} \end{bmatrix} \quad (\text{II.36})$$

Les éléments de la matrice sont :

$$r_{r11} = \frac{1}{3} (\Delta r_{ra} + \Delta r_{rb} + \Delta r_{rc}) + \frac{1}{6} (2\Delta r_{ra} - \Delta r_{rb} - \Delta r_{rc}) \cos(2\theta_r) + \frac{\sqrt{3}}{6} (\Delta r_{rb} - \Delta r_{rc}) \sin(2\theta_r)$$

$$r_{r13} = \frac{1}{3}(2\Delta r_{ra} - \Delta r_{rb} - \Delta r_{rc})\cos(\theta_r) + \frac{\sqrt{3}}{3}(\Delta r_{rb} - \Delta r_{rc})\sin(\theta_r)$$

$$r_{r21} = r_{r12}$$

$$r_{r22} = \frac{1}{3}(\Delta r_{ra} + \Delta r_{rb} + \Delta r_{rc}) - \frac{1}{6}(2\Delta r_{ra} - \Delta r_{rb} - \Delta r_{rc})\cos(2\theta_r) + \frac{\sqrt{3}}{6}(\Delta r_{rb} - \Delta r_{rc})\sin(2\theta_r)$$

$$r_{r23} = -\frac{1}{3}(2\Delta r_{ra} - \Delta r_{rb} - \Delta r_{rc})\cos(\theta_r) - \frac{\sqrt{3}}{3}(\Delta r_{rb} - \Delta r_{rc})\sin(\theta_r)$$

$$r_{r31} = \frac{1}{2}r_{r13}$$

$$r_{r32} = \frac{1}{2}r_{r23}$$

$$r_{r33} = \frac{1}{3}(\Delta r_{ra} + \Delta r_{rb} + \Delta r_{rc})$$

II.6 Modèle en présence de défaut statorique (court-circuit entre spire)

Le défaut de court-circuit des enroulements du stator dans une machine asynchrone peut être modélisé de la même manière que le défaut de rupture de la barre du rotor.

Dans une condition idéale, tous les paramètres du stator sont considérés comme identiques en trois phases. Lorsqu'un court-circuit entre les spires du stator se produit dans une phase donnée, le nombre correspondant de bobinages diminuera [29]. Dans ce cas, les changements de résistance et d'inductance du stator due à un court-circuit doivent être pris en compte.

Une relation approximative entre la portion de court-circuit et le changement d'inductance de l'enroulement dans le stator est qu'il faut considérer l'inductance de fuite doit être proportionnelle au nombre de tours carrés [32].

Alors que les inductances du rotor L_{rr}^{abc} restent inchangées

r_r Doit être remplacé par r_r^* en cas de défaut du rotor, les paramètres électriques du stator

r_s , L_{ss}^{abc} et les inductances mutuelles entre le stator et rotor (L_{sr}^{abc} et L_{rs}^{abc}) sont directement touchés. Soit g_{sa} , g_{sb} et g_{sc} le pourcentage des enroulements statoriques non court-circuités restants dans les phases a, b et c du stator, respectivement.

La matrice de résistance statoriques modifiée r_s à une structure similaire avec la matrice de résistance du rotor modifiée r_r dans l'équation (II.30) pour le défaut de barre cassée.

La matrice suivante représente la matrice d inductance du stator modifiée L_{ss}^{*abc} [29].

$$L_{ss}^{*abc} = \begin{bmatrix} g_{sa}^2 (L_{ls+L_{ss}}) & g_{sa} g_{sb} L_{sm} & g_{sa} g_{sc} L_{sm} \\ g_{sa} g_{sb} L_{sm} & g_{sa}^2 (L_{ls+L_{ss}}) & g_{sb} g_{sc} L_{sm} \\ g_{sb} g_{sc} L_{sm} & g_{sb} g_{sc} L_{sm} & g_{sa}^2 (L_{ls+L_{ss}}) \end{bmatrix}. \quad (II.37)$$

Et ici c'est la matrice d inductance mutuelle stator –rotor L_{sr}^{*abc}

$$L_{sr}^{*abc} = L_{sr} \begin{bmatrix} g_{sa} \cos \theta_r & g_{sa} \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & g_{sa} \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) \\ g_{sb} \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & g_{sb} \cos \theta_r & g_{sb} \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) \\ g_{sc} \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & g_{sc} \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & g_{sc} \cos \theta_r \end{bmatrix} \quad (II.38)$$

La relation suivante montre comment nous l'obtenons la matrice d inductance mutuelle rotor-stator L_{rs}^{*abc}

$$L_{rs}^{*abc} = [L_{sr}^{*abc}]^T$$

L_{ss} Et L_{rr} : ce sont les inductances dans le stator et le rotor respectivement.

L_{sm} : L'inductance mutuelle entre les enroulements de stator.

L_{rm} : L'inductance mutuelle entre les enroulements de rotor.

L_{sr} : La valeur crête de L'inductance mutuelle stator-rotor.

Dans ce cas en modélise la machine asynchrone d'une manière similaire de défaillance de bar cassée, En supposant que le court-circuit se produit uniquement dans la phase a du stator pour plus de simplicité, la matrice de résistance du stator à spires court-circuitées peut être écrit comme suit :

$$r_s^{*qd0} = r_s \begin{bmatrix} r_{s11} & 0 & r_{s13} \\ 0 & r_{s22} & 0 \\ r_{s31} & 0 & r_{s33} \end{bmatrix} \quad (II.39)$$

Les éléments non nuls de la matrice sont :

$$r_{s11} = \frac{1}{3}(2g_{as} + 1)$$

$$r_{s13} = \frac{2}{3}(2g_{as} - 1)$$

$$r_{s22} = 1$$

$$r_{s31} = \frac{1}{3}(g_{as} - 1)$$

$$r_{s33} = \frac{1}{3}(g_{as} + 1)$$

La matrice du flux statoriques et rotorique peut exprimer comme suit :

$$\begin{bmatrix} \phi_s^{*qdo} \\ \phi_r^{*qdo} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{11} & 0 & L_{13} & L_{14} & 0 & 0 \\ 0 & L_{22} & 0 & 0 & L_{25} & 0 \\ L_{31} & 0 & L_{33} & L_{34} & 0 & 0 \\ L_{41} & 0 & L_{43} & L_{44} & 0 & 0 \\ 0 & L_{52} & 0 & 0 & L_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_s^{qdo} \\ i_r^{qdo} \end{bmatrix} \quad (\text{II.40})$$

Les éléments de matrice :

$$L_{11} = \frac{1}{3}(2g_{sa}^2 + 1)L_{ls} + \frac{1}{9}(2g_{sa} + 1)^2 L_m$$

$$L_{13} = \frac{2}{3}(g_{sa}^2 + 1)L_{ls} + \frac{2}{9}(2g_{sa}^2 - g_{sa} - 1)L_m$$

$$L_{14} = L_{41} = \frac{1}{3}(2g_{sa} + 1)L_m$$

$$L_{22} = L_{ls} + L_m$$

$$L_{25} = L_{52} = L_m$$

$$L_{31} = \frac{1}{3}(g_{sa}^2 - 1)L_{ls} + \frac{1}{9}(2g_{sa}^2 - g_{sa} - 1)L_m$$

$$L_{33} = \frac{1}{3}(g_{sa}^2 + 2)L_{ls} + \frac{2}{9}(g_{sa}^2 - 2g_{sa} - 1)L_m$$

$$L_{34} = \frac{1}{3}(g_{sa} - 1)L_m$$

$$L_{43} = 2L_{34}$$

$$L_{44} = L_{55} = L_{lr} + L_m$$

$$L_{66} = L_{lr}$$

II.7 déséquilibre de la tension

Un système d'alimentation électrique désigne un ensemble de systèmes capables de fournir de l'électricité aux industries, appareils électriques fonctionnant avec cette énergie.

Le système d'alimentation comme illustre dans (figure II.6) constitué d'une source électrique un transformateur élévateur et un réseau de distribution d'électricité. (Ligne de transmission) pour transporté l'énergie et un transformateur abaisseur.

