

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

Spécialité : Electromécanique

Thème

**Surveillance et diagnostic de la machine asynchrone avec
défaut d'alimentation (déséquilibre de tension)**

Par :

Mr / M'beirick Mohamed Yahya

Travail proposé et dirigé par :

Mr / Boukhenaf Messoud

Promotion 2019

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

Remerciements

Tout d'abord je remercie allah le tout puissant qui ma eclaire le bon chemin

A ma mere qui est la lumiere de ma vie et mon père qui est mon dos.

Je tiens a remercies mon ancadreur MCB boukhnaf Mesoud qui est un potentiel infinie pour les conseils avisés et l'encouragement constant.

En fin j'associe a toute personne d'etant montre coperant de pres ou de loin a la realisation de ce mémoire de fin d'etude surtout

Ainsi que tous les professeur qui ont contribué à notre formation.

Dédicaces

*Je dédie ce mémoire à ma famille
et à mes amis proches...*

Abréviation

Abréviation

MAS	:	Machine asynchrone
f	:	Fréquence d'alimentation
i_s^{dqo}	:	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}	:	L'inductance propre d'une phase statorique
L_{rr}	:	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
L_m	:	La réactance magnétique du stator en ohm
P_m	:	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}	:	Le 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

Abréviation

T_{load}	:	Le couple mécanique appliqué par la charge
T_{qd0}	:	La matrice de transformation dq0
$\frac{d\varphi}{dt}$:	Le taux d'échange du champ magnétique entre les enroulements
ω_{rm}	:	La vitesse de rotation mécanique et électrique du rotor
P	:	Le nombre de paires de pôles
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_n et V_p	:	tension de séquence négative et positive respectivement
I_1 et I_2	:	tension de séquence négative et positive respectivement
V_r, V_b et V_y	:	tension de ligne du déséquilibre de tension
V_{av}	:	tension moyenne de ligne
K_v	:	facteur de déséquilibre de tension

Liste des figures

Figure I.1 : Machine asynchrone	3
Figure I.2 : élément de constitution d'une machine a cage d'écureuil [2]	4
Figure I.3 : Vue schématique du stator (gauche) et réelle (droite)	4
Figure I.4 : Rotor bobinée	5
Figure I.5 : vue en perspective du Rotor	6
Figure I.6 : Schéma symbolique du stator	7
Figure I.7 : Position du rotor et du stator dans une machine parfaite	8
Figure I.8 :Différent défaillances des machines asynchrone	10
Figure I.9 :Différent défaillances des machines asynchrone	11
Figure I.10 :diagnostic industriel	12
Figure I.11 :schema du surveillance	12
Figure I.12 :proportion des défauts.....	14
Figure I.13 :Répartitions des défauts dans les machines électriques du domaine industriel en 1982 ..	14
Figure I.14 :distribution des défauts dans les machines asynchrones a grand puissance	15
Figure I.15 :Mesures vibratoires sur la machine asynchrone	15
Figure I.16 :les défauts de court-circuit dans le stator	18
Figure I.17 :les défauts d'excentricités	19
Figure I.18 :Vue en coupe de la partie supérieure d'un roulement à bille [16] [17] [19]	21
Figure I.19 :Rupture des barres	22
Figure I.20 :defaut de rupture de barre	22
Figure I.21 :defaut de rupture de barre	23
Figure I.22 :Rupture d'anneau.....	24
Figure II.1 :Les méthodes utilisées pour modéliser un moteur asynchrone.	27
Figure II.2 :Comparaison entre les différentes méthodes de modélisation	32
Figure II.3 :composant symétriques	35
Figure II.4 :schema démonstrative	36
Figure II.5 :schema démonstrative qd	37
Figure II.6 :schema descriptive	38
Figure II.7 :Transformation des enroulements naturelle en enroulements équivalent	39
Figure II.8 :représentation de circuit équivalent d'une machine à induction dans le repère qd0.....	44
Figure III.1 :procédure de diagnostique en utilisant le vecteur de Park.....	49
Figure III.2 : vecteur de courant de Park pour une situation idéal	50
Figure III.3 :vecteur de Park pour une asymétrie de stator	51
Figure III.4 :courant statorique au démarrage puis en charge	53
Figure III.5 :vitesse au démarrage puis en charge.....	53

Figure III.6: couple électromagnétique au démarrage puis en charge.....	53
Figure III.7: courant statorique avec $K_v=1\%$ (sous-tension)	54
Figure III.8: courant statorique ids avec $K_v=3\%$ (sous-tension).....	55
Figure III.9: courant statorique au démarrage puis en charge avec $K_v=3\%$ (sous-tension).....	55
Figure III.10: courant statorique iqs au démarrage puis en charge avec $K_v=1\%$ (surtension).....	55
Figure III.11: courant statorique au démarrage puis en charge avec $K_v=3\%$ (surtension)	56
Figure III.12: courant statorique au démarrage puis en charge avec $K_v=5\%$ (surtension)	56
Figure III.13: vecteur de Park pour différent niveau de déséquilibre.....	58
Figure III.14: Couple électromagnétique au démarrage puis en charge avec $K_v=1\%$ (sous-tension) .	59
Figure III.15: Couple électromagnétique au démarrage puis en charge avec $K_v=3\%$ (sous-tension) .	60
Figure III.16 : couple électromagnétique au démarrage puis en charge avec $K_v=5\%$ (sous-tension) ..	60
Figure III.17: couple électromagnétique au démarrage puis en charge avec $K_v=1\%$ (surtension).....	60
Figure III.18: électromagnétique au démarrage puis en charge avec $K_v=3\%$ (surtension)	61
Figure III.19 : électromagnétique au démarrage puis en charge avec $K_v=5\%$ (surtension)	61
<i>Figure III.20: vitesse au démarrage puis en charge pour $K_v=1\%$(sous-tension)</i>	62
Figure III.21 : vitesse au démarrage puis en charge pour $K_v=3\%$ (sous-tension)	62
Figure III.22 : vitesse au démarrage puis en charge pour $K_v=5\%$ (sous-tension)	63
Figure III.23: vitesse au démarrage puis en charge pour $K_v=1\%$ (surtension)	63
Figure III.24: vitesse au démarrage puis en charge pour $K_v=3\%$ (surtension)	63
Figure III.25: vitesse au démarrage puis en charge pour $K_v=5\%$ (surtension)	64
Figure III.26 : couple électromagnétique au démarrage puis en charge pour $K_v=1\%$	64
Figure III.27 : couple électromagnétique au démarrage puis en charge pour $K_v=3\%$	65
Figure III.28 : couple électromagnétique au démarrage puis en charge pour $K_v=1\%$	65
Figure III.29 : vitesse au démarrage puis en charge pour $K_v=1\%$	66
Figure III.30 : vitesse au démarrage puis en charge pour $K_v=3\%$	66
Figure III.31 : vitesse au démarrage puis en charge pour $K_v=5\%$	67

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Analyses vibratoires, signatures fréquentielles [13]	16
Tableau II.1 : Les différentes méthodes de modélisation	31
Tableau III.1 :paramètres de la machine	51
Tableau III.2 :Niveau de déséquilibre de tension	52

Sommaire

Introduction générale	1
Chapitre I : Diagnostic et surveillance	3
I.1 Introduction	3
I.2 Construction de la machine asynchrone	3
I.2.1 Le stator	4
I.2.2 Le rotor	5
I.2.3 Les organes mécaniques	6
I.3 Principe de fonctionnement	7
I.4 Défaillance de la machine asynchrone	10
I.4.1 Définitions et concept [9]	10
I.4.2 Diffèrent défaillance de la machine asynchrone [10]	10
I.5 Diagnostique et surveillance des systèmes [11]	11
I.5.1 Diffèrent étapes techniques du diagnostic industriel	12
I.5.2 Surveillance	12
I.5.3 Etude statistique [12]	13
I.6 Méthodes de diagnostic	15
I.6.1 Analyses vibratoires de la machine	15
I.6.2 Analyse des flux	17
I.6.3 Analyse des courants	19
I.6.4 Analyse du couple électromagnétique [23]	24
I.7 Conclusion	25
Chapitre II : Modélisations de la machine asynchrones	26
II.1 Introduction	26
II.2 Méthodes de modélisation	26
II.2.1 Modèle physique	27
II.2.2 Modèles comportementaux	28
II.3 Méthode des circuits magnétiquement couplés	32
II.3.1 Modélisation de la machine asynchrone à l'aide des circuits magnétique couplés	32
II.4 Transformation de système triphasé	35
II.4.1 Transformation des composants symétriques(Fortescue)	35
II.4.2 Transformation de Park	36
II.5 Transformation de Park appliquée à la Machines asynchrone	39
II.6 Transformation des grandeurs statoriques et rotoriques	40
II.6.1 Modèle de la machine dans le repère dq0	41
II.7 Réduction de la matrice des inductances	42
II.8 Conclusion	45
Chapitre III : Simulation de la machine asynchrone	46
III.1 Introduction	46
III.2 Déséquilibre de tension [30]	46
III.3 Diagnostic des défauts	48

III.3.1 Diagnostique par le vecteur de Park [24]	49
III.4 Simulation de la machine asynchrone	51
III.4.1 Paramètre du moteur asynchrone	51
III.4.2 Niveau de déséquilibre de tension	51
III.4.3 Simulation de la machine asynchrone à l'état sain	52
III.4.4 Simulation de la machine asynchrone en présence du défaut de déséquilibre	54
III.4.5 Effet du défaut sur la partie transitoire	64
III.5 Conclusion	67
Conclusion général	69
Bibliographie	I

Introduction générale

Les machines asynchrones à cage d'écureuil sont largement répandues dans l'industrie en raison de leur fiabilité et construction simple. Elles sont utilisées dans la majorité des secteurs industriels et commerciaux. Cependant, elles sont sujettes à de nombreux défauts comme les barres cassées ou l'excentricité au niveau du rotor ou encore les court-circuits entre spires au stator ou le déséquilibre de tension qui est le sujet de cette mémoire. La surveillance et le diagnostic des machines électriques représentent un enjeu scientifique et économique. Le diagnostic nécessite la connaissance d'une terminologie variée comme par exemple, la sûreté de fonctionnement qui peut être définie par l'aptitude d'une entité à satisfaire une ou plusieurs fonctions requises dans des conditions données. Elle est scientifiquement caractérisée par l'étude statique et dynamique des systèmes du point de vue prévisionnel, opérationnel et expérimental, en tenant compte des aspects de probabilités et de conséquences liées aux défaillances.

La surveillance est un moyen de garantir le bon fonctionnement des systèmes. Le diagnostic est une partie de la surveillance qui a pour objectif de trouver la cause des dysfonctionnements. Multiples défaillances peuvent apparaître dans la machine asynchrone. Elles peuvent être prévisibles ou intempestives, mécaniques, électriques ou magnétiques et leurs causes sont très variées.

La modélisation et la simulation de la machine asynchrone ont fait l'objet de nombreux travaux de recherche, que ce soit dans le but de dimensionnement, de la commande ou du diagnostic. La diversité des objectifs a fait apparaître plusieurs techniques de modélisation et d'outils de simulation, dont chaque type de modélisation est plus ou moins adapté à un domaine plus que les autres.

L'objectif de notre travail est la surveillance des grandeur mesurables et le diagnostic de la machine asynchrone, pour la simulation du déséquilibre de tension. Pour cela, le mémoire a été organisé comme suit :

Dans le premier chapitre, nous rappelons les principaux défauts qui peuvent apparaître dans la machine asynchrone à cage, et leurs origines d'une part et d'autre part sont consacrées à la, présentation des différents types de défauts et les types de techniques de diagnostic des machines asynchrones.

Introduction générale

Le deuxième chapitre est consacré à la présentation du modèle des circuits magnétiques couplés de la machine asynchrone triphasée à cage. Nous montrerons dans un premier temps différents modèles et méthodes de simulation du moteur asynchrone, dans les différentes conditions de fonctionnement, avec et sans défauts.

Dans le troisième chapitre, nous avons simulé la machine asynchrone dans les états sains et défaillants afin de simuler le déséquilibre de tension (surtension et sous-tension). Les résultats sont conformes à ceux de la littérature. Nous présenterons cette analyse en deux parties : transitoire (couple et vitesse) et permanente (courant statorique) afin de mettre en évidence le comportement de la machine sous le défaut de déséquilibre de tension.

Le mémoire est clôturé par une conclusion générale.

Chapitre I : Diagnostic et surveillance

I.1 Introduction

Les progrès réalisés en matière d'électronique de puissance, de circuits de commande et en automatique ont contribué à l'utilisation grandissante des machines asynchrones dans les systèmes d'entraînements électriques. Le recours aux machines asynchrones est surtout lié à leur robustesse, leur puissance massique et à leur coût de fabrication. Leur maintenance et leur surveillance permettent de rentabiliser les installations. Il est donc important de développer des outils de diagnostic pour détecter de manière précoce les défauts pouvant apparaître dans ces machines.

Afin de synthétiser les méthodes de diagnostic, nous présenterons d'abord de manière succincte, la construction de la machine asynchrone triphasée puis les contributions scientifiques sur les défauts de la machine asynchrone. Ensuite, nous présenterons une synthèse des méthodes de diagnostics dédiées à l'étude de ses défauts électriques et mécaniques.

I.2 Construction 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'extérieur ou sont fermés sur eux-mêmes en permanence, on définit 2 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 intéressons à la machine asynchrone à cage d'écureuil. [1]

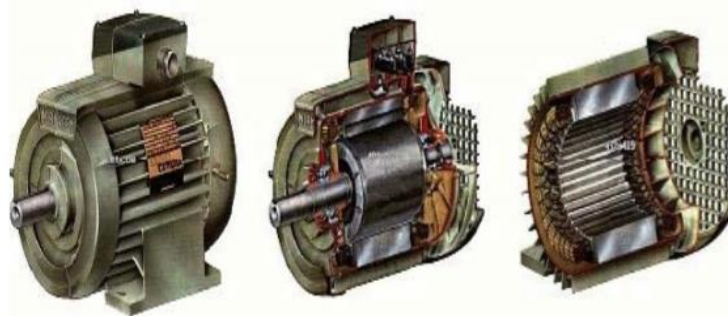


Figure I.1 : Machine asynchrone

La figure I.2 représente les éléments de constitution de la machine asynchrone a cage d'écureuil

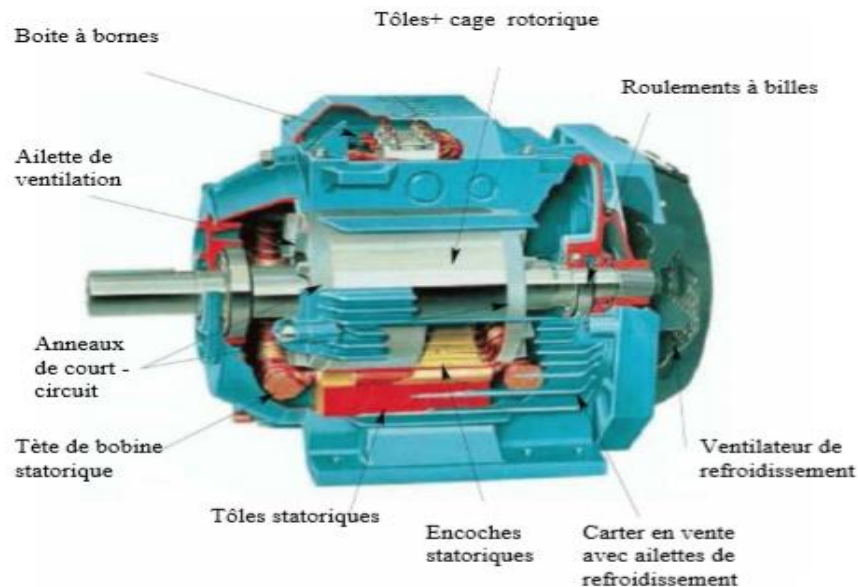


Figure I.2 : élément de constitution d'une machine a cage d'écureuil [2]

I.2.1 Le stator

Il est constitué d'un enroulement bobiné réparti dans les encoches du circuit magnétique. Ce circuit magnétique est constitué d'un empilage de tôles dans les quelles sont découpées des encoches parallèles à l'axe de la machine (Figure I.3). Le bobinage statorique peut se décomposer en 2 parties : les conducteurs d'encoches et les têtes de bobines [3].

Les conducteurs d'encoches permettent de créer dans l'entrefer le champ magnétique à l'origine de la conversion électromagnétique. Les têtes de bobines permettent, quant à elles, la fermeture des courants en organisant la circulation judicieuse des courants d'un conducteur d'encoche à l'autre. L'objectif est d'obtenir à la surface de l'entrefer une distribution de courant la plus sinusoïdale possible, afin de limiter les ondulations du couple électromagnétique. [3]

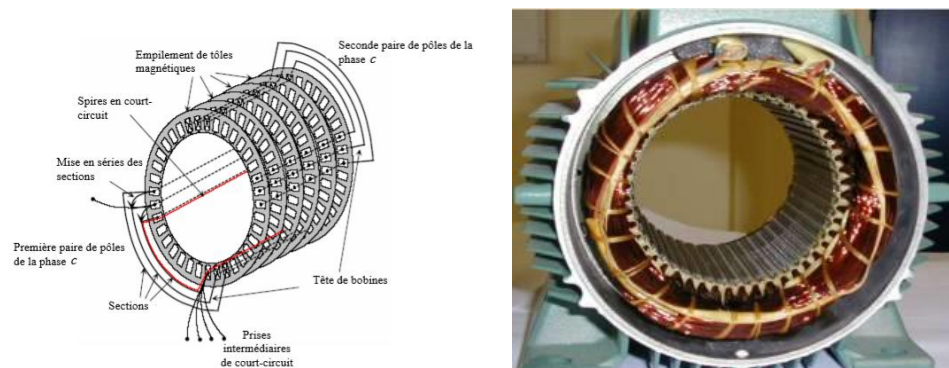


Figure I.3 : Vue schématique du stator (gauche) et réelle (droite)

I.2.2 Le rotor

Partie tournante qui permet de mettre en rotation la charge mécanique, tout comme le stator, le circuit magnétique est constitué de tôles d'acier qui sont en général, de même origine que celle utiliser pour la construction du stator, les rotors des machines asynchrones peuvent êtres de deux types : rotor bobine et rotor a cage [4]

I.2.2.1 Rotor a bobine

Sont constitué de la même manière que le bobinage statorique (insertion des enroulements dans les encoches rotoriques). Les phases rotoriques sont alors disponibles grâce à un système des bague-balai positionné sur l'arbre de la machine. [3]

Les enroulements rotoriques localise dans les encoches situe au périphérique du rotor. Ces enroulements sont bobinés de la machine à obtenir un enroulement triphasé à 'P' pair de pole. Le bobinage rotoriques sont toujours couple en Etoile, et les trois bornes accessibles sont reliés à la carcasse du stator à l'aide d'un système constitue de trois bagues et trois balais fixes.

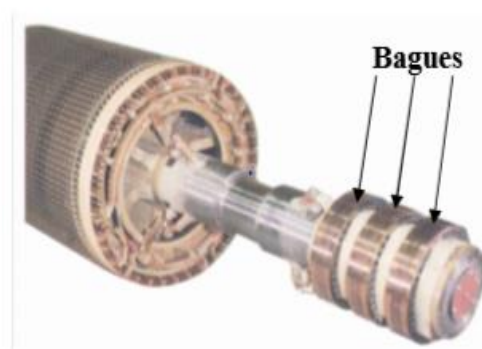


Figure I.4 : Rotor bobiné

I.2.2.2 Rotor a cage

Dans le rotor à cage, les anneaux de court-circuit permettent la circulation des courants d'un conducteur d'encoche (barre rotorique) à l'autre. Ces barres conductrices sont régulièrement réparties, et constituent le circuit du rotor. Cette cage est insérée à l'intérieur d'un circuit magnétique constitué de disques en tôles empilés sur l'arbre de la machine analogue à celui du moteur à rotor bobiné. Dans le cas du rotor a cage d'écureuil, les conducteurs sont réaliser par coulage d'un alliage d'aluminium, ou par des barres massives de cuivre performées et frettées dans les tôles du rotor.il n'y'a généralement pas, ou très peu d'isolation entre les barres rotoriques et les tôles magnétiques, mais leur résistance est

suffisamment faible pour que les courants de fuite dans les tôles soient négligeables, sauf lorsqu'il y a une rupture de barre.

Le moteur à cage d'écureuil est beaucoup plus simple à construire que le rotor bobiné, et de ce fait son prix de revient reste inférieur. De plus, il dispose d'une robustesse importante que celle du bobiné, il constitue la plus grande partie du parc des moteurs asynchrones actuellement en service. [6]

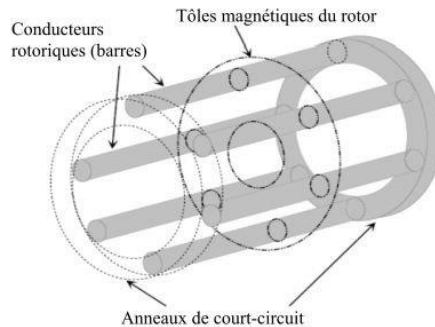


Figure I.5 : vue en perspective du Rotor

I.2.3 Les organes mécaniques

La carcasse sert de support. Elle joue le rôle d'enveloppe et assure la protection contre l'environnement extérieur. L'arbre est un organe de transmission. Il comprend une partie centrale qui sert de support au corps du rotor et un bout d'arbre sur lequel est fixé un demi-accouplement. Il est, généralement, constitué en acier moulé ou forgé. Son dimensionnement est fonction des plusieurs efforts :

- Efforts de flexion (force centrifuge qui s'exerce sur lui, attraction magnétique radiale, etc.).
- Efforts radiaux et tangentiels dus aux forces centrifuges.
- Efforts de torsion (couple électromagnétique transmis en régime permanent et transitoire). Il est supporté par un ou plusieurs paliers. Ces paliers soutiennent le rotor et assurent la libre rotation. Le second palier est libre pour assurer les dilatations thermiques de l'arbre. Une isolation électrique de l'un des paliers assure l'élimination des courants dans l'arbre dus aux dissymétries des réluctances du circuit magnétique. Ils sont, généralement, à roulements pour les machines de petite et moyenne puissances. [7]

I.3 Principe de fonctionnement

Tel que mentionné précédemment, la machine asynchrone est constituée principalement d'un stator et d'un rotor. Ces éléments sont fabriqués à l'aide de matériaux spéciaux et de manière à ce que le moteur à induction puisse fonctionner de la meilleure des manières possibles. Le stator, partie fixe de la machine, est constitué de $3p$ (où p désigne le nombre de paires de pôles) bobines alimentées par un système de tension et de courant triphasé de fréquence f fournies soit par le réseau électrique, soit par le variateur. Le déphasage entre les tensions et les courants des trois phases est de $\frac{2\pi}{3}$ radians. Cependant, chaque p série comporte trois bobines qui sont séparées de $\frac{2\pi}{3}$ les unes des autres. Ainsi, nous pouvons ramener l'explication du principe de fonctionnement de la machine asynchrone à 3 enroulements que nous notons "a", "b" et "c". (La Figure I.6) illustre une schématisation symbolique du stator.

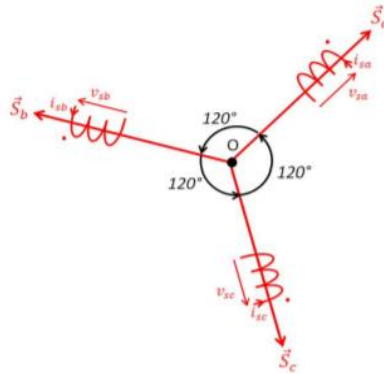


Figure I.6 : Schéma symbolique du stator

Les courants qui traversent les bobines du stator créent un champ magnétique tournant \vec{B}_s dans l'entrefer tel que :

$$\vec{B}_s = B_0 \cos(2\pi ft) \quad (\text{I.1})$$

Où B_0 est l'amplitude maximum du champ magnétique, f dénote la fréquence d'alimentation de la machine asynchrone, et t représente la fonction temporelle de l'oscillation. L'entrefer est l'espace vide entre le stator et le rotor tel qu'illustré à la figure tel

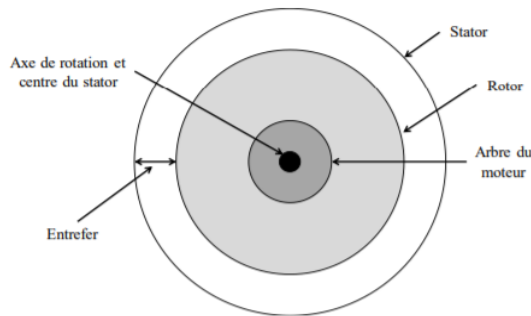


Figure I.7 : Position du rotor et du stator dans une machine parfaite

Ce champ tournant possède une vitesse de rotation dite de synchronisme et égale à :

$$n_s = \frac{f}{p} [\text{tr} / \text{s}] \quad (\text{I.2})$$

Où :

$$\Omega_s = \omega_s = \frac{2\pi f}{p} [\text{rad} / \text{s}] \quad (\text{I.3})$$

Où n_s est le nombre de tours par seconde de champ tournant, dénote la fréquence f d'alimentation de la machine asynchrone, p représente le nombre de paires de pôles, et ω_s (ou Ω_s) est la vitesse du champ tournant en radians par seconde.

Le champ magnétique créé par le stator tourne autour du rotor (à l'arrêt lors du démarrage) afin de créer grâce à son flux des courants induits dans les barres du rotor. D'après la loi de Lenz, les courants induits s'opposent par leurs effets à la cause qui leur a donné naissance. La circulation des courants dans la cage du rotor est possible, car le circuit est fermé, et par conséquent, des forces de Laplace en résultent. Cette force est différente en tout point de la cage. Ce phénomène permet de créer un couple et de faire démarrer le moteur asynchrone. En effet, si le flux du champ magnétique du stator n'était pas variant autour du rotor, les courants rotoriques seraient égaux, ainsi que les forces de Laplace se compenseraient. S'il n'existe aucune différence de force, la somme des forces serait nulle ainsi que le couple. Le moteur ne pourrait donc pas démarrer.

