

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 Khider Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrique
Filière : Electrotechnique
Option : Machines Electriques

Réf:.....

Mémoire de Fin d'Etudes
En vue de l'obtention du diplôme:

MASTER

Mémoire réalisée au laboratoire de génie électrique de Biskra: LGEB

Thème

**Etude et Simulation des Défauts
Statoriques d'une Machine Synchrone à
Aimants Permanents**

Présenté par :
RAHMOUNI Salih
Soutenu le : 03 Juin 2013

Devant le jury composé de :

<i>Mr ALLAG Abd Elkrim</i>	<i>Pr</i>	<i>Université de Biskra</i>	<i>Président</i>
<i>Mr MENACER Arezki</i>	<i>M.C.A</i>	<i>Université de Biskra</i>	<i>Encadreur</i>
<i>Mr ZOUZOU Salah Eddine</i>	<i>Pr</i>	<i>Université de Biskra</i>	<i>Examineur</i>

Année Universitaire : 2012 / 2013

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 Khider Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrique
Filière : Electrotechnique
Option : **Machines Electriques**

Mémoire de Fin d'Etudes
En vue de l'obtention du diplôme:

MASTER

Mémoire réalisée au laboratoire de génie électrique de Biskra: LGEB

Thème

**Etude et Simulation des Défauts Statoriques d'une Machine
synchrone à Aimants Permanents**

Présenté par :

RAHMOUNI Salih

Avis favorable de l'encadreur :

MENACER Arezki

Signature

Avis favorable du Président du Jury

ALLAG Abd Elkrim

Signature

Cachet et signature



Université Mohamed Khider Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrique
Filière : Electrotechnique
Option : Machines Electriques

Mémoire réalisée au laboratoire de génie électrique de Biskra: LGEB

Thème :

Etude et Simulation des Défauts Statoriques d'une Machine Synchrones à Aimants Permanents

Proposé par : MENACER Arezki

Dirigé par : MENACER Arezki

RESUMES

Ce travail s'inscrit dans la thématique de la surveillance et du diagnostic des défauts de la machine synchrone à aimants permanents. Le choix de la machine est justifié par le succès grandissant qu'elle a suscité, notamment, dans les applications industrielles. Sa robustesse, son faible moment d'inertie et l'absence d'un système balais bague, justifient son omniprésence dans le secteur industriel. Malgré ces avantages, il est donc important de développer des systèmes de diagnostic pour détecter de manière anticipée les défauts pouvant apparaître dans ce type des machines. Notre travail s'inscrit dans le cadre de synthèse et de choix des méthodes et des techniques de surveillance et de diagnostic des défauts dans la MSAP tels que les défauts de court circuit de phases, coupure des phases et déséquilibre des phases. Dans ce contexte, nous avons proposé deux approches de détection de défaut par la surveillance du courant statorique en l'occurrence l'approche signal et l'approche modèle.

ملخص

يهتم هذا البحث بمراقبة وتشخيص الأخطاء في الآلات الكهربائية المتزامنة ذات المغناطيس الدائم، و التذكير ببعض الأخطاء التي تصيب الماكينة، والقضاء الضوء على العديد من الطرق المستعملة في معالجة مشكلات المراقبة والصيانة وتشخيص الأخطاء فيها، ومن ثم وضع التدابير اللازمة و البحث عن الخيارات الناجعة والمواصفات ونماذج الأداء المنشود. يندرج عملنا هذا في تشخيص الأخطاء في الآلات الكهربائية المتزامنة ذات المغناطيس الدائم. الغرض من هذا، هو الحفاظ على الآلة الكهربائية وصيانتها من أجل تمديد مدة خدمتها وتحسين أدائها و مردودها. ويرجع سبب دراسة هذه الآلات الكهربائية لكونها تعرف استعمالا واسعا في المجال الصناعي وذلك لحجمها، قوتها ومتانتها الميكانيكية و عدم تكاليف صيانتها.

Remerciements

Les travaux présentés dans ce mémoire ont été effectués au sein du Département d'électrotechnique de l'université de Biskra et au laboratoire de génie électrique LGEB de Biskra.

J'exprime mes remerciements à Monsieur Dr ***Arezki MENACER***, Maître de conférences à l'université de Biskra, pour avoir dirigé ce travail, pour la confiance et l'intérêt qu'il a témoignés tout au long de la réalisation de ce travail.

Je remercie vivement Monsieur ***Abd elkrim ALLAG*** professeur à l'université de Biskra, pour m'avoir fait l'honneur de présider le jury de ma soutenance.

J'adresse mes respectueux remerciements à Monsieur, ***Salah Eddine ZOUZOU*** professeur à l'université de Biskra, pour m'avoir accepté d'examiner ce travail.

Mes remerciements vont aussi au directeur de laboratoire LGEB de Biskra Monsieur le professeur ***Salah Eddine ZOUZOU*** pour les facilités et les moyens qu'il a mis à ma disposition.

Je tiens à remercier vivement Monsieur ***S. DRID*** Professeur l'université de Batna pour son aide et la mise en disposition le laboratoire pédagogique des machines électriques et pour les essais expérimentaux effectués,

Je tiens à remercier Monsieur ***A. GOLEA*** professeur à l'université de Biskra, Monsieur ***L. ALLOUI*** Maître de conférences à l'université de Biskra, pour leurs conseils et leurs aides tout au long de ce travail.

Je tiens à remercier la directrice du centre des langues Madame ***BOUDIAF*** pour ses conseils et son aide.

Enfin, je ne pourrai terminer sans exprimer mes remerciements à ma famille et mes amis :

Yakoub AZIZI, Ahemed ABDELALI, Ammar CHOUCANE.

Dédicace

A mon Père et ma Mère

A mes Sœurs, mes Frères et mes amis :

Oussama, Tarek, Dassi, Hamza, Yakoub, Djamel, Okba, Imad,

Toufik, Hamid, Mohamed, Walid, khaled, adel,.....

Et à ceux avec qui je partage de bons souvenirs.

RAHMOUNI Salih

SOMMAIRE

Sommaire

Remerciements	
Dédicaces	
Liste des abréviations	
Liste des figures	
Introduction générale	1
Chapitre I : Généralités sur les Machines Synchrones à Aimants	
Permanents	
I.1. Introduction	3
I.2. Machines synchrones à aimants permanentes (MSAP)	3
I.2.1. Structure	3
I.3 Structure des aimants de la machine	5
I.3.1. Aimants en surface	5
I.3.2. Aimants insérés	6
I.3.3. Aimants enterrés	6
I.3.4. Aimants à concentration de flux	6
I.4. Avantages et Inconvénients des MSAP	7
I.4.1. Avantages	7
I.4.2. Inconvénients	7
I.5. Domaines d’application	8
I.6. Choix des aimants permanents	8
I.6.1. Différents types des aimants permanents	9
I.7. Différents types des machines à aimants permanents	10
I.7.1 Moteur à rotor intérieur	10
I.7.2 Moteur à rotor extérieur	11
I.7.3. Moteur à entrefer axial	11
I.8. Capteur de position	12
I.9 Conclusion	13

Chapitre II : Diagnostic des Défaits dans les Machines Electriques	
II.1. Introduction	14
II.2. Types des défauts dans les machines électriques	14
II.2.1 Défaillances des roulements mécaniques	14
II.2.2 Défaillances au rotor	15
II.2.2.1 Rupture de barres dans les machines asynchrones	15
II.2.2.2 Ruptures d'anneaux	16
II.2.2.3 Excentricité statique et dynamique	16
II.2.2.4 Désaimantation	17
II.2.3 Défaillances au stator de la machine	18
II.2.3.1 Défauts d'isolant dans un enroulement	19
II.2.3.2 Court-circuit entre spires	20
II.2.3.3 Court-circuit entre phases	20
II.3. Surveillance des machines électriques	21
II.3.1. Approche signal	21
II.3.1.1 Analyse spectrale	22
II.3.1.2 Démodulation synchrone	23
II.3.2 Approche modèle	23
II.3.2.1 Approche à base d'observateurs	24
II.3.2.2 Approche par estimation paramétrique	24
II.4 Conclusion	25

Chapitre III : Modélisation et Simulation de la Machine Synchrone à Aimants Permanents (MSAP)

III. 1 Introduction	26
III.2 Modélisation de la MSAP à l'état sain	26
III.2.1 Hypothèses simplificatrices	26
III.2.2 Modèle de la MSAP dans le repère triphasé (abc)	27
III.2.3 Mise en équation de la machine	27
III.2.3.1 Equations électriques	27
III.2.3.2 Equations magnétiques	28
III.2.3.3 Expression du couple	29
III.2.3.4 Equation mécanique	30

III.2.3.5 Modèle de la MSAP.....	30
III.3 Alimentation de la machine.....	31
III.4. Simulation du modèle de la machine.....	31
III.4.1. Cas de la machine saine sans défaut.....	31
III.5 Fonctionnement en défaut de la MSAP.....	33
III.5.1 cas d'une ouverture d'une phase.....	33
III.5.2 Cas d'une coupure de la tension d'alimentation.....	37
III.5.3 Cas d'un déséquilibre des tensions d'alimentation.....	38
a) Déséquilibre de la phase (a) (augmentation de 4%).....	39
b) Déséquilibre de la phase (a) (diminution de 4%).....	40
III.6. Analyse spectrale des défauts par la FFT.....	42
III.7 Conclusion.....	44
Chapitre IV : Analyse Expérimentale: Cas d'une machine Synchronique classique	
IV.1 Introduction.....	45
IV.2 Résultats expérimentaux : cas sain	46
IV.2.1 Cas d'une excitation de la machine en mode inductif	46
IV.2.2 Cas d'une excitation de la machine en mode capacitif	47
IV.3 Résultats expérimentaux : cas avec défauts	47
IV.3.1 Court circuit d'une phase	48
IV.3.2 Déséquilibre des phases.....	49
a) <i>Déséquilibre d'une phase pour une excitation à $\cos \varphi > 0$ (inductif)</i>	49
b) <i>Déséquilibre d'une phase pour une excitation à $\cos \varphi < 0$ (capacitif)</i>	50
IV.3.3 Coupure des phases.....	50
a) <i>Coupure d'une phase pour une excitation à $\cos \varphi > 0$ (inductif)</i>	51
b) <i>Coupure d'une phase pour une excitation à $\cos \varphi < 0$ (capacitif)</i>	52
IV. 4. Analyse spectrale des défauts par la FFT.....	52
IV. 5 Conclusion.....	55
Conclusion générale.....	56
Annexes.....	57
Bibliographie	59

Liste des figures

Liste des figures

Chapitre I : Généralité sur les Machines Synchrones à Aimants Permanents		
Figures	Titres	Page
1.1	Structure d'une machine synchrone à aimants permanents	4
1.2	Schéma du bobinage statoriques	4
1.3	Schéma de la MSAP monté en surface	5
1.4	Différents structures des rotors des MSAP	6
1.5	Courbes de désaimantation	9
1.6	Moteur à rotor intérieur	11
1.7	Moteur à rotor extérieur	11
1.8	Moteur à entrefer axial	12
Chapitre II : Diagnostic des Défauts dans les Machines Electriques		
2.1	Excentricité statique et dynamique	17
2.2	Point limite de désaimantation réversible	17
2.3	Evolution de l'alimentation rémanente avec la température	18
2.4	Représentation des différents défauts statoriques possible	19
2.5	Dégâts de courts-circuits	21
2.6	Principe de surveillance par analyse spectrale	22
2.7	Principe général du diagnostic des machines électrique à l'utilisation d'un modèle	23
2.8	Schéma de principe de l'approche à base d'observateur	24

Chapitre III : Modélisation et Simulation de la Machine Synchrone à Aimants Permanents		
3.1	Représentation du modèle d'une MSAP	27
3.2	Schéma bloc de la MSAP dans l'environnement Simulink	30
3.3	Caractéristique dynamique de la MSAP en charge	32
3.4	Courbes dans le cas de court circuit de la phase a	35
3.5	Courbes dans le cas de court circuit de la phase b	35
3.6	Courbes dans le cas de court circuit de la phase c	36
3.7	Coupure de la phase a	38
3.8	Déséquilibre de tensions de la phase a	40

3.9	Déséquilibre de tension de la phase a	41
3.10	Spectre du courant statorique à l'état sain	42
3.11	Spectre du courant statorique pour un court circuit d'une phase	42
3.12	Spectre du courant statorique pour coupure d'une phase	42
3.13	Spectre de courant statorique pour augmentation de la tension 4%	43
3.14	Spectre de courant statorique pour diminution de la tension	43
Chapitre IV : Analyse Expérimentale: Cas d'une machine Synchrone classique		
4.1	Le banc d'essai utilisé	45
4.2	Résultats pour un fonctionnement sain un mode d'excitation inductif de la machine	46
4.3	Résultats pour un fonctionnement sain un mode d'excitation capacitif de la machine	47
4.4	Court circuit d'une phase	48
4.5	Résultats du déséquilibre ($\cos \varphi > 0$)	49
4.6	Résultats de déséquilibre $\cos \varphi < 0$	50
4.7	Coupure de la phase a $\cos \varphi > 0$	51
4.8	Coupure de la phase a $\cos \varphi < 0$	52
4.9	Spectre des courants statorique à l'état sain	53
4.10	Spectre des courants statorique du court circuit d'une phase	53
4.11	Spectre des courants statorique avec déséquilibre d'alimentation $\cos \varphi > 0$	53
4.12	Spectre des courants statorique avec déséquilibre ($\cos \varphi < 0$)	54
4.13	Spectre des courants statorique pour une coupure de phase $\cos \varphi < 0$	54
4.14	Spectre des courants statorique pour une coupure de phase $\cos \varphi > 0$	55

Notation et Abréviation

MSAP	Machine Synchrone à Aimants Permanents
MCC	Machine à Courant Continu
MS	Machine Synchrone à rotor bobiné
FFT	Transformée de Fourier
FEM	Force Electromotrices
B_r	L'induction rémanente
HCB	Champ Coercitif de l'induction
R	Résistance d'un enroulement statorique.
\dot{i}_{abc}	Les courants des phases statorique a, b, c.
Φ_{abc}	Les flux produits par les phases statoriques respectivement a, b, c.
V_{abc}	Les tensions des phases statorique.
L_{sc}	Inductance cyclique d'un enroulement statorique.
L_s	Inductance propre d'une phase statorique.
M_s	Mutuelle inductance entres phases du stator.
Ωr	Vitesse de rotation de la machine.
θ	Angle permettant de repérer la position du rotor par rapport au stator.
P	Nombre de paire de pole.
C_{em}	Couple électromagnétique.
C_r	Couple résistant.
C_f	Couple de frottement.
J	Moment d'inertie
f	Coefficient de frottement

Introduction Générale

Dans tous les secteurs industriels, la sécurité des personnes, du matériel, de l'environnement du travail, la qualité de service et la rentabilité des installations imposent des contraintes sévères de fiabilité et de sûreté de fonctionnement. Depuis quelques années grâce à l'apport considérable de l'outil informatique et du matériel numérique il est devenu possible de créer des systèmes de supervision et de diagnostic dont le but est de signaler la présence du dysfonctionnement dans le processus.

Bien que la plus ancienne des machines électriques industrielles, la machine à courant continu reste très utilisée et particulièrement comme actionnaire. Ceci tient au fait que son fonctionnement est d'une grande simplicité, de même que sa modélisation, mais surtout ses performances statiques et dynamiques sont exceptionnelles. En effet le couple est le produit vectoriel de deux grandeurs naturellement orthogonales (flux inducteurs et courant d'induit) quasiment indépendantes et indépendantes de la vitesse et de la position du rotor.

Cependant, la fragilité du système balai collecteur a toujours été un inconvénient de la M.C.C, ce qui limite la puissance et la vitesse maximale et présente des difficultés de maintenance et des interruptions de fonctionnement. C'est pour cette raison qu'on a eu intérêt à utiliser des moteurs électriques à courant alternatif à fin d'écarter cet inconvénient.

Au cours de ces dernières années, les machines synchrones à aimants permanents (MSAP) sont plus en plus utilisées dans les applications industrielles comme l'automobile, l'aéronautique, la robotique ou encore le transport ferroviaire. La machines synchrone à aimants permanents est un actionneur électrique très robuste et présente de faibles moments d'inerties ce qui lui confère une dynamique caractérisée par de très faibles constantes de temps et permet de concevoir des commandes de vitesse, de couple ou de position avec une précision et des performances dynamiques très intéressantes.

Malgré le fait que la machine synchrone à aimants permanents soit réputée pour ses avantages, un certains nombre de contraintes de différentes natures (thermique, électrique, mécanique et d'environnement) peuvent affectés la durée de vie de celle-ci en faisant apparaître des pannes dans le stator et le rotor. Ces pannes occasionnent des pertes

économiques considérables, obligeant les chercheurs de mettre en oeuvre des systèmes de surveillance adéquats.

Dans ce mémoire nous sommes intéressés au diagnostic des défauts d'alimentation (court circuit, coupure et déséquilibre des phases) alimentant une machine synchrone à aimants permanents.

Dans le premier chapitre, nous présenterons la machine synchrone à aimants permanents, ses différentes structures, les caractéristiques des aimants permanents et les différents types des machines synchrones à aimants permanents,

Dans le deuxième chapitre est consacré à la présentation les différents défauts pouvant survenir dans les machines électriques, et les différentes techniques de diagnostic actuellement appliquées aux machines pour établir la présence d'un défaut.

Dans le troisième chapitre on va présenter le modèle mathématique de la MSAP, les résultats de simulation du modèle à l'état sain et avec défaut. On va étudier l'analyse des défauts à travers de l'analyse spectrale du courant en utilisant la transformation de Fourier rapide (FFT).

Afin de valider notre étude, les résultats expérimentaux sont effectués au sein du laboratoire pédagogique d'électrotechnique à Batna. Et on termine par une conclusion générale et perspective.

Chapitre I

Généralités sur les Machines Synchrones à Aimants Permanents

I.1. Introduction

L'étude du comportement d'un moteur électrique est une tâche difficile nécessitant une bonne connaissance de son modèle dynamique, afin de bien prédire son comportement dans les différents modes de fonctionnement envisagés.

Historiquement, le moteur à courant continu (MCC) a constitué la seule source électromagnétique de vitesse variable, en raison de sa commande simple. Cependant, la fragilité du système balais collecteur a toujours été un inconvénient de la MCC, ce qui limite la puissance et la vitesse maximale et présente des difficultés de maintenance et des interruptions de fonctionnement. C'est pour cette raison qu'on a eu intérêt à utiliser des moteurs électriques à courant alternatif afin d'écartier ces inconvénients [1].

Parmi les moteurs à courant alternatif utilisés dans les entraînements à vitesse variable, le moteur synchrone à aimants permanents (MSAP). Son choix devient attractif et concurrent de celui des moteurs asynchrones grâce à l'évolution des aimants permanents qu'ils soient à base d'alliage ou à terre rare. Cela leur permis d'être utilisés comme inducteur dans les moteurs synchrones offrant ainsi, beaucoup d'avantages à savoir les pertes au rotor nul, un couple massique élevé et une faible inertie [2].

Dans ce chapitre une présentation des généralités sur les machines électriques à aimants permanents sera considérée.

I.2. Machines synchrones à aimants permanentes (MSAP)

De nombreuses tentatives ont été faites par des chercheurs pour réaliser des moteurs synchrones à aimants permanents, mais ce n'est qu'avec l'apparition des matériaux à fort champ coercitif et induction rémanente assez élevée qu'elles ont pu, réellement se concrétiser.

I.2.1. Structure

La machine synchrone à aimants permanents est un dispositif électromécanique qui comprend un stator et un rotor. Le stator est une partie fixe où se trouvent les enroulements liés à la source. Le rotor est une partie mobile qui est monté sur l'axe de rotation.

La figure (1.1), représente la structure de la machine synchrone à aimants en surface.



Figure 1.1 : Structure d'une machine synchrone à aimants permanents.

- **Le stator**

Le stator est constitué d'un certain nombre de bobines réparties dans des encoches qui constituent trois bobinages indépendants. Leurs rôles consistent à créer un champ magnétique tournant lorsqu'on les alimente par un système de tensions ou de courants triphasés. Les topologies rencontrées dans les bobinages des machines tournantes à courants alternatifs sont nombreuses. On distingue deux grandes catégories de bobinage. Les bobinages dits réguliers, parmi lesquels on trouve les bobinages à pas diamétral, les bobinages à pas raccourcis, les bobinages répartis et les bobinages non réguliers, comme les bobinages à trous ou à nombre fractionnaire d'encoches par pôle et par phase. La figure (1.2) présente un exemple de bobinage statorique régulier à une seule voie par phase et à deux paires de pôles [4].

