الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE DR. YAHIA FARES DE MEDEA

FACULTE DE TECHNOLOGIE

Département du Génie Électrique



Mémoire de Fin d'Études

Présenté pour l'obtention du Diplôme
de Master en Électrotechnique

Option : Réseaux Électriques

THEME

MODELISATION DE LA MACHINE SYNCHRONE A AIMANTS PERMANENTS EN VUE DE DIAGNOSTIC DES DEFAUTS STATORIQUES

Proposé et dirigé par,

Dr.HAOUASSINE Hamza

Mme.YASSA Nacera

Préparé et présenté par,

BENMEZIANE Seif eddine

BAHMED Islam

REMERCIEMENTS

Ce projet n'aurait pas abouti sans la bénédiction du Bon Dieu, Qui nous a donné le courage et la volonté pour réaliser ce travail et Qui a entendu nos prières.

Je remercie profondément l'encadreur ***DR.Haouassine Mme. yassa*** *qui n'a jamais cessé de nous conseiller, orienter et encourager.*

Merci pour sa disponibilité et sa coopération remarquable.

Nos vifs remerciements vont au membre de jury pour avoir accepté d'évaluer notre travail.

Nous adressons nos remerciements à tous ceux qui de près ou de loin ont contribué à l'élaboration de ce travail.

DEDICACE

JE DÉDIE CE TRAVAIL :

A MA MÈRE

A MON PÈRE

A MES AMIS

A MES FRÈRES ET MA SŒUR

A MES PROCHES

SIFO

DEDICACE

JE DÉDIE CE TRAVAIL :

A MA MÈRE

A MON PÈRE

A MES AMIS

A MES FRÈRES ET MES SŒURS

A MES PROCHES

ISLAM

Table Des Matières

Titre **Page**

Liste des figures…… **I**

Notation ……... **II**

INTRODUCTIONGENERALE…... ……...…….. **III**

Chapitre I : Etat de l'art des défauts dans la machine synchrone à aimants permanents.

I.1Introduction :……...….03

I.2.Définition de la Machine synchrone……...……...……...… 04

I.3. Généralités sur les machines synchrones à aimants permanents(MSAP) :……04

I.3.1.Présentation de la machine synchrone à aimants permanents :……...……...04

I.3.2. Avantage des machines a aimants permanents : ……..…. 06

I.3.2. Inconvénients des machines synchrones : ……...….. 07

I.3.3. Domaine d'application de la machine synchrone à aimants permanents : ……..…. 07

I.3.5. Propriété des aimants permanents : ……11

I.4. Types des défauts dans les MSAP : ……. 13

I.4.1 Défauts rotoriques : ……14

I.4.2. Défauts statoriques : ……...20

I.5Généralités sur le diagnostic :……..25

I.5.1. Définition de Diagnostic : ……25

I.5.2. Les différentes notions utilisées en diagnostic : ……25

I.6. Panorama des méthodes de diagnostic des machines électriques : ……...25

I.6.1.Méthodes de diagnostic avec modèle analytique : ……26

I.6.2. Méthodes de diagnostic sans modèle analytique : ……27

I.6.3. Méthodes d'intelligence artificielle (IA) : ……30

Conclusion : ……31

Chapitre II : Modélisation et simulation de la MSAP en régime saine.

II.1.Introduction……32

II.2.Modélisation de la MSAP……..32

II.3. Modèle de la MSAP dans le repère (abc) (saine)……33

II.3.1.Hypothèses simplificatrices……33

II.4. Mise en équations de la machine synchrone dans le référentiel (a, b, c)……..34

II.4.1.Equations électriques……..35

II.4.2.Equations magnétique…… 35

II.4.3. Les équations mécaniques……37

II.4. Modèle d'état de la MSAP en régime sain……...37

II.4. Résultat de simulation du modèle MSAP en régime sain……38

IV.3.4 Interprétation des résultats en régime sain……39

Chapitre III : Modélisation et simulation de defaut court-circuit dans les MSAP .

III.1. Introduction……44

III.2. Modification de la structure du modèle……...44

III.3. Modèle de la MSAP en présence de défaut de court-circuit entre spire……45

III.4. Modèle de la MSAP avec défaut entre-spires dans le repère triphasés (abc)…….46

III.5. Résultats de simulation du MSAP en régime de défaut avec 2% des spires en court-circuit……..48

III.6. Résultats de simulation du MSAP en régime de défaut avec 5% des spires en Court-circuit…….51

III.7. Résultats de simulation du MSAP en régime de défaut avec 10% des spires en Court-circuit……54

III.8. Interprétation des résultats en régime de défaut…….57

III.9. Conclusion……...58

Conclusion Générale……..……59

Annexe……..…...61

Référence Bibliographiques……...……62

Liste des Figures

Chapitre I : Etat de l'art des défauts dans la machine synchrone à aimants permanents.

Figure I.1: Moteur industriel à aimants Permanents.

Figure I.2 : Rotor de la MSAP

Figure I.3: principe de fonctionnement du MSAP.

Figure I.4: Machine synchrone à aimants permanents montés en surface.

Figure I.5: Machine synchrone à aimants permanents insérés.

Figure I.6: Machine synchrone à aimants permanents chapeautés.

Figure I.7: Machines synchrones à aimants permanents enterrés.

Figure I.8: Exemple de structures à rotor interne et à rotor externe

Figure I.9 : Vue transversale des machines à aimants permanents à flux radial.

Figure I.10: Vue d'une machine à flux axial (différentes configurations)

Figure I.11: Courbe de désaimantation.

Figure I.12 : Point limite de désaimantation réversible.

Figure I.12 : Evolution de l'aimantation rémanente avec la température.

Figure I.13 : courbe de désaimantation B(H) des principaux types d'aimants.

Figure I.14 : Rotor parfaitement aligné au stator.

Figure I.14 : Excentricité statique d'une machine électrique.

Figure I.15: Excentricité dynamique d'une machine électrique.

Figure I.16 : Différents types d'excentricité dans les machines électriques.

Figure I.17 : Roulements à billes classiques.

Figure. I.18 : Représentation de courts-circuits entre spires, entre phases, phase et terre.

Figure I.19 : Exemple de dégâts provoqués par les défauts de court-circuit statorique.

Figure I.20 Différents défauts statoriques .

Figure I.4 : Diaporama des méthodes de diagnostic de machines électriques .

Chapitre II : Modélisation et simulation de la MSAP en régime saine.

Figure II.1 : Schéma du bobinage statorique équivalent (a) , et coupe transversale (b)d'une MSAP.

Figure II.2 : Schéma de la MSAP dans le repère abc.

Figure II.3 : Différents couples qui agissent sur le rotor.

Figure II.4 : courants statoriquea vide de la MSAP.

Figure II.5 : La vitesse de rotation a vide de la MSAP.

Figure II.6 : Couple électro magnétique a vide de la MSAP.

Figure II.7 : courants statoriques en charge de la MSAP.

Figure II.8 : vitesse de rotation en charge de la MSAP.

Figure II.9 : couple électromagnétique en charge de la MSAP.

Chapitre III : Modélisation et simulation de défaut court-circuit dans les MSAP .

Figure III.1 : Représentation d'un moteur synchrone à aimant permanent avec court-circuit entre spires dans la phase statorique A.

Figure III.2 : Les courants statorique avec 2% des spires en court-circuit à vide.

Figure III.3 : La vitesse de rotation de la MSAP avec 2% de spire en court-circuit à vide.

Figure III.4 : Couple électromagnétique avec 2% de spire en court-circuit à vide.

Figure III.5 : Les courants statorique avec 2% des spires en court-circuit en charge.

Figure III.6 : La vitesse de rotation de la MSAP avec 2% de court-circuit spires en charge.

Figure III.7 : Couple électromagnétique avec 2% de spire en court-circuit en charge.

Figure III.8 : courants statoriques avec 5% de spires en court-circuit à vide.

Figure III.9 : La vitesse de rotation de la MSAP avec 5% de spires en court-circuit à vide.

Figure III.10 : Couple électromagnétique avec 5% de spire en court-circuit à vide.

Figure III.11 : Les courants statorique avec 5% de spires en court circuit en charge.

Figure III.12 : La vitesse de rotation de la MSAP avec 5% de spires en court-circuit en charge.

Figure III.13 : Couple électromagnétique avec 5% de spire en court-circuit en charge.

Figure III.14 :courants statoriques avec 10% de spire en court-circuit à vide.

Figure III.15 La vitesse de rotation de la MSAP avec 10% de spires en court-circuit à vide.

Figure III.16 : Couple électromagnétique en charge a 10% de spires en court-circuità vide.

Figure III.17 : Courants statoriques avec 10% de spire en court-circuit en charge.

Figure III.18 : La vitesse de rotation de la MSAP avec 10% de spires en court-circuit en charge

Figure III.19 Couple électromagnétique avec 10 %de spires en court-circuit en charge.

Liste des Tableux

Tableau I.1 Exemples de propriétés magnétiques des aimants .

MSAP: Machine Synchrone à aimants Permanents.
FFT : Transformé de Fourier Rapide.
$[V_s]$: Matrice des tensions des trois phases statoriques.
$[I_s]$: Matrice des courants des trois phases statoriques.
V_a^s, V_b^s, V_c^s: Tensions des trois phases statoriques
I_a^s, I_b^s, I_c^s: Courants des trois phases statoriques
R^s: Résistances d'une phase statoriques
$\varphi_a^s, \varphi_b^s, \varphi_c^s$: Flux statoriques
a, b, c : trois phases statoriques
$\left[V_{abc}^s\right]$: le vecteur des tensions,
$\left[I_{abc}^s\right]$ le vecteur des courants
$\left[\varphi_{abc}^m\right]$: Vecteur flux créé par l'aimant à travers l'enroulement statorique
$[L_{ss}]$: Matrice des Inductance statoriques
L_s: Inductance propres des trois phases
M_s: Inductances mutuelles entre phases statoriques
θ : Angle entre l'axe d et l'axe de référence dans le système triphasé
ω : La pulsation électrique.
Ωr : La vitesse de rotation de rotor.
f : Coefficient de frottement visqueux
J : Moment d'inertie du moteur
C_r : Couple électromagnétique de la machine
C_{em} : Le couple électromagnétique délivré par le moteur.
p : Le nombre de pairs de pôle.
θ_f : paramètre de localisation de défauts.
cc : Rapport de court-circuit
n_{cc} : rapport du nombre des spires court-circuitées
N_s : nombre des spires statoriques total
θ_f : est un paramétre de localisation de défauts.
$i_{\sigma_{cc}}$: le courant de court-circuit.
i_{sA2} : le courant qui passe dans la partie court-circuitée.

الملخص

تقدم هذه الذاكرة آلة متزامنة مع مغناطيس دائم لتشخيص الأخطاء القاطعة لمعرفة الفشل.تغير وتغيير الكميات الكهربائية والبارامترية بمساعدة محاكاة ومقارنة النتائج ، بعد النمذجة ما يساعد تحسين موثوقية الاعتمادية والموثوقية التشغيلية.

Résumé

ce mémoire présente la machine synchrone à aimants permanents en vue de diagnostic de défauts statoriques pour connaitre les défaillances. les ruptures et changement des grandeurs électriques et paramétriques à l'aide d'une simulation et comparaison des résultats , après une modélisation ce qui aide l'amélioration de la fiabilité et la sureté de fonctionnement.

Abstract

this memory presents the synchronous machine with permanent magnets for statoric fault diagnosis to know the failures .ruptures and change of the electric and parametric quantities by the help of a simulation and comparison of the results, after a modeling what helps the improved reliability and safety of operation.

Mot cles

Machine synchrone à aimants permanents.

Défauts statoriques.

Diagnostic.

Modélisation.

Bien que la machine à courant continu soit la plus ancienne des machines, elle reste toujours utilisée comme un actionneur électrique. Cependant, son inconvénient majeur est la fragilité du système collecteur-balais, ce qui complique la maintenance, limite la puissance et la vitesse maximale. C'est pour surmonter ces inconvénients qu'on s'est intéressé aux machines à courant alternatif. De plus, l'arrivée sur le marché, des matériaux magnétiques (aimants permanents modernes) dont les caractéristiques se sont améliorées en terme de performance et de prix, a permis l'essor de la machine synchrone. En effet, la mise en place des aimants permanents au rotor pour créer le champ inducteur, a permis la suppression des contacts glissants ainsi que les dispositifs à diodes tournantes nécessaires aux rotor bobinés.
ce sujet consiste à modéliser la MSAP en vue de son diagnostic de défaillance au niveau du stator alimenté de réseaux électriques, ces machines spéciales sont largement utilisées dans l'entrainement électrique des auxiliaires des centrales électriques [31].

Dans ce travail, nous nous intéresserons spécifiquement aux diagnostics des défauts électriques pouvant survenir au stator des machines synchrones à aimants permanents. Les défauts de bobinages sont parmi les plus répandus. La machine synchrone à aimants permanents possède une caractéristique de fluxage permanent dû à la présence d'aimant au rotor. De ce fait, certaines catégories de défaillance comme les courts-circuits sont Particulièrement critiques car même une déconnexion de la machine de son dispositif d'alimentation ne permet pas « d'éteindre » le défaut. Pour traiter ce phénomène de court–circuit dans les MSAP plusieurs approches de modélisation ont étés envisagées, cependant, l'approche basée sur les Circuits Electriques Magnétiquement Couplés (CEMC) s'avère très appropriée car elle conduit à un modèle capable de représenter la machine en fonctionnement sain et en présences des défauts [22].

L'implémentation sous environnement Matlab des équations électriques, magnétique et mécanique sous forme d'un modèle d'état, nous offre la possibilité de réaliser des simulations numériques et d'exploiter les résultats [22].

Ce mémoire est structuré en trois chapitres, comme suit :

Dans le premier chapitre, on rappelle des généralités et différentes méthodes de diagnostic et de détection de défauts, et traite aussi les divers défauts qui peuvent apparaître dans les machines synchrone à aimants permanents.

Le deuxième chapitre est consacré à la modélisation et la présentation des résultats de simulation de la (MSAP) par la méthode des **C**ircuits **E**lectriques **M**agnétiquement **C**ouplés

(**CEMC**) dans le repère naturel (a, b, c) en régime sain. En vue d'observer et d'analyser l'évolution des grandeurs électriques, magnétiques et mécaniques caractérisant et les performances dynamique de cette machine.

Le troisième chapitre est réservé aussi à la modélisation et la simulation du modèle de la (MSAP) mais cette fois en presence de défaut de type court-circuit dans le repère naturel. L'établissement de modèle suffisamment précis sur la base de la méthode de **C**ircuits **E**lectriques **M**agnétiquement **C**ouplés (**CEMC**), permettra d'étudie le comportement de (MSAP) en présence de ce défaut.

Nous terminerons ce mémoire par une conclusion portant sur les travaux effectués et par une présentation des perspectives de recherche envisagées.

Chapitre I

Etat de l’art des défauts dans la machine synchrone à aimants permanents

I.1 Introduction

Dans de nombreux secteurs industriels, la sûreté de fonctionnement est un enjeu majeur pour assurer une compétitivité optimale de l'outil de production. Le diagnostic des défaillances de systèmes industriels, lorsqu'il est réalisé avec efficacité, représente un des moyens pour contribuer à obtenir un meilleur gain de productivité. Sa vocation première est de détecter et de localiser une défaillance des matériels. Les machines électriques sont très présentes dans de nombreux processus et leur surveillance est devenue un souci permanent particulièrement dans les systèmes embarqués.

Les machines synchrones à aimant permanent (MSAP) sont de plus en plus utilisées dans de nombreux domaines grâce à leur efficacité énergétique, leur simplicité de mise en œuvre et leur performance dynamique. La sûreté de fonctionnement de ce type d'actionneurs devient cependant un problème critique pour certaines applications industrielles car, à cause de la présence d'une excitation permanente des aimants au rotor, un défaut de court-circuit au stator de la machine est entretenu tant que la machine est en rotation. La détection de ce type de défaillance doit donc être réalisée au plus tôt avec un bon taux de confiance pour permettre une sécurisation rapide afin d'éviter la propagation de défaut aux autres composants du système.

Ce chapitre a pour but de définir la machine électrique à étudier dans le cadre de ce mémoire, qui est le moteur synchrone à aimant permanent (MSAP). Ainsi que la présentation des différents défauts affectant cette machine et leurs méthodes de diagnostic qui sera investie dans cette étude, pour le diagnostic du défaut de court-circuit de spires statoriques et circuit ouvert.

I.2.difinition de Machine synchrone

Toute machine électrique dans laquelle la vitesse de rotation du rotor est égale à la vitesse de rotation du champ tournant est appelé machine synchrone. Pour obtenir un tel fonctionnement, le champ magnétique rotorique est généré soit par des aimants, soit par un circuit d'excitation. La position du champ rotorique est alors fixe par rapport au rotor, ce qui impose en fonctionnement normal une vitesse de rotation identique entre le rotor et le champ tournant statoriques [26][4][17].

1) Le rotor : ou inducteur est la partie mobile de la machine se compose d'aimants permanents. Ce dernier présente l'avantage d'éliminer les balais et les pertes.
2) Le stator : ou l'induit est la partie fixe de la machine, il se compose de trois enroulements parcourus par des courants alternatifs décalés de 120° dans l'espace et dans le temps, logés dans les encoches du circuit magnétique fixe .

Cette famille de machines (machines synchrone) regroupe en fait plusieurs sous familles :

- ✓ les machines synchrone à rotor bobiné.
- ✓ les machines synchrone à réluctance variable.
- ✓ les machines synchrone à aimants permanent (MSAP).

Cette dernière catégorie (MSAP) est la plus intéressante dans notre travail.

I.3. Généralités sur les machines synchrones à aimants permanents(MSAP)

I.3.1. Présentation de la machine synchrone à aimants permanents

La machine synchrone, est constitué d'un empilage de tôle magnétique qui contient des encoches dans lesquelles sont logés trois enroulements identiques décalés entre eux de 120 degré [4][13][17].



Figure I.1 Moteur industriel à aimants Permanents.

Le rotor est constitué de pôles qui sont des inducteurs composés d'aimants permanents et de pièces polaires en matériaux ferromagnétiques. Généralement, le rotor de la MSAP est de deux types :

- Rotor possédant des pièces polaires (Figure I.2(a)), servant à la concentration du flux d'induction dans lequel les aimants sont orientés soit parallèlement soit perpendiculairement à l'entrefer, soit de manière plus complexe. Dans ce type de machine, l'inducteur est à pôles saillants.

- Rotor sans pièces polaires, donc à entrefer constante (Figure I.2(b)), dans lequel l'aimantation des aimants est généralement perpendiculaire à l'entrefer. Dans ce type de machine, l'inducteur est à pôles lisses.

Des enroulements amortisseurs sont parfois ajoutés formant une cage en court-circuit



(a) Rotor à pôles saillants **(b)** Rotor à pôles lisses

Figure I.2 Rotor de la MSAP

I.3.1.1.Principe de fonctionnement de la machine synchrone à aimant permanent

La machine électrique tournante est un dispositif électromagnétique destiné à transformer de l'énergie mécanique en énergie électrique (fonctionnement en générateur) ou, inversement, transformation de l'énergie électrique en énergie mécanique (fonctionnement en moteur). Elle comprend principalement deux parties mobiles l'une par rapport à l'autre : l'inducteur qui crée un champ magnétique et l'induit dans lequel ce champ induit une force électromotrice ; ces deux parties sont séparées par un entrefer.

Les bobines (phases) du stator sont reliées à une source triphasée de tensions sinusoïdales. La superposition des trois flux magnétiques crée par les trois bobines du stator produit un flux magnétique sinusoïdal tournant à la fréquence de la source de tension. Ce flux magnétique tournant interagit avec le flux de rotor dans l'entrefer qui sépare le stator du rotor et crée ainsi une force électromagnétique. Cette force se traduit par la rotation du rotor. La vitesse de rotation du rotor est proportionnelle à la fréquence de la source de tension. [26][4][13][17].

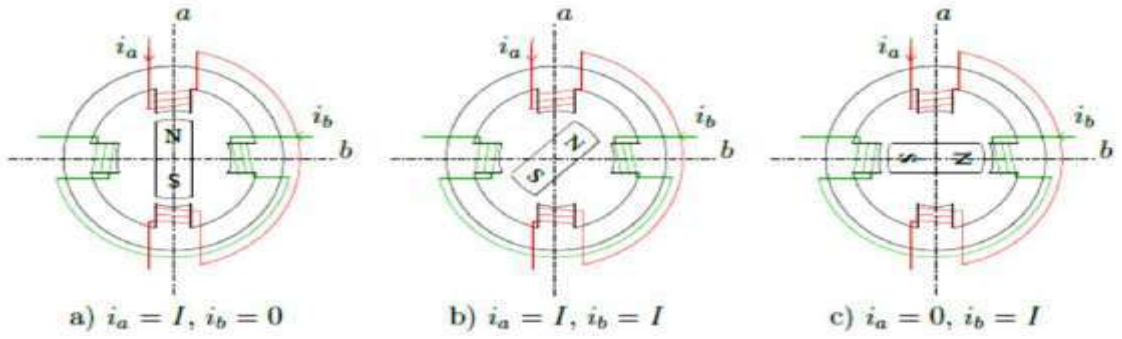


Figure I.3 principe de fonctionnement du MSAP [17].

