



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la
Recherche Scientifique

Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued

Faculté de Sciences et de La Technologies Filière :Génie Électrique

Mémoire de fin d'étude

Présenté pour l'obtention du diplôme de

MASTERACADEMIQUE

Spécialité :Machine électrique

**Par :Khaled bahri- A . mawla moussoui - Hanafi nouh -
Madani tarek**

Thème

**Etude et simulation de la machine synchrone à
aimants permanents**

Devant le jury composé de :

2021-2022

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

1420



Remerciements

En préambule à ce mémoire

Nous remerciant ALLAH qui nous aide et nous donne

la patience et le courage durant ces longues années d'étude

Nous souhaitons adresser nos remerciements les

plus sincères aux

personne qui nous ont apporté leur aide et qui ont contribué

à l'élaboration de ce mémoire

ainsi qu'à la réussite de cette formidable année universitaire.

*Nous tenant à remercier sincèrement Dr. HALEM
NOURA, en tant que Encadrante*

, qui à toujours montré à l'écoute et

très disponible tout au

long de la réalisation de ce mémoire,

*Enfin, nous adressons nos plus sincères remerciements à
tous nos proches*

*et amis, qui nous ont toujours soutenue et
encouragée au cours de la réalisation de ce mémoire.*

Merci à tous



- Dédicace
- Sommaire
- liste de figure
- Liste de Tableau

Résumé :

Le présent travail présente un modèle analytique développé pour la détection des défauts et le diagnostic de la machine asynchrone. Une machine asynchrone est bien considérée par ses qualités et sa robustesse. Cependant, il nécessite très peu d'entretien pour éviter les dysfonctionnements, les maintenances lourdes et coûteuses. Le modèle proposé repose sur la détection instantanée en utilisant une méthode analytique appelée la technique de « l'analyse spectrale en assurant la prévention des maintenances coûteuses et lourdes, y compris la capacité à détecter et surveiller les problèmes mécaniques et électriques en machine asynchrone, détection de défaut à niveau du rotor, comme la rupture de la barre ou la fissure du segment d'anneau de la cage d'écuréuil.

Mots clés : - Machine asynchrone. - Diagnostic. - Fonction d'enroulement modifiée (MWF). - Excentricité statique. - Harmoniques d'espaces. - Analyse spectrale.

المخلص :

يقدم العمل الحالي نموذجًا تحليليًا تم تطويره للكشف عن الأعطال وتشخيص الجهاز غير المتزامن. تعتبر الآلة غير المتزامنة جيدة لصفاتها وقوتها. ومع ذلك ، فهي تتطلب القليل من الصيانة لتجنب الأعطال والصيانة الثقيلة والمكلفة. ويعتمد النموذج المقترح على الكشف الفوري باستخدام طريقة تحليلية التي تسمى تقنية "التحليل الطيفي" لضمان منع الصيانة المكلفة والمرهقة ، بما في ذلك القدرة على اكتشاف الأعطال على مستوى الدوار ، مثل كسر القضيب أو تكسير قطعة حلقة قفص السنجاب .

الكلمات المفتاحية : - آلة غير متزامنة. التشخيص. - وظيفة اللف المعدلة. - (MWF) غرابة ثابتة. - التوافقيات الفضائية. - التحليل الطيفي.

Sommaire

Chapitre I: état de l'art

I.1 Introduction.....	2
I.2 Présentation de la machine synchrone a aiment permanent.....	2
I.3 Constitution de la machine synchrone à aimants permanents.....	3
I.3.1 Structure de stator.....	3
I.3.2 Structure du rotor.....	4
I.3.3 Les aimants permanents.....	4
I.4 Caractéristiques générales des aimants permanents	5
I.5 Les différents types d'aimants permanents.....	5
I.5.1 Les Alnico.....	6
I.5.2 Les Ferrites.....	6
I.5.3 Les Néodyme-Fer-Bore (Nd-Fe-B).....	7
I.5.4 Les alliages métaux – terres rares.....	7
I.6 Principe de fonctionnement de la MSAP.....	8
I.7 Catégories de la MSAP.....	9
I.8 Différentes structures de machines synchrones à aimants permanents.....	11
I.8.1 Structures à flux axial (AFPM).....	12
I.8.2 Structures à flux radial (RFPM).....	13
I.8.3 Les différents types de rotor de machines à flux radial.....	13
I.9 Les enroulements des machines.....	15
I.10 Commande vectorielle de la MSAP alimentée en tension.....	19

I.11 Avantages et inconvénients de la MSAP.....	20
I.11.1 Les avantages [11] [12].....	20
I.11.2 Les inconvénients [13].....	20
I.12 Conclusion.....	21

Chapitre II : modélisation et simulation de la machine synchrone à aimant permanent

II.1. Introduction.....	22
II.2. La méthode des éléments finis.....	22
II.1.2. Formulations.....	22
II.2.2. Le modèle utilisé.....	24
II.2.2.1. Le modèle magnétostatique.....	24
II.2.2.2. Le modèle magnétodynamique.....	25
II.3.1. Méthode des différences finis (MDF).....	25
II.3.2. Méthode des éléments finis (MEF).....	26
II.4. Présentation du logiciel de calcul par éléments finis.....	28
II.4.1. Préprocesseur.....	28
II.4.2. Processeur de calcul.....	28
II.4.3. Postprocesseur.....	29
II.5. Conclusion.....	30

Chapitre III : Simulation et résultats

III.1 Introduction.....	31
III.2 Définition du logiciel FEMM.....	31
III.3 Construction du modèle élément finis de la machine synchrone à aimant permanent	32
III.3.1 Définition du type de problème traité.....	32

III.3.2 Entrée de la géométrie et affectation des propriétés physiques...	32
III.4 Résultats de simulation.....	35
III.5 Conclusion.....	37

liste de figure

Chapitre I: état de l'art

Figure (I.1) :Structure de moteur synchrone à aimants permanents [3]...	2
Figure (I. 2) :Schéma de bobinages statoriques.....	3
Figure (I. 3) : Cycle d'hystérésis.....	4
Figure (I. 4) : Courbe de désaimantation.....	5
Figure (I. 5) : les Alnico.....	6
Figure (I. 6) : les ferrites.....	7
Figure (I. 7) : les Néodyme-Fer-Bore.....	7
Figure (I. 8) : Principe de fonctionnement du moteur à aimants permanents	9
Figure (I. 9) : Machine synchrone à aimants permanents montés en surface.....	10
Figure (I.10) : Machine synchrone à aimants permanents insérés.....	10
Figure (1.11) : Machine synchrone à aimants permanents chapeautés..	11
Figure (I.12) : Machines synchrones à aimants permanents enterrés....	11
Figure (I.13) : Machine à flux radial.....	12
Figure (I.14) : Machine à flux axial.....	12
Figure (I.15) : Machine à flux axial.....	13
Figure (I.16) : Les différents types de rotor de machines à flux radial..	14
Figure (I.17) : Groupes de bobines imbriqués ($q = 2$ et $q = 3$).....	15
Figure (I.18) : Connexion série $a = 1$	16
Figure (I.19) : Connexion série-parallèle $a = 2$	16
Figure (I.20) : Connexion parallèle $a = 4$	17
Figure (I.21) : Bobines concentriques reliées en série.....	18

Figure (I.21) :Système de tensions triphasées.....	18
Figure (I.22) :Encoche à un faisceau.....	18
Figure (I.23) : Schéma bloc d'une régulation de vitesse de la MSAP alimentée en tension et commandée par orientation du flux.....	19
Chapitre II : modélisation et simulation de la machine synchrone à aimant permanent	
Figure (III.1) : Fonction d'interpolation d'un élément [5].....	27
Figure (II.2) : Figure II.2 Organisation du logiciel de calcul par éléments finis [16].....	29
Chapitre III : Simulation et résultats	
Figure (III. 1) : Géométrie de la machine étudiée	32
Figure (III. 2) : Zoom de la géométrie de la machine étudiée.....	33
Figure (III. 3) : Caractéristiques d'aimant permanent utilisé.....	33
Figure (III. 4) : a Maillage du circuit magnétique.....	34
Figure (III.4) : b Maillage du circuit magnétique (Zoom).....	34
Figure (III. 5) : Répartition des lignes de flux magnétique.....	35
Figure (III. 6) : Répartition de l'induction magnétique.....	35
Figure (III. 7) : a Distribution du champ de la densité du flux magnétique.....	36
Figure (III. 7) : b Distribution du champ de la densité du flux magnétique.....	36
Figure (III. 8) : Module de l'induction magnétique dans l'entrefer de la machine.....	37
Figure (III. 9) : Induction radiale dans l'entrefer de la machine.....	37

liste de tableau

Chapitre I: état de l'art

Tableau I.1 Exemples de propriétés magnétiques des aimants [2,4]..... 8

Introduction générale

Avec l'apparition et l'évolution des matériaux à aimants permanents de haute énergie et les progrès réalisés dans le domaine de l'électronique de puissance, les machines synchrones à aimants permanents (MSAP) ont connue ces dernières années un grand envol. Elles ont été adoptées dans de nombreux domaines de hautes performances telles que la robotique, l'aérospatiale, les outils électriques, la production des sources d'énergie renouvelables, les divers équipements médicaux, les véhicules électriques, etc. Pour toutes ces applications, les MSAP sont parfois préférables aux autres machines classiques.

Notre travail a été divisé en trois chapitres :

Le premier chapitre a traité les généralités sur la machine synchrone à aimant permanent et on s'est focalisé plus précisément sur la structure de ces machines qui apparaît comme une solution technologique pertinente.

Comme on va modéliser la machine synchrone par les éléments finis, le deuxième chapitre est consacré à la présentation de la méthode des éléments finis, leurs formulations en passant par les équations de Maxwell. Le modèle magnétostatique vectoriel a été retenu. Ensuite le logiciel de calcul par éléments finis a été présenté en insistant sur les étapes à suivre jusqu'à la collecte des résultats.

Le chapitre trois a été consacré à la modélisation magnétostatique de la machine à aimant permanent par la méthode des éléments finis en utilisant le logiciel FEMM.

Enfin le mémoire est clôturé par une conclusion.

Chapitre I : état de l'art

I.1 Introduction

Pendant les années récentes, le moteur à courant continu 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. Le moteur à aimants permanents reste le bon choix dû à leurs excellentes caractéristiques dynamiques, à ses faibles pertes ainsi qu'à son important couple massique, qui le rend mieux adapté aux applications industrielles et donc faciliter les commandes en position ou en vitesse [2] [1].

Dans ce chapitre, nous présentons l'état de l'art de la machine synchrone à aimants permanents.

I.2 Présentation de la machine synchrone a aiment permanent

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

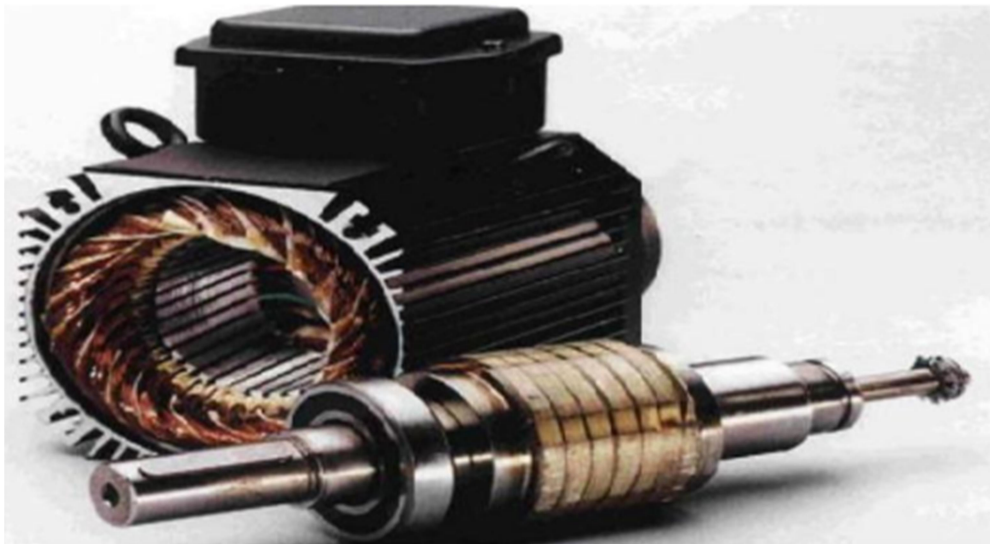


Figure I.1 Structure de moteur synchrone à aimants permanents [3]

I.3 Constitution de la machine synchrone à aimants permanents

I.3.1 Structure de stator

Le stator est constitué d'un certain nombre de bobines réparties dans des encoches qui constituent trois bobinages indépendants. Elles sont destinées à créer un champ magnétique tournant lorsqu'on les alimente par un système de tensions ou de courants triphasés. Les topologies rencontrées dans les bobinages des machines tournantes à courants alternatifs sont nombreuses. On distingue deux grandes catégories de bobinage. Les bobinages dits réguliers ou les bobinages à pas diamétral, les bobinages à pas raccourcis, les bobinages répartis et les bobinages non réguliers, comme les bobinages à trous ou à nombre fractionnaire d'encoches par pôle et par phase. La figure I.2 présente un exemple de bobinage statorique régulier à une seule voie par phase et deux paires de pôles. Les machines à basse tension sont habituellement bobinées en utilisant du fil cylindrique émaillé non rangé. Chaque conducteur, servant à constituer les spires, est le plus souvent formé de plusieurs fils, ou brins, en parallèle. Les conducteurs ainsi réalisés ne sont pas isolés entre eux. Comme on ne peut pas se fier suffisamment à l'isolation apportée par l'émail, qui peut avoir été altérée par les opérations d'enroulement des spires et d'insertion des bobines dans les encoches, ou présenter intrinsèquement des faiblesses localisées, on doit isoler les bobines par rapport à la masse, c'est-à-dire l'empilage de tôles magnétiques, de même que l'on doit isoler entre elles les bobines appartenant à des phases différentes. L'isolation des bobines par rapport à la masse est réalisée en plaçant dans les encoches, avant toute opération d'insertion du bobinage, une feuille de matériau isolant en forme de U qui épouse tout le périmètre utile de l'encoche. De plus amples détails sur les topologies et les technologies de bobinages sont largement développées dans [4].