La fonctionnalité du système d'alimentation électrique diminue lorsqu'il fonctionne dans des conditions de déséquilibre.

La provenance du déséquilibre de tension peut provenir de la source de tension ou des transformateurs et parfois de Ligne de transmission. Il faut donc analyser et évaluer les performances du système [33].

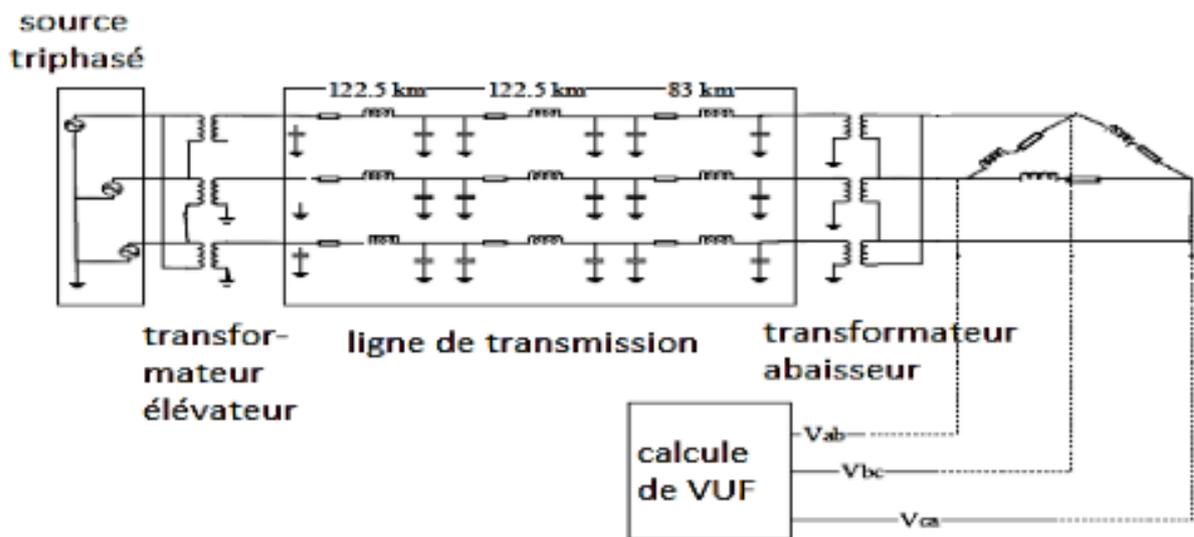


Fig. II.6 : Disposition générale d'une modèle de simulation du système électrique

II.7.1 Commission électrotechnique internationale (CEI)

Le facteur de déséquilibre de tension (VUF) est le degré de déséquilibre classé par la CEI et également connues sous le nom de définition exacte par rapport à la définition de L'Association nationale des fabricants de matériel électrique (NEMA). La valeur de VUF est définie comme [5] :

$$VUF = \left| \frac{V_n}{V_p} \right| \times 100\% = Kv$$

Où

V_n et V_p sont les séquences positive et négative composant des tensions en p.u.

VUF transmet des meilleures informations sur la cause et l'effet du déséquilibre de tension sur le moteur directement reflète par la composante de séquence négative. Mais cette définition seule n'est pas jugée appropriée pour une évaluation précise de la performance du moteur sous tension d'alimentation déséquilibré comme pour la valeur fixe VUF. La prédiction précise de la performance du moteur n'est possible que lorsque les conditions de sous ou la surtension est également disponible avec le degré de tension déséquilibré.

II.7.2 Approximation du déséquilibre dans un réseau

Voici comment obtenir une bonne approximation du déséquilibre dans un réseau :

1. Mesurer les trois tensions phase-phase.
2. Calculer la tension moyenne.
3. Déterminer la tension qui présente le plus grand écart par rapport à la moyenne.
4. Calculer le rapport entre cet écart et la tension moyenne. Si le rapport est supérieur à 2 %,

En pratique, une valeur approchée du déséquilibre peut être obtenue par le rapport :

$$PVUR = \frac{\max \left[|V_1 - V_{moy}|, |V_2 - V_{moy}|, |V_3 - V_{moy}| \right]}{V_{moy}} \times 100\%$$

Avec

$$V_{moy} = \frac{V_1 + V_2 + V_3}{3}$$

II.7.3 Niveaux de compatibilité

La norme CEI 1000-2-4 définit les niveaux de compatibilité sur les réseaux industriels, elle s'applique aux réseaux de basse et moyenne tension comme montre le tableau I.3. Les niveaux de compatibilité sont donnés pour différentes classes d'environnement[34] :

- Classe 1 : Cette classe s'applique aux réseaux protégés, elle a des niveaux de compatibilité plus bas que ceux des réseaux publics. Elle se rapporte à l'utilisation d'appareils très sensibles aux perturbations du réseau de puissance, par exemple instrumentation de laboratoires technologiques, certains équipements d'automatisation et de protection, certains ordinateurs ...

Elle contient normalement des équipements qui nécessitent d'être alimentés par une Alimentation sans interruption. Elle s'applique seulement aux réseaux basse tension.

- Classe 2 : Elle s'applique au point de livraison du distributeur et au réseau interne. Les niveaux de compatibilité sont identiques à ceux des réseaux publics.
- Classe 3 : Elle s'applique seulement au réseau interne. Les niveaux de compatibilité sont supérieurs à Ceux de la classe 2.

Tableau II.1 : *Classe des réseaux industriels basse et moyenne tension*

Perturbation	Classe 1	Classe 2	Classe 3
Déséquilibre de tension	1%	2%	5%

Une bonne répartition des charges et un réglage judicieux des protections contre les déséquilibres de courant permettent une exploitation optimale. Il est également recommandé de vérifier en continu la tension pour détecter toute dégradation du réseau et ainsi préserver la durée de vie des équipements [34].

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté explicitement les étapes de construction du modèle mathématique de la machine asynchrone à cage d'écureuil, en utilisant l'approche des circuits électrique magnétiquement couplés. Tout d'abord nous avons introduit les paramètres des défauts (déséquilibre de tension, court-circuit entre spire et ruptures des barres rotorique) à cette approche notamment pour la simulation, ce qui sera l'objet du chapitre suivant.

Chapitre III-Simulation de la machine asynchrone

III.1 Introduction

Après avoir défini le modèle de la machine asynchrone triphasée à cage, un programme écrit en MATLAB, permet de mettre en évidence le comportement du moteur asynchrone dans les différentes conditions de fonctionnement.

Dans ce chapitre on va étudier l'évolution des différentes grandeurs électriques et électromécaniques de la machine asynchrone pour différentes conditions de fonctionnement, que ce soit sain ou défaillant. Ainsi nous présentons une nouvelle technique de surveillance des trois défauts électrique (déséquilibre de tension, barres cassées, court-circuit entre spire.), par l'étude du comportement de la vitesse en fonction du temps pendant le régime transitoire. Les résultats de simulation de machine asynchrone saine et en présence des défauts seront présenté dans ce chapitre.

III.2 Paramètre de la machine étudiée

Les paramètres et les données de la machine sont de référence [29]

Tableau III.1 Paramètre de la machine asynchrone a cage d'écureuil

Paramètre de la machine asynchrone a cage d'écureuil	
Tension nominal (v)	230
Puissance nominal (w)	746
Fréquence nominal (Hz)	50
Nombre de pôles	4
Réactance statorique (Ω)	4.81
Vitesse de base (tr/min)	1400
Réactance magnétique du stator (Ω)	999.9×10^{-4}
Réactance d'une barre Rotorique (Ω)	1.99
Moment d'inertie ($\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot$)	0.13

III.3 Schéma bloc du model dans l'environnement Matlab Simulink

La vue d'ensemble du modèle dynamique de la machine à induction dans l'environnement Matlab Simulink est représentée sur la figure suivant.