I.3.1.1.1 Fonctionnement de MSAP en générateur

Pour faire fonctionner la MSAP en générateur, on entraine son rotor ayant une excitation due Aux aimants permanents à une vitesse (wr) le champ correspondant crée dans les Enroulements du stator des forces électromotrices (f e m) périodiques dont la fréquence (f) dépend de la vitesse d'entrainement et le nombre de paires de pôles .

I.3.1.1.2 Fonctionnement de MSAP en moteur

Le stator est alimenté par un système des tensions triphasées équilibrées créant dans l'entrefer Un champ tournant, ce dernier à tendance à attirer le rotor muni d'aimant permanant Produisant le champ d'induction magnétique (B). De ce fait, les champs d'induction créés par Le stator et le rotor ont tendance à s'aligner, raison pour laquelle un couple d'origine électromagnétique prend naissance. Le rotor se met à tourner à une vitesse angulaire, cette dernière est liée au nombre de paires de pôles (p) et à la pulsation (wr) qui est égale à celle du champ tournant.

I.3.2. Avantage des machines a aimants permanents [3][17][15]

- ✓ bon rendement ;
- ✓ fort couple massique ;
- ✓ fort couple volumique ;
- ✓ peu de pertes au rotor ;
- ✓ pas de système balais collecteur ;
- ✓ bon facteur de puissance ;
- ✓ pas ou peu d'entretien ;
- ✓ Simplicité de fabrication ;
- ✓ Puissances massiques élevées ;

- ✓ Possibilité de supporter des surcharges transitoires importantes et un bon comportement :
- ✓ dynamique en accélération et en freinage ;
- ✓ Fonctionnement en survitesse ;
- ✓ Absence de contacts glissants.

I.3.2. Inconvénients des machines synchrones [3][17][15]

Cependant ils ont tout de même certains inconvénients :

- ✓ Coût élevé des aimants.
- ✓ Interaction magnétique due au changement de structure.
- ✓ Influence des vibrations et des chocs sur la structure de la machine.
- ✓ Diminution de l'aimantation selon loi logarithmique en fonction du temps.

I.3.3. Domaine d'application de la machine synchrone à aimants permanents

Les MSAP, En effet, avec l'évènement des matériaux à aimants permanents de haute énergie et les progrès réalisés dans le domaine de l'électronique de puissance. Les moteurs à aimants permanents ont connu ces dernières années un grand essor. Ils ont été adoptés dans de nombreuses applications de hautes performances telles que la robotique, l'aérospatiale, les outils électriques, la production des sources d'énergie renouvelables, les divers équipements médicaux, les véhicules électriques et hybrides, etc… [26][4][13][17].

Maintenant on présente des exemples d'application des MSAP utilisées dans différentes plages de puissances [23] :

- ➢ Applications aux petites puissances (P<600W) :
  - ✓ Micro Ventilateur
  - ✓ Disque Dur
  - ✓ Fraise de dentiste
  - ✓ Programmateur Mécanique

- ➢ Applications aux moyennes puissances (500W<P<100kW) :
  - ✓ Vélo à assistance
  - ✓ Voiture électrique (Toyota Prius)
  - ✓ Machine-outil
  - ✓ Robot industrie
- ➢ Applications aux fortes puissances
  - ✓ Traction ferroviaire
  - ✓ Propulsion navale

Les machines à aimants permanents sont parfois préférables aux autres machines traditionnelles, telles que les machines à courant continu, les moteurs synchrones classiques et les moteurs asynchrones et en particuliers pour les applications spécifiques (servomoteur et vitesse variable). En effet, les machines à aimants permanents présentent plusieurs avantages par rapport aux autres types de machines [26][4][13][17] :

I.3.4. Différentes structures des machines synchrones à aimants permanents

Les structures des machines synchrones à aimant permanents sont classées suivant la disposition des aimants sur le rotor. Leurs différentes configurations incluent les machines à flux radial (RFPM) et à flux axial (AFPM) [13][8].

I.3.4.1. Structures à flux radial (RFPM)

La machine synchrone à flux radial (RFPM) est la machine à aimants la plus conventionnelle. Elle est employée couramment pour l'entrainement direct. Son stator est identique à celui d'une machine d'induction classique. Ces structures peuvent se présenter, soit avec un rotor placé à l'intérieur ou à l'extérieur (Figure I.8) [13][8][27].

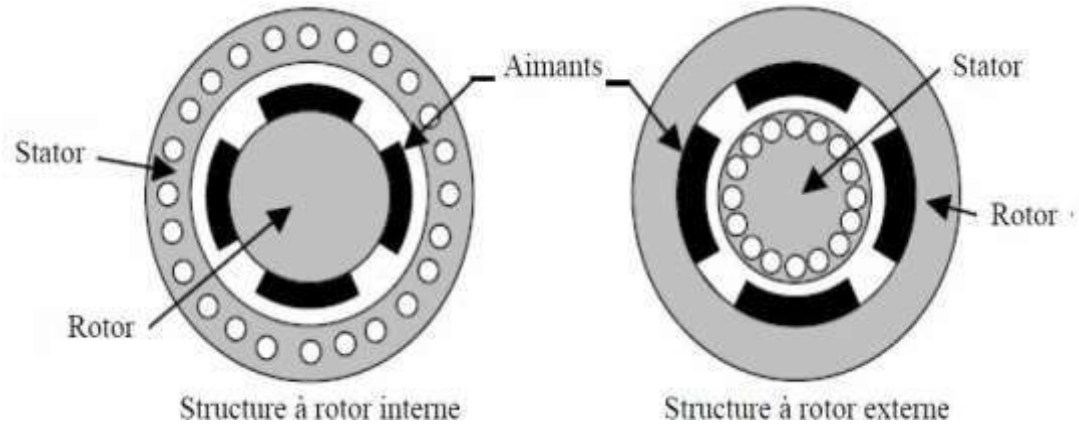
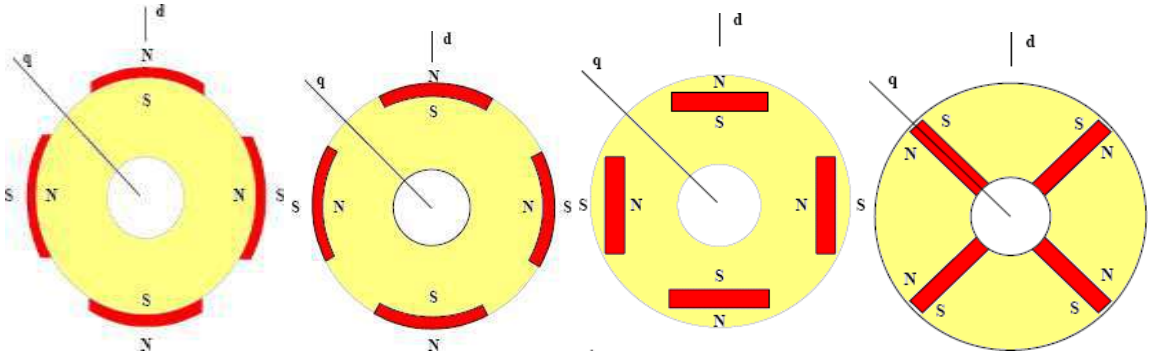


Figure I.8 Exemple de structures à rotor interne et à rotor externe

Les différents types de rotor de machine à flux radial sont munis d'aimants montés soit en surface, soit insérés (encastrés), soit enterrés ou à concentration de flux.



a) à aimants en surface **b)** à aimants insérés **c)** à aimants enterrés **d)** à concentration de flux

Figure I.9 Vue transversale des machines à aimants permanents à flux radial.

I.3.4.1.1 Structures à aimants déposés en surface

Elles sont appelées machines à inducteur lisse en raison de leurs aimants disposés a niveau de l'entrefer sur un noyau ferromagnétique lisse (Figure I.9(a)). L'induction dans l'entrefer est celle des aimants. Leur aimantation peut être radiale, tangentielle ou combinée. La topologie à rotor interne est généralement la plus utilisée en raison de sa simplicité et son faible coût de réalisation. Cependant elle présente quelques inconvénients. En effet, les aimants permanents sont exposés aux champs de démagnétisation et sont sujets à des forces centrifuges pouvant causer leur détachement du rotor [13][8][27] [17].

La topologie à rotor externe est moins utilisée car elle est plus difficile à réaliser et nécessite plus de volume d'aimant. Elle présente les avantages suivants :

- ✓ Un diamètre du rotor, plus grand que pour les machines conventionnelles, permettant d'avoir un nombre plus élevé de pôles et un couple plus grand.
- ✓ Une meilleure qualité de collage des aimants sur le rotor grâce à la force centrifuge qui-pousse les aimants vers l'extérieur, rendant leur détachement presque impossible.

I.3.4.1.2 Structures à aimant insérés

Des aimants de forme simple sont insérés à la surface du rotor, ce qui leur permet d'avoir une bonne tenue mécanique (Figure I.9(b)). L'espace entre les aimants est couvert par des dents rotoriques créant une saillance inversée, cette saillance produit un couple de réltance aussi important que le couple d'interaction dû aux aimants permanents [13][8][27] [17] .

I.3.4.1.3. Structures à aimants enterrés

La structure des inducteurs de ce type de machine est à géométrie complexe. Les aimants sont enterrés à l'intérieur du rotor (Figure I.9(c)). La robustesse mécanique de ce type de rotor permet d'atteindre de très grandes vitesses pour des puissances importantes.

L'avantage de cette configuration réside dans la possibilité de concentrer le flux produit par ces aimants, permettant ainsi d'assurer des niveaux d'inductions élevées dans l'entrefer. De plus, les aimants enterrés sont bien protégés contre la désaimantation. [13][8][27] [17].

I.3.4.1.4. Structures à concentration de flux

Cette topologie (Figure I.4(d)) est d'habitude excitée par des ferrites car le volume est important et les constructeurs préfèrent un matériau moins cher. De plus, le principe de concentration du flux permet une augmentation importante du champ dans l'entrefer, avec une géométrie adéquate, cela permet d'avoir l'induction dans l'entrefer supérieur à l'induction rémanente [13][8][27] [17].

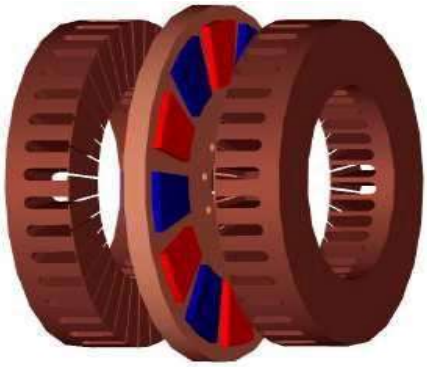
I.3.4.2. Structures à flux axial (AFPM)

Ces machines dites « discoïdales » ou AFPM représentent une autre solution possible pour les entraînements directs à basse vitesse. Elles comportent un ou plusieurs disques fixes bobinés et un ou plusieurs disques mobiles supportant les aimants permanents. Leur principal avantage est l'optimisation de la surface utile de génération du couple, qui se traduit par une puissance volumique importante. Cependant, leur assemblage est très compliqué, à cause des contraintes mécaniques liées aux poussées axiales. Comparées à la structure à flux radial, ces machines se caractérisent par un plus grand diamètre et une longueur axiale relativement plus courte. Le flux provenant des aimants est axial tandis que le courant est dans la direction radiale [13][8][27] [17].

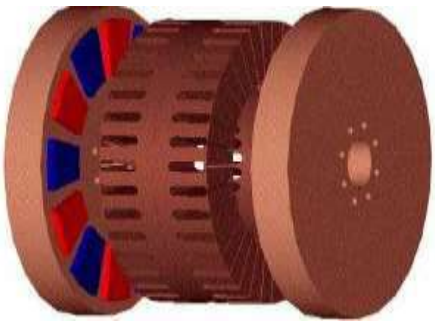
Différentes configurations à flux axial existent : celle à structure simple avec un seul rotor associé à un seul stator (Figure I.10(a)), celles à double entrefer avec soit ; un seul rotor inséré entre deux stators (Figure I.10(b)) ou un seul stator inséré entre deux rotors (Figure I.10(c)). On trouve également une configuration multi stator multi rotor (Figure I.10(d)). L'exploitation de ces machines dans le domaine de traction (vélo électrique et voiture hybride) est très prometteuse [13][8][27] [17].



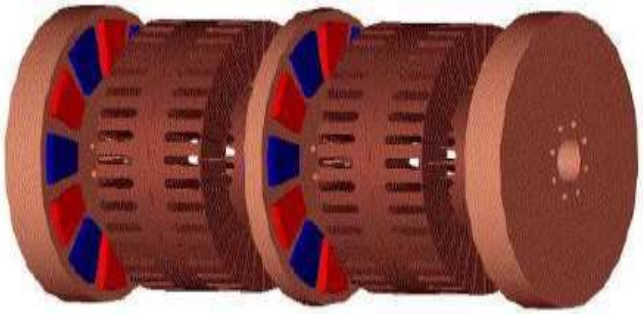
(a) structure simple



(b) structure double stator



(c) Structure double rotor



(d) structure multi rotor multi stator

Figure I.10 Vue d'une machine à flux axial (différentes configurations)

I.3.5. Propriété des aimants permanents

Le choix des aimants permanents est primordial puisqu'ils interviennent beaucoup dans le couple massique de la machine. Les aimants permanents sont principalement caractérisés par leurs cycle d'hystérésis et plus particulièrement par la courbe de désaimantation du deuxième quadrant du plan (B-H) comme le montre la (Figure I.11)**,** cette courbe est caractérisée par [3]:

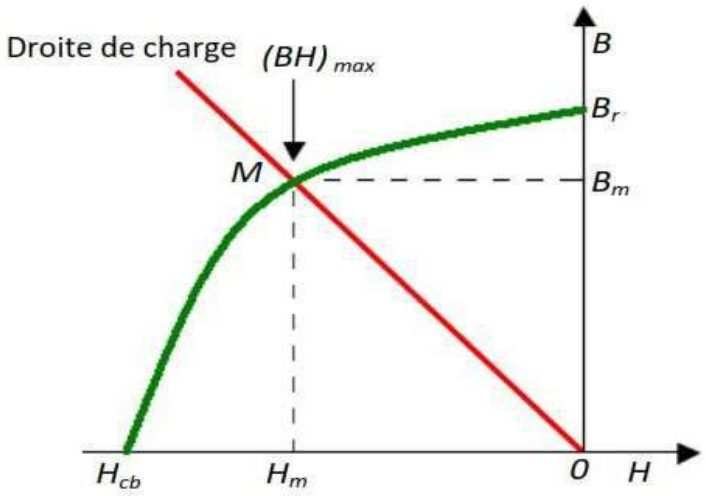


Figure I.11 Courbe de désaimantation.

- L'induction rémanente (Br) : c'est -à-dire l'induction résiduelle au circuit ferme, c'est -à-dire une induction de la puissance potentielle de l'aimant.
- Le champ coercitif (Hcb) : caractérise le champ démagnétisant annulant l'induction, plus sa valeur est élevé plus l'aimant est stable.
- Produit d'énergie volumique(BH) max, ce produit est couramment appelé énergie spécifique de l'aimant ; cette énergie caractérise la qualité du matériau. En effet pour un entrefer donné, le volume est d'autant plus faible, que l'énergie spécifique est élevée [3] [6].

I.3.5.1 Différents types d'aimants permanents

Les aimants permanents dans les circuits magnétiques et en particulier dans ceux des machines électriques apportent beaucoup d'avantages à savoir ; en premier lieu la possibilité d'obtenir une excitation sans pertes par effet joule et en second lieu la possibilité de mieux localiser le flux magnétique [8][27] [17].

On peut classer les matériaux, pour aimants permanents en trois grandes familles :

- **Les Alnico** : sont des aimants permanents réalisés à partir d'un alliage Aluminium-Nikel-Cobalt. caractérisés par une induction rémanente élevée et un champ coercitif faible ils sont donc de caractéristiques énergétiques médiocres. En effet, de par leur composition métallique ils sont le siégé de pertes, 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.
- **Les ferrites** : sont des 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 ils ont un champ coercitif élevé. Ils sont surtout intéressants pour leur bon rapport densité d'énergie-prix

- **Les terres-rares** : ils sont ; actuellement, les plus performants des aimants permanents, utilisés dans la construction des machine synchrone. Leur version la plus courante est l'alliage samarium-cobalt .caractérisé par une induction rémanente et un champ coercitif élevés A taille égale, la densité d'énergie emmagasinée dans l'aimant est trois fois plus grande que celle des Alnico et six fois plus que celle des ferrites. Leur prix est cependant élevé.

Le choix de l'aimant est effectué en fonction de 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 I.1 ci-dessous.

Type D'aimant	Densité d'énergie $(BH)_{max}$ (kJ/ m^3)	Induction rémanente Br (T) à 25°C	Champ coercitif $-H_c$ (kA/m)	Temperature T_{max} (°C)	Prix (€/kg)
NdFeB	200-380	1.2-1.5	900-2000	140-220	80-150
Sm Co_5	140-200	1	2000	280	220
Sm_2 Co_{17}	180-240	1.05	2000	350-550	300
Alnico	50-85	1.1-1.3	130	550	45
Ferrites Strontium	27-35	0.3-04	250	250	6
Ferrites Barium	8-30	0.2-04	170	100-240	4.5

Tableau I.1 Exemples de propriétés magnétiques des aimants [8,9,19].

I.4. Types des défauts dans les MSAP

Le défaut d'un élément est une condition de la réduction de capacité liée à des exigences minimales, Cela peut être le résultat d'une dégradation normale, une mauvaise utilisation, ou une combinaison de ceux-ci. Si un défaut n'est pas détecté, ou s'il est laissé se développer, il conduira à la défaillance du composant et provoquera sa sortie prématurée du fonctionnement [13] [17]. Dans les machines électriques les défauts peuvent provenir de la partie fixe (stator) ainsi que de partie mobile (rotor), d'où la classification ci-après.

I.4.1 Défauts rotoriques

La majorité des machines électriques ont une similarité de construction du stator et, par conséquent, les défauts sont également les mêmes. Toutefois, il existe une gamme de configurations du rotor selon le type de la machine. Les defaults rotoriques les
plus important sont les suivants:

- ✓ Rupture des barres rotoriques dans les machines synchrones.
- ✓ Défauts dans les enroulements rotoriques dans les machines synchrones classiques, les machines à courant continu et les machines asynchrones à rotors bobinés.
- ✓ Défauts des aimants dans les machines à aimants permanents.
- ✓ Ainsi, les défauts dans le rotor peuvent être considérés comme plus complexes et dépendent du type de la machine. Dans ce mémoire, nous nous concentrerons uniquement sur les défauts rotorique dans les MSAP. Ils sont brièvement décrits ci-dessous. [13][21] [17].

I.4.1.1. Défauts des aimants

Les moteurs à aimants permanents contiennent un rotor équipé d'aimants permanents. Ces derniers 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 statoriques 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 I.12). Mais ce point de fonctionnement peut évoluer et traverser le point limite de désaimantation réversible [13][21] [17].

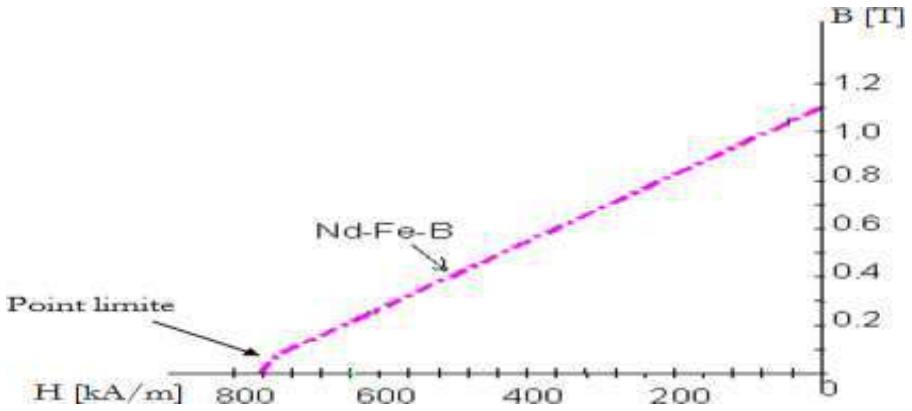


Figure I.12 Point limite de désaimantation réversible.

Ce phénomène peut se produire lors des applications brutales de charges ou en cas de défaut de court-circuit des enroulements statoriques. Une fois produite, la réduction irréversible de l'induction rémanente (Br) de l'aimant réduit de façon permanente les mances de la machine. Les températures élevées de fonctionnement réduisent aussi l'induction rémanente, La (Figure I.13) montre la variation du Br avec la température.