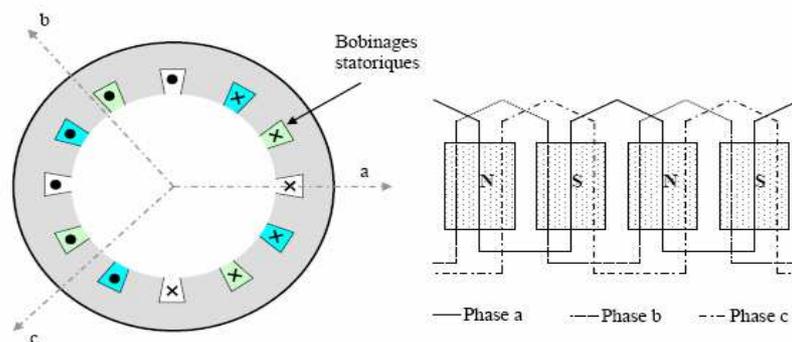


Figure 1.2 : Schéma du bobinage statorique

- **Le rotor**

Le rotor est quant à lui constitué d'un noyau de fer sur lequel sont disposés des aimants permanents qui servent à générer une excitation permanente. Le flux inducteur balaye les enroulements statoriques et y induit des forces électromotrices (f.é.m.) alternatives. L'interaction des champs statorique et rotorique donne naissance à un couple sur l'arbre du

moteur et l'entraîne à vitesse de rotation synchrone. La figure (1.3) présente un rotor d'une machine à aimants permanents montée en surface.

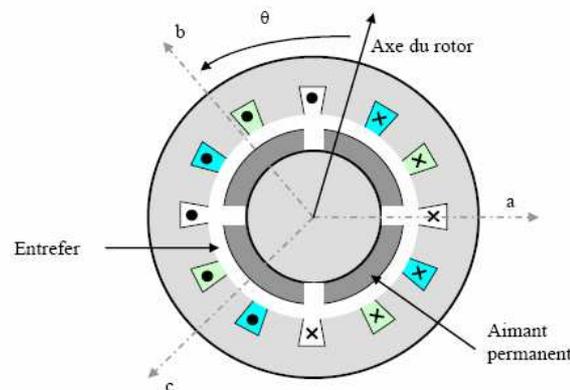


Figure 1.3: Schéma de la machine synchrone à aimants permanents montée en surface.

I.3 Structure des aimants de la machine

Les machines à aimants permanents peuvent être construites avec plusieurs configurations rotoriques. Leur classification globale en termes de placement des aimants est le suivant:

- aimants en surface (surface magnet),
- aimants insérés (inset magnet),
- aimants enterrés (interior magnet),
- aimants à concentration de flux (burried magnet).

I.3.1. Aimants en surface

Pour ces types des machines, les aimants sont placés sur la surface du rotor; ils sont aimantés radialement, comme le montre la figure (1.4a). Cette configuration du rotor est plus utilisée. Le principal avantage de la machine avec des aimants en surface est sa simplicité, donc son faible coût de fabrication par rapport à d'autres machines à aimants. L'inconvénient est l'exposition des aimants aux champs démagnétisant. De plus, les aimants sont soumis à des forces centrifuges qui peuvent causer leur détachement du rotor. Parfois, un cylindre externe non ferromagnétique de haute conductivité est utilisé. Il protège les aimants de la magnétisation, de la réaction d'induit et des forces centrifuges. Ce cylindre peut en plus fournir un couple de démarrage asynchrone et agir comme un amortisseur. Dans le cas des aimants du type terres rares la réactance synchrone dans l'axe-d et l'axe-q sont pratiquement les mêmes.

I.3.2. Aimants insérés

Comme des machines avec aimants en surface, les aimants insérés sont aussi montés sur la surface du rotor. Toutefois, les ouvertures entre les aimants permanents sont partiellement remplies avec le fer, comme montré sur la figure (1.4b). Le fer entre les aimants crée une saillance et donne un couple réactant en plus du couple des aimants, la réactance synchrone de l'axe $-q$ est légèrement supérieure à celle dans l'axe $-d$.

I.3.3. Aimants enterrés

Les machines à aimants enterrés sont des machines avec des aimants intégrés dans le rotor figure (1.4c) et aimantés radialement. Du fait que la surface du pôle magnétique est plus petite que celle du rotor, l'induction dans l'entrefer est plus faible que l'induction dans l'aimant. La réactance synchrone dans l'axe- d est plus petite que celle de l'axe- q , les aimants dans cette configuration sont très bien protégés contre les forces centrifuges. Cette configuration du rotor est recommandée pour les applications à grandes vitesses.

I.3.4. Aimants à concentration de flux

Une autre façon de placer les aimants permanents dans le rotor est de les enterrer profondément à l'intérieur du rotor. Ici, les aimants sont aimantés dans le sens de la circonférence (figure 1.4d). Les pôles magnétiques se forment alors au niveau des parties ferromagnétiques du rotor par concentration de flux provenant des aimants permanents. L'avantage de cette configuration est la possibilité de concentrer le flux générés par les aimants permanents dans le rotor et d'obtenir ainsi une induction plus forte dans l'entrefer. Comme les machines à aimants intérieurs, les aimants permanents de cette dernière sont aussi bien protégés contre la désaimantation et les contraintes mécaniques. La réactance synchrone sur l'axe- q est plus grande que celle de l'axe- d [5].

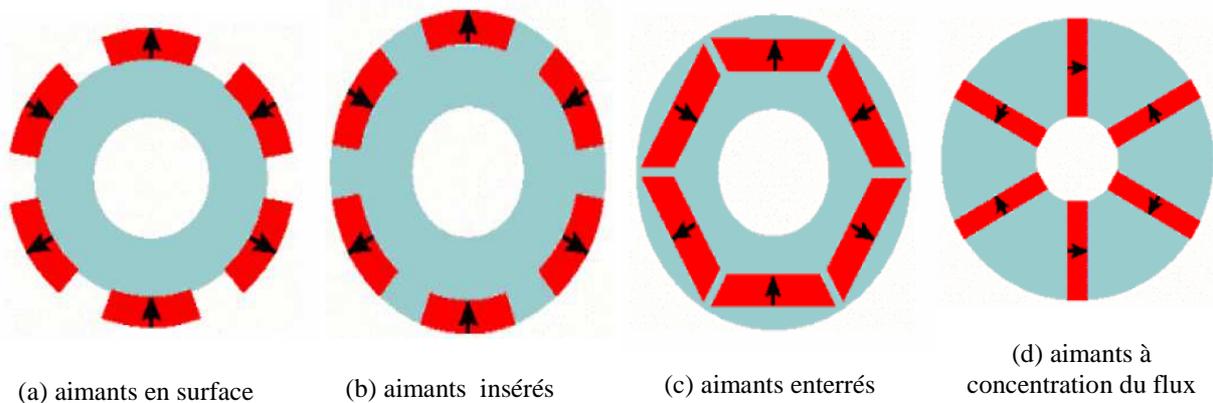


Figure 1.4 : Différents structures des rotors des MSAP

I.4. Avantages et Inconvénients des MSAP

I.4.1. Avantages

Les avantages associés à l'utilisation des machines à courant alternatif asynchrone et synchrone à aimants permanents ne sont pas à démontrer en termes de robustesse et de fiabilité.

Aujourd'hui, avec le progrès actuel des aimants permanents, le moteur synchrone est de plus en plus utilisé dans les systèmes d'entrainements à vitesse variable à hautes performances. Son choix dans ce domaine est devenu attractif et concurrent de celui des moteurs à courants continu et des moteurs asynchrones, cela est dû principalement à ses avantages multiples, relativement à ces deux types d'actionneurs, on cite principalement:

- facteur de puissance et rendement élevé par rapport à ceux des moteurs asynchrones,
- robustesse incontestée par rapport au moteur à courant continu,
- puissance massique élevée et précision de sa commande,
- développement de la technologie des composants de l'électronique de puissance, et l'apparition des processus numériques à fréquences élevée et à forte puissance de calcul, surmontant ainsi le problème de l'implantation des algorithmes de commande de l'onduleur assurant l'autopilotage du MSAP,
- augmentation de la constante thermique et de la fiabilité, à cause de l'absence de contacts bague-balais dans ces machines [6 -8].

I.4.2. Inconvénients [9-10]

Dans le MSAP, le commutateur mécanique du moteur à courant continu est remplacé par un commutateur électrique, ce qui a pour effet de rendre le contrôle de ce moteur plus complexe et coûteux que celui d'un moteur à courant continu,

Un inconvénient du MSAP est la présence des ondulations du couple, selon la méthode de commutation utilisée, le moteur synchrone est plus ou moins sujet à ce phénomène. La commutation sinusoïdale d'un contrôleur complexe et de capteur de courant sophistiqué (coûteux), la commutation trapézoïdale, permet d'utiliser un contrôleur et des capteurs de courant plus simples et moins coûteux, mais implique la présence de fortes pulsations de couple,

La présence d'aimants permanents majore le prix des moteurs synchrones, notamment dans le cas de l'utilisation d'aimants de terre rare. Ces aimants présentent des avantages (champs coercitifs, tenus en chaleur, etc.) par rapport aux aimants "ferrites" mais ont un prix aussi beaucoup plus élevé,

Le contrôle basé sur une commutation électronique augmente la complexité et donc le prix du contrôleur et du variateur. A cela s'ajoute le coût des capteurs supplémentaires nécessaires à la boucle du courant,

Risque de désaimantation, ce qui limite la température maximale, courant maximum, défluxage impossible dans les machines à courant continu, possible dans les machines synchrones par contrôle de l'angle d'autopilotage, Pertes par courants de Foucault dans les aimants.

I.5. Domaines d'application des MSAP

Le moteur synchrone à aimants permanents est utilisé dans une large gamme de puissance allant de quelques centaines de watts (servomoteurs) à plusieurs mega watts (systèmes de propulsion des navires). Dans des applications aussi diverses que le positionnement, la synchronisation l'entraînement à vitesse variable, et la traction.

- Il fonctionne comme compensateur synchrone.
- Il est utilisé pour les entraînements qui nécessitent une vitesse de rotation constante, tels que les grands ventilateurs, les compresseurs et les pompes centrifuges [11-12].

I.6. Choix des aimants permanents

Le choix des aimants permanents est essentiel puisqu'ils interviennent pour beaucoup dans le couple massique d'un actionneur [13]. Les aimants sont principalement caractérisés par leurs cycles d'hystérésis et plus particulièrement par la courbe de désaimantation du deuxième quadrant du plan B-H (figure 1.5), caractérisée par:

- l'induction rémanente B_r , c'est-à-dire l'induction résiduelle en circuit fermé,
- le champ coercitif de l'induction HCB qui est le champ démagnétisant annulant l'induction, plus sa valeur est élevée et plus l'aimant est stable,
- le produit d'énergie volumique (BH) max,
- les valeurs H_m et B_m du point de fonctionnement optimal M correspondant à (BH) max.

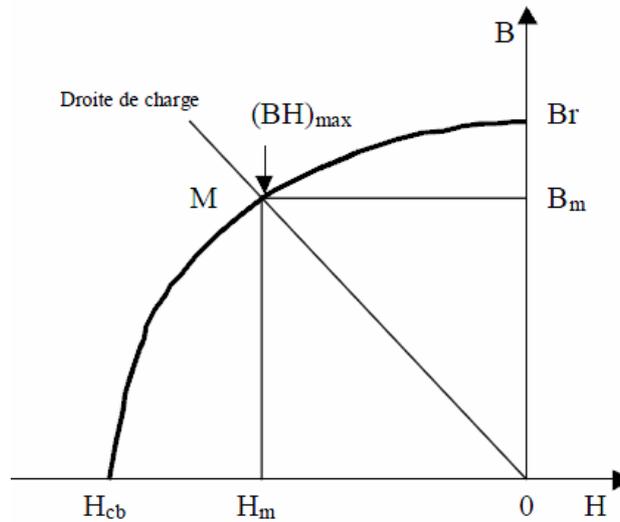


Figure 1.5 : Courbes de désaimantation

I.6.1. Différents types des aimants permanents

Il existe une grande variété de matériaux pour les aimants permanents dont les propriétés et les applications sont diverses. Dans le cas des machines tournantes, on distingue trois types [14]:

a. Alnicos: Aimants permanents réalisés à partir d'un alliage Aluminium Nickel Cobalt, caractérisés par une induction rémanente élevée et un champ coercitif faible, ils sont donc de caractéristique énergétique médiocre. En effet, de part leur composition métallique, ils sont le siège de pertes fer, et le procédé de fabrication induit une direction privilégiée de l'aimantation, qui est celle de la plus grande longueur. Actuellement, en raison de leur basse qualité, ils ne sont presque plus utilisés.

b. Ferrites: Aimants permanents, formés de matériaux de la famille des céramiques et donc électriquement non-conducteurs et quasiment ferromagnétiques. Ils sont caractérisés par une faible induction rémanente mais ont un champ coercitif élevé. Ils sont surtout intéressants pour leur bon rapport densité d'énergie –prix.

c. Alliages métaux terres rares: Ils sont actuellement, les plus performants des aimants permanents utilisés dans la construction des machines synchrones. La version la plus courante est l'alliage samarium-cobalt, caractérisé par une induction rémanente et un champ coercitif élevés. A taille égale, l'énergie emmagasinée dans l'aimant est trois fois plus grande que celle des Alnicos et six fois plus que celle des ferrites, réduisant ainsi de façon considérable le volume du rotor, ce qui permet donc d'augmenter le couple massique de la machine et de réduire son inertie. Leur prix est cependant élevé.

Le choix d'aimant est effectué en fonction des caractéristiques recherchées et du prix de l'aimant qui est très variable. Quelques propriétés magnétiques des différents types d'aimants sont données dans le tableau (1.1)

Matériaux	B_r en Tesla	H_c en KA/m	T° de Curie en °C	Remarque diverses
Ferrites	0.2 à 0.4	200	300	Les moins chers
Alnicos	1.2	50	750 à 850	Se démagnétisent trop facilement
Samarium cobalt	0.5	800	700 à 800	Prix élevé à cause du cobalt
Néodyme fer bore	1.3	1500	310	Prix en baisse (brevets), sujet à l'oxydation

Tableau 1.1 : Exemples de propriétés magnétiques des aimants [15]

I.7. Différents types des MSAP

Il existe de nombreuses configurations du MSAP. La raison principale de cette diversité est que les utilisateurs ont des besoins spécifiques. Par exemple, pour la conception d'un servomoteur, l'inertie devra être la plus faible possible, afin de permettre une accélération et une décélération, la plus rapide possible.

Il sera donc préférable d'utiliser un moteur à rotor intérieur avec des aimants à hautes énergies. Tandis que, pour une application où la vitesse doit rester la plus constante possible, telle que la motorisation d'un disque magnétique, un moteur à rotor extérieur du fait de son inertie, est préférable [16].

Trois grandes familles existent : les moteurs à rotor intérieur, à rotor extérieur ou à entrefer axial.

I.7.1 Moteur à rotor intérieur

Le moteur à rotor intérieur a une configuration classique. Le rotor est constitué d'aimants assemblés sur une douille magnétique. Le stator est similaire à celui des machines triphasées à induction.

L'avantage majeur de cette structure est la ration couple/vitesse qui est élevé. Néanmoins une difficulté de construction existe, il faut être capable de maintenir les aimants, même à vitesse élevée. Le plus souvent ils sont collés et frétés.

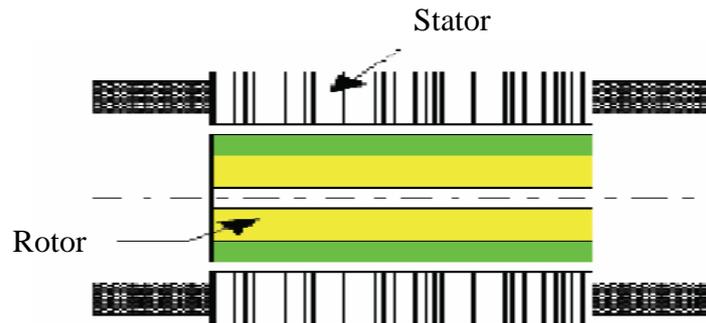


Figure 1.7 : Moteur à rotor intérieur

I.7.2 Moteur à rotor extérieur

La figure (1.8) présente la section d'un moteur à rotor extérieur. Les tôles utilisées au stator ressemblent à celle de l'induit de la machine à courant continu à balais. Ce type de stator est simple à bobiner, car le fil se bobine directement sur le stator section par section.

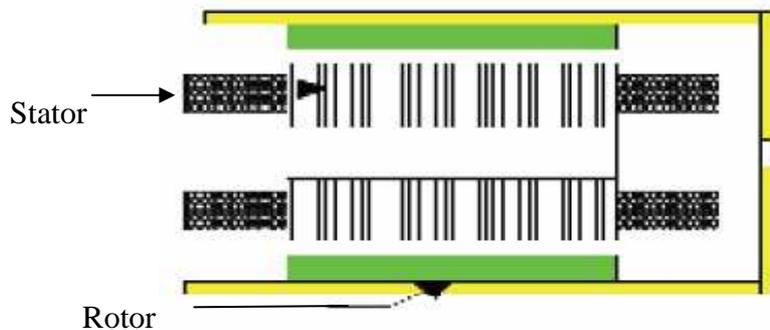


Figure 1.8 : Moteur à rotor extérieur

Le rotor est constitué d'aimants montés dans une cloche magnétique permettant la continuité du champ. Dans cette configuration, il n'y a plus de problème pour maintenir les aimants, car ils sont plaqués sur la cloche par l'action de la centrifuge.

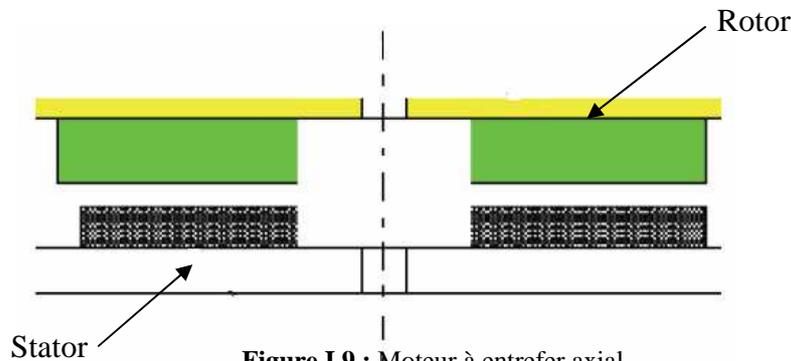
Cette structure est fréquemment utilisée dans les applications de ventilation pour son faible coût et sa fragilité de fabrication.

Pendant, les machines à rotor extérieur ne sont utilisées que pour des applications à vitesse constante.

I.7.3. Moteur à entrefer axial

Dans certaines applications à encombrement réduit, les machines à entrefer axial ont fait leur apparition (moteur de disque dur d'ordinateur, table tournante, ventilateur). Les aimants sont montés sur un disque magnétique mobile. Les bobines sont fixées en général

Sur le circuit imprimé avec les composants électroniques. Sous le circuit, une plaque métallique permet au champ de se refermer. La figure (1.9) représente une coupe d'un moteur à entrefer axial.



Ces machines ont en général un grand nombre de pôles et fonctionnent à basses vitesses (inférieure à 1000 tr/min) afin d'éviter un échauffement excessif dû aux courants de Foucault.

Les avantages du moteur à entrefer axial sont : un faible coût, sa forme plate et l'absence de couple réactif à faible vitesse

I.8. Capteur de position

Les MSAP requièrent la connaissance de la position angulaire du rotor par rapport au stator pour un fonctionnement autopiloté. Pour les moteurs à f.é.m. de forme sinusoïdale, il faut générer des courants de référence de forme sinusoïdale avec un capteur de haute résolution comme un synchro-résolveur. De plus, il faut disposer d'au moins deux capteurs de courant à isolement galvanique pour mesurer les courants dans les phases de la machine. Une commande simple consiste à régler le couple en agissant sur l'amplitude du courant de référence et sur l'angle de calage ψ entre le courant et la F.é.m. Pour les moteurs à fém. de forme trapézoïdale, un capteur de faible résolution suffit à définir la forme des courants de référence et à réaliser l'autopilotage. Les capteurs de position utilisés sont de trois technologies : les résolveurs, les capteurs optiques et les capteurs à effet Hall. Les premiers sont de petites machines synchrones alimentées en haute fréquence dont les signaux sont exploités pour extraire la position: ils présentent l'avantage de supporter les mêmes environnements que les moteurs auxquels ils sont associés et confèrent une excellente robustesse à l'ensemble du système. Les capteurs optiques offrent des résolutions élevées comme les résolveurs, mais sont plus fragiles et plus limités en température (moins de 100°C). Les capteurs à effet Hall habituellement utilisés offrent de basses résolutions, en général quelques « points » par période électrique: ils sont donc mis en œuvre dans des

structures de commande de machines synchrones à force électromotrice trapézoïdales pour des applications dont on souhaite contrôler uniquement la vitesse [18].

I.10 Conclusion

Ce chapitre a été consacré à la présentation des généralités sur la machine synchrone à aimants permanents est cela en se basant sur ces différentes structures, les caractéristiques des différents aimants permanents constituant le rotor. Les différents types de défauts pouvant survenir dans une machine électrique et les méthodes de surveillance et diagnostic seront considérés dans le deuxième chapitre.

Chapitre II
Diagnostic des Défauts dans les
Machines Electriques

II.1. Introduction

Les contraintes en termes de fiabilité, de disponibilité et de sûreté de fonctionnement des machines électriques imposent aux industriels (constructeurs ou utilisateurs) de mettre en place une stratégie de maintenance.