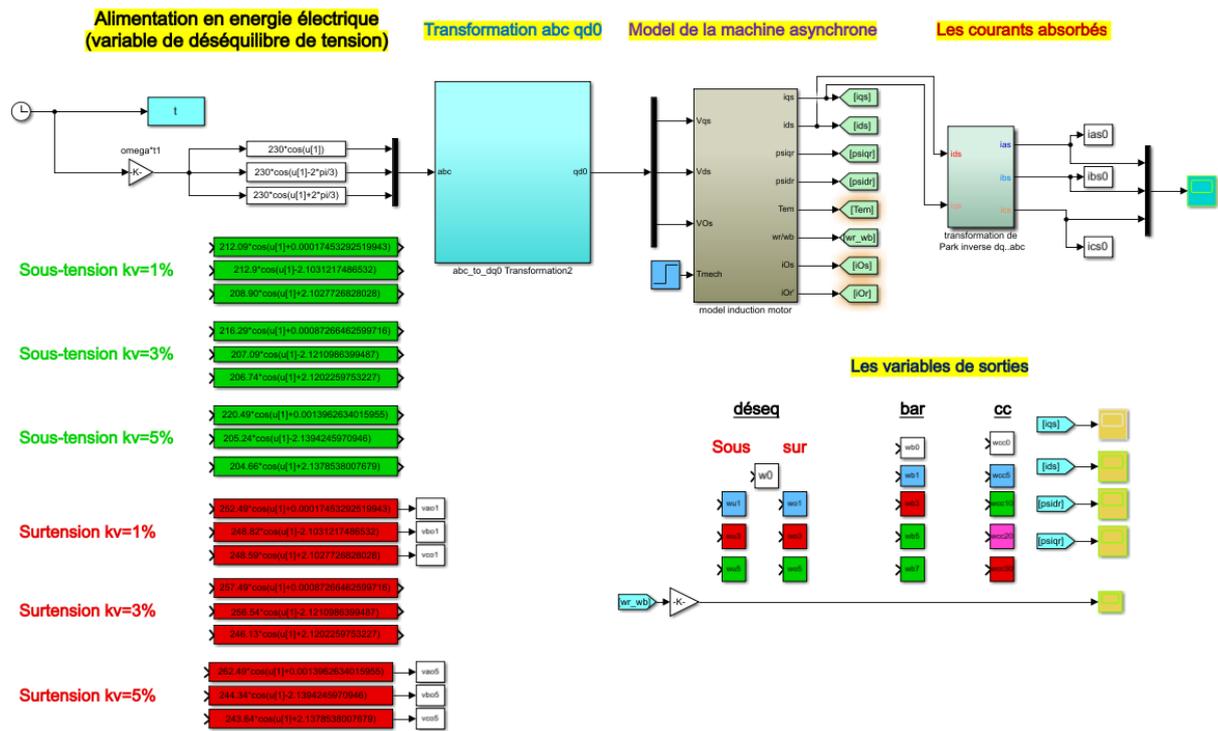


Fig.III.1 : Schéma bloc du modèle de moteur

Le schéma bloc du modèle de moteur est composée de cinq bloc repartie de gauche à droite nous trouvons

- 1) Bloc d'alimentation en énergie électrique sous différents cas à étudier.
- 2) Transformation abc à qd0 (transformation de Park).
- 3) Modèle à induction moteur composé de modules de séquence q, d et 0, qui sont les composants de base pour le calcul des liaisons de flux, les courants et les tensions dans un référentiel qd0.
- 4) Les courants statoriques.
- 5) Les variables de sortie (vitesse, couple et les courants)

Pour effectuer la simulation, le modèle Simulink doit être initialisé au préalable pour attribuer des valeurs à tous les paramètres de la machine et les conditions de fonctionnement.

Les entrées du modèle sont la tension triphasée équilibrée ainsi que déséquilibrée et le couple de charge. Le nombre de barres de rotor cassées et le pourcentage d'enroulements de stator en court-circuit peuvent être facilement modifiés à toutes les valeurs souhaitées comme indiqué dans le chapitre précédent.

III.4 la machine asynchrone à l'état sain

Nous pouvons étudier l'évolution des grandeurs temporelles tels que les courants, le couple et la vitesse rotorique lorsque la cage rotorique ne présente aucune défaillance (sain).

a) La vitesse

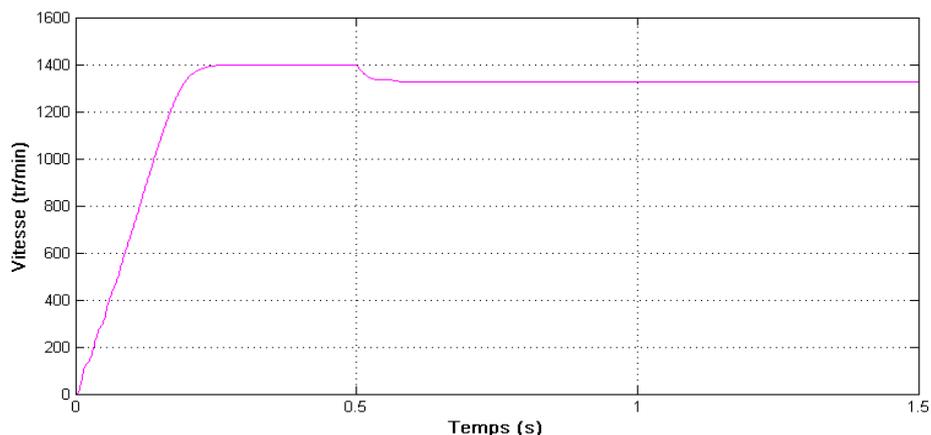


Fig.III.2 : *Vitesse de rotation d'une machine asynchrone saine*

Figure III.2 représente l'évolution de la vitesse de rotation d'une machine asynchrone à l'état sain en fonction du temps, en régime transitoire nous remarquons un accroissement linéaire de la vitesse au début de démarrage, qui en régime permanent se stabilise à 1400 (tr/min) a l'instant $t = 0.5s$, nous appliquons le couple résistant qui va tenter de freiner l'arbre du moteur d'où la diminution de la vitesse, puis elle se stabilise à une certaine valeur.

b) Couple électromagnétique

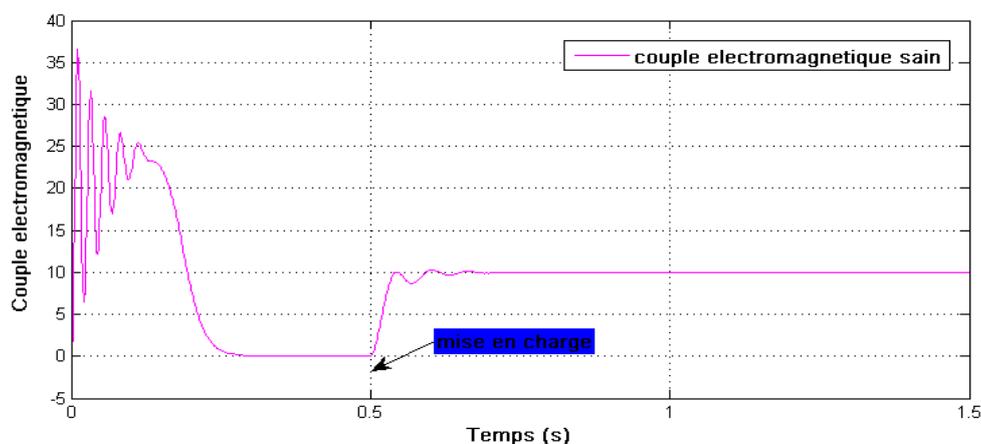


Fig.III.3 : *Couple électromagnétique d'une machine asynchrone sain*

La figure III.3 représente l'évolution du couple électromagnétique, d'une machine asynchrone à l'état sain, en régime transitoire se manifeste par des oscillations amorties due au courant de démarrage bref mais important il atteint une valeur maximale de 35 (N.m), À partir de l'instant $t = 0.11s$ le couple chute rapidement pour atteindre une valeur presque nulle, Dans l'instant $t=0.5s$ en appliquons un couple résistant $C_r = 10$ (N.m), le couple électromagnétique réagit d'une manière inverse, de sorte à combattre le couple résistant, d'après le principe fondamental de la dynamique, durant le régime permanent en charge, nous aurons un couple électromagnétique égal ou légèrement supérieur au couple résistant,