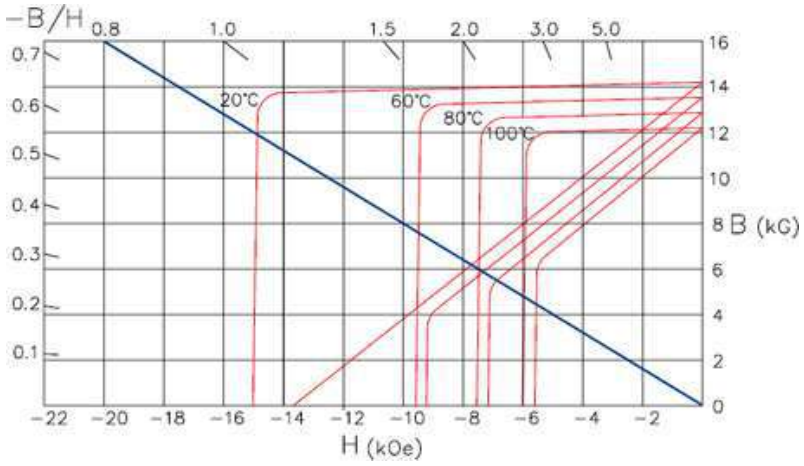


Figure I.13 Evolution de l'aimantation rémanente avec la température. [17].

La (Figure I.14) représente la caractéristique de démagnétisation lorsqu'un champ extérieur est appliqué pour s'opposer à l'aimantation résiduelle de déférents aimants :

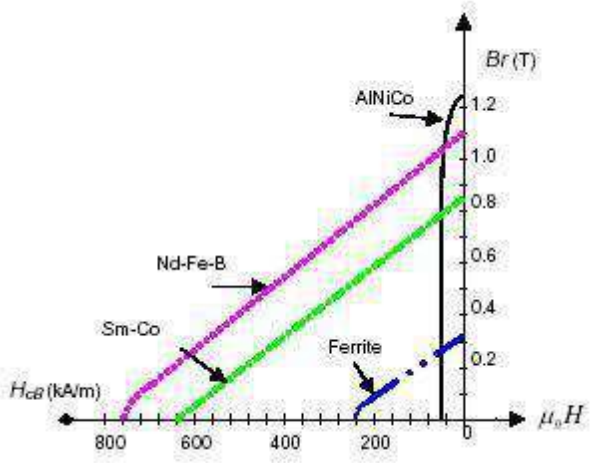


Figure I.14 courbe de désaimantation B(H) des principaux types d'aimants [3][1]

En plus de la diminution de la force magnétique de l'aimant en raison de la réaction d'induit ou de la température, il est également connu que certains aimants (comme Nd-Fe-B)

peuvent se détériorer par désintégration. Les fissures qui se forment lors de la fabrication peuvent conduire à la désintégration à grande vitesse. La désintégration entraîne la perturbation du flux dans l'entrefer causant ainsi le déséquilibre de l'attraction magnétique entre le rotor et le stator. Ceci engendre des vibrations et des contraintes sur les roulements [29] [17].

I.4.1.2. Défaut d'excentricité

Le centre du rotor est aligné sur celui du stator Dans une machine idéale, donc l'axe de rotation du rotor est le même que l'axe du stator comme indiqué sur la figure (I.9). L'excentricité dans une machine est définie comme un entrefer non symétrique entre le stator et le rotor. La présence d'un certain niveau d'excentricité est fréquente dans les machines électriques. Certains fabricants et utilisateurs spécifient un niveau maximal autorisé de 5%, alors que dans d'autres cas, un niveau maximal de 10% de longueur d'entrefer est autorisé par l'utilisateur. Toutefois, les fabricants.

Normalement essayent de maintenir le niveau total de l'excentricité encore plus faible afin de réduire les vibrations et le bruit et de réduire au mieux possible les attractions magnétiques déséquilibrées (Unbalanced magnetic pull UMP) [29] [17].

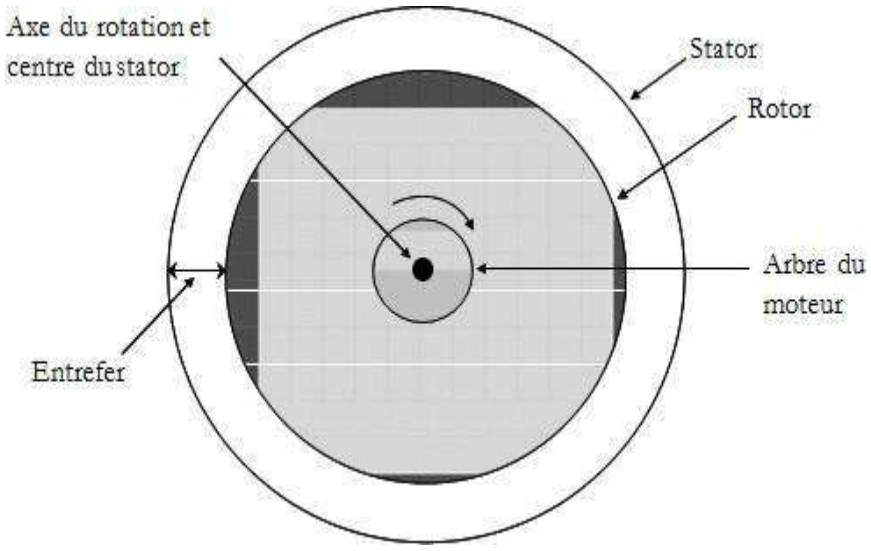
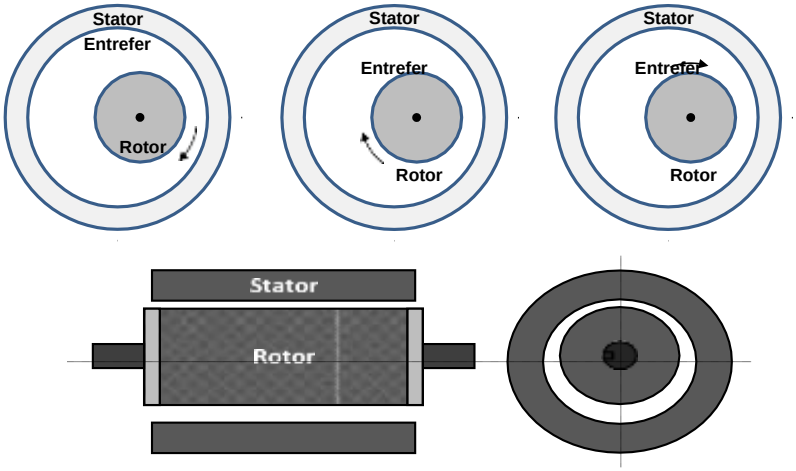


Figure I.15 Rotor parfaitement aligné au stator.

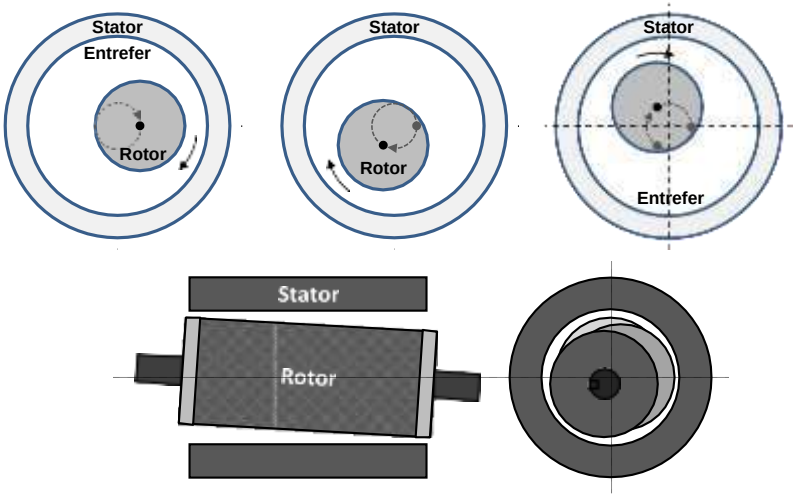
L'excentricité peut survenir sous forme statique ou dynamique. Dans le cas d'une excentricité statique, la position de la longueur radiale minimale de l'entrefer est fixée dans l'espace. Les causes typiques de l'excentricité statique comprennent l'ovaleité du stator ou le positionnement incorrect du rotor ou du stator à l'étape de mise en service. En supposant que le rotor et l'arbre sont suffisamment rigides, le niveau d'excentricité statique ne change pas avec le temps.



(a) Excentricité statique

Figure I.16 Excentricité statique d'une machine électrique [2][7].

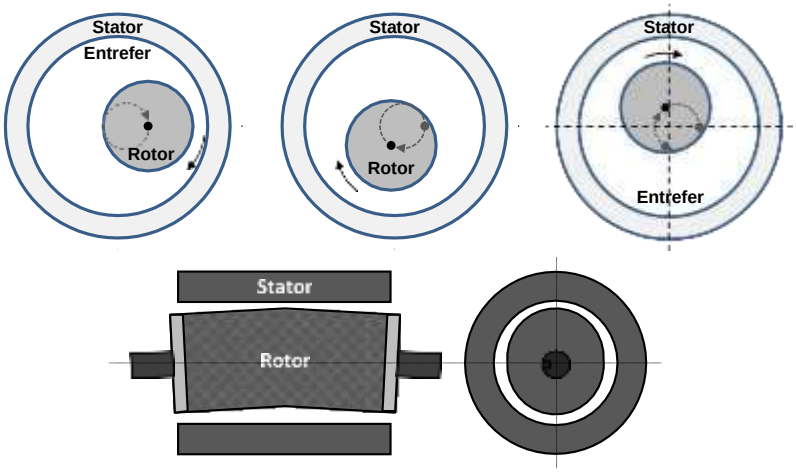
Une excentricité dynamique se produit quand le centre du rotor n'est pas sur l'axe de rotation. Un entrefer minimum tourne alors avec le rotor. Cela signifie que l'excentricité dynamique est une fonction de l'espace et du temps. Les causes typiques d'une excentricité dynamique sont les arbres pliées, les résonances mécaniques à vitesses critiques, et l'usure des roulements. La figure (I.17) montre la façon dont le rotor va tourner en présence de chaque type d'excentricités de l'entrefer [29] [17].



(b) Excentricité dynamique

Figure I.17 Excentricité dynamique d'une machine électrique [2][7]

L'excentricité mixte : c'est la somme des deux cas précédent



(c) Excentricité mixte

Figure I.18 Différents types d'excentricité dans les machines électriques [2][7]

Lorsque l'excentricité devient grande, les Forces Radiale du Déséquilibre (FRD), (Unbalanced Magnetic Pull UMP) peut provoquer un frottement enter stator - rotor, ce qui peut les endommager. Dans le cas d'excentricité statique (Figure I.16) il s'agit d'une traction dans un sens. Cela rend les FRD dans une excentricité statique, difficile à détecter à moins d'utiliser un appareil spécial avant la mise en service du moteur. D'autre part l'excentricité dynamique produit un FRD qui tourne à la vitesse de rotation du moteur et agit directement sur le rotor. Ceci rend FRD plus facile à détecter à travers l'analyse des vibrations ou la surveillance des courants statoriques [13][17][11].

I.4.1.3. Défauts de roulements

En raison de la forte dépendance des moteurs aux roulements, il est difficile d'imaginer l'état d'avancement des machines tournantes modernes sans tenir compte de la large implication des roulements. Cependant, les défauts de roulement peuvent représenter entre 42% et 50% de l'ensemble des défaillances des moteurs. Le coût des roulements se situe entre 3 et 10% du coût réel du moteur. En outre, les coûts cachés générés dans les temps d'arrêt et la perte de production font que la défaillance de roulement soit plutôt une anomalie coûteuse . [17][30].

La majorité des machines électriques utilisent un roulement du type billes. Chacun de ces roulements se compose de deux anneaux appelés l'intérieur et l'extérieur des anneaux. Un

jeu de boules ou éléments roulants placés dans des pistes tourne à l'intérieur de ces anneaux. Les défauts des roulements pourraient se manifester comme des défauts d'asymétrie du rotor, qui sont généralement inclus dans la catégorie des défauts d'excentricité. Sinon, les défauts des roulements à billes peuvent être classés comme défauts d'anneau extérieur, défaut d'anneau intérieur et les défauts des billes.

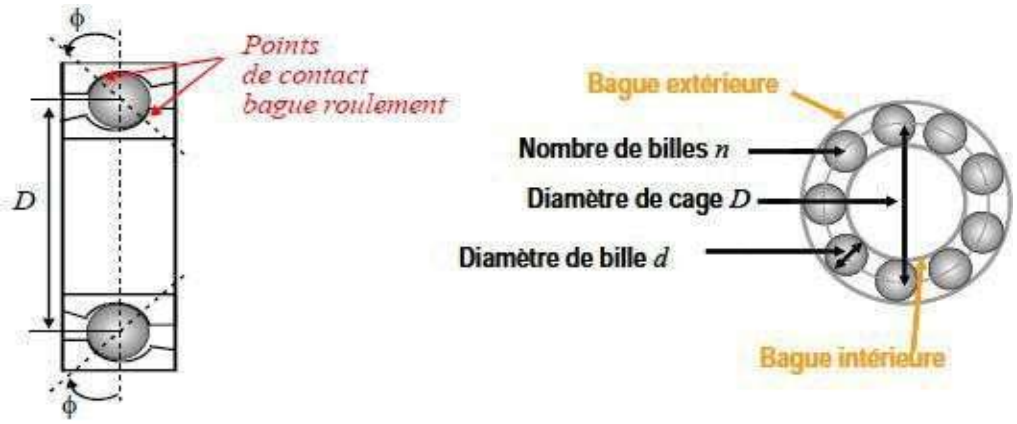


Figure I.19 Roulements à billes classiques. [17].

Les contraintes agissant sur un roulement peuvent conduire à l'excès de bruit, par rapport au fonctionnement régulier. De ce fait les vibrations mécaniques se développent et l'usure du roulement augmente. Si ces contraintes sont prises en compte dans la phase de conception, une défaillance prématurée pourra être évitée. Par contre, lorsque ces contraintes dépassent la capacité du roulement, sa durée de vie peut être considérablement diminuée et sa défaillance pourrait se produire à tout moment.

Les causes et mécanismes qui engendrent généralement ces défaillances sont :

- Sur charge thermique.
- Contrainte lourde, radiale ou axiale, causée par déviation de l'arbre.
- Chargement excessif (statiques et / ou dynamique).
- Choc excessive et vibration.
- Defaults d'usinage.
- Mauvaise manipulation et / ou montage.
- Problèmes d'environnement.
- Contamination causées par le ponçage des particules minuscules dures ou l'action corrosive de l'eau, de l'acide, etc.

I.4.2. Défauts statoriques

Le stator d'une machine électrique comprend des enroulements logés dans les encoches et une culasse qui assure la voie de retour pour le flux. Les défauts statoriques peuvent se situer au niveau des enroulements ou de la culasse [13][21][10] [17].

I.4.2.1. Défaut de culasse

La culasse (ou noyau) des machines électriques est construite de tôles fines d'aciers isolés dans le but de minimiser les pertes par courants de Foucault pour une plus grande efficacité opérationnelle. Dans le cas des machines à moyenne et grandes puissances, le noyau est compressé avant l'emplacement des tôles afin de minimiser les vibrations des feuilles de laminage et de maximiser la conductivité thermique.

Généralement les problèmes de noyau sont rares (1% des défauts). Par rapport à des problèmes d'enroulement, ils ne présentent pas une préoccupation majeure pour les petites machines. Pour les machines de grandes puissances la rectification des défauts du noyau est coûteuse [13] [17] , car elle exige généralement le remplacement de l'ensemble du noyau. Par conséquent, il y a eu l'intérêt d'identifier les causes principales de ces problèmes, de détecter et prévenir la défaillance de la culasse. Les causes principales de la défaillance de noyau du stator sont [21] [17] :

- ✓ Echauffement des extrémités ferromagnétiques résultant du flux axial des têts des bobines.
- ✓ Fusion du noyau causé par les courants de défaut.
- ✓ Vibration résultant de la dilatation de l'assemblage des tôles.
- ✓ Les défauts de fabrication des tôles : une épaisseur non uniforme des tôle cause
- ✓ Une distribution non uniforme de pression.
- ✓ Défaillance de l'isolant entre les tôles.
- ✓ Les dommages mécaniques à la surface intérieure du stator pendant l'assemblage, l'inspection, le re-bobinage, etc.
- ✓ Arc électrique du à la défaillance du bobinage.

I.4.2.2. Défauts des enroulements

Les enquêtes industrielles ont montré qu'un grand pourcentage de défaillances dans une machine électrique résulte des défauts liés aux enroulements statoriques. Des nombreux travaux ont démontré que la majorité des défauts de bobinage statorique résul-tent après la détérioration de l'isolation des fils. Dans la plupart des cas, cette défaillance démarre à partir d'un défaut entre spires. Finalement ce dernier grandit et entraîne les dé-fauts entre les bobines, entre les phases, ou phase et terre, avant la détérioration du moteur [21] [17]. Les court- circuit des spires dans le bobinage appartiennent à cette classe de dé-faut qui a souvent un effet négligeable sur les performances de la machine au début, mais leur persistance peut conduire à une défaillance destructrice. Par conséquent, des exigences rigoureuses visant à minimiser l'apparition et l'atténuation des effets de rupture de l'isolant deviennent hautement souhaitables [13][21] [17].

I.4.2.2.1. Défauts de court-circuit dans les enroulements statoriques

Comme déjà mentionné, l'isolation du bobinage statorique est exposée à une combinaison de contraintes multi physiques : thermique, électrique et mécaniques. A long terme, ces multiples contraintes accélèrent le vieillissement, qui conduit à la destruction de l'isolation.

Les fameuses causes de la défaillance des enroulements statoriques sont :

- ✓ la haute température de la culasse statorique et du bobinage,
- ✓ la contamination causée par les hydrocarbures, de l'humidité, la saleté…etc.,
- ✓ les court-circuit,
- ✓ les contraintes de démarrage,
- ✓ les décharges électriques,
- ✓ Les fuites dans les systèmes de refroidissement

La détérioration de l'isolation commence habituellement par un défaut entre spire (inter-turne) de quelques spires, ce qui produit un arc électrique irrégulier de faible puissance. Cela entraîne l'érosion des conducteurs jusqu'à ce qu'ils soient soudés. Un défaut entre spires entraîne un grand courant circulant dans la branche court-circuitée. L'amplitude de ce courant peut être deux fois plus grande que le courant à rotor bloqué. Il provoque de graves échauffements localisés ce qui maintient des conditions favorables pour la propagation du défaut à une plus grande partie de l'enroulement [13] [17]. Le courant à rotor bloqué est de l'ordre de 6 à 10 fois le courant nominal. La non détection de ce défaut conduit à un autre, plus néfaste :

I.4.2.2.1.1. Court-circuit entre les spires

C'est le défaut le plus fréquent, il engendre une augmentation du courant statorique dans la phase affectée. Ce courant peut être égal à deux fois le courant rotorique qui est environ 6 à 10 fois le courant nominal et il engendre des échauffements graves qui peuvent provoquer la propagation rapide du défaut dans tout l'enroulement (apparition d'un deuxième court-circuit).

I.4.2.2.1.2. Court-circuit entre les phases

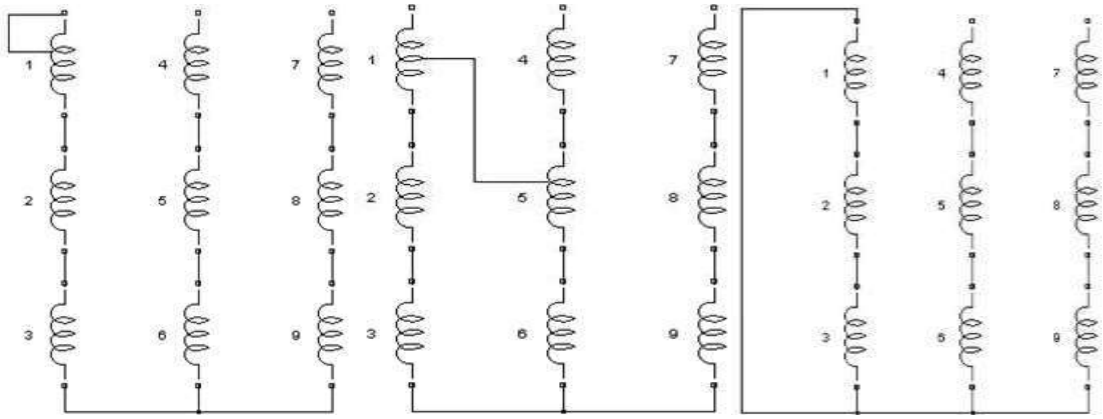
Le court-circuit entre les phases engendre des courants très élevés menant à la disjonction par les protections et/ou la fusion des conducteurs d'alimentation.

I.4.2.2.1.3. Court-circuit entre phase et neutre

Les conséquences d'un défaut de court-circuit entre phase et neutre sont moins graves puisque un déséquilibre des courants peut exister avec un petit risque concernant la fusion des conducteurs.