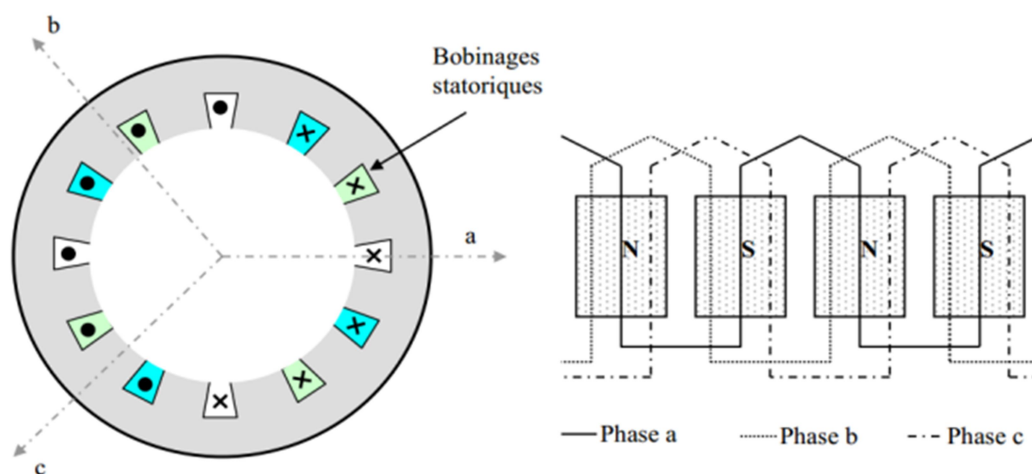


Figure I.2 Schéma de bobinages statoriques

I.3.2 Structure du rotor

Représente la partie mobile de la MSAP, formée d'un assemblage de tôles et d'aimants créant le flux d'inducteur, il est généralement de deux types :

- Rotor possédant des pièces polaires servant à la concentration du flux d'induction dans lequel les aimants sont orientés soit parallèlement, soit perpendiculairement à l'entrefer ou de manière plus complexe. Dans ce type de machine, l'inducteur est à pôles saillants.
- Rotor sans pièces polaires donc à entrefer constant, dans lequel l'aimantation des aimants est généralement perpendiculaire à l'entrefer.

I.3.3 Les aimants permanents

Les matériaux utilisés pour leurs propriétés magnétiques se classent en fonction de la largeur de leur cycle d'hystérésis (figure I.3) et forment deux grandes familles. La première est celle des matériaux magnétiques durs (à large cycle), appelés communément « aimants permanents » car leur aimantation ne varie pas sous l'effet d'un champ magnétique extérieur [2,3]. La seconde est celle des matériaux magnétiques dits « doux » qui ne manifestent de propriétés magnétiques qu'en présence d'une excitation externe.

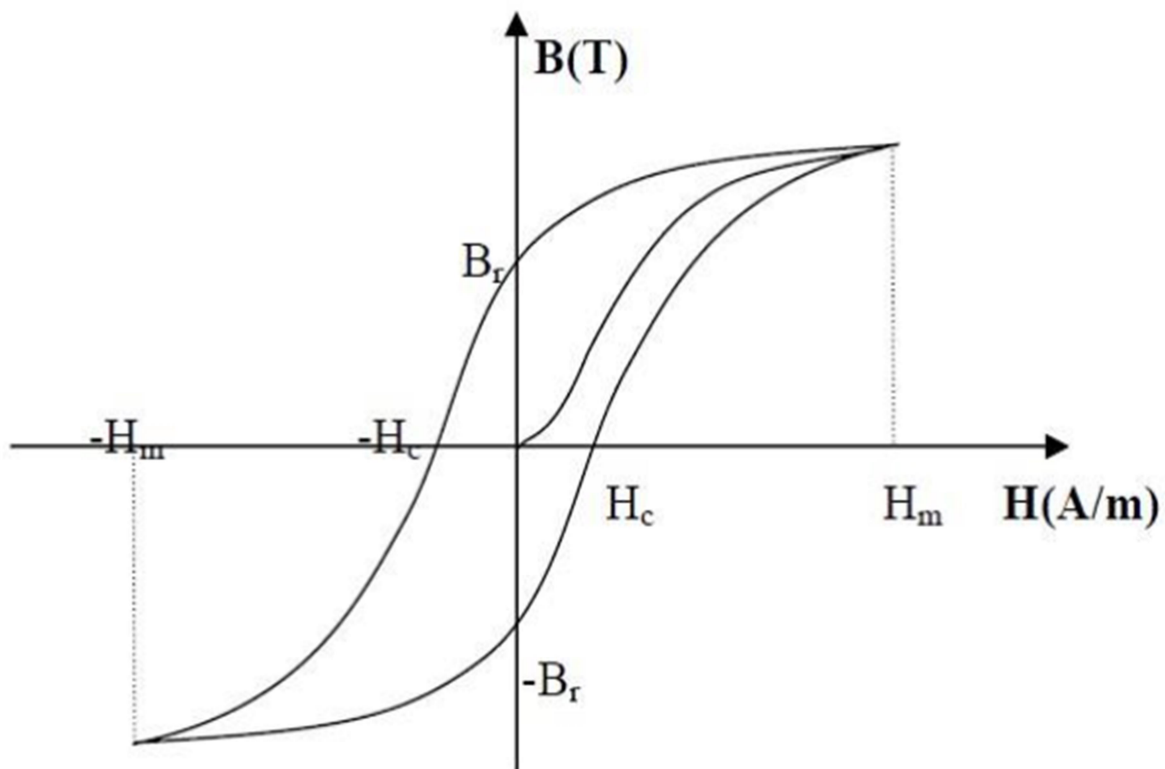


Figure I.3 Cycle d'hystérésis

I.4 Caractéristiques générales des aimants permanents :

L'état de fonctionnement d'un aimant se situe dans le deuxième quadrant de son cycle d'hystérésis (voir figure I.4)

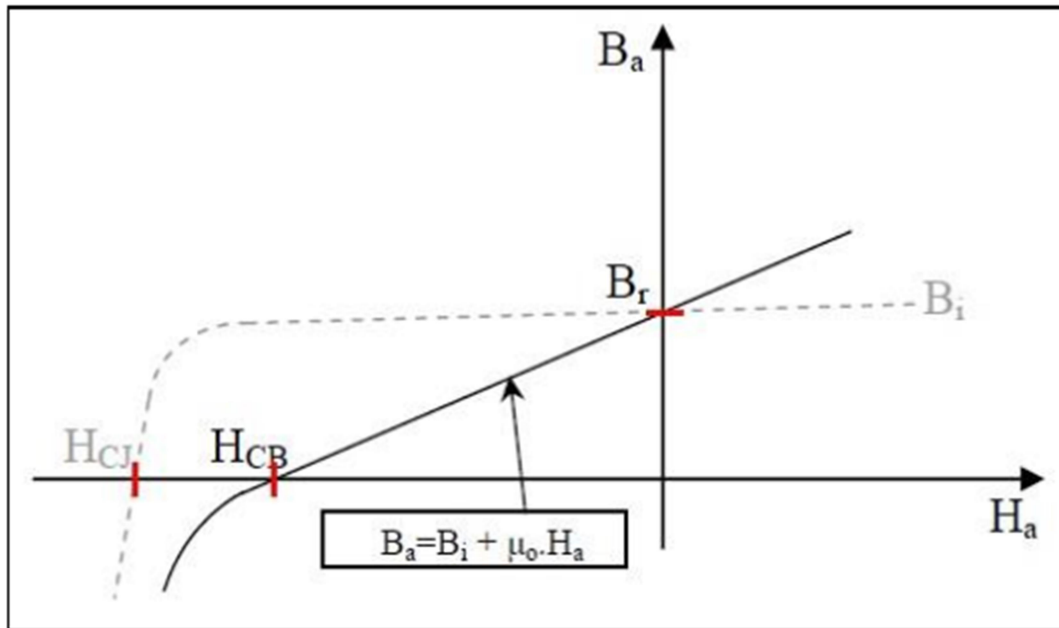


Figure I.4 Courbe de désaimantation

Les aimants permanents sont caractérisés par plusieurs paramètres qui sont déterminants pour les applications industrielles. Ces paramètres sont:

- L'induction résiduelle (ou rémanente) : qui indique la puissance potentielle de l'aimant et détermine la section normale nécessaire au passage de flux utile pour le maintien du flux d'entrefer.
- Le champ coercitif : représentant le champ magnétisant capable d'annuler l'induction résiduelle et, dont la valeur est d'autant plus élevée que l'aimant est plus stable.
- Le champ coercitif de polarisation : qui annule l'aimantation intrinsèque du matériau, la démagnétisation est totale et irréversible.
- Le produit d'énergie (b. H) : valeur énergétique de l'aimant par unité de volume. En plus des propriétés magnétiques, il est indispensable de connaître les propriétés mécaniques et physico-chimiques, le prix ainsi que le point de curie (température au-delà de laquelle l'aimant perd ses propriétés magnétiques).

I.5 Les différents types d'aimants permanents

Il existe une grande variété de matériaux, pour aimants permanents, dont les propriétés et les applications sont diverses. Dans le cas des machines tournantes, on distingue trois types [2,4]:

I.5.1 Les Alnico

Sont des aimants permanents réalisés à partir d'un alliage Aluminium-Nickel-Cobalt. Caractérisés par une induction rémanente élevée et un champ coercitif faible ils sont donc de caractéristiques énergétiques médiocres. En effet, de par leur composition métallique ils sont le siège de pertes fer, et le procédé de fabrication induit une direction privilégiée de l'aimantation, qui est celle de la plus grande longueur. Actuellement, en raison de leur basse qualité, ils ne sont presque plus utilisés.



Figure I.5 les Alnico

I.5.2 Les Ferrites

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

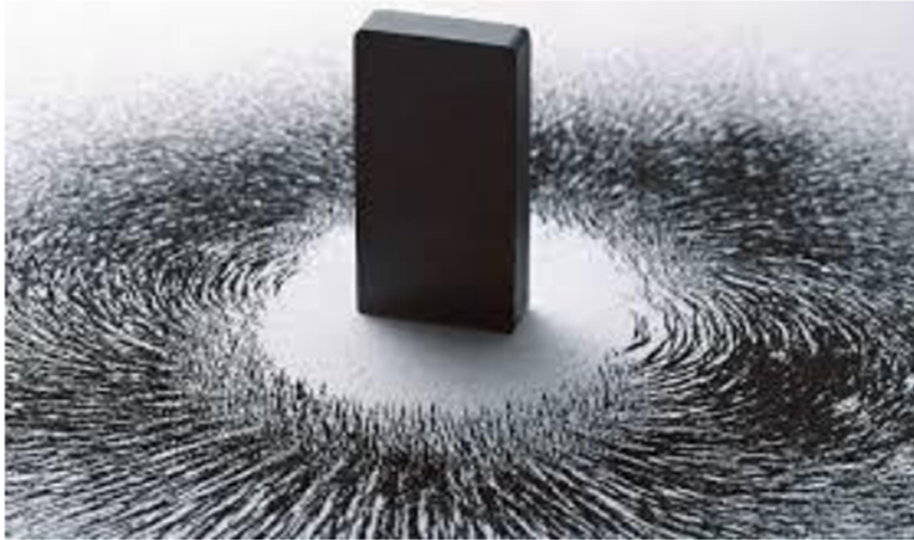


Figure I.6 les ferrites

I.5.3 Les Néodyme-Fer-Bore (Nd-Fe-B)

Ces aimants ont des performances supérieures aux Samarium Cobalt et sont beaucoup moins coûteux mais leur tenue à la température est moins bonne (jusqu'à 160 °C).

