

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur
et de la Recherche Scientifique

Université Akli Mohand Oulhadj - Bouira -

Tasdawit Akli Muḥend Ulḥağ - Tubirett -



جامعة البويرة

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

جامعة أكلي محمد أولحاج

- البويرة -

Faculté des Sciences et des Sciences Appliquées

كلية العلوم والعلوم التطبيقية

Mémoire de Master

Présenté au

Département : Génie Électrique

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Electrotechnique Industrielle

Réalisé par :

Aliouat Kenza

Et

Abdedou Atik

Thème

**Diagnostic de défauts dans la machine synchrone à
aimant permanent.**

Soutenu le : **06/07/2022**

Devant la commission composée de :

Mr : A.Yahiou

Univ. Bouira

Président

Mr : A.Bouzida

Univ. Bouira

Rapporteur

Mr : S.Bensaid

Univ. Bouira

Examineur

Année Universitaire : 2021-2022

Remerciement

Remerciements

Tout d'abord, nous remercions le Dieu, notre créateur de nous avoir donner la force, la volonté et le courage afin d'accomplir ce modeste travail.

Nous adressons le grand remerciement à notre encadreur Mr. AHSEN BOUZIDA qui a proposé le thème de ce mémoire et pour ses conseils et ses dirigés du début a la fin de ce travail.

Nous tenons également à remercier Messieurs les membres de jury pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant de siéger à notre soutenance, tout particulièrement.

Dédicace

Dédicaces

Je dédie ce travail à :

A mon cher père et mon cher frère que Dieu ait leurs âmes.

A ma mère

Mes sœurs

Mon frère

Et à tous mes proches.

Kenza

Je dédie ce travail à :

Ma chère mère

Mon cher père

Mes sœurs et mon frère

Et tous mes proches

Atik

Table des matières

Table des matières :

Remerciement

Dédicace

Table des matières

Liste de figures

Liste des tableaux

Liste des symboles

INTRODUCTION GENERALE.....1

Chapitre I : Généralités sur les machines synchrones a aimants permanents.

I. INTRODUCTION3

I.2 Présentation du moteur synchrone à aimants permanents (MSAP).....3

I.2.1 construction et fonctionnement de la MSAP.....3

I.2.1.1 Principe de fonctionnement de la MSAP3

I.2.1.2 Construction de la MSAP4

I.2.2 Catégories de la MSAP6

I.2.3 Avantages de la MSAP7

I.2.4 Inconvénients de la MSAP7

I.2.5 Les domaines d'application de MSAP.....8

I.3. Les défauts de les machines synchrone a aimants permanents8

I.3.1 Défauts statoriques.....8

I.3.1.1 Défauts d'isolant dans un enroulement.....9

I.3.1.2. Court-circuit entre spires9

I.3.1.3. Court-circuit entre phases9

I.3.3 Défauts au rotor11

I.3.3.1 Défauts de roulements mécaniques11

I.3.3.2. Défaut d'excentricité12

I.3.3.3 Défaut de démagnétisation13

I.4 Méthodes de détection de défauts dans les machines électriques :.....13

I.4.1 Méthode de diagnostic sans modèle.....14

I.4.2 Méthode par traitement de signal14

I.4.1.1.1 Transformée en Série de Fourier.....14

I.5 Conclusion15

Chapitre II : Modélisation de la machine synchrone à aimant permanent

II.1.Introduction	16
II.2. Modèle mathématique de la machine synchrone a aiment permanent	16
II.2.1 Modèle de la machine dans le repère abc	16
II.2.1.1. Equations électriques.....	17
II.2.1.2. Expression du flux.....	18
II.2.1.3. Équation mécanique	19
II.2.1.4. Expression du couple électromagnétique	20
II.2.1.5. Établissement du modèle d'état.....	20
II.2.2. Modélisation de la MSAP par la méthode des éléments finis.....	21
II.3. Présentation du logiciel ANSYS Maxwell	21
II.4 Conception du modèle de la machine MSAP	23
II.4.1. Étapes de Conception du modèle	24
II.4.2 Construction de la géométrie	24
II.5. Calcul de la force électromagnétique	27
II.5.1 Force électromagnétique radiale	28
II.5.2. Composantes harmoniques de la force électromagnétique	28
II.6. Résultat de simulation de la MSAP	30
II.7. CONCLUSION	35
 Chapitre III : Etude de défauts de court-circuit de la machine synchrone a aiment permanent.	
III.1. Introduction	36
III.2. Création des courts-circuits	36
III.3. Résultats de simulation	37
III.3.1. Couple électromagnétique :.....	37
III.3.2.Induction Magnétique	38
III.3.3. Force électromagnétique :.....	39
III.4 Analyse spectrale	40
III.4.1. Spectre de la composante radiale de la force pour la machine saine	41

III.4.2. Spectre de la composante radiale de la force pour la machine avec CC entre spires de la même bobine de la première phase	42
III.4.3. Spectre de la composante radiale de la force pour la machine avec CC entre deux spires des deux bobines différentes	43
III.4.4. Spectre de la composante radiale de la force pour la machine avec CC entre des spires de deux phases différentes	44
III.4. Interprétation des résultats.....	45
III.5. Conclusion	45
Conclusion générale	46

Liste des figures

LISTE DES FIGURES

Chapitre I

Figure I.1 : principe de fonctionnement de la machine synchrone a aiment permanent.....	4
Figure I.2 : Construction de la MSAP.....	4
Figure I.3 : Bobinage distribué.....	5
Figure I.4 : Bobinage concentrique.....	6
Figure I.5 : Rotor à aiment permanent.....	6
Figure I.6 : Différents disposition d'aiment permanent dans le rotor : (a)surfacique, (b) inséré (c) enterrés et (d) concentration de flux.....	7
Figure I.7 :: Représentation des différents défauts statoriques possibles.....	8
Figure I.8 : Dégâts de défauts statoriques	10
Figure I.9 : Structure d'un roulement à billes.....	11
Figure I.10 : Positions du rotor et du stator dans une machine parfaite	12
Figure I.11 :Type d'excentricité statique (a), dynamique (b) et mixte (c).....	13
Figure I.12 : schéma explicatif de la méthode de traitement designal.....	14
Figure I.13 :Spectre de la force radiale de la MSAP avec défauts.....	15

Chapitre II

Figure II.1 : schéma de la coupe transversale (a), et bobinage statorique équivalent (b) d'une MSAP.....	17
Figure II.2 : Etapes de construction d'un projet sur ANSYS-MAXWELL.....	24
Figure II.3 : Modèle 2D de la machine étudiée sur le logiciel Maxwell 2D.....	25
Figure II.4 : Distribution des bobines sur les encoches.....	25
Figure II.5 : Diagramme éclaté des bobines statorique.....	26
Figure II.6 : Circuit électrique équivalent de la MSAP.....	26

Figure II.7 :diagrammes de la force.....	28
Figure II.8 : Courants d'alimentation de la machine MSAP.....	30
Figure II.9 :distribution de l'induction magnétique.....	31
FigureII.10 : Densité de l'induction magnétique dans l'entrefer avec les composantes polaires.....	32
FigureII.11 :Coupleélectromagnétique.....	33
FigureII.12 : Courbe de l'amplitude de la force en fonction de temps.....	33
FigureII.13 :Courbe de la composante radiale de la force en fonction de temps.....	34
FigureII.14 :Courbe de la composante tangentielle de la force en fonction de temps.....	34

Chapitre III

FigureIII.1 :Circuit externe de la machine MSAP.....	36
FigureIII.2 : Distribution couple électromagnétique.....	38
Figure III.3 :Densité de l'induction induite dans l'entrefer.....	39
Figure III.4 :Composante de la force électromagnétique dans le stator.....	40
Figure III.5 :: Spectre de la composante radiale de la force pour la machine saine.....	41
Figure III.6 :: spectre de la composante radiale avec 2 spires en court-circuit (b) :spectre de la composanteradiale avec3 spires en court-circuit.....	42
FigureIII.7 :(a) : spectre de composante radiale avec 2 spires en court-circuit (b) : spectre de la composante radiale avec 3 spires en court-circuit.....	43
Figure.III.8. (a) spectre de la composante radiale avec 2 spires en court-circuit (b) : spectre de la composante radiale avec 3spires en court-circuit.....	44
Figure III.9 : Amplitudes de l'harmonique $2f_0=700Hz$	45

Liste des tableaux

Liste des tableaux

Chapitre II :

Tableau II.1 : les paramètres de la machine étudiée.....23

Tableau II.2 : matériaux utilisés pour les parties de la machine.....27

Chapitre III :

Tableau III.1 : Amplitude de l'harmonique $2f_0=700Hz$45

Symboles

Symboles :

MSAP : machine synchrone a aimant permanent.

PMSM : permanent magnet synchronous machine.

FFT : (fast Fourier transform) transformée de Fourier rapide.

CC : court-circuit.

V_{abc}^s : La tension des trois phases. (V)

R_{abc}^s : La résistance des trois phases. (Ohms)

Φ_{abc}^s : vecteur de flux.

I_{abc}^s : courant des phases (A).

$[R_{abc}^s]$: Matrice de résistance

$[L_s]$: Matrice d'inductance.

C_r : couple résistant extérieur. (N.m)

J : Moment d'inertie (kg.m²)

ω_r : vitesse angulaire mécanique du rotor (rad/s)

ω : Pulsation (rad/s)

f_r : Frottement(N.m.s/rad)

C_{em} : couple électromagnétique. (N.m²)

$[U]$: Vecteur d'état.

$[X]$ Vecteur de commande.

\vec{H} : Intensité du champ magnétique (A/m)

∇ : le gradient (A/m²).

\vec{j} : Densité de courant (C/m²).

\vec{D} : Vecteur de déplacement électrique.

\vec{B} : Force d'induction magnétique (T).

ρ : Densité de charge.

γ : Conductivité.

\vec{E} : Intensité du champ électrique. (N/C).

ϵ : Constante diélectrique (F/m).

μ : Perméabilité magnétique du matériau (H/m).

ρ_{em} : La puissance magnétique.

Introduction générale

Introduction Générale :

Au cours de ces dernières années, les machines synchrones à aimants permanents (MSAP) sont de plus en plus utilisées dans les applications industrielles, avec ses différentes structures selon la nuance et la disposition des aimants sur le rotor, sont des actionneurs électriques très robustes, elles sont caractérisées par un couple massique et un couple volumique important comparativement aux autres machines classiques. Ces machines présentent couples massiques plus élevés, bons rendements, bonnes durées de vies, performances dynamiques élevées, gammes de vitesse de fonctionnement importantes surtout dans les applications sensibles tels que l'automobile, le ferroviaire, l'aéronautique, la robotique et le médical.

La maintenance prédictive et le diagnostic de défauts dans les machines synchrones à aimants permanents (MSAP) ont pris une place importante, au cours des dernières décennies, depuis que les exigences de sécurité, de disponibilité et de fiabilité des processus industriels sont devenues de plus en plus sévères.

En raison du vieillissement des matériaux magnétiques, des défauts de fabrication et des opérations intermittentes, plusieurs types de défauts sont inévitables dans les machines électriques et peuvent intervenir dans leurs organes de mesure (capteurs) et de commande (actionneurs et convertisseurs) ou leurs différents composants (stator ou rotor). Lorsqu'un défaut se produit et que la machine tombe en panne, le résultat pourrait être, au mieux, une interruption ou même une perte de la chaîne de production ou bien, au pire, catastrophique pour le procédé et les humains. Les progrès en sciences des matériaux et en électronique de puissance ont rendu les machines électriques de plus en plus rapides et performantes mais aussi susceptibles à des nouveaux types de défauts. Pour ce fait, les constructeurs et les utilisateurs des machines électriques sont partis chercher également des améliorations dans le domaine du diagnostic de défauts afin de répondre à ces nouveaux enjeux. Actuellement, l'analyse des grandeurs mesurables issues des capteurs, et surtout les signaux vibro-acoustiques, combinée à une méthode automatique de surveillance est la démarche la plus souvent utilisée pour le diagnostic de défauts sur les machines tournantes.

Dans ce mémoire, nous intéressons spécifiquement aux défauts de court-circuit pouvant survenir aux machines synchrones à aimants permanent. Nous allons utiliser le logiciel ANSYS-MAXWELL 2D pour étudier les effets des défauts de court-circuit entre spire et bobine et phase sur les performances et les caractéristiques de fonctionnement de moteur synchrone à aimant permanent.

Ce travail est structuré de trois chapitres :

Le premier chapitre présente une étude sur la machine synchrone à aimant permanent ainsi que les défauts qui peuvent l'affecter au cours de son fonctionnement où on citera aussi les effets et les méthodes de détection de défauts.

Le deuxième chapitre présente une étude mathématique de la machine en état sain et une étude sous logiciel. Cette étude consiste à simuler et analyser les performances et les caractéristiques de moteur étudié en état de fonctionnement normal.

Le dernier chapitre présente les résultats de simulation de modèle de la machine avec défauts sous logiciel MAXWELL 2D avec une comparaison des résultats avec l'état sain. Puis on va utiliser la méthode de traitement de signal FFT pour la détection des défauts.

Enfin, on terminera notre travail avec conclusion générale.

Chapitre :

***Généralités sur les machines
synchronessynchrones***

Généralités sur les machines synchrones à aimants permanents.

I.1.Introduction :

Le moteur à courant continue est remplacé par le moteur synchrone à aimants permanents dans le milieu industriel. Cependant la présence du système balais collecteur a toujours posé des grands problèmes qui limitent de plus en plus son utilisation. Toutefois, la fragilité du système balais-collecteur a été un inconvénient de la M.C.C, ce qui limite la puissance et la vitesse maximale et présente des difficultés de maintenance et des interruptions de fonctionnement. C'est pour cette raison qu'on ait orientée à utiliser des moteurs électriques à courant alternatif afin d'écartier cet inconvénient [1].

Ce chapitre va présenter une étude générale sur les machines synchrone à aimant permanents et les types de ces machines et aussi leurs applications, et citer les méthodes de détection de défauts de ces machines.

I.2. Présentation du moteur synchrone à aimants permanents (MSAP) :

Les machines à aimants permanents représentent une famille des machines synchrones pour laquelle l'excitation du circuit magnétique s'effectue par des aimants permanents

I.2.1.Construction et fonctionnement de la MSAP :

I.2.1.1 Principe de fonctionnement de la MSAP :

Un moteur synchrone peut être représenté par la (figure I.1). Si on considère un petit aimant n_s situé dans le champ magnétique d'un grand aimant N_s , et qu'on entraîne ce dernier en rotation (créant ainsi un champ tournant), le petit aimant n_s sera soumis à un couple électromagnétique, et sera par conséquent entraîné à la même vitesse.

Si on exerce un couple résistant sur n_s , il prendra un décalage angulaire θ par rapport à N_s , tout en continuant à tourner à la même vitesse. Ce décalage θ sera d'autant plus grand que le couple résistant augmente, mais, si on accroît trop le couple résistant, le moteur décrochera, pour $\theta = -90^\circ$.

Dans un moteur réel, le rôle joué par le petit aimant est joué par le rotor (courant continu d'excitation polarisant sa structure magnétique comme un aimant), et le champ tournant crée par N_s est obtenu non pas en faisant tourner le stator, mais en envoyant des courants polyphasés dans ses enroulements fixes [2]. Donc il est basé sur le principe de rotation du champ magnétique en synchronisme avec le rotor.

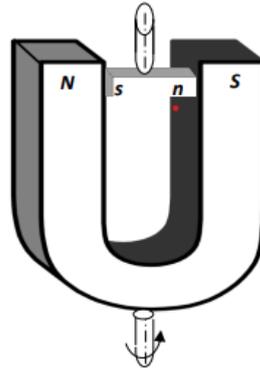


Figure I.1: principe de fonctionnement de la machine synchrone a aiment permanent

I.2.1.2 Construction de la MSAP :

Cette figure représente les éléments constitutifs de la machine synchrone a aiment permant.

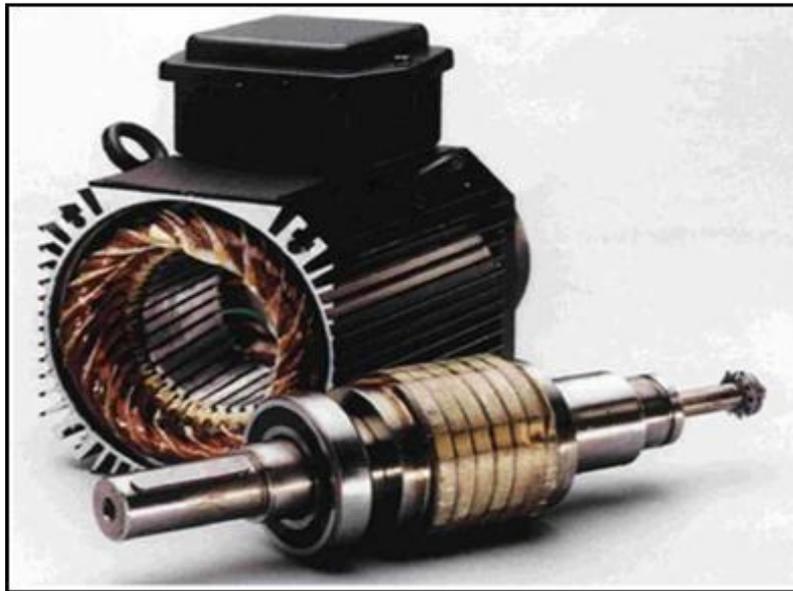


Figure I.2 : Construction de la MSAP[3].

- ❖ **Le stator** : ou l'induit est la partie fixe quant à lui similaire à celui d'une machine synchrone classique. Il est constitué d'un empilement de tôles encochées, muni d'un enroulement triphasé représenté par les trois axes (a , b , c) déphasés, l'un par rapport à l'autre, d'un angle de 120° électrique. Le but de cet enroulement est de créer un champ magnétique tournant, lorsqu'il est alimenté par un système triphasé de courant ou de tension [4]. Ce champ interagit avec celui créé par les aimants permanents pour produire le couple. Chaque encoche est remplie, en fonction de son facteur de remplissage, par le bobinage des conducteurs isolés les uns des autres et isolés aussi du circuit magnétique statorique. Ces conducteurs sont enroulés d'une encoche à l'autre selon le type de bobinage adapté, en formant des têtes de bobines (ou bien des chignons) de part et d'autre du stator [5]
- ❖ Selon la méthode de réalisation du bobinage, on peut en identifier deux grandes familles [6]

- Le bobinage distribué.
- Le bobinage concentré.

Le bobinage distribué, encore appelé réparti, est la technique la plus utilisée dans l'industrie, le bobinage distribué est bien adapté dans les applications à grande vitesse, où un nombre de paires de pôles réduit est bien nécessaire, ces avantages sont [07]:

- Elle permet une répartition quasi-sinusoïdale du champ magnétique dans l'entrefer.
- Elle augmente la capacité du bobinage à récupérer le flux rotorique et donc de réduire les pertes magnétiques.

L'inconvénient principal de cette structure de bobinage est le volume de cuivre important perdu, notamment dans les têtes de bobines, lors de sa mise en place.