I.4.2.2.1.4. Court-circuit dans une phase

Un court-circuit dans une phase est un des problèmes les plus difficiles à tolérer. Dans ce cas, la littérature présente la phase concernée comme perdue. Sur une machine triphasée avec un onduleur à 3 bras, cela implique l'arrêt de la machine à cause des conséquences physiques sur le moteur en cas de maintien de l'alimentation. La conséquence la plus importante est l'apparition des courants de court-circuit, le principal problème étant l'échauffement important pouvant propager la faute. L'importance des courants de faute dépend directement du nombre de spires en court-circuit. Il faut aussi prendre en compte le fait que des spires en court-circuit engendrent un couple résistant dû aux courants induits par le flux d'excitation circulant et les mutuelles de la machine en fonctionnement. Ce couple résistant est une valeur à caractériser pour en prévoir les conséquences sur le fonc-tionnement suite à la panne de la machine.



(a)Court-circuit entre spires (b) Court-circuit entre phases (c) Court-circuit entre phase et neutre

Figure. I.20 Représentation de court-circuit entre spires, entre phases, phase et terre[21]

L'échauffement excessif causé par un défaut entre spires conduit souvent les moteurs à une défaillance après quelques minutes de fonctionnement. Une règle générale stipule que chaque 10°C supplémentaire par rapport à la température nominale, entraîne le bobinage à se détériorer deux fois plus vite. Si le défaut est détecté assez tôt la machine peut être remise en service après un simple re-bobinage de l'enroulement statorique. Le remplacement de l'ensemble du moteur nécessite généralement un temps d'arrêt plus im-portant . [13][10] [17].

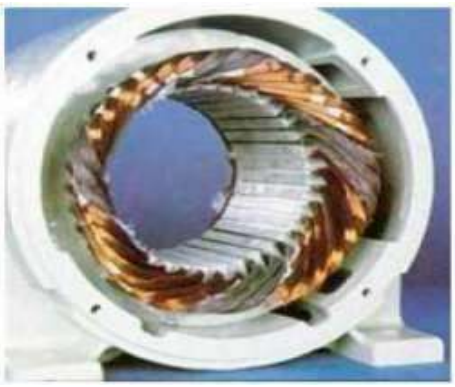


Figure I.21 Exemple de dégâts provoqués par les défauts de court-circuit statorique.

I.4.2.2.2.Circuit ouvert sur une phase

Un circuit ouvert dans une phase a des conséquences moins graves qu'un court-circuit. L'ouverture d'une des phases ne fait pas circuler de courant de faute et ne pose donc pas de problème d'échauffement pouvant détériorer le reste de la machine. De même, un circuit ouvert ne crée pas de couple résistant lorsqu'un champ variable est appliqué à la bobine. Le seul problème est donc la perte d'une phase et donc de produc-tion de couple. Dans le cas d'un moteur triphasé alimenté par un onduleur à trois bras, la seule manière de pouvoir assurer un

minimum de fonctionnement est de piloter les deux phases restantes, c'est-à-dire avec un fonctionnement équivalent à une machine à une phase. Le problème vient alors des ondulations de couple importantes et du fait de ne pas pouvoir assurer un service nécessitant des changements de sens de rotation et des phases marche/arrêt fréquentes (passage par une vitesse nulle.



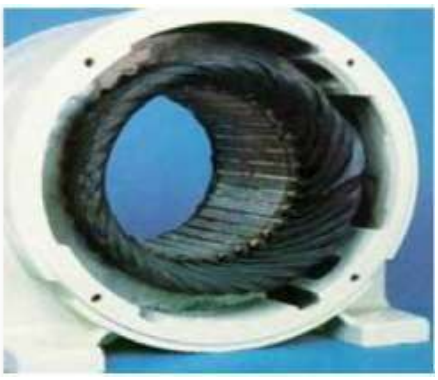
Ouverture d'une phase



Court-circuit dans une phase



Déséquilibre de l'alimentation



Damage dû à la surcharge



Masse dans l'encoche



Dégradation causée par une surtension

Figure I.22 Différents défauts statoriques [5].

I.5 Généralités sur le diagnostic

I.5.1. Définition de Diagnostic

Le diagnostic est l'action consistant à identifier et analyser la (ou les) cause(s) probable(s) de la (ou les) défaillance(s) ou de l'évolution d'un ou de plusieurs paramètres significatifs de dégradations à l'aide d'un raisonnement logique fondée sur un ensemble d'informations. Les méthodes de diagnostic peuvent utiliser toutes les connaissances disponibles sur leurs relations de cause à effet. Cette étape fournit des informations permettant de déterminer le degré de criticité du défaut et de cibler les moyens d'action possibles pour le contenir. Le diagnostic permet aussi de confirmer, de compléter ou de modifier les hypothèses faites sur l'origine et la cause des défaillances, et de préciser les opérations de maintenance corrective nécessaires

I.5.2. Les différentes notions utilisées en diagnostic[22]

I.5.2.1. La sûreté

La sûreté est définie comme un ensemble de propriétés indispensables à une machine électrique. La surveillance se réfère à la capacité de reconnaître un comportement anormal et de le signaler. La supervision est fondée sur la surveillance et la capacité d'agir, pour éviter des dommages sur l'installation et pour continuer la production, lorsque cela est possible .

I.5.2.2. La surveillance

La surveillance concerne les actions réalisées manuellement ou automatiquement, destinées à observer l'état de la machine électrique en vue de détecter l'apparition d'une éventuelle défaillance. Les informations nécessaires à ces actions peuvent provenir des grandeurs physiques directement prélevées sur la machine ou reconstituées à partir de mesures indirectes.

I.5.2.3. Une défaillance

Une défaillance est définie comme l'inaptitude d'un composant à remplir toute ou partie de sa fonction. Un défaut est un écart entre un comportement attendu et un comportement observé.

I.6. Panorama des méthodes de diagnostic des machines électriques [17].

Comme la conception et l'analyse des machines tournantes jouent un rôle important en termes de cout de production et d'entretien, le diagnostic des défauts est un aspect qui attire de plus en plus l'attention des concepteurs et des utilisateurs. En effet, la détection, la localisation et l'analyse des défauts sont devenues essentielles au bon fonctionnement des machines électriques. Ces taches sont tout aussi indispensables pour la sécurité, la fiabilité, l'efficacité et la performance du système. Les machines tournantes modernes étant de plus

complexe, les stratégies de surveillance et de diagnostic de ces machines doivent évoluer à faire face à l'augmentation des contraintes physiques imposées sur les composants de ces dernières.

La plupart des anciens travaux dans le domaine du diagnostic des défauts et de surveillance des machines ont été principalement concentrés sur les machines de type asynchrones. Diverses recommandations et solutions concernant des technologies de surveillance ont été proposées dans ce domaine [13][10] [17]. Avec le progrès technologique ces tâches deviennent complexes et sophistiqués. Des nouvelles structures (comme les machines à aimant permanent, les machines hybrides à aimants, les machines à reluctance variable etc.) ont également émergé. En conséquence, les solutions de surveillance de l'état doivent être adaptées selon les cas.

Le but de cette section est de présenter un panorama des méthodes de diagnostic appliquées aux machines électriques. Ces méthodes sont classées en deux grandes catégories, celles qui utilisent un modèle analytique du système et celles qui se dispensent de ce modèle. L'approche analytique est plutôt inspirée par les automaticiens, alors que les communautés du génie électrique et du traitement du signal préfèrent s'intéresser à des méthodes plus heuristiques [13][12] [25].

I.6.1.Méthodes de diagnostic avec modèle analytique

Ces méthodes de détection reposent sur des connaissances a priori du système. Elles supposent la connaissance des modèles et des paramètres représentant le processus physique à étudier. La comparaison des signaux expérimentaux représentant le fonctionnement du système et des signaux générées par les modèles (ou des paramètres estimés) permet la détection ainsi que l'identification de la défaillance susceptible de se produire. Ces techniques peuvent être classées en trois catégories [13][17] [25].

I.6.1.1. Techniques d'estimation d'état

Les modèles analytiques font intervenir un nombre fini de variables internes, appelés aussi variables d'état. Ces variables sont généralement non mesurables pour des raisons d'inaccessibilité, elles peuvent être dépourvues de sens physique ou le coût d'installation de capteurs est trop élevé. Comme l'évolution temporelle du système est caractérisée par l'évolution de ces variables, on a souvent recours à des techniques d'estimation (capteurs logiciels) pour suivre l'évolution de leurs valeurs. Deux manières différentes sont proposées pour la reconstruction de l'état du système en connaissant son modèle mathématique. Les

techniques qui découlent de ces deux concepts sont le filtre de Kalman et l'observateur de Luenberger [13][17] [25].

I.6.1.2. Technique de génération de résidus

Les résidus sont des signaux qui reflètent l'écart entre un modèle et le système à surveiller. Ces résidus dépendent de la technique avec laquelle ils ont été générés. Ces techniques d'extraction des résidus visent à fournir des signaux significatifs et exploitables pour détecter la présence d'une défaillance spécifique. En mode sain, ces résidus doivent s'approcher de zéro et refléter la présence d'un défaut en prenant des valeurs significatives [13][17] [25].

I.6.1.3. Techniques d'identification

Les techniques d'identification ont pour objectif de déterminer un modèle dynamique du système à surveiller à partir de mesures expérimentales, d'entrée et de sortie. L'idée fondamentale est que les paramètres caractérisant ce modèle identifié vont être sensibles aux défauts affectant la machine, et vont donc permettre par leurs variations de caractériser ces défauts. L'estimation des paramètres du modèle est assurée par un algorithme de minimisation de l'erreur entre la sortie du modèle et celle de la machine [13][17] [25].

Plusieurs techniques d'identification basées sur la minimisation d'un critère quadratique sont utilisables ; on peut les classer selon :

- ✓ techniques à erreur d'équation ;
- ✓ techniques à erreur de sortie ;
- ✓ filtre de Kalman étendu.

I.6.2. Méthodes de diagnostic sans modèle analytique

Ces méthodes se basent sur l'analyse des signaux d'acquisitions. Elles ont l'avantage de l'indépendance de l'analyse par rapport aux fluctuations internes du système. D'autre part, l'information contenue dans les signaux, n'étant pas filtrée par la modélisation, reste intacte [17][25] [20].

En effet, la machine électrique est utilisée pour la conversion électromécanique de l'énergie. Elle reçoit des signaux électriques (courants, tensions, puissances) et restitue des signaux mécanique (couple, vitesse), accompagnés de fuites magnétiques et des pertes de puissance sous forme de chaleur ce qui augmente sa température. Bien sûre tout cela se fait par la présence du champ magnétique dans l'entrefer de la machine. D'autre part l'apparition d'un défaut dans le moteur influe sur son comportement électromécanique, c.à.d. il est à l'origine de nombreux phénomènes tel 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. Ceci est, par différents degrés, dépendant du type de défaut et de sa sévérité. Cette réalité a motivé les chercheurs dans ce domaine de proposer des méthodes de diagnostic diverses, basées sur les déférentes grandeurs mesurables de la machine, révélatrices de défauts [17][25] [20].

Ces méthodes sont donc :

- mécanique (mesure : des vibrations, du couple, de la vitesse, de la température,…).
- chimique (analyse des huiles et des gaz).
- magnétique (mesure du flux : de l'entrefer, flux de fuite et flux axial).
- électrique (mesure : des courants, des tensions, des puissances,…).

Dans ce qui va suivre, nous allons présenter les techniques de diagnostic, basées sur la mesure des différents signaux de la machine, les plus utilisées.

I.6.2.1. Analyse des signaux vibratoires

L'analyse des défauts des moteurs électriques par les signaux vibratoires et acoustiques permet quasiment une détection de tous les défauts, notamment ceux mécaniques, pouvant se produire sur le processus [13] [17].cette analyse peut être réalisée à partir de capteurs, généralement des accéléromètres, placés sur les paliers dans les directions verticales, axiales et radiales [17] [25].

Cependant, ces analyses vibratoires comportent certains inconvénients :

- Problème d'accessibilité.
- difficultés rencontrée dans les connexions mécaniques des accéléromètres pour effectuer les mesures nécessaires au voisinage direct du défaut.
- De plus, le cout de ces capteurs reste relativement élevé par rapport aux autres capteurs. Ceci laisse cette technique employée uniquement pour les grandes machines. Pour s'affranchir de ces problèmes, les recherches focalisent leurs efforts pour détecter et localiser les défauts par l'analyse d'autres signaux.

I.6.2.2. Méthode thermique basée sur l'échauffement de la machine

Toute machine électrique dissipe une quantité de chaleur due aux pertes mécaniques dans les roulements, aux pertes électriques dans les conducteurs et aux pertes magnétiques dans le fer. Il en découle des échauffements générateurs de contraintes thermiques et une diminution du rendement. Par ailleurs l'élévation de température apparait dès la naissance du

défaut. La mesure de celle-ci peut donc donner accès à sa prévision. Ce type de diagnostic implique en premier lieu une meilleure compréhension du comportement thermodynamique du stator et du rotor dans les régimes permanent et transitoire [17] [25].
L'approche thermique consiste à mesurer la température de chaque phase de l'enroulement statorique et la comparer avec la valeur limite.
La température peut donc s'avérer, dans quelques cas de défauts, porteuse d'informations.

Cependant, sa mesure reste toujours très délicate et difficile à maitriser. En effet, cette approche nécessite aussi l'installation des capteurs au niveau de la machine, chose qui n'est pas praticable pour les machines de petite taille [13] [17].

I.6.2.3. Analyse des flux

Un déséquilibre magnétique, mécanique, électrique ou bien encore électromagnétique, situé au rotor ou au stator, peut affecter la conversion électromécanique et la répartition de champ dans et en dehors de la machine. Des études ont donc été menées pour extraire de la mesure des flux d'entrefer, axial ou de fuite des signatures caractéristiques de certains défauts [21] [17]. Pour cela, des bobines exploratrices sont placées à l'intérieur de la machine sur les dents statoriques, à l'extérieur de la machine, parallèlement et perpendiculairement à l'axe du rotor.

I.6.2.4. Analyse du couple électromagnétique

Certains défauts mécaniques peuvent être détectés par la recherche d'harmoniques dans le spectre du couple électromagnétique mesuré, résultat d'une interaction entre le flux et le courant [17] [25]. Ce couple peut être reconstruit, soit à partir de deux des trois courants statoriques, soit en utilisant un modèle physique de la machine [17] [25].

L'utilisation de ce signal peut s'avérer un bon choix pour la détection des défauts de charge. En effet, les variations du couple de charge vont induire des variations du flux et de courant dans le spectre du couple.

Les oscillations du couple, provoquées par certains défauts rotoriques, peuvent servir à détecter ces derniers [17] [25].

Comme nous venons de le voir, les signaux évoqués précédemment permettent de détecter un grand nombre de défauts sur la machine. Cependant, ces signaux nécessitent la mise en place d'un grand nombre de capteurs (bobines exploratrices pour le flux, couple mètre, accéléromètres, transducteurs,**…**) souvent coûteux ou onéreux, sensibles et délicats à placer dans des environnements contraignants. Ceci limite l'application de ces techniques qui sont basées sur l'analyse de ces signaux malgré leurs avantages. D'autres techniques qui ne

sont pas décrites ici, sont bien utilisées pour des applications bien particulières telles que les techniques de mesure des décharges électriques, les techniques qui utilise les signaux infrarouges, de radiofréquence (RF) ou les techniques chimiques et d'autres, qui trouvent dans certains cas leur emploi dans les grosses machines spécifiques à un certain type de défauts.

I.6.2.5. Techniques électriques

Malgré que certaines techniques sont jusqu'à maintenant utilisées telles que la technique des vibrations, les chercheurs durant ces dernières décennies s'orientent vers d'autres technique plus efficaces et plus simples à utiliser et qui ne nécessitant pas la mise en place de capteurs au niveau de la machine, mais uniquement une image sur la grandeur à mesurer à partir de la salle de contrôle. Il s'agit des techniques basées sur l'analyse de la signature électrique du moteur, où l'enroulement statorique placé dans la machine, est considéré comme un capteur. Ce qui montre l'avantage de leur emploi pour les machines de différentes tailles et quel que soit l'environnement dans les quelles sont placées. Cette approche de surveillance des entrainements électriques a été largement utilisée ces dernières années [17][25] [20], elle est connue sous le nom de l'analyse de la signature du courant du moteur.

L'avantage, comparé aux signaux précédents, est que les capteurs de courants sont désormais présents dans tous les systèmes de commande des entrainements électriques et offrent donc, un accès aisé à la mesure sans une implémentation (de capteur) supplémentaire.

I.6.3. Méthodes d'intelligence artificielle (IA)

L'intelligence artificielle est de plus en plus utilisée dans le domaine de la supervision et du diagnostic, elle a permis d'augmenter l'efficacité et la fiabilité du diagnostic. Dans le domaine de la supervision des machines électriques. En fait, le terme « Intelligence Artificielle » comprend diverses techniques telles que les systèmes experts, les réseaux de neurones, la logique floue qui peuvent être utilisés de manière indépendante ou combinés pour améliorer leur efficacité. Ces méthodes sont intéressantes même si elles nécessitent une phase d'apprentissage initial qui est critique pour un fonctionnement optimal. La phase d'apprentissage nécessite un ensemble important d'exemples comme elle peut être trompeuse ou peut produire des résultats limités à un ensemble de systèmes [17] [20].

Une fois la phase d'apprentissage accomplie, ces techniques se montrent efficaces et simples, et elles peuvent être adoptées avec succès pour le diagnostic des défaillances des systèmes électriques. Les techniques d'intelligence artificielle peuvent contribuer à accélérer le processus de décision avec une intervention humaine réduite [12] [15].

Voilà notre conclusion des méthodes de diagnostic exprimé dans la Figure I.22

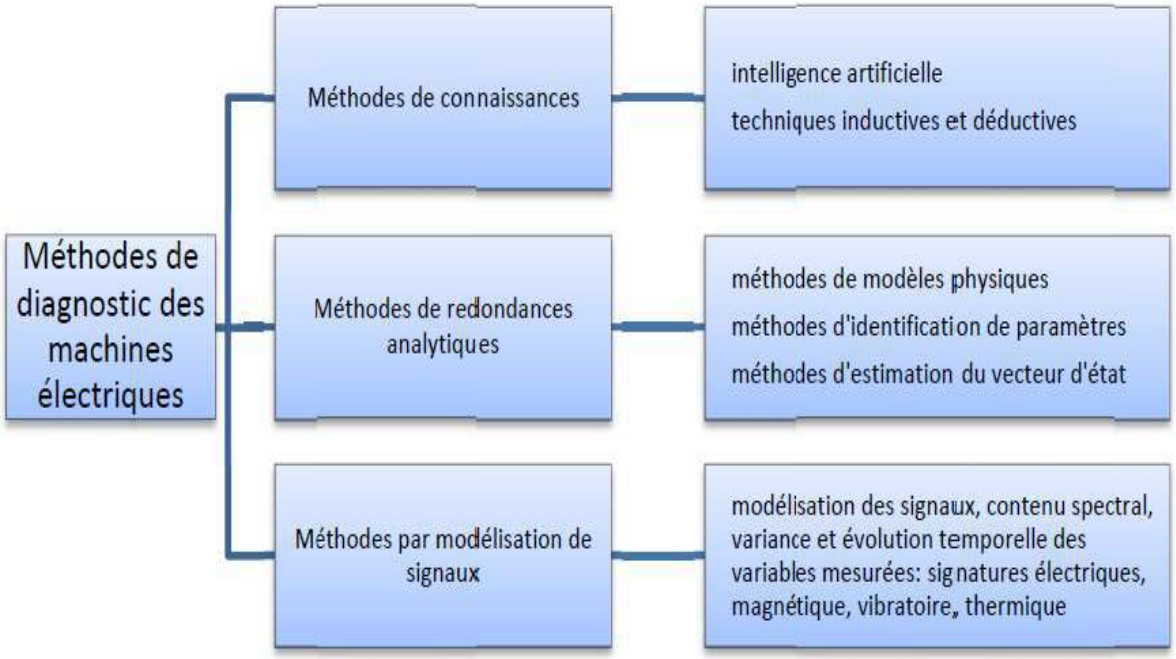


Figure I.22 Diaporama des méthodes de diagnostic de machines électriques [2]

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différents défauts affectant une machine synchrone à aimants permanents, et exposé les méthodes de diagnostic de ces défauts existantes. En discutant de leurs atouts et de leurs faiblesses, les méthode d'analyse en générale, même la méthode de l'intelligence artificielle.

Afin de montrer la fiabilité de la méthode choisie pour la détection du défaut de court-circuit de spires statoriques dans un moteur synchrone à aimants permanant, la simulation du comportement du moteur s'avère nécessaire. Pour se faire, il faut disposer d'un modèle mathématique décrivant le plus fidèlement possible les diverses situations de la machine. Ceci fera l'objet du prochain chapitre.