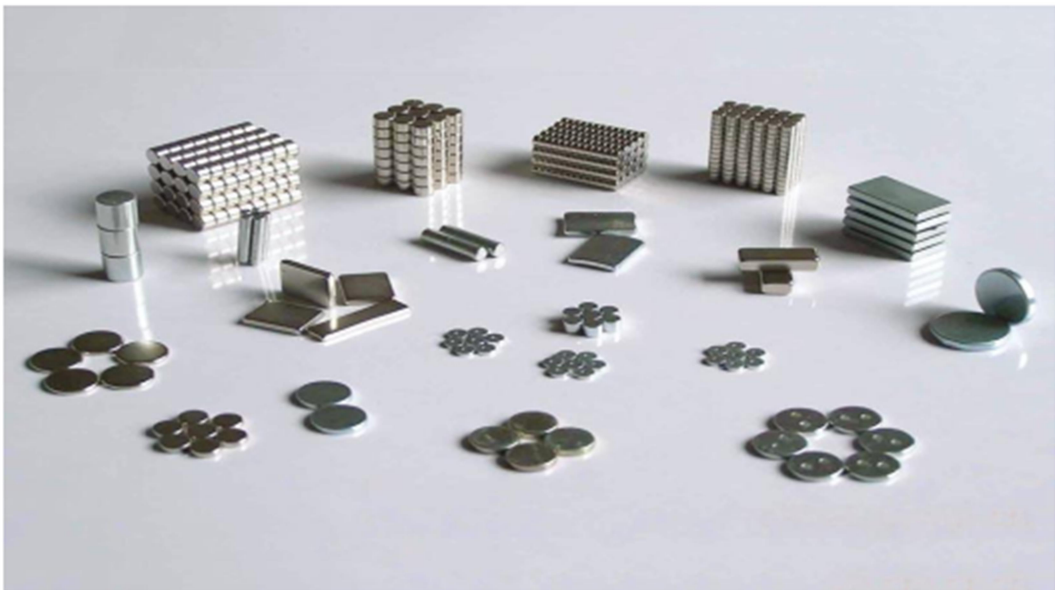


Figure I.7 les Néodyme-Fer-Bore

I.5.4 Les alliages métaux – terres rares

Ils sont, actuellement, les plus performants des aimants permanents utilisés dans la construction des machines synchrones. La version la plus courante est l'alliage samarium-cobalt, caractérisé par une induction rémanente et un champ coercitif élevés. A taille égale, la densité d'énergie emmagasinée dans l'aimant est trois fois plus grande que celle des Alnico et six fois plus que celle des ferrites, réduisant ainsi de façon considérable le volume du rotor, ce qui

permet donc d'augmenter le couple massique de la machine et de réduire son inertie. Leur prix est cependant élevé. Le choix de l'aimant est effectué en fonction de caractéristiques recherchées et du prix de l'aimant qui est très variable. Quelques propriétés magnétiques des différents types d'aimants sont données dans le tableau I.1 ci-dessous.

cType D'aimants	Densité d'énergie (BH) _{max} (kJ/ m ³)	Induction rémanente Br (T) à 25°C	Champ coercitif -H _c (kA/m)	Température T _{max} (°C)	Prix (€/kg)
NdFeB	200-380	1.2-1.5	900-2000	140-220	80-150
Sm Co ₅	140-200	1	2000	280	220
Sm ₂ Co ₁₇	180-240	1.05	2000	350-550	300
Alnico	50-85	1.1-1.3	130	550	45
Ferrites strontium	27-35	0.3-04	250	250	6
Ferrites baryum	8-30	0.2-04	170	100-240	4.5

Tableau I.1 Exemples de propriétés magnétiques des aimants [2,4]

I.6 Principe de fonctionnement de la MSAP

Toute machine électrique dans laquelle la vitesse de rotation du rotor est égale à la vitesse de rotation du champ tournant est appelé machine synchrone. Pour l'obtention d'un tel fonctionnement, le champ magnétique rotorique doit être généré soit par des aimants, soit par un circuit d'excitation. Cela dit, qu'en mode permanent la position du champ magnétique rotorique est alors fixe par rapport au rotor, ceci impose une vitesse de rotation identique entre le rotor et le champ tournant statorique [5].

- Le stator : ou l'induit est la partie fixe de la machine, il se compose de trois enroulements parcourus par des courants alternatifs décalés de 120° dans l'espace et dans le temps, logés dans les encoches du circuit magnétique fixe [6].
- 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 [1]. 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. Le principe des moteurs à aimants permanents est assez simple. Seules

les bobines sont alimentées. Le champ créé par les enroulements oriente le rotor qui est constitué par des aimants. La Figure (I.8) représente un moteur ayant un rotor bipolaire et un stator comportant une paire de pôles. Les phases a et b sont portées par des enroulements opposés. La présence de courants dans les phases oriente le rotor. On définit un "pas" élémentaire θ_p comme étant le déplacement angulaire du rotor lorsque l'alimentation est commutée d'une phase à la suivante. Nous obtenons pour cette structure $\theta_p = 90^\circ$. Ceci correspond au passage de la Figure (a) à la Figure (c). Les demi-pas sont obtenus en alimentant deux phases à la fois (Figure (b)). De nombreux moteurs sur le marché utilisent ce genre de structure.

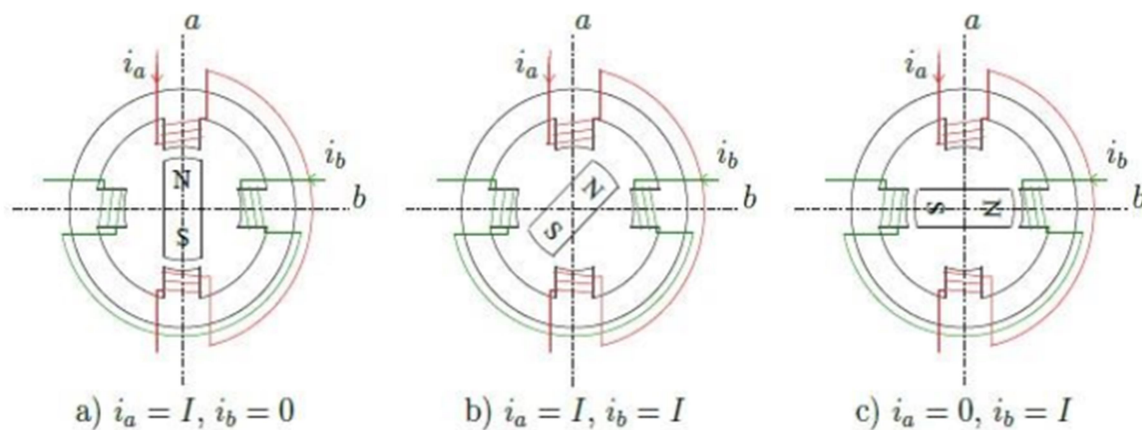


Figure I.8 Principe de fonctionnement du moteur à aimants permanents

I.7 Catégories de la MSAP

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

- 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.

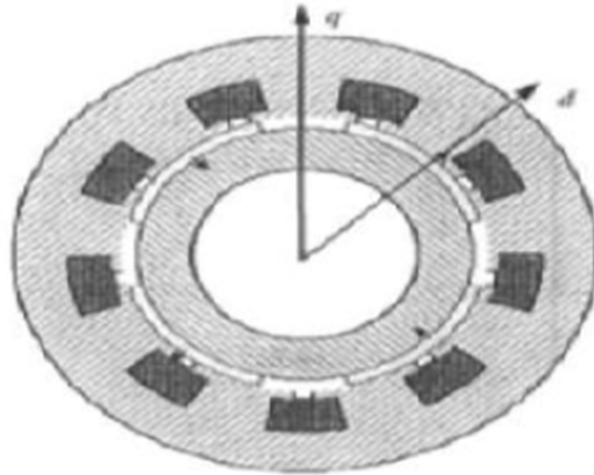


Figure I. 9 Machine synchrone à aimants permanents montés en surface

- Machine synchrones à aimants permanents insérés (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.

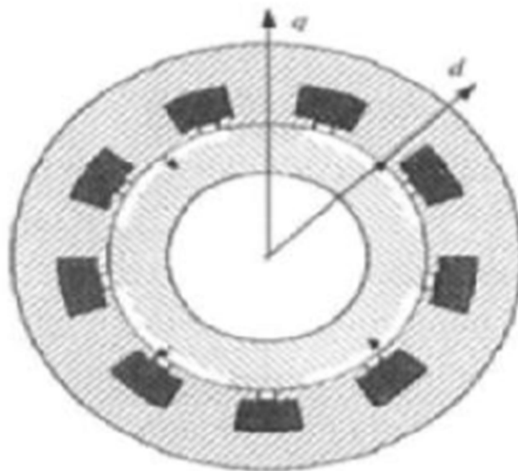


Figure I.10 Machine synchrone à aimants permanents insérés

- 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.e.m au stator en agissant sur le profil de la pièce.

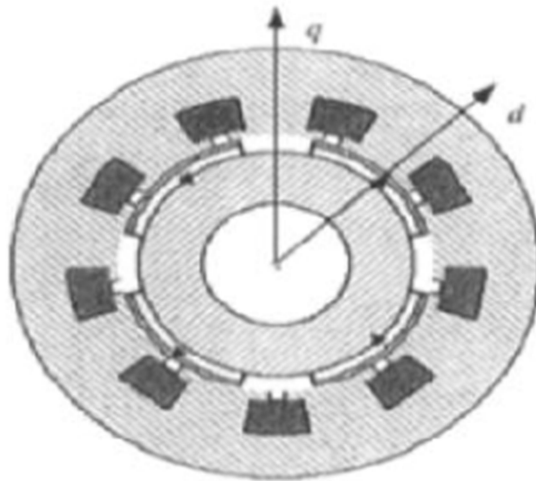


Figure I.11 Machine synchrone à aimants permanents chapeautés

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 [7].

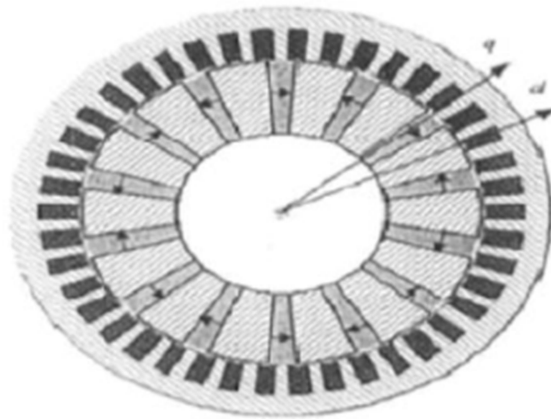


Figure I.12 Machines synchrones à aimants permanents enterrés

I.8 Différentes structures de machines synchrones à aimants permanents

Les structures des machines synchrones à aimants permanents sont classées suivant la disposition des aimants sur le rotor. Leurs différentes configurations incluent les machines à flux radial (RFPM) et à flux axial (AFPM). Celles-ci peuvent être alimentées, soit par des courants sinusoïdaux dans le cas des PMSM ou par des courants en créneaux dans le cas des BDCM.