Le nombre de pôles au rotor doit être égal au nombre de pôles au stator. Pour une cage d'écureuil, cette condition est automatiquement vraie. En effet, la cage d'écureuil est conçue

Chapitre I : Diagnostic et surveillance

pour qu'elle soit symétrique. Ainsi deux barres distantes de $\frac{2\pi}{3}$ constituent une spire et ont des forces électromotrices opposées.

Heureusement, la vitesse de rotation mécanique du rotor ne rattrape jamais la vitesse de synchronisme du champ tournant. Ainsi, il subsiste une différence de force, et donc de couple grâce à la condition :

$$n_s > n_m \quad (I.4)$$

Où n_s est le nombre de tours par seconde de champ tournant, et n_m représente le nombre de tours par seconde du rotor (ou de l'arbre de sortie).

Cette différence de vitesse définit ce que nous appelons le glissement donné par l'équation (I.5) :

$$g = \frac{n_s - n_m}{n_s} = \frac{\Omega_s - \Omega_m}{\Omega_s} \quad (I.5)$$

Où g représentée ratio du glissement de la machine asynchrone

Le glissement est également un des critères à l'origine des courants rotoriques puisqu'il réside dans la différence de grandeur entre n_s et n_m . Par conséquent, la fréquence des courants rotoriques proportionnelle au glissement peut être exprimée par la relation (I.6)

$$n_r = n_s - n_m \quad \text{Ou } f_r = pgn_s = \frac{p(n_s - n_m)}{n_s} \cdot n_s = g \cdot f_s \quad (I.6)$$

Où f_r est la fréquence des courants rotoriques et f_s est la fréquence des courants statoriques. Il faut savoir que les courants rotoriques de fréquence f_r créent une induction rotoriques tournante d'une vitesse égale à :

$$\Omega_r = \omega_r = \frac{2\pi f_r}{p} = \frac{2\pi g f_s}{p} \quad (I.7)$$

Où Ω_r (ou ω_r) est la vitesse du champ tournant du rotor en radians par seconde.

Les inductions statoriques et rotoriques créent le couple électromagnétique noté C_e ou (T_e) qui en fonction du principe fondamental de la dynamique sera égale aux couples mécaniques résistants. [8]

I.4 Défaillance de la machine asynchrone

I.4.1 Définitions et concept [9]

Une anomalie : est un particulaire non conforme à la loi naturelle ou logique

Une défaillance : est une anomalie de fonctionnement au sein d'un système physique

Une panne : est l'inaptitude d'un dispositif à accomplir une fonction requise. Une panne résulte toujours d'une défaillance.

Un défaut : est une anomalie de comportement au sein d'un système. Ce concept est important dans les opérations de surveillance pour la conduite et la maintenance des processus industriels. Tout écart entre la caractéristique observée et la caractéristique de référence est considéré comme étant un défaut. Il est donc clair qu'une défaillance conduit à un défaut. Mais un défaut n'induit pas forcément une défaillance, en effet, le dispositif peut conserver son aptitude à accomplir sa tâche principale si les défauts n'ont pas d'impacts sur cette tâche. L'art du diagnostic consiste à détecter de façon précoce un défaut avant qu'il ne conduise à un état de défaillance donc de panne.

Une perturbation : consiste en tous phénomènes conçus comme anormale influençant un processus, Non ou mal, représente par un modèle de référence

Un résidu : est un signal conçu comme un indicateur d'anomalie fonctionnelle ou comportementale, sensiblement nul en absence de défauts et non nul en leur présence.

I.4.2 Différents types de défaillance de la machine asynchrone [10]

Les machines électriques et les systèmes d'entraînement sont soumis à de nombreux types de défaut. Ces derniers peuvent être classés selon leur cause en deux familles (figure I.8) : les défauts à cause **interne** et les défauts à cause **externe**. Les défauts externes sont provoqués par des tensions d'alimentation, la charge mécanique ainsi que par l'environnement de l'utilisation de la machine. Les défauts internes sont causés par les constituants de la machine (circuit magnétique, bobinage du stator et du rotor, entrefer mécanique, cage rotoriques). A titre d'exemple nous pouvons citer d'une manière non exhaustive les défauts suivants :

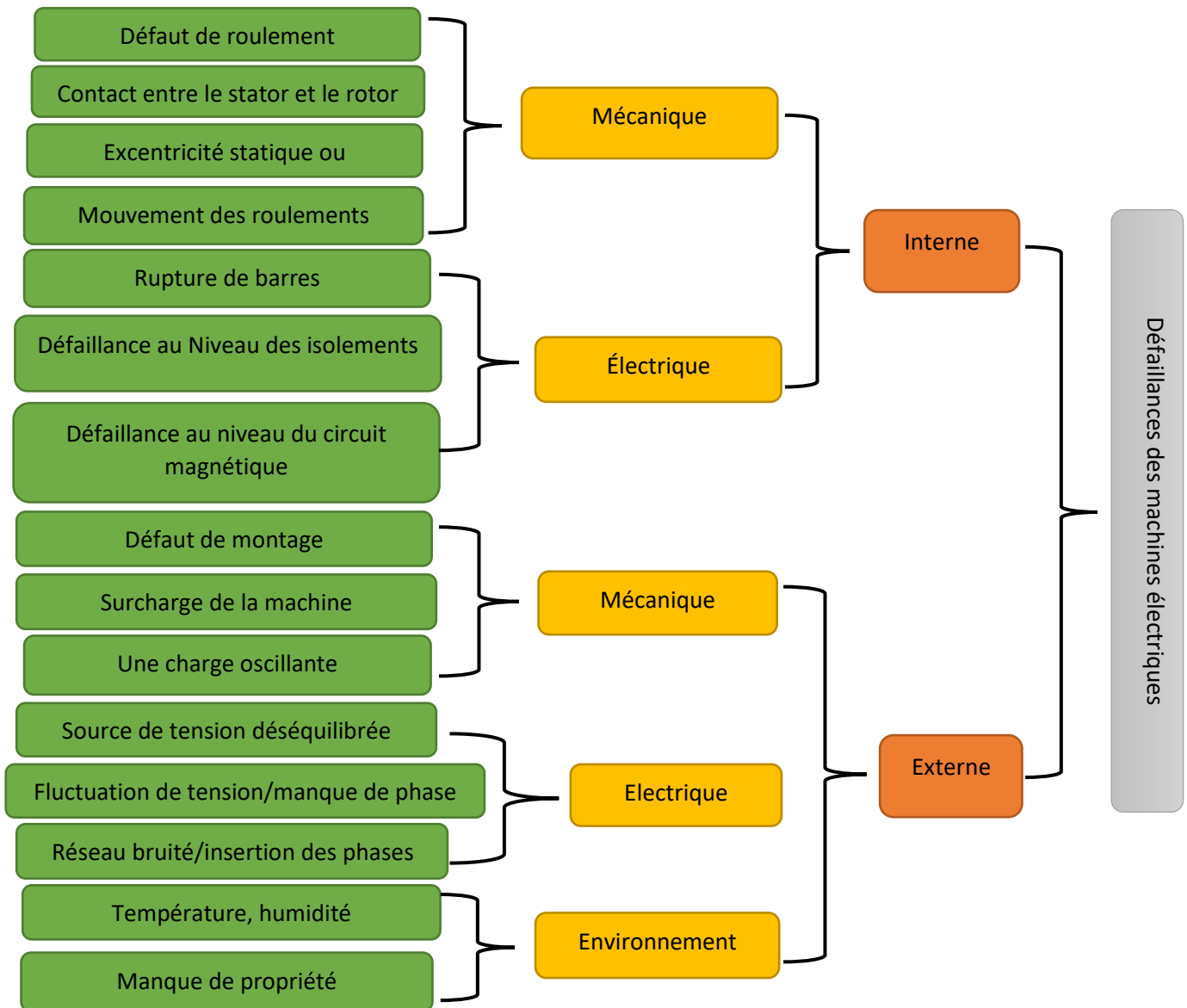


Figure I.9: Différentes défaillances des machines asynchrones

I.5 Diagnostic et surveillance des systèmes [11]

La maintenance nécessite de connaître les régimes de fonctionnement des systèmes alors que la surveillance donne une réponse aux besoins d'information de la maintenance dans le but de garantir le bon fonctionnement des systèmes. Le diagnostic s'intègre à la surveillance en ayant pour objectif de déterminer les causes de dysfonctionnement.

Le diagnostic des défauts nécessite d'obtenir des symptômes caractéristiques du fonctionnement de l'entraînement surveillé et de les analyser pour en déduire l'état du système. L'établissement des symptômes se fait, souvent, en référence à la connaissance du comportement sain dont on dispose.

I.5.1 Différent étapes techniques du diagnostic industriel

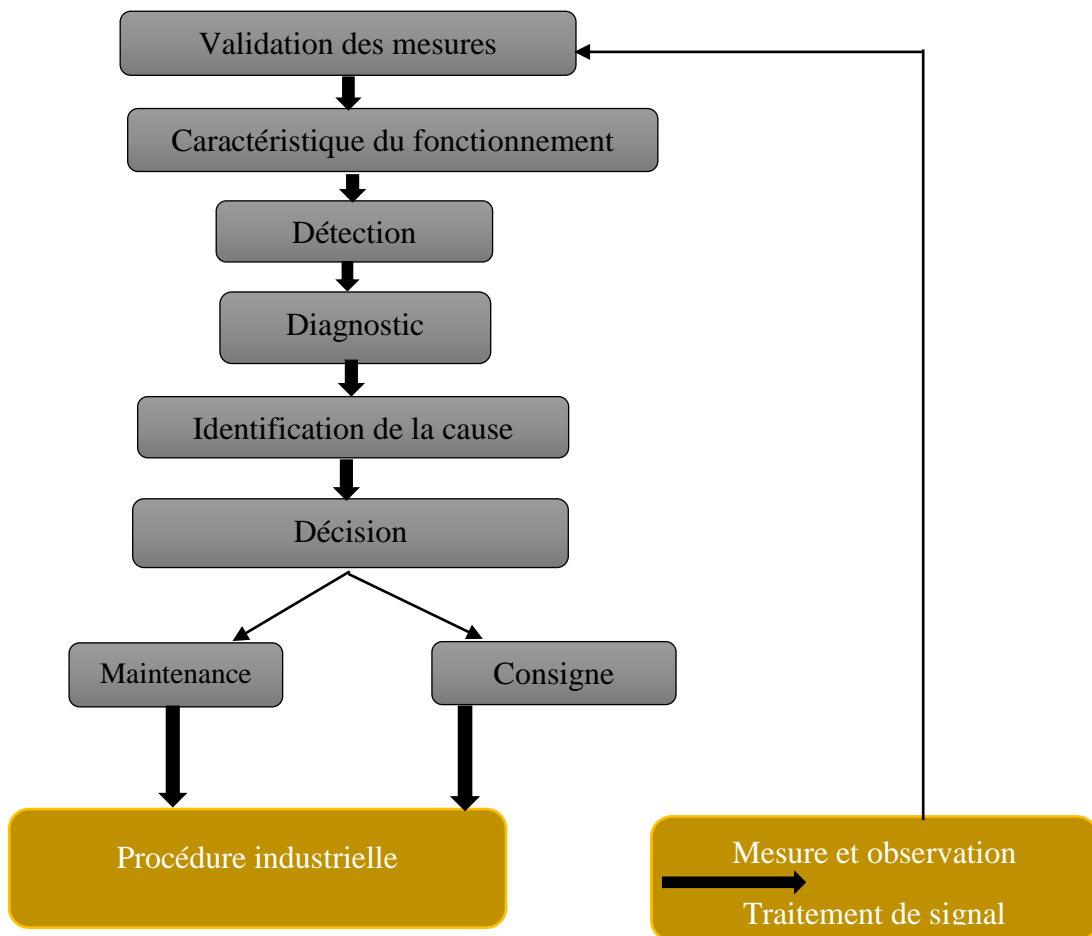


Figure I.10: diagnostic industriel

I.5.2 Surveillance

La surveillance est un dispositif passif, informationnel qui analyse l'état du système et fournit des indicateurs. la surveillance consiste notamment à détecter et classer les défaillances observant l'évolution du système puis à les diagnostiquer en localisant les éléments défilants les causes premier.

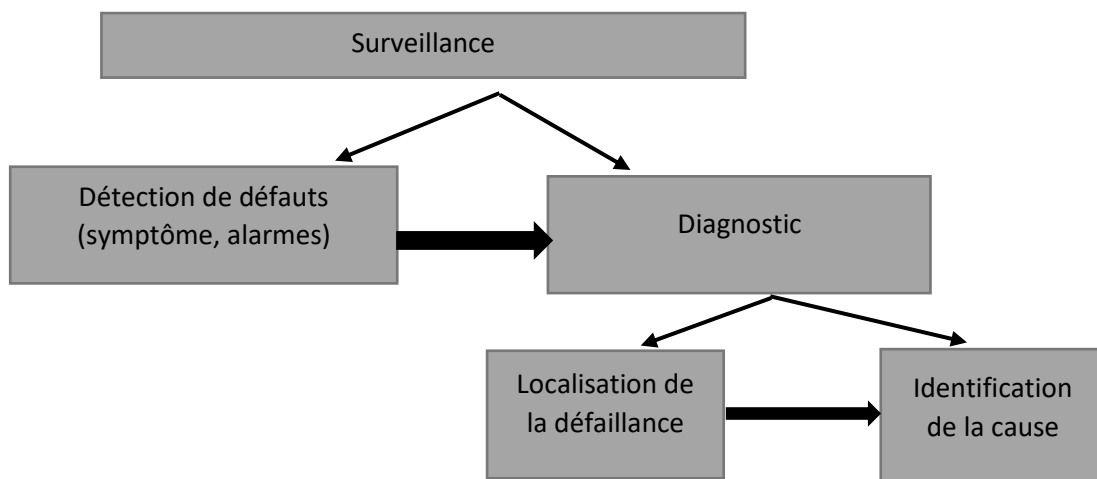


Figure I.11: schema du surveillance

La surveillance se compose de deux fonctions principales qui sont la détection et le diagnostic :

➤ **Détection :**

Pour détecter la défaillance du système : il faut être capable de classer la situation observable comme étant normales ou anormales. Cette classification n'est pas triviale, étant données le manque d'information qui caractérise généralement les cas anormaux. Une simplification communément adoptée consiste comme anormales toute situation qui ne sont pas normales.

➤ **Diagnostic :**

L'objectif de la fonction diagnostique est de rechercher les causes et de localiser les organes qui ont entraîné une observation particulière. La fonction de diagnostic se décompose en deux fonctions élémentaires : localisation et identification des causes.

La localisation permet de déterminer le sous-ensemble fonctionnel défaillants tandis que l'identification de la cause consiste à déterminer les causes qui ont mené à une situation anormale.

I.5.3 Etude statistique [12]

Plusieurs études statistiques ont été effectuées, à partir des années 80 jusqu'à présent, sur les défauts dans les machines asynchrones de moyenne et grande puissance. Cependant, il est toujours difficile de donner une répartition exacte des défaillances dans les différentes parties de la machine, parce qu'elle dépend de plusieurs facteurs tels que le type de la machine, le type d'alimentation, l'environnement d'application et autres.

Une étude statistique a été effectuée en 1988 par la compagnie d'assurance allemande Allianz sur les pannes des machines asynchrones de moyenne puissance (de 50kW à 200kW). Leur répartition dans les différentes parties du moteur, illustrée dans la (figure I.11), a montré que 60% des pannes se situent au stator, 22% au rotor et 18% dans les autres régions telles que les roulements.

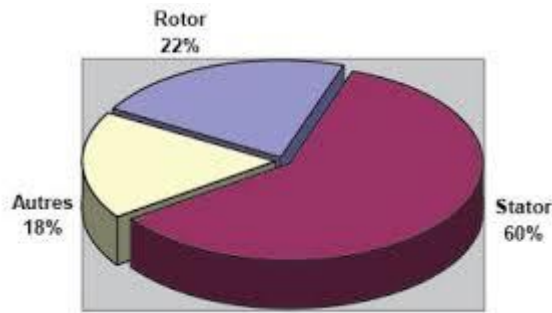


Figure I.12: proportion des défauts

Une deuxième enquête a été menée par la General Electric Company et publiée dans le journal d'EPRI (Electric Power Research Institute) en 1982. Cette étude a couvert environ 5000 moteurs, dont 97% sont des moteurs asynchrones à cage et travaillant dans diverses branches, de l'industrie. La (figure I.12) présente la répartition des défauts dans les moteurs testés et qui donne : 37% de défauts statorique, 41% de défauts de roulements, 10% de défauts rotoriques et 12% d'autres types de défauts.

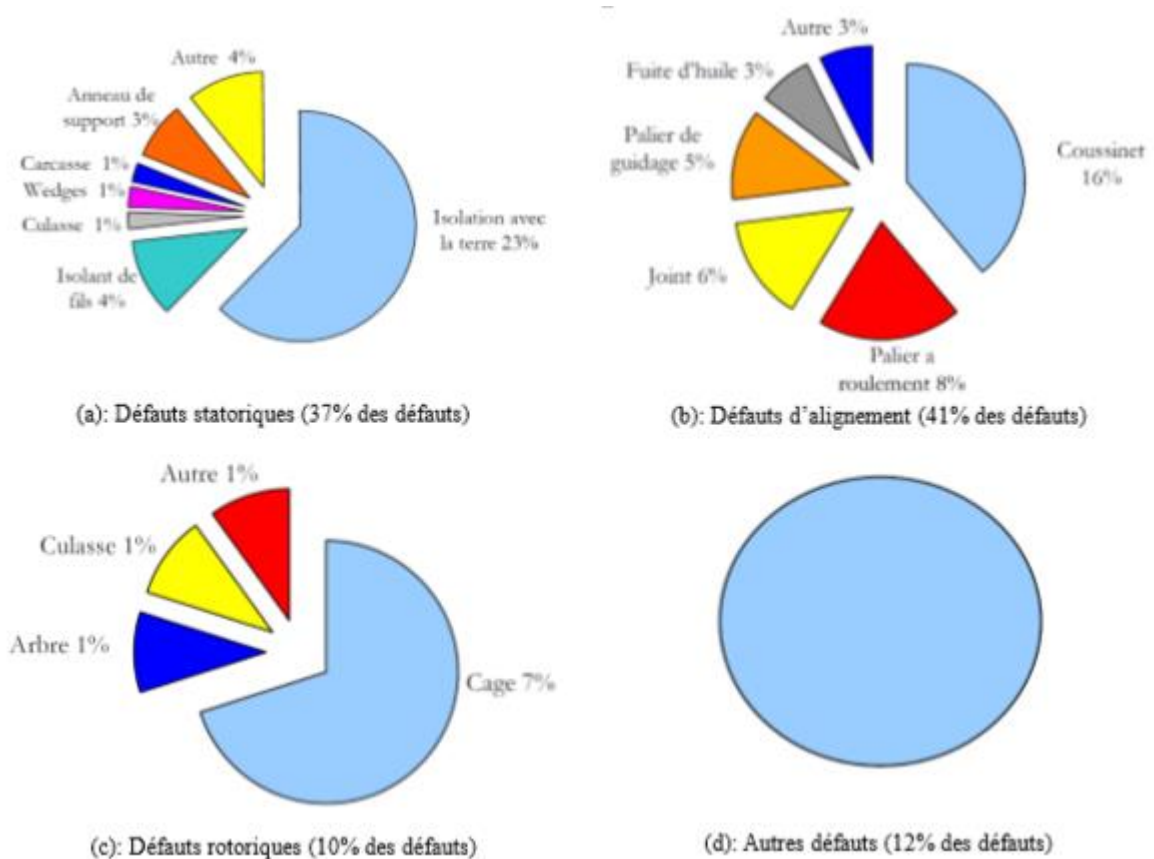


Figure I.13: Répartitions des défauts dans les machines électriques du domaine industriel en 1982

Une troisième étude statistique récente, effectuée en 2008, sur des machines asynchrones de grande puissance travaillant dans l'industrie pétrochimique. Le résultat de cette

Chapitre I : Diagnostic et surveillance

enquête, présenté dans la figure I.13, montre que 69% de défauts se situent dans les roulements, 21% au stator, 7% au rotor et 3% aux accouplements d'arbre.

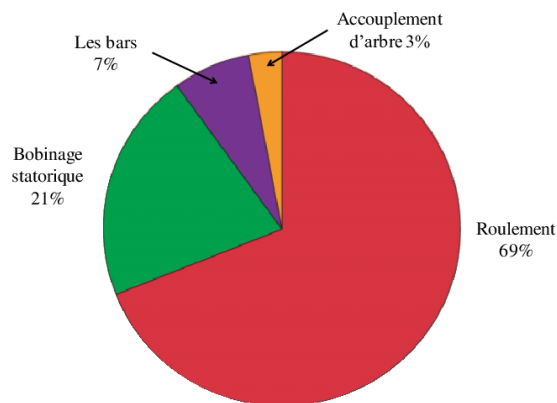


Figure I.14: distribution des défauts dans les machines asynchrones à grande puissance

Les différentes statistiques confirment que le taux de défaillance dépend considérablement de l'application de la machine et de son environnement. En effet, les défauts dans le stator sont les plus fréquents dans les machines de moyenne puissance (voir figure I.11) alors que les défauts de roulements sont dominants dans les applications à puissance élevée (voir figure I.13).

I.6 Méthodes de diagnostic

Dans cette partie nous nous intéressons donc aux résultats obtenus à partir du suivi direct des grandeurs mesurables telles que les vibrations, les flux, les courants et le couple.

I.6.1 Analyses vibratoires de la machine

L'analyse vibratoire de la machine asynchrone peut être menée grâce à des accéléromètres placés sur les paliers dans les directions verticales, axiales et radiales.

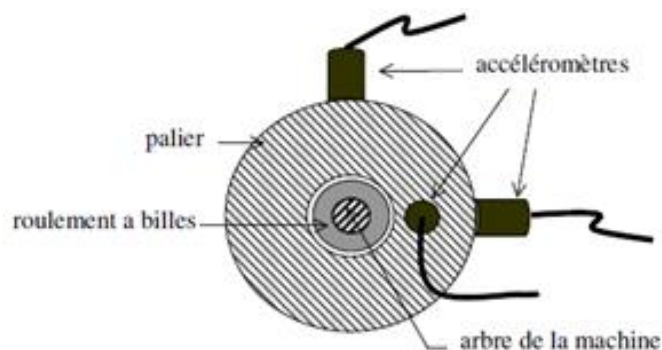


Figure I.15: Mesures vibratoires sur la machine asynchrone

Au même titre que les courants, les vibrations de la machine fournissent des informations sur pratiquement tous les défauts mécaniques fréquemment rencontrés. Plutôt que

Chapitre I : Diagnostic et surveillance

de disposer d'une étude au cas par cas, nous avons réalisé une synthèse de l'ensemble des informations que peuvent fournir ces signaux en fonction des défauts, à partir de la référence [13], qui présente une comparaison entre les signatures des courants et les signatures vibratoires. Ces observations sont résumées dans le tableau I.1.

Nous avons remarqué que les composantes fréquentielles, qui permettent d'identifier les défauts cités, dépendent de la fréquence de rotation du rotor. De ce fait, ces signatures ne sont pas assez distinctes les unes par rapport aux autres. Leur utilisation poserait des problèmes de discrimination des types de défaut. Par contre, pour la détection d'un défaut ou d'un déséquilibre au rotor, les vibrations de la machine s'avèrent être des signaux pertinents.

Type de défaut	Analyse vibratoire	Observations
Rupture de barres Rupture de portions d'anneaux	$f_r \pm 2.g.f_s$	Les vibrations augmentent dans l'axe du rotor
Excentricité Statique Dynamique	Exc. Statique : $2.f_s$ Ou des composantes à k $f_r + f_s$ Exc. Dynamique : $f_r \pm 2 g f_s$ ou f_r	L'excentricité dynamique est fonction du temps et de l'espace L'excentricité statique est fonction de l'espace seulement
Désalignement	f_r et $2.f_r$ principalement	On parle de désalignement : Parallèle et/ou angulaire Des paliers De l'arbre (torsion)
Déséquilibre mécanique	f_r	Au niveau de la charge notamment Vibrations plus importantes dans la direction radiale
Défaillance des paliers	$n.f_e$ et $f_i \pm k.f_r$	Bagues externes Bagues internes Ces composantes fréquentielles sont modulées par la vitesse

Tableau I.1 : Analyses vibratoires, signatures fréquentielles [13]

I.6.2 Analyse des flux

La conversion électromécanique de l'énergie est localisée dans l'entrefer. Cette conversion est donc affectée par tout déséquilibre magnétique, mécanique, électrique ou électromagnétique au rotor ou au stator. Le flux d'entrefer et par-là même l'induction magnétique dans cet entrefer, le flux embrassé dans les enroulements statorique ou encore le flux de fuite dans l'axe du rotor sont des paramètres qui, à cause de leur sensibilité à tout déséquilibre de la machine, méritent d'être analysés.

Ces grandeurs sont difficilement mesurables mais des études ont été menées pour extraire des signatures spécifiques à certains défauts. Signatures spécifiques à certains défauts.

Le flux axial est toujours présent dans les machines électriques à cause des dissymétries inhérentes à leur fabrication. L'étude des variations de flux peut donc être une solution pour détecter et localiser un défaut au travers de l'utilisation de bobines exploratrices placées à l'extérieur de la machine, perpendiculairement à l'axe du rotor.

Dans l'étude [14] l'auteur met en évidence les composantes fréquentielles du flux de fuite dans l'axe du rotor qui permettent de détecter et d'identifier des court-circuit dans les enroulements statorique. L'étude théorique est reprise dans ce qui suit. Le flux axial est le résultat de l'effet des courants sur les extrémités de la machine (têtes de bobines, anneaux de court-circuit). Dans une machine symétrique alimentée par un système de tensions équilibrées, par décomposition en séries de Fourier, l'induction magnétique d'entrefer B_{es} peut s'exprimer de la manière suivante :

$$B_{es}(\theta, t) = \sum_i B_i \cos(\omega_s t - ip\theta) \quad (I.8)$$

B_i est l'amplitude de l'harmonique de rang $(6k \pm 1)$, p le nombre de paires de pôles, ω_s la pulsation des tensions statoriques et θ l'angle mécanique associé à la position du rotor. L'équation (I.8) est exprimée dans un repère lié au stator. Dans un repère lié au rotor, il suffit d'appliquer à θ la relation suivante :

$$\theta = \theta_0 + \frac{\omega_s (1-g)}{p} t \quad (I.9)$$

La nouvelle expression spatio-temporelle de l'induction est alors :

$$\begin{aligned} B_{er}(\theta, t) = & B_1 \cos(g\omega_s t - p\theta_0) \\ & + B_5 \cos((6-5g)\omega_s t + 5p\theta_0) \\ & + B_7 \cos((7g-6)\omega_s t - 7p\theta_0) \end{aligned} \quad (I.10)$$

Cette expression donne implicitement les composantes harmoniques des courants au rotor.