Figure I.3: Bobinage distribué

Le bobinage concentrique est une ancienne technique de bobinage qui consiste à entourer chaque dent par un enroulement et puis relier les enroulements de la même phase en série ou en parallèle, ce type de bobinage est très adapté dans les applications à grande puissance, avec un nombre de phases ou de pôles importants, cette structure de bobinage présente beaucoup d'avantages parmi eux :

- La réduction des têtes de bobines et donc du volume de cuivre utilisé.
- Sa facilité de réalisation et son efficacité plus élevée pour le même couple moyen.

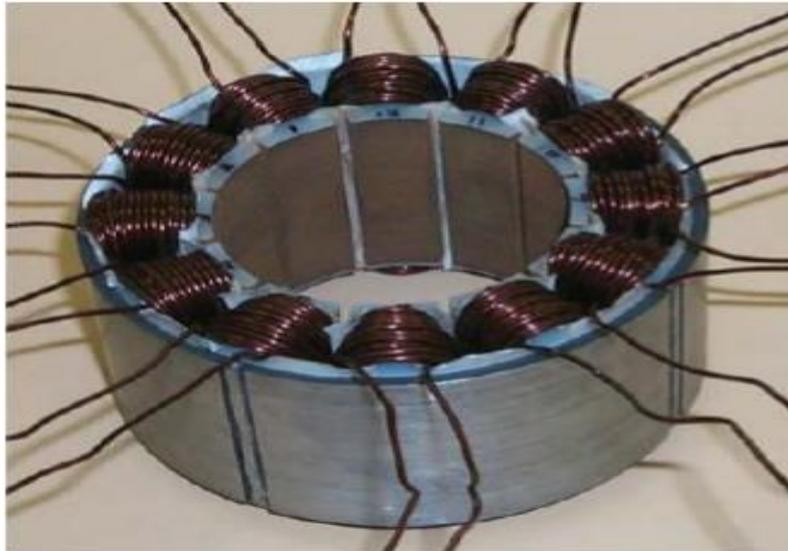


Figure I.4: Bobinage concentrique

- ❖ **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 rotoriques, ainsi que la nécessité d'une source pour fournir le courant d'excitation. Cependant, on ne peut pas contrôler l'amplitude du flux rotorique. Il existe deux types de rotor, ayant pour rôle de générer le champ d'induction rotorique. Les rotors à pôles lisses et les rotors à pôles saillants. Une machine à pôles lisses a un entrefer considéré comme constant alors qu'une machine à pôles saillants a un entrefer variable. On retrouve des machines synchrones à pôles lisses dans les applications où la vitesse de rotation est élevée et les machines à pôles saillants interviennent sur des applications de faible vitesse, avec des puissances plus importantes [8].



Figure I.5. Rotor à aimant permanent.

I.2.2 Catégories de la MSAP :

Il existe quatre catégories de machines synchrones à aimants permanents du point de vue construction mécanique [9] :

- Machines synchrones à aimants permanents montés en surface (MSAPS) : Cette structure est la plus simple à construire parce que des aimants permanents à aimantation radiale sont disposés directement sur la périphérie du rotor. Les aimants ont généralement une forme de tuile et sont collés sur une culasse cylindrique. Cette structure de machine rentre dans la catégorie des machines à pôles lisses.

- Machines synchrones à aimants permanents insérées (MSAPI) : A partir de la structure précédente, on entaille des logements pour insérer les aimants permanents dans le rotor afin de faciliter l'assemblage mécanique. Les parties de fer entre les aimants permanents sont des espaces inter polaires qui rajoutent de la saillance. Toutefois, les caractéristiques de cette structure restent fondamentalement proches de la MSAPS.
- Machines synchrones à aimants permanents chapeautés (MSAPC) : Cette structure est déduite de celles avec des aimants permanents montés en surface. On place sur les aimants des pièces polaire généralement en acier doux. La combinaison des aimants et des pièces polaires crée une anisotropie du rotor et rajoute une saillance. Les pièces polaires permettent de contrôler la forme de la f.é.m. au stator en agissant sur le profil de la pièce.
- Machines synchrones à aimants permanents enterrés (MSAPE) : Le principe de cette structure est d'augmenter l'induction magnétique dans l'entrefer par rapport à l'induction rémanente des aimants permanents. En fait, les pièces polaires canalisent le flux généré par les aimants permanents à aimantation tangentielle dont la surface latérale est supérieure à la demi-surface de la pièce polaire prise au niveau de l'entrefer.

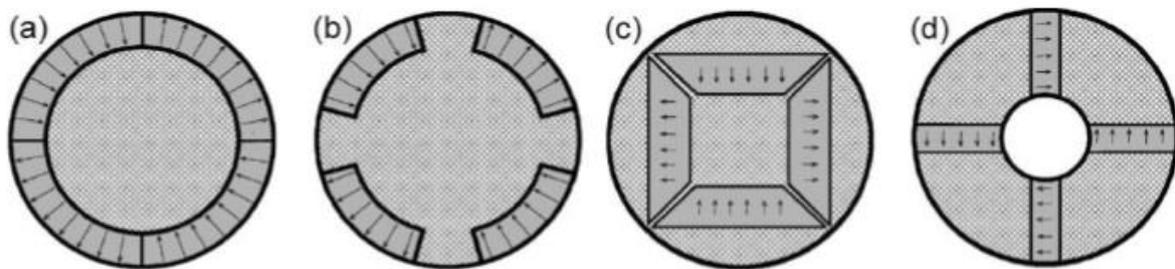


Figure I.6. Différentes dispositions d'aimants permanents dans le rotor : (a) surfacique, (b) insérés, (c) enterrés et (d) concentration de flux.

Dans ce travail, on s'intéresse à la machine synchrone à aimants montés en surface comme elle présente un bon compromis entre les performances d'une part et d'une autre part la simplicité de construction et de modélisation. Dans une telle machine, les aimants sont collés sur la surface du rotor par des résines spéciales et puis consolider avec un tube de matériau amagnétique et non conducteur afin d'éviter leur décollage à haute vitesse.

I.2.3 Avantages de la MSAP :

Les machines synchrones à aimants permanents présentent plusieurs avantages par rapport aux autres types de machines [10] :

- Fort couple massique.
- Un bon rendement (absence des pertes par effet Joule au rotor).
- Bonnes performances dynamiques grâce à la faiblesse des inductances statorique, due à la largeur importante de l'entrefer apparent (perméabilité des aimants voisine de celle de l'air).
- Champ magnétique important dans l'entrefer.
- Pas de source de tension continue pour l'excitation.

I.2.4 Inconvénients de la MSAP :

Comme inconvénients de la MSAP on cite [11] :

- Technologie coûteuse liée au coût des aimants.
- Interaction magnétique due au changement de structure.
- Ondulations de couple.

I.2.5 Les domaines d'application de MSAP

Cette machine est présente pour les petites et moyenne puissances, jusqu'à quelques dizaines de kilowatts, plus rarement jusqu'à quelques centaines de kilowatts [12].

Maintenant on présente des exemples d'application des MSAP utilisées dans différentes plages de puissance.

- ❖ Applications aux petites puissances ($P < 600\text{W}$) :
 - Micro Ventilateur
 - Disque Dur
 - Fraise de dentiste
 - Programmateur Mécanique
- ❖ Applications aux moyennes puissances ($500\text{W} < P < 100\text{kW}$) :
 - Vélo à assistance
 - Voiture électrique (Toyota Prius)
 - Machine-outil
 - Robot industrie
- ❖ Applications aux fortes puissances
 - Traction ferroviaire
 - Propulsion navale

I.3 Les défauts des machines synchrones à aimants permanents :

I.3.1 Défauts statoriques

Les défauts qui sont les plus récurrents, localisés au niveau du stator, peuvent être définis Comme suit : défaut d'isolant, court-circuit entre spires, court-circuit entre phases, court-circuit Entre phases et bâti, déséquilibre d'alimentation, défauts de circuit magnétique, la figure (I.7) montre les différents défauts statoriques possible.

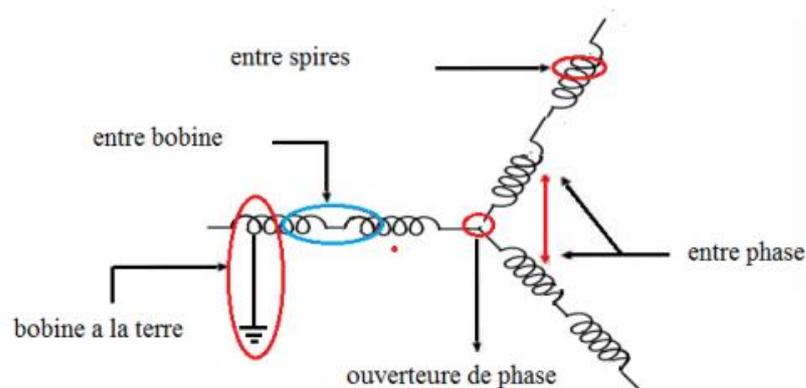


Figure I.7: Représentation des différents défauts statoriques possible

I.3.1.1 Défauts d'isolant dans un enroulement :

La dégradation des isolants dans les enroulements peut provoquer des court-circuits. En effet, les différentes pertes (joule, fer, mécanique,) engendrent une augmentation de la température des différents constituants de la machine. Or les matériaux d'isolation ont une limite de température, de tension et mécanique. Dans ce cas, un court-circuit peut apparaître dans l'enroulement concerné. Les différentes causes de ce type de défauts sont [13]. :

- Dégradation de l'isolant à la fabrication,
- Tension de l'enroulement supérieur à la limite du matériau d'isolation,
- Courant élevé dans l'enroulement dû à un court-circuit, un défaut du convertisseur, une surcharge,
- Vibrations mécaniques,
- Vieillesse naturelle des isolants.
- Fonctionnement dans un environnement sévère.

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

I.3.1.2. Court-circuit entre spires :

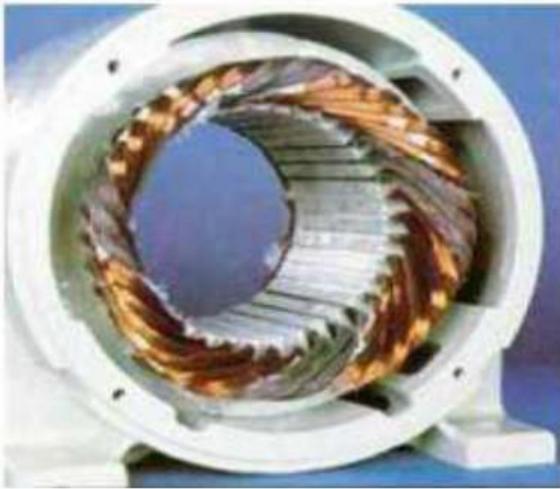
Un court-circuit entre spires de la même phase est un défaut assez fréquent qui a pour origine un ou plusieurs défauts d'isolant dans l'enroulement concerné. Il entraîne une augmentation des courants statoriques dans la phase affectée, une légère variation de l'amplitude sur les autres phases, modifie le facteur de puissance et amplifie les courants dans le circuit rotorique dans le cas des machines asynchrones. Ceci a pour conséquence une augmentation de la température au niveau du bobinage et, de ce fait, une dégradation accélérée des isolants, pouvant provoquer ainsi, un défaut en chaîne (apparition d'un 2^{ème} court-circuit). Par contre, le couple électromagnétique moyen délivré par la machine reste sensiblement identique hormis une augmentation des oscillations de couple liées au déséquilibre des courants de phases engendré par le défaut [14].

I.3.1.3. Court-circuit entre phases :

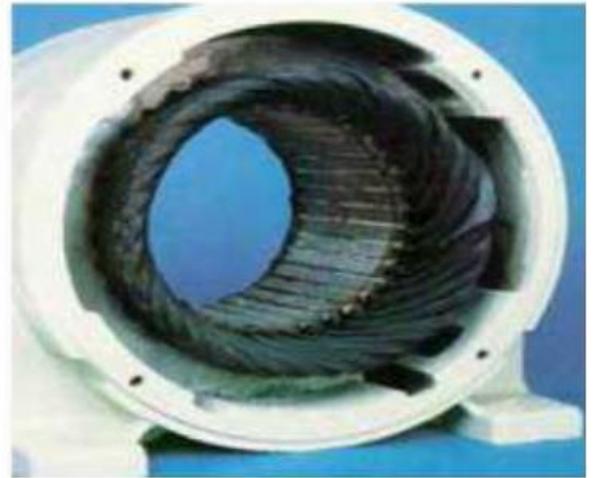
Ce type de défaillance peut arriver en tout point du bobinage. Cependant les répercussions ne seront pas les mêmes selon la localisation. Cette caractéristique rend difficile une analyse de l'incidence de ce défaut sur le système.

L'apparition d'un court-circuit proche de l'alimentation entre phases, induit des courants très élevés qui conduiraient à la fusion des conducteurs d'alimentation et/ou à la disjonction par les protections. D'autre part, un court-circuit proche du neutre entre deux phases a de moins graves conséquences ; il engendre un déséquilibre des courants de phases avec un risque moindre de la fusion des conducteurs. Les courants statoriques sont totalement déséquilibrés et ce déséquilibre dépend de la localisation du défaut. Dans le cas des machines asynchrones, les courants dans les

barres ainsique dans les anneaux sont augmentés lors de l'apparition de ce type de défaut. La détection de cetype de défaut peut reposer sur le déséquilibre des courants de phases. La figure (1.8) représente les dégâts provoqués par les défauts statoriques.



(a) Ouverture d'une phase (b) court-circuit dans une phase



(c) : Déséquilibre de l'alimentation

(d) : Damage dû à la surcharge



(e) : Masse dans l'encoche

(f) : Dégradation causée par une surtension

Figure 1.8: Dégâts de défauts statoriques

I.3.3 Défauts au rotor :

Contrairement aux défauts statoriques, les défauts au rotor dépendent du type de la machine considérée, parmi lesquels on peut citer les plus importants [15] :

- Défauts de roulements mécaniques,
- Excentricité du rotor,
- Rupture de barres rotoriques pour les machines asynchrones à cage,
- Défauts dans les enroulements rotoriques pour les machines synchrones classiques, asynchrones à rotor bobiné ou à courant continu,
- Défaut de démagnétisation pour les machines synchrones à aimants permanents.

Dans ce mémoire, nous allons nous intéresser aux défauts rotoriques survenant uniquement sur les MSAP et qui sont les défauts de roulements, d'excentricité et de démagnétisation.

I.3.3.1 Défauts de roulements mécaniques :

Dans une machine électrique, les roulements jouent le rôle d'interface mécanique entre le rotor et le stator. En effet, ils représentent l'élément de maintien de l'axe de la machine assurant une bonne rotation du rotor. Les roulements à billes, illustrés dans la figure (I.9), sont les plus utilisés dans la majorité des machines électriques en raison de leurs meilleurs rapports performance-prix [16].

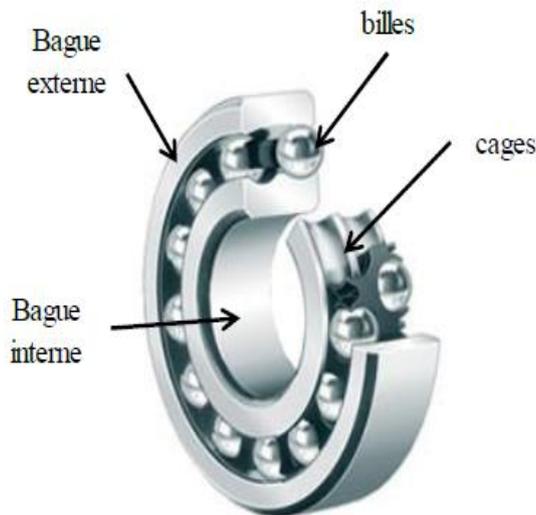


Figure I.9 : Structure d'un roulement à billes

Les défauts de roulements représentent de 40% à 90% du total de défauts en fonction du type et de la taille de la machine. Nous pouvons distinguer quatre types de défauts de roulement, en fonction de leur localisation :

- Défaut de bague externe,
- Défaut de bague interne,

- Défaut de billes,
- Défaut de cage.

Les causes externes possibles des endommagements de roulements ont été fournies par plusieurs références, parmi lesquelles on peut citer :

- Mauvais alignement du rotor,
- Courant traversant le roulement et causant des arcs électriques,
- Problèmes d'environnement,
- Contamination du roulement par des particules minuscules comme : les poussières et les grains de sable, ...
- Mauvaise lubrification provoquant l'échauffement et l'usure des roulements,
- Installation inexacte du roulement.

I.3.3 .2. Défaut d'excentricité

Dans une machine idéale, le centre du rotor est aligné sur celui du stator et l'axe de rotation du rotor est le même que l'axe du stator, comme illustré dans la figure I.9. Toutefois, les conséquences des défauts mécaniques peuvent se manifester au niveau de l'entrefer par un décentrement du rotor, se traduisant par des oscillations de couple [17]. Ce phénomène est appelé excentricité définie comme une asymétrie dans l'entrefer entre le stator et le rotor [18]. Ce défaut existe en général dans la machine, mais avec un faible niveau, dès sa fabrication et évolue avec le temps. Certains utilisateurs et fabricants spécifient un niveau d'excentricité maximal admissible de 5% alors que d'autres permettent un niveau maximal de 10% de la largeur de l'entrefer [16]. Selon, tout niveau d'excentricité supérieur à 60% nécessite une intervention immédiate afin d'éviter un frottement entre le rotor et le stator, ce qui peut mener à une panne très grave de la machine.

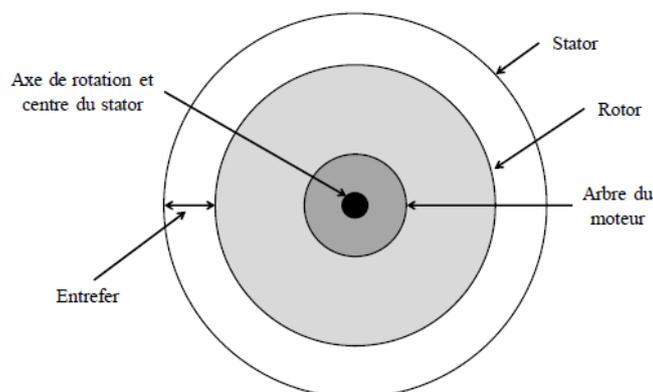


Figure I.10 : Positions du rotor et du stator dans une machine parfaite

Trois catégories d'excentricité peuvent être identifiées dans la littérature et sont illustrées dans la figure (I.10.)