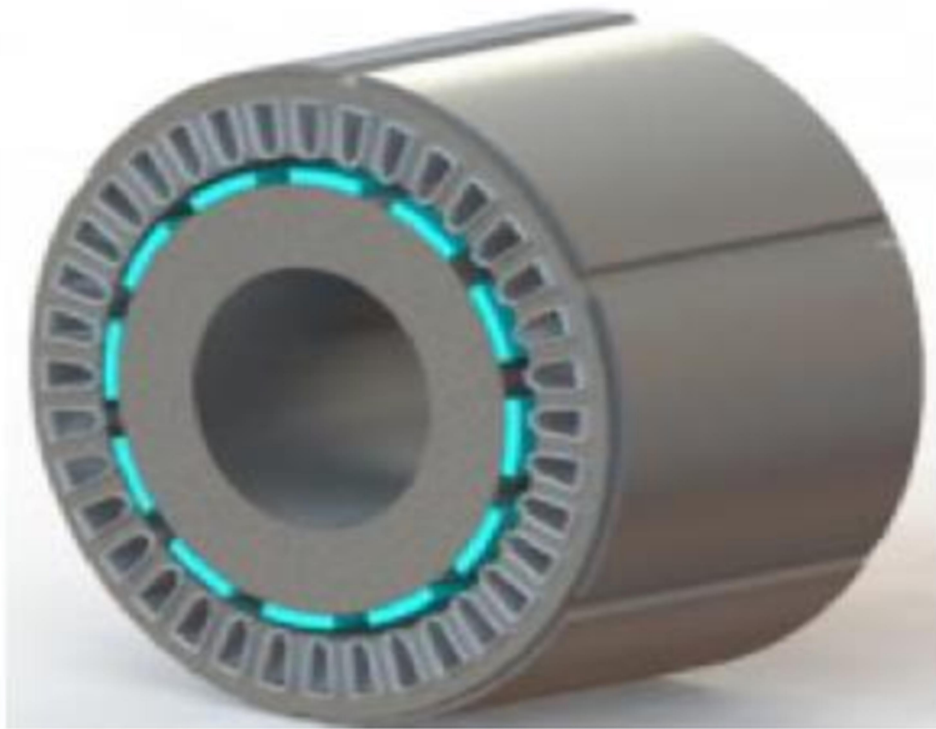


Figure I.13 Machine à flux radial

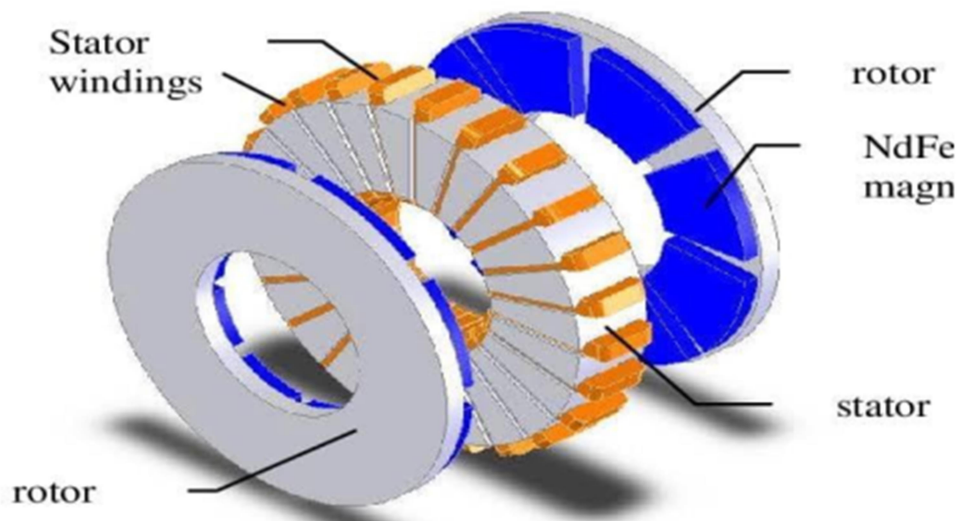


Figure I.14 Machine à flux axial

I.8.1 Structures à flux axial (AFPM)

Ces machines dites « discoïdales » ou AFPM représentent une autre solution possible pour les entraînements directs à basse vitesse. Elles comportent un ou plusieurs disques fixes bobinés et un ou plusieurs disques mobiles supportant les aimants permanents. Leur principal avantage est l'optimisation de la surface utile de génération du couple, qui se traduit par une puissance volumique importante. Cependant, leur assemblage est très compliqué, à cause des contraintes

mécaniques liées aux poussées axiales. Comparées à la structure à flux radial, ces machines se caractérisent par un plus grand diamètre et une longueur axiale relativement plus courte.

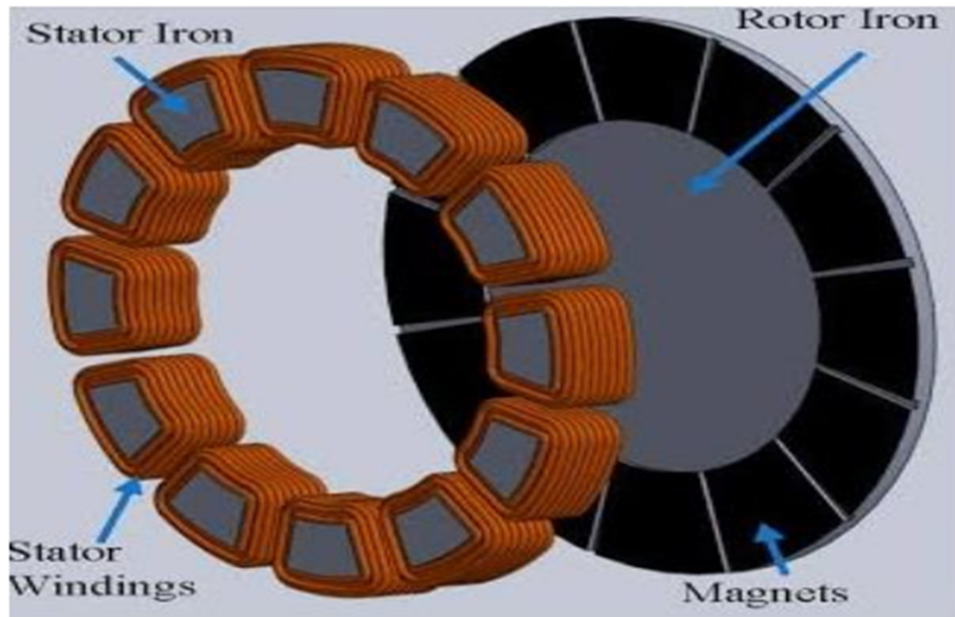


Figure I.15 Machine à flux axial

I.8.2 Structures à flux radial (RFPM)

La machine synchrone à flux radial (RFPM) est la machine à aimant la plus conventionnelle. Elle est employée couramment pour l'entraînement direct. Son stator est identique à celui d'une machine d'induction classique. Ces structures peuvent se présenter, soit avec un rotor placé à l'intérieur ou à l'extérieur.

I.8.3 Les différents types de rotor de machines à flux radial

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

- Aimants en surface
- Aimants insérés
- Aimants enterrés
- Aimants à concentration de flux.

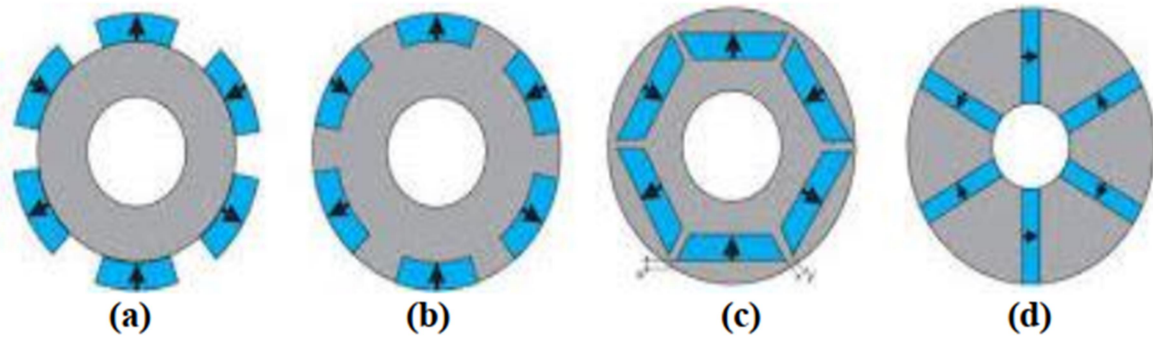


Figure I.16 Les différents types de rotor de machines à flux radial

Aimants en surface (a) :

Pour ces types de machines, les aimants sont placés sur la surface du rotor ; ils sont aimantés radialement, comme montré sur la figure (I-16). Cette configuration du rotor est la plus utilisée. Le principal avantage de ce type est sa simplicité donc faible coût de fabrication par rapport à d'autres machines à aimants. L'inconvénient est l'exposition des aimants permanents aux champs démagnétisant. De plus, les aimants sont soumis à des forces centrifuges qui peuvent causer leur détachement du rotor. Parfois, un cylindre externe non ferromagnétique de haute conductivité est utilisé. Ce cylindre peut en plus fournir un couple de démarrage asynchrone et agir comme un amortisseur. Les réactances synchrones de l'axe $-d$ et l'axe $-q$ sont pratiquement les mêmes

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

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

Aimants à concentration de flux (d) : Une autre façon de placer les aimants permanents dans le rotor et de les enterrer profondément à l'intérieur du rotor. Ici, les aimants sont aimantés dans le sens de la circonférence figure (d). Les pôles magnétiques se forment alors au niveau des parties ferromagnétiques du rotor par concentration de flux provenant des aimants permanents. L'avantage de cette configuration par rapport aux autres est la possibilité de concentrer le flux générés par les aimants permanents dans le rotor et d'obtenir ainsi une induction plus forte dans

l'entrefer. Comme les machines à aimants intérieurs, les aimants permanents de cette dernière sont aussi bien protégés contre la désaimantation et les contraintes mécaniques. La réactance [8].

I.9 Les enroulements des machines

L'enroulement de toute machine électrique est la pièce maîtresse nécessaire pour la création du champ magnétique. Il est constitué de bobines ou de sections, généralement en cuivre, connectées en série ou en série-parallèle. Tout enroulement à courant alternatif est défini par les paramètres suivants :

Z : le nombre d'encoches.

$2p$: le nombre de pôles.

En plus de la vitesse du champ tournant, le nombre $2p$ indique le nombre de groupes de bobines dans une phase à l'exception de l'enroulement à une couche par pôle conséquent où celui-ci est égal à p .

m : le nombre de phases.

q : le nombre d'encoches par pôle et par phase : $q = Z/2Pm$

Il indique le nombre de bobines dans un groupe :

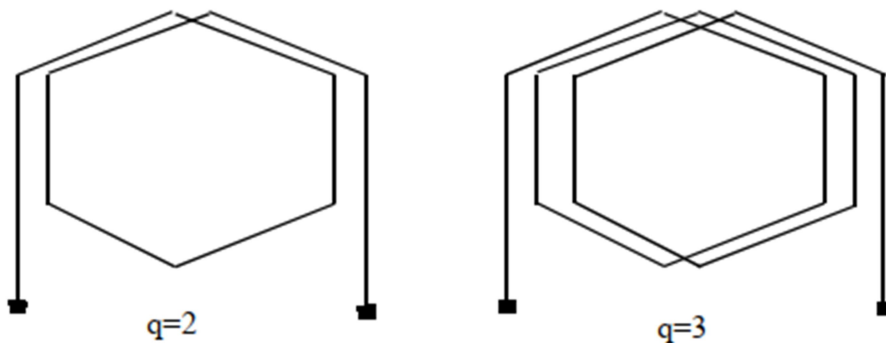


Figure I.17 Groupes de bobines imbriqués ($q=2$ et $q=3$)

Si q est entier l'enroulement est dit régulier ; si q est fractionnaire l'enroulement est dit irrégulier (ou fractionnaire). La caractéristique essentielle de tout enroulement à courant alternatif est le nombre d'encoches qu'occupe une phase sous chaque pôle. Celui-ci détermine le nombre de bobines dans un groupe. Une autre caractéristique de l'enroulement est le pas polaire τ défini comme étant la distance entre deux lignes neutres consécutives ; on l'appelle aussi le pas d'une section : $\tau = Z/2P = qm$: (En unités d'encoches)

Le périmètre de la circonférence statorique peut être déterminé à l'aide des paramètres de l'enroulement : $\pi D = 2P\tau$

Cela signifie que la circonférence statorique est composée de $2p$ pas polaires. L'expression du pas polaire est :

$$\tau = \frac{\pi D}{2P} \text{ (cm)}$$

Le pas de l'enroulement y représente le nombre d'encoches par section. Il peut être :

Raccourci $y < mq = Z/2P$

Diamétral $y = mq = Z/2P$

Allongé $y > mq = Z/2P$

Le pas relatif $\beta : \beta = y/\tau$

En fonction de nombre de pôles $2p$, il est recommandé d'avoir les valeurs suivantes :

Pour $2p = 2$ $0,67 \approx \beta$

Pour $2p \geq 4$ $0,83 \approx \beta$

Dans le but de diminuer les chutes de tension dans les phases, on connecte les groupes de bobines constituant les phases de l'enroulement en parallèle. Le nombre de branches parallèles « a » varie de 1 à $2p$.