I.6.2.1 Défauts de court-circuit dans le stator

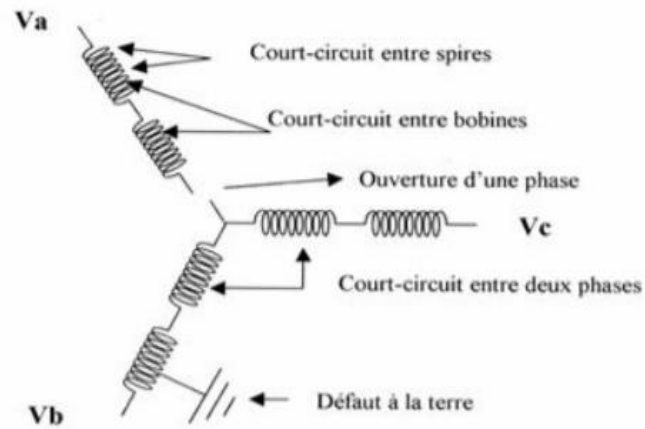


Figure I.16: les défauts de court-circuit dans le stator

L'apparition d'un défaut au niveau des circuits électriques statorique de la machine asynchrone peut avoir des origines diverses. Nous pouvons citer, par exemple, les défauts de type court-circuit entre-spices qui apparaissent à l'intérieur des encoches statoriques. Ce type de défaut peut être causé par une dégradation des isolants des spires du bobinage statoriques. On trouve également les courts-circuits apparaissent entre phase une phase et le neutre, entre une phase et la carcasse métallique de la machine ou encore entre deux phase statorique. Ces défauts ont le plus souvent une origine mécanique. En effet, des vibrations excessives peuvent mener à un desserrement des boulons de la plaque à bornes de la machine créant ainsi le court-circuit. Une cosse mal serrée à la jonction du câble d'alimentation et des bornes de la machine peut être à l'origine d'une ouverture de phase. Le défaut le plus couramment rencontré reste encore la fusion d'un fusible de protection. Ces défauts peuvent être détectés par une analyse harmonique des courants absorbés par la machine. [2]

$$f_{cc} = f_s \left[\frac{n_{cc}}{p} (1 - g) \pm k \right] \quad (I.11)$$

Avec n_{cc} : nombre de spire en court-circuit et $k = 1, 3, 5 \dots$

g : glissement

f_s : Fréquence d'alimentation

p : nombre de pair de pôles

I.6.2.2 Cas d'une dissymétrie au rotor

Le flux statorique, bien qu'il soit non mesurable (mais estimable par un observateur), est un paramètre à ne pas négliger pour la surveillance du fonctionnement de la machine. Pour l'identification du défaut de barres cassées au rotor. [15].

I.6.3 Analyse des courants

Les procédures de surveillance de fonctionnement sont généralement orientées vers des défaillances spécifiques intervenant sur l'une des trois parties de la machine :

Le stator, le rotor ou les paliers. Ces derniers supportent l'arbre moteur. Pour extraire de manière précise les informations relatives aux défauts les recherches ont été particulièrement dirigées vers le spectre des courants statoriques pour deux raisons. Les courants sont faciles à mesurer, ils fournissent des informations sur de nombreux défauts. Mais la mesure des signaux puis leurs traitements dans le domaine spectral ne peuvent servir, en terme d'identification, que si les composantes fréquentielles définies pour chaque défaut [16] [17] sont connues. Cette méthode ne s'applique actuellement qu'en régime permanent.

I.6.3.1 Défaut d'excentricité [18]

L'excentricité de la machine asynchrone est la condition de l'entrefer inégal qui existe entre le stator et le rotor. Quand l'excentricité devient grande, les forces radiales résultantes (connues aussi comme Concentration Magnétique déséquilibrée) peuvent causer par le stator avec la bande de frottement du rotor, ce qui conduit à des dommages du stator et du rotor. La géométrie du rotor peut présenter des dissymétries qui sont naturelles. Celles-ci relèvent de trois catégories d'excentricité de l'entrefer :

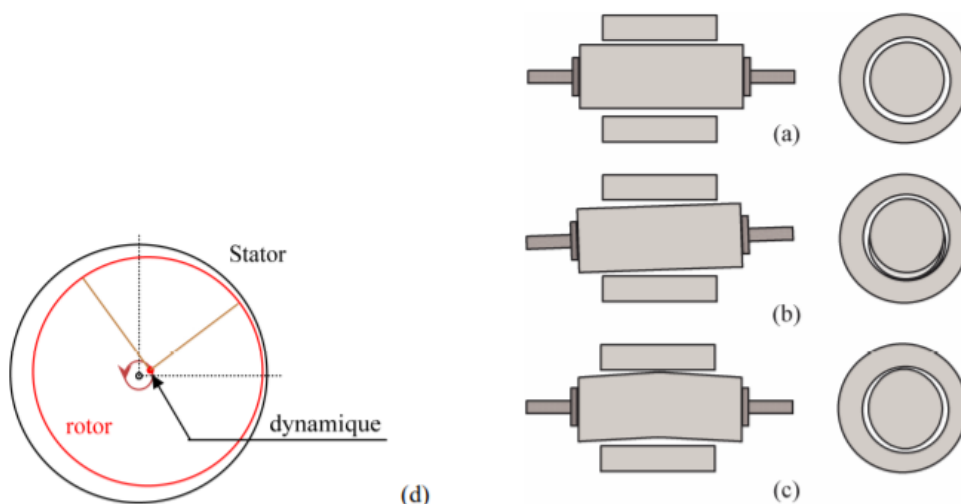


Figure I.17: les défauts d'excentricités

{(a) excentricité statique, (b) défaut de centrage, (c) déformation du rotor, (d) excentricité dynamique}

L'excentricité statique de l'entrefer, correspond au cas où le centre de rotation de l'arbre du rotor n'est pas celui du centre géométrique du stator, et la position de l'épaisseur minimale radiale de l'entrefer est fixée dans l'espace. L'excentricité statique peut être causée par le positionnement incorrect du rotor ou stator à l'étape de commission. Si l'assemblage du rotor roulement est suffisamment raide, le niveau de l'excentricité statique ne change pas.

L'excentricité dynamique, correspond au cas où le centre du rotor différent du centre géométrique du stator, de plus, le centre du rotor tourne autour du centre géométrique de stator.

Ce désalignement peut être causé par plusieurs facteurs tels que : arbre de rotor coudé, soutenir l'usage, désalignement, résonance mécanique à des vitesses critiques, etc... L'excentricité dynamique dans les nouvelles machines est contrôlée par le total a indiqué la lecture (TIR) ou par la bande finale du rotor.

Dans la référence [16], les auteurs utilisent des méthodes d'intelligence artificielle pour le diagnostic du défaut. Mais le plus important est l'identification du type d'excentricité qui est possible par la visualisation, dans le spectre des courants de phase, des composantes fréquentielles suivantes :

$$\text{Pour l'excentricité statique : } f_{exc} = f_s \left(1 \pm k \frac{N_r (1-g)}{p} \right) \quad \text{avec } k=1,2,3 \quad (\text{I.12})$$

$$\text{Pour l'excentricité dynamique : } f_{exc} = f_s (1 \pm 2.k(1-g)) \quad (\text{I.13})$$

$$\text{Pour le désalignement : } f_{exc} = f_s \left(1 \pm k \frac{(1-g)}{p} \right) \quad (\text{I.14})$$

p : nombre de pair de pole ;

L'origine du désalignement est introduite dans le paragraphe suivant.

I.6.3.2 Défaillance des paliers

Lors de son installation, le palier est souvent appuyé sur l'arbre ou dans le carter. Il s'ensuit alors une possibilité de désalignement qui peut apparaître de quatre manières différentes :

- Le désalignement proprement dit où les deux paliers (supportant le même arbre) ne sont pas dans le même axe.
- La flexion de l'arbre
- L'inclinaison d'une bague extérieure de roulement

➤ L'inclinaison d'une bague intérieure de roulement

On peut retrouver les phénomènes vibratoires des paliers sur le spectre des courants statoriques en considérant que l'excentricité ou le désalignement du rotor conduit nécessairement à une variation de la densité de flux d'entrefer. Etant donné que les paliers supportent le rotor, grâce aux roulements, un défaut de ceux-ci produira un mouvement radial entre le rotor et le stator. Les fréquences caractéristiques du défaut sont déduites des dimensions des paliers (DB et DP) et des roulements à billes, comme le montre la (figure I.17).

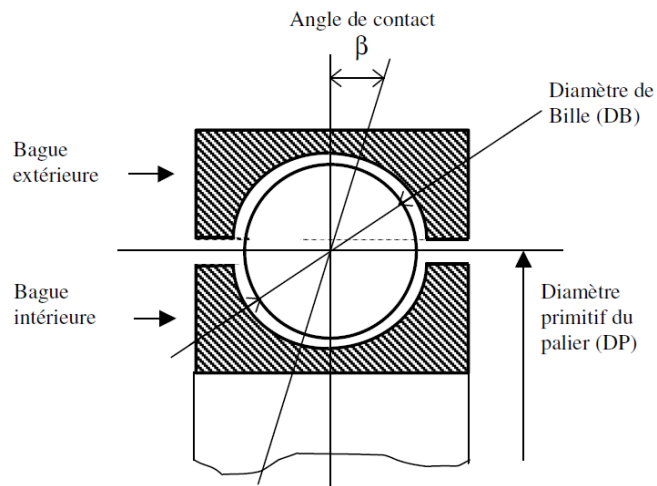


Figure I.18: Vue en coupe de la partie supérieure d'un roulement à bille [16] [17] [19]

En fonction du nombre de billes noté n_b , on définit les composantes fréquentielles spécifiques aux vibrations des paliers notées f_{pal} . Ces composantes sont définies par la relation (I.15)

$$f_{pal} = f_s \pm k \cdot f_{i,e} \quad (I.15)$$

"i, e" : interne, externe (bagues)

Avec :

$$f_{i,e} = \frac{n_b}{2} \times f_r \left[1 \pm \frac{DB}{DP} \times \cos \beta \right] \quad (I.16)$$

Où f_r est la fréquence de rotation du rotor.

De manière plus précise, on définit les fréquences des bagues internes et externes de roulement respectivement par les expressions (I.17) et (I.18)

$$f_e = \frac{n_b}{2} \times f_r \left[1 - \frac{DB}{DP} \times \cos \beta \right]$$

(I.17)

$$f_i = \frac{n_b}{2} \times f_r \left[1 + \frac{DB}{DP} \times \cos \beta \right]$$

(I.18)

Comme nous l'avons précisé, ces informations sont fonction des données du constructeur. On peut toutefois approcher les expressions de f_e et f_i pour un nombre faible de billes dans les roulements [16] par :

$$f_e = 0,4 \times n_b \times f_r \quad (I.19)$$

$$f_i = 0,6 \times n_b \times f_r \quad (I.20)$$

I.6.3.3 Ruptures de barres ou de portions d'anneaux

I.6.3.3.1 Rupture des barres

Les ruptures de barres ou de portions d'anneau peuvent être dues, par exemple, à une surcharge mécanique (démarrages fréquents, etc.), à un échauffement local excessif ou encore à un défaut de fabrication (bulles d'air ou mauvaises soudures) [11]. Cela fait apparaître des oscillations sur les courants et le couple électromagnétique d'autant plus apparentes que l'inertie est très grande (vitesse constante). Si l'inertie de l'entraînement est plus faible, des oscillations apparaissent sur la vitesse mécanique et sur l'amplitude des courants statoriques.

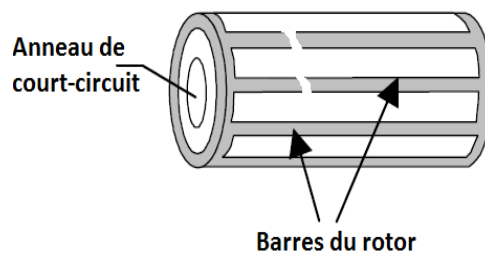


Figure I.19: Rupture des barres

Nous n'avons pas jugé utile ici de mener notre étude sur la détection de barres cassées par la mesure des courants statoriques. En effet, il est bien connu qu'un traitement approprié de ces signaux fait apparaître des composantes dans leurs spectres aux fréquences. [20]

$$f = f_s (1 \pm 2 \times g) \quad (I.21)$$

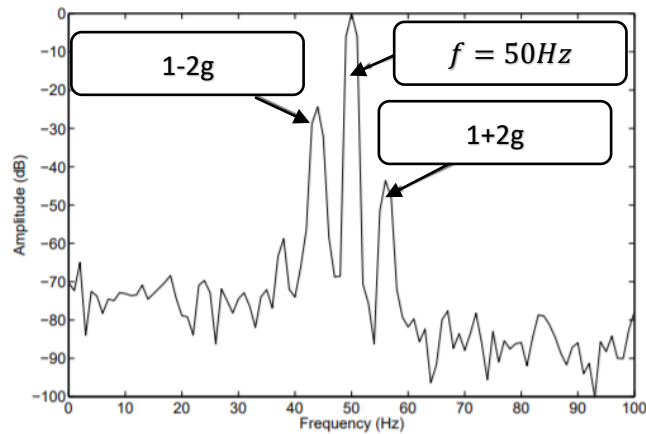


Figure 1.21: défaut de rupture de barre

En effet, lorsqu'une barre est cassée, des harmoniques de flux correspondant sont produits et induisent des harmoniques de courant dans l'enroulement statorique aux fréquences :

$$f = f_s (1 \pm 2 \times g) \quad (I.22)$$

Par ailleurs ce défaut à aussi une influence sur les harmoniques de rang faible des courants statoriques :

$$f_b = f_s \left[\frac{N_b}{p} (1 - g) \pm g \right] \quad (I.23)$$

De plus les amplitudes des raies dans ces bandes latérales du fondamental augmentent avec le nombre de barres défailtantes [21].

I.6.3.3.2 Rupture d'anneau [22]

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

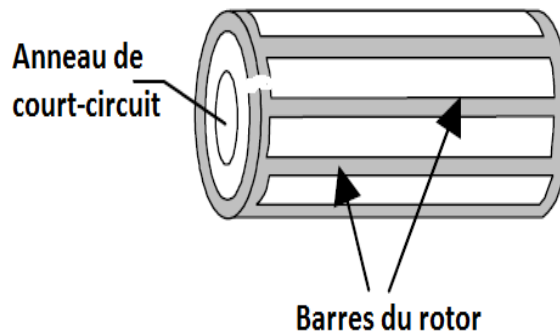


Figure I.22: Rupture d'anneau

I.6.3.4 Défauts de déséquilibre de tension

Les effets de déséquilibre de tension sur les moteurs à induction se traduisent par une réduction du rendement, des oscillations mécaniques et des courants fortement déséquilibrés sur le stator. Ces courants élevés entraînent une augmentation de la température. Par conséquent, l'isolation des conducteurs électriques dans le stator est affectée et considérée comme la partie la plus faible des moteurs à induction à cage d'écureuil. Cette contrainte thermique entraîne une réduction de la durée de vie du moteur à induction.

Le déséquilibre de tension génère une composante de séquence négative dans la tension, l'intensité du champ magnétique dans l'entrefer est proportionnelle à l'amplitude de la séquence positive et / ou négative. Le sens de rotation du champ correspondant à la séquence négative est opposé à celui correspondant à la séquence positive. C'est pourquoi, dans le cas d'une tension non équilibrée, le champ magnétique résultant devient elliptique plutôt que circulaire.

Cette séquence à flux négatif produit plusieurs effets indésirables, tels qu'une augmentation des pertes de cuivre dans le stator et dans le rotor, ainsi que des pulsations de puissance et de couple.

Ces pulsations sont causées par un couple supplémentaire à double fréquence de la tension appliquée. Tous ces effets réduisent la durée de vie de la machine et des moteurs en bon état peuvent être hors service. [24]

I.6.4 Analyse du couple électromagnétique [23]

Le couple électromagnétique peut être reconstruit à partir de deux des trois courants statoriques et par ajout de spires de flux dans ces deux phases (cela permet d'obtenir les forces

Chapitre I : Diagnostic et surveillance

électromotrices qui y sont induites). Dans un repère d,q lié au stator, le couple électromagnétique a pour expression(à titre d'exemple) :

$$C_{em} = p(\Phi_{sd}i_{sq} - \Phi_{sq}i_{sd})$$

(I.24)

Si on considère les courants et les flux dans un repère triphasé :

$\Phi_{s1}, \Phi_{s2}, \Phi_{s3}$ sont les flux embrassés sous un pôle pour les phases 1, 2 et 3 respectivement et i_{s1}, i_{s2}, i_{s3} sont les courants de phase au stator. Avec une alimentation triphasée sans neutre on a :

$$i_{s1} = -i_{s2} - i_{s3} \quad (I.25)$$

Et par conséquent,

$$\Phi_{s1} = -\Phi_{s2} - \Phi_{s3} \quad (I.26)$$

Ceci permet d'obtenir :

$$C_{em} = \sqrt{3}p(\Phi_{s3}i_{s2} - \Phi_{s2}i_{s3}) \quad (I.27)$$

La dissymétrie électrique du rotor fait apparaître des harmoniques de dentures rotoriques, ce qui modifie le champ d'entrefer. Le problème peut alors être détecté en analysant les fréquences d'encoches : L'harmonique à 700 Hz représente les composantes fréquentielles dues au nombre de barres et d'encoches au rotor. Leur expression est donnée par la relation.

$$f_{sb} = f_s \left[\frac{N_r(1-g)}{p} \pm k \right] \pm 2gf_s \quad (I.28)$$

fsb : fréquence d'encoche au rotor

Nr : nombre d'encoche au rotor

I.7 Conclusion

L'objectif de cette étude était d'établir un état de l'art des méthodes de diagnostic et de surveillance de la machine asynchrone. Nous avons scindé ce chapitre en 2 parties : la première concerne la constitution de la machine asynchrone et le principe de fonctionnement. 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, le flux et l'estimation du couple électromagnétique. Dans le suivant chapitre nous abordons la modélisation de la machine asynchrone a cage d'écureuil.

Chapitre II : Modélisations de la machine asynchrones

II.1 Introduction

La machine asynchrone occupe une grande place dans les applications industrielles. La croissance d'utilisation de cette machine électrique est essentiellement due à sa simplicité de construction, son faible coût, et robustesse mécanique. Cependant, ces machines sont utilisées de plus en plus dans les applications à vitesse variable nécessitant une alimentation par onduleurs de tension dont les composants commutent de plus en plus rapidement. De ce fait, on assiste à un vieillissement prématuré de leur isolant entraînant des défauts électriques entre spires ou phase bâti. Par conséquent, pour des applications pour lesquelles la continuité de service est primordiale, le diagnostic de défauts électriques et la surveillance de ces machines se développent afin d'améliorer la fiabilité du system. L'établissement des modèles en présence de chaque défaut est essentiel pour l'étude du comportement de la machine en présence de ce défaut et d'en déduire les méthodes adaptées de diagnostic.

Ce chapitre résume les méthodes actuelles de modélisation de défauts soit sur L'établissement de circuits électriques équivalents, soit le circuit électrique couplé avec circuit magnétique, soit la méthode élément fini, soit par réseaux de perméance et en fin une comparaison entre elle est sera réalisé. Ensuite nous présentons une étude détaillée d'un modèle de la machine à induction basé sur l'approche du circuit couplé pour simuler les défauts de déséquilibre de tension.

II.2 Méthodes de modélisation

Dans cette partie, nous allons introduire une description de quelques différentes méthodes couramment utilisées pour modéliser une machine asynchrone à cage d'écureuil.

A ce jour, les modèles qui décrivent le fonctionnement de la machine asynchrone à cage d'écureuil peuvent être décomposés en deux parties distinctes :

- Les modèles dits "physiques".
- Les modèles "comportementaux"

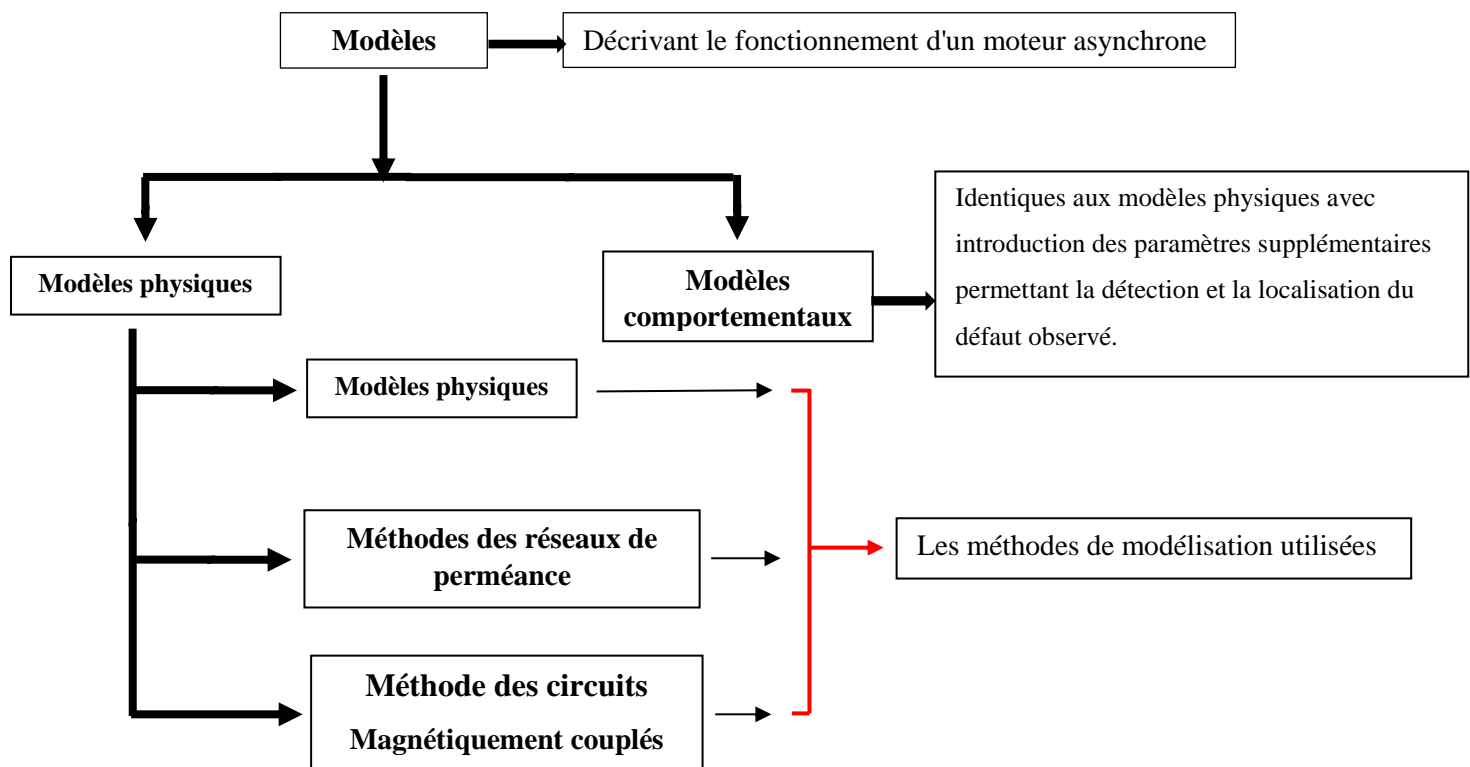


Figure II.1: Les méthodes utilisées pour modéliser un moteur asynchrone.

II.2.1 Modèle physique

En ce qui concerne le modèle physique ce sont les lois régissant l'électromagnétisme qui sont utilisées pour décrire le fonctionnement de la machine asynchrone. Ces modèles sont divers peuvent varier en complexité et/ou en précision selon la méthode de modélisation utilisée. Nous ne les citerons pas tous mais nous pouvons énoncer les plus populaires dont ceux basés sur :

II.2.1.1 Approche numérique

On peut citer deux méthodes :

II.2.1.1.1 La méthode des éléments finis

Il s'agit de découper la machine en élément de taille suffisamment petites, pour que le matériau magnétique puisse être considéré comme linéaire sur surface correspondantes et à partir des équations de Maxwell, il est possible d'exprimer le problème à résoudre.

La méthode des éléments finis permet de reproduire fidèlement le comportement électromagnétique de la machine, et de simuler d'une manière plus proche de la réalité.