c) Les courants statoriques

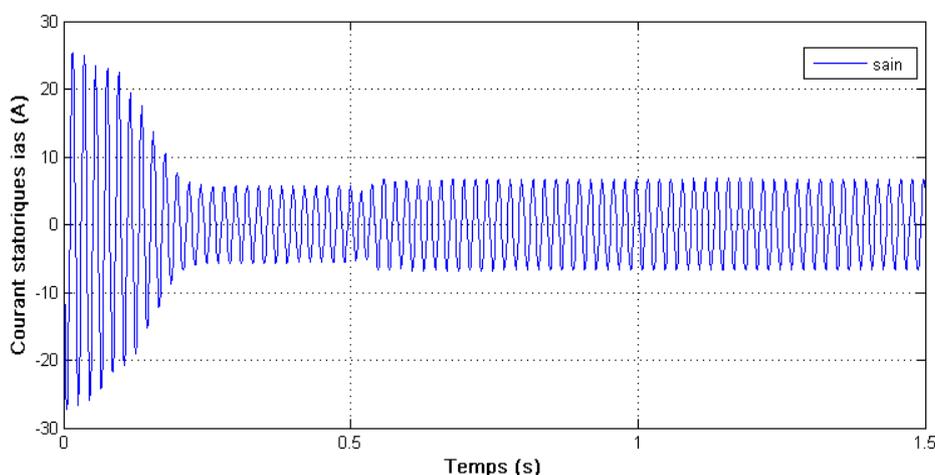


Fig. III.4 : Le courant statorique i_{as} de la machine asynchrone sain

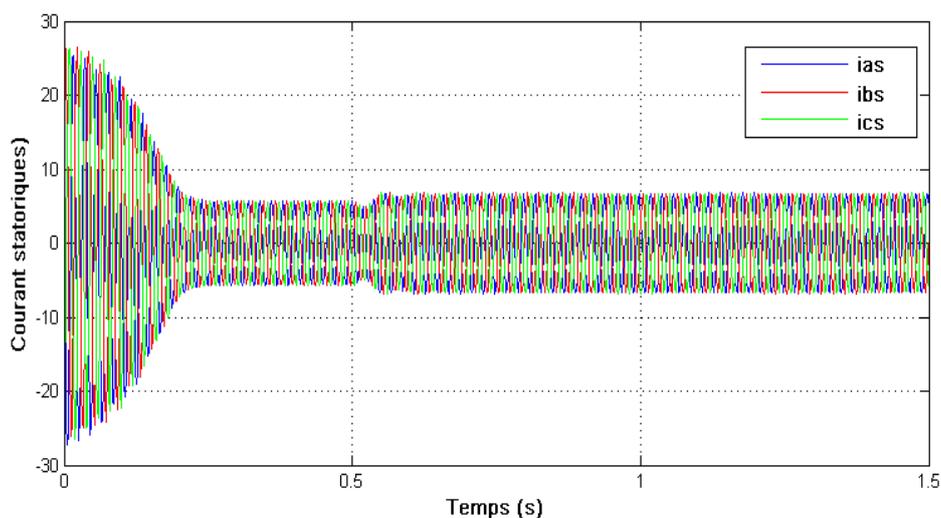


Fig.III.5 : Les courants statoriques i_{as} i_{bs} i_{cs} de la machine asynchrone sain

Les figures III.4 et III.5 Représentent l'évolution des courants statoriques en fonction du temps, Le régime transitoire se manifeste par des amplitudes de courants qui atteignent des valeurs maximales allant jusqu'à 30A et qui dure 0.25 s, le régime permanent s'établit et se traduit par la chute des courants avec des oscillations sinusoïdales autour de la valeur nulle, À t = 0.5s, nous imposons un couple résistant de 10 N.m, qui a comme effet d'augmenter les courants statoriques.

III.5 : La machine asynchrone en présence de défaut

III.5.1 Courbe de la vitesse en fonction du temps durant le régime transitoire

a) Cas de défaut de déséquilibre de tension

➤ Taux de déséquilibre d'alimentation en énergie électrique

La Commission électrotechnique internationale (CEI) introduit une définition indépendante du déséquilibre de tension ; il le définit comme le rapport entre la tension de séquence négative et la tension de séquence positive, ce rapport, appelé facteur de déséquilibre de tension VUF, décrit le pourcentage de déséquilibre de tension :

$$VUF = \left| \frac{V_n}{V_p} \right| 100\% = K_v$$

Tableau III.2 : Niveau de déséquilibre de tension

KV	V1	V2	V3	Condition du déséquilibre
1%	212.09∠0.01	212.09∠ -120.50	208.90∠120.48	Sous-tension
	252.49∠0.01	248.82∠ -120.50	248.59∠120.48	Surtension
3%	216.29∠0.05	207.09∠ -121.53	206.74∠121.48	Sous-tension
	257.49∠0.05	246.54∠ -121.53	246.13∠121.48	Surtension
5%	220.49∠0.08	205.24∠ -122.58	204.66∠122.49	Sous-tension
	262.49∠0.08	244.34∠ -122.58	243.64∠122.49	Surtension

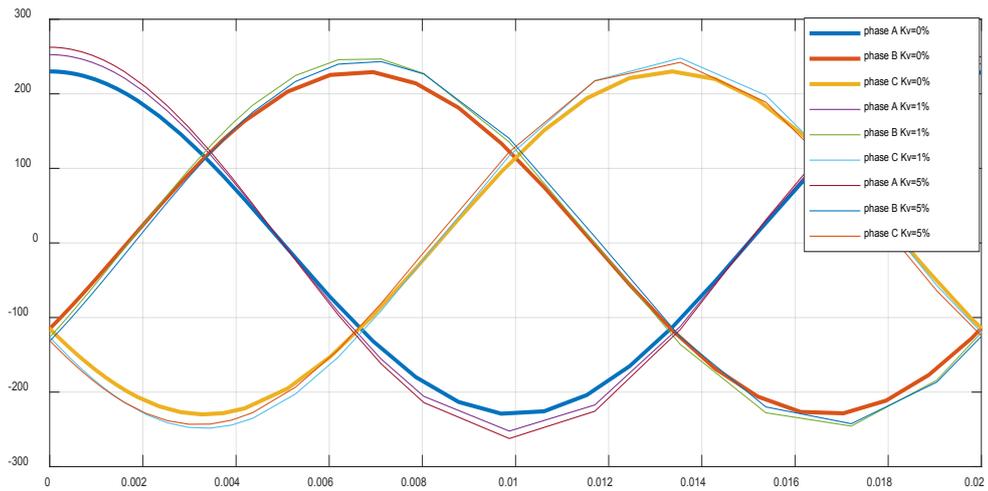


Fig.III.6 : Tension d'alimentation triphasée avec $K_v=0$, $K_v=1\%$ et $K_v=5\%$

➤ **Courbe de la vitesse en fonction du temps suivant le taux de déséquilibre de tension**