Exemple 1. Soit un enroulement ayant $2p=4$ et $q=1$. A l'aide de ces deux paramètres, on peut dire que la phase est constituée de quatre groupes de bobines ($2p=4$) dont chacun est composé d'une seule bobine ($q=1$). Les faisceaux des bobines voisines sont placés côte à côte. Par conséquent, on a la possibilité de les connecter ; Soit en série $a=1$.

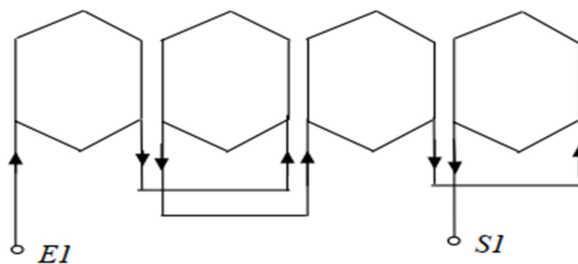


Figure I.18 Connexion série $a = 1$

Ou bien, on les divise en deux parties. Chacune d'elle est formée de deux bobines reliées en série. Les deux parties sont reliées en parallèle. $a=2$.

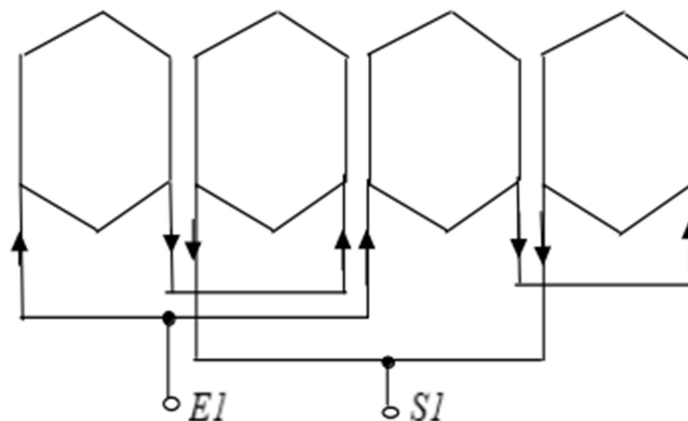


Figure I.19 Connexion série-parallèle $a = 2$

Ou encore, on connecte toutes les bobines en parallèle. $a=2p=4$.

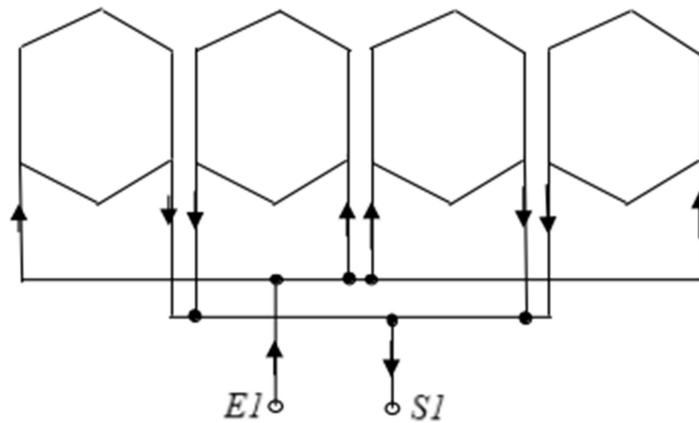


Figure I.20 Connexion parallèle $a = 4$

On remarque à travers les trois exemples, que les sens des courants dans les bobines restent inchangés quel que soit le nombre de branches parallèles. Ils définissent le nombre de pôles fictifs instantanés. La vitesse du champ (vitesse synchrone) est liée directement au nombre de pôles de l'enroulement et à la fréquence du réseau, c'est-à-dire :

$$n = 60 * f / p$$

Où :

n : la vitesse, (tr/mn) ;

f : la fréquence, (Hz), " 50 Hz " ou 60 Hz ;

p : le nombre de paires de pôles.

A partir de l'expression de la vitesse, on distingue la machine ;

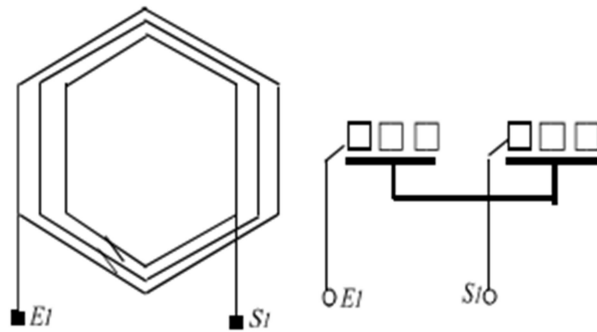
Bipolaire $2p=2$ à $n=3000$ tr/mn.

Tétrapolaire $2p=4$ à $n=1500$ tr/mn.

Héxapolaire $2p=6$ à $n=1000$ tr/mn. Etc...

L'enroulement est exécuté dans des encoches présentées sur la surface intérieure du stator. Tous les enroulements électriques sont constitués de groupes de bobines. Le groupe peut être composé de :

a) bobines concentriques reliées en série :



Représentation classique / Représentation proposée

Figure I.21 Bobines concentriques reliées en série

Les fils de S1 et E1 sont situés tous les deux à l'extérieur. Dans les systèmes triphasés, à tout instant (1, 2 ou 3), on a toujours deux signaux de même signe, et un troisième de signe opposé. C'est pourquoi dans tous les enroulements représentés, l'entrée de la troisième phase a un signal sortant

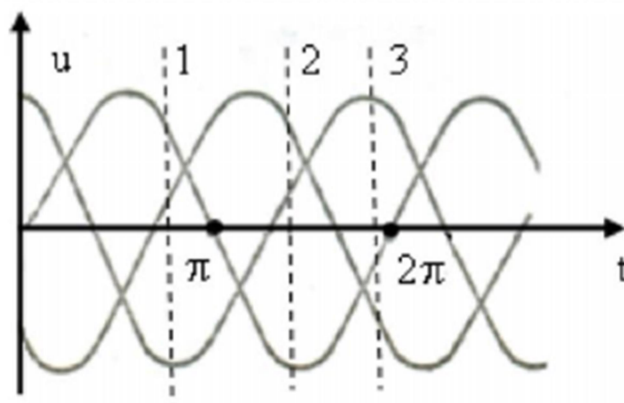
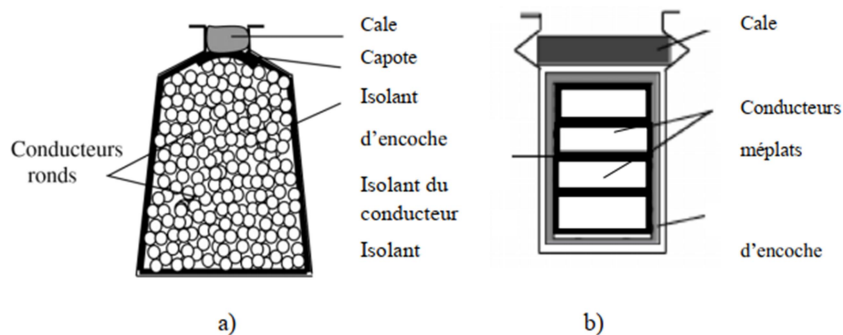


Figure I.21 Système de tensions triphasées

L'enroulement à une couche (à un faisceau par encoche) est un enroulement dont les côtés actifs des bobines occupent toute l'encoche.



- a) encoche trapézoïdale à un faisceau à conducteurs ronds
- b) encoche rectangulaire à un faisceau en méplat.

Figure I.22 Encoche à un faisceau

L'utilisation de ces enroulements est destinée particulièrement aux machines de faibles puissances (à petits diamètres intérieurs statoriques), et aux machines de grandes puissances quand le nombre de pôles est élevé [9].

I.10 Commande vectorielle de la MSAP alimentée en tension

La commande vectorielle porte en général sur des machines alimentées en tension et régulées en courant sur les axes d et q. Cette topologie permet une meilleure dynamique dans la commande du couple tout en évitant les inconvénients d'une alimentation en courant. La figure (I.23) représente le schéma bloc d'une régulation de vitesse de la (MSAP) alimentée en tension et commandée par orientation du flux [10].

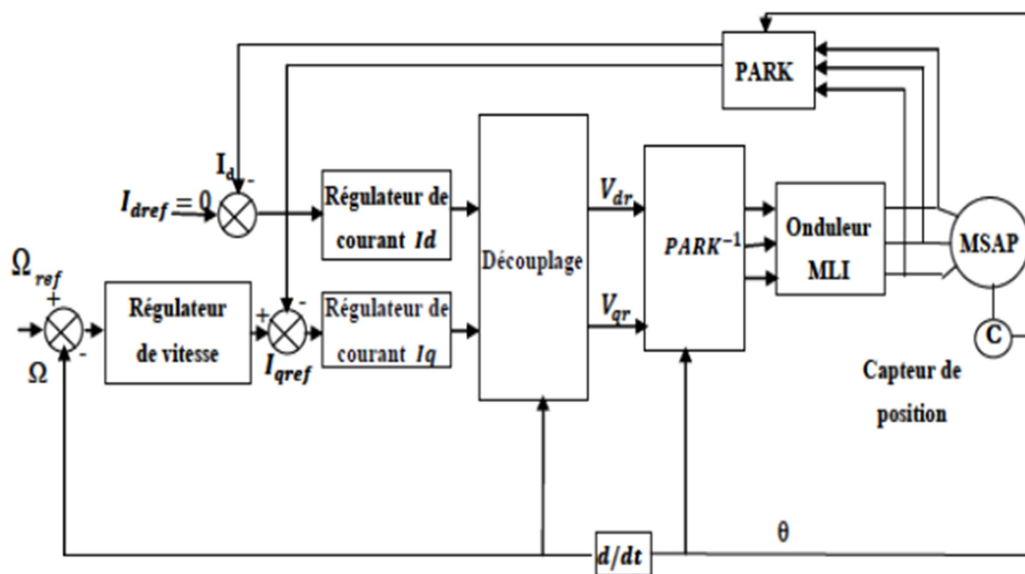


Figure I. 23 Schéma bloc d'une régulation de vitesse de la MSAP alimentée en tension et commandée par orientation du flux

Les principaux constituants dans la commande vectorielle sont la boucle de régulation de vitesse, celle des courants i_{qs} et i_{ds} et la transformation directe et inverse de Park. La vitesse est régulée à travers la boucle externe du bloc, la sortie de son régulateur est le couple électromagnétique de référence C_{em}^* ou le courant de référence i_{qs}^* . Il est limité de manière à tenir compte des caractéristiques de l'onduleur et de la surcharge de la machine. Le courant i_{qs}^* est comparé à la valeur i_{qs} issue de la mesure des courants réels, l'erreur sollicite l'entrée du régulateur de référence v_{qs}^* . En parallèle avec cette boucle interne, on trouve une boucle de régulation de i_{ds} . Le courant i_{ds} de référence est maintenu à zéro. Les sorties des régulateurs de courant i_{ds} et i_{qs} sont appliquées à un bloc de découplage qui donnent les tensions de référence v_{ds}^* et v_{qs}^* et par la transformation de Park inverse, on obtient les tensions v_{as}^* , v_{bs}^* , v_{cs}^* qui sont les tensions de la commande de l'onduleur à commande MLI.

I.11 Avantages et inconvénients de la MSAP

La MSAP a plusieurs avantages mais aussi elle a quelques inconvénients :

I.11.1 Les avantages [11] [12]

Avec l'avènement des matériaux à aimants permanents de grande énergie et les progrès réalisés dans le domaine de l'électronique de puissance, les machines à aimants permanents (MSAP) ont connu ces dernières années un grand essor. Elles ont été adoptées dans de nombreuses applications de hautes performances. Pour toutes ces applications, les machines à aimants permanents sont parfois préférables aux autres machines traditionnelles, telles que les machines à courant continu, les moteurs synchrones classiques et les moteurs asynchrones et en particulier pour les applications spécifiques (servomoteur à vitesse variable). A titre d'illustration, quelques avantages des machines à aimants permanents, sont cités ci-dessous :

- ✓ L'absence d'enroulement rotorique annule les pertes Joules au niveau du rotor.
- ✓ Le couple volumique et la puissance massique importante permettent une meilleure compacité.
- ✓ L'absence des collecteurs et des balais simplifie la construction et l'entretien.
- ✓ La densité du flux, relativement élevée dans l'entrefer, assure une très bonne performance dynamique.
- ✓ Possibilité de supporter des surcharges transitoires importantes et un bon comportement dynamique en accélération et en freinage.
- ✓ Très bon rendement et un facteur de puissance élevé (proche de l'unité).
- ✓ Grande fiabilité.
- ✓ Fonctionnement à très haute vitesses.