Chapitre II :

Modélisation et simulation de la MSAP en régime sain

II.1.INTRODUCTION

Vu que l'application de l'expérimentation n'est pas aisée. L'étude du comportement d'un moteur électrique nécessite une bonne connaissance de son modèle dynamique afin de bien prédire, par voie de simulation, son comportement dans les différents modes de fonctionnement envisagé.

En générale, la machine synchrone est modélisée par des équations non linéaires. Ce non linéarité est du aux inductances et aux coefficients des équations dynamiques qui dépendent de la position rotorique, donc du temps. un changement de variable est souvent utilisé afin de diminuer la complexité de ce modèle dynamique, par la réduction du nombre de variables et l'élimination de la position du rotor dans les coefficients des équations différentielles. Dans ce cas, les conditions du régime permanent peuvent être déterminées beaucoup plus facilement et l'analyse de stabilité se fait plus aisément, ainsi que la synthèse de la commande.

L'objectif de ce chapitre est l'étude de la machine synchrone à aimants permanents (MSAP) en régime sain, afin de comparer les résultats en présence de défauts dus au court-circuit qu'on traitera dans le chapitre suivant. La méthode qu'on utilisera est basée sur la méthode des Circuits Electriques Magnétiquement Couplés (CEMC) qui est représenté dans un repère naturel des bobinages du stator de la machine par des circuits électriques intégrant les couplages magnétiques d'une part et la prise en charge des équations mécaniques après calcul préalable du couple électromagnétique d'une autre part sous forme d'un modèle d'état en tenant compte des hypothèse simplificatrices.

Ce modèle nous permet d'analysé les différentes grandeurs électriques (courant dans les enroulements), mécaniques (couple électromagnétique, vitesse de rotation et position angulaire rotorique) et magnétique (flux).

II.2.Modélisation de la MSAP

La machine (moteur) synchrone à aimants permanents (MSAP) comporte, au stator, un enroulement triphasé représenté par les trois axes (a, b, c) déphasés, l'un par rapport à l'autre, de 120° électrique (Figure II.1) et au rotor des aimants permanents assurant son excitation.

En fonction de la manière dont les aimants sont placés, on peut distinguer deux types de rotors [19][17] :

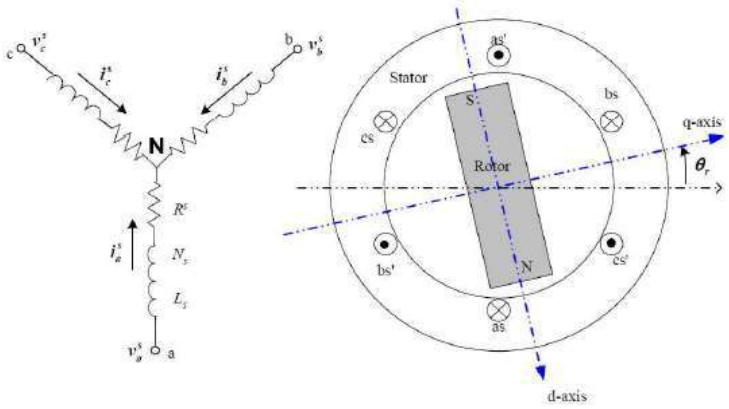
- Dans le premier type, les aimants sont montés sur la surface du rotor offrant un entrefer homogène, le moteur est appelé à rotor lisse et les inductances ne dépendent pas de la position du rotor.

➢ Dans le deuxième, par contre, les aimants sont montés à l'intérieur de la masse rotorique et l'entrefer sera variable à cause de l'effet de la saillance. Dans ce cas, les inductances dépendent fortement de la position du rotor.

Le diamètre du rotor du premier type est moins important que celui du deuxième ce qui réduit considérablement son inertie en lui offrant la priorité dans l'entrainement des charges rapides.

II.3. Modèle de la MSAP dans le repère (abc) (saine)

Les machines synchrones à aimants permanents sont des moteurs sans balais avec une distribution sinusoïdale des enroulements statorique. Le flux d'excitation vient des aimants situés sur ou à l'intérieur du rotor. Les lois de Kirchhoff sont appliquées pour développer le modèle électrique de la machine montrée dans la (Figure II.1) [31][13].



(a) (b)

Figure II.1 Schéma du bobinage statorique équivalent (a)

, et coupe transversale (b)d'une MSAP.

Ce modèle adopte les hypothèses simplificatrices suivantes

II.3.1.Hypothèses simplificatrices

Afin de modéliser la MSAP, on adopte les hypothèses simplificatrices usuelles données dans la majorité des références :

Le circuit magnétique n'est pas saturé, d'où les flux sont directement proportionnels aux courants qui leurs donnent naissance. Il en résulte que les inductances propres et mutuelles sont indépendantes des courant qui circulent dans les différents enroulements.

- ✓ _Le circuit magnétique est parfaitement feuilleté, ce qui permet de négliger les pertes

dans le fer (pertes par hystérésis et par courants de Foucault).

- ✓ La variation des résistances des enroulements en fonction de la température

négligeable. On prendra les valeurs correspondantes au fonctionnement sous charge nominale, après stabilisation de la température des enroulements.

- ✓ L'effet de peau sur les conducteurs est négligé, d'où la densité du courant est uniforme

dans les sections des conductions.

- ✓ Distribution spatiale sinusoïdale des forces magnétomotrices d'entrefer. Cela revient à

considérer la variation sinusoïdale des inductances mutuelles entre les enroulements statoriques en fonction de l'angle de leurs axes magnétiques.

- ✓ Les couplages capacitifs entre les enroulements est négligé.
- ✓ La composante homopolaire est nul (couplage en étoile).

Ces Hypothèses sont normalement connues comme étant appropriées pour un modèle de paramètres globale pour les moteurs électriques .

II.4. Mise en équations de la machine synchrone dans le référentiel (a, b, c)

Le modèle mathématique de la MSAP est similaire à celui de la machine synchrone classique. Dans le cadre des hypothèses simplificatrices et pour une machine équilibrée La (Figure II.2) donne la représentation des enroulements pour une machine synchrone triphasée à aimants permanents [23][24].

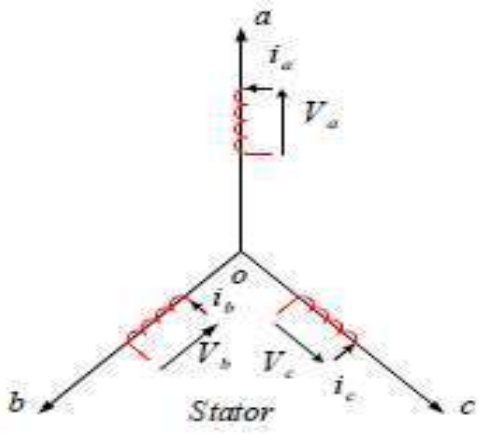


Figure II.2 Schéma de la MSAP dans le repère abc.

La modélisation d'une MSAP comprend trois types d'équations:

- ✓ Equations électriques,

- ✓ Equations magnétique,
- ✓ Equations mécaniques.

II.4.1.Equations électriques

Les tensions de trois phases statoriques de la MSAP sont donné par :

$$\begin{cases} V_a^s = R_s I_a^s + \dfrac{d}{dt}\phi_a^s \\ V_b^s = R_s I_b^s + \dfrac{d}{dt}\phi_b^s \\ V_c^s = R_s I_c^s + \dfrac{d}{dt}\phi_c^s \end{cases} \quad \text{(II.1)}$$

En rassemblant le système d'équation (II.1) sous forme matricielles, on obtient :

$$\left[V_{abc}^s\right] = \left[R_s\right].\left[I_{abc}^s\right] + \frac{d}{dt}\left[\varphi_{abc}^s\right] \quad \text{(II.2)}$$

Où : $\left[V_{Sabc}\right]$ représente le vecteur des tensions, $\left[I_{Sabc}\right]$ le vecteur des courants et $\left[\varphi_{Sabc}\right]$ levecteur des flux statoriques respectivement, tels que :

$$\left[V_s\right] = \begin{bmatrix} V_a^s \\ V_b^s \\ V_c^s \end{bmatrix} ; \left[I_s\right] = \begin{bmatrix} I_a^s \\ I_b^s \\ I_c^s \end{bmatrix} ; \left[\varphi_s\right] = \begin{bmatrix} \varphi_a^s \\ \varphi_b^s \\ \varphi_c^s \end{bmatrix} ; \left[R_s\right] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \quad \text{(II.3)}$$

où:

$\left[V_s\right]$: Vecteur tension statorique.

$\left[I_s\right]$: Vecteur courant statorique.

$\left[\varphi_s\right]$: Vecteur flux statorique.

$\left[R_s\right]$: Matrice résistance du stator.

En général, les trios phases du stator sont connectées en étoile de sorte que :

$$I_a^s + I_b^s + I_c^s = 0 \quad \text{(II.4)}$$

II.4.2.Equations magnétique

Les tensions de trois phases statoriques de la MSAP sont donné par :

$$\begin{cases} \varphi_a^s = L_s i_a^s + M_s i_b^s + M_s i_c^s + \varphi_m \cos(\theta) \\ \varphi_b^s = M_s i_a^s + L_s i_b^s + M_s i_c^s + \varphi_m \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \varphi_c^s = M_s i_a^s + M_s i_b^s + L_s i_c^s + \varphi_m \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \end{cases} \quad \text{(II.5)}$$

Sous forme condensée on a :

$$\left[\varphi_{abc}^s\right] = \left[L_{ss}(\theta_r)\right].\left[I_{abc}^s\right] + \left[\varphi_{abc}^m(\theta_r)\right] \quad \text{(II.6)}$$

Avec :

$$\left[L_{ss}\right] = \begin{bmatrix} L_s & M_s & M_s \\ M_s & L_s & M_s \\ M_s & M_s & L_s \end{bmatrix} ; \left[\varphi_{abc}^m\right] = \begin{bmatrix} \left[\varphi_a^m\right] \\ \left[\varphi_b^m\right] \\ \left[\varphi_c^m\right] \end{bmatrix} \quad \text{(II.7)}$$

$\left[L_{ss}\right]$: Matrice d'inductances statoriques.

$\left[\varphi_{abc}^m\right]$: Vecteur flux créé par l'aimant à travers l'enroulement statorique définie par :

$$\left[\varphi_{abc}^m\right] = \begin{bmatrix} \cos(\theta) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad \text{(II.8)}$$

Où:

θ : Angle entre l'axe magnétique de l'aimant et l'axe de référence dans le système triphasé défini par :

$$\theta(t) = \int_0^t \omega dt \quad \text{(II.9)}$$

Sachant que :

$$\omega = p\Omega r \quad \text{(II.10)}$$

Avec :

ω : La pulsation électrique.

p : Le nombre de pairs de pôle.

Ωr : La vitesse de rotation de rotor.

II.4.3. Les équations mécaniques

L'application de la 2ème loi de Newton donne l'équation de mouvement :

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{J}(C_{em} - C_r - f\omega_r) \qquad \text{(II.11)}$$

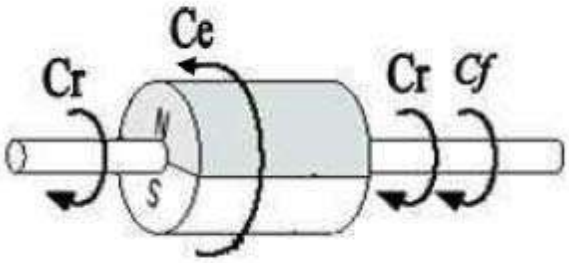


Figure II.3 Différents couples qui agissent sur le rotor.

Avec :

C_{em} : Le couple électromagnétique délivré par le moteur.

C_r : Le couple résistant.

f : Coefficient de frottement.

J : Moment d'inertie du moteur.

ω_r : La vitesse de rotation de rotor.

II.4. Modèle d'état de la MSAP en régime sain

En remplaçant les expressions des flux (II.2) dans les équations des tensions (II.1)

On obtient :

$$\left[V_{abc}^{s}\right]=\left[R_{abc}^{s}\right].\left[i_{abc}^{s}\right]+\frac{d\left[L_s(\theta_r)\right]}{dt}.i_{abc}^{s}+\left[L_s(\theta_r)\right].\frac{d\left[i_{abc}^{s}\right]}{dt}+\frac{d\left[\varphi_{abc}^{m}\right]}{dt} \quad \text{(II.12)}$$

$$\left[V_{abc}^{s}\right]=\left[R_{abc}^{s}\right].\left[i_{abc}^{s}\right]+\frac{d\theta_r}{dt}.\frac{d\left[L_s(\theta_r)\right]}{\theta_r}.i_{abc}^{s}+\left[L_s(\theta_r)\right].\frac{d\left[i_{abc}^{s}\right]}{dt}+\frac{d\theta_r}{dt}+\frac{d\left[\varphi_{abc}^{m}(\theta_r)\right]}{\theta_r} \quad \text{(II.13)}$$

$$w_r=\frac{d\theta_r}{dt} \quad \text{(II.14)}$$

Le système matriciel qui englobe les équations électriques et magnétiques est :

$$\begin{pmatrix}V_a^s\\V_b^s\\V_c^s\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}R_a^s&0&0\\0&R_b^s&0\\0&0&R_c^s\end{pmatrix}.\begin{pmatrix}I_a^s\\I_b^s\\I_c^s\end{pmatrix}+w_r.\frac{d}{d\theta_r}.\begin{pmatrix}L_s(\theta_r)&M_s(\theta_r)&M_s(\theta_r)\\M_s(\theta_r)&L_s(\theta_r)&M_s(\theta_r)\\M_s(\theta_r)&M_s(\theta_r)&L_s(\theta_r)\end{pmatrix}.\begin{pmatrix}I_a^s\\I_b^s\\I_c^s\end{pmatrix}$$
$$+\begin{pmatrix}L_s(\theta_r)&M_s(\theta_r)&M_s(\theta_r)\\M_s(\theta_r)&L_s(\theta_r)&M_s(\theta_r)\\M_s(\theta_r)&M_s(\theta_r)&L_s(\theta_r)\end{pmatrix}.\frac{d}{dt}.\begin{pmatrix}I_a^s\\I_b^s\\I_c^s\end{pmatrix}+w_r.\frac{d}{d\theta_r}\begin{pmatrix}\varphi_a^m(\theta_r)\\\varphi_a^m(\theta_r)\\\varphi_a^m(\theta_r)\end{pmatrix} \quad \text{(II.15)}$$

Dans le cas d'une machine avec des aimants en surface. L'inductance propre d'une phase et l'inductance mutuelle sont constantes et indépendantes de la position du rotor c'est-à-dire :

$$L_{s1s1}=L_{s2s2}=L_{s3s3}=L_{ls}+L_m \quad \text{(II.16)}$$

$$M_{s1s2}=M_{s2s1}=M_{s1s3}=M_{s3s1}=M_{s2s3}=M_{s3s2}=-\frac{1}{2}L_{ls} \quad \text{(II.17)}$$

$$\begin{pmatrix}V_a^s\\V_b\\V_c^s\\-cr\\0\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}R_a^s&0&0&\varphi_a^m(\theta_r)&0\\0&R_b^s&0&\varphi_a^m(\theta_r)&0\\0&0&R_c^s&\varphi_a^m(\theta_r)&0\\\frac{p}{2}\varphi_a^m(\theta_r)&\frac{p}{2}\varphi_a^m(\theta_r)&\frac{p}{2}\varphi_a^m(\theta_r)&f&0\\0&0&0&-1&0\end{pmatrix}\begin{pmatrix}i_a^s\\i_b^s\\i_c^s\\wr\\\theta\end{pmatrix}$$
$$+\begin{pmatrix}L_s&M_s&M_s&0&0\\M_s&L_s&M_s&0&0\\M_s&M_s&L_s&0&0\\0&0&0&j&0\\0&0&0&0&1\end{pmatrix}.\frac{d}{dt}\begin{pmatrix}i_a^s\\i_b^s\\i_c^s\\wr\\\theta\end{pmatrix} \quad \text{(II.18)}$$

II.4. Résultat de simulation du modèle MSAP en régime sain

On considère que la machine synchrone à aimants permanents est en régime sain et quelle est alimentée par un système de tension triphasées. L'implémentation du système d'équation différentielle constituante le modèle d'état de la MSAP en régime sain est réalisé sous environnement de Matlab. L'algorithme de Rung-Kutta 4, nous avons utilise un pas de temps de 10-4. Les figures ci- dessous représentent les résultats de simulation en régime transitoire des grandeurs électriques (les courants statoriques) et mécaniques (couple électromagnétique et la vitesse) de la machine synchrone à aimants permanents.

Les formes d'ondes qui concernent les courants dans les trois phases du stator, obtenues pour la MSAP saine est présentées sur la Figure IV.1suivante

- A Vide

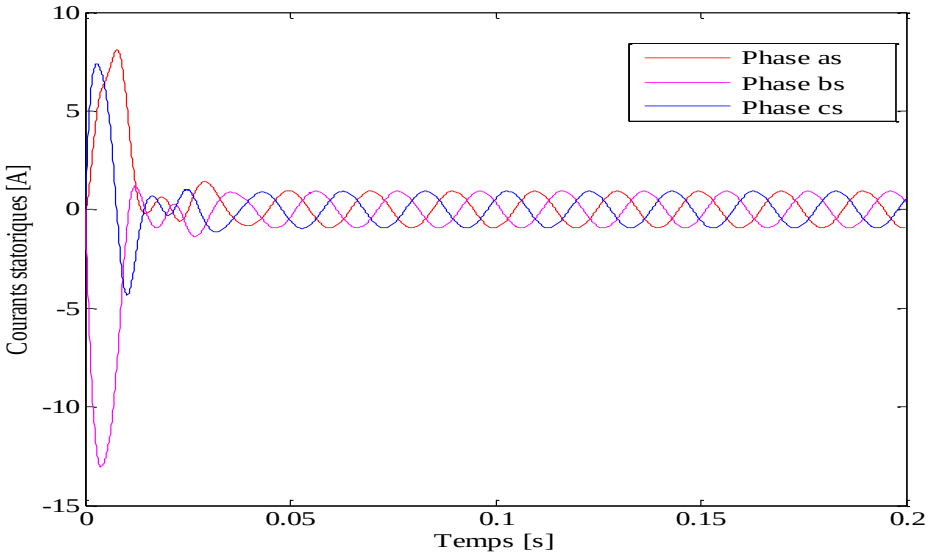


Figure II.4 courants statoriquea vide de la MSAP

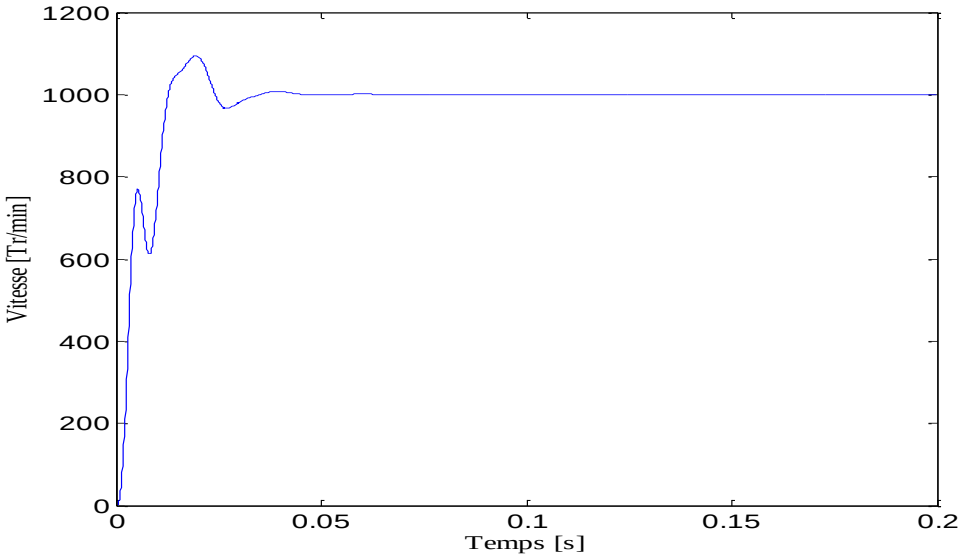


Figure II.5 La vitesse de rotation a vide de la MSAP

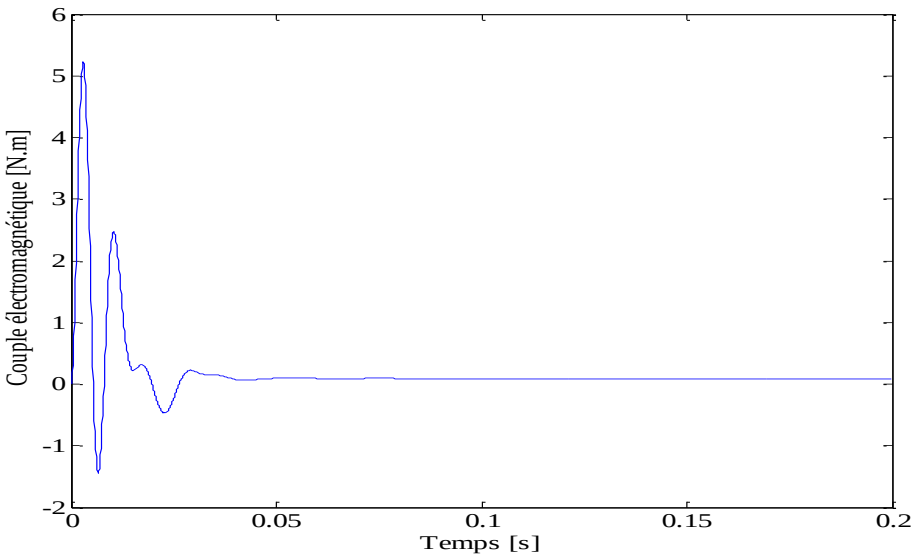


Figure II.6 couple électro magnétique a vide de la MSAP

- En charge

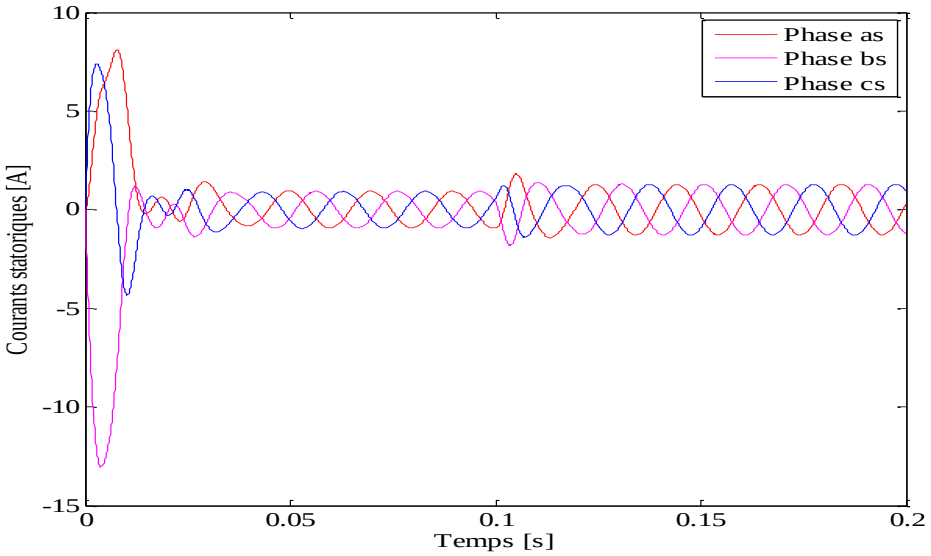


Figure II.7 courants statoriques en charge de la MSAP.