De nos jours, une maintenance efficace demande un système de surveillance sophistiqué permettant de prendre les décisions correctes au bon moment, en évitant les pannes et donc les arrêts de production non planifiés. C'est pour cette raison que l'industrie a des plus en plus besoin de méthodes et d'outils de plus en plus performants pour diagnostiquer et évaluer l'état de santé des machines électriques dans le but d'optimiser la maintenance et donc le budget des investissements. Plusieurs méthodes de diagnostic efficace ont atteint l'industrie, pourtant le diagnostic demeure encore un domaine où de nombreuses avancées restent encore à réaliser.

Dans ce chapitre sera présenté les différents types de défauts apparaissant dans les machines électriques, plus particulièrement les défauts statoriques et les différents méthodes et techniques de diagnostic de ces pannes.

II.2. Types des défauts dans les machines électriques

On désigne par défaillance dans les machines électriques tout incident donnant lieu à un comportement anormal de la machine et qui peut à court ou à long terme provoquer son endommagement. Les défaillances peuvent être d'origines diverses, électriques, mécaniques ou bien encore magnétiques. Leurs causes sont multiples et peuvent être classées en trois groupes [19]:

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

II.2.1 Défaillances des roulements mécaniques

Les roulements à billes jouent un rôle d'interface mécanique entre le stator et le rotor. En outre, ils représentent l'élément de maintien de l'axe de la machine permettant d'assurer une bonne rotation du rotor. Ce type de défaut est plus fréquent sur les machines de fortes

puissances. Il est généralement lié à l'usure des roulements et plus précisément une dégradation des billes, ou de la bague de roulement. Ses causes possibles sont l'usure due au vieillissement, une température de fonctionnement élevée, la perte de lubrification, l'huile contaminée, le défaut de montage, les courants d'arbres [20-22].

Ce type de défaut se traduit par des oscillations du couple de charge, une apparition de pertes supplémentaires et un jeu entre la bague interne et la bague externe du roulement entraînant des vibrations par les déplacements du rotor autour de l'axe longitudinale de la machine. Dans le cas plus défavorable, la présence d'un roulement défectueux peut amener au blocage du rotor.

II.2.2 Défaillances au rotor [23-24]

Pour le rotor, les défaillances sont essentiellement dues à un problème:

- thermique (surchage),
- électromagnétique,
- résiduel (déformation),
- dynamique (arbre de transmission),
- environnemental (agression).

Les défauts qui sont les plus récurrents, localisés au niveau du rotor, peuvent être définis comme suit :

- rupture de barres dans les machines asynchrones,
- rupture d'une portion d'anneau de court-circuit dans les machines asynchrones,
- excentricité statique et dynamique,
- désaimantation dans les MSAP.

II.2.2.1 Rupture de barres dans les machines asynchrones

La cassure ou rupture de barre est l'un des défauts les plus fréquents au niveau du rotor de la machine. Elle peut se situer soit au niveau de son encoche soit à l'extrémité qui la relie à l'anneau de court-circuit. La détérioration des barres provoque la réduction de la valeur moyenne du couple électromagnétique et l'augmentation de l'amplitude des oscillations de la vitesse de rotation, ce qui engendre des vibrations mécaniques et donc, un fonctionnement anormal de la machine, ce qui accélère la détérioration de la machine. Ainsi, le couple diminue sensiblement avec le nombre de barres cassés induisant un effet cumulatif de la défaillance. L'effet d'une cassure de barre croît rapidement avec le nombre de barres cassées [25].

II.2.2.2 Ruptures d'anneaux

La rupture d'une portion de l'anneau de court-circuit dans une machine asynchrone à cage, est un défaut qui apparaît aussi fréquemment que la cassure de barres. Ces ruptures peuvent être dues à des bulles de coulées ou aux dilatations différentielles entre les barres et les anneaux. Ces portions d'anneaux de court-circuit véhiculent des courants plus importants que ceux des barres rotoriques. De ce fait, un mauvais dimensionnement des anneaux, une détérioration des conditions de fonctionnement (température, humidité,...) ou une surcharge de couple et donc de courants, peuvent entraîner leur cassure.

La rupture d'une portion d'anneau déséquilibre la répartition des courants dans les barres rotoriques et de ce fait, engendre un effet de modulation d'amplitude sur les courants statoriques similaire à celui provoqué par la cassure de barres [26-27].

II.2.2.3 Excentricité statique et dynamique

Parfois, la machine électrique peut être soumise à un décentrement du rotor, se traduisant par des oscillations de couple (décalage entre le centre de l'arbre et le centre du rotor). Ce phénomène est appelé excentricité (statique et dynamique) dont l'origine peut être liée à un positionnement incorrecte des paliers lors de l'assemblage, à un défaut roulement (usure), à un défaut de charge, ou à un défaut de fabrication [28].

On distingue trois types d'excentricité [29]:

- excentricité statique: le rotor est déplacé du centre de l'alésage stator mais tourne toujours autour de son axe,
- excentricité dynamique: le rotor est positionné au centre de l'alésage mais ne tourne plus autour de son axe,
- excentricité mixte: associant les deux types d'excentricité.

Ces défauts modifient les comportements magnétiques et mécaniques de la machine. En effet, l'augmentation de l'excentricité dans l'entrefer induit une augmentation des forces électromagnétiques qui agissent directement sur l'armature statorique ainsi que l'enroulement correspondant, ce qui engendre une dégradation de son isolation. D'autre part, cette augmentation peut avoir comme conséquence des frottements entre le stator et le rotor en raison des forces d'attraction magnétique qui déséquilibrent le système. Ceci donne naissance à des niveaux de vibration considérables dans les enroulements, la figure (2.1) représente l'excentricité statique et dynamique.

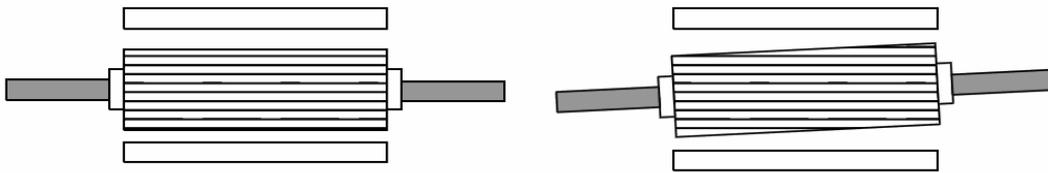


Figure 2.1: Excentricité statique et dynamique.

II.2.2.4 Désaimantation

Les MSAP contiennent un rotor équipé d'aimants permanents qui sont soit sur la surface du rotor ou intégrés. La présence des aimants dans le rotor produit un flux rotorique constant. Toutefois, ce flux peut varier sous l'influence de nombreux facteurs tels que la réaction d'induit et la température. Lorsque les enroulements statorique sont alimentés avec une tension, le champ créé s'oppose au champ produit par les aimants. Dans des conditions normales le point de fonctionnement des aimants est situé dans le deuxième quadrant (figure 2.2), mais ce point de fonctionnement peut évoluer et traverser le point limite de désaimantation réversible [5].

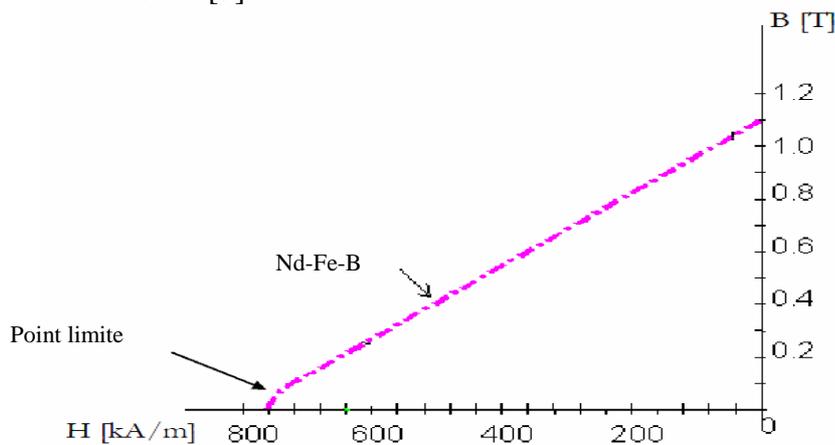


Figure 2.2: Point limite de désaimantation réversible [5]

Ce phénomène peut se produire lors des applications brutales de charges ou en cas de défaut de court-circuit des enroulements statorique. Une fois produite, la réduction irréversible de l'induction rémanente (B_r) de l'aimant réduit de façon permanente les performances de la machine.

Les températures élevées de fonctionnement réduisent aussi l'induction rémanente. La figure (2.3) montre la variation de B_r avec la température.

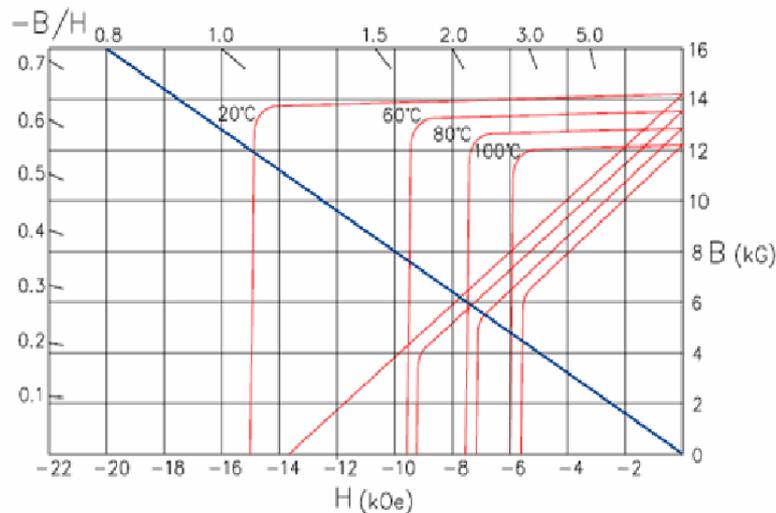


Figure 2.3: Evolution de l'aimantation rémanente avec la température [5]

II.2.3 Défaillances au stator de la machine

L'armature statorique munie de son bobinage est l'une des parties de la machine qui subit beaucoup de contraintes et dont les effets sont plus importants à cause de la complexité de la structure et la fragilité de certaines parties telles que les isolants. Pour le stator, les défaillances sont principalement dues à un problème soit [30]:

- **Thermique:** l'isolation est conçue pour avoir une certaine durée de vie à la température nominale. Toutefois, si la température augmente au-dessus de la température de fonctionnement, la durée de vie raccourcit rapidement. Cette augmentation de la température peut être due à une variation de la tension ou un déséquilibre à la répétition des démarrages dans un court laps de temps, à des surcharges, à une mauvaise ventilation ou alors à une haute température ambiante.

- **Electrique:** une tension supérieure à la valeur nominale ou de haute valeurs de dv/dt dû à l'ouverture et la fermeture des interrupteurs du convertisseur statique qui vont conduire à la dégradation du diélectrique assurant l'isolation des bobines. La présence d'un fort champ électrique interne conduira à des décharges partielles dans les cavités de l'isolant. Il en résulte des spots carbonisés dans l'isolation, ce qui cause des déformations du champ électrique (augmentation dans la région du défaut).

- **Mécanique:** les démarrages répétitifs de la machine provoquent l'augmentation de la température dans le cuivre (bobinage statorique et cage). Cet effet cyclique provoque des dilatations et contractions répétitives de l'isolant. Cela pourrait entraîner des fissures dans l'isolant qui peuvent se propager et provoquer un début de court-circuit interne. Les efforts

mécaniques sur les tôles et les conducteurs ont des composants alternatifs qui provoquent des vibrations de la structure qui induira l'érosion et l'abrasion de l'isolant entraînant leur détérioration [31].

- **Environnemental** : la présence d'humidité ou de produits chimiques dans l'air ambiant peut détériorer la qualité de l'isolation et conduire à défaut d'enroulement. Le début de la dégradation entraîne des courants de fuites accélèrent la détérioration de l'isolant jusqu'au court-circuit franc. Une autre conséquence est la création de l'ozone et les oxydes d'azote qui peuvent se combiner avec l'humidité pour former de l'acide nitrique, qui détruit l'isolant [32].

Les défauts qui sont les plus récurrents, localisés au niveau du stator, peuvent être définis comme suit : défaut d'isolant, court-circuit entre spires, court-circuit entre phases, court-circuit entre phases et bâti, déséquilibre d'alimentation, défauts de circuit magnétique, la figure (2.4) montre les différents défauts statoriques possible.

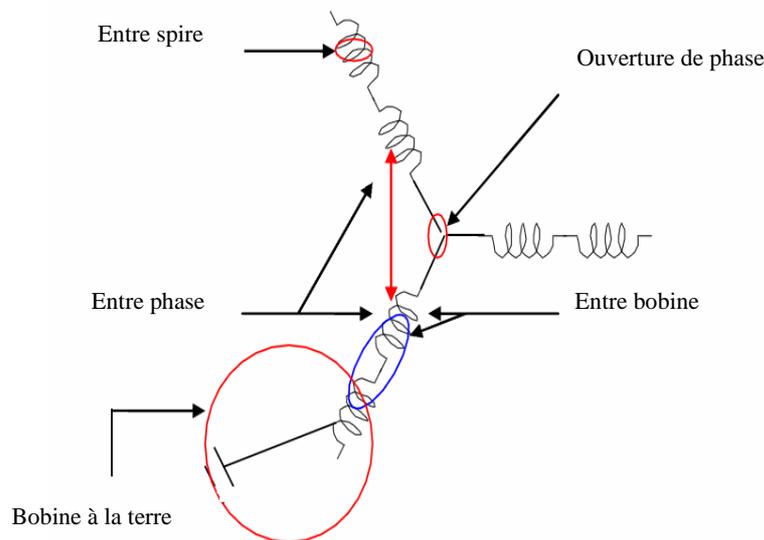


Figure 2.4 : Représentation des différents défauts statoriques possible.

II.2.3.1 Défauts d'isolant dans un enroulement

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

- dégradation de l'isolant à la fabrication,
- tension de l'enroulement supérieur à la limite du matériau d'isolation,

- courant élevé dans l'enroulement dû à un court-circuit, un défaut du convertisseur, une surcharge,
- vibrations mécaniques,
- vieillissement naturel des isolants.
- fonctionnement dans un environnement sévère.

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

II.2.3.2 Court-circuit entre spires

Un court-circuit entre spires de la même phase est un défaut assez fréquent qui a pour origine un ou plusieurs défauts d'isolant dans l'enroulement concerné. Il entraîne une augmentation des courants statoriques dans la phase affectée, une légère variation de l'amplitude sur les autres phases, modifie le facteur de puissance et amplifie les courants dans le circuit rotorique dans le cas des machines asynchrones. Ceci a pour conséquence une augmentation de la température au niveau du bobinage et, de ce fait, une dégradation accélérée des isolants, pouvant provoquer ainsi, un défaut en chaîne (apparition d'un 2^{ème} court-circuit). Par contre, le couple électromagnétique moyen délivré par la machine reste sensiblement identique hormis une augmentation des oscillations de couple liées au déséquilibre des courants de phases engendré par le défaut [33].

II.2.3.3 Court-circuit entre phases

Ce type de défaillance peut arriver en tout point du bobinage. Cependant les répercussions ne seront pas les mêmes selon la localisation. Cette caractéristique rend difficile une analyse de l'incidence de ce défaut sur le système.

L'apparition d'un court-circuit proche de l'alimentation entre phases, induirait des courants très élevés qui conduiraient à la fusion des conducteurs d'alimentation et/ou à la disjonction par les protections. D'autre part, un court-circuit proche du neutre entre deux phases a de

moins graves conséquences ; il engendre un déséquilibre des courants de phases avec un risque moindre de la fusion des conducteurs.

Les courants statoriques sont totalement déséquilibrés et ce déséquilibre dépend de la localisation du défaut. Dans le cas des machines asynchrones, les courants dans les barres ainsi que dans les anneaux sont augmentés lors de l'apparition de ce type de défaut. La détection de ce type de défaut peut reposer sur le déséquilibre des courants de phases [34].

La figure (2.5) représente les dégâts provoqués par les défauts de courts-circuits statoriques.

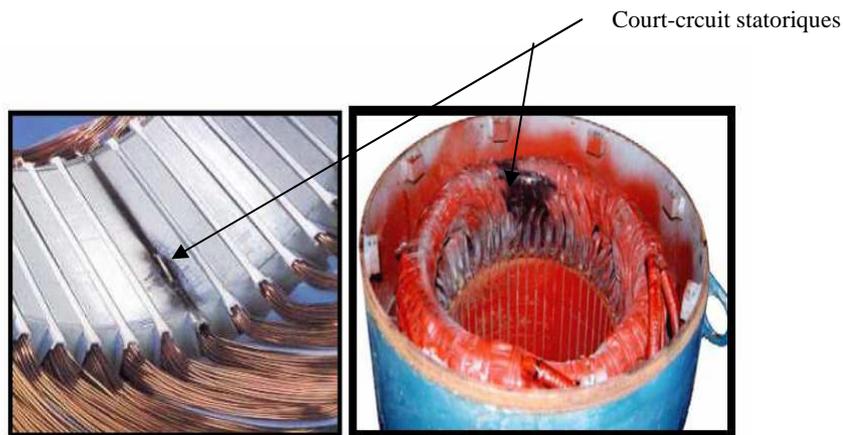


Figure 2.5: Dégâts de courts-circuits

II.3. Surveillance des machines électriques

De manière générale, lors d'une apparition d'un défaut dans le bobinage statorique d'une machine électrique, sa topologie est modifiée, ce qui implique la modification de certaines grandeurs caractérisant l'état de la machine. Les manifestations de ces défauts sont perceptibles soit par l'intermédiaire:

- des modifications des propriétés de certains signaux que l'on peut capter sur le dispositif,
- des modifications de certains paramètres physiques du dispositif.

Ces deux possibilités conduisent à définir deux classes de méthodes de surveillance et de diagnostic à base du signal modèle.

II.3.1. Approche signal

Le principe des méthodes d'analyse du signal repose sur l'existence des caractéristiques fréquentielles propres au fonctionnement sain ou défaillant du procédé. La première étape

dans cette approche concerne la modélisation des signaux en les caractérisant dans le domaine fréquentiel, en déterminant leur contenu spectral, leur variance, etc.

L'apparition d'un défaut étant à l'origine de nombreux phénomènes tels que le bruit, l'échauffement, les vibrations, etc. Ces symptômes sont la manifestation flagrante d'une modification des caractéristiques temporelles et fréquentielles des grandeurs électriques et mécaniques. Dans la littérature sont présentées plusieurs techniques de détection de défauts par traitement du signal qui est utilisé depuis de nombreuses années pour détecter des défaillances dans les machines électriques, essentiellement les défauts rotoriques. Le défaut étant traduit par l'apparition de fréquences directement liées à la vitesse de rotation, ces méthodes se trouvent bien adaptées à la détection de défauts, exigeant uniquement un capteur de courant ou/et capteur de vitesse, l'analyse spectrale est de loin la méthode de diagnostic la plus économique et la plus rapide, d'où son succès auprès des industriels. Cependant, cette méthode se prête uniquement au diagnostic à vitesse constante et principalement sur des machines alimentées par le réseau constant [35].

II.3.1.1 Analyse spectrale

L'analyse spectrale est utilisée depuis de nombreuses années pour détecter des défaillances dans les machines électriques, essentiellement les ruptures de barres au rotor des machines asynchrones, la dégradation des roulements, les excentricités et les court-circuits dans les bobinages. Ces cas se prêtent bien à cette approche dans la mesure où de nombreux phénomènes se traduisent par l'apparition de fréquences directement liées à la vitesse de rotation ou à des multiples de la fréquence d'alimentation.

La surveillance par analyse spectrale de la machine électrique consiste à effectuer une transformée de Fourier des grandeurs affectées par le défaut, et à visualiser les fréquences parasites constituant la signature d'un défaut dans la machine. Les grandeurs choisies sont soit électriques, soit mécaniques. Cette technique permet une surveillance rapide et peu onéreuse car elle exige un simple capteur de courant ou de vibration [36-37].

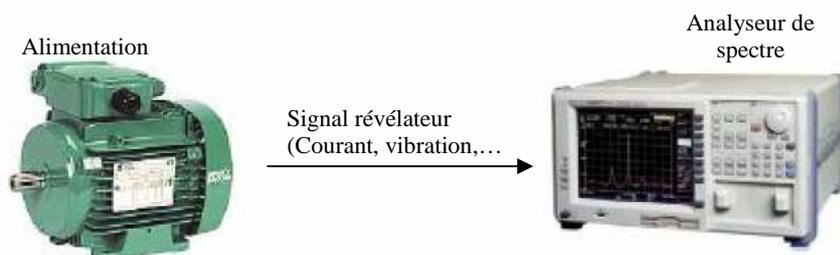


Figure 2.6 : Principe de surveillance par analyse spectrale

II.3.1.2 Démodulation synchrone

Le principe de cette méthode consiste à extraire la valeur de la composante de la raie associée au défaut dont la pulsation est bien connue. En pratique cette technique consiste à multiplier le signal modulé par un signal auxiliaire de même fréquence que la composante à rechercher. Un filtrage passe-bas permet alors de ne conserver que la composante continue de chaque signal. La composante continue obtenue en sortie est proportionnelle à l'amplitude de la composante harmonique du signal de la fréquence surveillée. Lorsque la fréquence de défaut est parfaitement connue, la démodulation synchrone conduit à de meilleurs résultats. Par contre, il est important de noter qu'une incertitude sur cette fréquence peut conduire à la non détection du défaut ou à d'éventuelles fausses alertes. Comme les défauts de la machine électrique sont généralement liés à la vitesse de rotation, cette méthode s'appuie sur la mesure de la vitesse de rotation. Dans le cas des entraînements à vitesse variable, cette technique s'avère inadaptée au diagnostic de la machine électrique ou alors elle nécessite une adaptation de la fréquence recherchée à la vitesse mesurée [38].