I.11.2 Les inconvénients [13]

- Construction plus compliquée du moteur synchrone et par conséquent un prix élevé.
- Problème de tenue en température des aimants.
- Risque de démagnétisation irréversible des aimants par la réaction d'induit.
- Impossibilité de régler l'excitation.
- Pour atteindre des vitesses élevées, il est nécessaire d'augmenter le courant statorique afin de démagnétiser la machine. Ceci entraînera inévitablement une augmentation des pertes statoriques par effet Joule.

- La non-régulation de ce flux ne permet pas une souplesse de contrôle sur une très large plage de vitesse.
- Influence des vibrations et des chocs sur la structure de la machine.
- En contrepartie, lorsque le réseau est exposé à des interruptions de service de très courte durée (de l'ordre d'une seconde), le moteur asynchrone peut continuer à fonctionner alors que le moteur synchrone décroche et s'arrête, ce qui nécessite une surveillance particulière avec l'utilisation des dispositifs de sécurité.

I.12 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté des généralités sur la machine synchrone à aimant permanent, la construction et les caractéristiques et les différents types des aimants permanents, qui constituent un élément fondamental pour ce type de machine, les différentes structures des aimants sur le rotor, le principe de fonctionnement et la commande de MSAP et en fin les avantages et les inconvénients.

Chapitre II : modélisation et simulation de la machine synchrone à aimant permanent

II.1. Introduction

Dans ce chapitre, on va exposer les équations de Maxwell puis un exposé sur les différents modèles issus de ces équations, car la machine à aimant permanent sera modélisée par un modèle magnétique. La méthode des éléments finis sera aussi représentée dans ce chapitre dans le but d'utiliser cette méthode pour simuler la machine.

II.2. 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 les équations de circuit...) et que l'on utilise le mode de résolution adéquate (magnétostatique, magnétodynamique, magnétique évolutif). D'autre part, d'un point de vue pratique, il est très facile de faire varier les conditions de fonctionnement de la machine (fréquence et flux magnétisant), en modifiant, directement, les paramètres dans le programme du calcul (Logiciel) d'où une grande souplesse d'utilisation [14].

II.1.2. Formulations

Considérons un certain domaine (Ω) dans lequel un champ A , scalaire ou vectoriel, est la solution de l'équation aux dérivées partielles suivante [14] :

$$D(A) = F \tag{II.1}$$

Où D est un opérateur différentiel et F est une fonction connue, appelée terme de source. Pour spécifier entièrement le champ A , il faut tenir compte des conditions aux limites Γ du domaine (Ω).

$$L(A) = G \frac{\partial A}{\partial t} + HA \tag{II.2}$$

Dans cette équation G et H sont des fonctions connues sur les frontières Γ . Il en est donc de même de la fonction L . On peut distinguer deux cas particuliers importants :

- Si la fonction G est nulle, on aura une condition de Dirichlet imposant la valeur du champ A sur la frontière Γ :

$$L(A) = HA \quad (\text{II.3})$$

- Si la fonction H est nulle, on aura une condition de Neumann imposant la valeur de la dérivée du champ A par rapport à la normale extérieure à la frontière Γ :

$$L(A) = G \frac{\partial A}{\partial t} \quad (\text{II.4})$$

La solution de l'équation (II.1) compte tenu des conditions aux limites (II.2) peut être obtenue par une méthode de résolution numérique. La résolution numérique basée sur la méthode des éléments finis consiste à associer à celle-là un découpage du domaine Ω en sous domaines élémentaire Ω_e dans lesquels le champ A est, habituellement, approximé par une fonction polynomiale. Cela va se traduire par une transformation des équations différentielles en un système d'équations algébriques dont la résolution nous permet de déterminer la distribution du champ A dans le domaine Ω .

Dans les machines électriques les équations qui régissent le champ électromagnétique sont les équations de Maxwell associées aux relations constitutives du milieu considéré.

On les définit comme suit [14] :

- ❖ Les relations de couplage électromagnétique :

$$\overrightarrow{\text{rot}} \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (\text{II.5})$$

$$\overrightarrow{\text{rot}} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{II.6})$$

- ❖ Les relations de la conservation des flux :

$$\text{div} \vec{D} = \rho \quad (\text{II.7})$$

$$\text{div} \vec{B} = 0 \quad (\text{II.8})$$

- ❖ La relation régissant les propriétés des matériaux magnétiques :

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E} \quad (\text{II.9})$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (\text{II.10})$$

- ❖ La relation de la loi d'Ohm :

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (\text{II.11})$$

Où,

\vec{H} : Champ magnétique (A/m)

\vec{E} : Champ électrique (V/m)

\vec{B} : Induction magnétique (T)

\vec{B}_r : Induction rémanente des aimants (T)

\vec{j} : Densité de courant totale (A/m²)

\vec{D} : Induction électrique (C/m²)

μ : Perméabilité magnétique (H/m)

σ : Conductibilité électrique ($\Omega^{-1}m^{-1}$)

II.2.2. Le modèle utilisé

Selon les résultats escomptés et le temps de simulation dont on dispose, deux modèles de résolutions peuvent être employés :

II.2.2.1. Le modèle magnétostatique

Ce modèle ne pourra être utilisé que pour simuler un instant donné d'un fonctionnement essentiellement à vide (sans courants induits) de la machine car il impose de connaître les valeurs des courants dans les différentes barres du rotor. On s'en servira essentiellement pour la détermination de l'inductance magnétisante du moteur. Dans ce mode les sources sont indépendantes du temps. Le terme $\frac{\partial B}{\partial t} = 0$

Par conséquent, les équations du modèle deviennent :

$$\overline{rot} \vec{H} = \vec{j} \quad (II.12)$$

$$div \vec{B} = 0 \quad (II.13)$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} + \vec{B}_r \quad (II.14)$$

La condition (II.13) permet de définir une fonction en vecteur potentiel \vec{A} telle que :

$$\vec{B} = \overline{rot} \vec{A} \quad (II.15)$$

Pour que A soit totalement défini, il faut également fixer la valeur de sa divergence. On ajoute alors la condition $div(A) = 0$ appelée jauge de Coulomb. Qui vérifiée automatiquement l'unicité de la solution.

Par la substitution de (II.15) et (II.14) dans (II.12) nous obtenons l'équation électromagnétique en magnétostatique, exprimée par le système d'équations suivant :

$$\overline{rot}(v \overline{rot} \vec{A}) = \vec{j} + r o \vec{(v \cdot \vec{B}_r)} \quad (II.16)$$

Où :

$\nu = 1/\mu$: est la réflectivité magnétique.

II.2.2.2. Le modèle magnétodynamique

Ce modèle s'applique aux dispositifs qui ont des sources du courant ou de la tension variant en fonction du temps. Le terme $\frac{\partial B}{\partial t}$ n'est pas nul, ce qui permet d'obtenir des valeurs convenables du courant efficace. Ce modèle pourra être utilisé pour étudier un schéma équivalent de la machine.

Le système à résoudre est le suivant :

$$\text{rot}(\nu \text{rot} \vec{A}) + j\omega\sigma \vec{A} = \vec{J} \quad (\text{II.17})$$

$\omega = 2\pi f$: pulsation électrique (rad. s^{-1}), j : unité imaginaire ($j^2 = -1$)

Présentation de la méthode de calcul par éléments finis

La détermination des champs électromagnétique est d'un grand intérêt pour la conception des machines électriques. En effet, le dimensionnement et l'évaluation des performances d'une machine asynchrone à cage reposent sur la connaissance et l'identification des inductances dont découle le calcul des efforts dans les conducteurs des ampère-tour consommés dans les circuits magnétiques, des flux utiles et des flux de fuites de réactances.

L'analyse de ces phénomènes électromagnétiques est basée sur la résolution des équations de Maxwell dont la complexité est telle qu'elle est exclue dans la plupart des cas du formalisme analytique.

Plusieurs méthodes numériques transforment les équations aux dérivées partielles à des systèmes d'équations algébriques dont la solution fournit une approximation de l'inconnue en différents points situés aux nœuds du réseau géométrique correspondant à la discrétisation.

Parmi ces méthodes, nous distinguons deux méthodes principales de résolution des équations des champs électromagnétiques

II.3.1. Méthode des différences finis (MDF)

C'est la méthode la plus ancienne, connue depuis Gauss. Le principe fondamental de cette méthode consiste à appliquer au domaine d'étude un maillage en nœuds dont la finesse, permet de donner une approximation des contours du domaine. Ensuite, en appliquant le développement limité en série de Taylor de la fonction à déterminer dans chaque nœud du

maillage, ce qui permet d'obtenir un nombre d'équations algébriques égales au nombre des valeurs d'inconnues des grandeurs étudiées.

II.3.2. Méthode des éléments finis (MEF)

Autorisent l'emploi d'éléments de toute forme à l'intérieur desquels le potentiel est approché par un polynôme ; la résolution se ramène à la minimisation d'une fonctionnelle liée à l'énergie emmagasinée dans les éléments. Elle conduit à des tailles importantes en mémoire des calculateurs et à des temps de calcul long qui nécessite souvent des stations de travail pour la résolution des problèmes industriels [15].

La méthode des éléments finis est très puissante pour la résolution des équations aux dérivées partielles. Cette méthode ne s'applique pas directement aux équations aux dérivées partielles, mais à une formulation intégrale qui est équivalente au problème à résoudre, en utilisant l'une des deux approches suivantes [15]:

- La méthode des résidus pondérés ou méthode projective qui consiste à minimiser le résidu induit par l'approximation de la fonction inconnue.
- La méthode variationnelle qui consiste à minimiser une fonctionnelle qui représente généralement l'énergie du système étudié.

L'utilisation de la méthode numérique de calcul par élément finis nous apporte plusieurs avantages [5]:

- Prise en compte de la géométrie de la machine.
- Prise en compte de la saturation des matériaux magnétiques.
- Prise en compte de l'effet de peau dans les barres rotoriques.
- De point de vue pratique, il est très facile de faire varier les conditions de fonctionnement de la machine (fréquence et flux magnétisant), en changeant simplement les données du programme de calcul d'où une grande souplesse d'utilisation.

La méthode consiste à mailler l'espace en régions élémentaires dans lesquelles on représente la grandeur recherchée par une approximation polynomiale. Le maillage peut être constitué de triangles ou de rectangles aux sommets desquels on recherche les valeurs de l'inconnue en supposant que, dans ce domaine, l'inconnue varie linéairement en fonction des coordonnées. Une telle méthode nécessite donc de mailler tout l'espace étudié (y compris l'espace environnant). Sur chaque élément du découpage, la fonction d'interpolation est de la forme [15] :

$$A = \sum_{m=1}^{ns} A_m \varphi_m(x, y) \quad (\text{II.18})$$

Où ns est le nombre de sommets de cet élément.

Le polynôme d'approximation (du second degré pour un élément quadrilatéral est déterminé par ces coefficients (ici six).

$$\varphi_m(x, y) = a_m + b_m x + c_m y + d_m x^2 + e_m xy + f_m y^2 \quad (\text{II.19})$$

Les coefficients peuvent être déterminés par les valeurs de la fonction en des points particuliers appelés nœuds de l'élément (ici les sommets du triangulaire dans la figure II.1). Ainsi, le potentiel est défini à l'intérieur de chaque élément.

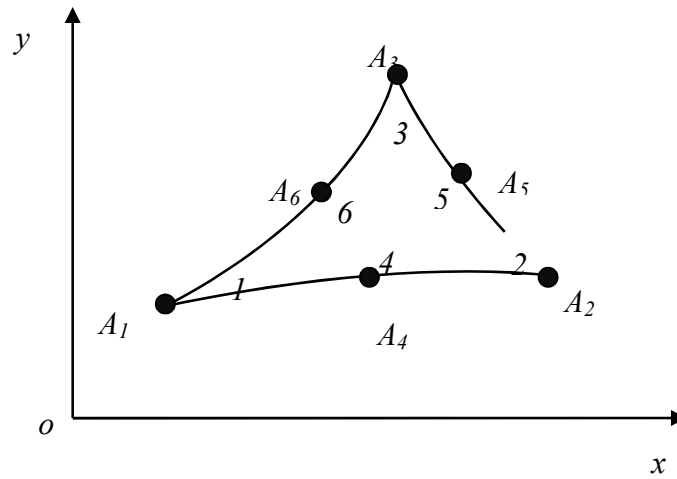


Figure II.1 Fonction d'interpolation d'un élément [5]

Le processus de discrétisation par éléments finis aboutit, alors, à un système algébrique de la forme :

$$[K][A] + [F] = 0 \quad (\text{II.20})$$

Où $[A]$ est un vecteur dont les composantes sont les inconnues du problème et représentent les valeurs nodales du potentiel magnétique ; $[K]$ est une matrice symétrique dont les composantes sont fonction des propriétés magnétiques des matériaux composant le système et indépendantes des sources du champ ; $[F]$ est un vecteur fonction des sources du champ (courants, tensions, aimants).