Cependant, les moyens et le temps de calcul freinent l'utilisation de cette méthode en simulation et l'évolution des défauts. [25]

II.2.1.1.2 La méthode des réseaux de perméances

Cette approche permet de prendre en compte les caractéristiques du fer utilisé pour la construction de la machine asynchrone. En effet, le calcul des différent perméance ne peut se faire qu'en fixant une valeur précise pour la perméabilité relative du fer μ_r . Le mouvement de rotation de la machine est pris en compte par l'intermédiaire de perméances d'entrefer variables selon la position du rotor de la machine. [26]

II.2.1.2 Méthode analytique

La modélisation analytique repose sur le concept d'inductance, notion qui caractérise une relation de flux-courant linéaire. Cette approche globale des phénomènes électromagnétique permet d'établir un schéma électrique équivalent de la machine, la théorie du circuit permet de trouver les équations différentielles caractérisant le fonctionnement de la machine. [26]

II.2.1.2.1 Modèle triphasé-triphasé de la machine asynchrone

Ce modèle représentant la machine par trois phases au stator et trois autres au rotor, il permet la détection de quelques types de défaut reliés surtout au stator tels que l'ouverture d'une phase statorique, le court-circuit phase-phase ou le court-circuit phase-neutre. [27]

II.2.1.2.2 Méthode des circuits électrique magnétiquement couplés

Les inductances propres et mutuelles entre le stator et le rotor de la machine prennent une place importante dans cette méthode de modélisation car elles contiennent la signature des différents phénomènes pouvant apparaître au sein de la machines asynchrones une modélisation précise de ces inductances mènera à un apport d'information supplémentaires sur les signaux tels que le courant statorique ou encore la vitesse rotoriques. Cette approche offre un bon compromis en terme de précision de modèle et de temps de calcul. de plus ce type de modélisation permet de prendre en compte un certain nombre de défauts d'origine électromagnétiques tels que les défauts de court-circuit entre spires statoriques, les défauts de type rupture de barre rotoriques, de portion d'anneaux de court-circuit et le défaut de déséquilibre de tension. [25]

II.2.2 Modèles comportementaux

Les modèles comportementaux, quant à eux, reprennent les modèles physiques en y incluant des paramètres supplémentaires. Ces paramètres permettent la détection, et pour certains d'entre eux, la localisation du défaut observé. [25]

II.2.2.1 Modèle basés sur l'estimation paramétrique :

Ces modèles sont basée sur l'hypothèse qu'un défaut se traduit par la variation de l'état paramétrique de la machine (résistance statorique pour le défaut des enroulements statorique et la résistance rotorique pour le défaut de rupture de barres. [28])

II.2.2.2 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 reconnaissances des formes

L'objectif du diagnostic par reconnaissances des formes est d'associer une observation du système (données fournies par des capteurs, par exemple), à un mode de fonctionnements, correspondant à une classe.

II.2.2.3 Comparaison entre les différentes méthodes de modélisation

Comme illustré dans la figure.II.1 il y a une complémentarité entre les modèles et qu'aucune ne s'impose comme étant à la fois plus rapide et plus précise que les autres.

La méthode des éléments finie et la quel constitue une référence à leur actuel mais demande un temps de calcule plus important, par contre la méthode de circuit électrique couplé et plus rapide mais avec des nombreuses hypothèses.

Méthode	Particularités	Observation
Méthode des éléments finis	Requiert un temps de calcul important	
	Le circuit magnétique de la machine est découpé en plusieurs éléments de dimension faible	Permet de considérer le matériau magnétique linéaire sur les surfaces correspondantes
	Utilisation des équations de Maxwell à partir des formes locales	Permet la résolution du problème
	Complexité de la résolution Analytique correspondante	Permet le traitement du phénomène de façon approchée
	Approche difficile basée sur de nombreux logiciels	Permet la détermination de la cartographie du champ magnétique présent dans les machines
Méthodes des Réseaux de Perméance	Le circuit magnétique est décomposé en tubes (caractérisés par leurs perméances) de flux élémentaires	Permet la construction d'un réseau dit de perméance
	Prise en compte des caractéristiques Du fer utilisé pour la construction de la machine	Permet le calcul des différentes perméances en fixant une valeur précise pour la perméabilité relative du fer μ_r
	Prise en compte du mouvement de rotation de la machine	

Méthode des circuits magnétiquement couplés	Prise en compte des inductances propres et mutuelles entre le stator et le rotor de la machine	Permet de mener à un apport d'informations sur les signaux tels que le courant statorique ou la vitesse rotorique
	Offre un compromis en terme de précision du modèle et de temps de calcul	Permet la prise en compte d'un certain nombre de défauts d'origine électromagnétique tels que les défauts de court-circuit entre spires statoriques, les défauts de rupture de barres rotoriques et/ou de portion d'anneau de court-circuit ...
	Basée sur la décomposition en séries de Fourier de l'induction d'entrefer de la machine	(Permet le calcul des inductances) nécessite la connaissance des termes relatifs à l'étalement, au raccourcissement, à l'inclinaison du bobinage qui sont intégrés au calcul des inductances à travers des coefficients spécifiques
	Basée sur la fonction d'enroulement	(Permet le calcul des inductances) nécessite la connaissance précise de la forme du bobinage de la machine

Tableau II.1 : Les différentes méthodes de modélisation

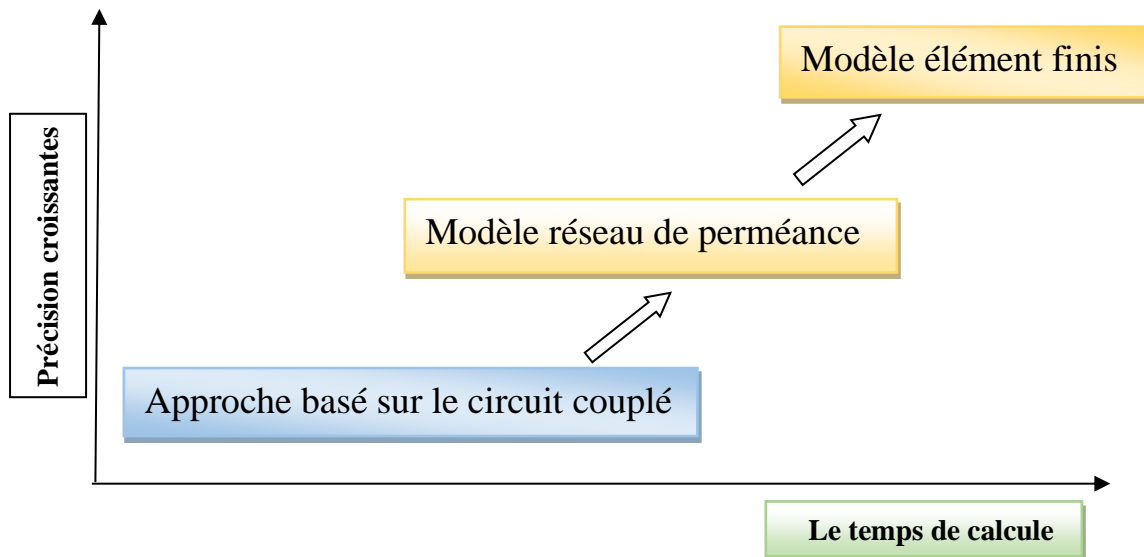


Figure II.2: Comparaison entre les différentes méthodes de modélisation

II.3 Méthode des circuits magnétiquement couplés

D'après la comparaison entre les différentes méthodes, cette méthode permet la prise en compte d'un certain nombre de défauts d'origine électromagnétique tels que les défauts de court-circuit entre spires statoriques, les défauts de rupture de barres rotoriques et/ou de portion d'anneau de court-circuit.

II.3.1 Modélisation de la machine asynchrone à l'aide des circuits magnétique couplés

Généralement, l'approche à circuit couplé est utilisée pour décrire les relations électromagnétiques des machines à induction avec des rotors bobinés. Les moteurs à induction avec rotors à cage d'écureuil peuvent être considérés comme équivalents aux moteurs à rotor bobiné ayant une résistance de rotor équivalente [24]. Les circuits de stator et de rotor d'une machine à induction sont couplés magnétiquement. En utilisant l'approche du circuit couplé et la notation matricielle, une machine à induction idéalisée peut être présentée sous la forme d'équations différentielles du premier ordre des tensions dans le référentiel abc naturel du moteur, comme. [25]

La loi de Faraday permet d'écrire

$$V = ri + \frac{d}{dt} \phi \quad (II.1)$$

On déduit pour l'ensemble des phases statoriques : [29]

$$V_s^{abc} = r_s i_s^{abc} + \frac{d\phi_s^{abc}}{dt} \quad (\text{II.2})$$

Et pour les phases rotoriques :

$$V_r^{abc} = r_r i_r^{abc} + \frac{d\phi_r^{abc}}{dt} \quad (\text{II.3})$$

Les flux totalisés couplés avec les phases statorique et rotoriques s'expriment sous la forme :

$$\begin{aligned} \phi_s^{abc} &= L_{ss}^{abc} i_s^{abc} + L_{sr}^{abc} i_r^{abc} \\ \phi_r^{abc} &= L_{rr}^{abc} i_r^{abc} + L_{rs}^{abc} i_s^{abc} \end{aligned} \quad (\text{II.4})$$

Notations V_s^{abc} , i_s^{abc} , ϕ_r^{abc} , V_r^{abc} , i_r^{abc} , ϕ_s^{abc} sont des vecteurs de colonne représentant les tensions, les courants et les liaisons de flux de chaque phase dans un stator ou un rotor, où les indices s et r indiquent respectivement le stator et le rotor, et le super script abc désigne les trois phases. Dans une machine à induction idéale, la résistance dans chaque phase de stator ou de rotor est supposée être égale. Ainsi, les notations r_s et r_r sont des matrices diagonales avec une résistance équivalente du stator ou du rotor, l'indice étant indiqué par les éléments non nuls, donnés par :

$$r_{s,r} = \begin{bmatrix} r_{s,r} & 0 & 0 \\ 0 & r_{s,r} & 0 \\ 0 & 0 & r_{s,r} \end{bmatrix} \quad (\text{II.5})$$

où r_s et r_r représentent la résistance équivalente équilibrée dans chaque phase d'un stator et d'un rotor d'une machine à induction en bonne santé, respectivement.

Notations L_{ss}^{abc} L_{rr}^{abc} sont des matrices de l'inductance propre du stator et de l'enroulements du rotor, respectivement, tandis que L_{sr}^{abc} et L_{rs}^{abc} sont des matrices du stator au rotor et des inductances mutuelles rotor-stator, respectivement.

Les sous-matrices des inductances d'enroulement stator-stator et rotor-rotor sont formés comme suit :

$$L_{ss}^{abc} = \begin{bmatrix} L_{ls} + L_{ss} & L_{sm} & L_{sm} \\ L_{sm} & L_{ls} + L_{ss} & L_{sm} \\ L_{sm} & L_{sm} & L_{ls} + L_{ss} \end{bmatrix} \quad (\text{II.7})$$

$$L_{rr}^{abc} = \begin{bmatrix} L_{lr} + L_{rr} & L_{rm} & L_{rm} \\ L_{rm} & L_{lr} + L_{rr} & L_{rm} \\ L_{rm} & L_{rm} & L_{lr} + L_{rr} \end{bmatrix} \quad (\text{II.8})$$

où L_{ls} est l'inductance de fuite d'enroulement de stator par phase, L_{lr} est le par phase inductance de fuite d'enroulement de rotor, L_{ss} est l'inductance propre de l'enroulement de stator, L_{rr} est l'inductance propre de l'enroulement du rotor, L_{sm} est l'inductance mutuelle entre les enroulements du stator et L_{rm} est l'inductance mutuelle entre l'enroulements du rotor.

Les inductances mutuelles stator-rotor sont exprimées comme suit :

$$L_{sr}^{abc} = [L_{rs}^{abc}]^T = L_{sr} \begin{bmatrix} \cos(\theta_r) & \cos(\theta_r + 2\pi/3) & \cos(\theta_r - 2\pi/3) \\ \cos(\theta_r - 2\pi/3) & \cos(\theta_r) & \cos(\theta_r + 2\pi/3) \\ \cos(\theta_r + 2\pi/3) & \cos(\theta_r - 2\pi/3) & \cos(\theta_r) \end{bmatrix} \quad (\text{II.9})$$

où L_{sr} et L_{rs} sont les valeurs maximales du stator à rotor et du rotor à stator inductance mutuelle, respectivement, θ_r est l'angle électrique entre les axes de phase a du stator et du rotor, à savoir l'angle du rotor, et le super script T désigne la transposée du matrix.

Les équations ci-dessus montrent que les équations de tension stator et rotor sont couplés les uns aux autres à travers les termes d'inductance mutuelle, qui sont une fonction de l'angle du rotor. Ainsi, les termes couplés interagissent et varient avec le rotor position et le temps.

Pour un modèle complet, une équation de couple est également nécessaire. L'équation de couple est déduite en appliquant des économies d'énergie, qui est donné par Eq (II.9) dans le cas d'une induction

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

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.

Le couple électromécanique est défini par le terme P_{em} divisé par la vitesse angulaire

mécanique du rotor (ω_{rm}).

$$C_{em} = \frac{P_{em}}{\omega_{rm}} \quad (\text{II.11})$$

II.4 Transformation de système triphasé

II.4.1 Transformation des composants symétriques(Fortescue)

Les composants symétriques permettent de remplacer les quantités de phase de tension et de courant par trois composants symétriques séparés. Considérons les composants

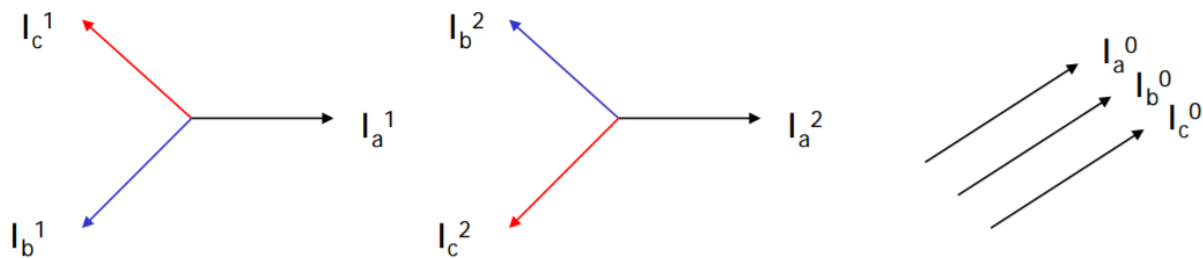


Figure II.3:composant symétriques

Triphasés équilibré

$$\begin{aligned} I_a^1 &= I_a^1 \angle 0 = I_a^1 \\ \text{Ou } I_b^1 &= I_a^1 \angle 240 = a^2 I_a^1 & \text{ou } a &= 1 \angle 120, a^2 = 1 \angle 240 \\ I_c^1 &= I_a^1 \angle 120 = a I_a^1 \end{aligned} \quad (\text{II.12})$$

L'ordre des phases :

- abc : séquence positive

$$\begin{aligned} I_a^1 &= I_a^1 \angle 0 = I_a^1 \\ I_b^1 &= I_a^1 \angle 240 = a^2 I_a^1 \\ I_c^1 &= I_a^1 \angle 120 = a I_a^1 \end{aligned} \quad (\text{II.13})$$

- acb : séquence négative

$$\begin{aligned} I_a^1 &= I_a^1 \angle 0 = I_a^1 \\ I_b^1 &= I_a^1 \angle 120 = a I_a^1 \\ I_c^1 &= I_a^1 \angle 240 = a^2 I_a^1 \end{aligned} \quad (\text{II.14})$$

- Zéro séquence

$$I_a = I_b = I_c = 0 \quad (\text{II.15})$$

Chapitre II : Modélisations de la machine asynchrone

Donc les composants symétriques des courants deviennent :

$$\begin{aligned} I_a &= I_a^0 + I_a^1 + I_a^2 \\ I_b &= I_b^0 + I_b^1 + I_b^2 = I_a^0 + a^2 I_a^1 + a I_a^2 \\ I_c &= I_c^0 + I_c^1 + I_c^2 = I_a^0 + a I_a^1 + a^2 I_a^2 \end{aligned} \quad (\text{II.16})$$

Et les matrices deviennent :

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a^0 \\ I_a^1 \\ I_a^2 \end{bmatrix} \Rightarrow I^{abc} = A I_a^{012} \quad (\text{II.17})$$

La transformation réciproque des composants symétriques vers a,b et c devient :

$$I_a^{012} = A^{-1} I^{abc} \quad \text{Ou } A^{-1} = \frac{1}{3} A^* \quad (\text{II.18})$$

$$\begin{bmatrix} I_a^0 \\ I_a^1 \\ I_a^2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.19})$$

II.4.2 Transformation de Park

La transformation de Park permet de découpler les grandeurs triphasées en variable biphasées

a- notation du générateur :

$$[f_{dqo}] = [T_{dqo}(\theta_d)] [f_{abc}] \quad (\text{II.20})$$

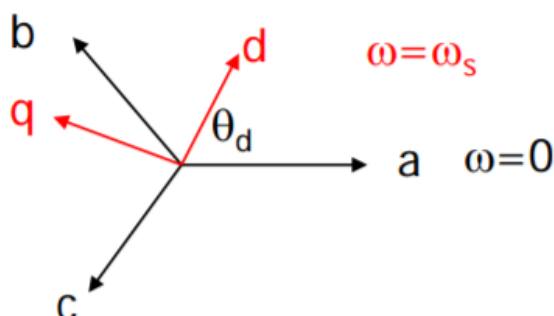


Figure II.4: schema démonstrative

$$\text{Notation du générateur} \quad \theta_q = \theta_d + \pi/2 \quad (\text{II.21})$$

$$[T_{dqo}(\theta_d)] = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta_d & \cos\left(\theta_d - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_d + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin \theta_d & -\sin\left(\theta_d - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta_d + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (\text{II.22})$$

$$[T_{dqo}(\theta_d)]^{-1} = \begin{bmatrix} \cos \theta_d & -\sin \theta_d & 1 \\ \cos\left(\theta_d - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta_d - \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \\ \cos\left(\theta_d + \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta_d + \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{II.23})$$

Relation entre dq et abc :

- ✓ L'axe d positif est le long de l'axe d'enroulement

Magnétique.

- ✓ L'axe q positif est le long de l'axe de la tension

interne $\omega_{af} i_f$

- ✓ La tension interne conduit le champ magnétique de 90 degré (générer)

b- notion en fonctionnement moteur :

$$[f_{dqo}] = [T_{dqo}(\theta_d)][f_{abc}]$$

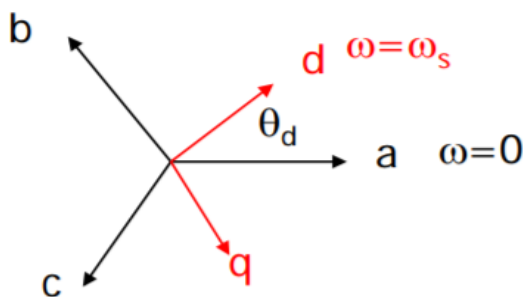


Figure II.5: schema démonstrative qd

$$\text{Notation du moteur} \quad \theta_q = \theta_d - \pi/2 \quad (\text{II.24})$$

$$[T_{dqo}(\theta_d)] = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta_d & \cos\left(\theta_d - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_d + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \sin \theta_d & \sin\left(\theta_d - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta_d + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (\text{II.25})$$

Relation entre dq et abc :

- ✓ L'axe d positif est le long de l'axe d'enroulement Magnétique
- ✓ L'axe q positif est le long de l'axe de la tension

Interne négative $\omega l_{af} i_f$ (tension induite-moteur)

- ✓ L'axe d est référé à partir de l'axe a

Transformation de Park pour découpler les variables des phases abc

$$[f_{dqo}] = [T_{dqo}(\theta_q)] [f_{abc}]$$

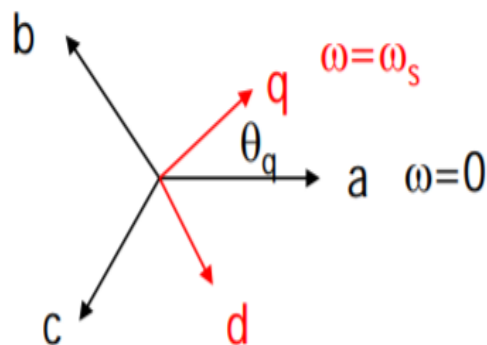


Figure II.6: schema descriptive

Notation du fonctionnement en mode générateur $\theta_q = \theta_d + \pi/2$

$$[T_{dqo}(\theta_d)] = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta_d & \cos\left(\theta_d - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_d + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \sin \theta_d & \sin\left(\theta_d - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta_d + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (\text{II.25})$$

$$[T_{dq0}(\theta_d)]^{-1} = \begin{bmatrix} \cos \theta_d & \sin \theta_d & 1 \\ \cos\left(\theta_d - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta_d - \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \\ \cos\left(\theta_d + \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta_d + \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{II.26})$$

Relation entre dq et abc :

- ✓ L'axe q positif est le long de l'axe de la tension Interne
- ✓ L'axe d positif est le long de l'axe d'enroulement Magnétique
- ✓ L'axe q est référé à partir de l'axe

II.5 Transformation de Park appliquée à la Machines asynchrone

Pour des raisons pratiques, des transformations mathématiques sont souvent utilisées pour étudier les machines électriques tournantes. En effet, les coefficients des équations différentielles de tension varient dans le temps, sauf lorsque la machine est à l'arrêt.

La transformation de Park transforme les variables du cadre de référence abc en un cadre de référence qd0 en rotation arbitraire [26]. Les axes directs et en quadrature sont des quantités importantes du moteur à induction triphasé symétrique. La relation entre les cadres de référence abc et qd0 arbitraires est illustrée à la figure II.8, où θ est l'angle de transformation du stator, qui est l'angle entre l'Axe q du repère arbitraire qui tourne à une vitesse angulaire ω dans le sens de la rotation du rotor et de l'axe a de l'enroulement de stator fixe.

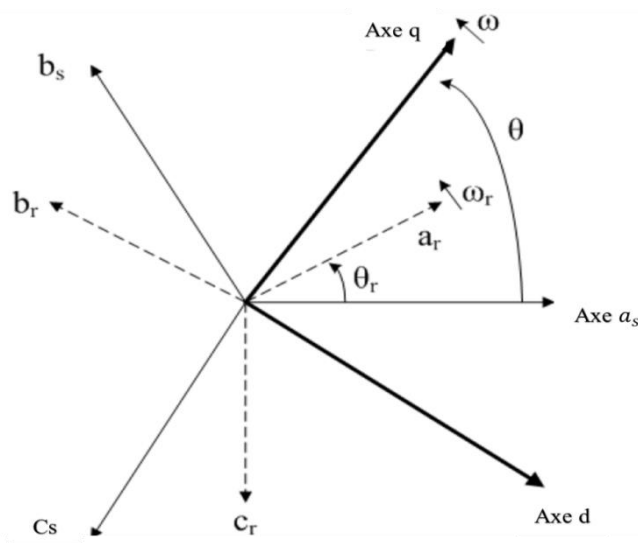


Figure II.7: Transformation des enroulements naturelle en enroulements équivalent

Chapitre II : Modélisations de la machine asynchrone

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 rotoriques.

II.6 Transformation des grandeurs statoriques et rotoriques

Dans la théorie de Park, on utilise la transformation unique pour le courant, tension, et flux

$$[f_{dq0}] = [T_{dq0}(\theta_q)] [f_{abc}] \quad (\text{II.27})$$

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.

$$[T_{qd0}(\theta)] = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta + 2\pi/3) \\ \sin(\theta) & \sin(\theta - 2\pi/3) & \sin(\theta + 2\pi/3) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (\text{II.28})$$

Cette matrice est orthogonale, c'est-à-dire $[T(\theta)]^T = [T(\theta)]^{-1}$.

$$[f_{qd0}] = [T_{qd0}]^{-1}(\theta) [f_{abc}] \quad (\text{II.29})$$

Avec :

$$[T_{qd0}(\theta)^{-1}] = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) & 1 \\ \cos(\theta - 2\pi/3) & \sin(\theta - 2\pi/3) & 1 \\ \cos(\theta + 2\pi/3) & \sin(\theta + 2\pi/3) & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{II.30})$$

Chapitre II : Modélisations de la machine asynchrone

Le cadre de référence qd0 arbitraire peut être choisi pour tourner à une vitesse désignée dans le même sens que la rotation du rotor afin de simplifier le modèle. En pratique, deux cadres de référence souvent utilisés pour l'analyse de la machine à induction dans différents scénarios sont les cadres de référence stationnaire et synchrone. Le cadre de référence du rotor tournant à la même vitesse que le rotor est rarement utilisé. Avec des cadres de référence rotatifs arbitraires, il est commandé de convertir ceux-ci en un cadre de référence quelconque. Cela peut être facilement accompli en réglant la vitesse de rotation de référence ω égale à zéro, à la vitesse synchrone ou à la vitesse du rotor, pour les applications à cadre de référence stationnaire, synchrone ou à rotor.

II.6.1 Modèle de la machine dans le repère dq0

Les fonctions de transformation (II.27) et (II.29) sont appliqués aux tensions, aux courants et aux résistances dans l'équation. (II.2) et l'équation (II.3). Cela donne : [29]

$$V_s^{qd0} = T_{qd0}(\theta) r_s T_{qd0}^{-1}(\theta) i_s^{qd0} + T_{qd0}(\theta) \frac{d}{dt} \left[T_{qd0}^{-1}(\theta) \phi_s^{qd0} \right] \quad (\text{II.32})$$

Le terme dérivé temporel suivant peut-être exprimé comme : [29]

$$\frac{d \left[T_{qd0}^{-1}(\theta) \phi_s^{qd0} \right]}{dt} = \frac{d \left[T_{qd0}^{-1}(\theta) \right]}{dt} \cdot \phi_s^{qd0} + T_{qd0}^{-1}(\theta) \cdot \frac{d(\phi_s^{qd0})}{dt} \quad (\text{II.33})$$

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

$$V_r^{qd0} = T_{qd0}(\theta - \theta_r) r_r T_{qd0}^{-1}(\theta - \theta_r) i_r^{qd0} + T_{qd0}(\theta - \theta_r) \frac{d}{dt} \left[T_{qd0}^{-1}(\theta - \theta_r) \phi_r^{qd0} \right] \quad (\text{II.34})$$

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

$$V_s^{qd0} = r_s^{qd0} i_s^{qd0} + E_s^{qd0} + \frac{d\phi_s^{qd0}}{dt} \quad (\text{II.35})$$

$$V_r^{qd0} = r_r^{qd0} i_r^{qd0} + E_r^{qd0} + \frac{d\phi_r^{qd0}}{dt} \quad (\text{II.36})$$

Avec :

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

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

et

$$r_s^{qd0} = r_s \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} ; \quad r_r^{qd0} = r_r \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} .$$

Les termes (ir) sont les tensions produisant des pertes de cuivre, les termes E représentent le taux d'énergie converti en travail mécanique, les termes $\frac{d\phi}{dt}$ représente le taux d'échange du champ magnétique entre les enroulements.