II.3.2 Approche modèle [39]

Le principe de la détection des défauts statoriques par une approche modèle repose sur la comparaison du comportement réel de la machine avec celui fourni par un modèle de représentation auquel sont appliquées les mêmes excitations qu'au système réel. La forme du modèle utilisé peut prendre plusieurs formes. Il peut être simplement basé sur une représentation en régime sain de la machine ou inclure dans sa formulation des éléments supplémentaires relatifs au défaut surveillé. Dans tous les cas, le principe de comparaison entre un dispositif surveillé et un modèle fait apparaître des différences comportementales de certaines grandeurs caractéristiques liées au fonctionnement de la machine. Ces différences sont appelées résidus. Ces résidus sont alors utilisés comme entrées d'un processus de détection des défauts. Ce principe est illustré sur la figure (2.7).

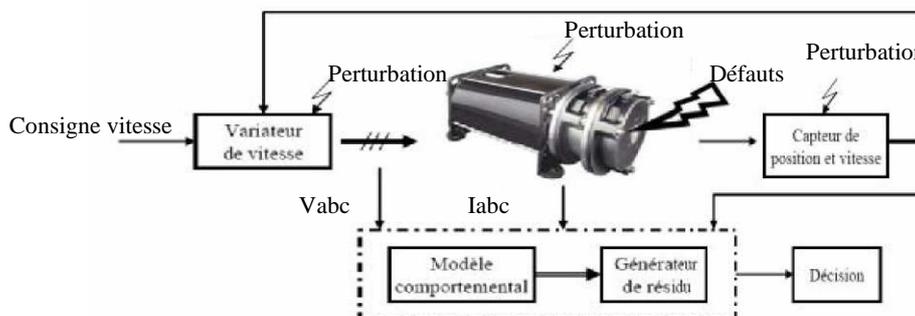


Figure 2.7 : Principe général du diagnostic des machines électriques à l'utilisation d'un modèle.

Il apparaît ainsi que la génération de résidus et son exploitation jouent un rôle primordial dans la procédure de surveillance/diagnostic puisque c'est elle qui conditionne la qualité de la prise de décision. Deux grandes approches de génération de résidus se sont développées:

- approche à base d'observateurs,
- approche par estimation paramétrique.

II.3.2.1 Approche à base d'observateurs

L'idée principale des méthodes de génération du vecteur de résidus à base d'observateurs est d'estimer une partie ou l'ensemble des mesures du système surveillé à partir des grandeurs mesurables. Le résidu est alors généré en formant la différence entre les sorties estimées et les sorties réelles [40]. L'observateur revient finalement à un modèle parallèle au système avec une contre réaction qui pondère l'écart de sortie. Ce principe est illustré sur la figure (2.8). Les résidus ainsi générés sont exploités par un système de décision permettant de déterminer l'action à mener en fonction des propriétés du résidu.

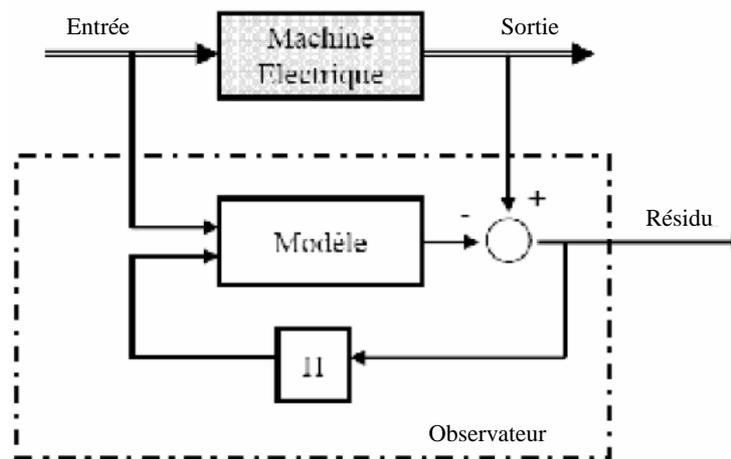


Figure 2.8: Schéma de principe de l'approche à base d'observateur

II.3.2.2 Approche par estimation paramétrique

Cette méthode de diagnostic utilise les paramètres structuraux d'un modèle de connaissance et extrait par la suite les paramètres du système à partir des lois de connaissance pour détecter et localiser les défaillances. Le point essentiel de l'efficacité de cette méthode est le choix du modèle de connaissance. En effet, le type de défaut que l'on voudra détecter sera fonction du modèle utilisé. Les premiers travaux avec cette méthode, ont débuté avec des méthodes relativement simples citons par exemple le modèle de Park qui est utilisé depuis plusieurs années pour la commande des machines électriques [41].

II.4 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les différents types de défauts pouvant survenir dans les machines électriques. Ils peuvent être d'origine électrique, mécanique ou magnétique. Un des défauts les plus rencontrés étant le court-circuit entre spires qui est souvent dû à la dégradation de l'isolant suite à un échauffement excessif ou un champ électrique fort. Nous avons ensuite présenté les différentes méthodes de surveillance qui reposent souvent sur l'analyse des grandeurs mesurables et l'identification d'une signature d'un défaut déjà connu et répertorié.

Une modélisation et simulation de la machine synchrone à aimants permanents dans l'état sain et avec défauts sera l'objet du troisième chapitre.

Chapitre III

Modélisation et Simulation de la Machine Synchrone à Aimants Permanents (MSAP)

III. 1 Introduction

Historiquement, les servomoteurs utilisant des moteurs à courant continu ont assuré le fonctionnement de la plupart d'équipements industriels. Cependant, leur principal inconvénient et limitation est le collecteur mécanique. Pour cela leur remplacement par des machines à courant alternatif est nécessaire en raison aussi de la flexibilité de variation de vitesse et la stabilité de fonctionnement. Parmi les moteurs électriques à courant alternatif utilisés dans les entraînements, le moteur synchrone à aimants permanents (MSAP) reste un bon candidat à cause d'un certain nombre d'avantages qu'il présente, à savoir les pertes au rotor sont faibles, une grande capacité de surcharge, une vitesse stable et constante à une fréquence donnée et surtout à cause de son couple massique élevé comparativement à celui du moteur asynchrone [42]. L'étude des performances et de l'état de la MSAP nécessite la connaissance de son modèle. Pour cela dans ce chapitre sera présenté le modèle dans le repère (a, b, c) découlant des équations différentielles régissant le fonctionnement de la machine à l'état sain et avec défaut.

III.2 Modélisation de la MSAP à l'état sain

L'étude de tout système physique nécessite une modélisation en vue de simuler son comportement face à différentes sollicitations et d'appréhender ainsi les mécanismes régissant son fonctionnement.

Les lois modernes de commande de plus en plus performantes permettent un meilleur contrôle des régimes transitoires tout en assurant, dans une grande plage de fonctionnement, un asservissement précis de la vitesse. Tous ces perfectionnements demandent une bonne connaissance de la machine et de son convertisseur.

III.2.1 Hypothèses simplificatrices

La modélisation de la MSAP est subordonnée par les hypothèses simplificatrices suivantes [43] :

- induction dans l'entrefer est supposée sinusoïdale,
- distribution spatiale supposée sinusoïdale des forces magnétomotrices dans l'entrefer,
- circuit magnétique supposé non saturé, ce qui permet d'exprimer les flux comme fonctions linéaires des courants,
- harmoniques d'encoches et d'espace ne sont pas pris en compte,
- circuit magnétique supposé parfaitement feuilleté ainsi les courants de Foucault sont considérés négligeables,

- hystérésis, l'effet de peau ainsi que l'effet de la température sont considérés négligeables.

III.2.2 Modèle de la MSAP dans le repère triphasé (abc)

La MSAP comporte un stator fixe et un rotor mobile autour de l'axe de symétrie de la machine. Dans des encoches régulièrement réparties sur la face interne du stator sont logés trois enroulements identiques, à P paires de pôles; leurs axes sont distants entre eux d'un angle électrique égal à 120° .

Le modèle de la machine est représenté sur la figure (3.1) par ses trois enroulements statoriques dans l'espace électrique.

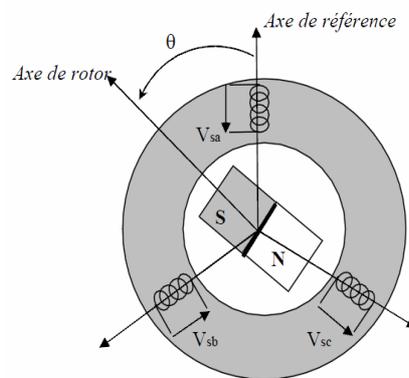


Figure 3.1 : Représentation du modèle d'une MSAP.

III.2.3 Mise en équation de la machine

Le modèle mathématique de la MSAP est similaire à celui de la machine synchrone classique en considérant les conditions simplificatrices citées précédemment.

On distingue trois types d'équations qui définissent internement le comportement de la machine à savoir:

- les équations électriques,
- les équations magnétiques,
- l'équation mécanique.

III.2.3.1 Equations électriques

Les équations électriques du stator d'une machine synchrone triphasée à aimants permanents s'écrivent:

$$\begin{cases} V_a = R i_a + \frac{d \phi_a}{dt} \\ V_b = R i_b + \frac{d \phi_b}{dt} \\ V_c = R i_c + \frac{d \phi_c}{dt} \end{cases} \quad (3.1)$$

avec :

R : Résistance d'un enroulement statorique.

i_{abc} : Les courants des phases statorique a, b, c.

ϕ_{abc} : Les flux produits par les phases statoriques respectivement a, b, c.

V_{abc} : Les tensions des phases statoriques.

Les équations des tensions (équations électriques) peuvent être exprimées sous forme matricielle comme suit:

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_a \\ \phi_b \\ \phi_c \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

III.2.3.2 Equations magnétiques

En vertu les hypothèses d'une répartition spatiale sinusoïdale de l'induction, les flux induits par les aimants dans les trois phases statoriques a, b et c sont donnés par:

$$\begin{cases} \phi_{fa} = \phi_{\max} \cdot \cos \theta \\ \phi_{fb} = \phi_{\max} \cdot \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \phi_{fc} = \phi_{\max} \cdot \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \end{cases} \quad (3.3)$$

Le flux produit dans chaque enroulement statorique est la somme de quatre termes. Comme exemple, pour la phase 'a', le flux ϕ_a est la somme des termes:

$\phi_{aa} = L_s \cdot i_a$: flux propre de la phase a.

$\phi_{ba} = M_s \cdot i_b$: flux mutuel entre la phase b et a.

$\phi_{ca} = M_s \cdot i_c$: flux mutuel entre la phase c et a.

ϕ_{fa} : flux mutuel de l'aimant sur la phase a.

L'expression du flux total dans la phase 'a' est donnée par:

$$\varphi_a = \varphi_{aa} + \varphi_{ba} + \varphi_{ca} + \varphi_{fa} = L_s i_a + M_s (i_b + i_c) + \varphi_{fa}$$

Du fait que la machine est équilibrée a neutre isolé, on a : $(i_a + i_b + i_c = 0)$, d'où l'expression du flux dans la phase 'a' se réduit alors à :

$$\varphi_a = (L_s - M_s) i_a + \varphi_{fa} = L_{sc} \cdot i_a + \varphi_{fa} \quad (3.4)$$

Avec :

$L_{sc} = (L_s - M_s)$: Inductance cyclique d'un enroulement statorique.

L_s : Inductance propre d'une phase statorique.

M_s : Mutuelle inductance entres phases du stator.

Par conséquent, les expressions des flux dans les autres phases se déduisent par :

$$\begin{cases} \varphi_b = L_{sc} \cdot i_b + \varphi_{fb} \\ \varphi_c = L_{sc} \cdot i_c + \varphi_{fc} \end{cases} \quad (3.5)$$

En remplaçant les expressions des flux dans le système des tensions et on obtient:

$$\begin{cases} V_a = R \cdot i_a + L_{sc} \cdot \frac{di_a}{dt} + \frac{d\varphi_{fa}}{dt} \\ V_b = R \cdot i_b + L_{sc} \cdot \frac{di_b}{dt} + \frac{d\varphi_{fb}}{dt} \\ V_c = R \cdot i_c + L_{sc} \cdot \frac{di_c}{dt} + \frac{d\varphi_{fc}}{dt} \end{cases} \quad (3.6)$$

III.2.3.3 Expression du couple

La puissance électromagnétique instantanée s'écrit :

$$p_{em} = e_a \cdot i_a + e_b \cdot i_b + e_c \cdot i_c \quad (3.7)$$

D'où l'expression du couple électromagnétique :

$$c_{em} = \frac{p_{em}}{\Omega} = \frac{e_a \cdot i_a + e_b \cdot i_b + e_c \cdot i_c}{\Omega} \quad (3.8)$$

En remplaçant les FEM par leurs expressions en fonction des flux, on obtient :

$$c_{em} = p \cdot \left[i_a \cdot \frac{d \varphi_{fa}}{d \theta_e} + i_b \cdot \frac{d \varphi_{fb}}{d \theta_e} + i_c \cdot \frac{d \varphi_{fc}}{d \theta_e} \right] \quad (3.9)$$

III.2.3.4 Equation mécanique

L'équation mécanique de la machine s'écrit :

$$\begin{cases} J \frac{d\Omega}{dt} = (c_{em} - c_r - c_f) \\ c_f = f_c \cdot \Omega \end{cases} \quad (3.10)$$

III.2.3.5 Modèle de la MSAP

En développant le système d'équations (3.1) on peut déduire la forme finale des équations de la MSAP dans le repère triphasé (a, b, c):

$$\begin{cases} V_a = R \cdot i_a + L_{sc} \cdot \frac{d i_a}{dt} + P \cdot \Omega \cdot \frac{d \varphi_{fa}}{d \theta_e} = R \cdot i_a + L_{sc} \cdot \frac{d i_a}{dt} + e_a \\ V_b = R \cdot i_b + L_{sc} \cdot \frac{d i_b}{dt} + P \cdot \Omega \cdot \frac{d \varphi_{fb}}{d \theta_e} = R \cdot i_b + L_{sc} \cdot \frac{d i_b}{dt} + e_b \\ V_c = R \cdot i_c + L_{sc} \cdot \frac{d i_c}{dt} + P \cdot \Omega \cdot \frac{d \varphi_{fc}}{d \theta_e} = R \cdot i_c + L_{sc} \cdot \frac{d i_c}{dt} + e_c \\ c_{em} = p \cdot \left[i_a \cdot \frac{d \varphi_{fa}}{d \theta_e} + i_b \cdot \frac{d \varphi_{fb}}{d \theta_e} + i_c \cdot \frac{d \varphi_{fc}}{d \theta_e} \right] \\ J \frac{d\Omega}{dt} = C_{em} - C_r - C_f \end{cases} \quad (3.11)$$

Ces dernières équations constituent la base du schéma bloc de la MSAP dans l'environnement Simulink (figure 3.2)

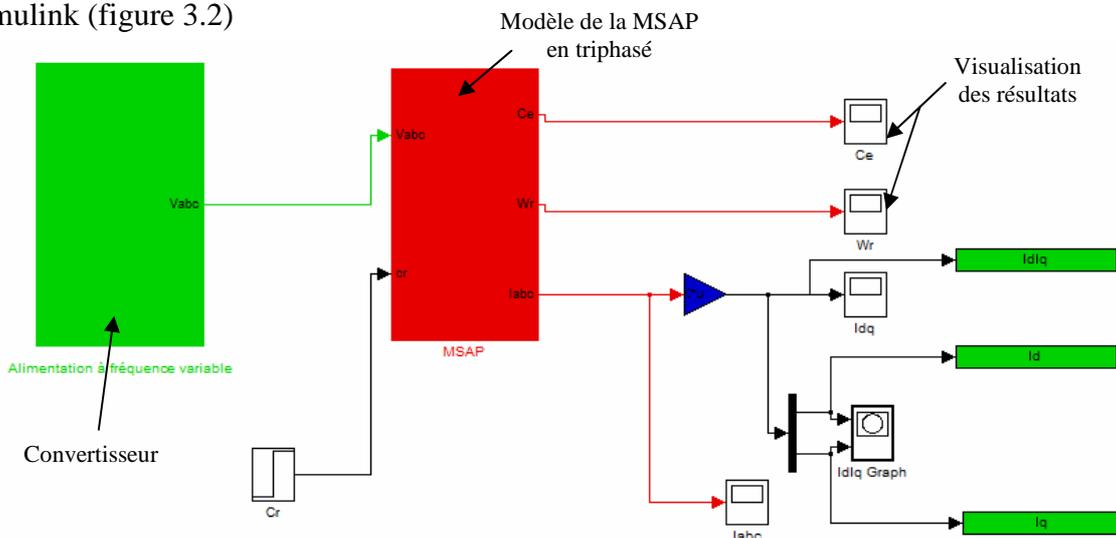


Figure 3.2 : Schéma bloc de la MSAP dans l'environnement Simulink

III.3 Alimentation de la MSAP

La machine synchrone à aimants permanents (MSAP) est alimentée par une source de tensions à fréquence variable en vue d'un démarrage progressif à fréquence variable au lieu de l'autopilotage de la position du rotor; car la machine ne peut pas démarrer directement à travers le réseau en fonctionnement moteur.

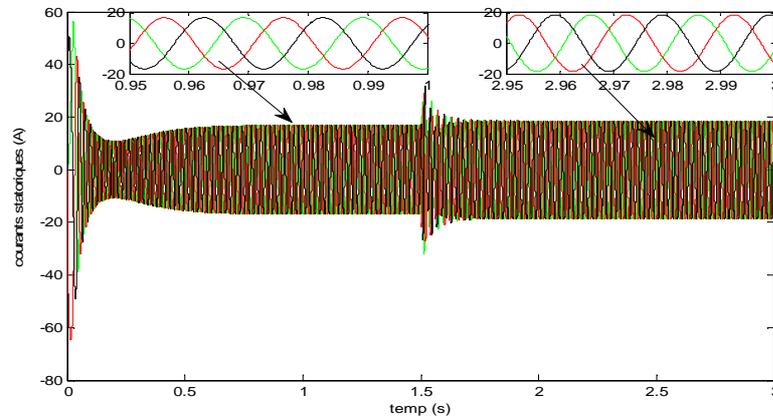
III.4. Simulation du modèle de la MSAP

Une fois le modèle de la machine synchrone à aimants permanents établie, nous pouvons aborder l'aspect lié à la simulation de celle-ci en utilisant *MATLAB/SIMILINK*. Ce la permet de mettre en évidence le comportement de la machine synchrone à aimants permanents dans le cas où la machine est saine et dans le cas où la machine est défaillant.

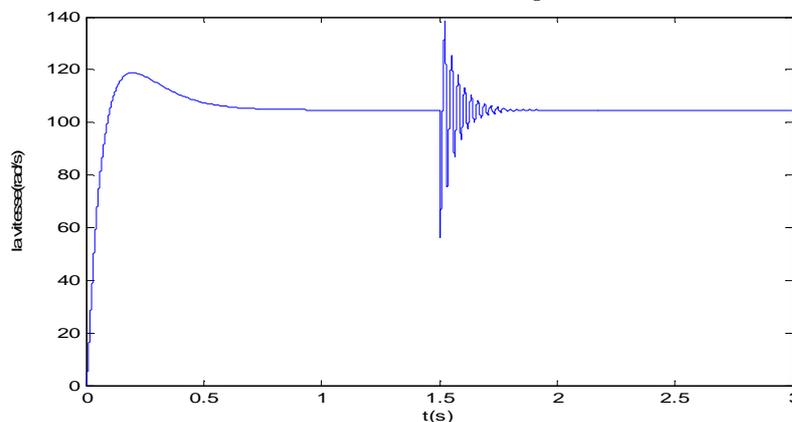
III.4.1. Cas de la machine saine sans défaut

Les paramètres de la machine synchrone à aimants permanents utilisée en simulation sont donnés en annexe A.