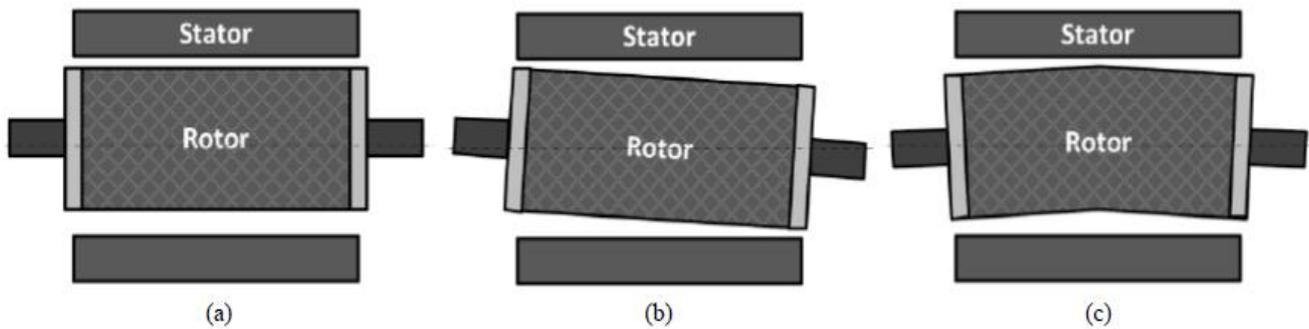


Figure I.11 :Types de défaut(a) d'excentricités statique ,(b) dynamique et (c) mixte .

I.3.3.3 Défaut de démagnétisation :

La machine à aimants permanents est constituée d'un rotor équipé d'aimants permanents, qui peuvent être montés en sa surface ou bien intégrés. La démagnétisation de ces aimants est une des problématiques les plus courantes de ce type de machine, en raison de leur coût relativement élevé qui représente environ 80% du coût réel de la machine [18].

Dans des conditions normales, les aimants produisent un flux rotorique constant. Cependant, ce flux peut varier pour des nombreuses causes, telles que :

- La réaction d'induit : le courant au stator crée un champ qui s'oppose à celui produit par les aimants ce qui peut déplacer leur point de fonctionnement hors de la zone limite de réversibilité,
- La température élevée : qui réduit l'induction rémanente des aimants,
- Les fissures : qui se forment dans les aimants lors de leur fabrication et qui peuvent conduire à leur désintégration et donc leur détérioration.

I.4 Méthodes de détection de défauts dans les machines électriques :

Pour effectuer le diagnostic d'une installation, les opérateurs de maintenance analysent un certain nombre de symptômes, tels que le bruit, la température, les vibrations...etc. En s'appuyant sur leurs expériences, ces derniers sont dus à des modifications des caractéristiques temporelles et fréquentielles d'un certain nombre de grandeurs mesurables ou non [19]. Pour effectuer un diagnostic, il est nécessaire de procéder à une ou des analyses afin d'interpréter les signaux issus des capteurs tant sur le plan fréquentiel que temporel. Parmi tous les signaux permettant d'établir un diagnostic, ceux-ci peuvent provenir de la mesure du courant absorbé par le moteur électrique, le carré de ce courant, la puissance instantanée, le vecteur de Park. Il est important de savoir que les différentes méthodes de diagnostic sont classées selon les approches auxquelles elles appartiennent. En effet, il existe deux approches [20] :

- Approche sans modèle,
- Approche avec modèle.

I.4.1 Méthode de diagnostic sans modèle :

Ces méthodes ne nécessitent pas forcément de modèle analytique précis du système mais reposent plutôt sur une reconnaissance de signatures, les signatures de défauts, obtenues par une modélisation ou par mesure sur maquette, sont généralement dans une base de données [21].

L'analyse est réalisée par une interprétation du type signal ou par système expert. Parmi ces méthodes on trouve :

- Diagnostic par l'analyse des tensions statorique induites.
- Diagnostic par mesure du couple électromagnétique.
- Diagnostic par analyse du courant statorique.
- Diagnostic par analyse des vibrations mécaniques de la machine.
- Diagnostic par analyse du vecteur de Park.
- Diagnostic par utilisation des techniques d'intelligence artificielle (AI).
- Diagnostic par utilisation des techniques de traitement de signal.

Dans ce que suit, on présente brièvement les techniques de traitement de signal utilisé dans le diagnostic (les transformées de Fourier rapide (FFT))

I.4.2. Méthode par traitement de signal :

Les techniques de traitement du signal appliquées à la détection des défaillances dépendent des conditions de fonctionnement de la machine. Ces conditions peuvent être très différentes selon que la vitesse et/ou le couple est constant ou variable. Parmi ces techniques on peut citer :

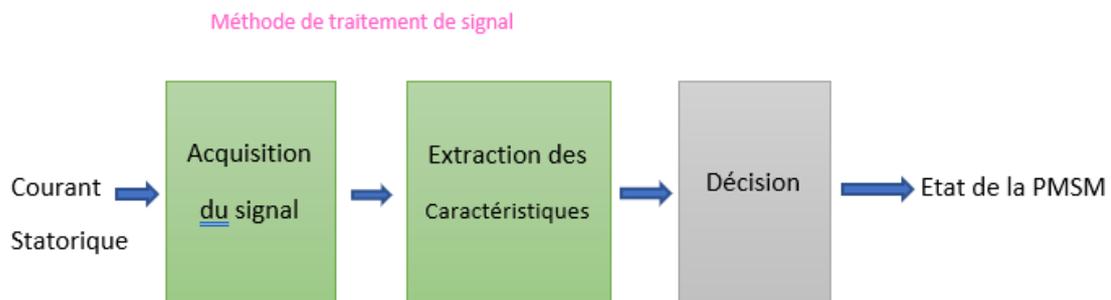


Figure I.12 : schéma explicatif de la méthode de traitement de signal.

I.4.1.1.1 Transformée en Série de Fourier :

La défaillance de la machine MSAP provoque l'apparition et/ou la modification d'harmoniques au niveau des spectres des signaux, la Transformée de Fourier (FFT) (Fast Fourier Transform) est une méthode non paramétrique dédiée à l'analyse des phénomènes stationnaires.

La transformée de Fourier permet le passage entre deux domaines de représentations complémentaires ; temporelle et fréquentielle grâce à l'intégrale qui porte son nom et qui s'exprime, pour une fonction $x(t)$, par [22] [23] :

$$X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) e^{-j2\pi f t} dt$$

I.1

De même, si l'on veut retrouver $x(t)$ à partir de $X(f)$, il faut connaître le spectre pour toutes les fréquences jusqu'à l'infini :

$$x(t) = \int X(f) e^{-j2\pi ft} df \quad \text{I.2}$$

L'analyse de Fourier peut particulièrement servir comme un outil de diagnostic de défaut par le suivi du changement du spectre fréquentiel.

Malgré sa facilité de mise en œuvre et d'interprétation, la transformée de Fourier ne convient que pour les signaux linéaires et stationnaires. Autrement dit, elle ne permet pas de bien localiser les changements temporels transitoires qui peuvent affecter le signal.

.Q

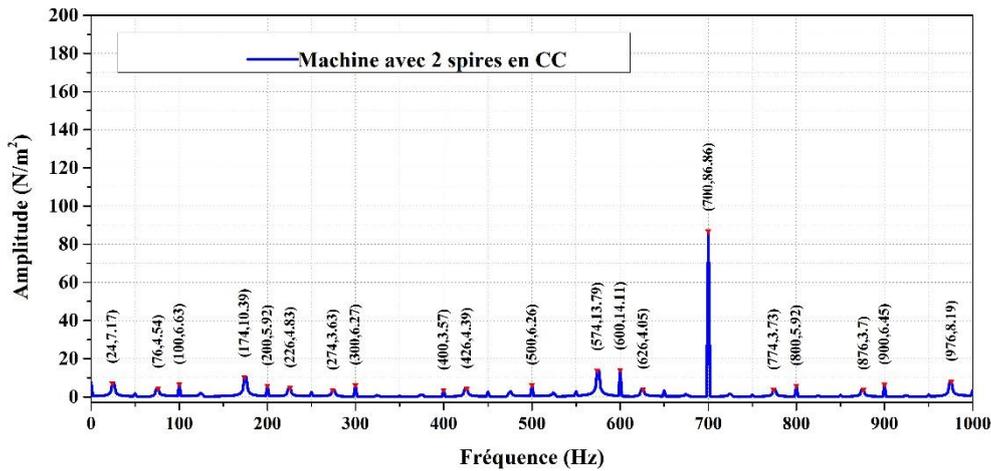


Figure I.13 : Spectre de la force radiale de la MSAP avec défauts

La figure (I.13) représente un exemple de spectre de force radiale d'une machine synchrone avec défauts, ou un pique est appars dans la fréquence 700 Hz.

I.5 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons fait un rappel sur la constitution de la machine synchrone à aimants permanents, en suite on a présenté les catégories de la MSAP qui peuvent être construites avec plusieurs configurations rotoriques selon le placement des aimants, puis nous avons parlé des avantages et inconvénients, ainsi l'utilisation de la MSAP dans tous les secteurs de la vie (domaines d'applications) par rapport aux autres machines malgré son cout à cause des aimants, et sur les défaillances pouvant affecter cette machine (excentricité, court-circuit,désaimantation...).On a présenté également quelques techniques de diagnostic de la machine synchrone à aimants permanents.

Le prochain chapitre va présenter la modélisation de la machine synchrone à aimant permanent.

Chapitre II :

**Modélisation de la machine synchrone à
aimant permanent**

Modélisation de la machine synchrone à aimant permanent

II.1. Introduction :

La modélisation et la simulation des machines constituent une étape primordiale en matière de diagnostic. Elles permettent la compréhension du fonctionnement en régime défectueux, la vérification sur le prototype numérique virtuel de l'efficacité des méthodes de détection de défauts et elles apportent également la possibilité de construire des bases de données sur les manifestations électriques et magnétiques de ces défauts [24].

Dans ce chapitre on va présenter deux approches de modélisation pour modéliser la MSAP sans et avec des défauts. Un modèle numérique basé sur la méthode des éléments finis sous le logiciel ANSYS électronique/maxwell, où les différentes étapes pour la conception du prototype de la machine seront évoquées. Un autre modèle mathématique de la machine sera présenté pour la méthode utilise la méthode classique des Circuits Electriques Magnétiquement couplés, où nous représentons les bobinages du stator de la machine dans le repère naturel 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 autres part sous forme d'un modèle d'état. Pour la validation, nous avons utilisé le modèle numérique pour analyser les différentes grandeurs électriques mécaniques.

II.2. Modèle mathématique de la machine synchrone a aiment permanent :

L'approche de modélisation par circuits électriques magnétiquement couplés repose sur une modélisation semi-analytique. La mise en place d'un modèle de la machine par l'approche nécessite deux étapes de développement distinctes :

- Ecriture des équations différentielles
- Détermination des paramètres du modèle

II.2.1 Modèle de la machine dans le repère abc :

Les machines synchrones à aimants permanents sont des moteurs sans balais avec une distribution sinusoïdale des enroulements statoriques. Le flux d'excitation vient des aimants situés sur ou à l'intérieur du rotor. Le modèle de MSAP dans le repère abc adopte les hypothèses suivantes [10],[25] :

1. La perméabilité magnétique des parties ferromagnétiques est considérée comme infinie
2. Le phénomène de saturation est négligé
3. La force magnétomotrice et le flux sont considérés comme distribués sinusoïdalement

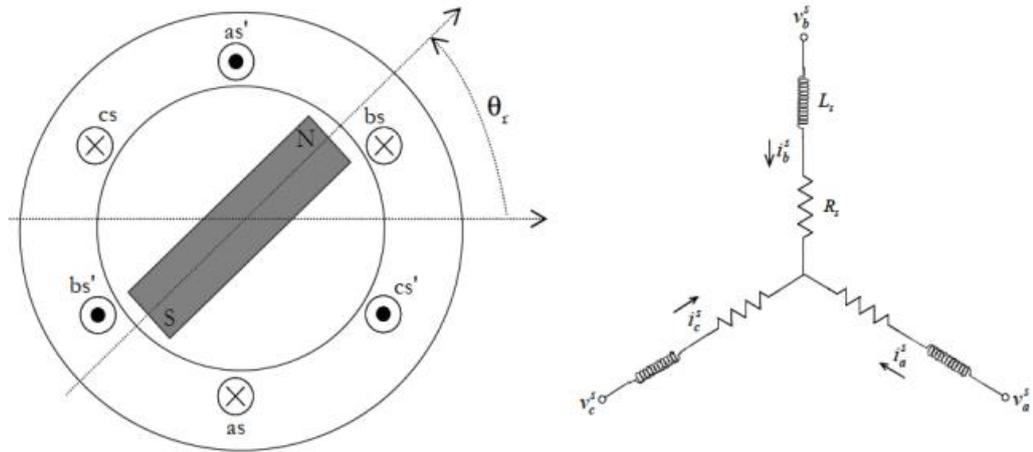


Figure II.1 : Schéma de la coupe transversale (a), et bobinage statorique équivalent (b) d’une MSAP

II.2.1.1.les équations électriques :

Les tensions de la machine vont présenter avec ces équations électriques suivantes :

$$V_{as} = R_s \cdot i_{as} + \frac{d\Phi_{as}}{dt} \tag{II.1}$$

$$V_{bs} = R_s \cdot i_{bs} + \frac{d\Phi_{bs}}{dt} \tag{II.2}$$

$$V_{cs} = R_s \cdot i_{cs} + \frac{d\Phi_{cs}}{dt} \tag{II.3}$$

Ces équations peuvent être écrites sous forme matricielle :

$$[V^s_{abc}] = [R^s_{abc}] \cdot [i^s_{abc}] + \frac{d[\Phi^s_{abc}]}{dt} \tag{II.4}$$

En examinant le système d’équations (II.4) on remarque que les tensions statoriques de phase se composent de deux parties : une partie résistive représentant les chutes de tension aux bornes de la résistance, et une partie magnétique résultant de l’évolution du flux lié au stator.

Ou, V^s_{abc} , R^s_{abc} , i^s_{abc} et Φ^s_{abc} indiquent les grandeurs et paramètres électromagnétiques de trois phases exprimées sous forme matricielle comme suite :

$$[V^s_{abc}] = [V^s_a \quad V^s_b \quad V^s_c] \tag{II.5}$$

vecteur des tensions statoriques.

$$[I^s_{abc}] = [i^s_a \quad i^s_b \quad i^s_c] \tag{II.6}$$

vecteur des courants de phase.

$$[\Phi^s_{abc}] = [\Phi^s_a \quad \Phi^s_b \quad \Phi^s_c] \tag{II.7}$$

vecteur de flux.

$$[R^s_{abc}] = \begin{bmatrix} R^s_a & 0 & 0 \\ 0 & R^s_b & 0 \\ 0 & 0 & R^s_c \end{bmatrix} \quad \text{Matrice de résistance.} \quad \text{II.8}$$

$$L_s = \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} \\ L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} \end{bmatrix} \quad \text{Matrice d'inductance.} \quad \text{II.9}$$

II.2.1.2. Expression du flux :

Pour les machines à aimants permanents. Le flux magnétique Φ^s_{abc} est généré par deux sources différentes : le flux créé par les bobines statoriques et celui provenant des aimants situés sur le rotor :

$$\Phi_{as} = L_{aa} \cdot i_{as} + L_{ab} \cdot i_{bs} + L_{ac} \cdot i_{cs} + \Phi^s_{mas} \quad \text{II.10}$$

$$\Phi_{bs} = L_{ba} \cdot i_{as} + L_{bb} \cdot i_{bs} + L_{bc} \cdot i_{cs} + \Phi^s_{mbs} \quad \text{II.11}$$

$$\Phi_{cs} = L_{ca} \cdot i_{as} + L_{cb} \cdot i_{bs} + L_{cc} \cdot i_{cs} + \Phi^s_{mcs} \quad \text{II.12}$$

Ainsi Φ^s_{abc} peut être exprimé par l'équation matricielle suivante :

$$\Phi^s_{abc} = L_S \cdot i^s_{abc} + \Phi^s_{mabc} \quad \text{II.13}$$

Où, Φ^s_{abc} est la partie du flux créée par les aimants, L_S est l'inductance propre de chaque bobine, et les éléments hors diagonale sont les inductances mutuelles entre les différents enroulements de phase.

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 :

$$L_{aa} = L_{bb} = L_{cc} = L \quad \text{II.14}$$

$$L_{ab} = L_{ac} = L_{ba} = L_{bc} = L_{ca} = L_{cb} = M \quad \text{II.15}$$

La matrice de l'inductance L_S prend alors la forme :

$$L_S = \begin{bmatrix} L & M & M \\ M & L & M \\ M & M & L \end{bmatrix} \quad \text{II.16}$$

$$R^s_a = R^s_b = R^s_c = R \quad \text{II.17}$$

$$[R^s_{abc}] = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \quad \text{II.18}$$

Et pour le système équilibré et connecté en étoile :

$$i_a^s + i_b^s + i_c^s = 0 \quad \text{II.19}$$

$$L_s = \begin{bmatrix} L - M & 0 & 0 \\ 0 & L - M & 0 \\ 0 & 0 & L - M \end{bmatrix} \quad \text{II.20}$$

Le flux produit par les aimants permanent Φ_{mabc} est lié à la position angulaire électrique θ_r du rotor.

En supposant que les enroulements du stator sont placés régulièrement avec un déphasage de $\frac{2\pi}{3}$.