Ainsi la détermination des valeurs, A_1, A_2, \dots, A_n , que la fonction inconnue $A(x, y)$ prend en chaque nœud de chaque élément de découpage, représente le déroulement des calculs pour arriver à la solution du problème [15].

II.4. Présentation du logiciel de calcul par éléments finis

La mise en œuvre d'une méthode numérique de calcul de champ débouche inévitablement sur un logiciel qui lui est associé. Si, lors des premières tentatives de calcul par des méthodes numériques, on écrivait, pour chaque nouveau problème, un programme différent tenant compte de sa géométrie particulière, de ses particularités physiques et de ses conditions aux limites, on s'oriente aujourd'hui vers la réalisation de logiciels généraux dont la structure informatique est adaptée au traitement d'un grand nombre de problèmes d'un même type.

II.4.1. Préprocesseur

La première des fonctions du préprocesseur est la définition des types des éléments (magnétique et électrique) suivant le type et les caractéristiques du problème que l'on veut étudier, et les résultats que l'on veut obtenir.

La deuxième fonction du préprocesseur est la description de la géométrie de la machine que l'on veut étudier. Cette opération est programmée suivant le principe d'un jeu de construction. À partir des points dont les coordonnées sont entrées au clavier, on définit des lignes (qui peuvent être des segments de droite ou des arcs de courbe) et l'on décrit des régions comme des parties de domaine délimitées par ces lignes. À chaque région est attribué un matériau extrait d'une base de données et le type d'élément choisi [15].

La fonction suivante du préprocesseur est la discrétisation en éléments finis. Cette fonction de maillage, qui représente une opération complexe, est intégrée au logiciel qui la réalise de manière automatique.

II.4.2. Processeur de calcul

À partir des éléments de la géométrie et de la physique de la machine et du découpage en éléments finis du domaine ainsi que le type du problème, le processeur fait le calcul des éléments de la matrice Jacobienne et réalise l'assemblage des éléments pour construire la matrice globale et le second membre du problème. La résolution des équations est ensuite enchaînée de manière automatique en laissant à l'utilisateur le soin de définir la précision recherchée et le nombre maximal d'itérations qu'il autorise dans le cadre de la méthode de Runge-kutta pour le cas du non linéarité.

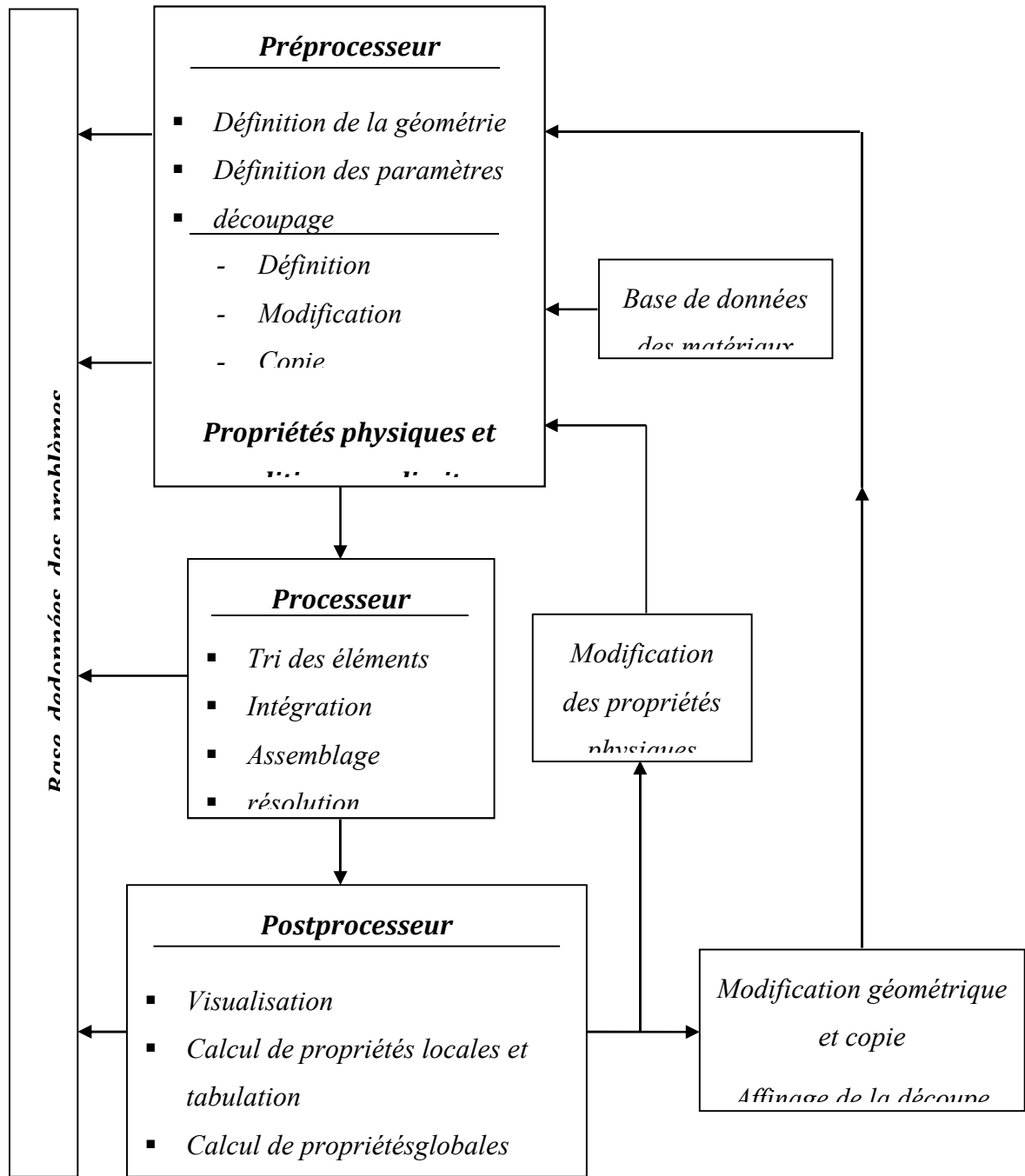


Figure II.2 Organisation du logiciel de calcul par éléments finis [16]

II.4.3. Postprocesseur

À l'intérieur de ce module, on présente les résultats à l'utilisateur sous une forme adaptée à sa perception de la physique du problème. Par exemple, dans un problème d'électrostatique le tracé des équipotentielles est un résultat très utilisé. En magnétostatique, les lignes de flux, ou un ensemble de vecteurs d'induction, informent sur la répartition du champ. Enfin, dans

l'étude des courants induits, on peut, en fixant l'instant de la représentation, se ramener au cas précédent, mais aussi tracer les lignes d'égale densité de puissance dissipée, afin de caractériser la localisation des pertes par effet Joule associées aux courants induits [16].

Parmi les facilités qui sont très utiles à l'intérieur du postprocesseur, on trouve la possibilité de tracer la courbe représentative d'une grandeur le long d'une ligne intérieure au domaine (segment, cercle ou arc de cercle). Cette grandeur peut être le potentiel ou le module, la composante normale ou la composante tangentielle du champ. L'utilisation de dégradés de couleur ou de gris pour visualiser la répartition d'une grandeur scalaire ou le module d'une grandeur vectorielle est également très significative par exemple la présentation de la densité du courant électrique [16].

II.5. Conclusion

Ce chapitre a été réservé à la réalisation du modèle magnétostatique de la machine synchrone par la méthode des éléments finis. Bien que cette modélisation soit très coûteuse en construction, elle reste très fidèle au comportement magnétique de la machine. Cette caractéristique est bien argumentée par les différents résultats obtenus.

Le prochain chapitre sera réservé à la simulation de la machine synchrone à aimant par le logiciel de calcul par éléments finis FEMM.

Chapitre III : Simulation et résultats

III.1 Introduction

Dans ce chapitre la machine synchrone à aimant permanent sera simulée par la méthode des éléments finis en utilisant le logiciel FEMM. Le modèle utilisé est le modèle magnétostatique vectoriel où la machine sera alimentée par une densité de courant électrique. Les étapes nécessaires pour l'analyse par éléments finis sont :

- Définition de la géométrie.
- Affectation des matériaux pour chaque région du problème.
- Définition du problème.
- Définition des conditions aux limites.
- Le maillage de la géométrie de la machine en éléments finis.
- La résolution du problème.

III.2 Définition du logiciel FEMM

Le logiciel FEMM (Finite Element Method Magnetics) est une suite de programmes pour résoudre les problèmes magnétostatiques et de faibles fréquences en deux dimensions (2D), planaires et axisymétriques. Le logiciel FEMM est divisé en trois parties :

- ❖ **Preprocessor** (femme.exe): est un programme de CAO pour la définition de la géométrie du problème à résoudre, et définir les propriétés des matériaux et les conditions aux limites.
- ❖ **Solver** (fkern.exe): le Solver prend en compte les fichiers de données décrivant le problème et résout les équations de Maxwell pour obtenir les valeurs de l'induction magnétique dans le domaine de résolution.
- ❖ **Postprocessor** (femmview.exe): est un programme graphique qui affiche les résultats sous formes de champs, de contour et de densité. Le programme permet aussi à l'utilisateur d'inspecter le champ aux points arbitraires, d'évaluer plusieurs différentes intégrales et de tracer diverses quantités d'intérêt le long des contours définis par l'utilisateur.

Deux programmes supplémentaires sont aussi appelés pour exécuter des tâches spécialisées. Ceux sont :

- **Triangle.exe** : triangle découpe la région en un grand nombre de triangles, c'est une partie vitale du procédé d'éléments finis.
- **Femplot.exe** : ce programme est utilisé pour afficher les diverses solutions en 2D.

III.3 Construction du modèle élément finis de la machine synchrone à aimant permanent

III.3.1 Définition du type de problème traité

Il faut d'abord choisir le type de problème traité parmi ceux proposés par le logiciel, en précisant si la représentation en 2D correspond à la simplification d'un problème infiniment long (problème PLANAR) ou axisymétrique (problème AXISYMMETRIC).

III.3.2 Entrée de la géométrie et affectation des propriétés physiques

Le préprocesseur (femme.exe) est utilisé pour dessiner la géométrie des problèmes, la définition des matériaux et les conditions aux limites.

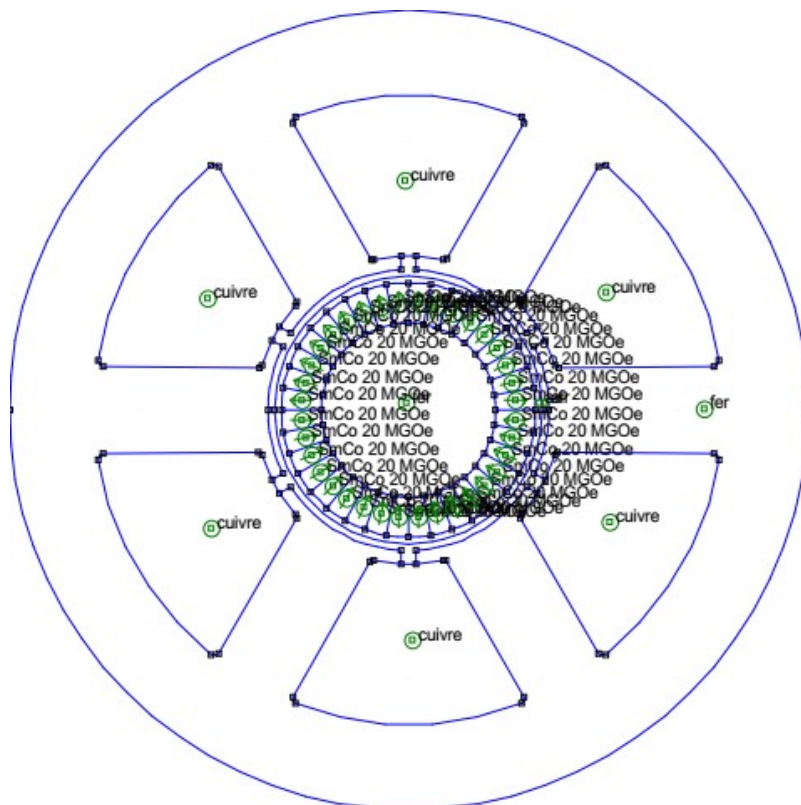


Figure III.1 Géométrie de la machine étudiée

La machine utilisée possède six encoches statoriques de forme trapézoïdale (figure III.1), et des aimants permanents insérés dans le rotor.