II.7 Réduction de la matrice des inductances

Les transformations établissent des relations entre les flux dans le repère dqo et les flux dans le repère abc : [29]

Au stator :

$$\phi_s^{dq0} = T_{dq0}(\theta) \left(L_{ss}^{abc} i_s^{abc} + L_{sr}^{abc} i_r^{abc} \right) \quad (II.37)$$

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

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

$$\phi_r^{qd0} = T_{qd0}(\theta - \theta_r) \left(L_{rr}^{abc} i_r^{abc} + L_{rs}^{abc} i_s^{abc} \right) \quad (II.38)$$

Après le calcul, on trouve :

$$\begin{bmatrix} \phi_{qs} \\ \phi_{ds} \\ \phi_{0s} \\ \phi'_{qr} \\ \phi'_{dr} \\ \phi'_{0r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{ls} + L_m & 0 & 0 & L_m & 0 & 0 \\ 0 & L_{ls} + L_m & 0 & 0 & L_m & 0 \\ 0 & 0 & L_{ls} & 0 & 0 & 0 \\ L_m & 0 & 0 & L'_{lr} + L_m & 0 & 0 \\ 0 & L_m & 0 & 0 & L'_{lr} + L_m & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & L'_{lr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{qs} \\ I_{ds} \\ I_{0s} \\ I'_{qr} \\ I'_{dr} \\ I'_{0r} \end{bmatrix} \quad (\text{II.39})$$

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]

$$L_m = \frac{3}{2} L_{ss} = \frac{3}{2} \frac{N_s}{2N_r} L_{sr} = \frac{3}{2} \frac{N_s}{N_r} L_{rr} \quad (\text{II.40})$$

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

On remplace l'équation (II.39) dans (II.35) et (II.37) pour former toutes les équations de tension de la machine dans le repère qd0. La représentation de circuit équivalente d'une machine à induction dans le repère qd0 est illustrée par la figure (II.8). Avec L_{ls} , L_{lr} et L_m désignent respectivement la réactance de fuite du stator, la réactance de fuite du rotor et la réactance magnétisante du stator en ohms. [29]

E_{qs} , E_{qr} , E_{ds} et E_{dr} représente le produit des flux par les vitesses ω et ω_r .

Chapitre II : Modélisations de la machine asynchrone

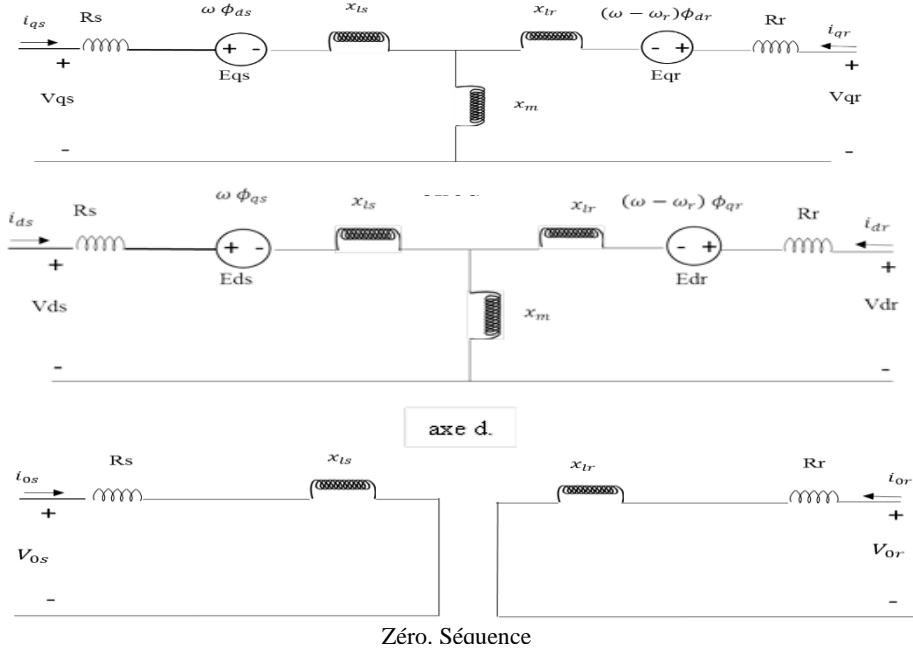


Figure II.8: représentation de circuit équivalent d'une machine à induction dans le repère $qd0$

$$P_{in} = V_{as} i_{as} + V_{bs} i_{bs} + V_{cs} i_{cs} + V_{ar}' i_{ar}' + V_{br}' i_{br}' + V_{cr}' i_{cr}' \quad (\text{II.41})$$

En appliquant la transformation de Park sur l'équation (II.25) on obtient : [35]

$$P_{in} = \frac{3}{2} (V_{qs} i_{qs} + V_{ds} i_{ds} + 2V_{0s} i_{0s} + V_{qr}' i_{qr}' + V_{dr}' i_{dr}' + 2V_{0r}' i_{0r}') \quad (\text{II.42})$$

Nous codons:

$$\begin{aligned} P_{in} &= \frac{3}{2} \left[r_s i_{qs}^2 + \omega \phi_{ds} i_{qs} + \frac{d}{dt} (\phi_{qs} i_{qs}) + r_s i_{ds}^2 - \omega \phi_{qs} i_{ds} + \frac{d}{dt} (\phi_{ds} i_{ds}) \right. \\ &+ 2r_s i_{0s}^2 + 2 \frac{d}{dt} (\phi_{0s} i_{0s}) + r_r i_{qr}'^2 + (\omega - \omega_r) \phi_{dr}' i_{qr}' + \frac{d}{dt} (\phi_{qr}' i_{qr}') \\ &+ r_r i_{dr}'^2 - (\omega - \omega_r) \phi_{qr}' i_{dr}' + \frac{d}{dt} (\phi_{dr}' i_{dr}') + 2r_r i_{0r}'^2 + 2 \frac{d}{dt} (\phi_{0r}' i_{0r}') \left. \right] \\ &= \frac{3}{2} (r_s i_{qs}^2 + r_s i_{ds}^2 + 2r_s i_{0s}^2 + r_r i_{qr}'^2 + r_r i_{0r}'^2) + \frac{3}{2} \left[\omega (\phi_{ds} i_{qs} - \phi_{qs} i_{ds}) + (\omega - \omega_r) (\phi_{dr}' i_{qr}' - \phi_{qr}' i_{0r}') \right] \\ &+ \frac{3}{2} \frac{d}{dt} (\phi_{qs} i_{qs} + \phi_{ds} i_{ds} + 2\phi_{0s} i_{0s} + \phi_{qr}' i_{qr}' + \phi_{dr}' i_{dr}' + 2\phi_{0r}' i_{0r}') \end{aligned} \quad (\text{II.43})$$

Le $i^2 r$ terme est les pertes de cuivre, le $i \frac{d\phi}{dt}$ termes sont le taux de l'échange de l'énergie magnétique entre les enroulements, et $\omega \phi i$ les 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

$\omega_{rm} = \frac{2}{P} \omega_r$, rendement.

$$C_{em} = \frac{3}{2} \frac{P}{\omega_r} \left[\omega (\phi_{ds} i_{qs} - \phi_{qs} i_{ds}) + (\omega - \omega_r) (\phi'_{dr} i'_{qr} - \phi'_{qr} i'_{dr}) \right] \quad (\text{II.44})$$

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

$$C_{em} = \frac{3}{2} \frac{P}{\omega_m} [\omega (\phi_{ds} i_{qs} - \phi_{qs} i_{ds}) + (\omega - \omega_r) (\phi'_{dr} i'_{qr} - \phi'_{qr} i'_{dr})] \quad (\text{II.45})$$

Avec P est le nombre de pôles de la machine et ω_r , ω_m respectivement les vitesses de rotation mécanique et électrique du rotor : $\omega_m = \frac{2}{P} \omega_r$

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

$$C_{em} = \frac{3}{2} \frac{P}{2} (\phi_{ds} i_{qs} - \phi_{qs} i_{ds}) \quad (\text{II.46})$$

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

$$\psi = \omega_b \phi \quad \text{et} \quad x = \omega_b L \quad \text{Avec : } \omega_b = 2\pi f$$

II.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté l'approche du circuit couplé pour tester des techniques de diagnostic du défaut de déséquilibre de tension dans les machines asynchrones à cage d'écurie. Cette approche permet de simuler le défaut de déséquilibre de tension.

Pour la modélisation de ces défauts des modifications sont effectuées initialement dans le repère de référence abc, puis transformées dans le repère qd0.

Les détails de La modélisation des machines à induction défectueuses dans Simulink est présentée avec des diagrammes de chaque module de fonction. Ces fonctions peuvent être utilisées comme indicateurs de défaut pour le diagnostic des défauts de la MAS.

Les résultats de la simulation peuvent être utilisé pour étudier les techniques de diagnostic des défauts.

Pour le défaut déséquilibre de tension nous avons utilisé la méthode du vecteur de Park qui sera présenté dans le chapitre suivant.

Chapitre III : Simulation de la machine asynchrone

III.1 Introduction

Après avoir présente la modélisation de la machine asynchrone a cage d'écureuil, nous nous intéressons à la simulation des modelés de défauts de déséquilibre de tension qui permet d'avoir une idée globale sur l'état de la machine.

La machine asynchrone est alimentée directement par le réseau triphasé équilibré. Les résultats de simulation effectuée sous Matlab-Simulink, sont présentés, puis nous présentons une méthode de diagnostic pour détecter le défaut de déséquilibre de tension.

III.2 Déséquilibre de tension [30]

Énumérer la rigueur de la tension déséquilibre divers les normes ont divers index. Dans cette section, différents les indices de déséquilibre de tension prescrits dans différents les normes sont discutées.

A. 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 :

$$LVUR(\%) = \frac{\text{Ecart de tension maximal par rapport à la tension de ligne moyenne}}{\text{La tension de ligne moyenne}}$$

$$LVUR = \frac{\text{MAX}[|V_{ry}-V_{av}|, |V_{yb}-V_{av}|, |V_{br}-V_{av}|]}{V_{av}} \times 100\% \quad (\text{III.1})$$

$$\text{Ou } V_{av} = \frac{V_{ry}+V_{yb}+V_{br}}{3}$$

Dans cette définition, seules les tensions de lignes (V_{ry} , V_{yb} , V_{br}) 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.

B. 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 dans [28] comme :

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

$$PVUR = \frac{\text{Max}[|V_r - V_{av}|, |V_y - V_{av}|, |V_b - V_{av}|]}{V_{av}} \times 100\% \quad (\text{III.2})$$

$$\text{Ou } V_{av} = \frac{V_r + V_y + V_b}{3}$$

Des équations L'IEEE exploite une définition analogue pour la quantification de déséquilibre de tension donné par NEMA, différence de base étant que l'IEEE utilise la magnitude des tensions de phase plutôt que des tensions ligne à ligne. Comme cette 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.

C. 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 [16]. La valeur de VUF est définie comme :

$$VUF = \left| \frac{V_n}{V_p} \right| \times 100\% = K_v \quad (\text{III.3})$$

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'effets 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.

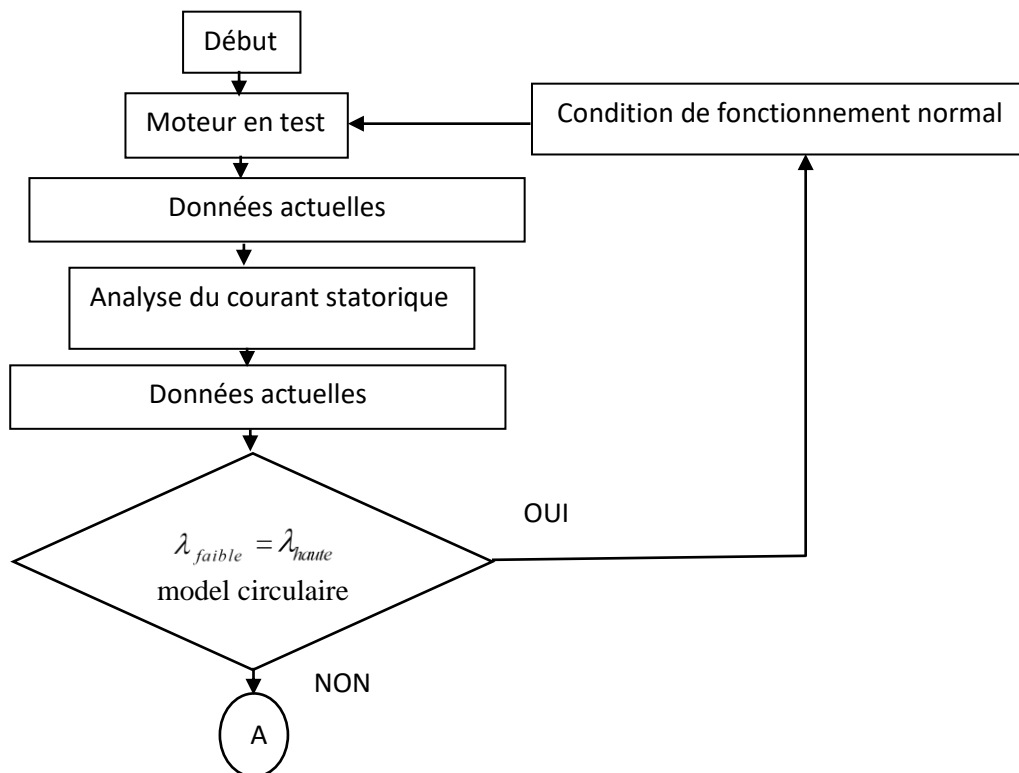
D. Définitions non standard

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

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

Dans [21], 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 instantané fonctionne sous déséquilibre

III.3 Diagnostic des défauts



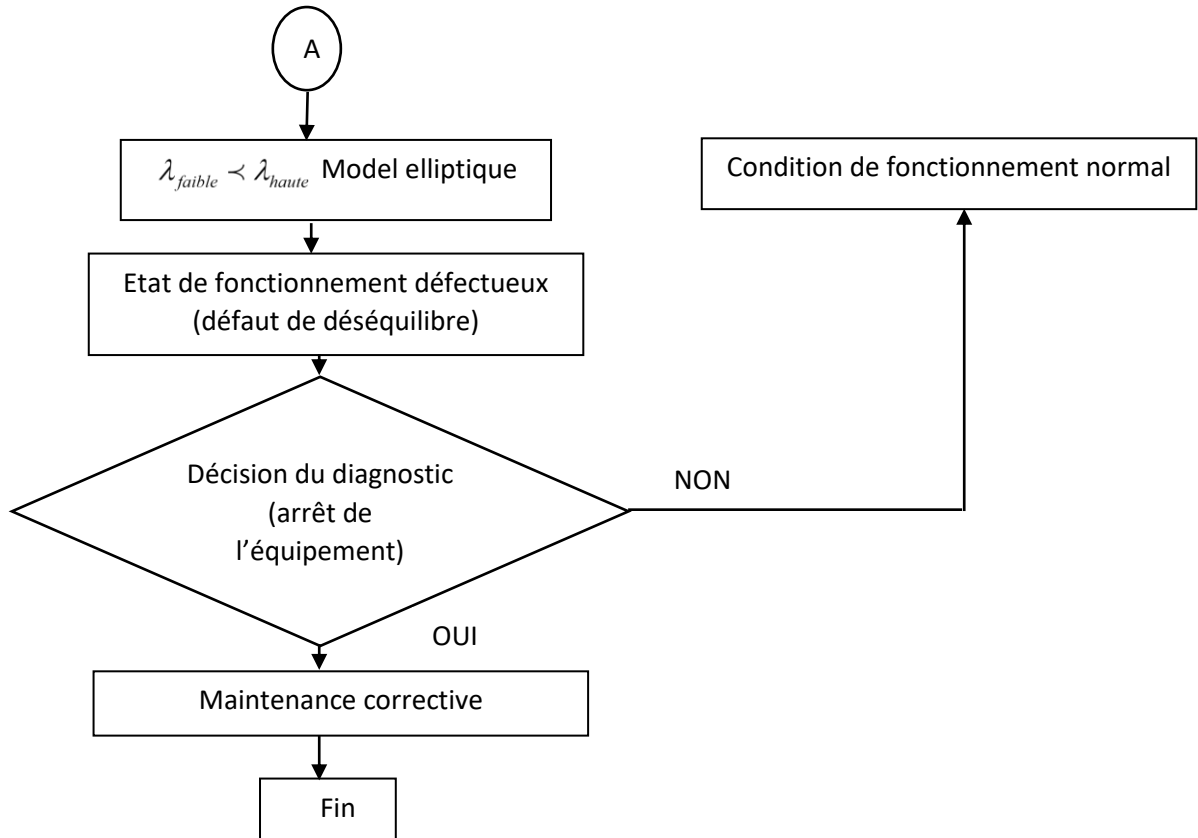


Figure III.1 :procédure de diagnostic en utilisant le vecteur de Park

III.3.1 Diagnostic par le vecteur de Park [24]

La transformation bien connue de Park montre les variables d'une machine triphasée à travers un système de deux quadratures, il s'agit d'un outil de mesure et de diagnostic dans les systèmes électriques triphasés. Les composantes du courant de stator dans un système de référence formé de deux arbres orthogonaux fixés au stator (arbres d et q) sont obtenues par l'équation suivante :

$$i_{sd}(t) = \sqrt{\frac{2}{3}}i_{sa}(t) - \frac{1}{\sqrt{6}}i_{sb}(t) - \frac{1}{\sqrt{6}}i_{sc}(t) \quad (\text{III.5})$$

$$i_{sq}(t) = \frac{1}{\sqrt{2}}i_{sb}(t) - \frac{1}{\sqrt{2}}i_{sc}(t) \quad (\text{III.6})$$

Où i_d et i_q sont respectivement les courants d'axe direct et d'axe de quadrature, dans des conditions de fonctionnement idéales, lorsque les courants d'alimentation constituent un système à séquence positive, les trois courants de phase conduisent au vecteur de courant de Park avec les composantes

$$\begin{cases} i_d = \frac{\sqrt{6}}{2} I_m \sin(\omega t) \\ i_q = \frac{\sqrt{6}}{2} I_m \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}) \end{cases} \quad (\text{III.7})$$

Chapitre III : Simulation de la machine asynchrone

Sur la figure III.2 (0% de pourcentage de déséquilibre), les axes des courants directs et en quadrature représentent un cercle centré à l'origine des coordinateurs. Ces courants devraient idéalement être déphasés de $\pi / 2$ radians.

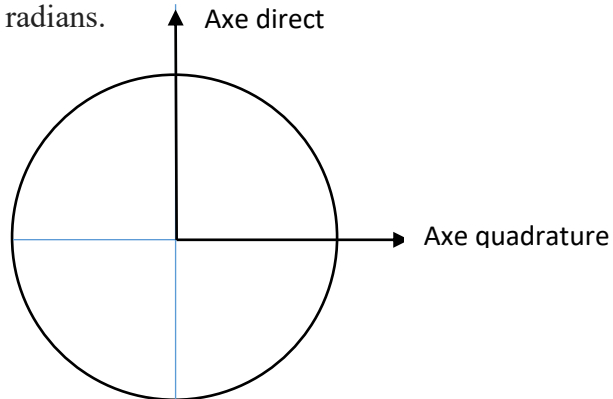


Figure III.2: vecteur de courant de Park pour une situation idéal

Ce modèle circulaire est donc une référence facile, qui permet la détection et l'identification de conditions anormales en surveillant les déviations des modèles acquis. Dans le cas d'une véritable machine en bonne santé, l'intrigue différera légèrement d'un cercle parfait pour deux raisons principales : pratiquement toutes les sources de tension contiennent un certain degré d'asymétrie, c'est-à-dire que le système n'est pas parfaitement équilibré. Deuxièmement, toutes les machines électriques présentent des asymétries inhérentes. Ce résultat est considéré comme une base de référence en ce qui concerne le cas d'une condition anormale.

Le figure II.2 présente le tracé vectoriel du parc avec une asymétrie statorique, son motif elliptique dont la somme des amplitudes des composantes positives et négatives est directement proportionnelle à l'axe principal, tandis que la différence entre les amplitudes de ces deux composantes est directement proportionnelle. À la longueur du petit axe. L'orientation des grands axes est associée à la phase défaillante.

$$\begin{cases} i_d = \frac{\sqrt{6}}{2} (I_1 + I_2) \sin(\omega t) \\ i_q = \frac{\sqrt{6}}{2} (I_1 + I_2) \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \end{cases} \quad (\text{III.8})$$

Comme les courants statoriques diffèrent les uns des autres de 120° électrique, il est important de noter que le grand axe des trois ellipses diffère de 120 degrés dans l'espace, tant dans l'approche vectorielle du parc que dans le référentiel de courant à trois dimensions.

Outre la reconnaissance du motif elliptique obtenu, il convient de signaler la gravité du défaut moteur, qui est liée à l'excentricité de l'ellipse. De cette manière, le nouvel index est proposé, permettant l'identification du modèle et la mesure de la gravité de la faute. Cet indice

Chapitre III : Simulation de la machine asynchrone

de gravité est donné par l'équation (10), les paramètres λ haut et bas désignent respectivement la longueur la plus élevée et la plus basse des axes de l'ellipse. Il est important de noter que λ haut se réfère à l'axe où se produit le défaut - la direction principale transportant plus d'énergie [9]. Cet indice de gravité prend des valeurs comprises entre zéro et un, l'absence de tout défaut signalé par un indice de gravité égal à zéro ($S_{st} = 0$).[24]

$$S_{ST} = 1 - \frac{\lambda_{low}}{\lambda_{high}} \quad (III.9)$$

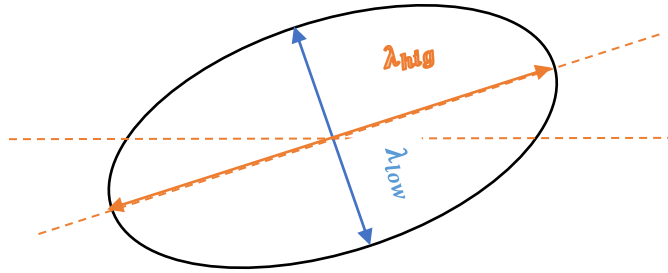


Figure III.3: vecteur de Park pour une asymétrie de stator

III.4 Simulation de la machine asynchrone

III.4.1 Paramètre du moteur asynchrone

Paramètre de la machine utilisée	
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 ($kg.m^2$)	0.13

Tableau III.1: paramètres de la machine

III.4.2 Niveau de déséquilibre de tension

Le tableau suivant illustre les niveaux de déséquilibre utilisés dans la simulation :

K_v	V_1	V_2	V_3	Conduction du déséquilibre
1 %	212.09 \angle 0.01	209.01 \angle -120.50	208.90 \angle 120.48	Sous-tension
	252.49 \angle 0.01	248.82 \angle -120.50	248.59 \angle 120.48	Surtension
3%	216.29 \angle 0.05	207.09 \angle -121.53	206.74 \angle 121.48	Sous-tension
	257.49 \angle 0.05	246.54 \angle -121.53	246.13 \angle 121.48	Surtension
5%	220.49 \angle 0.08	205.24 \angle -122.58	204.66 \angle 122.49	Sous-tension
	262.49 \angle 0.08	244.34 \angle -122.58	243.64 \angle 122.49	Surtension

Tableau III.2: Niveau de déséquilibre de tension

III.4.3 Simulation de la machine asynchrone à l'état sain

III.4.3.1 Les courants statoriques

Le courant de démarrage (figure III.1) est excessif est due à l'appel de puissance pour pouvoir démarrer la machine. Ces pulsations disparaissent au bout de quelque alternance pour donner une forme sinusoïdale d'amplitude constante. A $t=0.8s$ ce courant augmente pour

III.4.3.2 Vitesse

L'allure de la vitesse (figure III.2) présente des oscillations dans les premiers instants de démarrage avec un accroissement presque linéaire. Le régime établi atteint au bout de (0.2s). Après l'introduction du couple de charge à $t=0.8s$, la vitesse se dégrade au-dessous de sa valeur nominal.