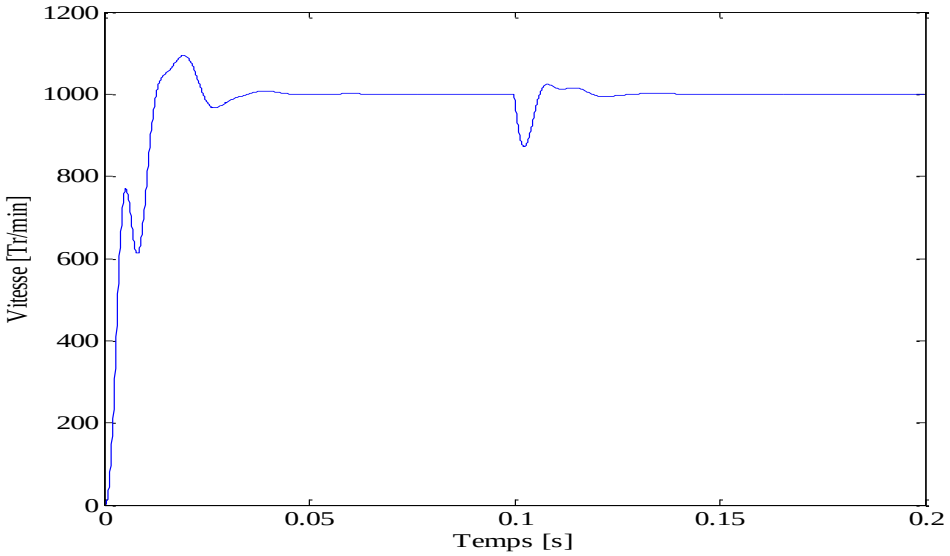


Figure II.8 vitesse de rotation en charge de la MSAP.

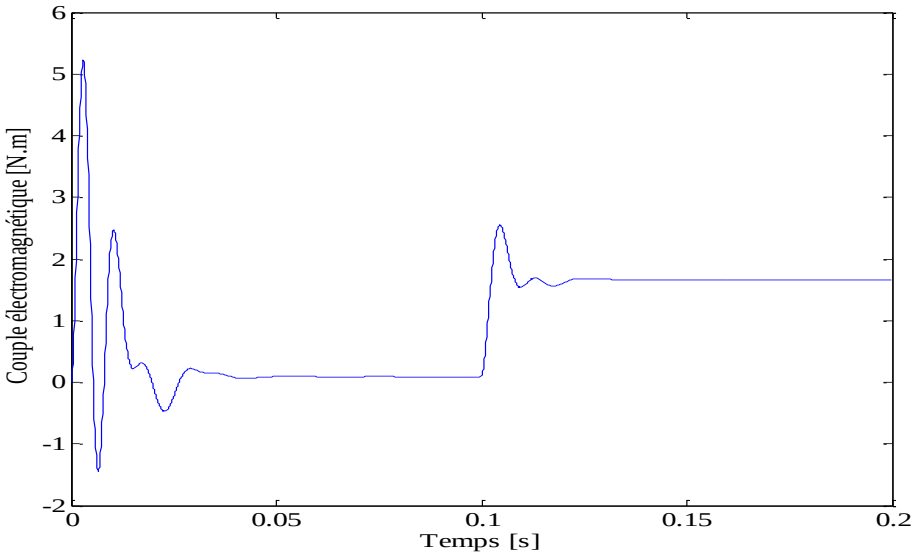


Figure II.9 couple électromagnétique en charge de la MSAP.

II.5. Interprétation des résultats en régime sain

La figure (II.7) relative aux courants dans les phases du stator fait apparaitre un courant de démarrage avec des valeurs maximales importantes (les pics de courant) et un déséquilibre dû à la variation maximale des flux de la machine en autre termes la force contre électromotrice(fcem) est nulle ainsi ce régime transitoire prendre une durée de temps courte à cause du démarrage à vide, et un régime permanent correspondant à des courants stabilisés et équilibrés sous forme d'ondes sinusoïdales équilibrées dû au développement de la (fcem) pour atteindre une valeur qui est proche de la tension d'alimentation ce qui implique des courants avec des amplitudes constantes. La figure (II.8)montre qu'en régime sain, la vitesse de rotation de la partie tournante (rotor) dela machine synchrone à aimants permanents passe d'un régime transitoire qui fait apparaitre des oscillations dû de l'accélération de la vitesse de rotation pour atteindre la vitesse de champ tournant crée par les courants circulé dans les enroulements de partie fixe (stator), où la vitesse du démarrage atteint une valeur important pendant une durée du temps de 0.02s.

Toutefois, en régime permanent la vitesse se stabilise à une vitesse constante où la vitesse de rotation égale à la vitesse de champ tournant. A l'instant de 0.02s avec l'affectation d'un couple résistant, qui fonctionne comme un frein entraine la diminution de la vitesse de rotation, de ce fait, la machine cherchera un nouveau point de

fonctionnement nominal qui va faire en sorte que le couple électromagnétique soit sensiblement équivalent au couple résistant. La figure (II.9) relative au couple électromagnétique fait apparaitre deux régimes Un régime transitoire : fait apparaitre des oscillations où la machine développe un couple maximal de démarrage important pour arrive à vaincre inertie de la masse rotorique, se que permettre, les pôles magnétiques créés par les aimants permanents cherchent en permanence de s'aligner sur ceux du stator.

Un régime permanent où la machine synchrone à aimants permanents à vide développe un couple de faible valeur, mais à l'instant de 0.02s où la machine est en charge, le couple électromagnétique développe une valeur sensiblement équivalente au couple résistant qui va faire en sorte avec le nouveau point de fonctionnement nominal.

Les résultats obtenus à partir de la simulation de modèle de machine synchrone à aimants permanents en régime sain sont en bonne correspondance avec ceux donnés en [22].

II.6. Conclusion

Ce chapitre a été consacré à la modélisation de la (MSAP) en régime sain dans le repère naturel (a, b, c). Les équations électriques (aux tentions), mécaniques (vitesse de rotation, position angulaire de rotor, couple électromagnétique) et magnétiques (flux) sont regroupées dans des systèmes équation différentielle sous forme de représentations d'états. Cette modélisation nous permet d'observer et d'analyser évolutions des différentes grandeurs électriques, magnétiques et mécaniques et prévoir le comportement et les performances dynamiques de cette machine.

Dans le chapitre suivant nous allons présenter la modélisation de la machine synchrone à aimants permanents en présence de défaut de court-circuit inter-spires dans les enroulements statoriques de la machine synchrone à aimants permanents.

Chapitre III :

Modélisation des défauts de court-circuit statorique dans les MSAP

III.1. INTRODUCTION

Les machines synchrones à aimants permanents (MSAP) sont de plus utilisées dans de nombreux domaines grâce à leur efficacité énergétique, leur simplicité de mise en oeuvre et leur performance dynamique. La sureté de fonctionnement de ce type d'actionneur devient cependant un problème critique, à cause de la présence d'un flux permanent au rotor, un court-circuit au stator de la machine est entretenu tant que la machine est en rotation.

La détection de ce type de défaillance doit être réalisée au plus tôt avec un bon taux de confiance pour permettre une sécurisation rapide afin d'éviter la propagation de défaut aux autres composants.

Dans ce chapitre, nous nous intéressons à la modélisation et l'étude de défauts inters spires de l'enroulement statorique afin de pouvoir diagnostiquer ce défaut. L'établissement de modèle suffisamment précis, prenant en compte la nature et la sévérité du défaut est la première étape dans l'étude de comportement de (MSAP) en présence d'un défaut de court-circuit inter spires [2] [12]. Elaboration de modèle en présence de défaut de court-circuit inter spires est faite à travers la mise en équations des relations électrique, magnétique et mécanique.

III.2.Modification de la structure du modèle

On vient de voir que l'occurrence d'un court-circuit entraîne une modification des circuitsélectriques équivalents des phases statoriques. Si ce court-circuit apparaît au sein de la phasestatorique*a s* , on propose la modification présenté à la figure 2.5. Deux nouvelles branchesnotées respectivement *d s* et *contact s* sont introduites. La branche *d s* représente les spires encourt-circuit . Celle-ci est couplée magnétiquement avec l'ensemble des phases statoriques etdes bobines fictives rotoriques et on lui associe la résistance *sdR* .

La branche *contact s* relie les points de contact *A1* et *A2* où se produit le court-circuit ; celle-cin'est pas couplé magnétiquement avec l'ensemble des phases statoriques et des bobinesfictives rotoriques et on lui associe la résistance *scontactR* .

Ce dernier paramètre constitue un degré de liberté permettant d'introduire le court-circuit. En effet, si on affecte une valeur assez grande à cette résistance, le courant *scontact i* circulant dans la branche S*contact* sera faible et la phase statorique*a as* retrouve sa configuration nominale ; si on affecte une valeur nulle àcette résistance, on provoque un court-circuit franc des conducteurs entre spires [8].

III.3. Modèle de la MSAP en présence de défaut de court-circuit entre spire

Dans ce paragraphe, nous désignons par court-circuit entre-spires tout défaut d'isolation pouvant intervenir entre deux spires d'une même phase au stator.

Le défaut n'est pasforcément franc et une résistance équivalente permet de modéliser ce qui reste de la résistance de l'isolant entre les spires court-circuitées. La valeur de la résistance indique la sévérité du défaut d'isolation.

En pratique la résistance r_f varie depuis une valeur infinie lorsque la machine est saine et è zérolorsque la machine est en présence d'un défaut franc de court-circuit entre-spires. Il est doncintéressant de déterminer le comportement de la machine lorsque cette résistance estsuffisamment petite pour que son effet soit perceptible sur les courants absorbés par lamachine [31] [12].

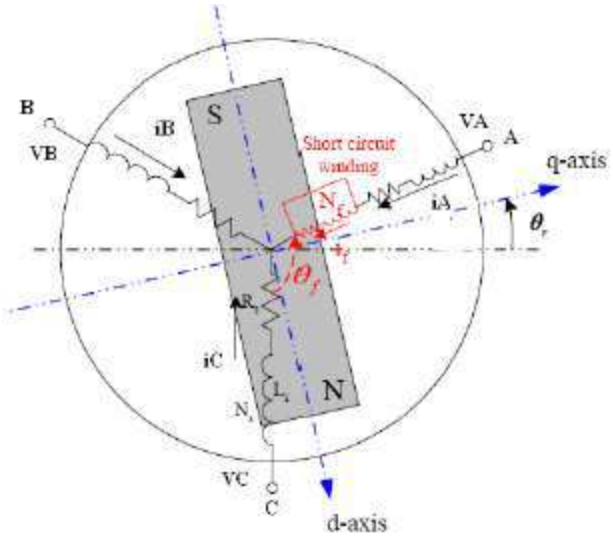


Figure III.1 Représentation d'un moteur synchrone à aimant permanent avec court-circuit entre spiresdans la phase statorique A.

La partie court-circuitée forme un circuit supplémentaire, ce qui crée un circuit magnétique fixe, le nouveau champ magnétique résultant va modifier le champ original en ajoutant le quatrième circuit couplé magnétiquement au système. Pour représenter le défaut,deux nouveaux paramètres sont définis ; σ_{cc} et θ_f .

- cc : est défini comme étant le rapport du nombre des spires court-circuitées n_{cc} au nombre des spires statoriques total N_s

$$\sigma_{cc} = \frac{n_{\sigma_{cc}}}{N_f} \tag{III.1}$$

- θ_f : est un paramétre de localisation de défauts. C'est l'angle entre la partie de la phaseen défaut et la partie de la phase saine. Elle ne peut prendre que trois valeursdifférentes. $0, \frac{2\pi}{3}, -\frac{2\pi}{3}$ correspondant à un enroulement du stator défaillant pour les phases A, B ou C.

III.4. Modèle de la MSAP avec défaut entre-spires dans le repère triphasés (abc)

Par rapport à la nomenclature présentée ci haut, les équations électriques dans les deuxparties qui composent la phase as (sous-bobines as1 et as2 sur la figure II.5) sont données par:

Les équations des tensions statoriques s'écrivent alors comme suit :

$$[V_s]_{\sigma_{cc}} = [R_s]_{\sigma_{cc}} . [I_s]_{\sigma_{cc}} + \frac{d}{dt}[\varphi_s]_{\sigma_{cc}} \tag{III.2}$$

où :

$$[V_s]_{\sigma_{cc}} = \begin{bmatrix} V_{A1}^s \\ V_b^s \\ V_c^s \\ V_{A2}^s \end{bmatrix} ; [I_s]_{\sigma_{cc}} = \begin{bmatrix} i_{A1}^s \equiv i_A^s \\ i_B^s \\ i_c^s \\ i_{A2}^s \end{bmatrix} ; [\varphi_s]_{\sigma_{cc}} = \begin{bmatrix} \varphi_{A1}^s \\ \varphi_b^s \\ \varphi_c^s \\ \varphi_{A2}^s \end{bmatrix} \tag{III.3}$$

$i_{\sigma_{cc}}$: le courant de court-circuit.

i_{sA2} : le courant qui passe dans la partie court-circuitée et qui égal à :

$$i_{sA2} = i_{sA1} - i_{cc} \tag{III.4}$$

Nous désignions n_{cc} par le nombre de spires court-circuitées de la phase "A", alors nousavons une portion saine de $N_s - n_{cc}$ spires et en supposant que les phases "B " et "C" sontsaines.

Dans ce cas, la nouvelle matrice des résistances $[R_s]$ statoriques devient :

$$[R_s] = R_s \begin{bmatrix} (1-\sigma_{cc}) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sigma_{cc} \end{bmatrix} \tag{III.5}$$

La nouvelle matrice de l'inductance $[L_{ss}]$ est maintenant composée des inductancespropres et mutuelles entre la partie court-circuitée et les parties saines des enroulementsstatoriques.

$$[L_{ss}] = \begin{bmatrix} (1-\sigma_{cc})^2(l_{fs}+L_{ms}) & -\frac{L_{ms}(1-\sigma_{cc})}{2} & -\frac{L_{ms}(1-\sigma_{cc})}{2} & -\frac{L_{ms}(1-\sigma_{cc})}{2} \\ -\frac{L_{ms}(1-\sigma_{cc})}{2} & (l_{fs}+L_{ms}) & -\frac{L_{ms}}{2} & -\frac{\sigma_{cc}L_{ms}}{2} \\ -\frac{L_{ms}(1-\sigma_{cc})}{2} & -\frac{L_{ms}}{2} & (l_{fs}+L_{ms}) & -\frac{\sigma_{cc}L_{ms}}{2} \\ L_{ms}cc(1-\sigma_{cc}) & -\frac{\sigma_{cc}L_{ms}}{2} & -\frac{\sigma_{cc}L_{ms}}{2} & \sigma_{cc}{}^2(l_{fs}+L_{ms}) \end{bmatrix} \tag{III.6}$$

Cependant, le flux de l'aimant traversant la phase en défaut peut également être diviséen deux parties qui sont proportionnelles à la gravite du défaut.

Par conséquent, le vecteur du flux mutuel de l'équation (II.11) devient :

$$\left[\varphi_{mABCf}\right] = \begin{bmatrix} \varphi_{mA}(\theta_r,\theta_f) \\ \varphi_{mB}(\theta_r,\theta_f) \\ \varphi_{mC}(\theta_r,\theta_f) \\ \varphi_{mf}(\theta_r,\theta_f) \end{bmatrix} = \varphi_f \begin{Bmatrix} (1-\sigma_{cc})\cos(\theta_r-\theta_f) \\ \cos(\theta_r-\frac{2\pi}{3}+\theta_f) \\ \cos(\theta_r+\frac{2\pi}{3}+\theta_f) \\ (\sigma_{cc})\cos(\theta_r-\theta_f) \end{Bmatrix} \tag{III.7}$$

Voilà donc décrit le modèle mathématiques d'un moteur à aimants permanents sain etavec court-circuit de spires d'une phase statorique. Il faut noter que, l'ordre du systèmed'équations du moteur défaillent à résoudre est augmenté d'une équation par rapport à celui du moteur sain.

Les deux systèmes d'équations présentés (cas sain et défaillant) sont résolus sousenvironnement Matlab, par la méthode de Runge-Kutta d'ordre 4, afin de ressortir

lesgrandeurs électriques du moteur à aimants permanents (courants statoriques et puissanceactive et réactive) à travers la simulation. Ces grandeurs sont exploitées dans le domainefréquentielle, afin de pouvoir analyser leurs signatures. Ces signatures sont les indicateurs de la présence du défaut au niveau du moteur.

III.4.1 Résultats de simulation du MSAP en régime de défaut avec 2% des spires en court-circuit

A VIDE : cr=0 Nm

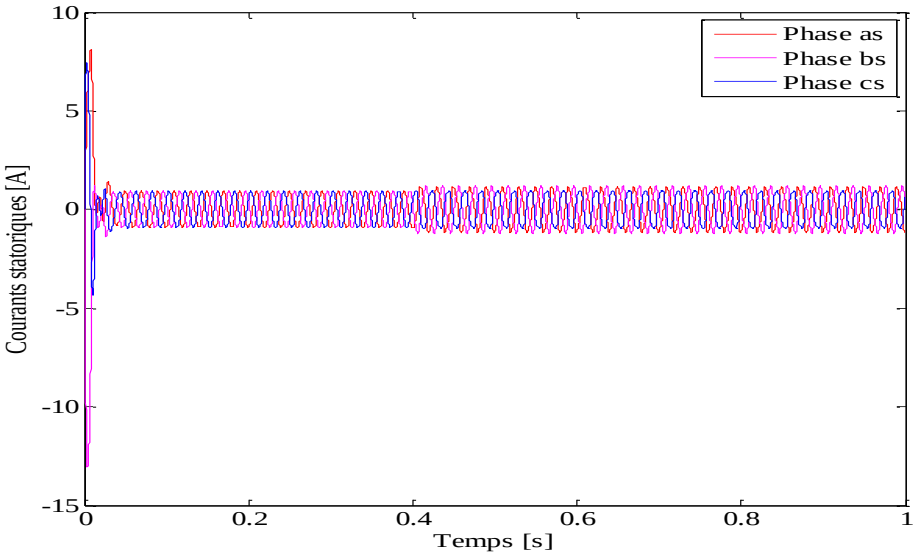


Figure III.2 Les courants statorique avec 2% des spires en court-circuit à vide.