Le démarrage de la machine est effectué à fréquence variable à vide, une fois le démarrage est réalisé un régime permanent est établi, la machine est chargé à l'instant $t=1.5s$



a. Courants statoriques



b. la vitesse de rotation

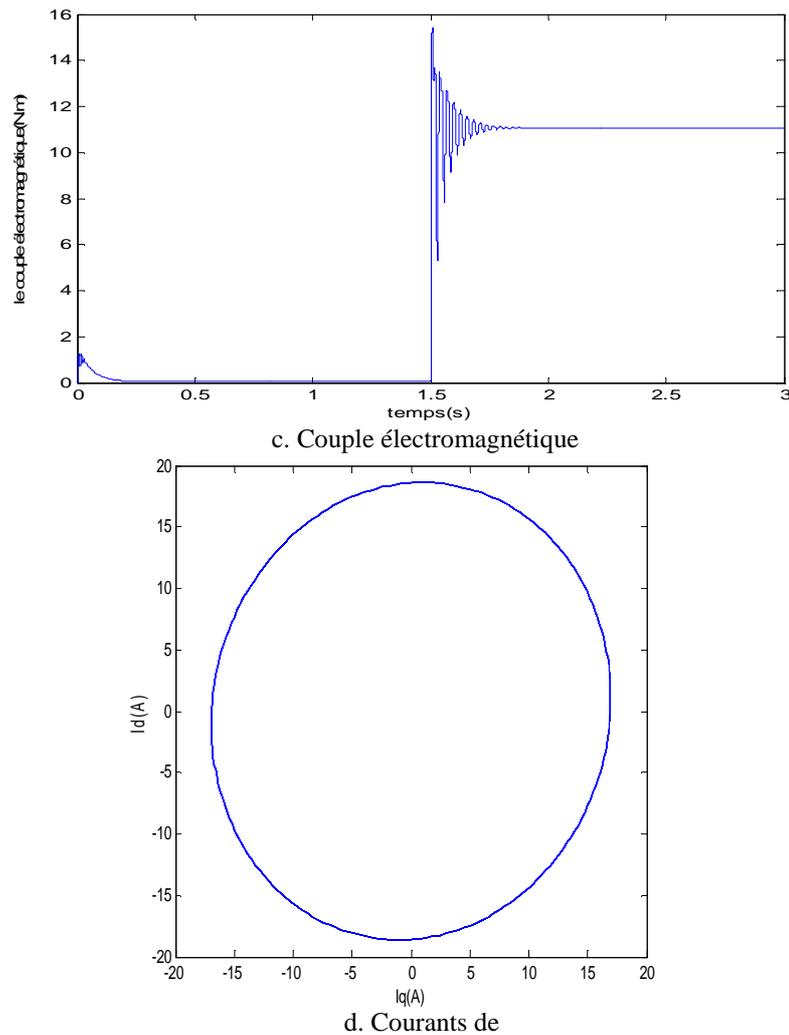


Figure 3.3 : Caractéristique de la MSAP en charge

Les résultats de simulation ainsi obtenus sont représentés sur la figures (3.3) où l'évolution de quelques variables fondamentales de la MSAP à savoir la vitesse de rotation (figure 3.3b), le couple électromagnétique (figure 3.3c), les courants statoriques (figure 3.3a) et les courants de Park dans le repère (d, q) (figure 3.3d).

On note, en fonctionnement à vide de la MSAP, un appel excessif du courant lors de la mise sous tension du moteur en régime transitoire provoqué par le démarrage progressive à fréquence variable, qui ce stabilise pour donner lieu à une forme sinusoïdale d'amplitude constante.

La vitesse augmente progressivement dans le régime transitoire jusqu'à se stabilise au régime permanent à une valeur fixe (figure 3.3b). La durée de mise en vitesse (environ 0.6 s) est déterminé par l'inertie totale autour de l'arbre de rotation, le moteur n'étant pas chargé, la vitesse atteinte est égale à la vitesse de synchronisme (104.71 rad/s).

Le couple électromagnétique n'est pas important en raison du démarrage progressive il atteint une valeur maximale de 1.3 Nm au bout de 0.01s (figure 3.3c) et se stabilise à une valeur de 0.0733 N.m correspondant au pertes par frottement (couple à vide).

En charge, une perturbation du couple ($C_r = 11$ Nm), est appliquée à l'arbre de la machine à l'instant $t = 1.5$ s. Le couple électromagnétique se stabilise finalement à la valeur du couple de charge, évidemment on observe une perturbation de la vitesse de rotation avant qu'elle stabilise a nouveau à 104.71 rad/s (figure 3.3b), le couple de charge ne doit pas atteint le couple de décrochage. Si on dépasse le couple de décrochage le moteur va s'arrêter parce que la force d'attraction ne suffi pas pour attirer les pôles de rotor. On remarque également une augmentation de l'amplitude des courants statorique (figure 3.3a).

III.5 Fonctionnement en défaut de la MSAP

Dans ce qui suit, on considère que la machine fonctionne dans son état dégradé provoqué par:

- Un court circuit d'une phase,
- Coupure d'une phase,
- Déséquilibre des tensions statorique.

Pour cela, on désigne par a , b , c , V_a , V_b et V_c les tensions d'alimentations de la machine tel que a , b , c sont des valeurs réelles introduites pour définir les différents type de déséquilibre de la tension d'alimentation:

$$\begin{cases} V_a = a.V_a \\ V_b = b.V_b \\ V_c = c.V_c \end{cases}$$

III.5.1 cas d'une ouverture d'une phase

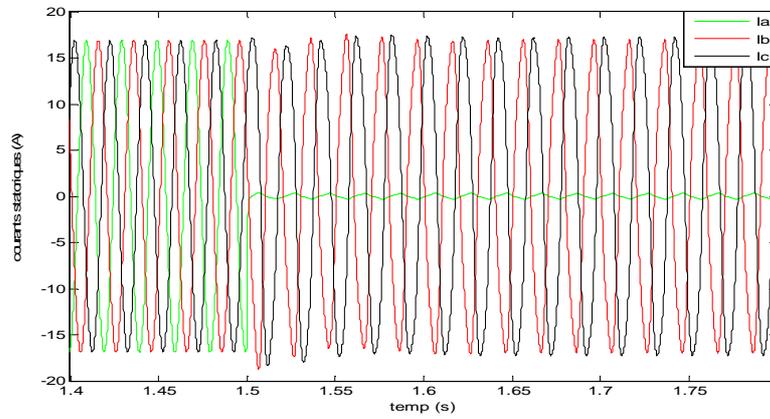
L'équation de la phase court-circuitée en fonctionnement stationnaire devienne:

$$\begin{cases} V_a = (R + R_f) i_a + L_{sc} \cdot \frac{d i_a}{dt} + e_a \\ V_b = R \cdot i_b + L_{sc} \cdot \frac{d i_b}{dt} + e_b \\ V_c = R \cdot i_c + L_{sc} \cdot \frac{d i_c}{dt} + e_c \\ c_{em} = p \cdot \left[i_a \cdot \frac{d \varphi_{fa}}{d \theta_e} + i_b \cdot \frac{d \varphi_{fb}}{d \theta_e} + i_c \cdot \frac{d \varphi_{fc}}{d \theta_e} \right] \\ J \frac{d \Omega}{dt} = (c_{em} - c_r - c_f) \end{cases} \quad (3.12)$$

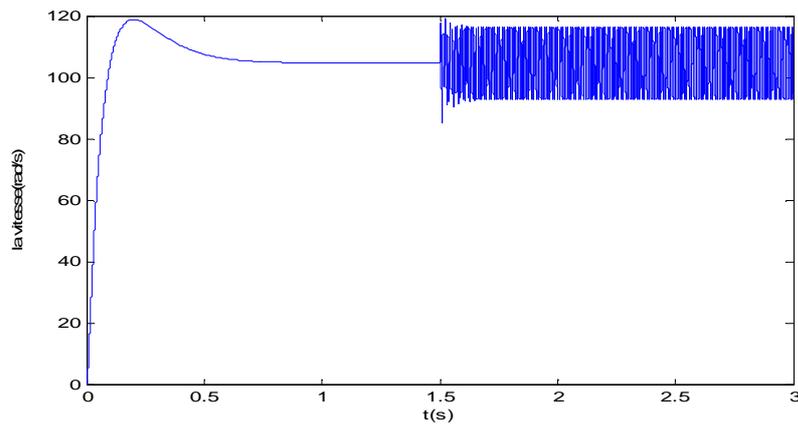
Dans ce cas la résistance de court-circuit considéré est R_f de valeur $R_f = 90 * R$

Les résultats de simulation dans le cas d'une ouverture d'une phase sont représentés sur les figures (3.4), (3.5) et (3.6).

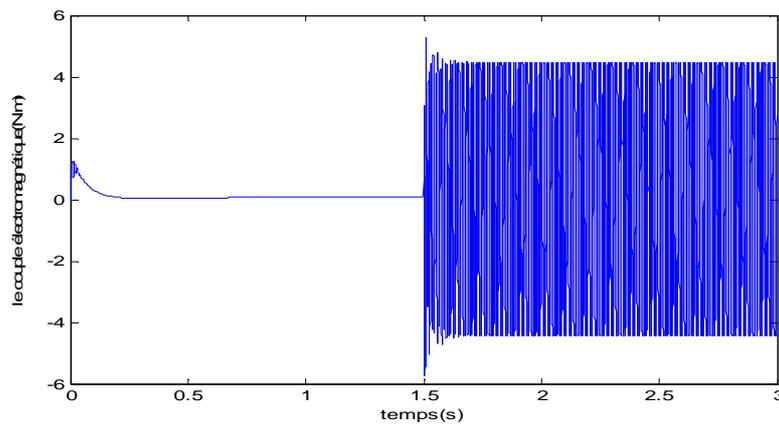
a) court circuit de la phase a d'alimentation



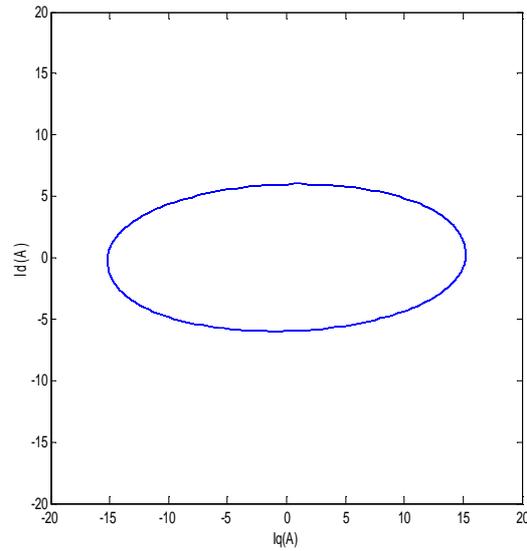
a. Courants statoriques en cas de défaut dans la phase a



b. la vitesse de rotation



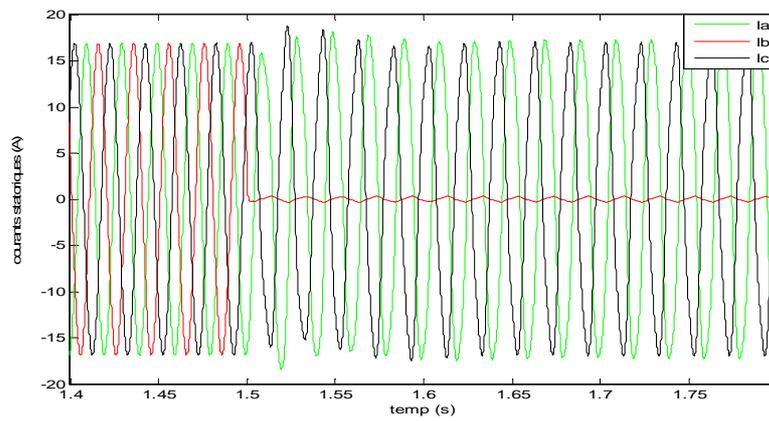
c. Couple électromagnétique



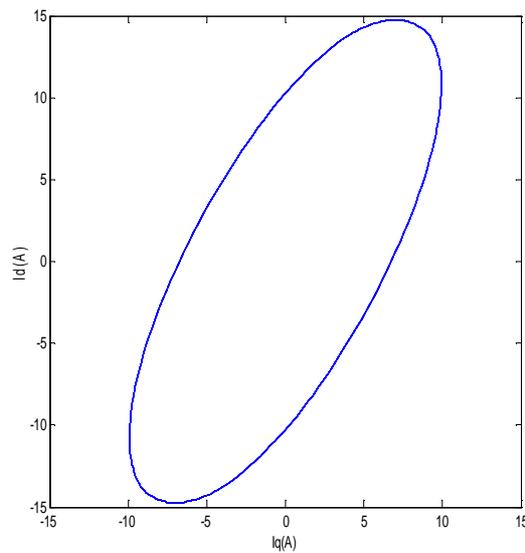
d. Courants de Park en défaut

Figure (3.4) : Courbes dans le cas de court circuit de la phase a

b) court circuit de la phase b d'alimentation



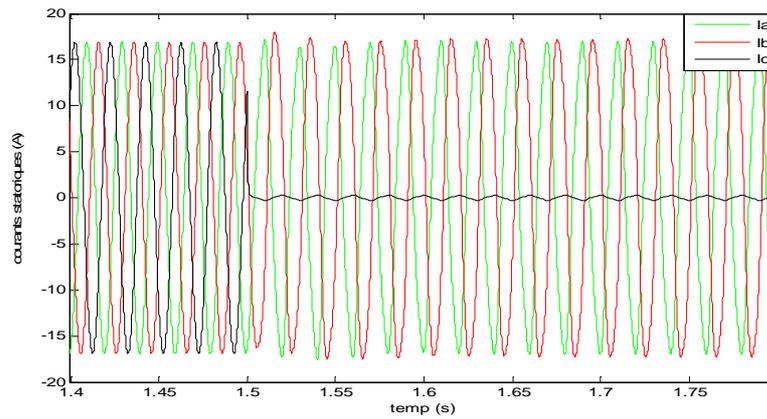
a. Courants statoriques en cas de défaut dans la phase b



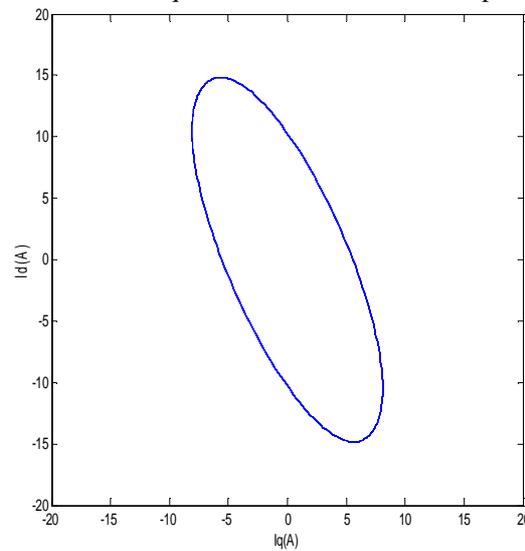
b. Courants de Park en cas de défaut dans la phase b

Figure (3.5) : Courbes dans le cas de court circuit de la phase b

c) *court circuit de la phase c d'alimentation*



a. Courants statoriques en cas de défaut dans la phase c



b. Courants de Park en cas de défauts dans la phase c

Figure (3.6) : Courbes dans le cas de court circuit de la phase c

En régime établi, on a introduit à l'instant $t= 1.5s$ un défaut de type court-circuit. On remarque au moment de l'ouverture de la phase a (figure 3.4) ou b (figure 3.5) ou c (figure 3.6), que le courant de la phase court-circuitée tend vers à zéro ; car sa résistance est très grande par rapport aux autre phases. Les courants des phases saines gardent leurs amplitudes constantes, le défaut provoque des ondulations sur la vitesse et le couple.

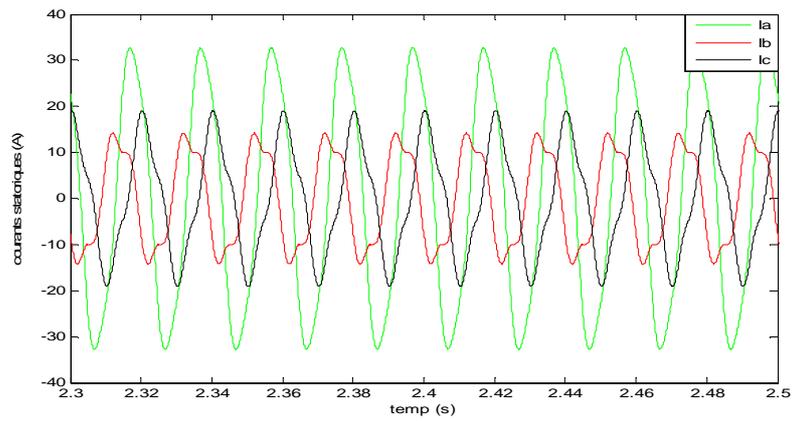
III.5.2 Cas d'une coupure de la tension d'alimentation

Pour ce type de défaut on considère que:

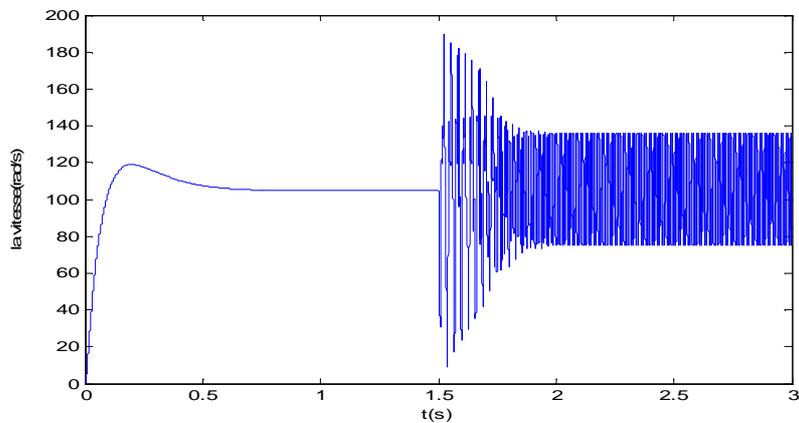
- La coupure de tension de la phase (a) : $(a=0, b=1, c=1)$.
- La coupure de tension de la phase (b) : $(a=1, b=0, c=1)$.
- La coupure de tension de la phase (c) : $(a=1, b=1, c=0)$.

Les résultats de simulation de ce type de défaut sont représentés sur la figure (3.7).

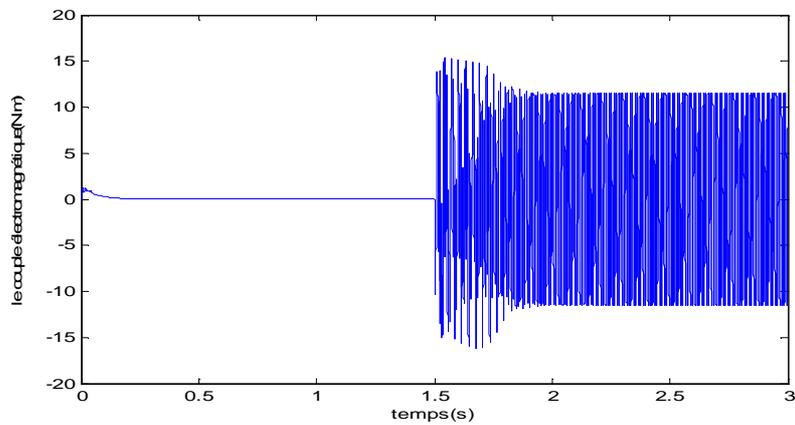
a) Coupure de la phase a



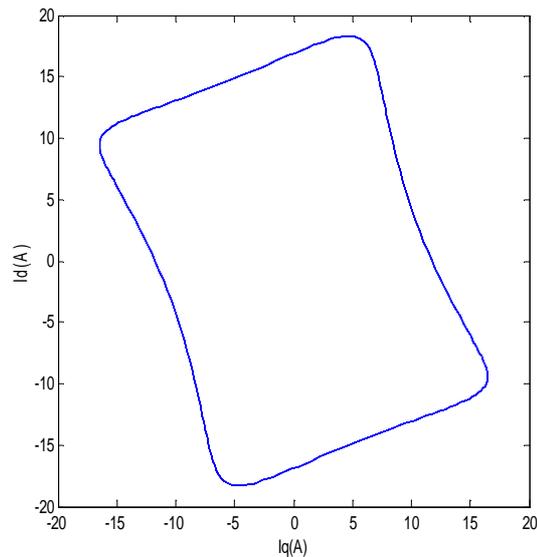
a. Courants statorique des phases (b et c)



b. la vitesse de rotation



c. Couple électromagnétique



d. Courants de Park

Figure (3.7) : Coupure de la phase a

On remarque d'après la figure (3.7) que la coupure de la tension d'alimentation des phases a ou b ou c, génère un déséquilibre sur les courants de ligne malgré les deux phases restent saines, une augmentation de deux fois de courant de la phase qui manque. Cette coupure engendre des ondulations et des oscillations sur la vitesse et le couple électromagnétique.

la coupure d'une phase engendre des oscillations de vitesse plus grande que l'ouverture et le déséquilibre d'une phase.