III.4.3.3 Couple électromagnétique

Le couple électromagnétique (figure III.3) admet une forte valeur (due au courant de démarrage bref mais important) avec des oscillations puis se rétablit à zéro (charge nulle) et en suite après $t=0.8 s$ il atteint la valeur du couple de charge $C_r=4.5(N.m)$

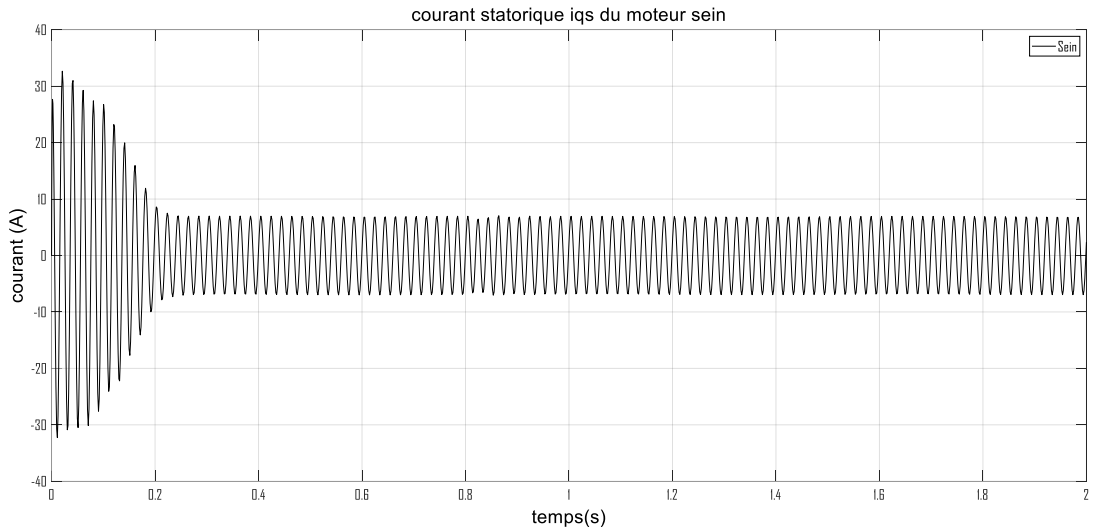


Figure III.4: courant statorique au démarrage puis en charge

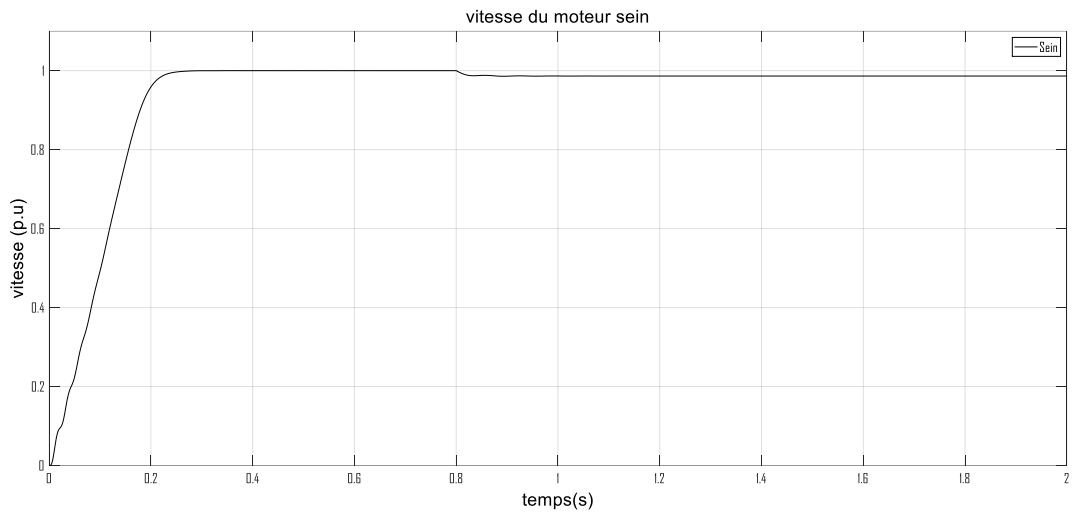


Figure III.5: vitesse au démarrage puis en charge

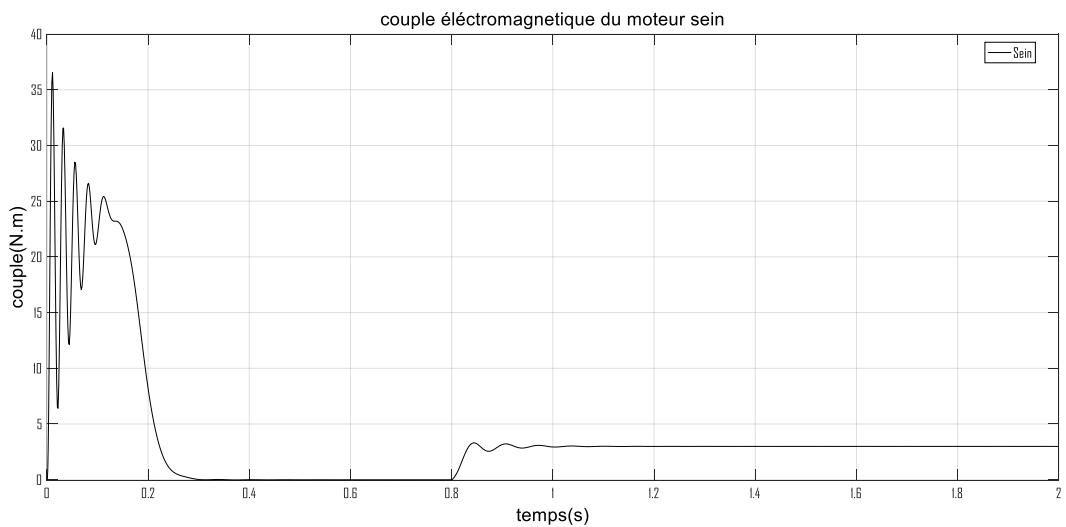


Figure III.6: couple électromagnétique au démarrage puis en charge

III.4.4 Simulation de la machine asynchrone en présence du défaut de déséquilibre

III.4.4.1 Effet du défaut sur la partie pérennante

III.4.4.2 Courant statorique

D'après les figures ci-dessous, on constate que lors d'un défaut de déséquilibre de tension, il y a une apparition des ondulations sur le courant statorique, l'amplitude de cette ondulation est proportionnelle au pourcentage de déséquilibre de tension donc on remarque que l'amplitude augmente avec l'augmentation du pourcentage de déséquilibre pour le courant i_{qs} voir figure (III.9 a III.11) au surtension de même en sous tension tandis que c'est le contraire pour i_{ds} voir figures (III.6 a III.8)

a- Sous-tension

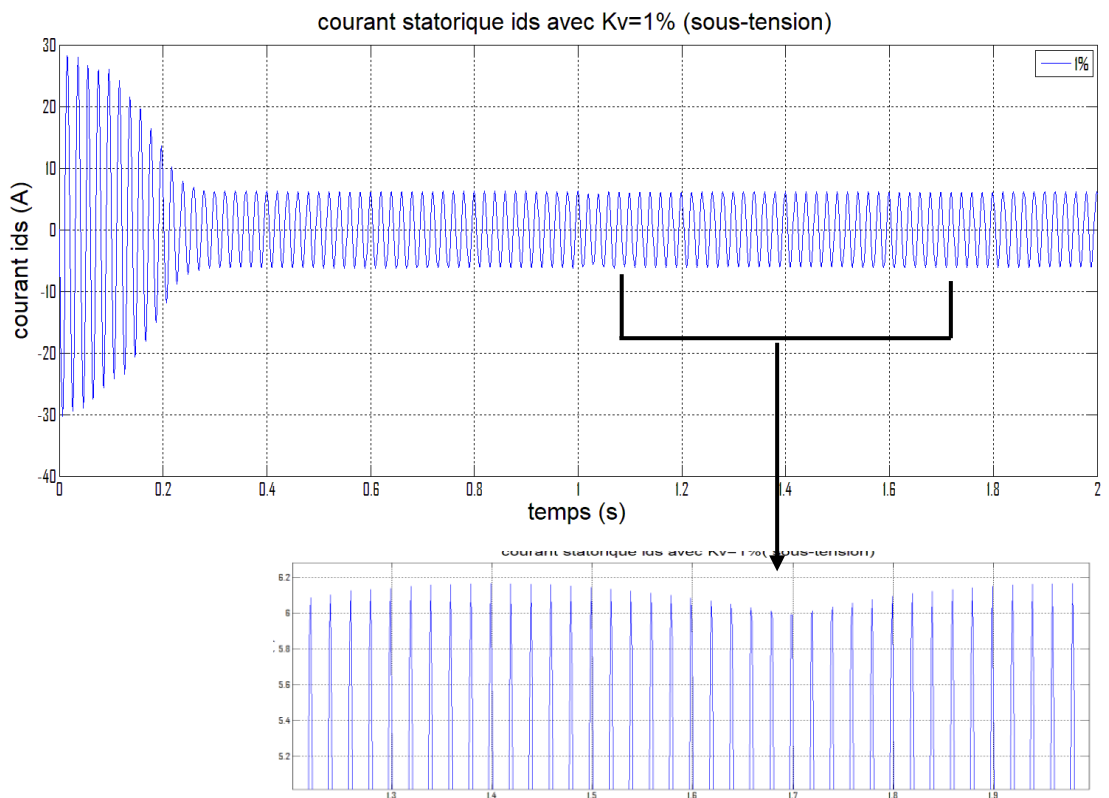


Figure III.7: courant statorique avec $K_v=1\%$ (sous-tension)

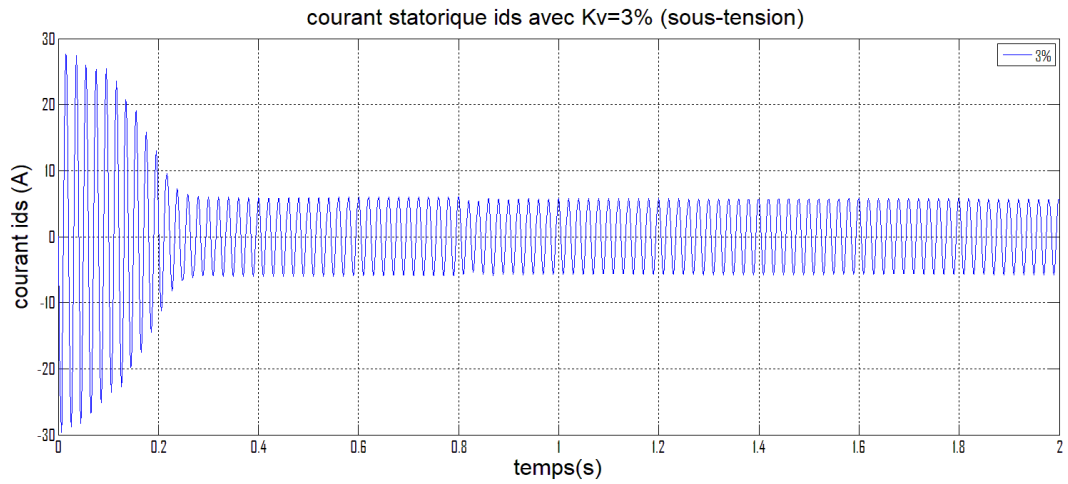


Figure III.8: courant statorique i_{ds} avec $K_v=3\%$ (sous-tension)

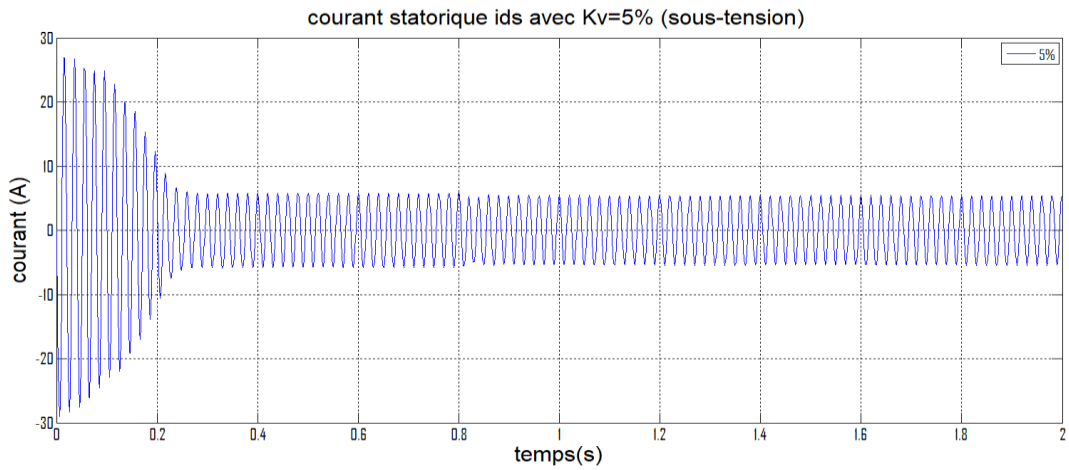


Figure III.9: courant statorique au démarrage puis en charge avec $K_v=3\%$ (sous-tension)

b-surtension :

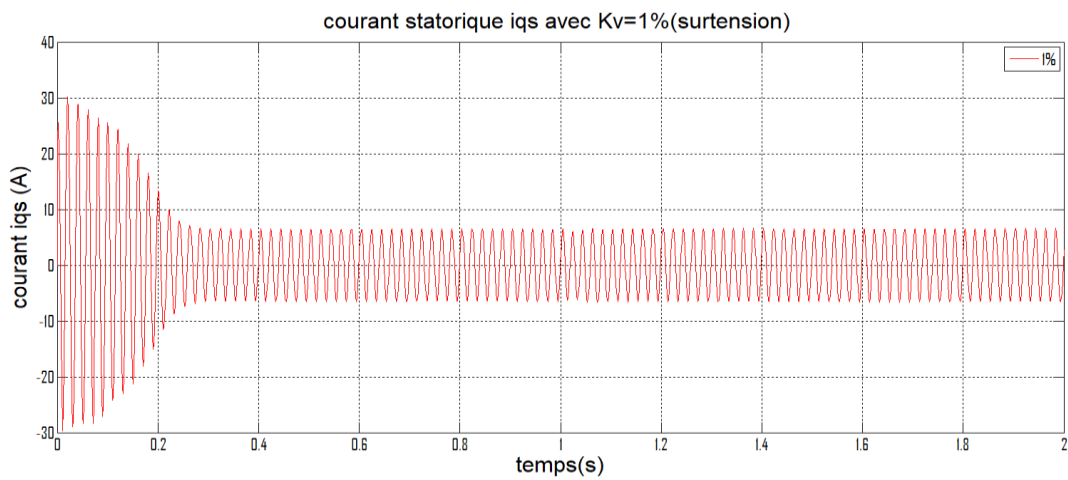


Figure III.10: courant statorique i_{qs} au démarrage puis en charge avec $K_v=1\%$ (surtension)

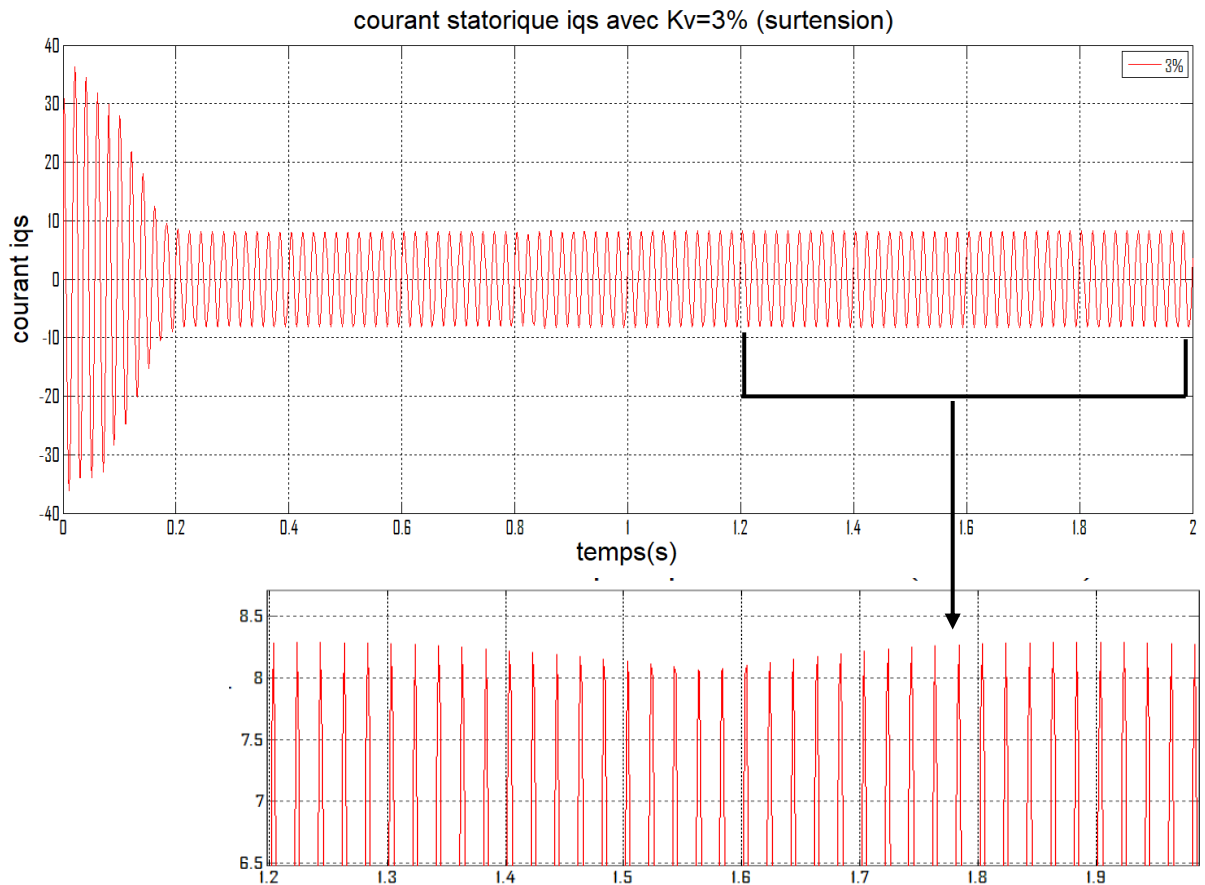


Figure III.11: courant statorique au démarrage puis en charge avec $K_v=3\%$ (surtension)

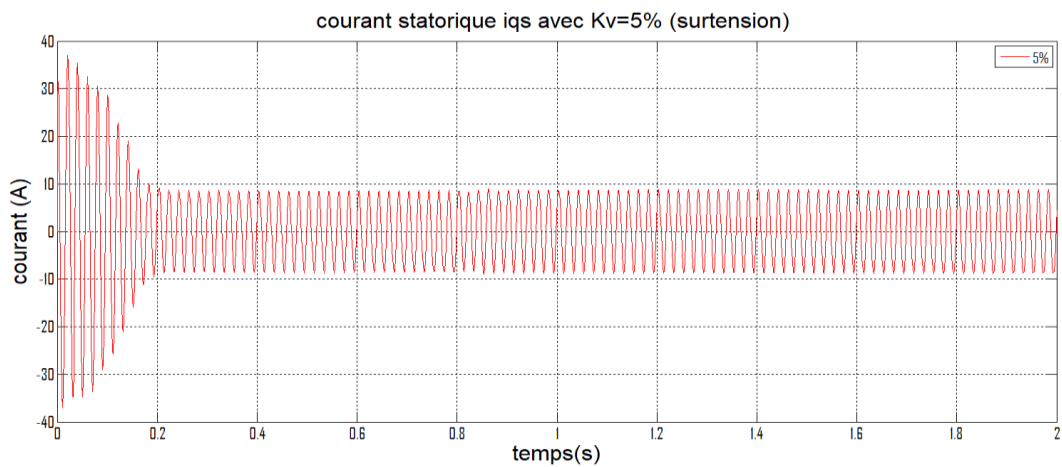
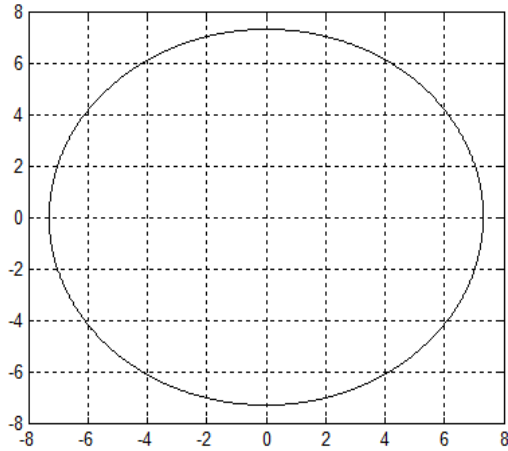


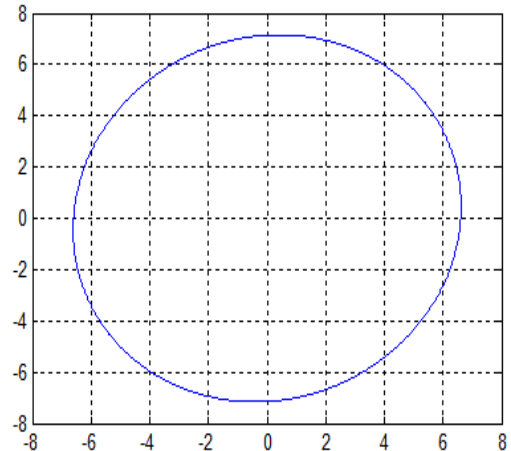
Figure III.12: courant statorique au démarrage puis en charge avec $K_v=5\%$ (surtension)

III.4.4.3 Résultat de simulation (vecteur de park) :

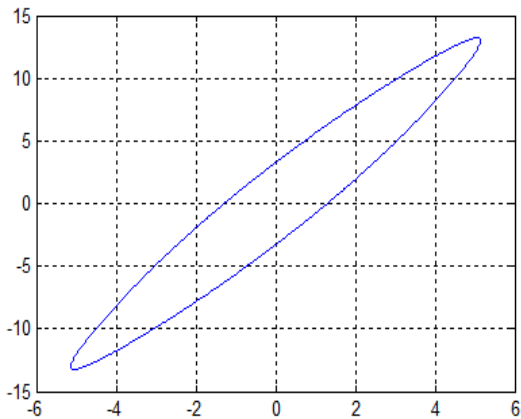
a- Sous-tension



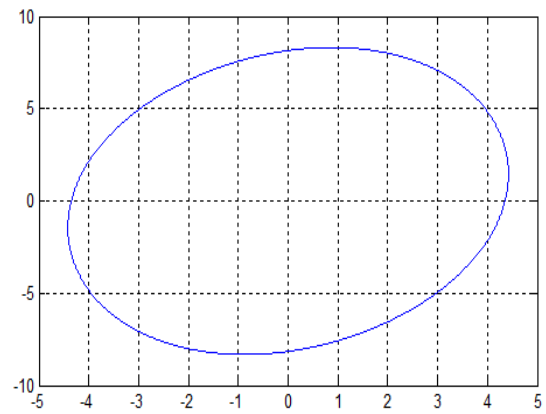
a-Sein



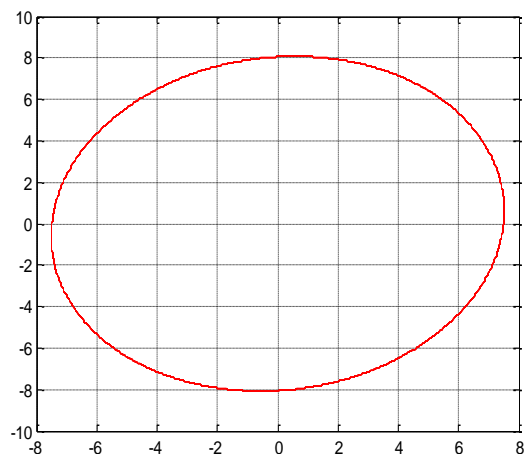
b-avec Kv=1%(sous-tension)



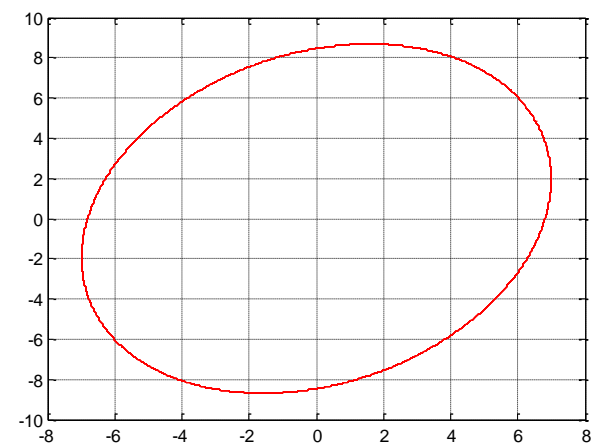
c-Kv=3%(sous-tension)



d-Kv=5%(sous-tension)



e-Kv=1%(surtension)



f-Kv=3%(surtension)

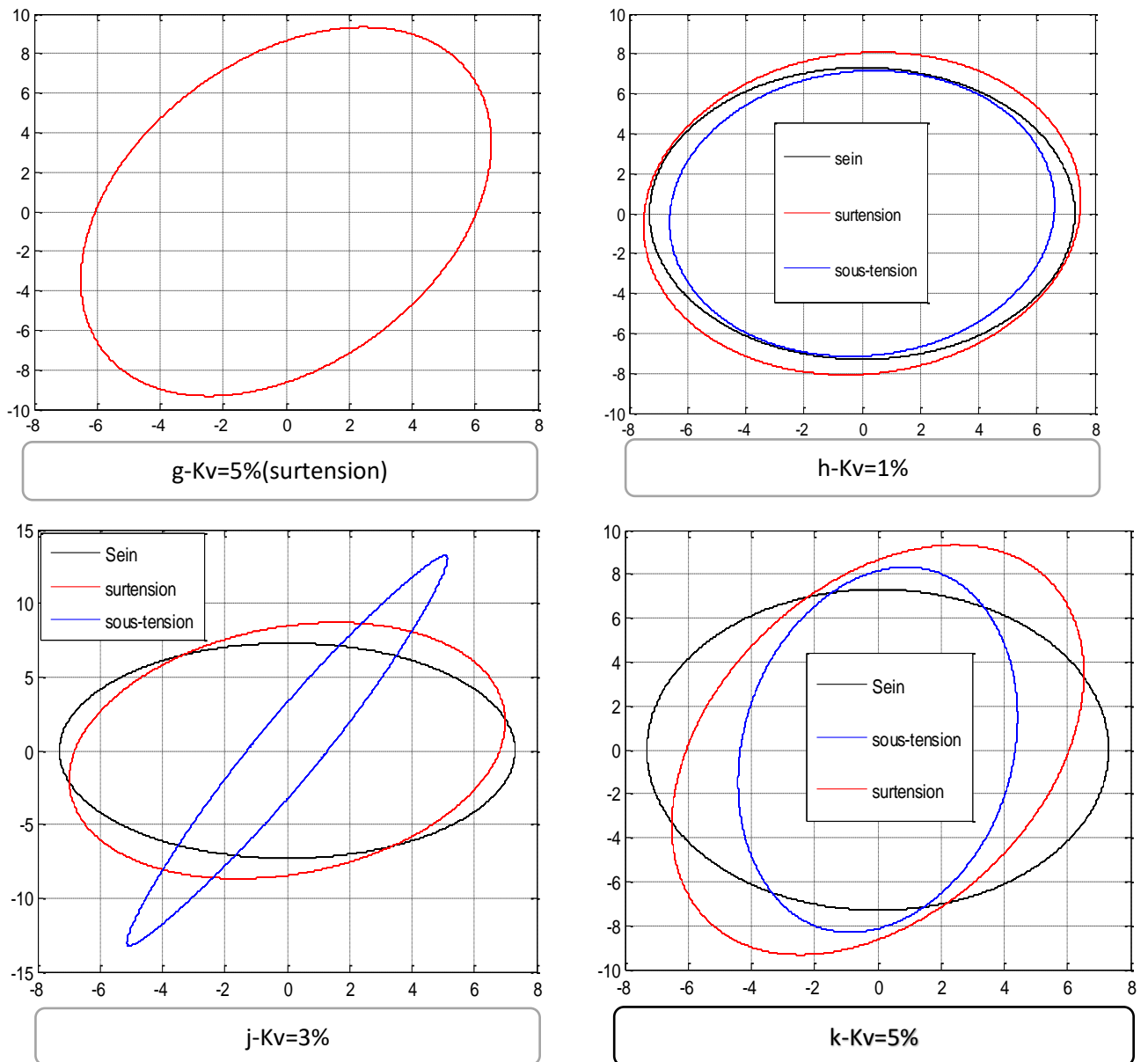


Figure III.13: vecteur de Park pour différents niveaux de déséquilibre de tension

Le Figure III.13 résultats de simulation du vecteur de park avec différents déséquilibres de tension

Nous appliquons une autre méthode d'analyse de défaut de déséquilibre de tension dans le cas du moteur sein (figure -III.13-a) la courbe a une forme circulaire centrée à l'origine, le courant d'alimentation du moteur ne contient qu'une composante de séquence positive, ce qui conduit à un module de vecteur Park constant. Pour le cas du moteur avec défaut déséquilibre de tension, nous constatons que les axes sont proportionnels à la sévérité de l'asymétrie du stator.