Et que la distribution de flux qui les traversent est sinusoïdale peut alors être exprimé sous la forme d'une fonction périodique de θ_r définie par l'équations (II.16) dans laquelle Φ_m est l'amplitude de flux de l'aimant.

$$\Phi_{mabc}^s = \begin{bmatrix} \Phi_{ma}^s(\theta_r) \\ \Phi_{mb}^s(\theta_r) \\ \Phi_{mc}^s(\theta) \end{bmatrix} = \Phi_m \cdot \begin{bmatrix} \sin(\theta_r) \\ \sin\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \sin\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \quad \text{II.21}$$

Ou, θ_r la position angulaire du rotor par rapport à l'axe magnétique de la phase a du stator $\theta_r = \omega_r t$, avec ω_r est la pulsation rotorique et t est le temps. L'équation de tension (II.1) peut maintenant être écrite de manière plus détaillée :

$$V_{abc}^s = R_{abc}^s i_{abc}^s + L_s \frac{d\Phi_{abc}^s}{dt} \quad \text{II.22}$$

$$\frac{d\Phi_{mabc}^s}{dt} = \Phi_m \cdot \omega_r \begin{bmatrix} \cos \theta_r \\ \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \quad \text{II.23}$$

II.2.1.3. Équation mécanique :

Afin de résoudre l'équation (II.17), il y a deux variables θ et ω_r qui doivent être calculées. Pour ce faire. Les équations mécaniques du système sont incorporées. Conformément à la loi de Newton ; le modèle mécanique peut être décrit par les deux équations suivantes :

$$J \frac{d\omega_r}{dt} + f_r \cdot \omega_r = C_{em} - C_r \quad \text{II.24}$$

$$\omega_r = \frac{d\theta}{dt} \quad \text{II.25}$$

C_r : couple résistant extérieur. [N.m]

J : Moment d'inertie. [kg.m²]

ω_r : vitesse angulaire mécanique du rotor. [rad/s]

ω : Pulsation. [rad/s]

f_r :Frottement [N.m.s/rad]

II.2.1.4. Expression du couple électromagnétique :

Le couple électromagnétique est donné par :

$$C_{em} = \frac{1}{2} \cdot [i_{abc}^s]^T \frac{d\Phi_{mabc}^s}{dt} \quad \text{II.26}$$

$$C_{em} = \frac{1}{2} \cdot \begin{bmatrix} i_a^s \\ i_b^s \\ i_c^s \end{bmatrix} \cdot \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{ma}^s \\ \Phi_{mb}^s \\ \Phi_{mc}^s \end{bmatrix} \quad \text{II.27}$$

$$C_{em} = \frac{1}{2} \left(i_a^s \cdot \frac{d\Phi_{ma}^s}{dt} + i_b^s \cdot \frac{d\Phi_{mb}^s}{dt} + i_c^s \cdot \frac{d\Phi_{mc}^s}{dt} \right) \quad \text{II.28}$$

II.2.1.5. Établissement du modèle d'état

Les équations des tensions deviennent :

$$V_a^s = R_a^s i_a^s + L_s \cdot \frac{di_a^s}{dt} + M \frac{di_b^s}{dt} + M \frac{di_c^s}{dt} + M \frac{d\Phi_{ma}^s}{dt} \quad \text{II.29}$$

$$V_b^s = R_b^s i_b^s + M \cdot \frac{di_a^s}{dt} + M \frac{di_b^s}{dt} + M \frac{di_c^s}{dt} + M \frac{d\Phi_{mb}^s}{dt} \quad \text{II.30}$$

$$V_c^s = R_c^s i_c^s + M \cdot \frac{di_a^s}{dt} + M \frac{di_b^s}{dt} + M \frac{di_c^s}{dt} + M \frac{d\Phi_{mc}^s}{dt} \quad \text{II.31}$$

En associant l'équation mécanique et celle du couple (II.21) nous obtenons le modèle d'état suivant :

$$\begin{bmatrix} V_a^s \\ V_b^s \\ V_c^s \\ -C_r \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 & \frac{d\Phi_{ma}^s}{d\theta_r} & 0 \\ 0 & R & 0 & \frac{d\Phi_{mb}^s}{d\theta_r} & 0 \\ 0 & 0 & R & \frac{d\Phi_{mc}^s}{d\theta_r} & 0 \\ \frac{1}{2} \frac{d\Phi_{ma}^s}{d\theta_r} & \frac{1}{2} \frac{d\Phi_{mb}^s}{d\theta_r} & \frac{1}{2} \frac{d\Phi_{mc}^s}{d\theta_r} & f & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a^s \\ i_b^s \\ i_c^s \\ \omega_r \\ \theta_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L & M & M & 0 & 0 \\ M & L & M & 0 & 0 \\ M & M & L & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & J & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a^s \\ i_b^s \\ i_c^s \\ \omega_r \\ \theta_r \end{bmatrix} \quad \text{II.32}$$

Une forme condensée est obtenue sous l'écriture suivante :

$$[U] = [A][X] + [B][\dot{X}] \quad \text{II.33}$$

[U] : Vecteur d'état.

[X] : Vecteur de commande.

Le vecteur $[\dot{X}]$ peut s'écrire :

$$[\dot{X}] = [B]^{-1}([U] - [A] \cdot [X]) . \quad \text{II.34}$$

La matrice [A] obtenue s'écrit sous la forme :

$$[A] = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 & \frac{d\Phi_{ma}^s}{d\theta_r} & 0 \\ 0 & R & 0 & \frac{d\Phi_{mb}^s}{d\theta_r} & 0 \\ 0 & 0 & R & \frac{d\Phi_{mc}^s}{d\theta_r} & 0 \\ \frac{1}{2} \frac{d\Phi_{ma}^s}{d\theta_r} & \frac{1}{2} \frac{d\Phi_{mb}^s}{d\theta_r} & \frac{1}{2} \frac{d\Phi_{mc}^s}{d\theta_r} & f & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \quad \text{II.35}$$

La matrice inductance B de la MSAP peut se réécrire sous la forme suivante :

$$[B] = \begin{bmatrix} L & M & M & 0 & 0 \\ M & L & M & 0 & 0 \\ M & M & L & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & J & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{II.36}$$

II.2.2. Modélisation de la MSAP par la méthode des éléments finis :

La méthode des éléments finis est basée sur la résolution numérique des équations de maxwell. Les informations fournies par ce type de simulation sont d'une grande précision et elles nous apportent la prise en compte de la géométrie de la machine, la saturation des matériaux magnétiques, ainsi que l'effet de peau dans les barres rotoriques, lorsque le problème est correctement posé (géométrie, physique, lien avec des équations de circuit...) et que l'on utilise le mode de résolution adéquate (magnétostatique, magnétodynamique, magnétique évolutif). D'autre part, d'un point de la machine (fréquence et flux magnétisant), en modifiant, directement, les paramètres dans le programme de calcul (logiciel) d'où une grande souplesse d'utilisation [25].

Il existe des nombreux logiciels comme : mawell2D/3D qu'on va utiliser pour cette étude et qui peut aborder cette approche difficile. Le but principal de logiciel est de déterminer la cartographie du champ magnétique présent dans les machines électriques dont l'objectif d'optimiser le dimensionnement de ses dernières [27].

II.3. Présentation du logiciel ANSYS Maxwell :

ANSYS Maxwell est le logiciel de simulation de champ électromagnétique leader de l'industrie pour la conception et l'analyse de moteurs électriques, d'actionneurs, de capteurs, de transformateurs et d'autres dispositifs électromagnétiques et électromécaniques. Avec Maxwell, vous pouvez caractériser précisément le mouvement transitoire non linéaire des composants électromécaniques et leurs effets sur le circuit de commande et la conception du système de commande. En tirant parti des solveurs de champs électromagnétiques avancés de Maxwell et en les reliant de façon transparente à la technologie de simulation de circuits intégrés et de systèmes, vous pouvez comprendre les performances des systèmes électromécaniques longtemps avant de construire un prototype en matériel. Ce laboratoire électromagnétique virtuel vous donne un avantage concurrentiel important avec des délais de mise sur le marché plus courts, des coûts réduits et des performances système améliorées [28].

Maxwell inclut les solveurs suivants [28] :

- Transitoire magnétique.

- AC électromagnétique.
- Magnétostatique.
- Électrostatique.
- Conduction DC.
- Transitoire électrique.

II.3.1. Théorie des éléments finis pour les machines électriques :

Dans la théorie électromagnétique de l'élément finit, les équations de Maxwell sous forme différentielle peut être exprimée par les équations suivantes [25] [29] :

$$\begin{cases} \vec{\nabla} \times \vec{H} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \\ \vec{\nabla} \times \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \\ \vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \\ \vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \theta \end{cases} \quad \text{II.37}$$

\vec{H} : Intensité du champ magnétique (A/m).

∇ : Le gradient.

\vec{J} : Densité de courant (A/m²).

\vec{D} : Vecteur de déplacement électrique (C/m²).

\vec{B} : Force d'induction magnétique (T).

ρ : Densité de charge.

La relation entre les variables électromagnétiques dans les matériaux peut être exprimé sous forme de l'équation (II.33) :

$$\begin{cases} \vec{J} = \gamma \cdot \vec{E} \\ \vec{D} = \epsilon \cdot \vec{E} \\ \vec{B} = \mu \cdot \vec{H} \end{cases} \quad \text{II.38}$$

γ : Conductivité (S/m).

\vec{E} : Intensité du champ électrique (N/C).

ϵ : Constante diélectrique (F/m).

μ : Perméabilité magnétique du matériau (H/m).

Le potentiel vecteur magnétique et le potentiel scalaire sont introduits pour résoudre le champ électromagnétique, qui sont défini par les équations (II.34) et (II.35) :

$$\vec{B} = \nabla \times \vec{A} \quad \text{II.39}$$

$$\vec{E} = -\nabla \cdot \varphi \quad \text{II.40}$$

Substitution des équations (II.32) et (II.35) dans l'équation (II.32) deux indépendants équations différentielles partielles (II.36) et (II.37) peuvent être obtenu comme suite :

$$\nabla^2 \vec{A} - \mu \mathcal{E} \frac{\partial^2 \vec{A}}{\partial t^2} = -\mu \vec{J} \quad \text{II.41}$$

$$\nabla^2 \varphi - \mu \mathcal{E} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} = -\frac{p}{\mathcal{E}} \quad \text{II.42}$$

Dans le processus de résolution des problèmes électromagnétiques, il existe trois principaux types de conditions aux limites [26].

- Le premier type de conditions aux limites, également connu sous le nom de conditions de Dirichlet, donne la fonction $y_1(s)$ du champ limite qui est :

$$y|_s = y_1(s) \quad \text{II.43}$$

- Le deuxième type de condition aux limites, également appelé la condition de Neumann, donne la dérivée normale $y_2(s)$ de la fonction à la limite du champ. Qui est :

$$\frac{\delta y}{\delta n} \Big|_s = y_2(s). \quad \text{II.44}$$

- Un troisième type de condition aux limites, étant donné une combinaison linéaire de la fonction et de sa dérivation normale au champ frontière, qui peut être exprimée sous forme d'équation :

$$a y + \frac{\delta y}{\delta n} \Big|_s = y_3(s) \quad \text{II.45}$$

II.4 Conception du modèle de la machine MSAP :

Avant de commencer la conception nous allons d'abord présenter les paramètres de la machine sur laquelle on va faire notre étude.

Tableau II.1 : les paramètres de la MSAP étudiée

Caractéristiques	Valeurs	Unité
Nombre de pôle	28	/
Nombre d'encoche statoriques	24	/
Nombre de spire / encoche	20	/
Type d'enroulement	Concentrique	/
couplage	Etoile	/
Rayon extérieur du stator	309	mm
Rayon intérieur du stator	250	mm
Rayon intérieur du rotor	90	mm
Entrefer magnétique	1.5	mm
Résistance de phase	0.004955	Ohms
Inductance de phase	0.0773	mH
Tension induite/phase	500	V
Fréquence nominale	350	Hz
Facteur de puissance	0.83104	/
Courant de phase	745.3	A
Couple nominale	1.3	K.N
Puissance nominale	195	kw
Vitesse de rotation nominale	1500	tr/min

II.4.1. Étapes de Conception du modèle :

La création du modèle de la machine passe par plusieurs étapes qu'on peut les résumer par le schéma suivant :

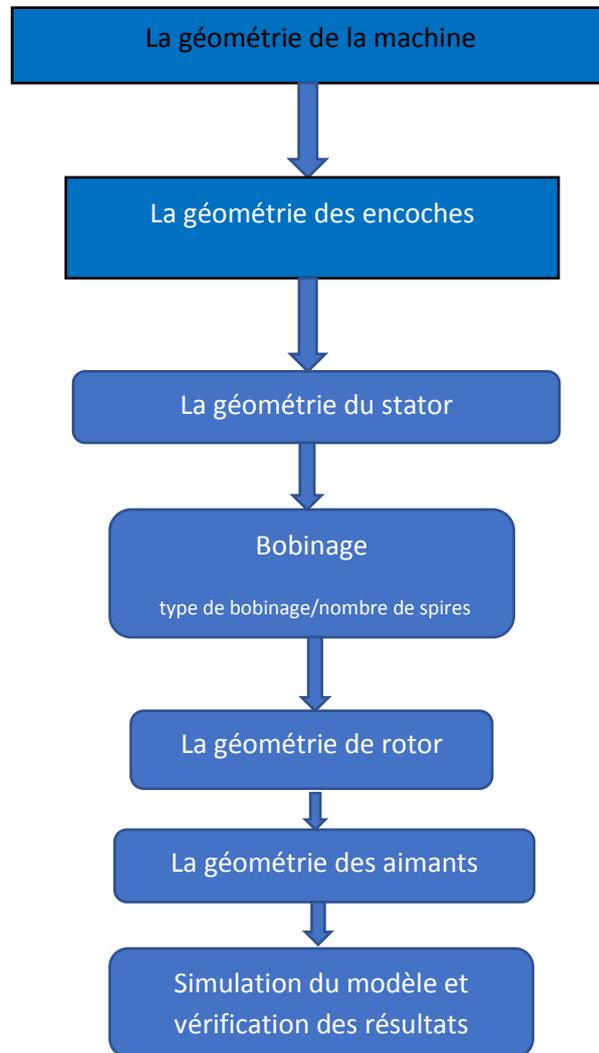


Figure II.2 : Etapes de conception d'une machine sur ANSYS-MAXWELL

II.4.3 Construction de la géométrie :

La structure de la machine MSAP étudié est donnée dans la figure (II.3). La machine est à aimants montés en surface, tourne à la vitesse maximale de 1500tr/mn pour une puissance nominale de 195kW. Elle est conçue pour un être fonctionner en mode moteur dans les applications aérospatiales.

Slot Type:	Parallel Slot	Rotor Type:	Surface Parallel
Stator Ducts:	None	Rotor Ducts:	None
Stator Parameters	Value	Rotor Parameters	Value
Slot Number	24	Pole Number	28
Stator Lam Dia	308	Magnet Thickness	7
Stator Bore	250	Magnet Reduction	0
Slot Width	25	Magnet Arc [ED]	144
Slot Depth	20	Magnet Segments	1
Tooth Tip Depth	1	Airgap	1.5
Slot Opening	23	Banding Thickness	0.5
Tooth Tip Angle	0	Shaft Dia	90
Sleeve Thickness	0	Shaft Hole Diameter	60

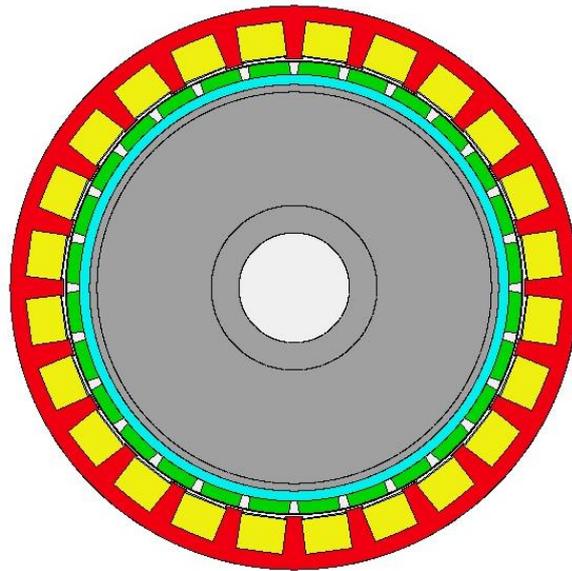


Figure II.3 : Modèle 2D de la machine étudiée sur le logiciel Maxwell 2D

Le module RMxprt permet de définir le type de bobinage utilisé dans le stator selon certaines configurations prédéfinis et souvent utilisées dans les machines électriques. Dans notre cas le bobinage utilisé dans la machine n’est pas préconfiguré dans le logiciel.

A cet effet nous avons introduit notre configuration du bobinage manuellement conforment à distribution donnée par constructeur.

Figure (II.4) représente la distribution des bobines sur les encoches de la machine.

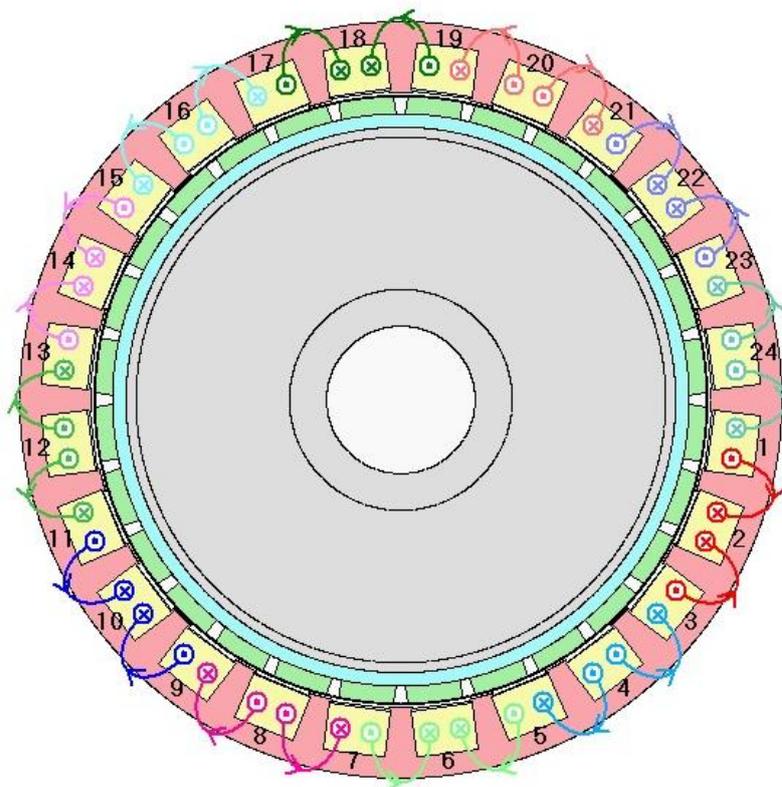


Figure II.4 : Distribution des bobines sur les encoches

Une distribution écartée des bobines sur les différentes encoches est recommandée pour comprendre le fonctionnement de la machine. Les 4 voies parallèles des bobines sont montrées sur la Figure (II.5).

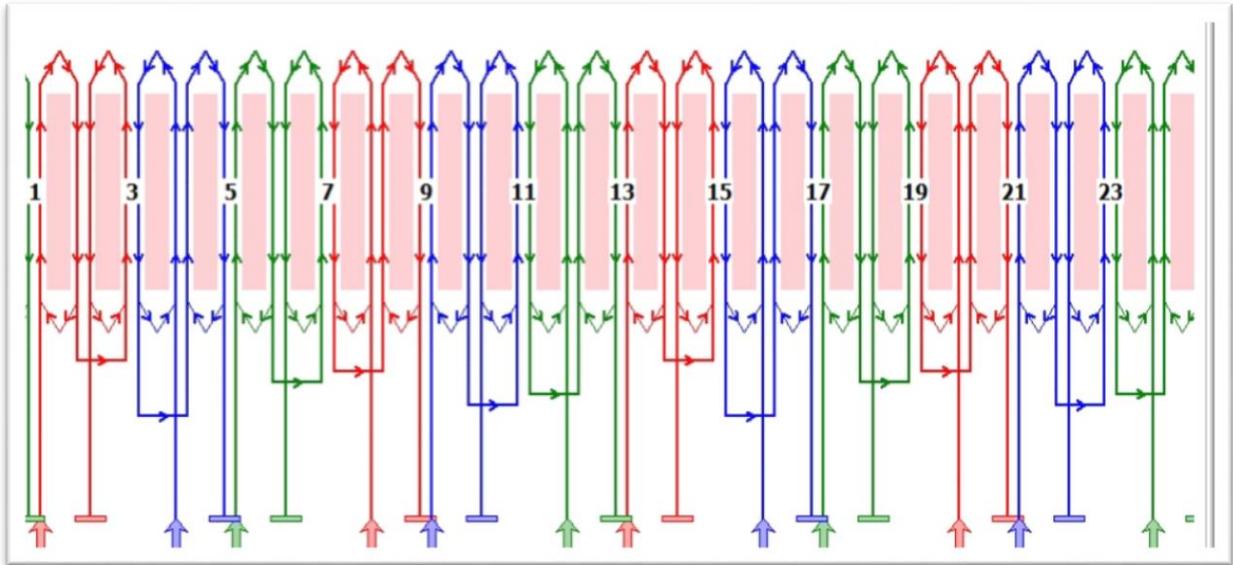


Figure II.5 : Diagramme écarté des bobines statorique

Le schéma équivalent utilisé pour la simulation de la machine est celui de la figure (II.6). Le circuit permet d'introduire les différents défauts statoriques.