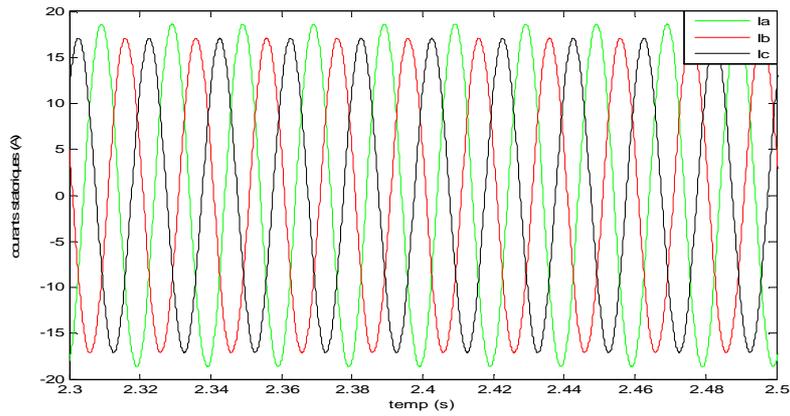
III.5.2 Cas d'un déséquilibre des tensions d'alimentation:

Pour ce type de défaut on a déséquilibre de 4% de tension d'alimentation et diminution de 4% de tension d'alimentation:

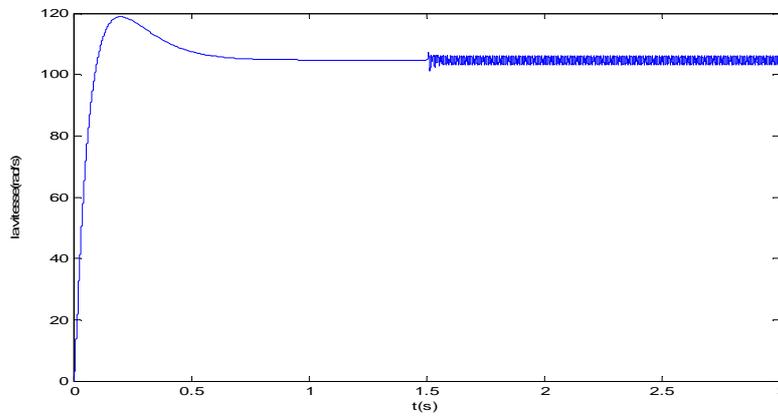
- Déséquilibre de tension de la phase (a) : $(a = 1.04, b = 1, c = 1)$
- Déséquilibre de tension de la phase (b) : $(a = 1, b = 1.04, c = 1)$
- Déséquilibre de tension de la phase (c) : $(a = 1, b = 1, c = 1.04)$
- Déséquilibre de tension de la phase (a) : $(a = 0.96, b = 1, c = 1)$
- Déséquilibre de tension de la phase (b) : $(a = 1, b = 0.96, c = 1)$
- Déséquilibre de tension de la phase (c) : $(a = 1, b = 1, c = 0.96)$

Les résultats de simulation de déséquilibre de tension d'alimentation sont représentés sur les figures (3.8) et (3.9).

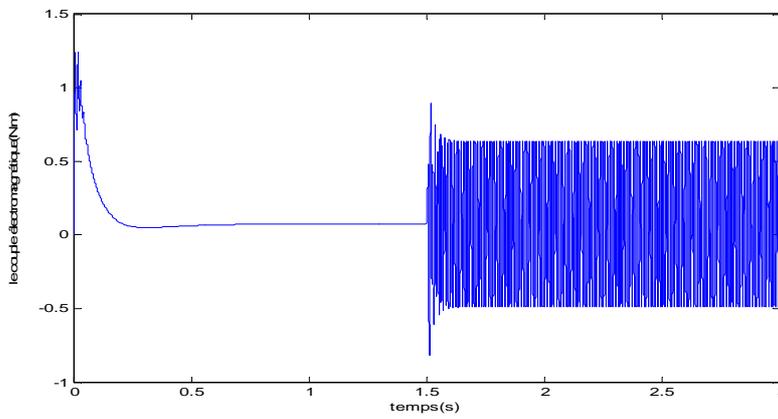
a) Déséquilibre de la phase (a) (augmentation de 4%)



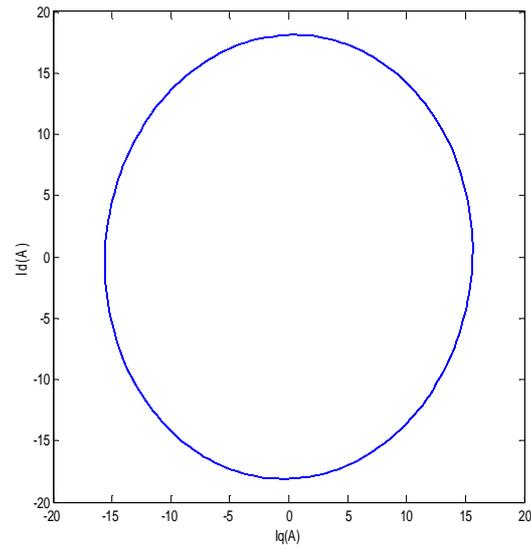
a) déséquilibre de la phase a



b) la vitesse de rotation



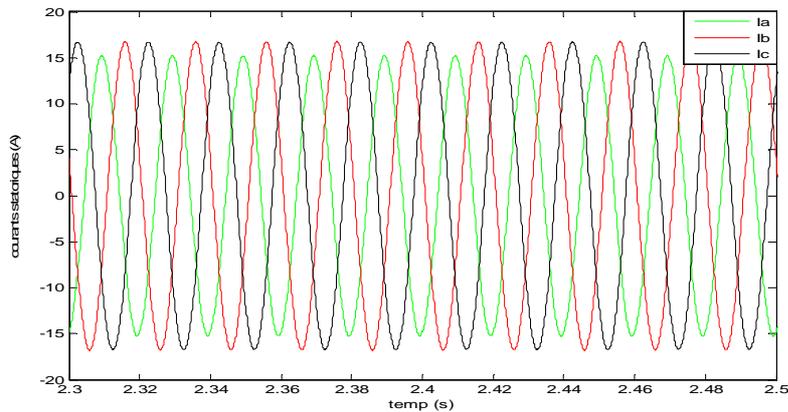
c) Couple électromagnétique



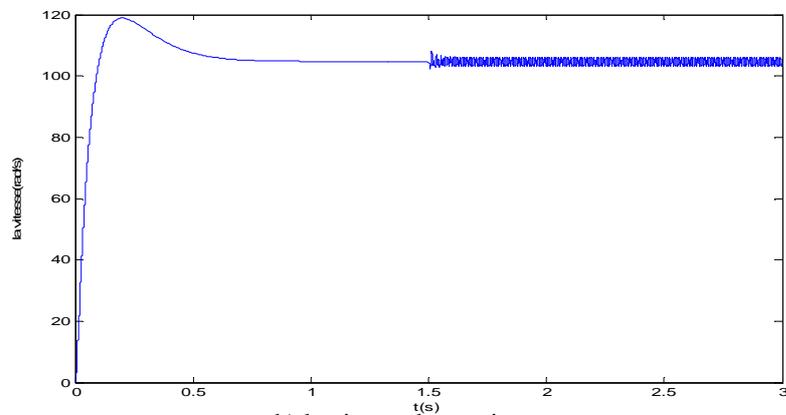
d) Courants de Park

Figure (3.8) : Déséquilibre de tensions de la phase a

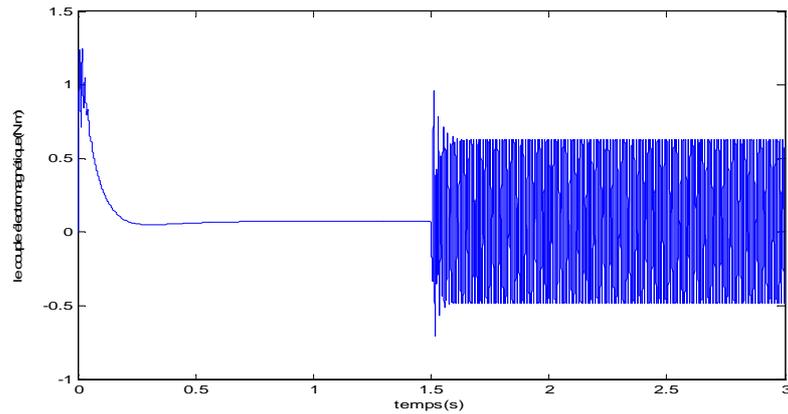
b) Déséquilibre de la phase (a) (diminution de 4%)



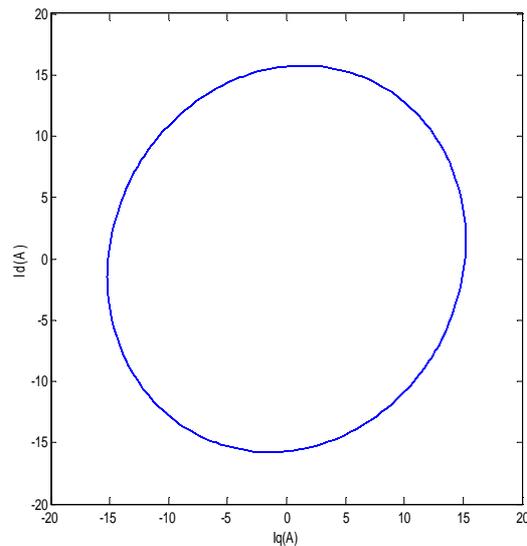
a) déséquilibre de la phase a



b) la vitesse de rotation



c) Couple électromagnétique



d) Courants de Park

Figure (3.9) : Déséquilibre de tension de la phase a

On a fait un déséquilibre des tensions d'alimentation, une augmentation et diminution de 4% de la tension nominale. On constate une augmentation de courant de la phase déséquilibrée, mais les autres phases gardent même amplitude figure (3.8). Pour la diminution on remarque une diminution de courant figure (3.9). Le déséquilibre influe sur la vitesse et le couple électromagnétique ; engendre des oscillations.

On remarque que le défaut de coupure d'une phase plus néfaste que l'ouverture et déséquilibre d'une phase car les ondulations du couple de coupure d'une phase est plus grande par rapport au couple de l'ouverture et déséquilibre d'une phase.

III.6. Analyse spectrale des défauts par la FFT

Après avoir simulé la machine synchrone à aimants permanents à l'état sain et avec les différents types des défauts qu'ils peuvent provoquer la machine. Dans cette partie on va analyser le spectre du courant dans l'état sain et en défaut.

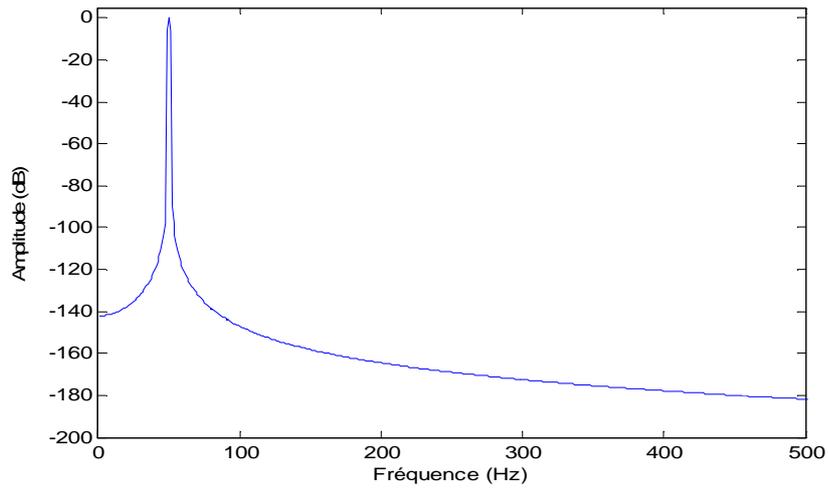


Figure 3.10 : Spectre du courant statorique à l'état sain

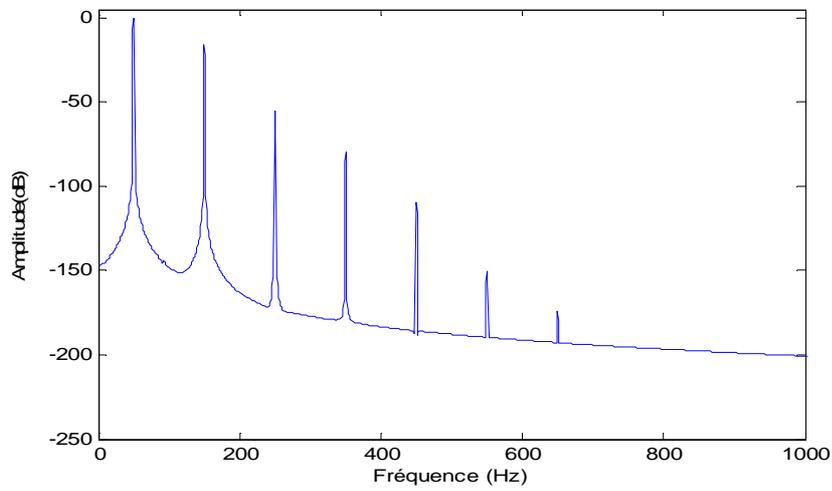


Figure 3.11 : Spectre du courant statorique pour un court circuit d'une phase

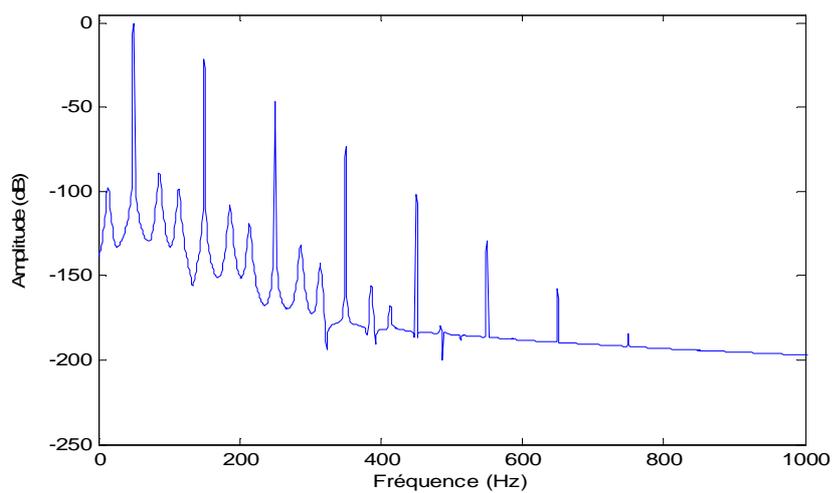


Figure 3.12 : Spectre du courant statorique pour coupure d'une phase

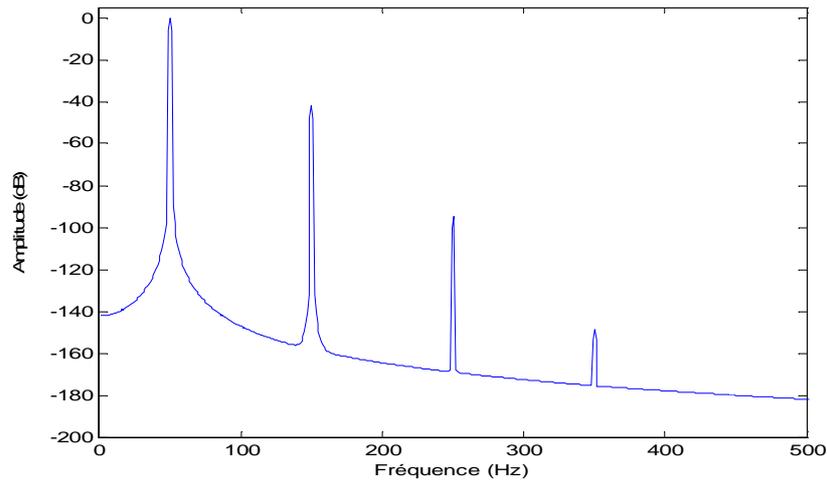


Figure 3.13 : Spectre de courant statorique pour augmentation de la tension 4%

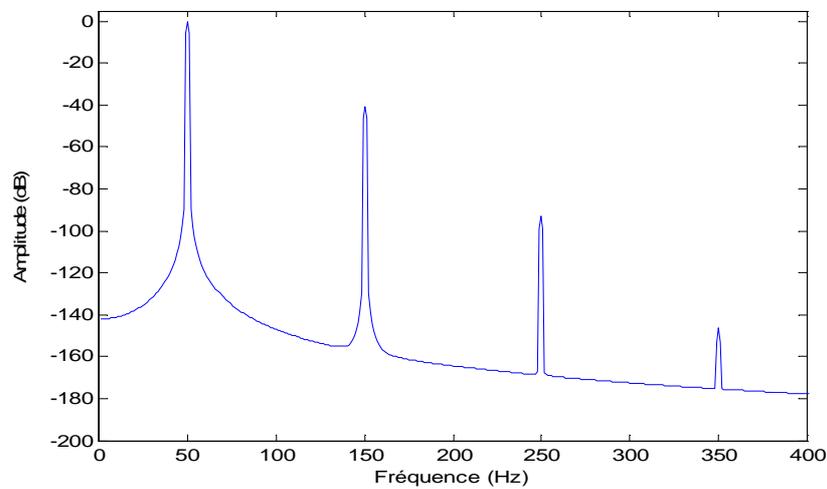


Figure 3.14 : Spectre de courant statorique pour diminution de la tension

Les figures (3.10 à (3.14) représentent le spectre du courant statorique pour $f=50$ Hz en régime sain et avec les défauts d'ouverture des phases, coupure des phases, et déséquilibre des phases.

Lors de la simulation du modèle de la machine en cas d'un fonctionnement sain, on n'observe aucune raie latérale autour de la fondamentale à 50 Hz. La figure (3.10) représente le contenu spectral du courant statorique en régime permanent.

Lorsque la machine présente un défaut de court circuit de phase, coupure d'une phase et déséquilibre d'une phase, le spectre du courant statorique fait apparaître des informations qui n'étaient pas décelables sur l'analyse temporelle.

Lors d'un court circuit d'une phase, on remarque l'apparition des raies et des harmoniques d'ordre impair des fréquences [150, 250, 350, 450 et 550] et avec les amplitudes [-23.3, -66.52, -93.76, -125.9 et -170.1], figure (3.11).

Lors d'une coupure d'une phase, on observe une augmentation de nombre des raies d'ordre impair, mais avec une diminution de l'amplitude avec des autres raies à faibles amplitudes, figure (3.12).

Lors d'un déséquilibre d'une phase on constate l'apparition des raies des fréquences [150, 250 et 350] et avec les amplitudes [-42.17, -94.47 et -148.5], figures (3.13) et (3.14).

III.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la simulation du modèle de la machine synchrone à aimants permanents en tenant compte des différentes conditions de fonctionnement sain (démarrage à vide et en charge) et en défauts (court circuit d'une phase, coupure des phases et déséquilibre des phases). Nous avons trouvé que le court circuit d'une phase provoque des oscillations dans le couple et dans la vitesse et sa courant tend vers à zéro. Nous avons vu aussi l'influence de coupure d'une phase sur les courants, la vitesse et le couple. Nous avons vu l'effet de déséquilibre des tensions d'alimentation.

L'analyse spectrale du courant statorique par la transformée de Fourier rapide, nous a permis de déterminer la composition fréquentielle de signaux du courant, et donc de retrouver les raies associées au défaut de court circuit de la phase, coupure des phases et déséquilibre des phases. Nous avons vu dans cette partie le nombre des raies de coupure d'une phase est plus grande que ouverture et déséquilibre d'une phase. Pour mettre en œuvre la simulation, une étude expérimentale est effectuée pour une machine synchrone classique qui fera l'objet du quatrième chapitre

Chapitre IV

Analyse Expérimentale:

Cas d'une machine

Synchrone classique

IV.1 Introduction

Dans les chapitres précédents, nous avons présenté les différents défauts que peuvent affecter la machine synchronique à aimants permanents ainsi leurs origines et leurs influences.

Dans ce chapitre nous allons présenter expérimentalement les différents types des défauts au niveau de l'alimentation en fonctionnement de la machine synchronique mais dans le cas à rotor bobiné.

Les tests expérimentaux sont effectués sur un banc expérimental au sein du laboratoire pédagogique d'électrotechnique à Batna utilisant une Dspace 1103.

Les caractéristiques du moteur utilisé sont:

- Puissance : 0.8 Kw
- Nombre de pôle : $P = 2$
- Tension : 220/380 v
- Vitesse de rotation : 1500 tr/mn
- Fréquence : 50 Hz
- Courant d'excitation : $I_{ex} = 0.6 A$

Les courants et les tensions des trois phases ainsi que la vitesse sont enregistrés en utilisant une interface Dspace et sont exploités en utilisant un programme implanté sous l'environnement MATLAB.



Figure 4.1 : Le banc d'essai utilisé

IV.2 Résultats expérimentaux : cas sain

Dans un premier temps, nous avons exploité les résultats expérimentaux à l'état sain dans les cas d'excitation de la machine inductif et capacitif. Les résultats sont représentés sur les figures (4.2) et (4.3).