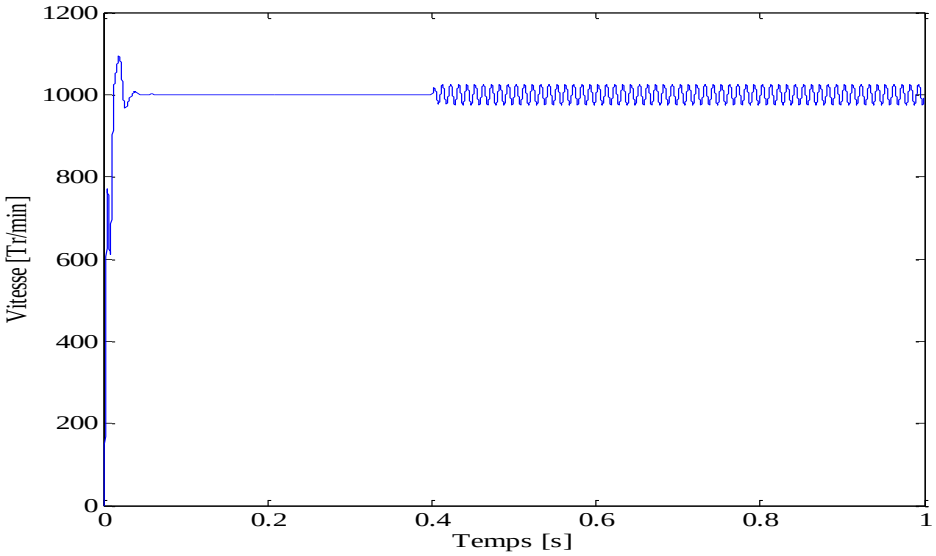


Figure III.3 La vitesse de rotation de la MSAP avec 2% de spire en court-circuità vide.

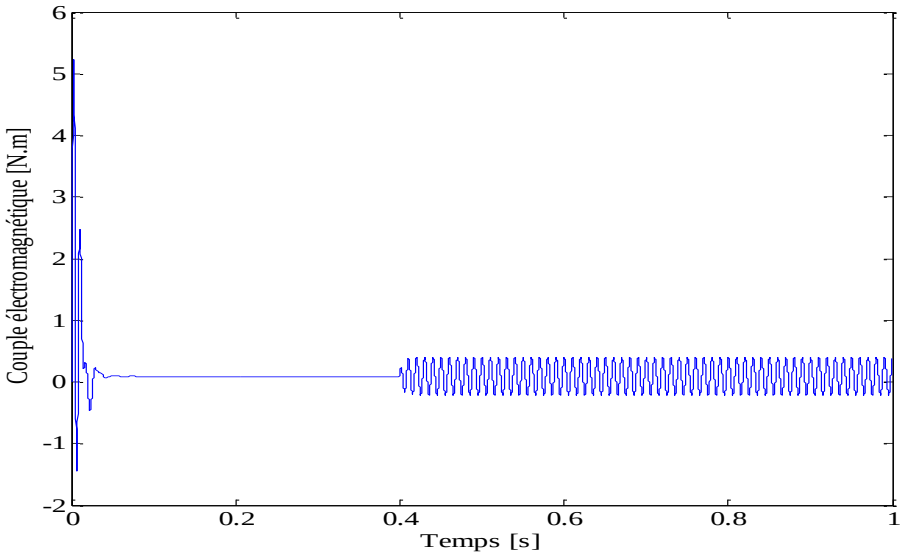


Figure III.4 Couple électromagnétique avec 2% de spire en court-circuit à vide.

EN CHARGE : Cr=1.6Nm

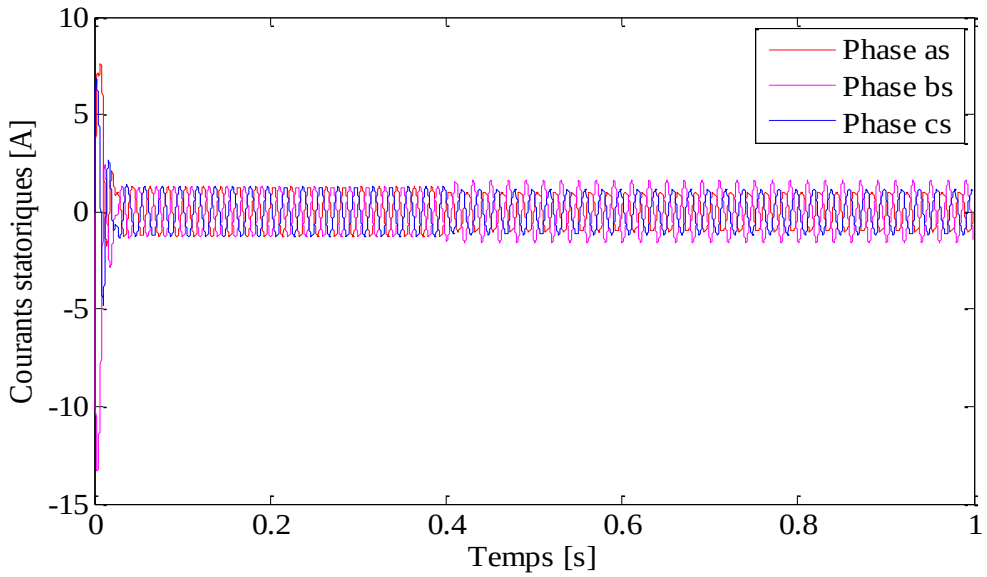


Figure III.5 Les courants statorique avec 2% des spires en court-circuit en charge.

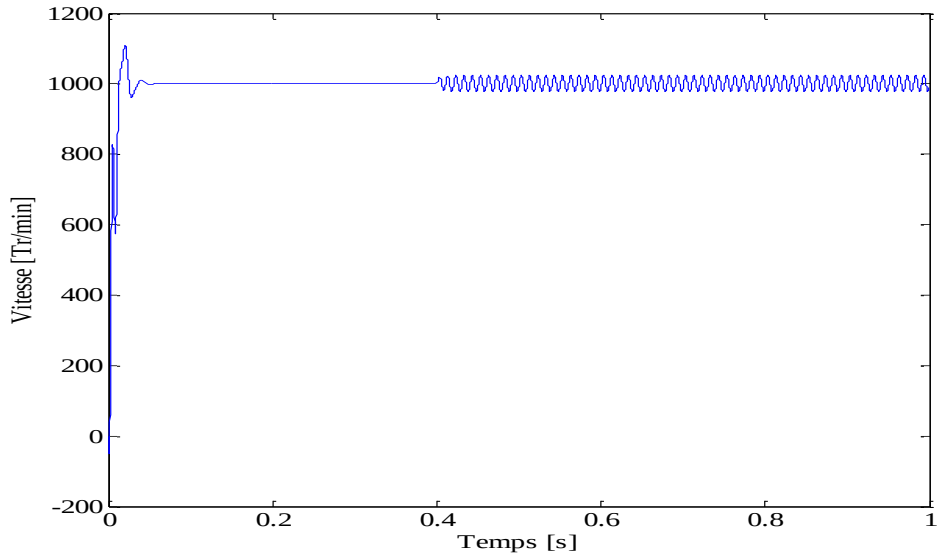


Figure III.6 La vitesse de rotation de la MSAP avec 2% de court-circuit spires encharge.

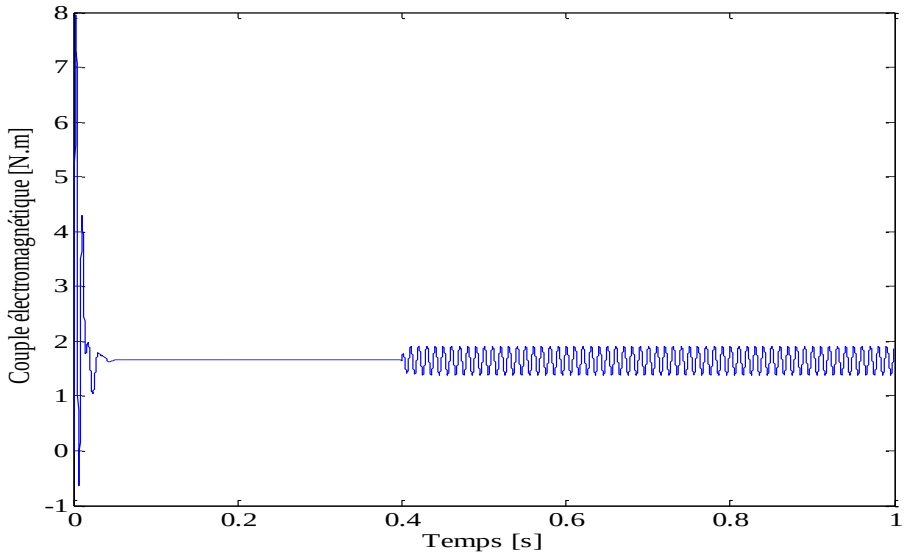


Figure III.7 Couple électromagnétique avec 2% de spire en court-circuit en charge.

III.4.2 Résultats de simulation du MSAP en régime de défaut avec 5% des spires en Court-circuit

A VIDE : Cr=0Nm

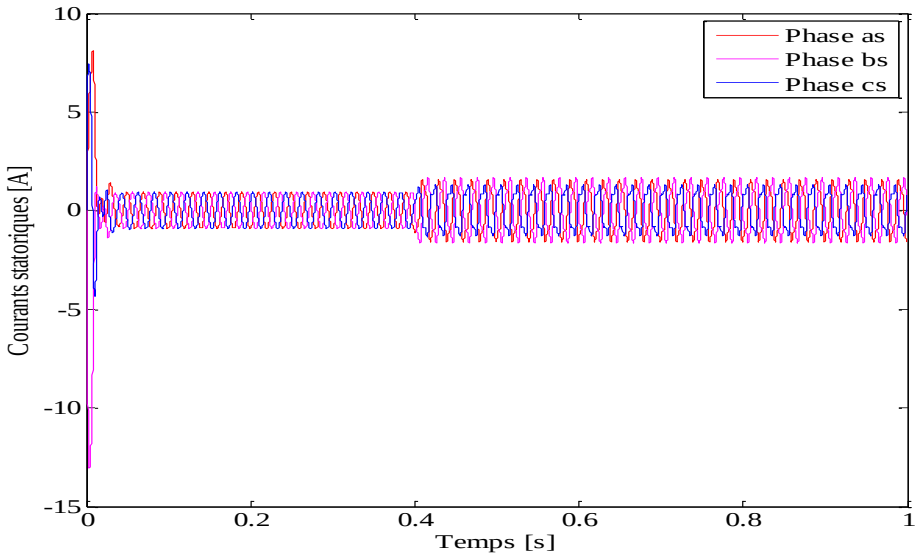


Figure III.8 courants statoriques avec 5% de spires en court-circuit à vide.

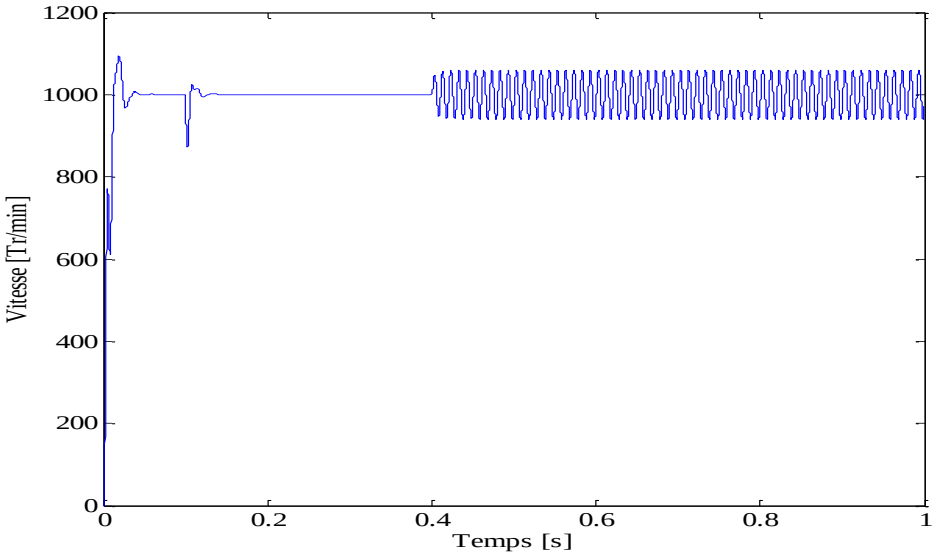


Figure III.9 La vitesse de rotation de la MSAP avec 5% de spires en court-circuit à vide.

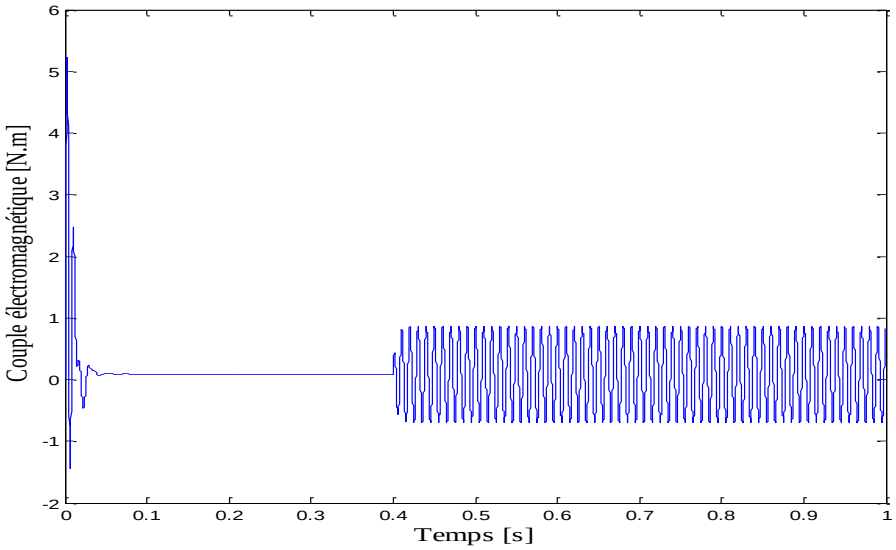


Figure III.10 Couple électromagnétique avec 5% de spire en court-circuità vide.

EN CHARGE :Cr=1.6Nm

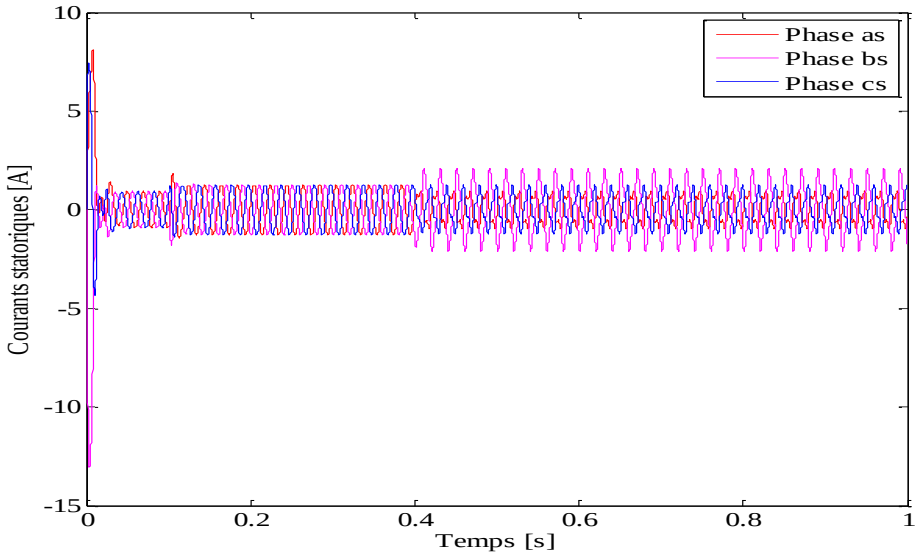


Figure III.11 Les courants statorique avec 5% de spires en court circuit en charge.

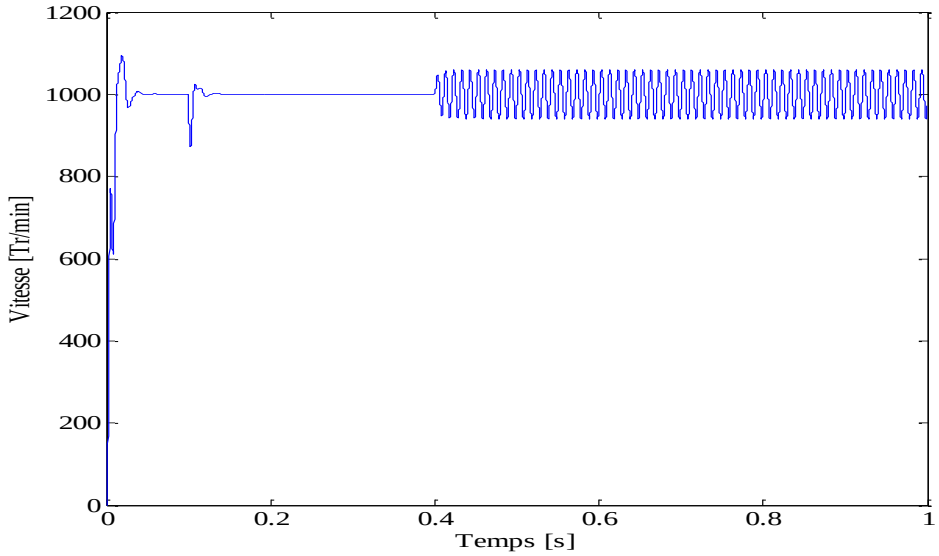


Figure III.12 La vitesse de rotation de la MSAP avec 5% de spires en court-circuit en charge.

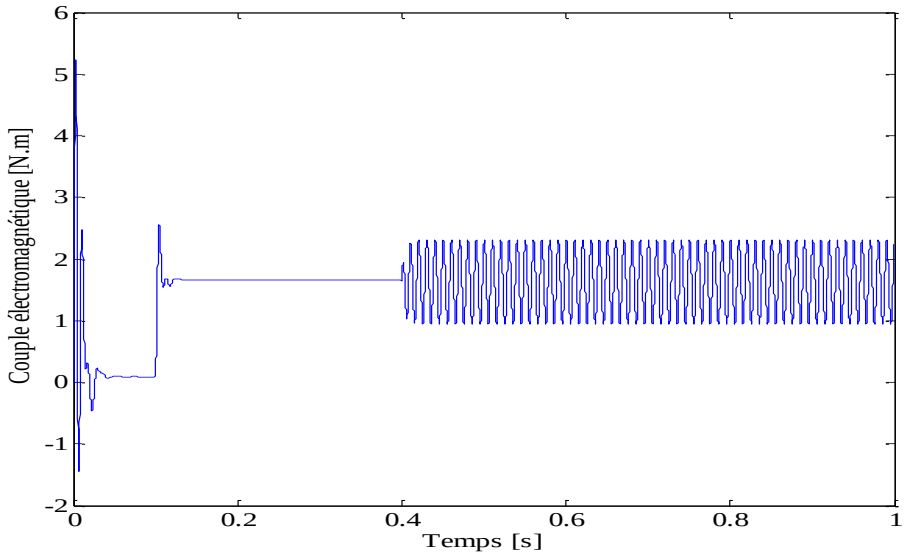


Figure III.13 Couple électromagnétiqueavec 5% de spire en court-circuit en charge.

III.4.3 Résultats de simulation du MSAP en régime de défaut avec 10% des spires en

A VIDE : Cr=0.Nm

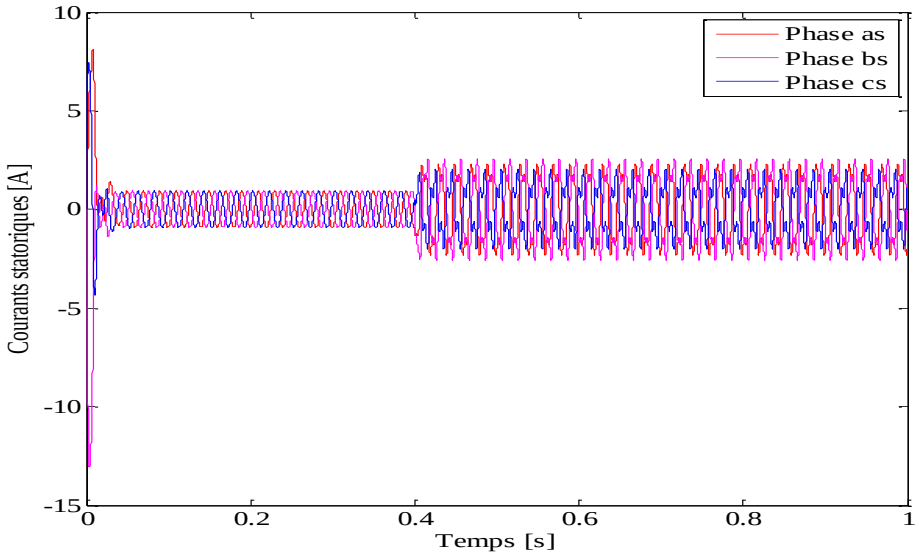


Figure III.14 courants statoriques avec 10% de spire en court-circuità vide.