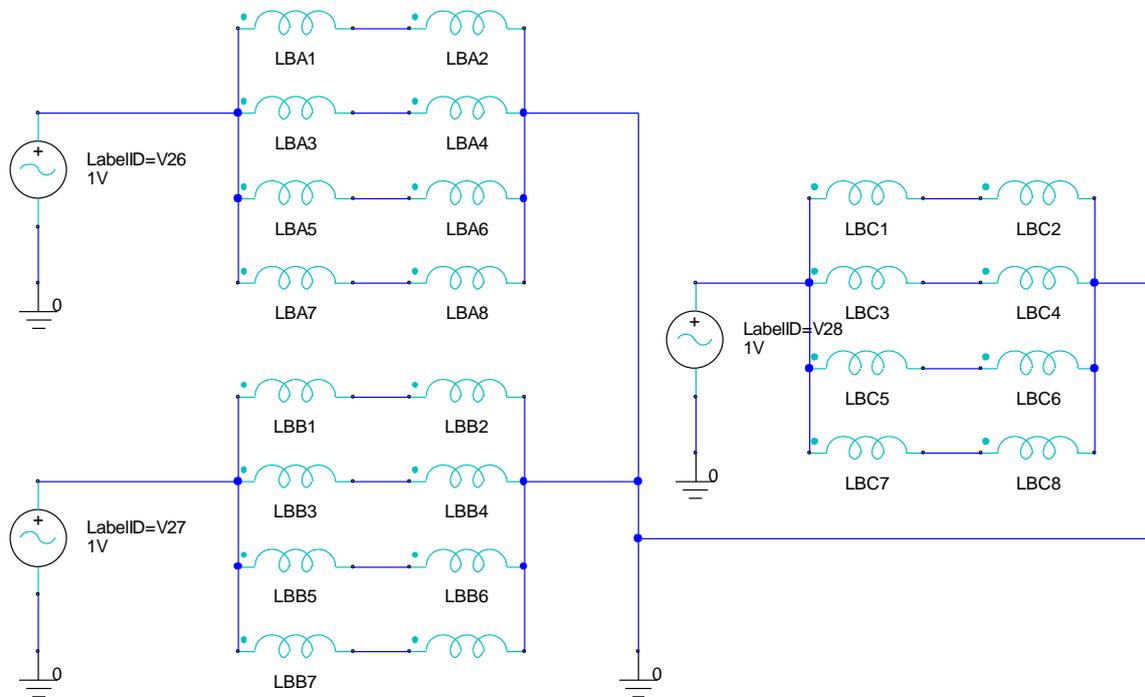


Figure II.6 : Circuit électrique équivalent de la MSAP.

Le tableau (II.2) montre également les matériaux utilisés pour les différentes parties de la machine.

Tableau II.2 : matériaux utilisés pour les parties de la machine.

Partie du machine	Matériau
Stator	M350-50A
Rotor	M350-50A
Aimants permanents	N42UH
Enroulement	Cuivre

Tableau II.2 : matériaux utilisés pour les parties de la machine.

II.5. Calcul de la force électromagnétique :

Dans notre travail nous allons utiliser la force radiale pour détecter la présence de déséquilibre dans les bobines statoriques. L'estimation des forces électromagnétiques est effectuée à l'aide de tenseur de contrainte de Maxwell. Il est important que les calculs soient effectués pour un grand nombre de point dans l'espace, pour une estimation détaillée des forces, l'incrément recommandé entre les points est d'au moins 0.5 degré mécanique, ou de 720 points pour un point complet cercle.

Les équations employées sont les suivantes [29] :

$$f_r = \frac{1}{2\mu_0} [B_r^2 - B_t^2] \quad \text{densité de la force radiale [N/m}^2\text{].} \quad \text{II.41}$$

$$f_t = \frac{1}{\mu_0} [B_r B_t] \quad \text{densité de la force tangentielle [N/m}^2\text{].} \quad \text{II.42}$$

Sur la base des valeurs de densité de force, le programme calculera automatiquement les forces en chaque point en fonction de :

$$F_r = f_r \cdot L_{stk} \cdot L_{arc} \quad \text{II.43}$$

$$F_t = f_t \cdot L_{stk} \cdot L_{arc} \quad \text{II.44}$$

L_{stk} est la longueur axiale magnétique= la longueur la plus courte de l'aimant.

L_{arc} est la longueur de l'arc sur lequel la force agit.

La définition se dépendra du fait que la force est calculée pour les essais de performance de force intégrés ou pour un chemin d'accès défini par l'utilisateur. La conversion entre les composants cartésiens et polaires de la force électromagnétique est donnée par les expressions suivantes :

$$\begin{cases} F_x = Fr \cos(\theta) + Ft \sin(\theta) \\ F_y = -Fr \sin(\theta) + Ft \cos(\theta) \\ F_r = Fx \cos(\theta) - Fy \sin(\theta) \\ F_t = Fx \sin(\theta) + Fy \cos(\theta) \end{cases} \quad \text{II.45}$$

Où θ est l'angle du point où la force agit, en coordonnées (R, T) dans le référentiel local.

C'est illustré dans le diagramme ci-dessous, où le point rouge indique le point où la force agit. Pour obtenir les définitions des cadres de référence utilisés pour indiquer les valeurs de force.

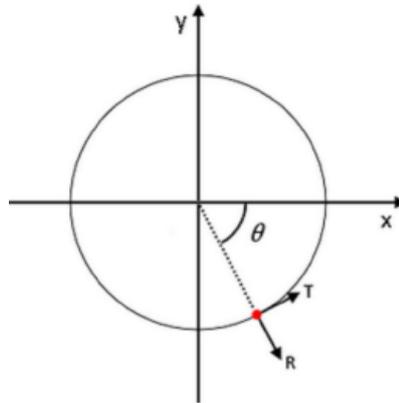


Figure II.7 : diagrammes de la force.

II.5.1 Force électromagnétique radiale :

La Méthode du tenseur de contrainte de Maxwell est utilisée pour calculer la contrainte magnétique sur la paroi de la dent et la surface du stator. Parce que la densité magnétique tangentielle dans l'entrefer est relativement petite, elle est ignorée dans le calcul. La force électromagnétique radiale par unité de surface de PMSM peut être exprimé sous forme d'équation [30]:

$$f(t, \alpha) = \frac{b_n^2(t, \alpha)}{2\mu_0} \quad \text{II.46}$$

Dans cette équation :

μ_0 : Perméabilité à l'air (H/m).

t : Temps.

α : Angle d'espace.

$b_n^2(t, \alpha)$: Densité magnétique de l'espace d'air.

II.5.2. Composantes harmoniques de la force électromagnétique :

Lorsque le moteur tourne, l'entrefer contient un champ magnétique fondamental et une série des champs magnétiques due aux harmoniques. Ces champs magnétiques interagissent les uns avec les autres pour générer une force tangentielle produisant un couple électromagnétique de sortie. Autrement, des Composantes de forces électromagnétiques radiales en rotation en fonction du temps et pour des fréquences différentes. Plus l'ordre des Composantes de la force électromagnétique radiale est faible, plus que la courbe de déformation du noyau est importante. La déformation du noyau du stator est approximativement inversement proportionnelle aux quelques Composantes de force et proportionnelle à l'amplitude des Composantes de la force [30].

Pour les PMSM une distribution fractionnaire des encoches, la position des dents du stator correspondant à chaque aimant permanent peut être différent. Pour un PMSM à des encoches fractionnaires triphasées, le nombre des encoches par pôle et par phase peuvent être exprimées par l'équation suivante :

$$q = \frac{z}{2mp} = b + \frac{c}{d} \quad \text{II.47}$$

Dans l'équation (II.54) :

z : Nombre d'encoches du moteur.

m : Nombre de phase.

P : Nombre de pole

$\frac{c}{d}$: Une fraction la plus simple

Lorsque d est un nombre pair, le nombre de parties unitaires $t = \frac{2p}{d}$, et le multiple de la force magnétomotrice harmonique magnétique et le champ de l'enroulement du stator peut être exprimé en équation (II.48) :

$$v = (3k_1 + 1) t \quad \text{II.48}$$

Avec :

$$k_1 = \pm 1, \pm 2, \pm 3.$$

Lorsque d est un nombre impair, le nombre de parties unitaires est $t = \frac{p}{d}$, et le multiple du champ magnétique harmonique de force magnétomotrice de l'enroulement du stator peut être exprimé par l'équation (II.49) :

$$v = (6k_1 + 1) t \quad \text{II.49}$$

L'ordre du champ magnétique harmonique de la force magnétomotrice de l'aimant permanent du rotor peut être exprimé sous forme d'équation (II.50) :

$$\mu = (2k_2 + 1)p \quad \text{II.50}$$

avec: $k_2 = 0, 1, 2, 3.$

En plus du champ magnétique harmonique de force magnétomotrice, le champ magnétique harmonique de l'entrefer a également des harmoniques dus au champ magnétique des dents.

L'ordre de l'harmonique du champ magnétique des dents perméables à enroulement du stator peut être exprimé en Equation (II.51) :

$$v = k_1 Z + p \tag{II.51}$$

L'ordre du champ magnétique harmonique des dents de perméation de l'aimant permanent du rotor peut être exprimé en équation (II.52) :

$$\mu = k_1 Z + (2k_2 + 1)p \tag{II.52}$$

Le nombre d'ondes de force générées par l'interaction des harmoniques des champs magnétiques du stator et du rotor est : $\gamma = v \pm \mu$ et la fréquence est : $f = |f_v + f_\mu|$

II.6. Résultat de simulation de la MSAP :

Afin de vérifier le comportement dynamique de la machine et voir les caractéristiques dynamiques, nous devons simuler le modèle en 2D qui va nous permet de calculer la distribution de l'induction magnétique à tout instant. Ce modèle est possible avec le module de résolution numérique de Maxwell 2D. Nous créons une solution transitoire et on lance la simulation pour une durée suffisante pour l'analyse spectrale de la force électromagnétique.

La machine a été alimenté directement pour une source de courants triphasés alternatifs de valeur efficace nominale et une vitesse de rotation nominale.

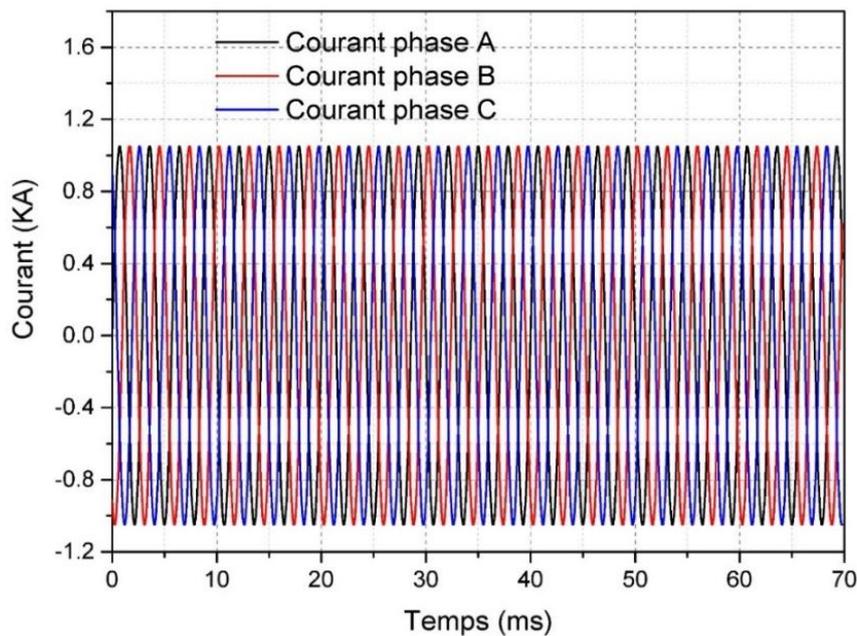


Figure II.8 : Courants d'alimentation de la machine MSAP

La figure (II.9) montre la distribution de l'induction magnétique sur la machine pour un instant données. Le calcul de l'induction magnétique nous permet d'estimer son intensité au niveau de l'entrefer avec les composantes radiale et tangentielle (II.9).

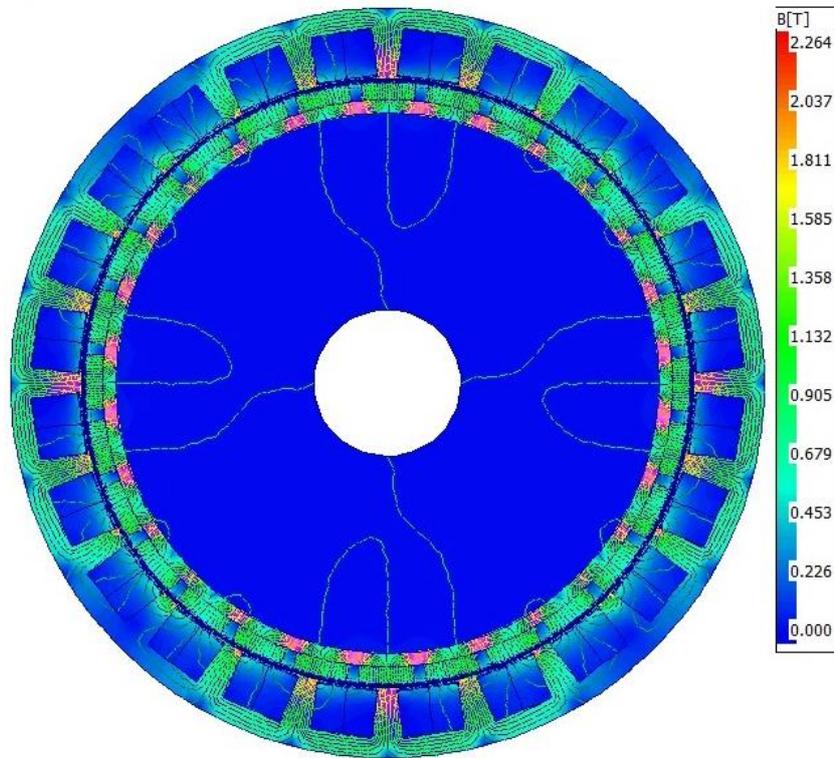


Figure II.9 : distribution de l'induction magnétique.

les figure suivantes (II.10 a II.14) représentent les résultats de la densité de l'induction magnétique dans l'entrefer avec ses composantes (radiale et tangentielle) et aussi le couple électromagnétique.

L'amplitude de la force et sa composante radiale sera présenté avec les figures (II.12 et II.13).

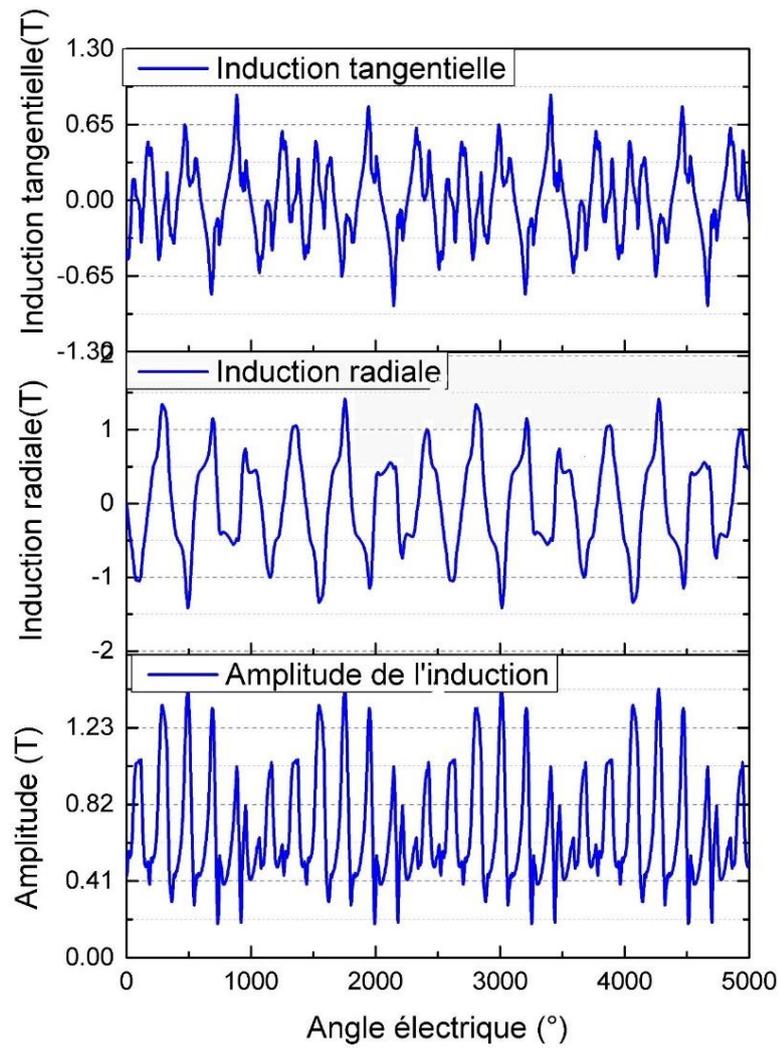


Figure II.10: Densité de l'induction magnétique dans l'entrefer avec les composantes polaires

La figure (11) montre le couple électromagnétique de sortie de la machine pour un courant nominale. Il est clair que sa valeur est très proche de la valeur assignée par le constructeur de la machine.

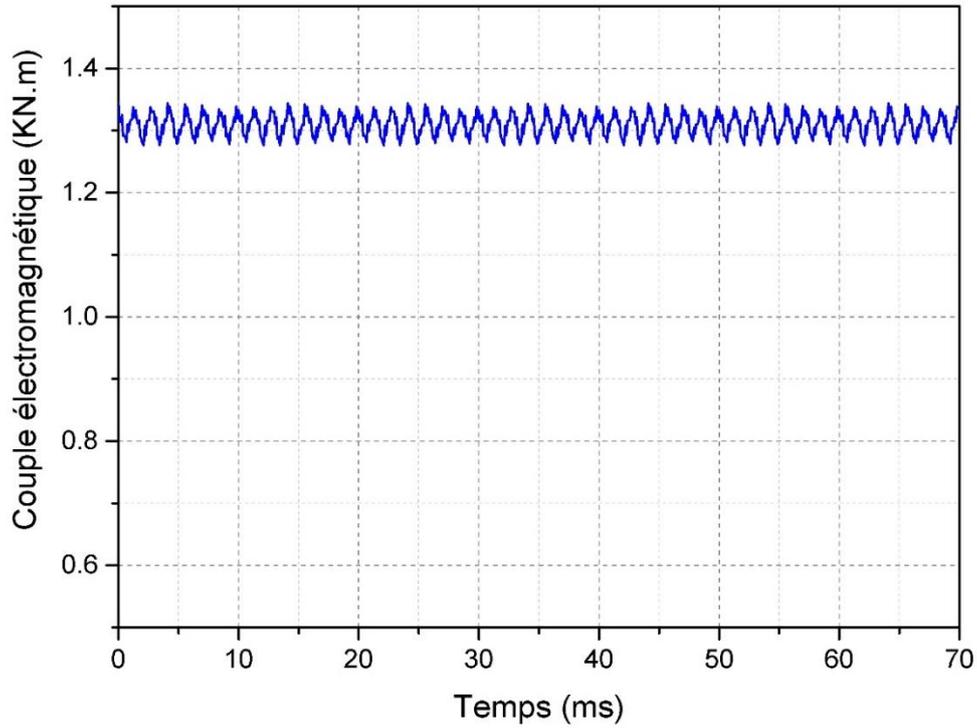


Figure II.11 : Couple électromagnétique

En se basant les équations II.41 et II.42 et en utilisant les densité radiale et tangentielle de l'induction magnétique le long de l'entrefer, il est possible de calculer les composantes radiale, tangentielle et l'amplitude de la force électromagnétique exercée saur le stator. Les Figures (II.12) et la Figure (II.13) et (II.14) montrent la distribution de cette force et ces composantes.