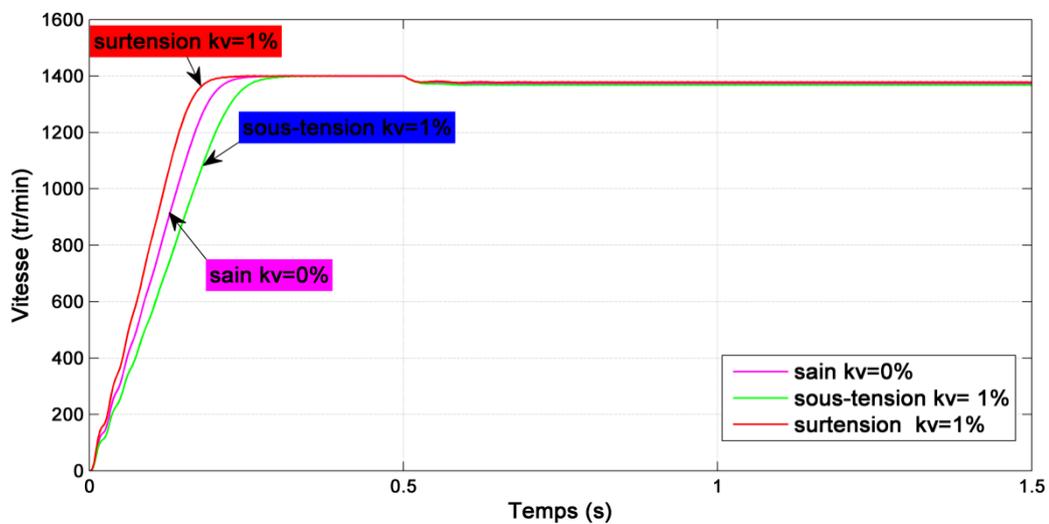


Fig. III.7 : Variation de la Vitesse de rotation en fonction de déséquilibre de tension $k_v=1\%$ (sous-tension et surtension)

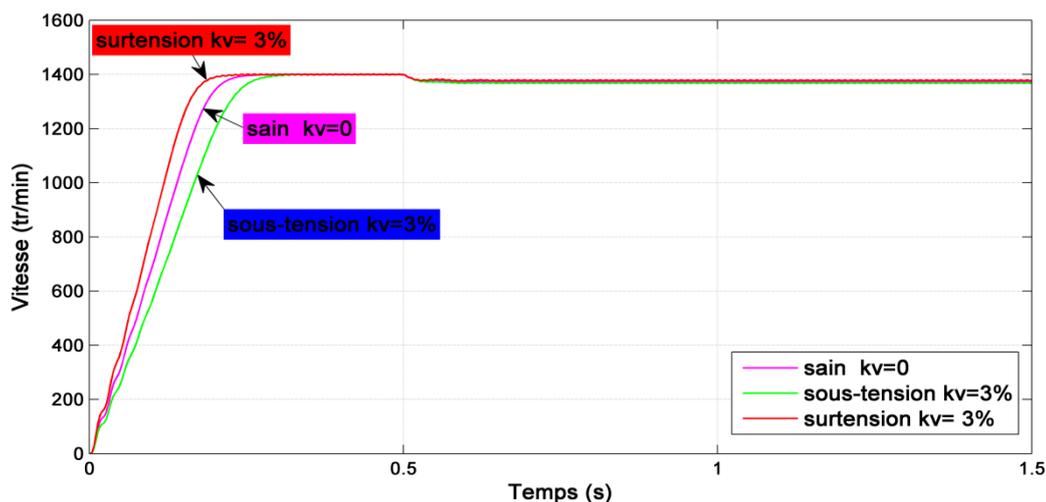


Fig. III.8 : Variation de la Vitesse en fonction de déséquilibre de tension $kV=3\%$ (sous-tension et surtension)

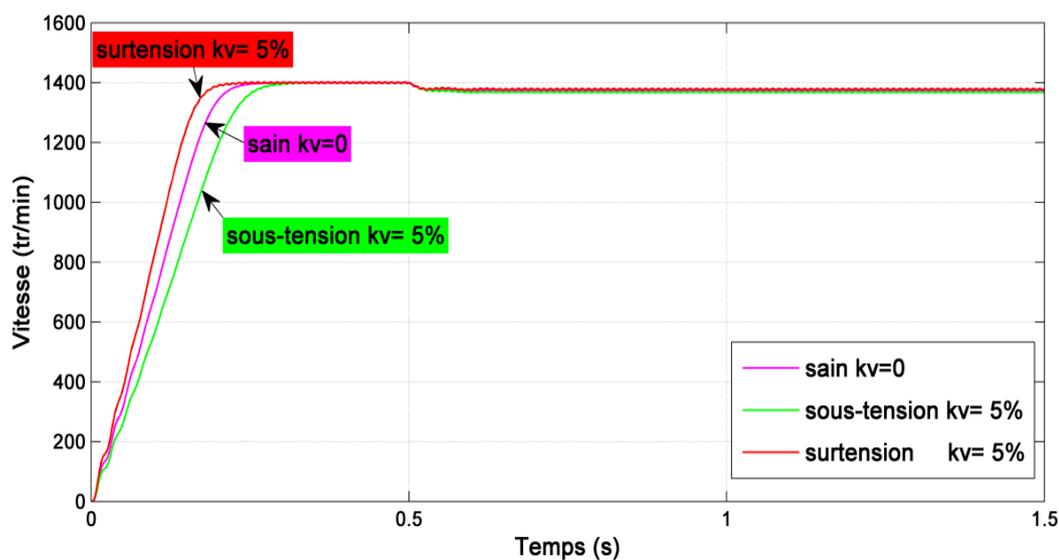


Fig. III.9 : Variation de la Vitesse en fonction de déséquilibre de tension $kV=5\%$ (sous-tension et surtension)

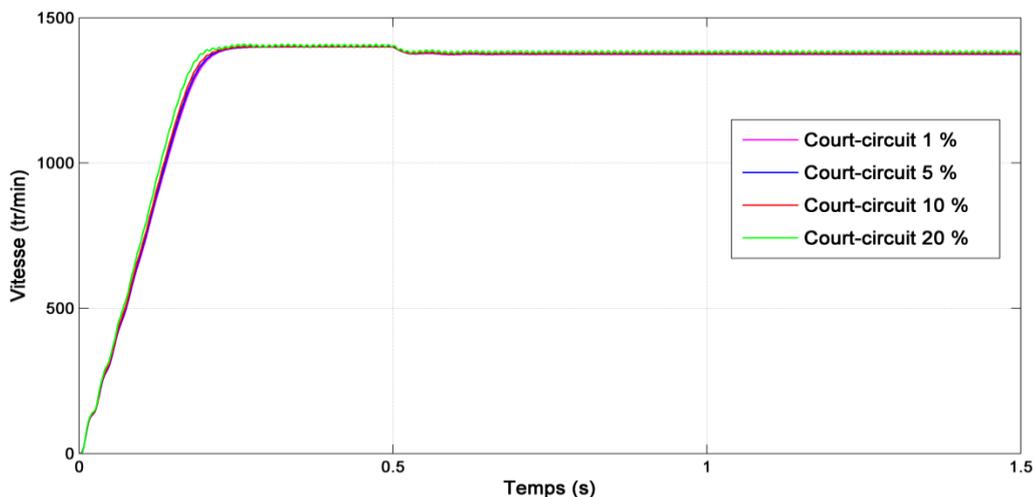
Les variations de vitesse par rapport au temps ont été montrées dans les fig.III.6, fig.III.7 et fig.III.8. Sous différents degrés et conditions de déséquilibre.