Les figures (III.13.b à III.13.d) présentent un taux de déséquilibre de $K_v=1\%$, $K_v=3\%$ ET $K_v=5\%$ du vecteur de Park correspondant au sous-tension. On observe que l'axe

Chapitre III : Simulation de la machine asynchrone

majeur des tracés elliptiques correspond à la phase de déséquilibre, comme il a été souligné précédemment, cette ellipticité est due au composante de séquence négative génère par le défaut.

Les figures (III.13.e à III.13.g) présente un taux de déséquilibre de $K_v=1\%$, $K_v=3\%$ ET $K_v=5\%$ du vecteur de Park correspondant au surtension. Ce type de déséquilibre est le plus dangereux dans les phases de tension, car l'augmentation des séquences négatives sont plus significatives

Les figures (III.13.h à III.13.j) contient la normal ploté avec chaque degré de déséquilibre pour montres la fatalité de ces déséquilibres et son effet sur le moteur

III.4.4.4 Le couple électromagnétique

a- Sous tension

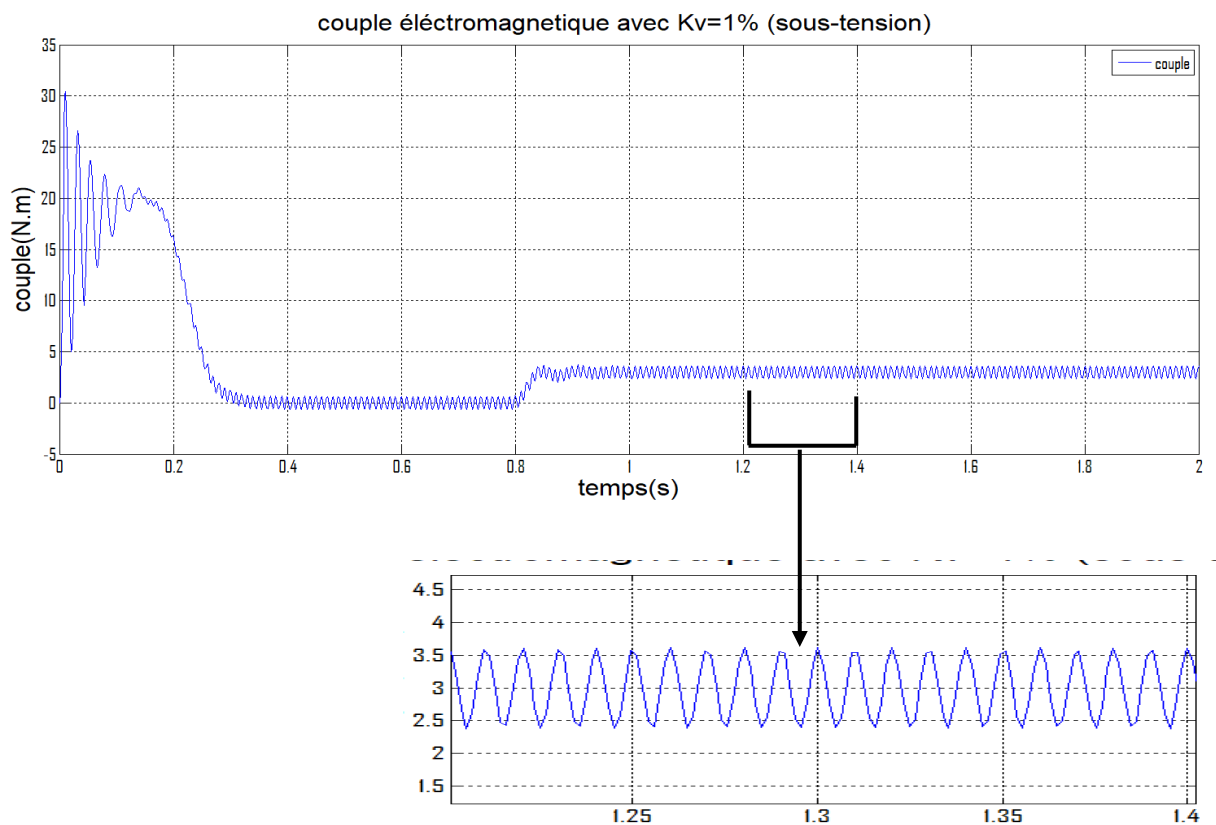


Figure III.14: Couple électromagnétique au démarrage puis en charge avec $K_v=1\%$ (sous-tension)

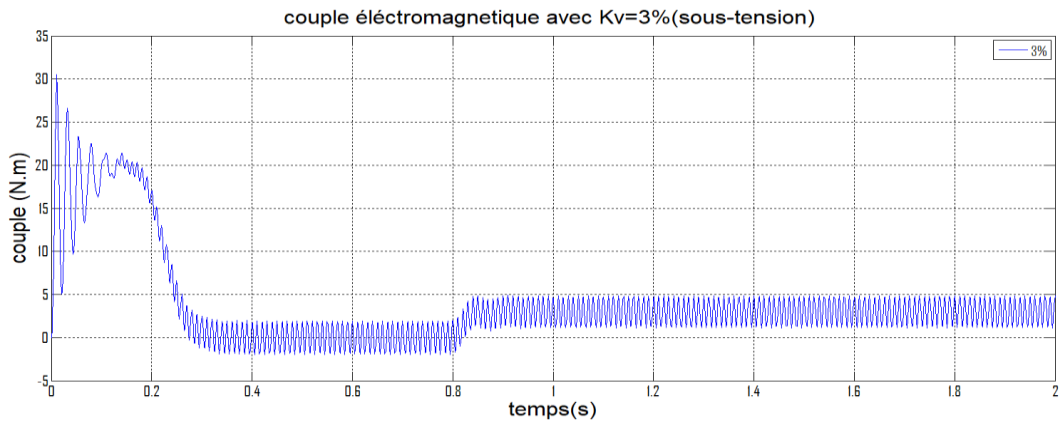


Figure III.15: Couple électromagnétique au démarrage puis en charge avec $K_v=3\%$ (sous-tension)

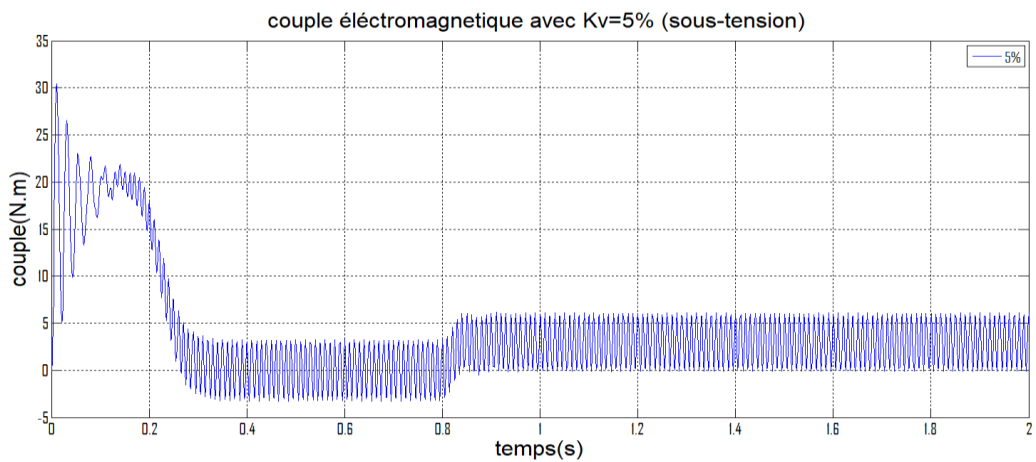


Figure III.16 : couple électromagnétique au démarrage puis en charge avec $K_v=5\%$ (sous-tension)

b- surtension

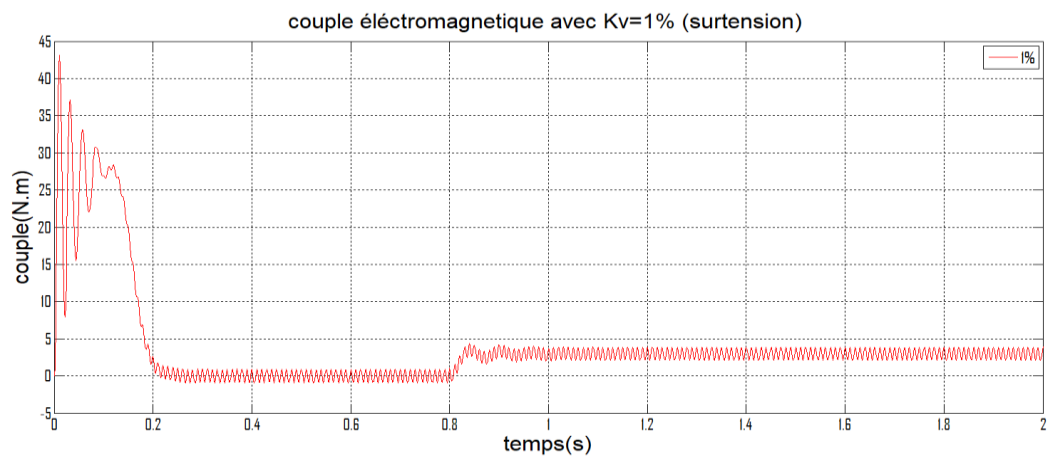


Figure III.17: couple électromagnétique au démarrage puis en charge avec $K_v=1\%$ (surtension)

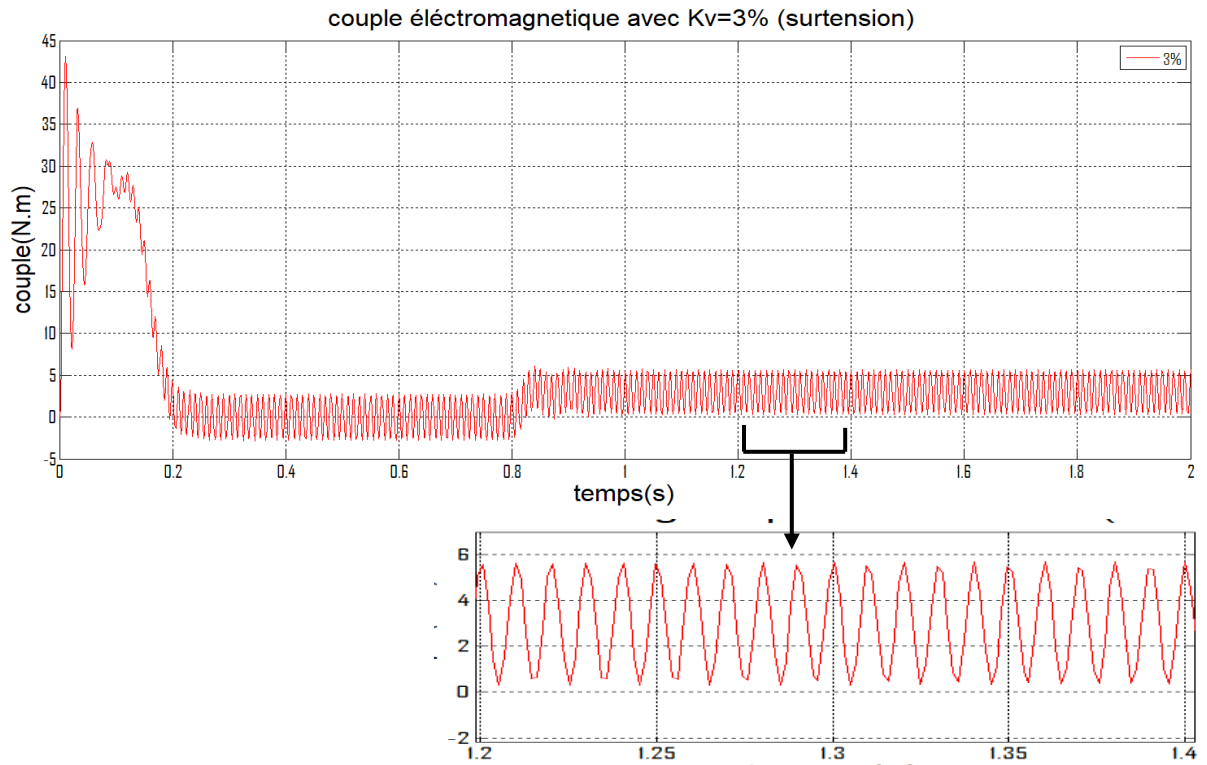


Figure III.18: électromagnétique au démarrage puis en charge avec $K_v=3\%$ (surtension)

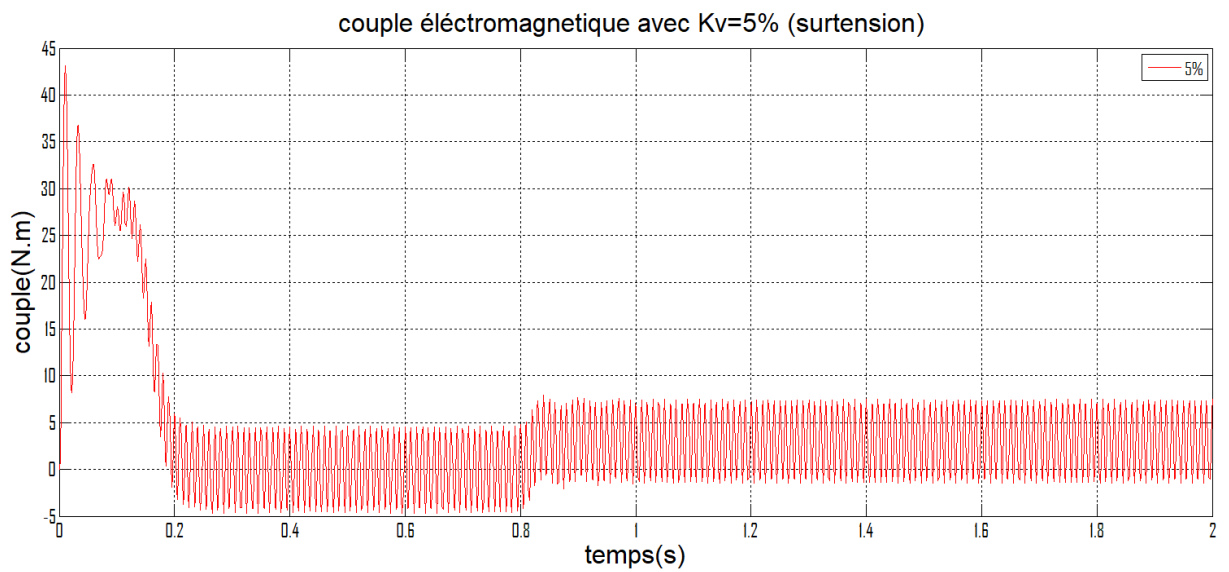


Figure III.19 : électromagnétique au démarrage puis en charge avec $K_v=5\%$ (surtension)

III.4.4.5 La vitesse

a- Sous tension

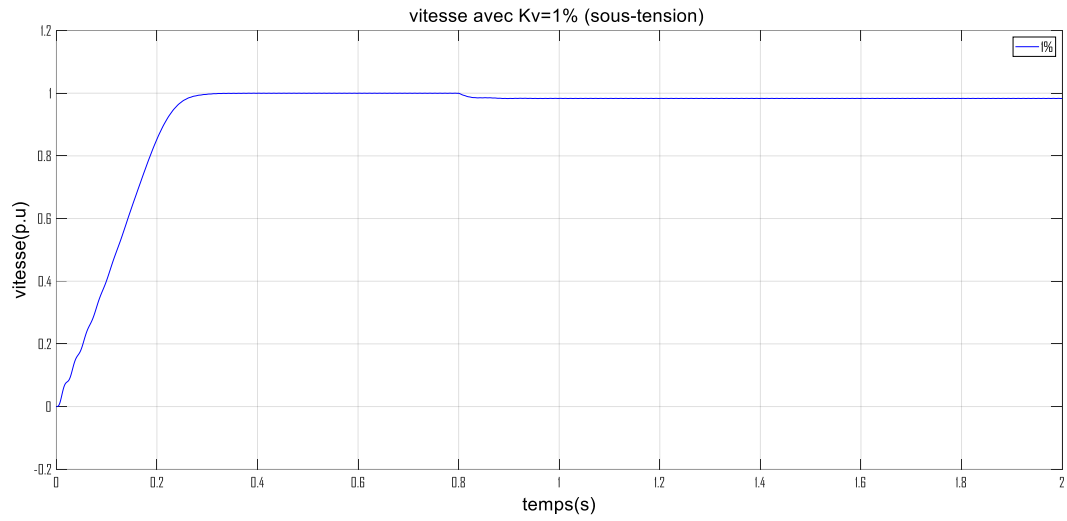


Figure III.20: vitesse au démarrage puis en charge pour $Kv=1\%$ (sous-tension)

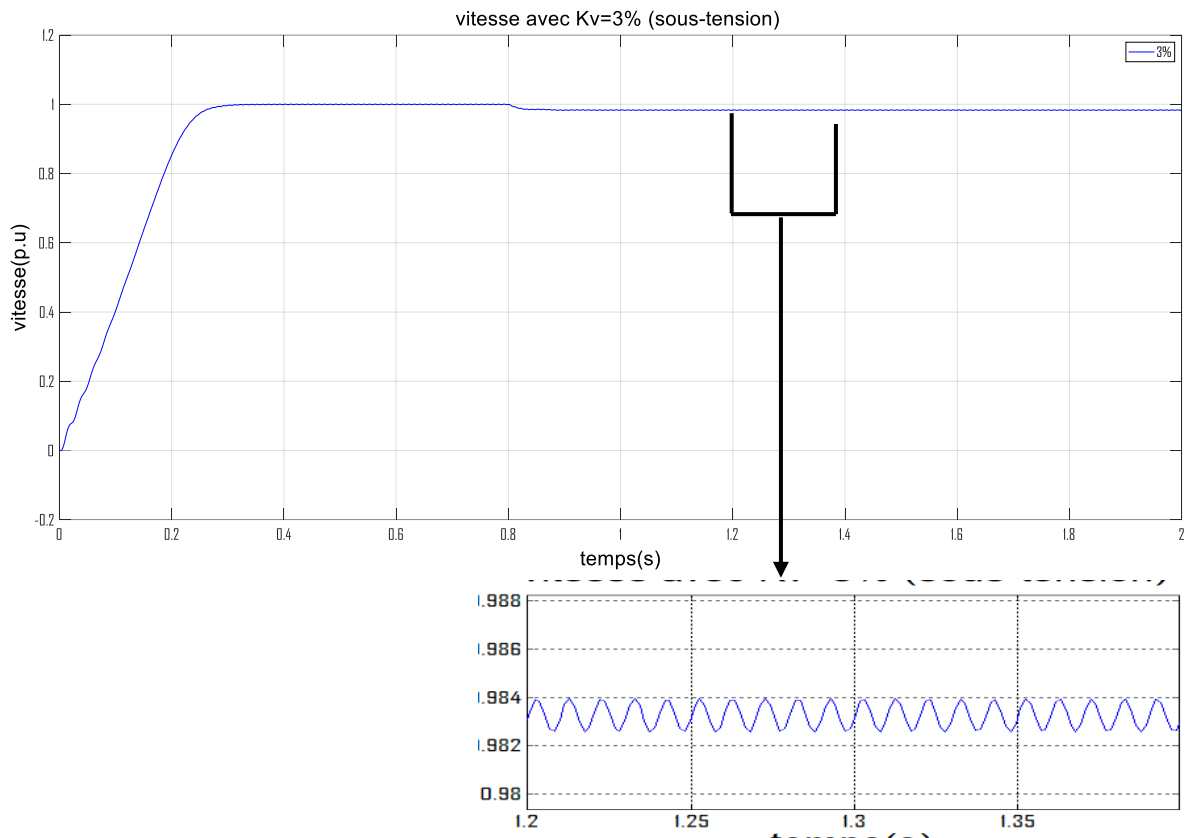


Figure III.21 : vitesse au démarrage puis en charge pour $Kv=3\%$ (sous-tension)

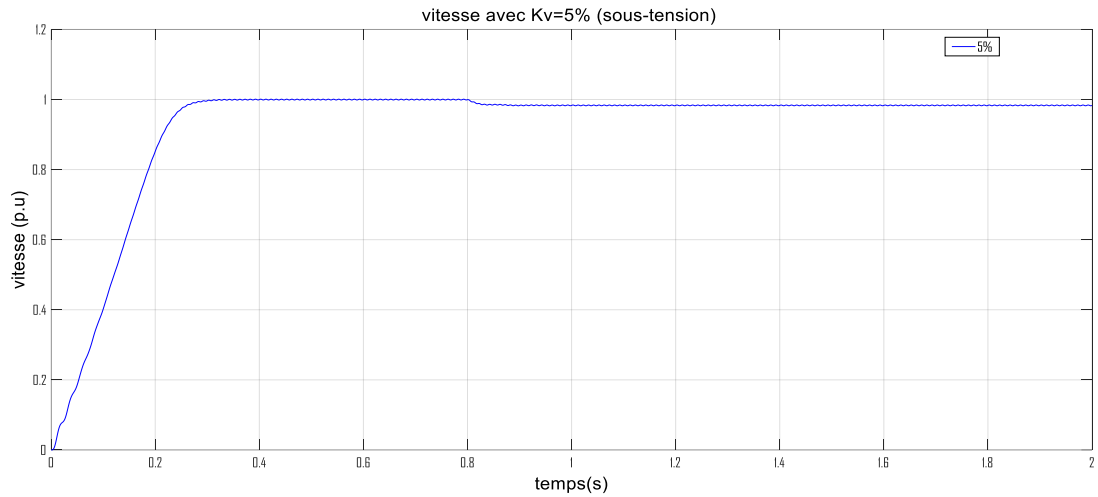


Figure III.22 : vitesse au démarrage puis en charge pour $K_v=5\%$ (sous-tension)

b-Sur tension

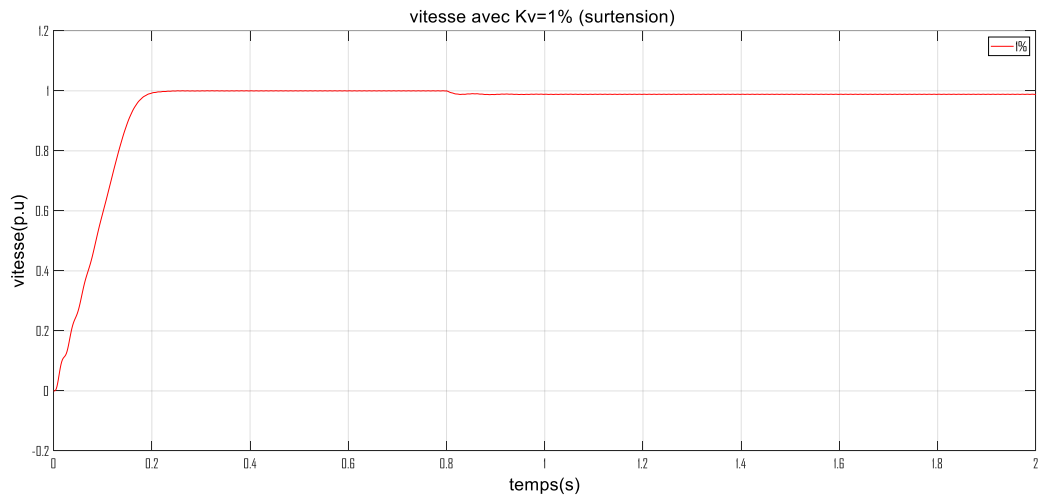


Figure III.23:vitesse au démarrage puis en charge pour $K_v=1\%$ (surtension)

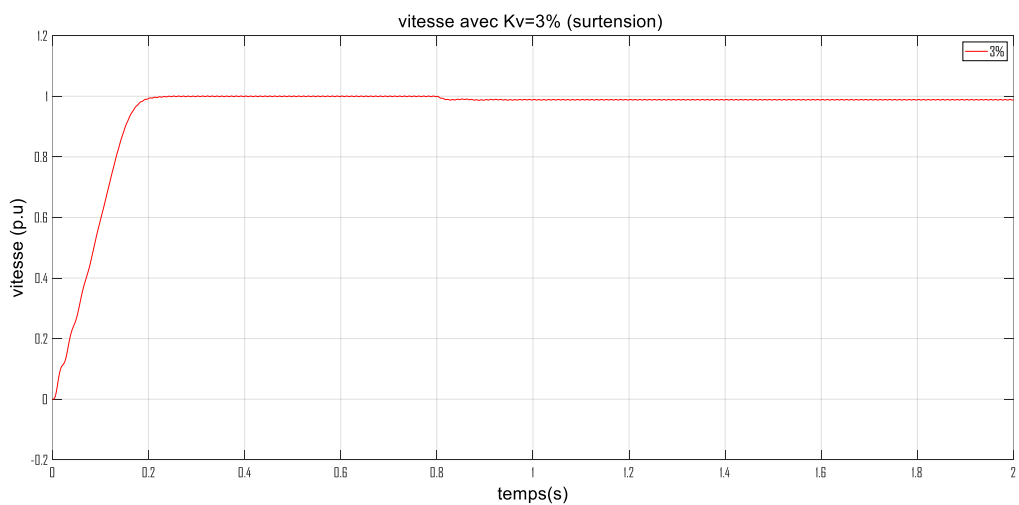


Figure III.24:vitesse au démarrage puis en charge pour $K_v=3\%$ (surtension)