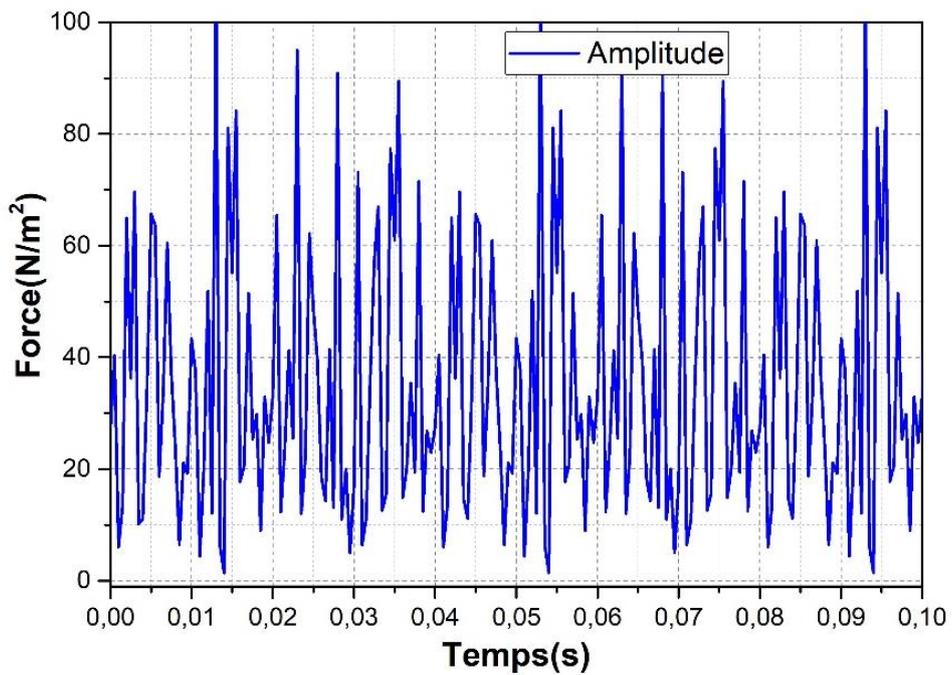


Figure II.12 : Courbe de l'amplitude de la force en fonction de temps

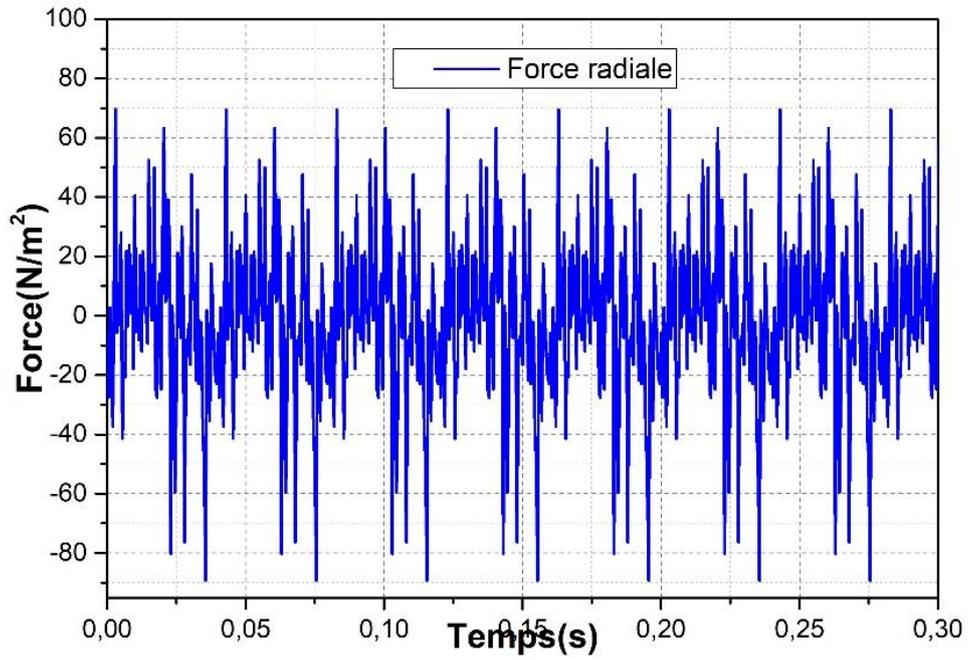


Figure II.13 : Courbe de la composante radiale de la force en fonction de temps

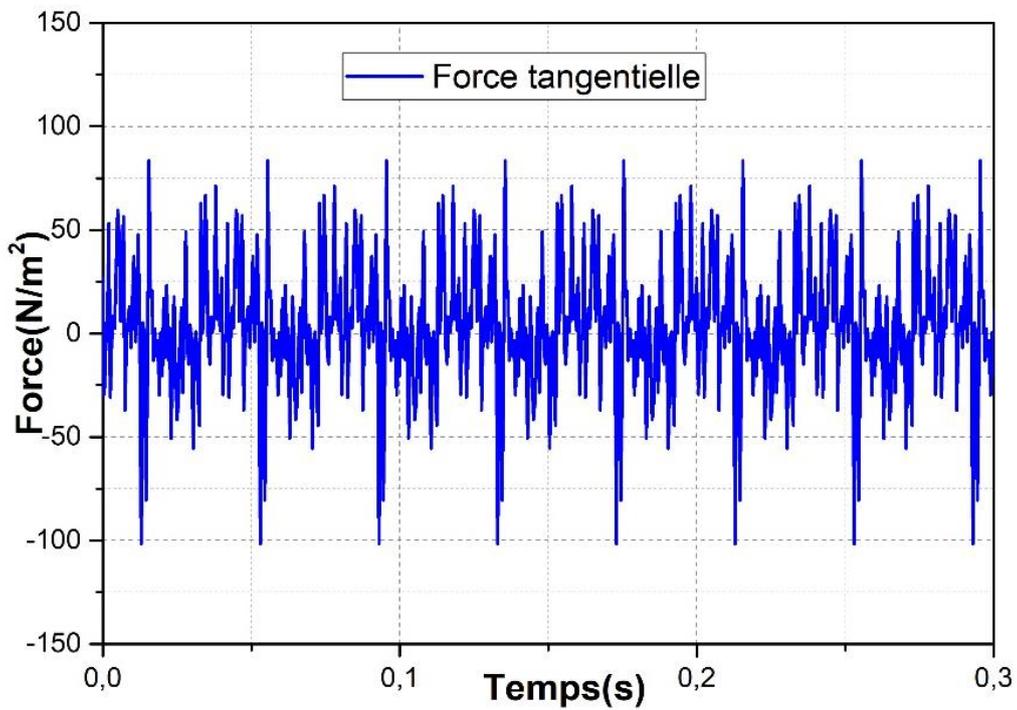


Figure II.14 : Courbe de la composante tangentielle de la force en fonction de temps

Interprétation :

La figure (11) montre le couple électromagnétique de sortie de la machine pour un courant nominale. Il est clair que sa valeur est très proche de la valeur assignée par le constructeur de la machine. Les Figures (II.12) et la Figure (II.13) et (II.14) montrent la distribution de cette force et ces composantes. Ou la force radiale qui influe directement sur le fonctionnement de la machine

II.7. CONCLUSION :

Dans ce chapitre nous avons montré la capacité d'un logiciel de conception des machines électriques de reproduire le fonctionnement réel de la machine pour différents régimes. La connaissance des paramètres de la machines est nécessaire afin de permettre aux constructeurs de tenir compte des différentes contraintes. Nous avons également présenté les caractéristiques dynamiques de la machine en utilisant l'outil de simulation 2D dédié pour ce faire. Les résultats obtenus ont montré une bonne concordance par rapport aux valeurs assignées par le constructeur. Nous avons également tiré l'allure de la force électromagnétique et ses composantes pour l'analyser en chapitre III par FFT sous différentes modes de fonctionnement dégradés.

Chapitre III :

**Etude de défauts de court-circuit de la
machine MSAP**

Etude de défauts de court-circuit de la machine MSAP

III.1. Introduction :

Après avoir modélisé et simulé la machine synchrone à aimant permanents dans le chapitre précédent avec les deux méthodes (éléments finis et circuits électriques magnétiquement couplés) en régime sain. Nous présentons dans ce dernier chapitre la modélisation de la MSAP avec défauts, les résultats de simulation qui nous permettra de comparer et d'analyser le comportement de la machine en présence des défauts.

Le court-circuit entre spires, entre bobines et entre bobines de différentes phases dans l'une des enroulements du stator est le défaut le plus courant dans la machine à aimant permanent. Ce type de défaut est une des principales raisons des défaillances de l'enroulement du stator entraîne par la suite d'autres dommages. Dans ce modèle de la machine développé dans notre mémoire, un court-circuit entre spires et entre bobines dans la phase « a » est analysé par une diminution du nombre de spires des bobines concernées. Les défauts simulés sont mentionnés sur la (figure III.1) du circuit externe de la machine.

III.2 Création des courts-circuits :

Le court-circuit entre spires, entre bobines et entre bobines de différentes phases dans l'une des enroulements du stator est le défaut le plus courant dans la machine à aimant permanent. Ce type de défaut est une des principales raisons des défaillances de l'enroulement du stator entraîne par la suite d'autres dommages. Dans ce modèle de la machine développé dans notre mémoire, un court-circuit entre spires et entre bobines dans la phase « a » est analysé par une diminution du nombre de spires des bobines concernées. Les défauts simulés sont mentionnés sur la (figure III.1) du circuit externe de la machine

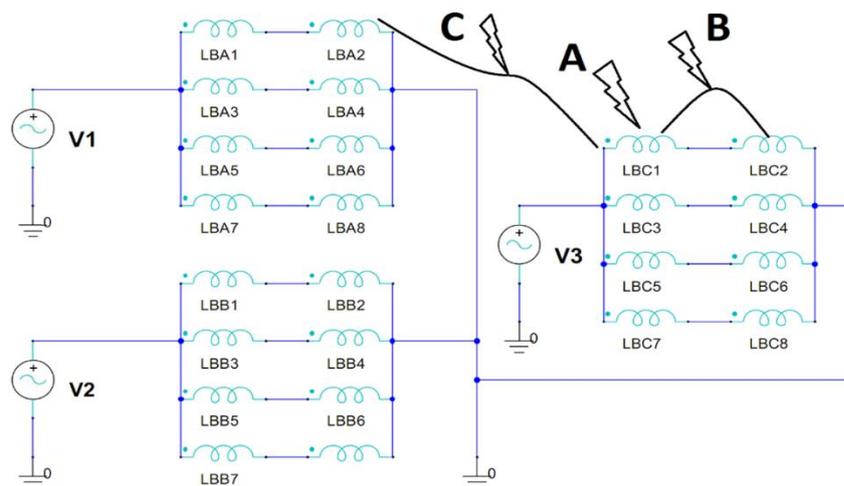


Figure III.1 : Circuit externe de la machine MSAP.

Afin d'analyser la caractéristique sur les courts-circuits du stator et son influence sur la répartition de la force électromagnétique, on considère les cas suivants :

- A- Un court-circuit entre les spires à l'intérieur de la bobines (2 et 3 spires mises en court-circuit).
- B- Un court-circuit deux bobines de la même phase (2 et 3 spires mises en court-circuit pour les deux bobines).
- C- Un court-circuit deux bobines de phases différentes (2 et 3 spires mises en court-circuit pour les deux bobines).

III.3 Résultats de simulation :

La méthode des éléments finis est une technique numérique basée sur le calcul par ordinateur afin de calculer les paramètres des dispositifs électromagnétiques. Il peut être utilisé pour calculer la densité de flux dans l'entrefer, les lignes de champs, l'inductance, le couple, la force électromotrice induite, etc. Le modèle réalisé offre une flexibilité illimitée dans la forme géométrique, les propriétés des matériaux et les conditions aux limites dans différentes régions de la machine. En outre, il fournit des informations détaillées sur les effets non linéaires de la machine (basés sur sa géométrie et ses propriétés matérielles). Cette approche de modélisation permet d'obtenir une description précise et complète d'une machine électrique sous les différents régimes de fonctionnements dégradés. Ces valeurs de champ sont supposées être une simple fonction de la position au sein de ces éléments, permettant l'interpolation des forces agissant sur le stator de la machine.

III.3.1. Couple électromagnétique :

Les résultats de simulation, obtenus en appliquant un des défauts de courts-circuits dans l'enroulement statorique du MSAP, la figure (III.2) montre la distribution de couple électromagnétique dans l'entrefer.

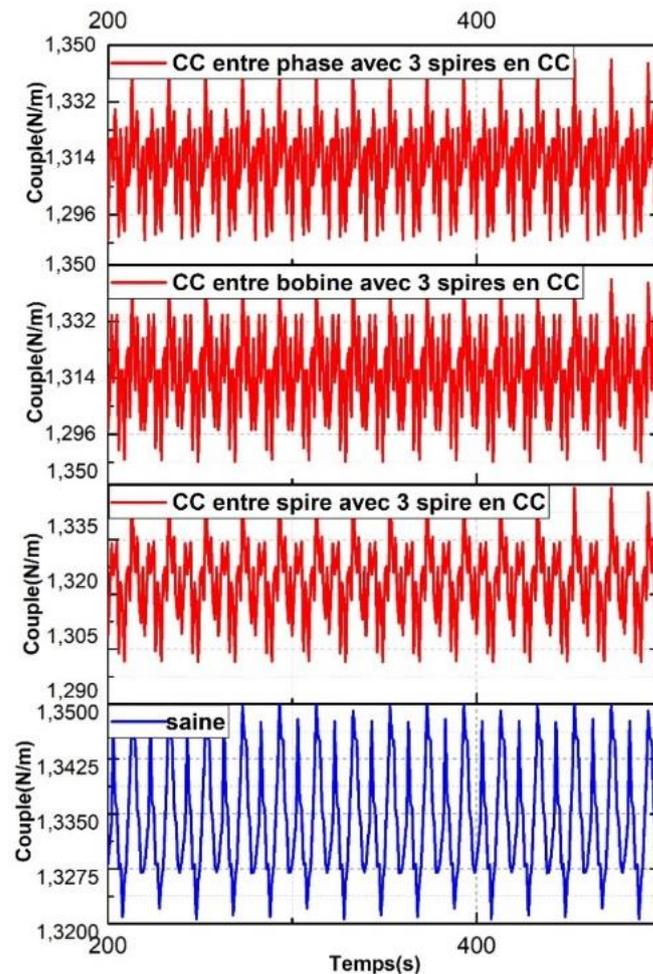


Figure III.2 : Distribution couple électromagnétique.

III.3.2. Induction magnétique :

Comme le montre la figure (III.3) la densité de l'induction induite dans l'entrefer dans les diverses conditions de fonctionnement montre une légère augmentation selon le degré la position de défauts. Ce travail est basé sur une alimentation par courant purement sinusoïdal, ce qui est favorisé pour analyser uniquement les composantes spatiales de la force électromagnétique.

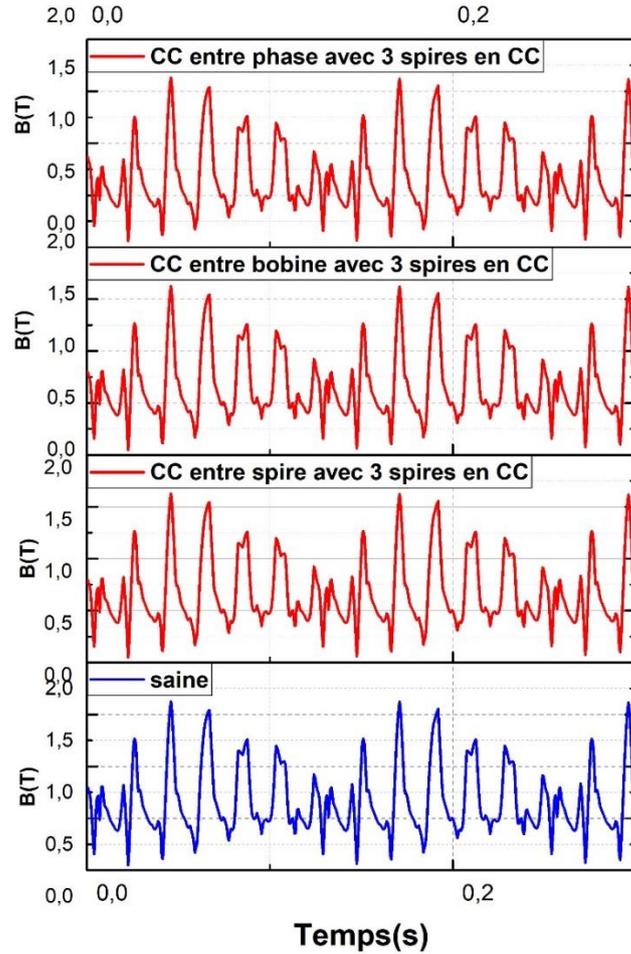
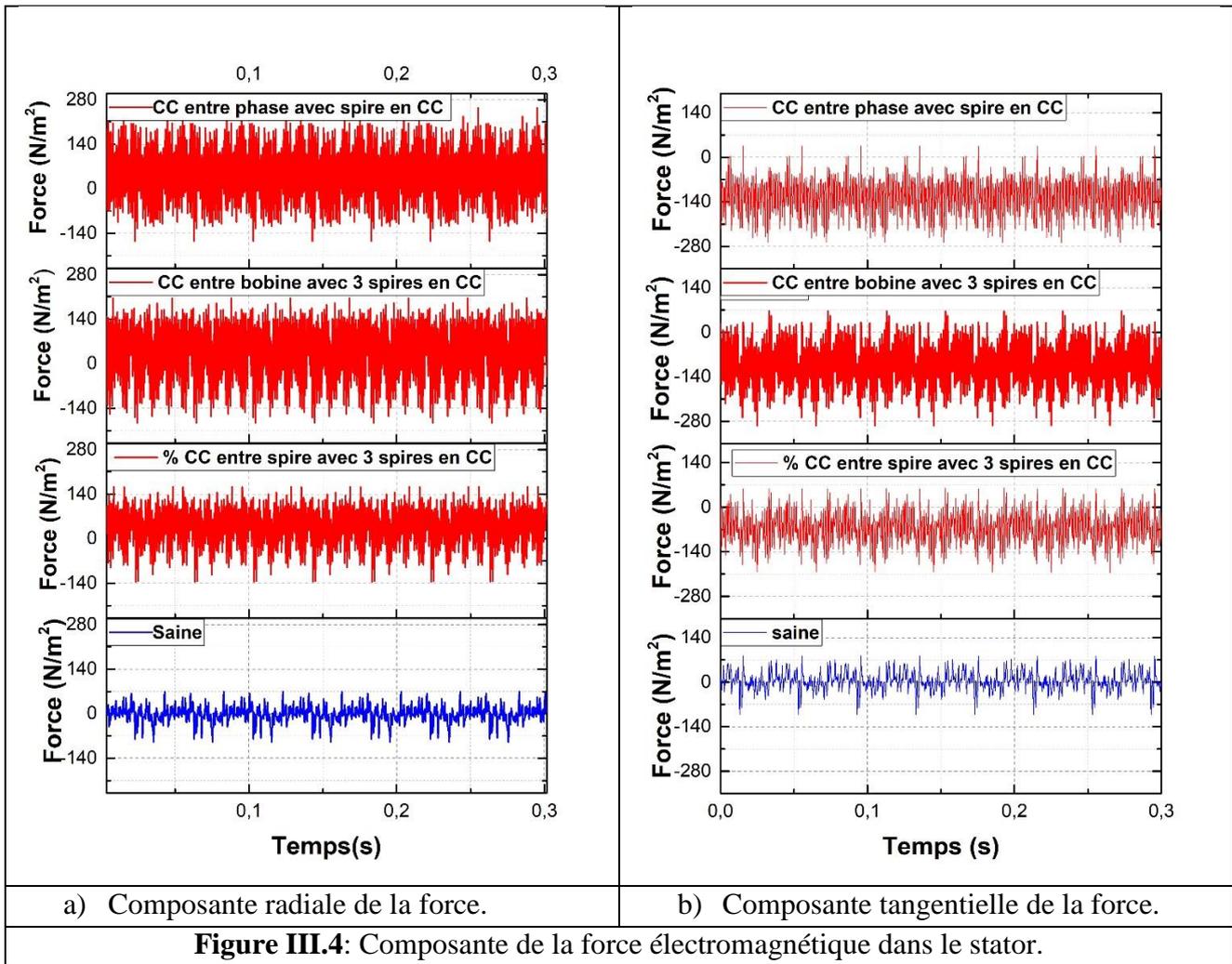