IV.2.2 Cas d'une excitation de la machine en mode inductif

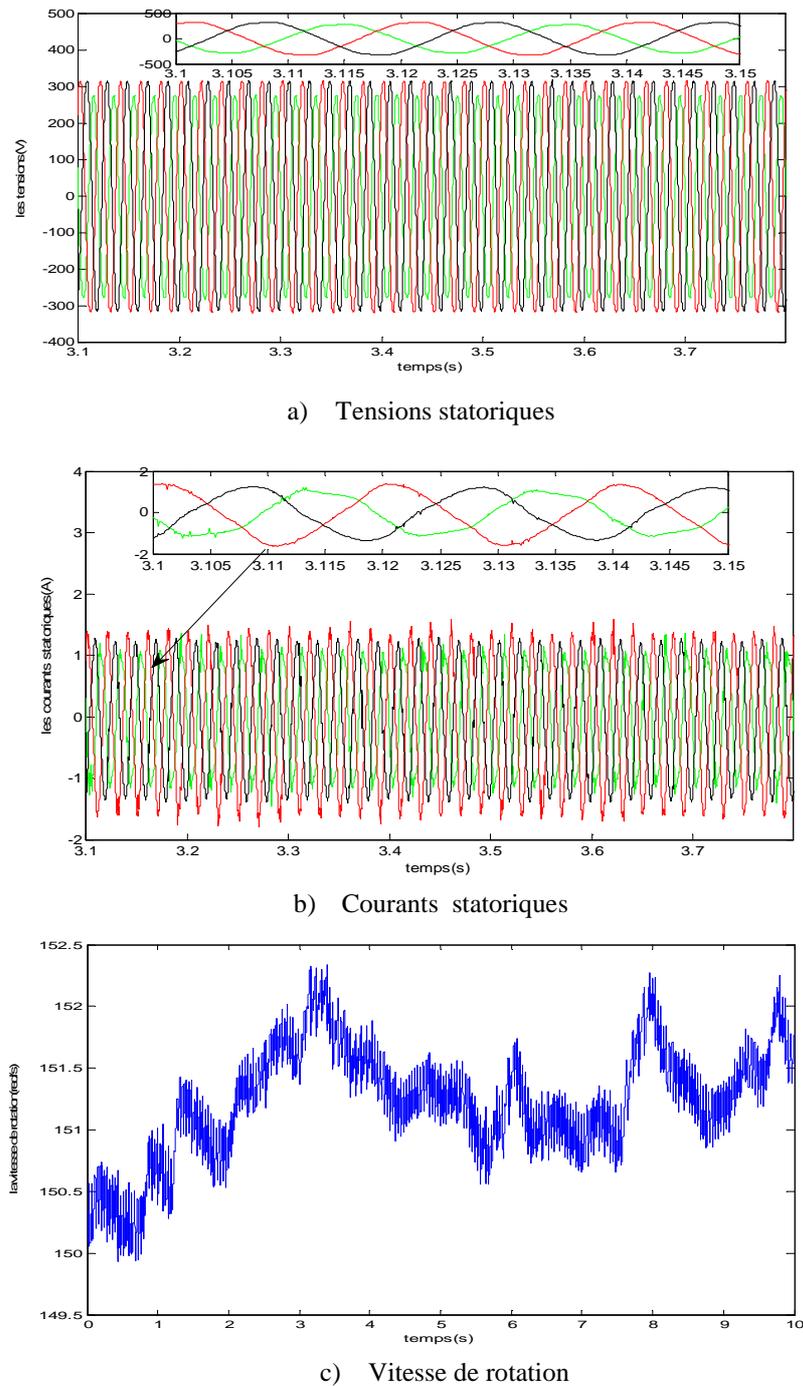
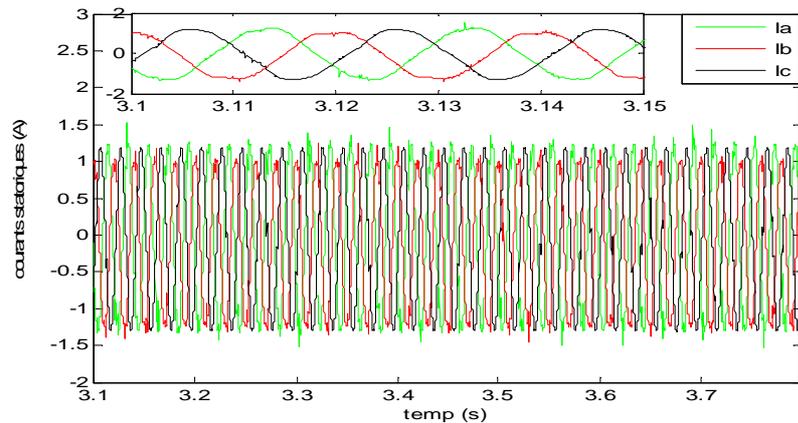
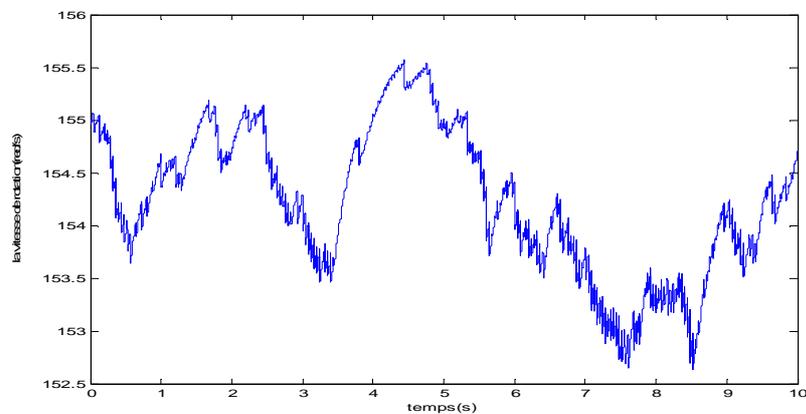


Figure 4.2 : Résultats pour un fonctionnement sain un mode d'excitation inductif de la machine

IV.2.3 Cas d'une excitation de la machine en mode capacitif



a) Courants statoriques



b) Vitesse de rotation

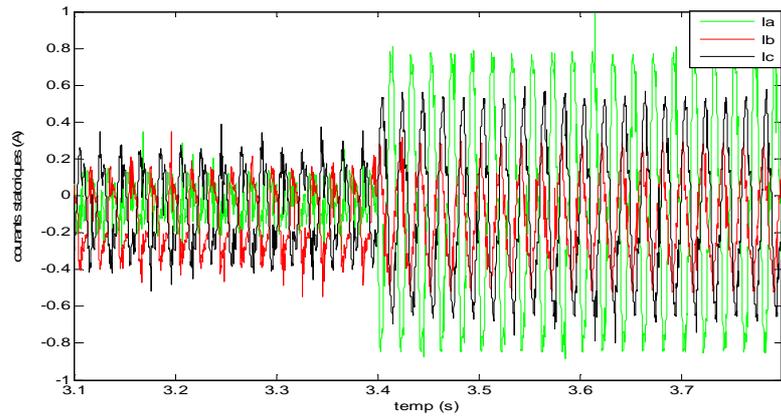
Figure 4.3 : Résultats pour un fonctionnement sain un mode d'excitation capacitif de la machine

Les figures (4.2) et (4.3) représentent les résultats expérimentaux d'une machine à rotor bobiné à l'état sain dans les cas inductif et capacitif. On remarque une augmentation de vitesse dans le cas capacitif avec des oscillations car la machine est surexcitée, les courants statoriques à une forme sinusoïdale d'amplitude constante dans les deux cas.

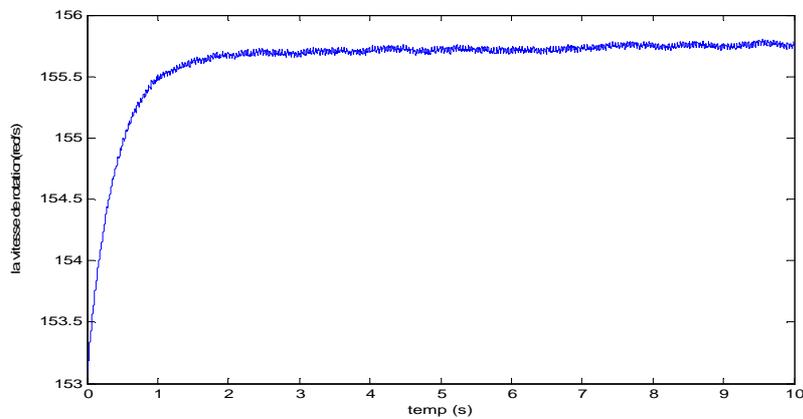
IV.3 Résultats expérimentaux : cas avec défauts

Dans cette partie nous avons exploité les résultats expérimentaux des différents types des défauts d'alimentation (circuit ouvert de la phase, déséquilibre des phases et coupure des phases) dans les cas inductif et capacitif. Les résultats sont représentés sur les figures (4.4), (4.5), (4.6), (4.7) et (4.8).

IV.3.1 Court circuit d'une phase



b) Courants statoriques



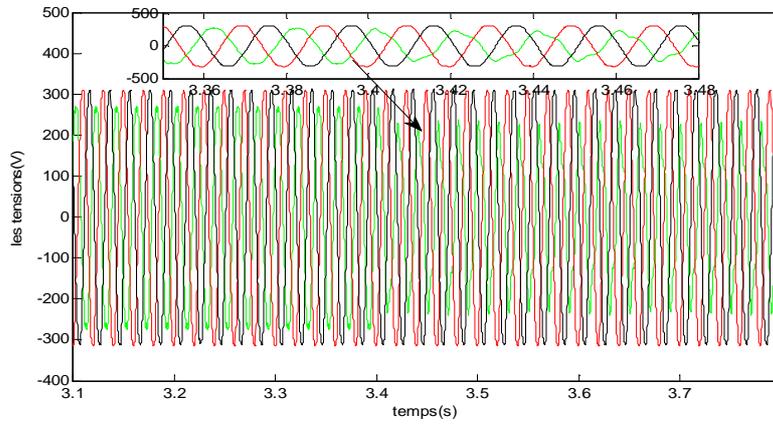
c) Vitesse de rotation

Figure 4.4 : Court circuit d'une phase

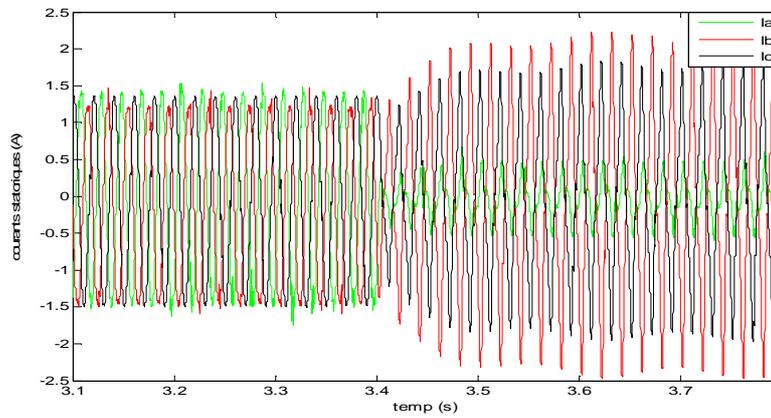
On remarque au moment du court circuit de la phase a ou b ou c sur la figure (4.4), une augmentation de quatre fois du courant de la phase court-circuité, ce qui génère un déséquilibre dans les autres phases. La vitesse reste stable pendant le court-circuit. Ce court-circuit fait seulement dans le cas résistif car dans le cas capacitif la machine fonctionne dans la zone instable ce qui engendre la bruit dans la machine.

IV.3.2 Déséquilibre des phases

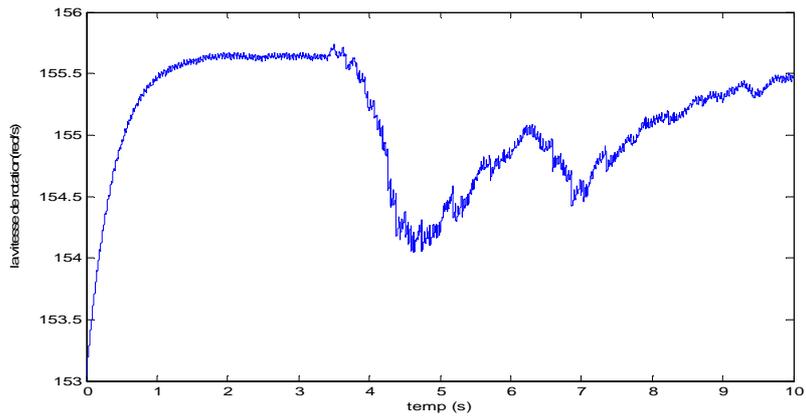
a) Déséquilibre d'une phase pour une excitation à $\cos \varphi > 0$ (inductif)



a) Tensions statoriques



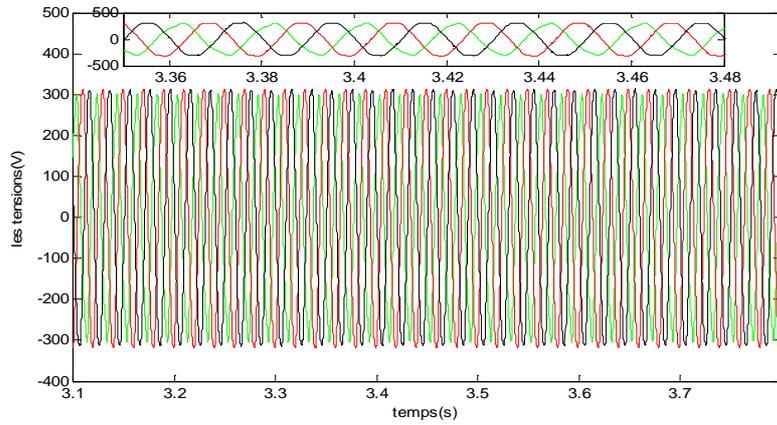
b) Courants statoriques



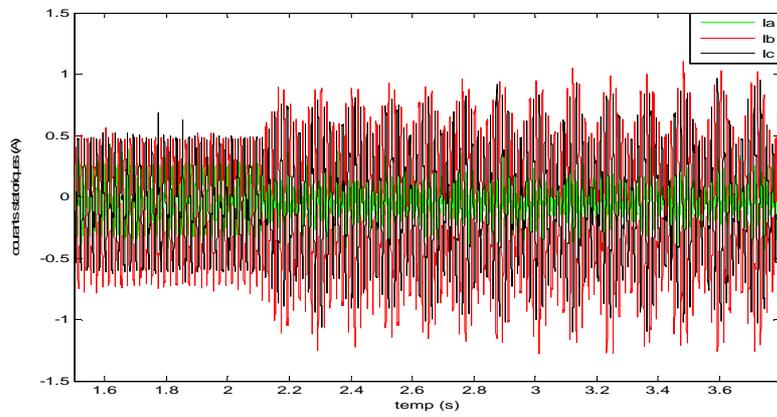
c) vitesse de rotation

Figure 4.5 : Résultats du déséquilibre ($\cos \varphi > 0$)

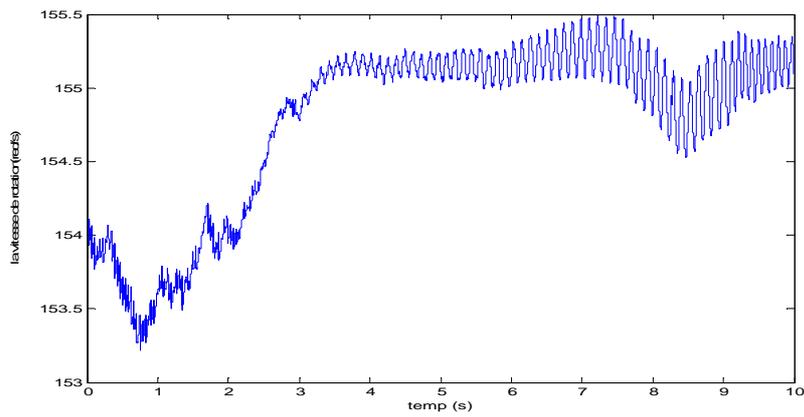
b) Déséquilibre d'une phase pour une excitation à $\cos \varphi < 0$ (capacitif)



a) Tensions statoriques



b) Courants statorique



c) Vitesse de rotation

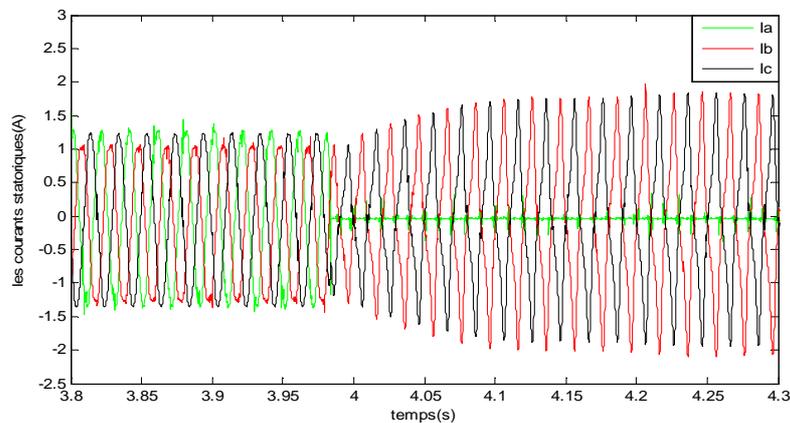
Figure 4.6: Résultats de déséquilibre $\cos \varphi < 0$

D'après la courbe (4.5), à l'instant de déséquilibre, on remarque une chute de tension de la phase (a) dû au déséquilibre inductif de la tension d'alimentation. Ce déséquilibre engendre une diminution du courant de la phase déséquilibré et une augmentation dans les autres phases. Pour la courbe de vitesse on constate une diminution de la valeur de la vitesse avec des oscillations, cette diminution du courant et de vitesse due car la machine est sous excitée.

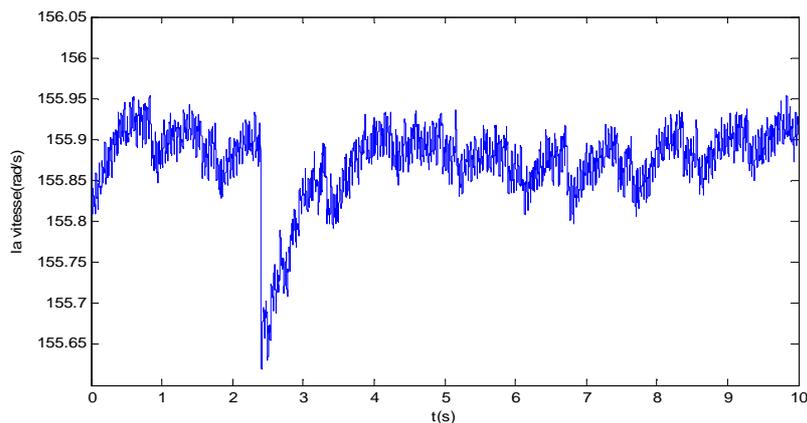
On remarque d'après la courbe (4.6) que le déséquilibre capacitif n'influe pas sur la tension d'alimentation, on constate les courants statoriques sont déséquilibré, la vitesse est augmenté à cause la machine est surexcitée.

IV.3.3 Coupure des phases

a) Coupure d'une phase pour une excitation à $\cos \varphi > 0$ (inductif)



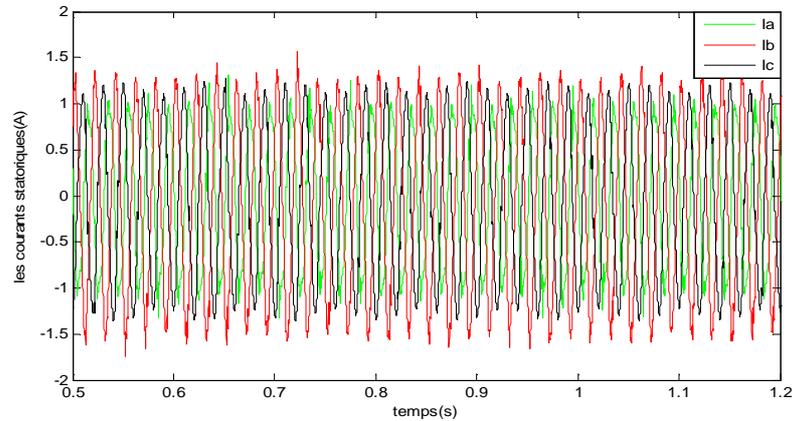
a) Courants statoriques



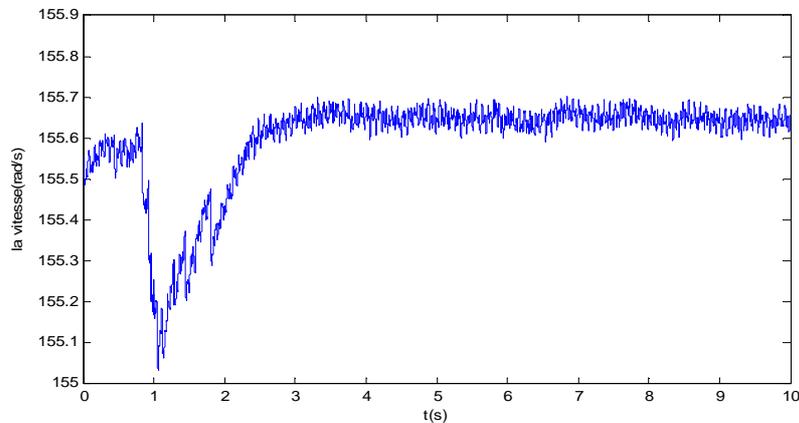
b) Vitesse de rotation

Figure 4.7 : Coupure de la phase a $\cos \varphi > 0$

b) Coupure d'une phase pour une excitation à $\cos \varphi < 0$ (capacitif)



a) Coupure capacitif de la phase a



b) Vitesse de rotation

Figure 4.8 : Coupure de la phase a $\cos \varphi < 0$

La courbe (4.7) représente les courants statoriques et la vitesse de rotation soumis à une coupure d'une phase inductif, on remarque au moment de la coupure de la phase le courant de cette dernière tend vers à zéro avec une augmentation du courant de les autres phases, malgré ces phases restent saines. On remarque aussi une chute instantanée sur la vitesse de rotation avec des oscillations, dans un temps court la vitesse revient à sa valeur nominale. Le déséquilibre capacitif n'influe pas sur les courants statoriques, la courbe (4.8) montre une coupure d'une phase capacitif, on remarque une diminution des oscillations de la vitesse.