Les observations suivantes ont été extraites des fig.III.6, fig.III.7 et fig.III.8

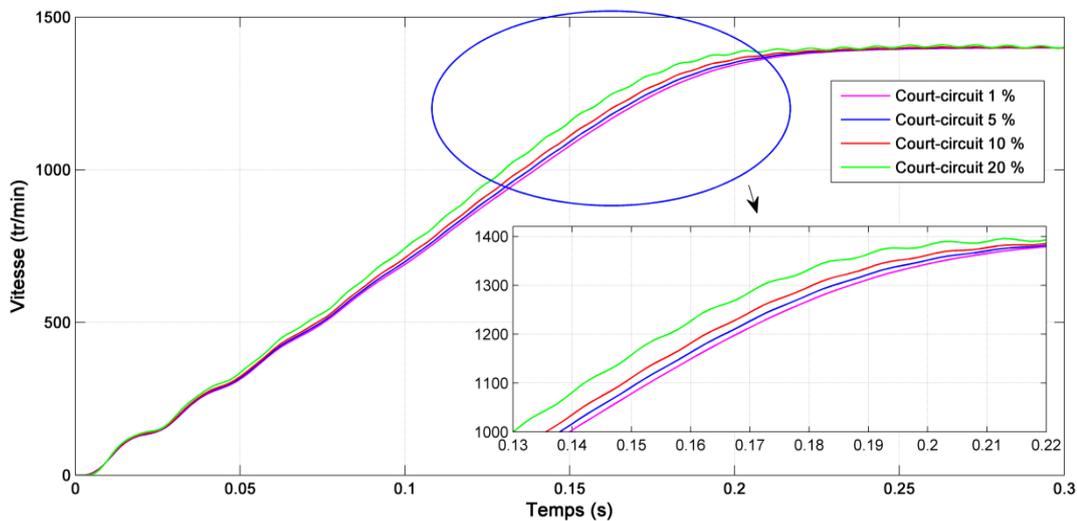
- La vitesse atteint l'état stable plus tôt en condition de surtension par rapport à la condition de sous-tension.
- Il est remarquable que la vitesse de sous-tension plus de temps que l'alimentation à tension équilibrée pour atteindre l'état d'équilibre ou cas de surtension.

- La caractéristique vitesse-temps dépend légèrement de degré de déséquilibre à KV = 1%, 3% et 5%.mais elle dépend fortement de la fin d'oscillation amortie du couple électromagnétique [34].

b) Cas de défaut de court-circuit entre spire



(a)



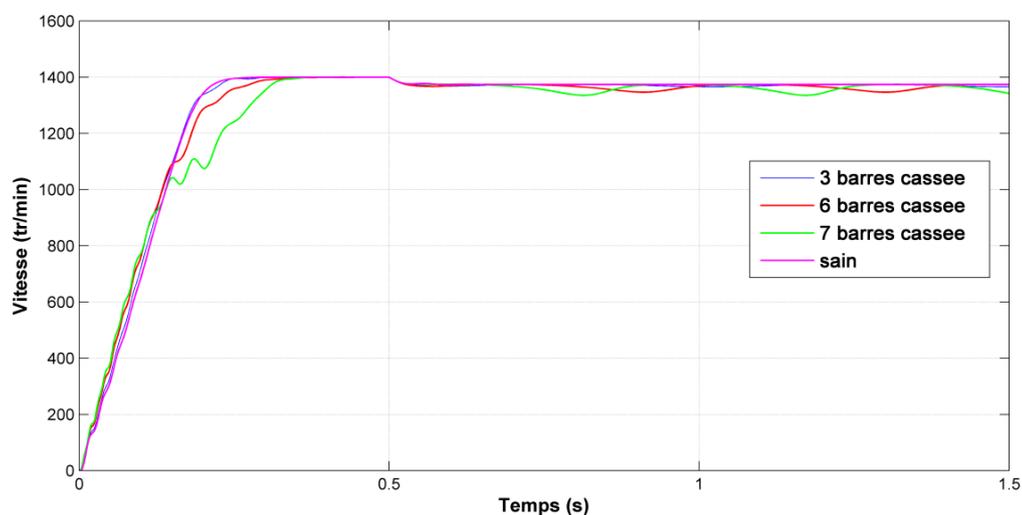
(b)

Fig. III.10 : (a) Variation de la Vitesse de rotation en fonction de défaut de court-circuit entre spire

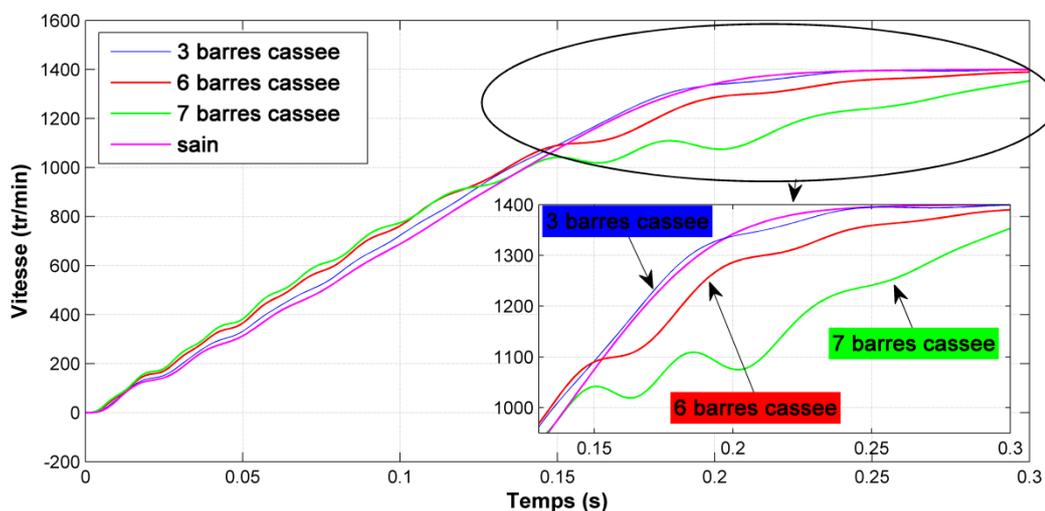
(b) Zoom de la vitesse de rotation en régime transitoire

La figure (IV.5) montre l'évolution de la vitesse pour différent nombre de spires court-circuitée. Il est évident que la machine commence a décroché en augmentant le nombre de spires court-circuit entre spire, c.a.d l'augmentation de l'amplitude d'ondulations correspondant à la signature de court-circuit entre spire.

c) Cas de défaut des barres cassées



(a)



(b)

Fig. III.11 (a) Variation de la Vitesse de rotation en fonction de défaut des Barres Cassées
(b) Zoom de la vitesse de rotation en régime transitoire

Nous faisons une observation sur la vitesse du moteur pendant le régime transitoire, on constate que la durée du régime transitoire augmente en fonction de défaut, cette augmentation sera mesurée par rapport à la vitesse référentiel (état sain), plus une augmentation de l'ondulation des défauts rotorique.

III.5.2 Sélection des défauts d'après la courbe de la vitesse en régime transitoire

Nous présentant dans un tableau les différents types de défauts étudiés avec leurs niveaux

Tableau.III.3 : Le type des défauts étudiés avec leurs niveaux

Type de défaut	Niveaux de défaut			
	Déséquilibre de tension (kV%)	surtension	surtension	surtension
1		3	5	
sous-tension		sous-tension	sous-tension	
	1	3	5	
Court-circuit (%)	1	5	10	20
Barres cassée (n)	3	6	7	

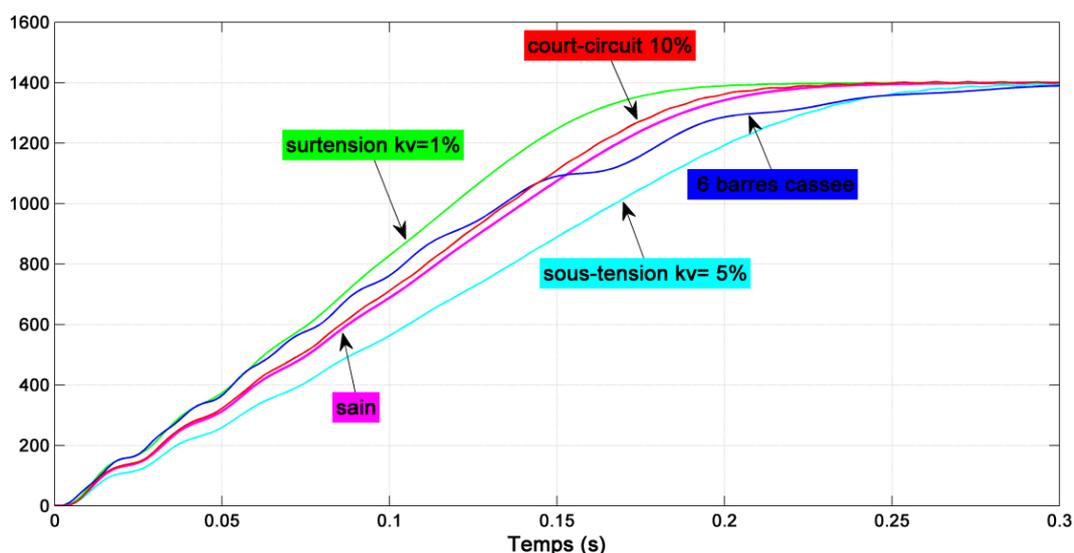


Fig. III.12 Variation de la Vitesse de rotation en fonction des 3 défauts

Sur cette figure nous observons la variation de l'allure des vitesses au niveau du coude qui se trouve avant la fin du régime transitoire en présence des défauts étudiés (déséquilibre de tension, court-circuit et barre cassée) par rapport à la vitesse référentielle de l'état sain de la machine.