Figure (III.3) : Densité de l'induction induite dans l'entrefer

III.3.3. Force électromagnétique :

On peut voir sur les figures (III.4.a) et (III.4.b) les différentes composantes de la force agissant sur le stator. Il est clair que force radiale change dans le temps et dans l'espace, et que la force électromagnétique radiale change considérablement à différentes fréquences de temps et à différentes positions et l'amplitude augmente également en fonction du défaut. En comparant l'état de charge à l'état sans charge, la fréquence harmonique principale de la force électromagnétique radiale est constante et l'amplitude est variable. Lorsque PMSM est sous charge



La figure (III.3) représente la densité de force électromagnétique radiale et tangentielle en fonction du temps pour une vitesse de rotation de 1500 tr/mn et un courant nominal de 1024A, les valeurs maximales de la force sont respectivement reliées à la nature de défauts. Bien que l'amplitude de l'onde de force électromagnétique tangentielle soit plus petite et n'est pas fortement influencée par le déséquilibre provoqué dans l'enroulement statorique, seulement. Cependant, la force électromagnétique tangentielle du stator va être négliger dans la partie suivante en raison de la plus grande fluctuation des directions positive et négative, par conséquent, la vibration causée par la force électromagnétique tangentielle ne peut pas être ignorée pour une étude plus détaillée sur la machine basée sur l'analyse des défauts de la MSAP par traitement de signal.

III.4 Analyse spectrale :

Plus fréquemment, la détection de défauts dans les machine électriques classiques a été étudiée en analysant les harmoniques du courant statorique au moyen de la transformée de Fourier rapide (FFT) bien connue. Cette analyse a été étendue aux machines PMSM, dont l'analyse fréquentielle d'un signal met en évidence de nombreuses caractéristiques cachées importantes et extrait des informations utiles. À l'aide de la FFT, on peut faire une analyse du comportement de la machine sous différentes conditions dégradées de fonctionnement et l'amplitude de certaines harmoniques peut donner une idée sur le degré de défaut. Dans cette section, la force électromagnétique radiale (image des vibrations radiale) sera analyser par la transformée FFT.

Nous représentons ans la suite les résultats de l’analyse spectrale de la force radiale pour les cas A, B et C pour deux degrés de défauts. Le pas de simulation et temps total de simulation joue un rôle important dans la plage de fréquence allouée pour l’analyse de la force. Pour cela nous avons choisi un pas de 0,0005s pour une durée totale de 4s. Cette configuration nous permet d’avoir une résolution en fréquence égale à :

$$R_f = \frac{F_e}{N_e} = \frac{2000}{8000} = 0,25$$

III.1

Tel que : F_e est la fréquence d’échantillonnage et N_e est le nombre total des points enregistrés.

Selon le théorème de Shannon la fréquence maximale qui peut être affiché sur le spectre est directement liée à la fréquence d’échantillonnage et ne pas dépasser la valeur :

$$F_{max} \leq \frac{F_e}{2} = \frac{2000}{2} = 1000 Hz \tag{III.2}$$

Les figures (III.5) à (III.8) représentent les spectres correspondants à l’analyses spectrales de la composante radiale pour les cas traités dans ce travail. L’amplitude maximale a été limité à $200N/m^2$ pour pouvoir comparer les harmoniques induits induisent par le défaut.

III.4.1. Spectre de la composante radiale de la force pour la machine saine :

Le spectre de la force obtenue pour la machine saine sera considéré comme référence pour comparer les autres spectres obtenus pour les machines défectueuses.

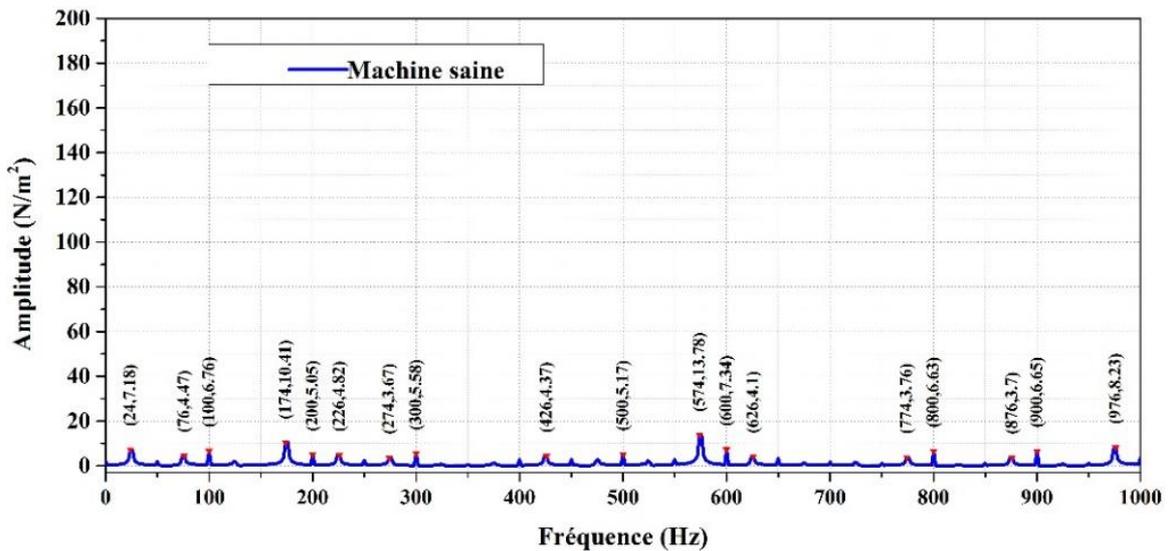


Figure III.5 : Spectre de la composante radiale de la force pour la machine saine.

III.4.2. Spectre de la composante radiale de la force pour la machine avec CC entre spires de la même bobine de la première phase :

Une comparaison de la composante radiale de la force électromagnétique par FFT avec la machine saine dans le cas de court-circuit est présentée dans le figure suivante (III.6) .

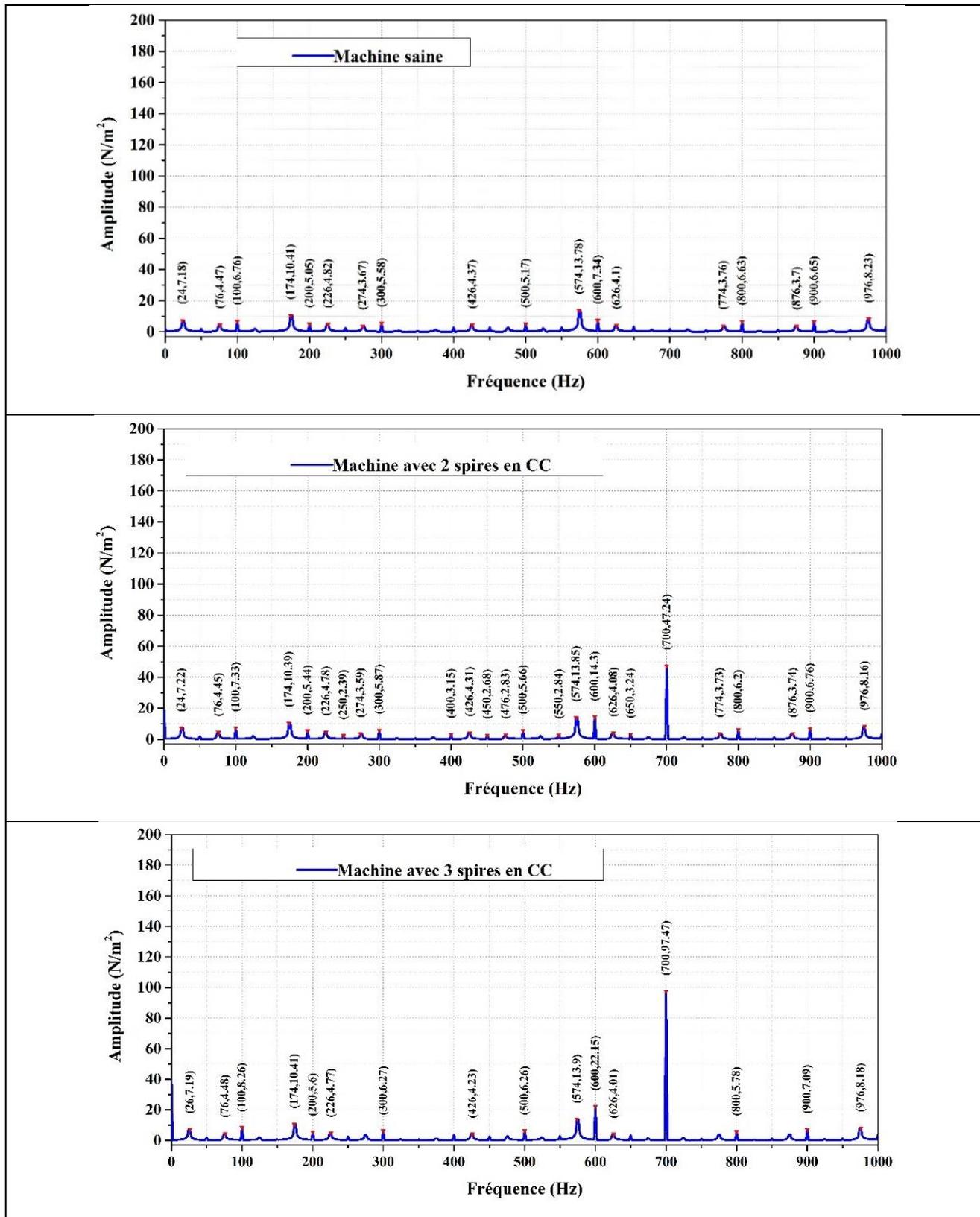


Figure III.6 : Comparaison spectre de la composante radiale avec 2 spires en CC (b) : spectre de la composante radiale avec 3 spires en CC avec de la machine saine.

III.4.3. Spectre de la composante radiale de la force pour la machine avec CC entre deux spires des deux bobines différentes :

Une comparaison de la composante radiale de la force électromagnétique par FFT avec la machine saine dans le cas de court-circuit entre de spires de deux bobines différentes est présentée dans le figure suivante (III.7).

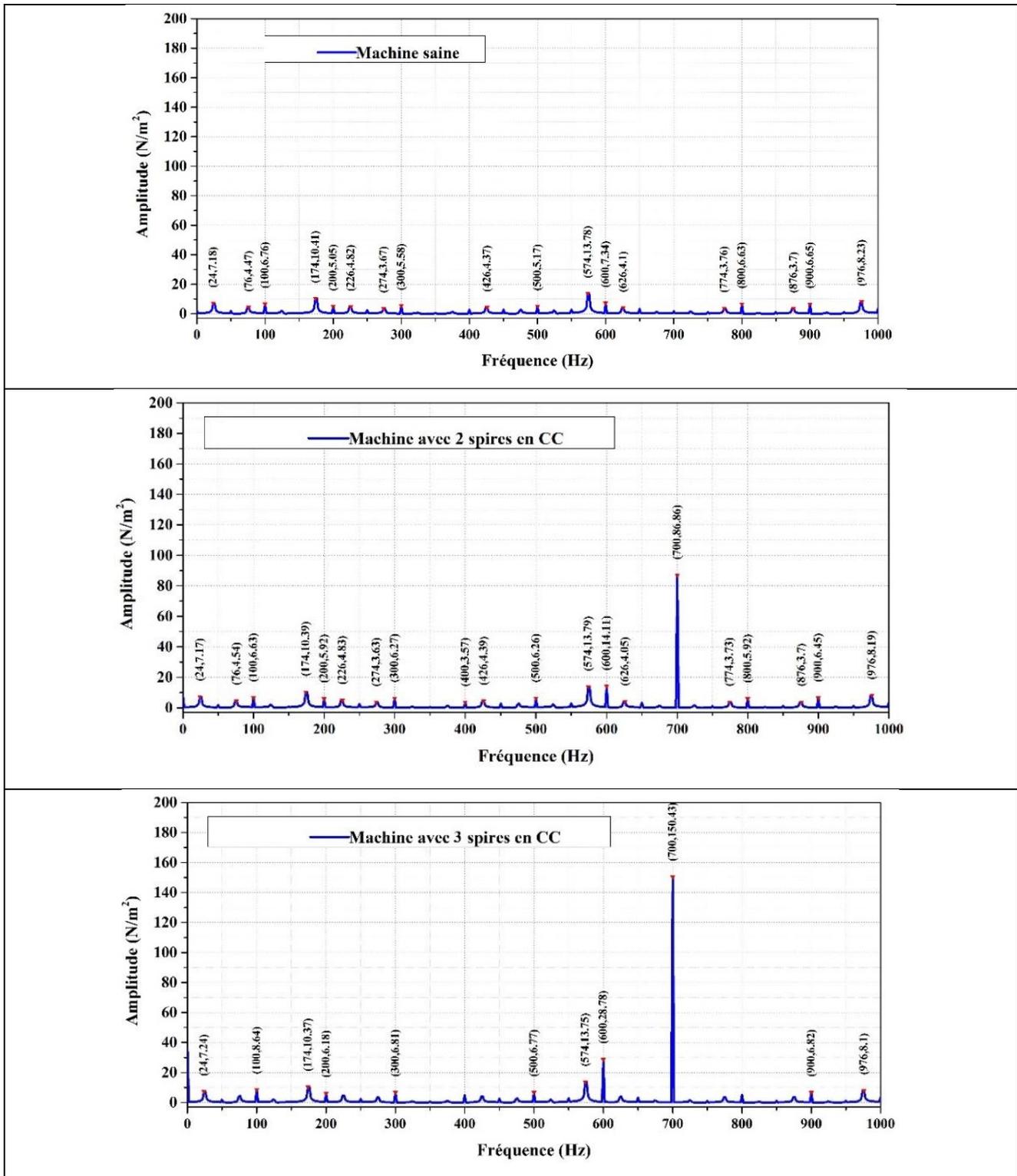


Figure III.7 : Comparaison de spectre de composante radiale avec 2 spires de deux bobines différentes en CC et spectre de la composante radiale avec 3 spires en CC avec la machine saine.

III.4.4. Spectre de la composante radiale de la force pour la machine avec CC entre des spires de deux phases différentes :

Une comparaison de la composante radiale de la force électromagnétique par FFT avec la machine saine dans le cas de court-circuit dans des spires de deux phases différentes est présentée dans le figure suivante (III.8).

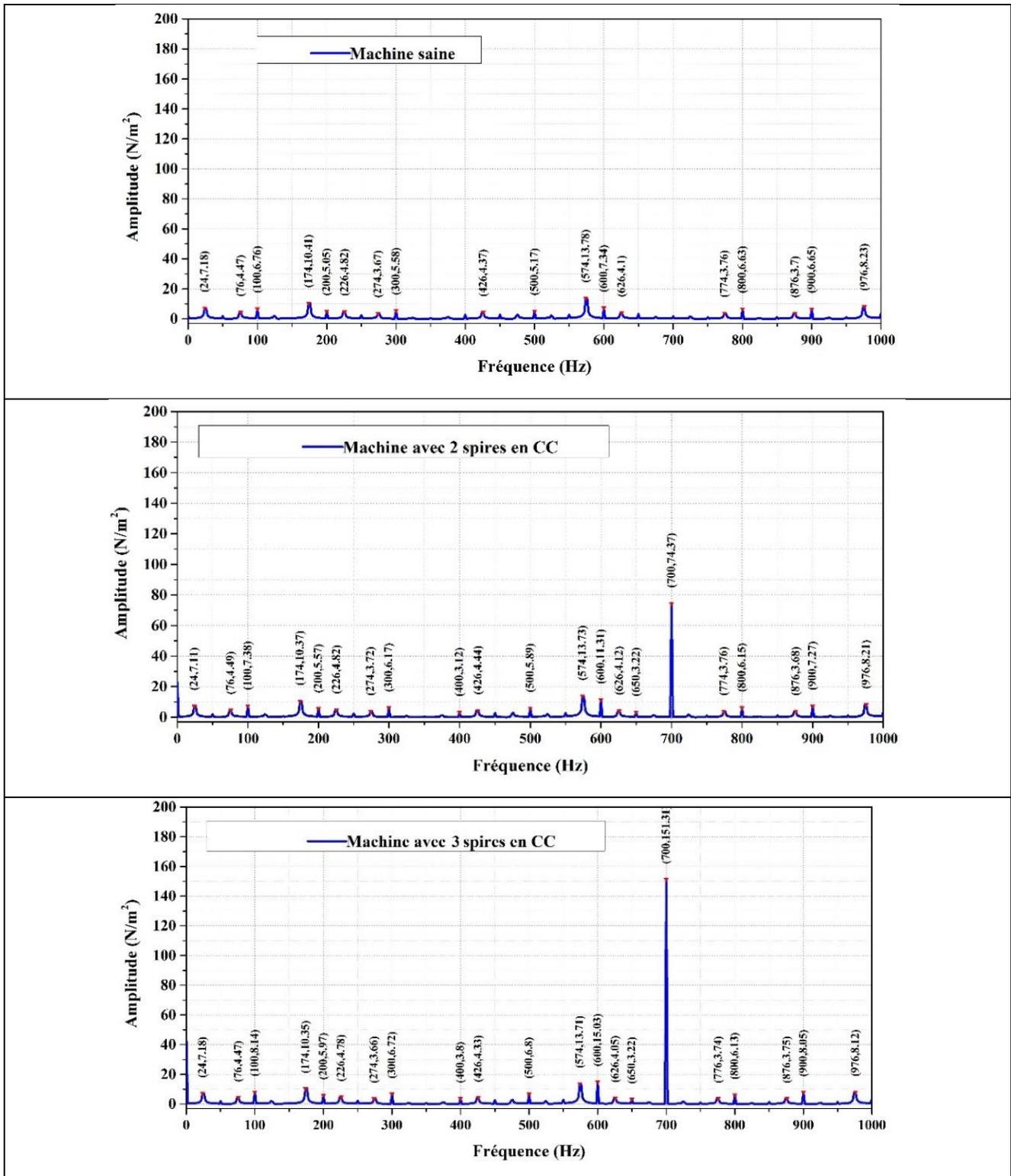


Figure.III.8 : Comparaison de spectre de la composante radiale avec 2 spires dans deux phases différentes en CC et spectre de la composante radiale avec 3 spires en CC avec la machine saine.