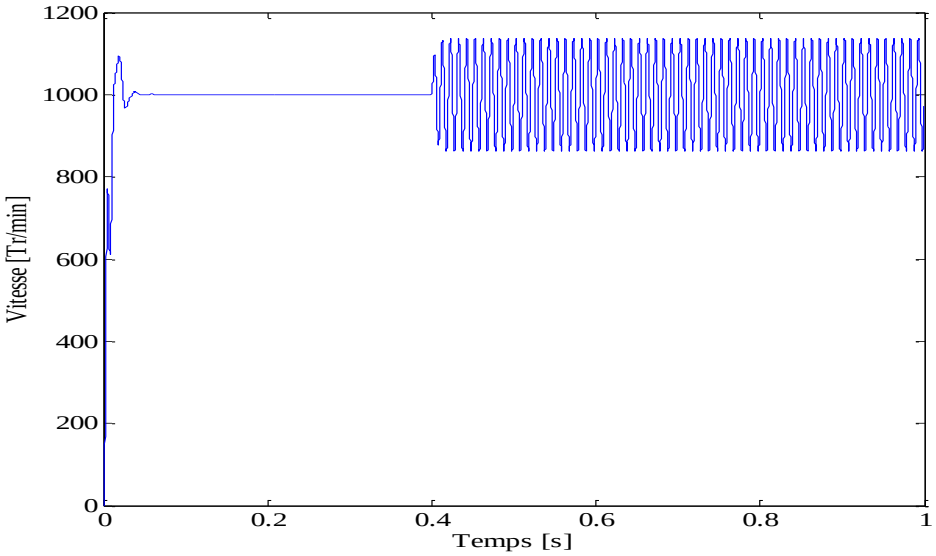


Figure III.15 La vitesse de rotation de la MSAP avec 10% de spires en court-circuit à vide.

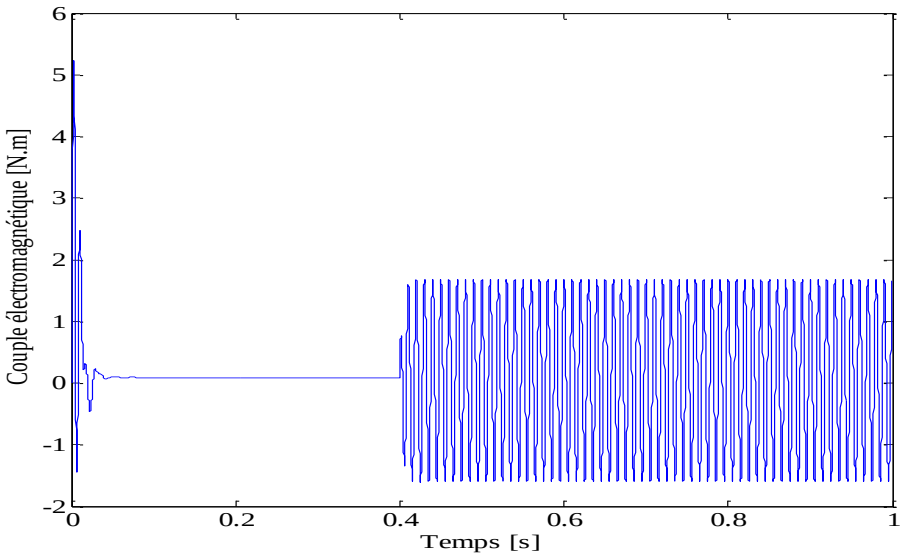


Figure III.16 Couple électromagnétique en charge a 10% de spires en court-circuità vide.

EN CHARGE : Cr=1.6Nm

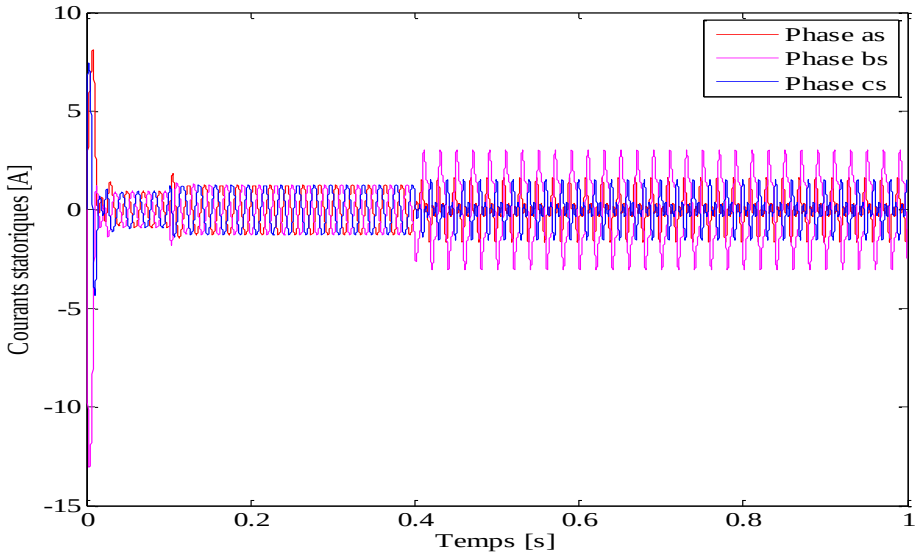


Figure III.17 Courants statoriques avec 10% de spire en court-circuit en charge.

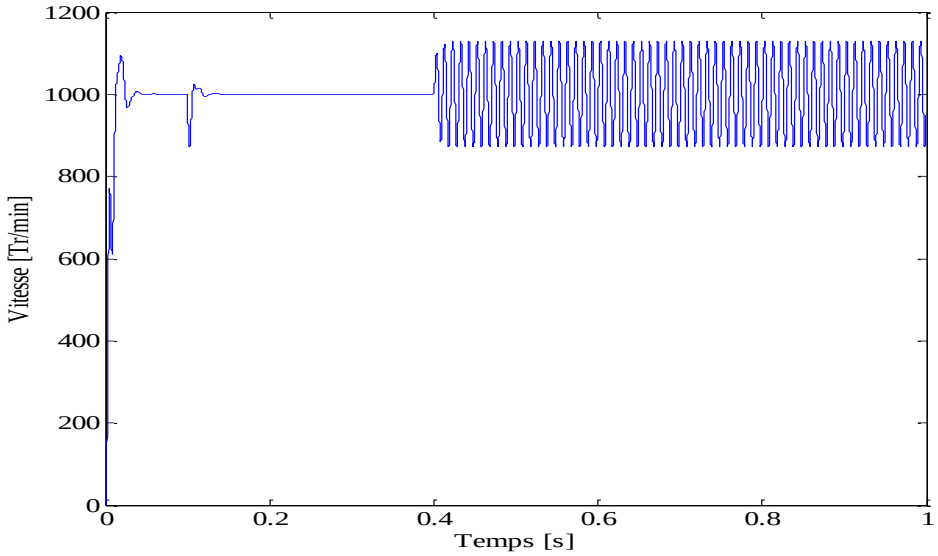


Figure III.18 La vitesse de rotation de la MSAP avec 10% de spires en court-circuit en charge.

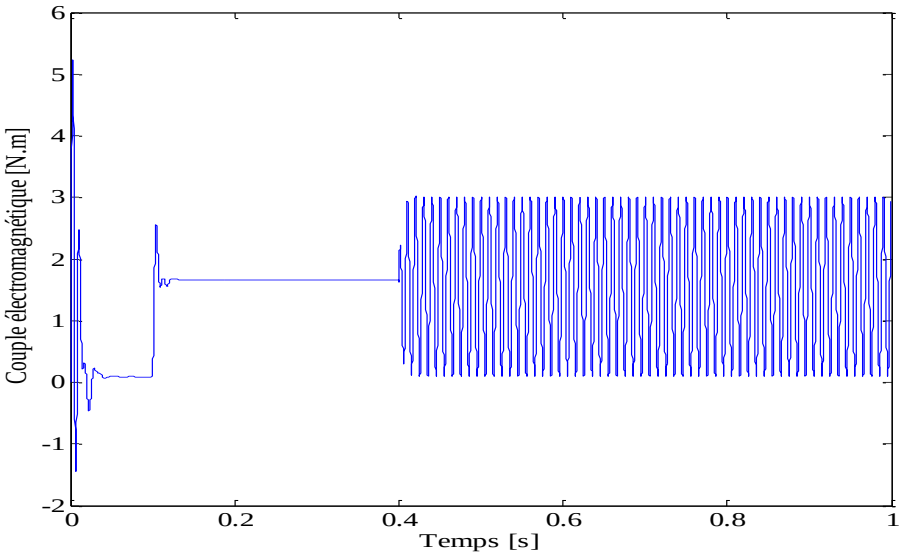


Figure III.19 Couple électromagnétique avec 10 %de spires en court-circuit en charge.

III.4.4 Interprétation des résultats en régime de défaut

Les figures III.4, III.7 et III.12 montrent que le défaut de court-circuit inter spires engendre des augmentations significatives du courant dans la phase incriminée par le défaut, et appréciables pour les deux autres phases. L'augmentation des courants est d'autant plus importante que le nombre de spires en court-circuit est élevé. Les courants ne sont plus équilibrés ce que aura comme conséquence un phénomène de battement.

Les figures III.5, III.11, III.17, III.6 , III.12 , III.18, montrent que le défaut de court-circuit interspires engendre des vibrations mécaniques significatives au niveau du couple électromagnétique et de la vitesse de rotation dès l'apparition du défaut à t=0.1 sec, à cause de l'effet du défaut de court-circuit inter spires qui perturbe la répartition spatiale du champ tournant. L'augmentation de ces signatures (les ondulations) est d'autant plus importante que le nombre des spires en court-circuit élevé.

A partir des résultats obtenus, nous avons observés l'agressivité d'un défaut de court-circuit inter-spires sur les grandeurs électriques et mécanique de la machine synchrone à aimants permanents. D'une part cela conduit à des oscillations du couple électromagnétique, donc de la vitesse. Il en découle des vibrations mécaniques qui, si elles sont fortes, peuvent avoir des effets destructeurs pour les organes mécaniques environnant la machine. D'autre part, le courant circulant dans la boucle créée par le court-circuit peut atteindre des valeurs élevées. Il en résulte rapidement une destruction, par effet thermique, du matériau isolant recouvrant les conducteurs appartenant à cette boucle.

Les résultats obtenus de la simulation du modèle de machine synchrone à aimants permanents en régime de défaut de court-circuit inter-spires sont en bonne correspondance avec ceux donnés en [26] [17] [19].

II.5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le modèle mathématique du moteur à aimants permanents avec court-circuit entre spires d'une phase stotorique. Le modèle établi vas utilisé pour la simulation du comportement du moteur avec défaut de court-circuit de spires.

Les résultats de simulation vont nous permettre d'exploiter les courants de phases statoriques, les vitess de rotations et les couples electromagnetiques, dans le domaine fréquentielle. Les signatures requises seront les indicateurs de la défaillance du moteur.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Les **M**achines **S**ynchrones à **A**imants **P**ermanents (**MSAP**) sont de plus en plus les plus utilisées dans les applications industrielles pour leur efficacité énergétique, leur rendement et leur simplicité d'utilisation et exploitation. Les problèmes liés au vieillissement et aux défaillances de ce type d'actionneur prennent une plus large part dans les contraintes d'exploitation. Les défauts de court-circuit sont parmi les plus répondus.

Le diagnostic du défaut de court-circuit dans les machines synchrones à aimants permanents et une étape importante. Dans la démarche « sûreté de fonctionnement », une des étapes consiste à assurer la détection des défauts pouvant survenir au sein d'une machine à aimants permanents. Cette fonctionnalité consiste en la mise en place d'une procédure de diagnostic, qui a pour rôle la localisation et l'identification d'un défaut, et éventuellement l'estimation de son degré de criticité.

L'objectif est d'être capable, à partir de grandeurs directement prélevées sur la machine, de construire des indicateurs donnant une image de l'état de santé du dispositif.

Ce mémoire de fin d'étude à portée sur la mise en œuvre d'un modèle de la machine synchrone à aimants permanents a pole saillant en régime sain et en régime de défaut de court-circuit. Dans ce contexte, les modèles d'états en régime sain et de défaut de court-circuit entre spires sont obtenus à partir des équations électriques , magnétiques et mécaniques en s'appuyant sur la méthode des circuits électriques magnétiquement couplé (CEMC) dans le repère naturel (a, b, c). La méthode (CEMC) est basée sur la représentation dans un repère naturel des bobinages du stator de la machine par des circuits électriques intégrants les couplages magnétiques d'une part et la prise en charge de l'équation mécanique après un calcul préalable du couple électromagnétique d'une autre part. Cette méthode, offre un bon compromis en termes de précision des phénomènes physiques observés et de temps de calcul associé. Les effets du défaut sont observés à travers l'investigation des grandeurs électrique (courant dans les phases du stator), et mécanique (vitesse de rotation et couple électromagnétique) obtenues à partir de la résolution des modèles d'états implémentes sous environnement Matlab.

Les simulations réalisées pour la validation des modèles ont portées sur la machine synchrone à aimants permanents en régime-Sain et en régime de défaut de court-circuit entre-spires en considérant différent pourcentage des spires en court-circuit. Les différents résultants de simulation obtenus à partir de la résolution des modèles d'état sain et en défaut, ont été comparés à ceux donnés dans les références montrant une bonne concordance. A partir

des résultats obtenus, nous avons observé l'agressivité d'un défaut de court-circuit entre-spires sur les grandeurs électriques et mécaniques de la MSAP [22].

Annexe

Tableau de données de l'alimentation :

Données de l'alimentation	
Vmax=33	Tension d'alimentation maximale [v]
Fs=50	Fréquence de l'alimentation (réseau) [HZ]
p=3	Nombre de paires de pôles
ws=2*pi*Fs	Pulsation de l'alimentation
Cr=0	Couple résistant [Nm]

Tableau de paramètres de machine :

Paramètres de la machine	
Jt=0.000185	Moment d'inertie [Kg*m^2]
fv=0.00065	Coefficient de frottement visqueux
Ls=0.0032	Inductance cyclique d'une phase au stator [H]
Rs=1.5	resistance statorique en [Ω]
Ms=-0.0013	inductance mutuelle [H]

Bibliographique

[1] A ADEL « Analyse du comportement du moteur synchrone dans les entraînements électriques à vitesse variable » Thème magister en électrotechnique, Université BADJI MOKHTAR-ANNABA, Faculté des sciences de l'ingénieur Département d'électro-mécanique, 2009/2010.

[2] A.CEBAN «Méthode global de diagnostique des machines électriques, Université Lille de Nord de France – École doctorale SPI-Université d'Artois – Laboratoire Systèmes Électrotechniques et Environnement, 2012.

[3] H. AZEDINE, BENKERROU « Etude et modélisation d'une machine synchrone à aimant permanent», Mémoire de master, Université Abderrahmane MIRA de Bejaia, 2015.

[4] A. Khurram « Position and speed sensor-less control of permanent magnet synchronous Motors », Thèse de Doctorat, dissertation, Michigan State Université, MI, 2001.

[5] K.ABDELMONAIM, B.AMMAR « Détection De Défaut Statorique Par Suivi Paramétrique D'un Moteur Synchrone A Aimants Permanents »,thèse de master, Université Kasdi Merbah Ourgla, juin 2014.

[6] A.TLEMSSANI « contribution à l'application des commandes adaptives par les systèmes floue a une machines synchrone a aimant permanent alimente par unconvertisseur multicellulaire série » ,Janvier2006.

[7] B.AUBERT « Détection des courts-circuits inter-spires dans les Générateurs Synchrones à Aimants Permanents : Méthodes basées sur les modèles et les filtre de Kalman étendu-Application à un canal de génération électrique en aéronautique », Thèse de Doctorat, université Toulouse, 2014.

[8] B.BOUSSAD, «contribution à la modélisation des systèmes couples machines convertisseurs : application aux machines à aimant permanents (BDCM-PMSM)», Thèse de Doctorat à université MOULOUD MAMMERI TIZI-OUZOU, Février2012.

[9] B.MULTON, «Application des aimants aux machines électriques », Notes de cours version 2009. Ecole normale supérieure de Cachan. http://e- mecatronique. bretagne. Ens. cachan.fr.

[10] B. VASEGHI « Contribution a l'étude des Machines Electrique en Présence de Défaut Entre-Spires, Modélisation – Réduction du Courant de Défaut » Thèse de Doctorat , L'Institut National Polytechnique de Lorraine, Laboratoire « Groupe de Recherche en Electrotechnique et Electronique de Nancy ». Décembre2009.

[11] D.G. DORREL, W.T. THOMSON, S. ROACH « Analysis of airgap, flux, current, and vibration signals as a function of the combination of static and dynamic airgap eccentricity in 3-phase induction motors », IEEE Transactions. On Industry Applications, Vol. 33, Issue 1, pp. 24-34, Jan-Feb.1997.

[12] L.FATEH **«** Modélisation et simulation d'une chaine de conversion d'énergie éolienne a base d'une machine synchrone à aimant permanent », Thèse Doctorat, Université Badji Mokhtar, Annaba,2016

[13] J.A.FAROOQ « Etude du problème inverse en électromagnétisme en vue de la localisation des défauts de désaimantation dans les actionneurs à aimants permanent » Thèse de Doctorat, Ecole Doctorale de Sciences pour l'ingénieur et Microtechnique, BELFORT MONTBELIARD, Décembre2008.

[14] H.AKAGI, H.WATANABE, M. AREDES «Instantaneous Power Theory Applications to Power Conditioning. Piscataway », IEEE Press, 2007. Capteurs de Position et de Vitesse». Thèse de Magister, Université de Biskra 2001.

[15] A.HASSINA « étude expérimentale de la position rotorique d'un moteur synchrone a aimant permanent par variable électrique », Mémoire de magister en
Electrotechnique, Université de Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou.

[16] H.AKAGI, Y. KANAZAWA, A. NABAE «Generalized theory of the instantaneous reactive power in three-phase circuits », IEE. Int. Power Electron. Conf. pp. 1375–1386, Tokyo, Japan, 1983.

[17] KH.KARIMA, B.SOUMIA « Diagnostic du défaut de court-circuit de spires statoriques d'une machine synchrone à aimants permanents par emploi de la puissance active et réactive instantanées», Thèse de master, Université Dr Tahar Moulay, Saïda, 2017.

[18] Li Liu **«** Robust Fault Detection and Diagnosis for Permanent Magnet Synchronous Motors » Thèse de Doctorat. College of Engineering, Florida State University, 2006.

[19] B.B.MANSOUR **«** Identification *des paramètres d'une machine* synchrone à aimant permanent en vue d'une intégration dans des simulateurs en temps réel, Thèse de magister, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran, 04/02 /2015.

[20] M. DRIF « Diagnostic des défauts dans les entraînements électriques par l'analyse de la signature du moteur», Thèse de doctorat, UST Oran, Décembre 2007.

[21] M. KHOV « Surveillance et diagnostic des machines synchrones à aimants permanents Détection des courts-circuits par suivi paramétrique » Thèse de Doctorat, Institute National Polytechnique de Toulouse. Décembre2009.

[22] M.SALHI **«**Diagnostic du défaut du court-circuit dans la machine synchrone à aimants permanents », Mémoire de Master, Universite De Mouloud Mammeri De Tizi-Ouzou, 29 septembre 2014.

[23] S.NAWEL, CH.AMMARIA« commande du machine synchrone a aimants permanents backstepping », Thèse de master, Université Abou Bekr Belkaid, Telemcen, Juin 2015.

[24] Mr. NOUREDDINE «Commande par Mode de Glissement d'Ordre Supérieur de la Machine Synchrone à Aimants Permanents », Thèse de Magiste r en Electrotechnique, Université Ferhat ABBAS, Sétif -1 (ALGERIE), 2014.

[25] O. ONDEL « Diagnostic par reconnaissance des formes : application à un ensemble convertisseur– machine asynchrone», Thèse de Doctorat, Lyon, Octobre2006.

[26] P. Vas «Parameter estimation, condition monitoring and diagnosis of electrical machines», Oxford, 1993.

[27] R. LATEB « Modélisation des machines asynchrones et synchrones à aimants avec prise en compte des harmoniques d'espace et de temps : Application à la propulsion marine par POD » Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine, Octobre2006.

[28] S. MEDJMADJ «Méthodes et outils d'aide à la décision en vue de la commande tolérante aux défauts des entraînements électriques », Thèse de Doctorat, Université de Ferhat Abbas, UFAS, 2015.

[29] S. RAJAGOPALAN « Detection of rotor and load fault in brushless de motors operating under stationary and non-stationary conditions »These de Doctorate, School of Electrical and Computer Engineering, Georgia Institute of Technology, USA, 2006.

[30]S. BARKER « Avoiding premature bearing failure with inverter fed induction motors », power Engineering Journal, Vol. 14, Issue 4, pp. 182-189, Aug.2000.

[31] Z.SARA «Détection des défauts statoriques dans la machine synchrone à aimants permanents par les techniques avancées/Magister/Université Mohamed Khider – Biskra//2015