IV. 4. Analyse spectrale des défauts par la FFT

Les résultats ainsi mesurés principalement du courant statorique sont analysés en utilisant la transformée de Fourier en régime permanent

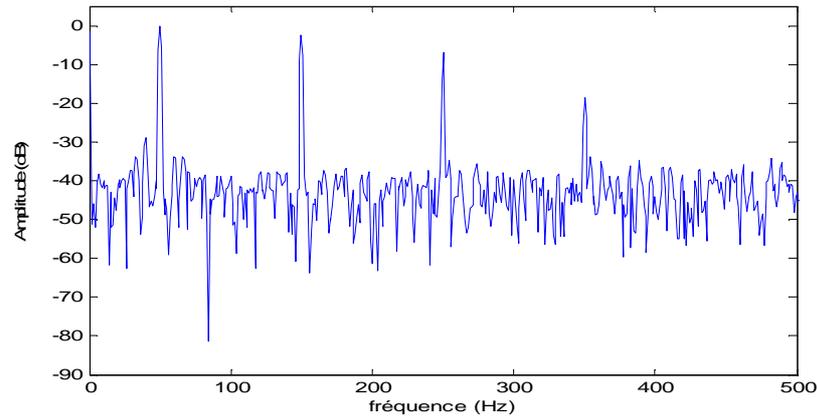


Figure 4.9 : Spectre des courants statorique à l'état sain

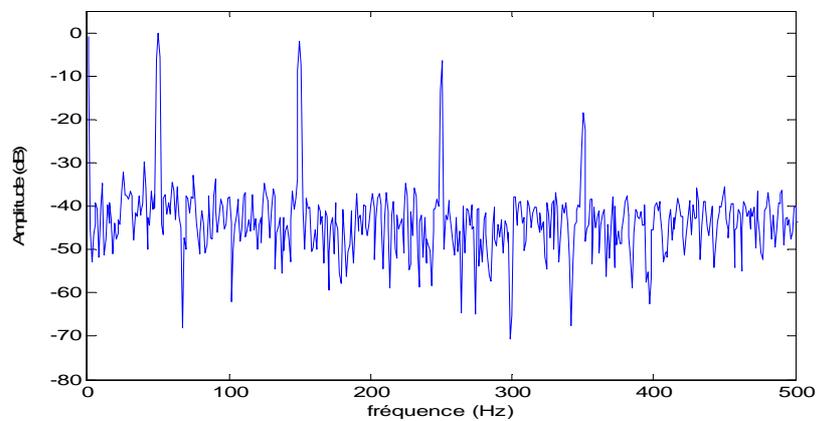


Figure 4.10 : Spectre des courants statorique du court circuit d'une phase

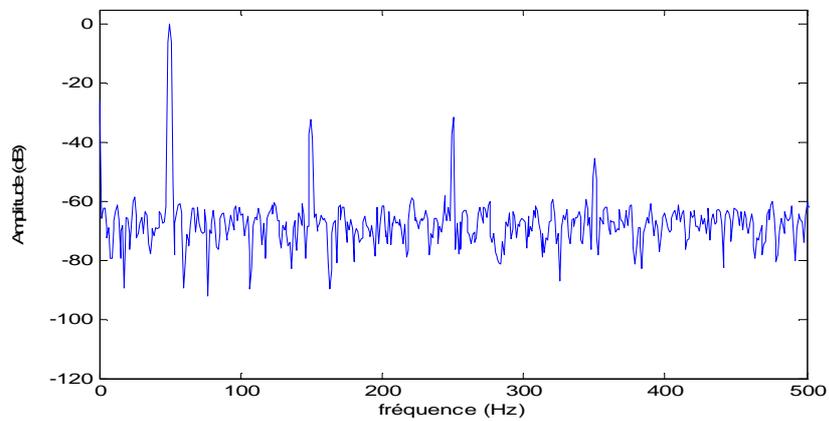


Figure 4.11 : Spectre des courants statorique avec déséquilibre d'alimentation $\cos \varphi > 0$

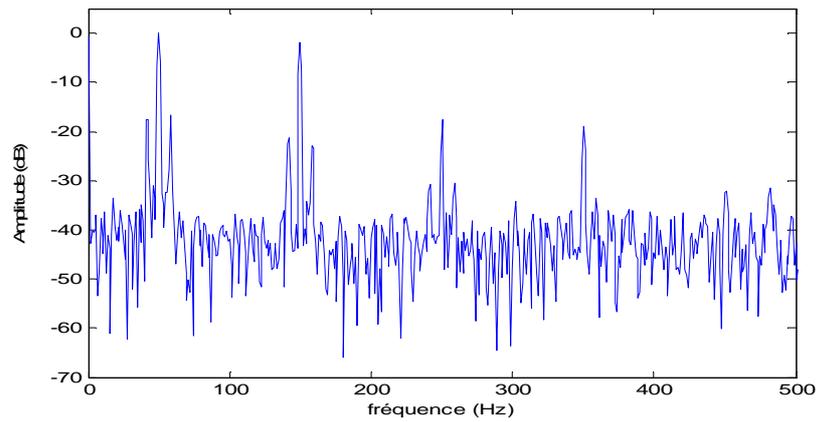


Figure 4.12 : Spectre des courants statorique avec déséquilibre ($\cos \varphi < 0$)

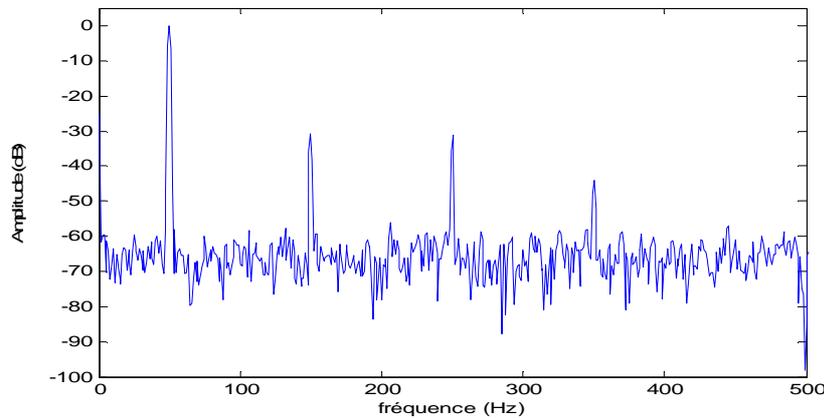


Figure 4.13 : Spectre des courants statorique pour une coupure de phase $\cos \varphi < 0$

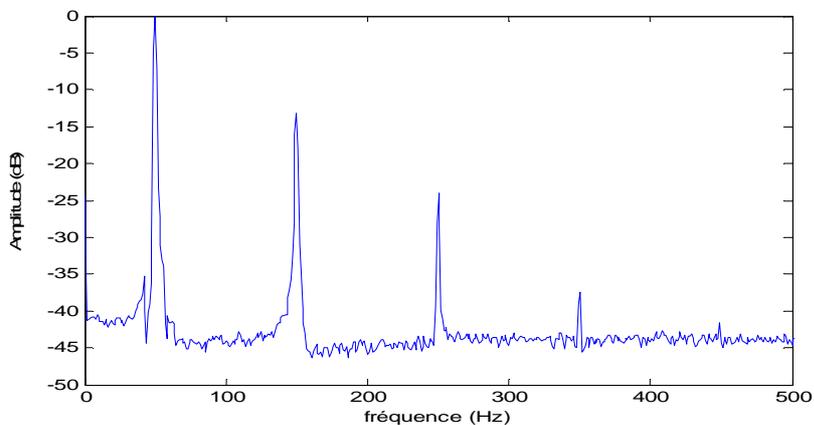


Figure 4.14 : Spectre des courants statorique pour une coupure de phase $\cos \varphi > 0$

Les figures (4.9), (4.10), (4.11), (4.12), (4.13) et (4.14) montrent que même pour un moteur à l'état sain, il existe toujours des composantes fréquentielles due à une mauvaise conception, une mauvaise fabrication ou un mauvais montage.

Nous avons appliqué la technique des courants statoriques pour détecter la présence des défauts en utilisant les signaux expérimentaux. Les figures d'ouverture d'une phase,

déséquilibre d'une phase et coupure d'une phase fait apparaître des harmoniques d'ordre impaire. On remarque qu'il y a une concordance entre la simulation de la MSAP et l'expérimental de la MS.

IV.5 Conclusion

Dns ce chapitre, nous avons présenté les résultats expérimentaux d'une machine synchronique à rotor bobiné dans les cas d'une excitation de la machine de telle sorte à avoir soit un comportement inductif et capacitif ; pour des différentes conditions de fonctionnement sain et en défauts (coupure des phases, court circuit d'une phase et déséquilibre des phases). Nous avons vu l'influence de chaque type de défauts sur les courants statoriques, la vitesse et les tensions d'alimentation.

Conclusion Générale

L'évolution croissante des machines synchrones à aimants permanents dans les secteurs industriels oblige certains utilisateurs à se prémunir contre l'apparition d'un défaut provoquant le plus souvent un arrêt intempestif de la machine. Le travail présenté traite donc du diagnostic de défauts d'alimentation et plus particulièrement d'ouverture, coupure et déséquilibre des phases qui peuvent survenir au sein de la machine synchrone à aimants permanents.

Dans le premier chapitre, nous avons présenté la machine synchrone à aimants permanents à savoir, ses différentes structures, les caractéristiques des aimants permanents et les différents types des machines synchrones à aimants permanents. Nous avons ensuite présenté les différents défauts pouvant survenir dans les machines électriques, et les différentes techniques de diagnostic actuellement appliquées aux machines pour établir la présence d'un défaut.

Afin de représenter le comportement de la machine, lors d'un fonctionnement sain et avec défaut, nous avons développé un modèle mathématique. Ensuite, nous avons construit un programme de simulation. Ceci, nous a permis de visualiser le courant statorique, le couple électromagnétique et la vitesse de rotation, en considérant les différentes conditions de fonctionnement de la machine (sans et avec défaut).

Les résultats obtenus ont montré l'influence de défauts cités précédemment sur le couple électromagnétique, la vitesse de rotation et le courant statoriques, qui se traduit par des ondulations et déformations des allures.

Nous avons utilisé le programme de la transformée de Fourier rapide (FFT) pour exploiter le contenu spectrale du courant statorique pour chaque défaut.

Des essais expérimentaux effectués au sein du laboratoire pédagogique d'électrotechnique à Batna, nous ont permis de visualiser les courants et la vitesse dans les cas inductif et capacitif à l'état sain et dégradé d'une machine synchrone à rotor bobiné.

Annexe A

Les paramètres de la machine synchrone à aimants permanents utilisés sont :

Caractéristique	Valeur	Unité
R	0.88	Ω
L	0.0031	H
φ_f	0.132	Wb
J	0.0006	kg.m ²
f	0.0007	N.ms
P	3	-

Annexe B

Les paramètres de la machine synchrone à rotor bobiné sont :

Caractéristique	Valeurs	Unité
R_s	11	Ω
R_f	70.5	Ω
M_{df}	2.35/2	H
L_f	1.85	H
L_d	0.995	H
L_q	0.885	H
P	2	-
J	0.015	Kg.m^2
f	0.0001	N.ms

Bibliographies

- [1] **A. KADDOURI**, "Étude d'une Commande Non Linéaire Adaptative d'une machine Synchrones à Aimants Permanents", Thèse de Doctorat, Université Laval, Québec, 2000.
- [2] **W. LEONHARD**, "Control of AC Drives spring", Verlag, Berlin, 1984.
- [3] **G.LACROUX**, "les aimants permanents"; TEC et DOC, Lavoisier, 1989.
- [4] **J. SAINT-MICHEL**, "Bobinage des machines tournantes à courant alternatif" Techniques de l'ingénieur, D3 420, 2001.
- [5] **Jawad Ahmed FAROOQ**, "Etude du problème inverse en électromagnétisme en vue de la localisation des défauts de désaimantation dans les actionneurs à aimants permanents", Thèse d'ingénieur école doctorale: sciences pour l'ingénieur et microtechnique, 05 décembre 2008.
- [6] **A. Ounissi**, "Contribution par mode glissant d'une machine synchrone à aimant permanent", Thèse de magister université de Batna.
- [7] **N. Soulahi**, "Optimisation du rendement d'un ensemble convertisseur-machine à induction", soutenu le 23/10/2004. Thèse magister université Batna.
- [8] **S.Belkacem**, "Etude comparative des performances statiques et dynamiques d'un contrôle de découplage et d'un DTC d'un moteur à induction alimenté par un convertisseur statique", Thèse de magister soutenu l'année 2005, université Batna.
- [9] **M. Budiner, J. Liscoult, S. Orioux, J. CH. MARE**, "Etat de l'art sur la conception des systèmes d'actionnement électromécanique", Notes de cours, INSA, Toulouse, 2008.
- [10] www.mpimagnet.com, "High- energy rare earth magnet material".
- [11] **S. Ozcira, N. Bekiroglu, E. Aycicek**, "Simulation of direct torque controlled permanent magnet synchronous motor drive", 5th international conference on electrical and electronics engineering, 5-9 December 2007, pp 272-276, Bursa, turkey.
- [12] **H. Schawab**, " Stratégies de commande d'actionneurs synchrones à aimants permanents intégrant la sureté de fonctionnement", Thèse de doctorat, université de Haute Alsace, 2004.
- [13] **F. Leprince-Ringuet**, "Aimants permanents - Matériaux et applications", Techniques de l'ingénieur D2100.
- [14] **G. Lacroux**, "Les aimants permanents", Edition technique et documentation, 1989.

- [15] **Y. BOUTORA**, "Calcul d'une BDCM Excitée par des aimants à aimantation parallèle", Mémoire de magister, université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2001.
- [16] **F. GILLON**, "Modélisation et optimisation par plan d'expériences d'un moteur à commutation électrique", Thèse de doctorat, université de Lille, 1997.
- [17] "Identification et commande vectorielle de la machine synchrone à aimants permanents", PFE, USTHB, 2005.
- [18] **Laurent GASC**, "Conception d'un actionneur à aimants permanents à faibles ondulations de couple pour assistance de direction automobile approches par la structure et par la commande", Thèse de doctorat, l'institut national polytechnique de Toulouse 2004.
- [19] **P. O'Donnell**, "Report of large reliability survey of industrial and commercial installations, Part 1", IEEE Transaction on Industry Applications, Vol. IA,21, N° 4, aug. 1985, pp 853 – 864.
- [20] **W.T. Thomson**, "A review of on-line condition monitoring techniques for three-phase squirrel-cage induction motors – past present and future", IEEE International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines”, Power Electronics and Drives Conf., IEEE SDEMPED Conf., 1999.
- [21] **G. Salles**, "Surveillance et diagnostic des défauts de la charge d'un entraînement par machine asynchrone", Thèse de doctorat de l'Université Claude Bernard Lyon1, Janvier 1997.
- [22] **M. F. Cabanas, M. G. Melero, J.G. Alexandre et J. Solares**, "Shaft misalignment diagnosis of induction motors using current spectral analysis: A theoretical approach", Proc. International Conference on Electrical Machines (ICEM), pp 384-390, 10 – 12 September 1996.
- [23] **S. Nandi, H. A. Toliyat**, « Condition monitoring and fault diagnosis of electrical machines – a review » IEEE Industry Applications Conference. Thirty-Fourth IAS Annual Meeting, Vol.1, pp.197-204, Phoenix, USA, 1999.
- [24] **B. Raison**, "Détection et localisation de défaillances sur un entraînement électrique", Thèse de doctorat de l'Institut National Polytechnique de Grenoble, Septembre 2000.
- [25] **G. Didier, E. Ternisien, O. Caspary, H. Razik**, "A new approach to detect broken rotor bars in induction machines by current spectrum analysis", Journal of Mechanical Systems and Signal Processing (MSP), vol. 21, n° 2, pp. 1127-1142, Feb.07.
- [26] **Yahoui H., J. Seetohul, Grellet G., Jammal A**, "Detection of broken bar or end-ring fault in asynchronous machines by spectrum analysis of the observed electromagnetic

- torque through supply cable", *Revue Europeans de Diagnostic et Sûreté de Fonctionnement*, Vol.5, no.4, 1995.
- [27] **A. Bentounsi**, "On Line Diagnosis of Defaults on Squirrel Cage Motors Using FEM", *IEEE Transactions on Magnetic*, Vol. 34, No. 5, September 1998.
- [28] **R. N. Andriamalala, H.Razik, L. Baghli, F-M. Sargos** , "Eccentricity Fault Diagnosis of a Dual-Stator Winding Induction Machine Drive Considering the Slotting Effects", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Volume 55, Issue 12, , pp. 4238 – 4251, Dec. 2008.
- [29] **V. Devanneaux, H. Kabbaj, B. Dagues et J. Faucher**, "An accurate model of squirrel cage induction machines under static, dynamic or mixed eccentricity", *Proc. IEEE SDEMPED 2001*, pp.121-126, September 2001.
- [30] **A. H. Bonnett, G. C. Soukup**, "Cause and analysis of stator and rotor failures in three phase squirrel cage induction motors", *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol.28 no.4, pp 921-937, Aug 1992.
- [31] **W. Jiabin , W. Weiya , G.W. Jewell, D. Howe**, "Design of a miniature permanent magnet generator and energy storage system", *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, Volume: 52, Issue: 5, page(s): 1383- 1390, Oct. 2005.
- [32] **Noel C, Takorabet N., Meibody-Tabar F**, "Short-Circuit Current Reduction Technique for Surface Mounted PM Machines in High Torque-Low Speed Applications", *IAS*, 2004
- [33] **G. M. Joksimovic, J. Penman**, "The detection of inter-turn short circuits in the stator Windings of operating motors", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol.47, no.5, pp. 1078-1084, Oct. 2000.
- [34] **J. S. Thomson, C. S. Kallesoe**, "Stator fault modelling of induction motors", *SPEEDAM Conference*, 2006.
- [35] **R. Casimir, E. Bouteleux, H. Yahoui, G, G. Rostaing and J.-P. Rognon**, "Synthèse de plusieurs méthodes de modélisation et de diagnostic de la machine asynchrone à cage en présence de défauts », *Journal RIGE*, vol. 8, no 2/2005, pp. 287-300, 2005.
- [36] **L. Baghli, L. Hein, H. Razik & A. Rezzoug**, "Modelling rotor cage induction motors for default detection", *IEEE International SDEMPED'97*, France, pp. 41-47, Sep. 1997.
- [37] **M. G. Maléro, M. F. Cabanas, F. R. Faya, C. H. Rojas & J. Solares**, "Electromagnetic torque harmonics for on-line inter turn short circuits detection in squirrel cage induction motors", *EPE'99*, Lausanne, Suisse, September, 1999.

- [38] **A. Abed**, "Contribution à l'étude et au diagnostic de la machine asynchrone", Thèse de doctorat, Université de Henri Poincaré, Nancy-I, France, 2002.
- [39] **M.Khov**, "Surveillance et diagnostic des machines synchrones à aimants permanents ; Détection des courts-circuits par suivi paramétrique", Thèse de doctorat, université de Toulouse, Décembre 2009.
- [40] **T.Boumegoura**, "Recherche de signature électromagnétique des défauts dans une machine asynchrone et synthèse d'observateurs en vue du diagnostic", Thèse de doctorat, université de Lyon, Mars 2001.
- [41] **E. Schaeffer**, "Diagnostic des machines asynchrones ; modèles et outils paramétriques dédiés a la simulation et à la détection des défauts ", Thèse de doctorat, université de Nantes, Décembre 1999.
- [42] **N. Khalil**, "Stratégies de commande et techniques intelligentes appliquées aux machines de type synchrone", Thèse doctorat, université de Constantine.
- [43] **G. S .Eddie S**, "Modélisation et commande des moteurs triphasé »Ellipses. Edition Marketing S A.2000.
- [44] **B. Chetate, dj. Khodja**, "Diagnostic en temps réel des défaillances d'un ensemble Moteur asynchrone-convertisseur électronique en utilisant le réseau neurones artificiels", Journal d'électrotechnique, Moscou 12/2003, PP-16-20.