III.5. Interprétation des résultats :

L'analyse fréquentielle de la composante radiale de la force électromagnétique par FFT présentée dans les figures (III.4) à (III.8) permet d'afficher le contenu spectrales contenu dans les ondes de force électromagnétique radiale sous formes des harmoniques aux amplitudes différentes. Les amplitudes des pics dus aux défauts lorsque la fréquence d'alimentation est $f_0=350Hz$ sont en générales multiples de cette fréquence. Par conséquent, les composantes harmoniques telles que : $2f_0$, $4f_0$ et $6f_0$ sont induites lorsqu'un déséquilibre prend place au niveau des enroulements statoriques. On peut également illustrer que les harmoniques de force à faible ordre qu'a un effet significatif sur la vibration du stator.

La surveillance de l'harmonique $2f_0=700Hz$ peut nous renseigner sur le comportement de la machine et le degré du défaut dans la machine. Pour ce faire nous avons mesuré l'amplitude de cet harmonique dans le Tableau III.1.

Etat	Etat sain	CC entre spires		CC entre bobines		CC entre phases	
		A		B		C	
		2 spires	3 spires	2 spires	3 spires	2 spires	3 spires
Amplitude (N/m ²)	~0	47.2	97.47	86.86	150.43	74.37	151.31

Tableau III.1 : Amplitude de l'harmonique $2f_0=700Hz$

La figure (III.9) montre la représentation graphique des amplitudes $2f_0=700Hz$ obtenues.

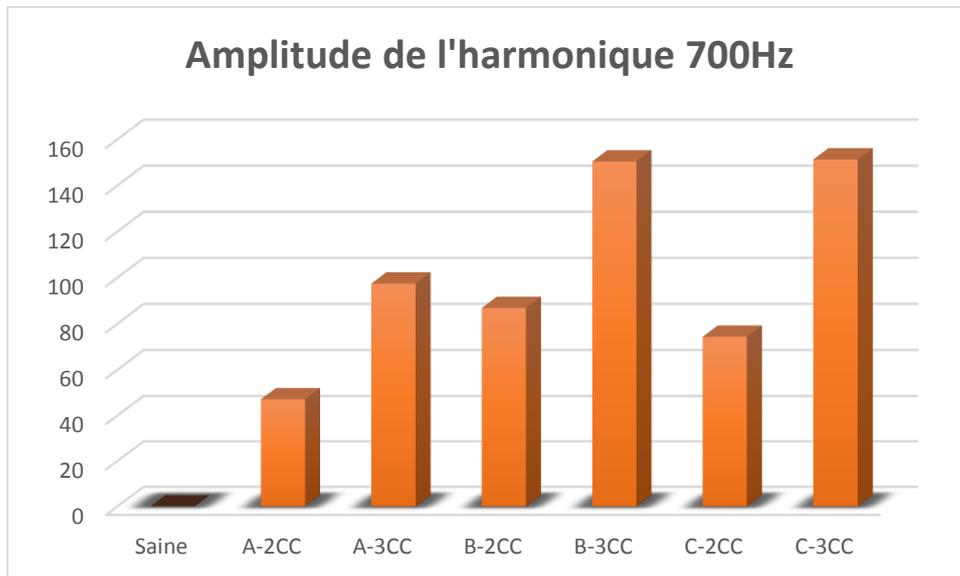


Figure III.9 : Amplitudes de l'harmonique $2f_0=700Hz$

III.6. Conclusion :

Ce chapitre présente une méthode de calcul de la force électromagnétique de machine synchrone à aimants permanents en utilisant un logiciel de basé sur les éléments finis sous certains régimes de fonctionnement dégradés. Le modèle de simulation réalisé en combinant le prototype en éléments finis avec un circuit externe de bobinage nous a permet d'introduire les différents défauts de court-

circuit au niveau de l'enroulement statorique. La force électromagnétique est calculée par la méthode de l'estimation de la densité de l'induction magnétique dans l'entrefer, les forces électromagnétiques radiales et tangentielles sont obtenues respectivement à partir des composantes polaires de l'induction magnétique. Ensuite, la signature de la force électromagnétique radiale de chaque machine simulée est analysée par la transformée de Fourier Rapide FFT. Après avoir comparé les différents spectres obtenus, nous avons constaté l'influence de la distribution non uniforme des enroulements statoriques sur la force électromagnétique tangentielle et radiale qui seront la source des vibrations de la machine.

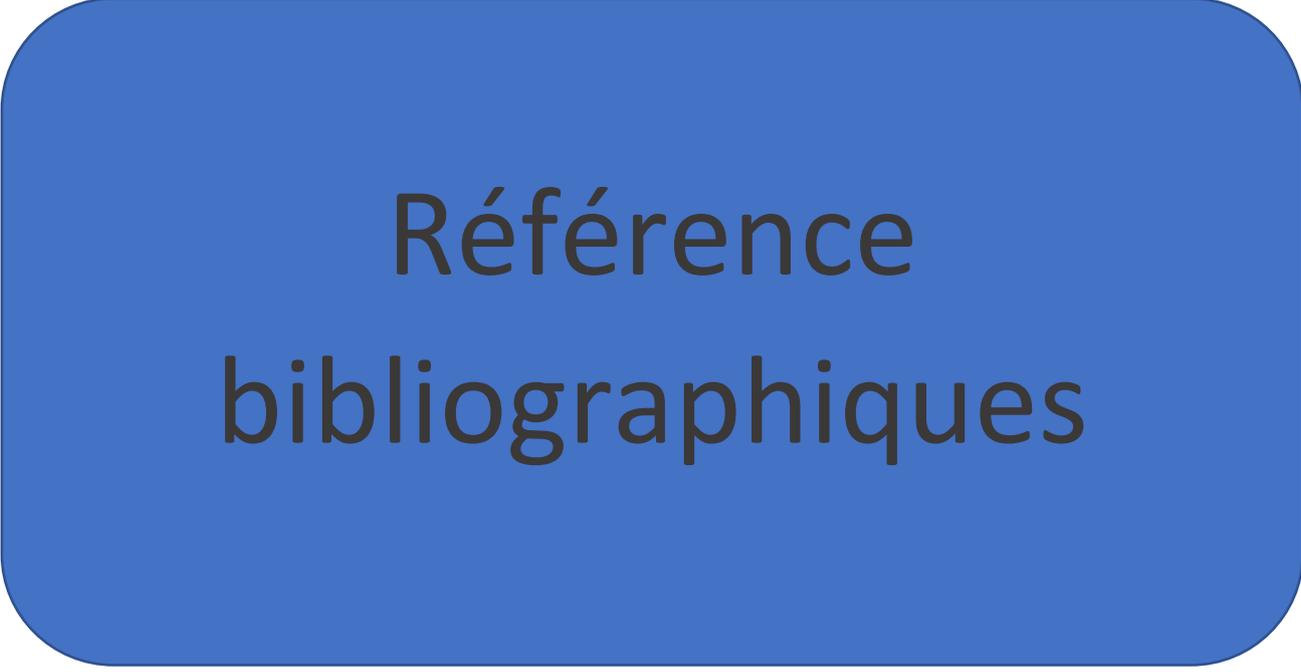
Conclusion générale

Conclusion générale :

Dans ce travail, le modèle numérique de simulation basé sur le calcul du champ magnétique pour les défauts de court-circuit dans les enroulements statoriques a été utilisé pour la machine MSAP triphasée fonctionnant en moteur. L'analyse spectrale de la signature de la force électromagnétique dans différentes conditions de fonctionnement sont analysés. Les résultats sont comparés avec le spectre obtenu pour la machine symétrique pour identifier les harmoniques indicateurs de défauts et mesurer leurs amplitudes. En analysant les harmoniques du moteur dans la plage allouée et la distribution des forces électromagnétiques, les conclusions suivantes peuvent être tirées :

- Lorsqu'il y a un défaut de court-circuit dans l'enroulement triphasé du moteur et en absence d'un système de compensation tolérant au défaut, le courant consommé devient asymétrique et entraînera l'asymétrie du champ magnétique dans l'entrefer du moteur. Un champ magnétique de séquence négative sera généré, ce qui produira une grande ondulation de couple et des forces électromagnétiques et par conséquent des vibrations.
- La force électromagnétique maximale produite par la machine est toujours celle due à l'induction de l'entrefer qui contient beaucoup de composants harmoniques basse fréquence dépend principalement par le nombre de paires de pôles et nombre d'encoches.
- La simulation des machines électriques par les logiciels basés sur les modèles numériques est un bon alternatif pour la prédiction des fonctionnements dégradées.

Finalement, la modélisation de la machine synchrone à aimants permanents nécessite une connaissance approfondie de la géométrie et les paramètres de la machine et un bon choix des paramètres des simulation en vue d'analyser les différentes signatures par FFT et obtenir une bonne résolution en fréquence et large plage de fréquence permettant de suivre les harmoniques d'ordre supérieurs.



Référence
bibliographiques

Référence bibliographique :

- [1] B. BOUKAIS. Contribution A La Modélisation Des Systèmes Couples Machines Convertisseurs : Application Aux Machines A Aimants Permanents (BDCM-PMSM), Thèse de Doctorat, Université mouloud mammeri, Tizi-Ouzou, 2012.
- [2] B.Multon :<>notes de cours : Ecole normal supérieur de cochan, auteonne de bretagne, 2004.
- [3] C. Bouchareb, COMANDE DIRECTE DU COUPLE DES MACHINES SYNCHRONES A AIMANTS PERMANENT, Thèse de magister, Université de Batna, 2005.
- [4] J. F. Gieras, C. Wang, and J. C. Lai, *Noise of polyphase electric motors*. 2006.
- [5] J. Saint-Michel, “Bobinage des machines tournantes à courant alternatif,” *Tech. l’Ingénieur*, vol. 33, no. 0, pp. 0–24, 2001.
- [6] D. Fodorean and M. Abdellatif, “Dimensionnement rapide des machines synchrones à aimants permanents (MSAP),” *Tech. l’ingénieur*, vol. 33, no. d3554, pp. 1–27, 2009.
- [7] A. M. EL-Refaie, “Fractional-slot concentrated-windings synchronous permanent magnet machines: Opportunities and challenges,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 57, no. 1, pp. 107–121, 2010.
- [8] Cédric Bourrasset, Théorie des machines synchrones, projet : Gestion intelligente des transferts d’énergie d’un pylône d’éclairage public autonome, Poly Tech Clermont-Ferrand, France, 2010.
- [9] P. P. Acarnley and J. F. Watson, “Review of position-sensorless operation of brushless permanent-magnet machines,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 53, no. 2, pp. 352–362,
- [10] J.A. Farooq “Etude du Problème Inverse en Electromagnétisme en Vue de la Localisation des Défauts de désaimantation dans les actionneurs à aimants permanents”, Thèse de Doctorat, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, 2008.
- [11] S.Nawel , C.Ammaria, Commande du moteur synchrone a aimants permanents par backstepping, Mémoire de Master, Université Abou Bekr Belkaid de Tlemcen, 2015.
- [12] B.Mansour, Identification des paramètres d’une machine synchrone à aimant permanent envue d’une intégration dans des simulateurs en temps réel, mémoire de magister, Université des Sciences et de la Technologie d’Oran, 2015.
- [13] O. Ondel”Diagnostic par reconnaissance des formes : application a un ensemble convertisseur -machine asynchrone”, Thèse de doctorat, Ecole central de LyonFrance, 2006.
- [14] G. M. Joksimovic, J. Penman “The detection of inter-turn short circuits in the stator windings of operating motors”, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol.47, no.5, pp. 1078-1084, Oct. 2000.
- [15] A. Ceban, “Méthode Globale De Diagnostic Des Machines Electriques,” Université Lille de Nord de France, 2012.
- [16] A. Ibrahim, “Contribution au diagnostic de machines électromécaniques : Exploitation des signaux électriques et de la vitesse instantanée,” Université Jean Monnet - Saint-Etienne, 2009.

- [17] B. Vaseghi, "Contribution à l'étude des machines électriques en présence de défaut entre-spines : modélisation - Réduction du courant de défaut," Institut National Polytechnique de Lorraine, 2010.
- [18] L. Liu, "Robust Fault Detection and Diagnosis for Permanent Magnet Synchronous Motors," Florida State University, 2006.
- [19] F. Babaa "Modélisation et diagnostic des machines asynchrones : Application à la détection de défaut", Université Mentourie Constantine.
- [20] R. Casimir "Diagnostic des défauts des machines asynchrones par reconnaissance des formes", Thèse de Doctorat, Ecole central de Lyon, 2003.
- [21] A. CEBAN, Méthode globale de diagnostic des machines électriques, thèse de doctorat, Université d'Artois, 2012.
- [22] Frédéric Truchetet « Ondelettes pour le signal numérique » Editions Hermes, Paris, 1998.
- [23] A. Tarek, « Analyse du signal ECG par les ondelette », Mémoire de Magister, Université Badji Mokhtar, Annaba, 2008.
- [24] A. Adel, Analyse du comportement du moteur synchrone dans les entraînements électriques à vitesse variable, mémoire de magister, Université BADJI MOKHTAR- ANNABA, 2010.
- [25] Ko H-S, Kim K-J (2004) Characterization of noise and vibration sources in interior permanent-magnet brushless DC motors. IEEE Trans Magn 40(6):3482–3489 18.
- [26] Hussein Dogan, Méthodologie de Conception des Machines Synchrones à Aimants Permanents - Application au Véhicule Electrique avec Chargeur Rapide Embarqué, thèse de doctorat, Université de Grenoble, 2013.
- [27] A. CEBAN, Méthode globale de diagnostic des machines électriques, thèse de doctorat, Université d'Artois, 2012.
- [28] .Ansoft Links, Maxwell, RMxpert and Simplorer are trademarks of ANSYS, Inc. All other trademarks are property of their respective owners. © 2010 ANSYS, Inc.
- [29] mk:@msitstore:c:\ansys_motor-cad\15_1_2\motor-cad.chm::/force_calculati... - [Rechercher \(bing.com\)](#).
- [30] Ichikawa S, Tomita M, Doki S et al (2006) Sensorless control of permanent-magnet synchronous motors using online parameter identification based on system identification theory. Electr Eng 53(2):363–372 Pu

Résumé :

Le moteur synchrone à aimants permanents (MSAP) est de plus en plus utilisé dans le domaine industriel grâce à ses performances supérieures aux autres types de moteurs.

L'un des défauts les plus fréquents dans la PMSM est le défaut de court-circuit ou se soit entre spire ou entre bobine ou bien entre phase et l'étude de ces défauts est basé sur deux modèle, modèle en état sain et modèle avec défauts.

Et ce travail traite La thématique du diagnostic de défaut se base sur l'application de la technique de traitement de signal qui est une solution efficace pour le problème de diagnostic des défauts qui se base sur l'analyse spectrale du courant statorique (FFT). Pour étudier les effets des défauts de court-circuit entre spire et bobine et phase sur les performances et les caractéristiques de fonctionnement de moteur synchrone à aimant, l'étude est faite avec logiciel de simulation de champ électromagnétique leader de l'industrie. Les résultats sont exploités et présentés sous forme de courbe de chaque paramètre de la machine avec et sans défauts.

ملخص:

يستخدم المحرك كالمتر امنللمغناطيسالداائمبشكالمتر ايدفيالمجالالصناعييفضلأدائهاالمتفوقمقارنتبالأنواع

الأخرىبالمحركات

منأكثرالعيوبيشيو عاهو عيبالدارةالقصيرةأوإمابيناللفائفأوبينالمراحلوتعتمددراسةهذهالعيوبعلينموذجيننموذجفيحالةعاديةونموذج مععيوب

،نموذجفيحالةعاديةونموذجمععيوبويتناولهذاالعملموضوعتشخيصالعيوبويستندإلىالتطبيقتقنيتمعالجةالإشارات.التيتمعدحلالالمشكلةتشخيص صالعيوبوالتيتمومعلناالتحليلالطيفيللتيارالثابت

لدراسةأثارعيوبالدائرةالقصيرةبينالويرةالملفوالطورعلناالأداءوخصائصالتشغيلللمحرككالمتر امنللمغناطيسي،تتم

الدراسةبأستخدامميرنامجمحاكاةالمجالالكهر ومغناطيسالرائدفيالصناعة

تتمالدراسةبأستخدامميرنامجمحاكاةالمجالالكهر ومغناطيسالرائدفيالصناعة يتماستغلالالنتائجوتقديمهاكمحننالكخاصية.منخصائصالجهازمعوبدونعيوب

Abstract :

The permanent magnet synchronous motor (MSAP) is increasingly used in the industrial field thanks to its superior performance compared to other types of motors.

One of the most frequent faults in pmsm is the fault of short circuit or either between turns or between coil or between phase and the study of these faults is based on two models, model in healthy state and model with defects.

And this work deals with the theme of defect diagnosis is based on the application of the signal processing technique which is an effective solution for the problem of defect diagnosis which is based on the spectral analysis of the statoric current (FFT). For study the effects of short circuit defects between whorl and coil and phase on the performance and operating characteristics of magnet synchronous motor, the study is done with industry-leading electromagnetic field simulation software. The results are exploited and presented as a curve of each parameter of the machine with and without defects.