En conclusion nous pouvons aboutir à un critère de défaut comme suivant :

- 1) Pour le déséquilibre de tension (sous tension) : l'allure de la vitesse mécanique de la machine en défaut pendant le régime transitoire est la même que l'état sain, mais avec une durée plus longue.
- 2) Pour le déséquilibre de tension (sur tension) : l'allure de la vitesse mécanique de la machine en défaut pendant le régime transitoire est la même que l'état sain, mais avec une durée plus courte.
- 3) Pour le court-circuit entre spire : l'allure de la vitesse mécanique de la machine en défaut pendant le régime transitoire a une ondulation à la fréquence de court-circuit entre spire, mais avec une durée plus courte.
- 4) Pour le casseur des barres : l'allure de la vitesse mécanique de la machine en défaut pendant le régime transitoire a une ondulation à la fréquence de cassure des barres, mais avec une durée plus longue.

III.6 : Conclusion

La méthodologie proposée a été validée de manière informatique. Il a permis la quantification des niveaux de défaut et a montré son efficacité. Nous avons présenté la méthode de détection des défauts qui peuvent survenir au niveau du déséquilibre de tension, court-circuit entre spire du stator de la machine, cette méthode est basée sur la représentation de la vitesse du moteur à l'état sain comme référence pendant le régime transitoire puis en suit l'évolution de la vitesse en fonction de défaut durant ce régime.

Cette méthodologie a été faite de manière informatique (simulation), reste à valider ces observations dans la pratique afin de conclure un critère réel de détection de défaut.

Conclusion générale et perspective

Le travail présenté dans ce mémoire s'inscrit dans le cadre de la détection des défauts électriques au sein des moteurs asynchrones à cage d'écureuil triphasés. Plus particulièrement, les défauts traités sont le déséquilibre de tension, court-circuit entre spire et les barres cassés.

En premier lieu de maîtriser l'état de l'art du diagnostic, connaître les défauts internes et externes qui peuvent affecter la machine asynchrone, leurs origines et leurs effets sur les grandeurs physiques issues de cette dernière, en plus les signatures spectrales spécifiques à chaque défaut, ont été présentées, ce qui a été sujet de notre premier chapitre.

En second lieu on s'est intéressé à l'aspect de la modélisation des machines asynchrones triphasées. Sachant que dans la littérature, il existe une multiplicité de modèles mathématiques associées à la machine asynchrone, chaque modèle est spécifique à un type de défauts précis. Nous avons choisi un modèle commun pour les défauts électriques (déséquilibre de tension, court-circuit entre spire et rupture des barres rotoriques).

En troisième lieu ce mémoire traite l'aspect lié à la simulation et à l'interprétation des résultats obtenus, par l'implantation d'un programme de simulation sous environnement MATLAB /SIMULINK afin de visualiser tous les signaux issus de la machine, en considérant les différentes conditions de fonctionnement, à l'état sain et défectueux. La méthodologie proposée s'est avéré bénéfique d'étudier la vitesse rotation pour les questions liées à la détection des défauts, ce qui semble être la solution appropriée pour la surveillance périodique de la machine.

En perspective, concernant la modélisation des moteurs asynchrones, par l'approche des circuits électriques magnétiquement couplés ne permet pas d'aborder autres défauts. Il faut donc impérativement disposer d'un modèle plus fin prenant compte de saturation magnétique..., pour pouvoir traiter notamment les défauts d'excentricité du tambour de la machine.

Enfin, cette méthodologie proposé été faite de manière informatique (simulation), reste la validé dans la pratique afin de conclure un critère réel de détection de défaut.

Bibliographie

Bibliographie

- [1] G. Didier, "Modélisation et diagnostic de la machine asynchrone en présence de défaillances," *PhD Thesis, University of Nancy*, 2004.
- [2] Mihoub M.O., "Méthode globale de diagnostic des machines asynchrone à cage d'écureuil, " *université de Mohamed Boudiaf Msila 2016*
- [3] Medouad A., "surveillance et diagnostic des défauts des machines électriques " *thèse de doctorat, Université du 20 Août 1955-Skikda 2012*
- [4] Benamira N., Rachedi M.F., Bouras S., Kerfali S., Bouras A. "Numerical simulation of three phase asynchronous motor to diagnose precisely the stator unbalanced voltage anomaly. *Rev. Sci. Technol.*, 2017, no. 34, pp.134-150.
- [5] M'beirick M.Y., M. boukhenaf "Surveillance et diagnostic de la machine asynchrone avec défaut d'alimentation (déséquilibre de tension)", *mémoire de master, Université Mohamed Seddik Ben Yahia - Jijel 2019*
- [6] A. Chahmi., " Identification paramétrique de la machine asynchrone dédiée au diagnostic. *Energie électrique,*" *Thèse de doctorat, Université d'Oran*, 2017.
- [7] M. E. K. Oumaamar, "Surveillance et diagnostic des défauts rotoriques et mécaniques de la machine Asynchrone avec alimentation équilibrée ou déséquilibrée ". *Thèse de doctorat, Université de Lorraine*, 2012.
- [8] R. Bousseksou, "Modélisation analytique des machines Asynchrone application au diagnostic," *mémoire de magister, Université de Constantine*, 2007.
- [9] D. G. Dorrell and A. C. Smith, "Calculation of UMP in induction motors with series or Parallel winding connections," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 9, pp. 304-310, 1994.
- [10] D. G. Dorrell, W. T. Thomson, and S. Roach, "Analysis of airgap flux, current, and vibration signals as a function of the combination of static and dynamic airgap eccentricity in 3-phase induction motors," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 33, pp. 24-34, January/February 1997.
- [11] S. Nandi, T. C. Ilamparithi, L. Sang Bin, and H. Doosoo, "Detection of Eccentricity Faults in Induction Machines Based on Nameplate Parameters," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, pp. 1673-1683, May 2011.

- [12] R. N. Andriamalala, H. Razik, L. Baghli, and F. M. Sargos, "Eccentricity Fault Diagnosis of a Dual-Stator Winding Induction Machine Drive Considering the Slotting Effects," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 55, pp. 4238-4251, December 2008.
- [13] H. Razik, "Le contenu spectral du courant absorbe par la machine asynchrone en cas de défaillance, un état de l'art," *La revue 3EI*, vol. 29, pp. 48-52, Juin 2002.
- [14] S. Nandi, S. Ahmed, H.A. Toliyat, "Detection of rotor slot and other eccentricity Related harmonics in a three phase induction motor with different rotor cages" *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 16, pp. 253–260 Sept. 2001.
- [15] G. R. Bossio, C. H. De Angelo, J. M. Bossio, C. M. Pezzani, and G. O. Garcia, "Separating Broken Rotor Bars and Load Oscillations on IM Fault Diagnosis Through the Instantaneous Active and Reactive Currents," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 56, pp. 4571-4580, November 2009.
- [16] T. Boumegoura, "Recherche de signature électromagnétique des défauts dans une machine asynchrone et synthèse d'observateurs en vue du diagnostic," *Thèse de doctorat, Ecole centrale de Lyon Ecully, France, 2001.*
- [17] E. Schaeffer, Diagnostic des machines asynchrones : modèles et outils paramétriques dédiés à la simulation et à la détection de défauts". *Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Nantes, 1999.*
- [18] S. Nandi, H.A. Toliyat, Xiaodong Li, "Condition Monitoring and Fault diagnosis of Electrical Motors-A Review", *IEEE Transaction on Energy conversion*, Vol. 20, No,4, December 2005.
- [19] O. Mellak, M.A.Djilali, " Discrimination des défauts d'un Moteur Asynchrone Triphasé," *mémoire de master Université de Saad Dahleb Blida, 2019*
- [20] S. Bazine, "Conception et implémentation d'un Méta-modèle de machines asynchrones en défaut," *Thèse de doctorat, Université de Poitiers, 2009.*
- [21] A. H. Bonnett and G. C. Soukup, "Cause and analysis of stator and rotor failures in three phase squirrel-cage induction motors," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 28, pp. 921-937, 1992.
- [22] A. Ceban, R. Pusca, and R. Romary, "Study of rotor faults in induction motors using external magnetic field analysis," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. PP, p. 12, 2011.