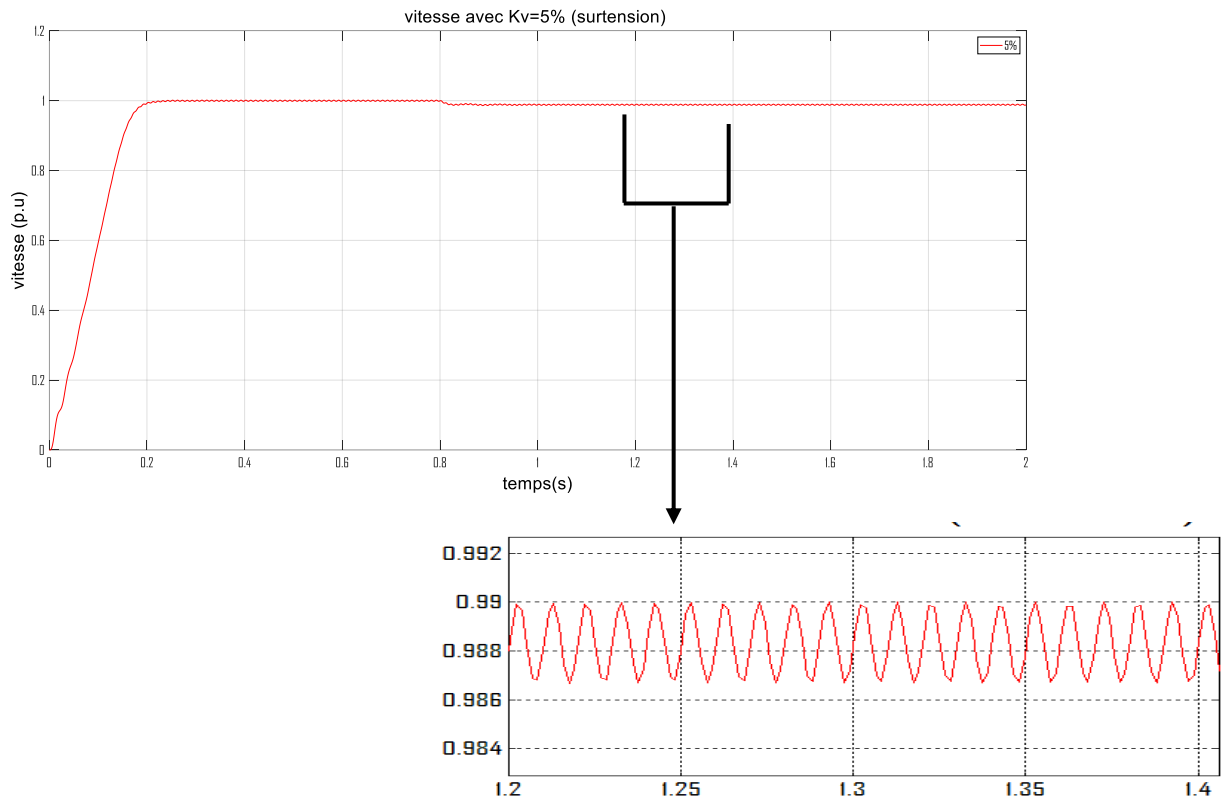


Figure III.25: vitesse au démarrage puis en charge pour $K_v=5\%$ (surtension)

III.4.5 Effet du défaut sur la partie transitoire

III.4.5.1 Couple électromagnétique

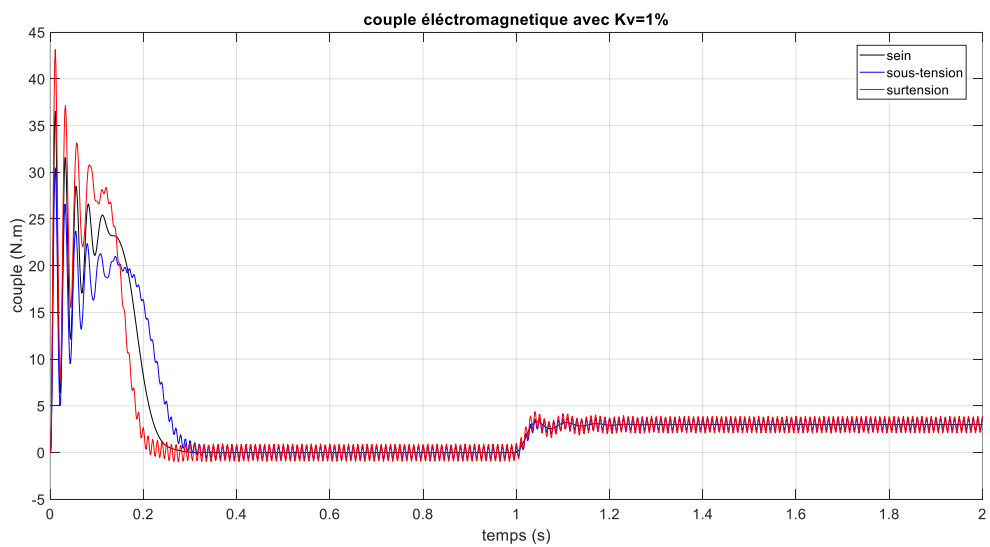


Figure III.26 : couple électromagnétique au démarrage puis en charge pour $K_v=1\%$

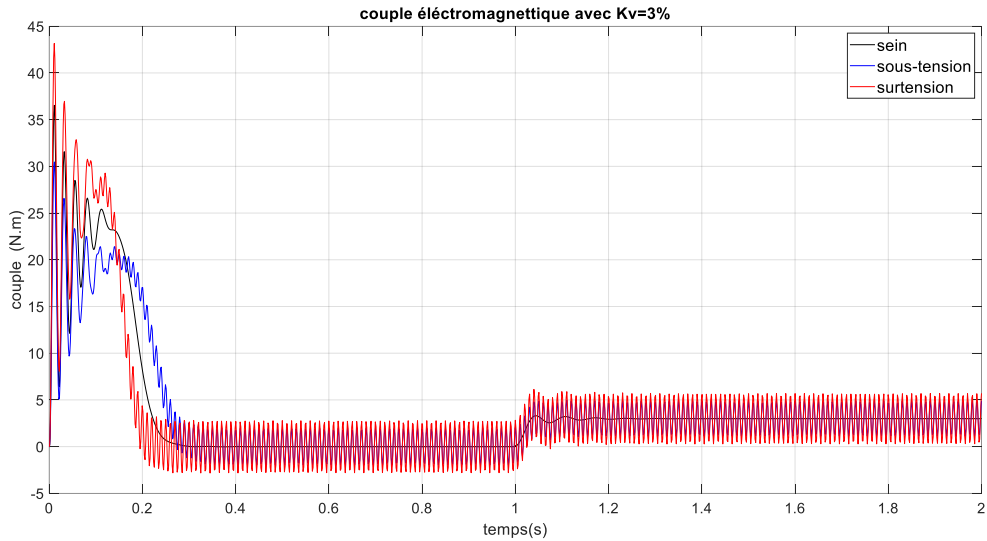


Figure III.27 : couple électromagnétique au démarrage puis en charge pour $Kv=3\%$

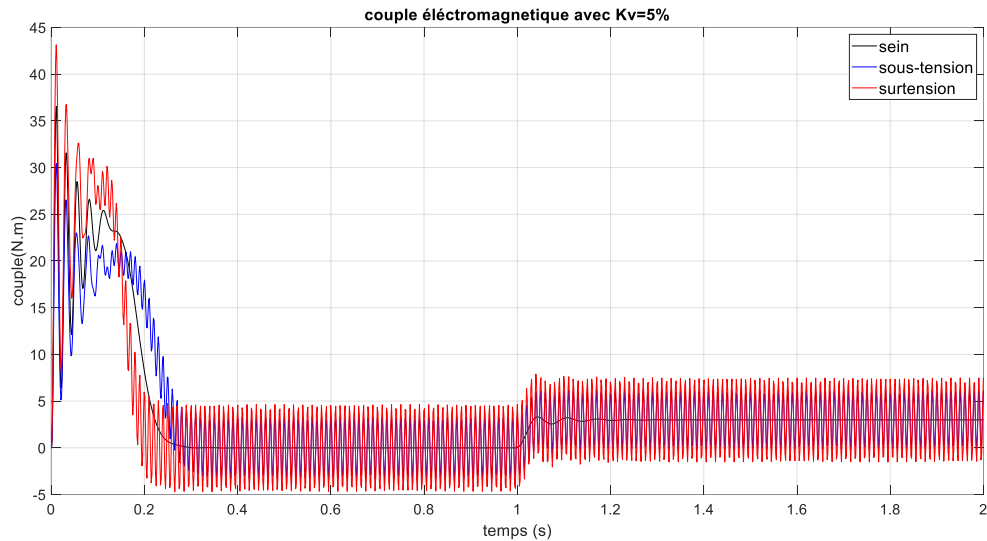


Figure III.28 : couple électromagnétique au démarrage puis en charge pour $Kv=1\%$

Dans le but de connaître les pulsations de couple, l'amplitude de couple et l'écart par rapport aux conditions de tension équilibrée l'étude de la caractéristique du couple devient importante. Les variations de couple en fonction du temps ont été montrées dans les Figures (III.14 à 22) sous différents degrés et conditions de déséquilibre.

Les observations suivantes ont été extraites de la Figure (III.26 à 28), La pulsation de couple augmente avec l'augmentation du degré de déséquilibre (Kv).

- Le couple met plus de temps à atteindre un état stable dans le cas de sous-tension que dans le cas de tension équilibrée ou de surtension. Cela signifie qu'un moteur fonctionnant en condition de sous-tension de déséquilibre serait fonctionner plus lentement comparativement à son opération initiale.

Chapitre III : Simulation de la machine asynchrone

- L'effet du degré de déséquilibre est négligeable sur le couple de freinage.
- Les oscillations continuent d'augmenter avec l'augmentation du degré de déséquilibre (K_v).
- L'écart de la caractéristique par rapport à la tension équilibrée augmente avec l'augmentation de K_v .
- Les oscillations augmentent considérablement avec la variation de K_v

III.4.5.2 La vitesse

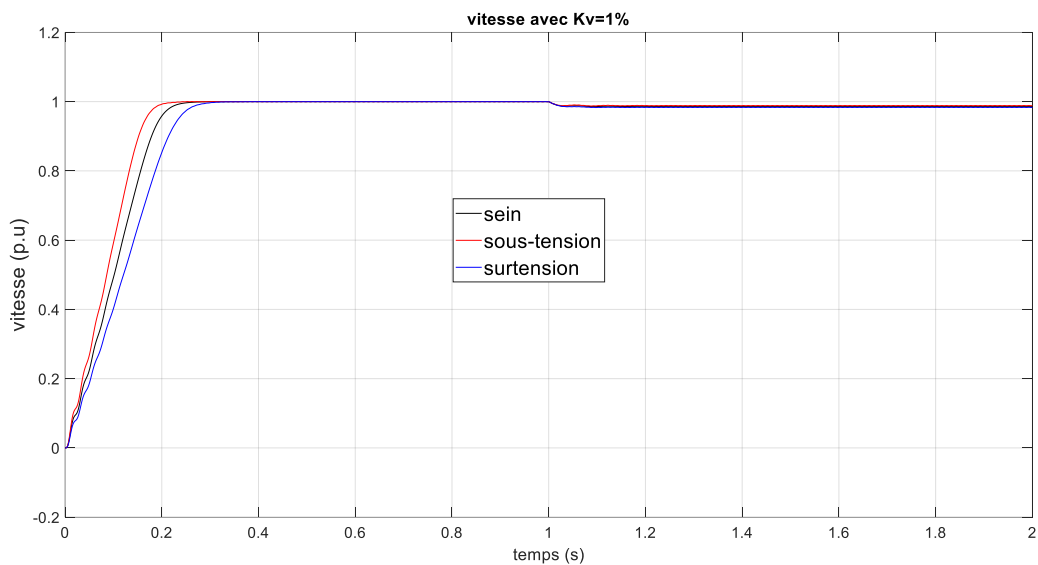


Figure III.29 : vitesse au démarrage puis en charge pour $K_v=1\%$

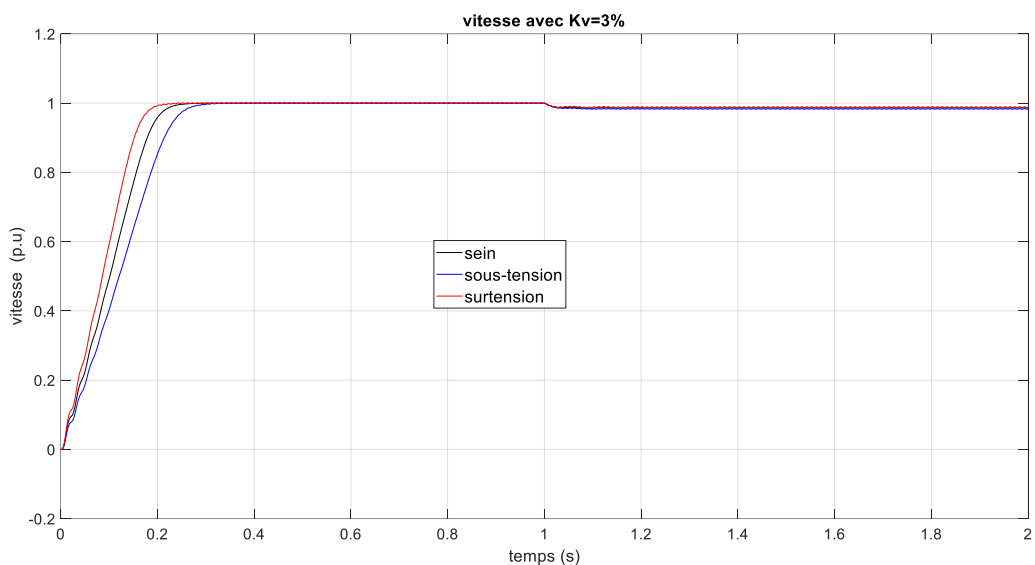


Figure III.30 : vitesse au démarrage puis en charge pour $K_v=3\%$

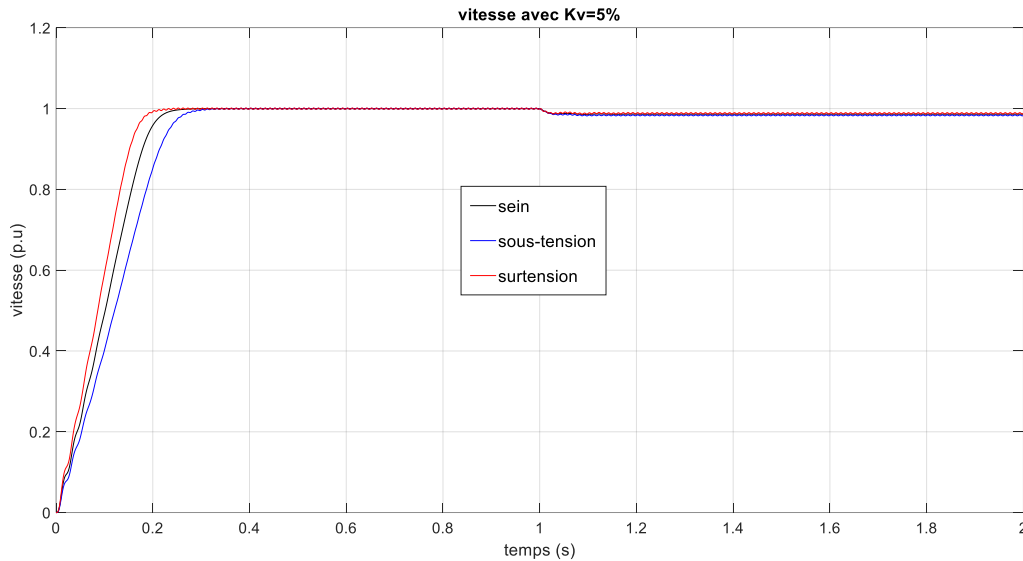


Figure III.31 : vitesse au démarrage puis en charge pour $K_v=5\%$

Ce phénomène peut être évalué et caractérisé par la visualisation des allures de la vitesse figures (III.29 à III.31), ces figures montrent l'influence du déséquilibre de la tension sur la durée du régime transitoire de la vitesse au démarrage.

On remarque nettement que la durée pour atteindre la vitesse nominale augmente avec la sous-tension et diminue en surtension.

- La vitesse atteint un état stable plus tôt en condition de surtension par rapport à la condition de sous-tension.
- Il est remarquable que la vitesse en sous tension prenne plus de temps que la vitesse à tension équilibrée ou cas de surtension pour atteindre l'état stable.
- La caractéristique vitesse-temps est légèrement dépendante de degré de déséquilibre $K_v = 1\%$, 3% et 5%

III.5 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les résultats de simulation d'un moteur à cage d'écureuil alimenté directement de partir d'un réseau triphasé pour différents régimes de fonctionnement sain et défectueux, à vide puis en charge. On peut constater facilement que les allures de courant statorique ne fournissent pas d'informations fines sur l'état du moteur. Par conséquent il est judicieux de traiter le signal fin pour ressortir avec des informations plus perspectives.

Chapitre III : Simulation de la machine asynchrone

Le vecteur de Park est le plus approprié pour la visualisation des différents défauts qui peuvent survenir à la machine asynchrone.

Une étude complète a été faite dans ce chapitre comme montré ci-dessous, cette dernière a été divisée en deux parties :

Étude du régime Permanent, elle concerne le courant statorique et a montré l'efficacité du vecteur de Park pour la détection du défaut de déséquilibre de tension qui se manifeste par des ondulations au niveau du courant qui s'accroît selon le degré de déséquilibre.

La deuxième est l'étude du régime transitoire, elle concerne la vitesse et le couple. Cette étude a montré que ces derniers s'ondulent avec l'augmentation et prennent du retard en sous-tension, par contre elles prennent une avance en surtension par rapport à la vitesse et au couple normale.

Conclusion général

Les activités scientifiques dans le domaine du diagnostic de la machine à induction ainsi que les intérêts financiers indirects revêtent encore assez d'importance pour mobiliser notre communauté. Les techniques présentées dans ce mémoire concernent le diagnostic du défaut de déséquilibre de tension de la machine asynchrone triphasée.

Dans le premier chapitre, nous avons rappelé la construction de la machine afin de mettre en exergue les différentes cages rotoriques. Puis, nous avons présenté, sans exhaustivité, des synthèses de méthode de diagnostic base sur les grandeurs mesurables fréquemment publiées dans le domaine du diagnostic.

Le deuxième chapitre, est dédié à la modélisation de la machine asynchrone, puis nous avons choisi le model de circuit couplées.

Dans le troisième chapitre, nous avons commencé par citer les normes du déséquilibre de tension, puis nous avons illustré les résultats de simulation sous deux forme, une dans la zone pérennante (vecteur de Park) et l'autre dans le régime transitoire (couple et vitesse).

Il est conclu que le couple est différent sous différentes conditions de déséquilibre. Considérant que la caractéristique couple-temps est maximale dans les conditions de surtension et continue à diminuer lorsque la réponse tend vers la condition de sous-tension. Les harmoniques augmentent avec le degré de déséquilibre et sont observé plus en condition de déséquilibre de surtension.

La réponse vitesse-temps atteint l'état d'équilibre plus rapidement en condition de surtension, cependant, il y a un temps retard pour atteindre l'état d'équilibre si le moteur fonctionne sous l'influence de la sous-tension. De plus, C'est une importante observation qu'en cas de sous-tension, courbe vitesse-temps prend plus de temps que la tension équilibrée ou le cas de surtension pour atteindre le régime permanent, Aussi la caractéristique vitesse-temps dépend légèrement du degré de déséquilibre ($K_v = 1\%$, 3% et 5%) lorsqu'elle varié avec le changement de temps. La Sous tension est la condition de déséquilibre la plus compétent pour l'utilisateur par rapport au déséquilibre de surtension.

L'étude de ces caractéristiques met en évidence l'impact de déséquilibre sur la performance instantanée des moteurs, il doit être traiter pour évaluation sûre et meilleure.

Dans le même contexte on peut considérer les perspectives suivantes :

Conclusion générale

- La réalisation des tests expérimentale est la comparaison des résultats avec celle obtenue par la simulation basée sur un modèle mathématique
- Diagnostic de la machine en présence d'un mélange des défauts (électriques et mécaniques)
- L'utilisation des diagnostics avancées (logique floue, réseau de neurone)

Bibliographie

- [1] Riguet abd elwahab, « Diagnostic de défauts de la machine asynchrone par analyse spectrale des courants (id, iq) de Park », Mémoire de fin d'étude Université Mohamed Khider Biskra, soutenue 24 juin 2018
- [2] MEDOUED AMMAR, « surveillance et diagnostic des défauts des machines électriques : applications aux moteurs asynchrones », thèse de doctorat, Université du 20 Août 1955-Skikda, , Soutenue le : 08 / 03 / 2012.
- [3] Didier G., « Modélisation et diagnostic de la machine asynchrone en présence de défaillances » Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy-I, France, 2004.
- [4] AZZOUZI KHELED, « Modélisation d'un moteur asynchrone pour le suivi de la sévérité des défauts rotoriques par l'approche de la fonction d'enroulement »,Mémoire de magister, université Mohamed Boudiaf Oran, soutenue le 11/04/2011
- [5] KERROUM Badr Eddine, « Etude et Diagnostic de mauvais branchement d'un moteur à induction », mémoire de master, université badji mokhtar- annaba,2017
- [6] Ondel O, « Diagnostic par reconnaissance des formes : Application a un ensemble convertisseur – machine asynchrone », Thèse de Doctorat, Ecole centrale de Lyon, France, 2006
- [7] Mohamed El Kamel Oumaamar . « Surveillance et diagnostic des défauts rotoriques et mécaniques de la machine asynchrone avec alimentation équilibrée ou déséquilibrée ». Autre. Université de Lorraine, 2012. Français.
- [8] JULIEN MAITRE, « Reconnaissance des défauts de la machine asynchrone : application des modèles d'intelligence artificielle », thèse de doctorat, l'université du Québec à Chicoutimi, mai 2017
- [9] BELHAMDI Saad, « Diagnostique des défauts de la machine asynchrone contrôlée par différentes technique de commande », thèse de doctorat, université mohammed-khider – biskra,soutenue le 08-05-2014
- [10] [3] KERFALI SAMIR,“ Contribution à la Surveillance et au Diagnostic des Défauts De la Machine Asynchrone“these de doctorat, UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA, Soutenue le 30/05/2016

Bibliographie

- [11] MERABET HICHEM, « Surveillance et détection des défauts d'une machine à induction », thèse de magister, université badji mokhtar annaba, soutenue 2009
- [12] Kawthar Alameh. « Contribution au diagnostic et à l'analyse de défauts d'une machine synchrone à aimants permanents », Automatique. Normandie Université, 2017.
- [13] H. Calis, P. J. Unsworth, "Fault diagnosis in induction motors by motor current signal analysis" Proc. IEEE SDEMPED'99 – Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives, pp 237 – 241, September 1 –3, Gijon, Spain.
- [14] H. Hénao, M. Garcia-Melero, "Méthodes de détection de défauts dans les machines à induction par utilisation de la mesure du flux axial" Colloque EF'99 - Lille, 30 et 31 mars 1999 pp 106 - 111
- [15] X. Deng, E. Ritchie, "Detection of broken bars in induction motors by investigating the flux linkages of the stator winding" ICEMA 14 - 16 September 1993 Adelaide Australia.
- [16] M. E. H. Benbouzid, M. Vieira, C. Theys, "Induction motor's faults detection and localization using stator current advanced signal processing techniques" IEEE Transaction on Power Electronics, Vol. 14, N° 1, pp 14 – 22, January 1999
- [17] R. R. Schoen, B. K. Lin, T. G. Habetler, "An unsupervised, on-line induction motor fault detection using stator current monitoring" IEEE Transaction on Industry Applications, Vol. 31, N° 6, november/december 1995 pp 1280 - 1286
- [18] NOUREDDINE Lahcène, « Diagnostic de défauts au rotor d'une machine asynchrone à cage d'écureuil », thèse de magister, Ecole Nationale Polytechnique, Soutenue publiquement le 26 octobre 2005
- [19] R. R. Schoen, T. G. Habetler, F. Kamran, R. G. Bartheld, "Motor bearing damage detection using stator current monitoring" IEEE Transaction on Industry Applications, Vol. 31, N° 6, november/december 1995 pp 1274 - 1279
- [20] Thomson, W.T.; Fenger, M. "Industrial application of current signature analysis to diagnose faults in 3-phase squirrel cage induction motors " Pulp and Paper Industry Technical Conference, 2000. Conference Record of 2000, pp 205 -211
- [21] J. Stein, R. D. Endicott, "Noninvasive detection of broken rotor bars in operating induction motors" IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol 3, N° 4, december (1988)

Bibliographie

- [22] ANDRIAN CEBAN, “ Méthode globale de diagnostic des machines électriques“ these de doctorat, Université Lille de Nord de France – École doctorale SPI, soutenue publiquement le 2 février 2012
- [23] Roland Casimir, « Diagnostic des défauts des machines asynchrones par reconnaissance des formes », Ecole Centrale de Lyon, 2003. Français.
- [24] Nadir Benamira, "Numerical simulation of three phase asynchronous motor to diagnosis presisley the stator unbalanced voltage normaly",*rev.sci.technology.synthese* 34:134-150(2017),
- [25] E .Schaefer "diagnostique des machines asynchrones : modèles et outils paramétriques dédiés à la simulation de défauts " *thèse de doctorat, école centrale Nantes* 1999.
- [26] Andrzej, m Trzynadlowsk, and Ritchie "comparative investigation of diagnostique media for induction Motors a case of rotor cage fault" *IEEE transaction on industriel electronic*, vol 47 No 5 octobre 2000,
- [27] G Didier, E ternisienO.caspray "fault détection of broken rotor bar in induction motors using a global fault index" *IEEE transaction on industry application*, vol 42 NO 1 jan /feb 2006.
- [28] Bachir S, " Contribution au diagnostic de la machine asynchrone par estimation paramétrique ", *Thèse de Doctorat, Université de Poitiers, France*, 2002.
- [29] by Shuo Chen A thesis submitted to the School of Electrical and Electronic Engineering of the University of Adelaide in partial fullment of the requirements for the degree of Master of Engineering Science in Electrical Engineering Adelaide, Australia April, 2008.
- [30] Summit natural, et al. “Estimating Torque-Speed Characteristic of Three-Phase Induction Motor Operating under Unbalance Supply ”, Nirma University International Conference on Engineering (NUiCONE), 2013, pp.1-6.