- [23] G. R. Bossio, C. H. De Angelo, J. M. Bossio, C. M. Pezzani, and G. O. Garcia, "Separating broken Rotor Bars and Load Oscillations on IM Fault Diagnosis Through the Instantaneous active and Reactive Currents," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 56, pp. 4571-4580, November 2009.
- [24] *BAZINE Sadok* " Conception et implémentation d'un méta-modèle de machines asynchrones en défaut " thèse de doctorat, Université de Poitiers, Année 2009.
- [25] https://fr.wikibooks.org/wiki/Méthode_des_éléments_finis/Présentation_générale
- [26] Delmotte-Delforge C, Hénao H., Ekwe G , Brochet P, Capolino G.-A., " Comparison of two modeling methods for induction machine study: application to diagnosis ", *Int. Journal for Computation and Math's(COMPEL)*, n°4, vol.22, pp.891-908, 2003.
- [27] G. Lacombe, " Définition et réalisation d'une nouvelle génération de logiciel pour la conception des moteurs du futur ", *Thèse de doctorat, Université du Grenoble*, 2007.
- [28] Bousbia S.M., Djeribiai A., Bouaziz S. " Identification des machines asynchrones par la méthode SSFR vue de leur diagnostic" *mémoire d'ingénieur, Université de M'silla* ,2012
- [29] *Shuo Chen A " thesis submitted to the School of Electrical and Electronic Engineering " University of Adelaide in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Engineering Science in Electrical Engineering Adelaide, Australia April, 2008.*
- [30] Bellini A, Filippetti F, Franceschini G, Tassoni C, Kliman GB. " Quantitative evaluation of induction motor broken bars by means of electrical signature analysis ".*IEEE Transactions on Industry Application* 2001; vol.37: pp.1248–1255.
- [31] Santos PM, Correa MBR, Jacobina CB, et al. "A simplified induction machine model to study rotor broken bar effects and for detection." *PESC'06, 37th IEEE*, pp18–22 June 2006.
- [32] Cruz SMA, Cardoso AJM. Multiple reference frame theory: a new method for the diagnosis of stator faults in three-phase induction motors. " *IEEE Transactions on Energy Conversion* 2005; Vol.20:pp.611–619.
- [33] Dana M. Ragab , Jasim A Ghaeb "A Linear Relation for Voltage Unbalance Factor Evaluation in Three-Phase Electrical Power System Using Space Vector" *International Journal of Energy and Power Engineering* Vol:13, No:2, 2019

- [34] Shashi Bhushan Singh, Asheesh K. Singh, "Steady-state Performance Assessment of Induction Motor under Unbalanced Voltage Condition," *Electric Power Components and Systems*, Vol. 41, Iss. 13, pp.1248- 1263, Jun. 2013.

الملخص

يتعلق العمل البحثي المقدم في أطروحة الماجستير هذه باكتشاف الأعطال الكهربائية في المحركات غير المتزامنة ثلاثية الطور ذات قفص السنجاب. وبشكل أكثر تحديداً ، فإن الأخطاء التي يتم التعامل معها هي عدم توازن الجهد ، وقصر الدائرة بين المنعطفات والكسر في القضبان.

أولاً ، لإتقان حالة فن التشخيص ، لمعرفة العيوب الداخلية والخارجية التي يمكن أن تؤثر على الآلة غير المتزامنة ، وأصولها وتأثيراتها على الكميات المادية الناتجة عن الأخيرة.

ثانياً ، للتعامل مع الجانب المتعلق بالحاكاة وتفسير النتائج التي تم الحصول عليها ، من خلال تنفيذ برنامج محاكاة في بيئة MATLAB / SIMULINK من أجل تصور تطور الكميات الكهربائية والكهروميكانيكية المختلفة للآلة غير المتزامنة لمختلف ظروف التشغيل سواء كانت صحية أو معيبة. لذلك نقدم منهجية جديدة للرصد الدوري للأعطال الثلاثة (عدم توازن الجهد ، القضبان المكسورة ، قصر الدائرة بين المنعطفات) ، من خلال دراسة سلوك سرعة الدوران كدالة للوقت خلال الوقت العابر. النتائج التي تم الحصول عليها عن طريق الكمبيوتر (المحاكاة) للآلة غير المتزامنة في حالة صحية وفي ظل وجود أعطال تتيح بسهولة اكتشاف وتوطين الأعطال المدروسة.

الكلمات المفتاحية: أعطال الآلة غير المتزامنة، التشخيص، تكسر القضبان الدوارة، قصر الدائرة بين المنعطفات، عدم توازن الجهد.

Résumé

Le travail de recherche présenté dans ce mémoire de master s'inscrit dans le cadre de la détection des défauts électriques au sein des moteurs asynchrones à cage d'écureuil triphasés. Plus particulièrement, les défauts traités sont le déséquilibre de tension, court-circuit entre spire et les ruptures des barres.

En premier lieu de maîtriser l'état de l'art du diagnostic, connaître les défauts internes et externes qui peuvent affecter la machine asynchrone, leurs origines et leurs effets sur les grandeurs physiques issues de cette dernière.

En second lieu de traiter l'aspect lié à la simulation et à l'interprétation des résultats obtenus, par l'implantation d'un programme de simulation sous environnement MATLAB /SIMULINK afin de visualiser l'évolution des différentes grandeurs électriques et électromécaniques de la machine asynchrone pour différentes conditions de fonctionnement, que ce soit sain ou défaillant. Ainsi nous présentons une nouvelle méthodologie de surveillance périodique des trois défauts électrique (déséquilibre de tension, barres cassées, court-circuit entre spire.), par l'étude du comportement de la vitesse de rotation en fonction du temps pendant le régime transitoire. Les résultats obtenus de manière informatique (simulation) de la machine asynchrone à l'état saine et en présence des défauts permettent aisément la détection et la localisation des défauts étudiés.

Mots clés : défauts machine asynchrone, diagnostic, rupture des barres rotoriques, court-circuit entre spire, déséquilibre de tension.

Abstract

The research work presented in this master's thesis relates to the detection of electrical faults in three-phase squirrel-cage asynchronous motors. More particularly, the faults dealt with are voltage imbalance, short-circuit between turns and breaks in the bars.

First, to master the state of the art of diagnostics, to know the internal and external faults that can affect the asynchronous machine, their origins and their effects on the physical quantities resulting from the latter.

Secondly, to deal with the aspect related to the simulation and to the interpretation of the results obtained, by implementing a simulation program in a MATLAB / SIMULINK environment in order to visualize the evolution of the various electrical and electromechanical quantities of the asynchronous machine for different operating conditions, whether healthy or faulty. We therefore present a new methodology for periodically monitoring the three electrical faults (voltage imbalance, broken bars, short-circuit between turns.), By studying the behavior of the rotational speed as a function of time during the transient time. The results obtained by computer (simulation) of the asynchronous machine in a healthy state and in the presence of faults easily allow the detection and localization of the faults studied.

Key words : asynchronous machine faults, diagnosis, broken rotor bars, short-circuit between turn, voltage imbalance.