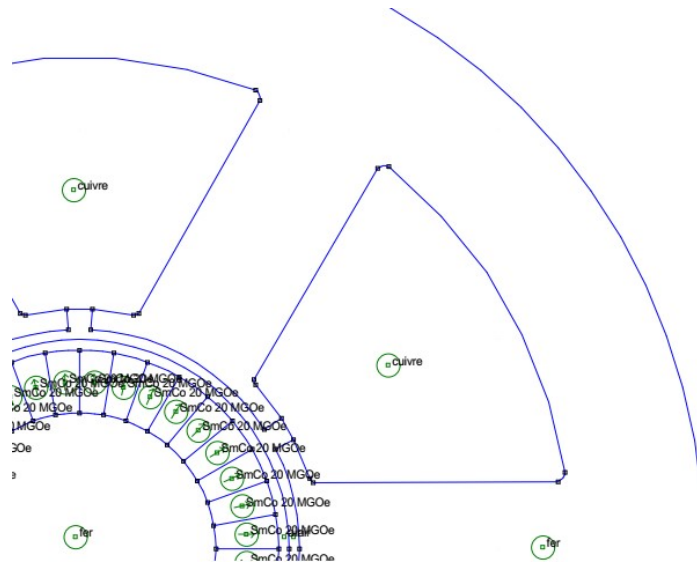


Figure III.2 Zoom de la géométrie de la machine étudiée

On affecte à chaque région un matériau :

- ❖ **Stator:** contient une culasse qui est définie par un matériau magnétique et 06 encoches statoriques qui sont définies par un matériau non magnétique d'une perméabilité magnétique égale à 1, pour notre cas le matériau utilisé est le cuivre.
- ❖ **Entrefer:** d'épaisseur égale à 0.6 mm, sa perméabilité magnétique est égale à 1.
- ❖ **Rotor:** contient un noyau ferromagnétique et des aimants permanents définis par le matériau SmCo 20 MGOe, les caractéristiques de ce matériau sont représentés dans la figure III.3.

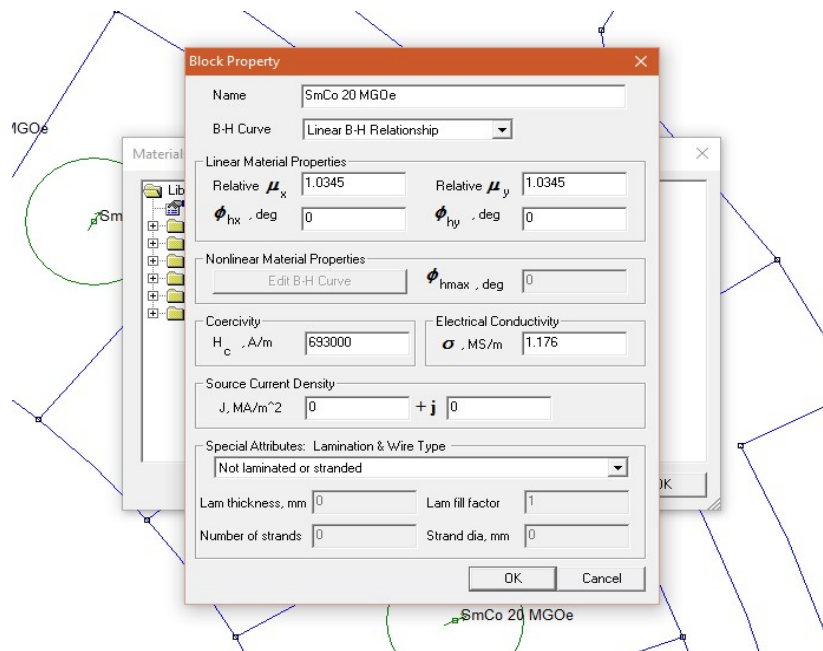


Figure III.3 Caractéristiques d'aimant permanent utilisé

Le module (triangle.exe) permet le maillage de la géométrie qui consiste à découper le domaine en triangles sur lesquels le potentiel A sera approximé. Le maillage du circuit magnétique, est présenté dans la figure III.4.a. Le maillage comporte des éléments triangulaires. L'exploitation principale du modèle éléments finis a pour objectif d'étudier le comportement magnétique de la machine, ce qui exige un maillage du domaine de calcul assez fin dans l'entrefer, dans les régions d'aimants permanents et au niveau des régions des encoches statoriques (voir Figure III.4.b). Ces paramètres sont nécessaires pour assurer un compromis raisonnable entre la précision et la rapidité de calcul numérique.

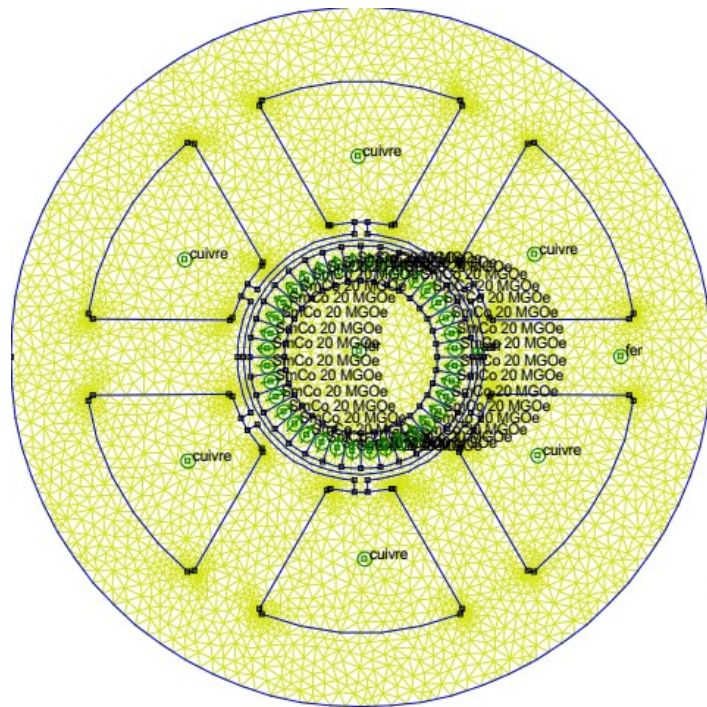


Figure III.4.a Maillage du circuit magnétique

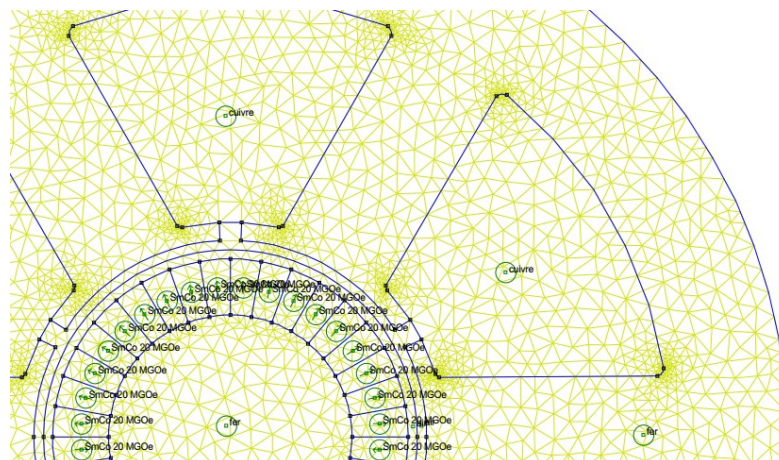


Figure III.4.b Maillage du circuit magnétique (Zoom)

III.4 Résultats de simulation

Ainsi à partir d'un modèle magnétostatique vectoriel, on peut obtenir des représentations de la répartition des lignes de flux magnétiques présentées à la figure III.5, comme illustrée dans cette figure, la distribution des lignes d'équiflux est symétrique et les deux pôles magnétiques sont clairement présentés.

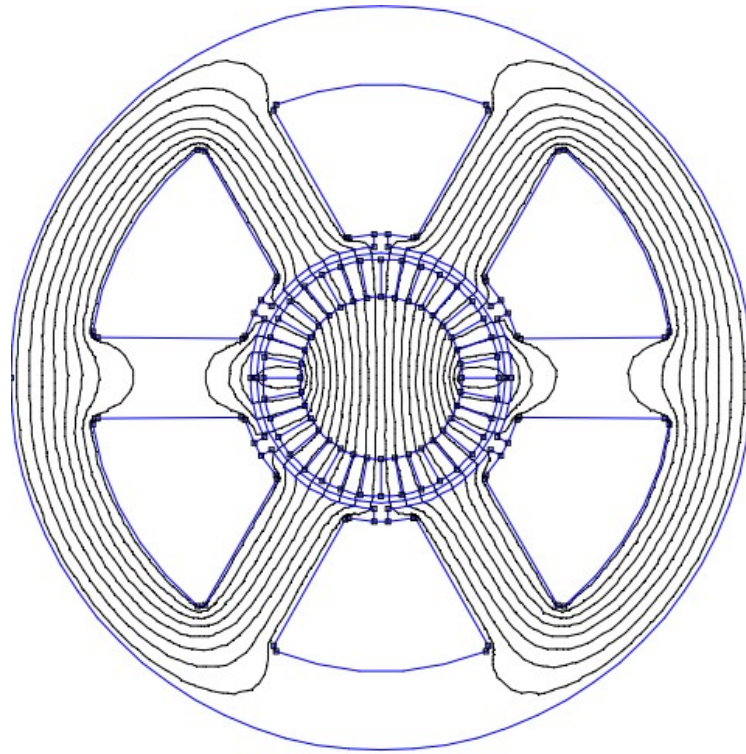


Figure III.5 Répartition des lignes de flux magnétique

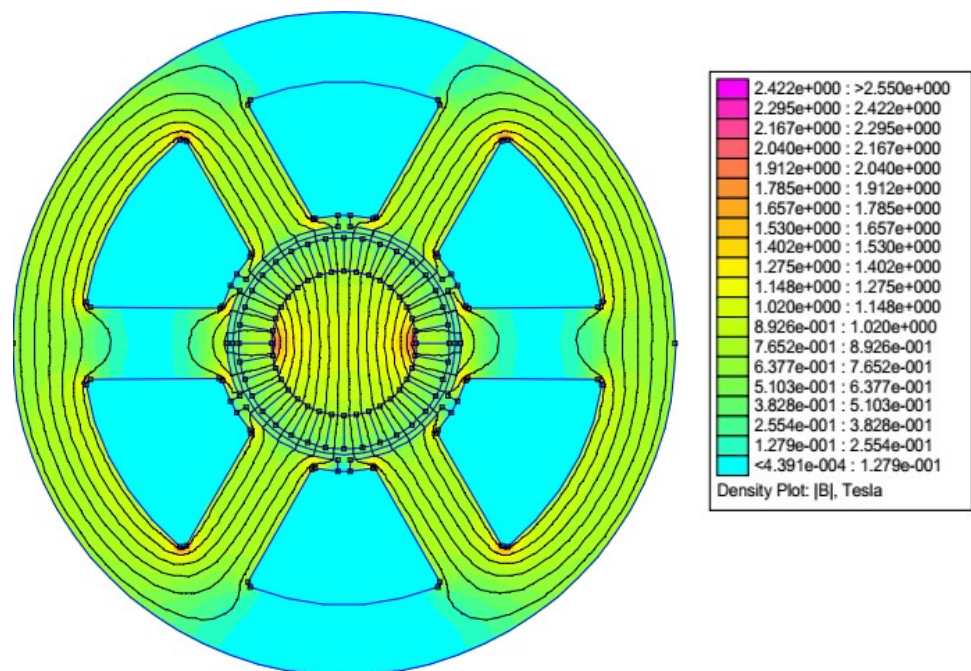


Figure III.6 Répartition de l'induction magnétique

Les figures III.7.a et III.7.b montrent la distribution du champ magnétique de la machine, on peut observer clairement le sens du champ.

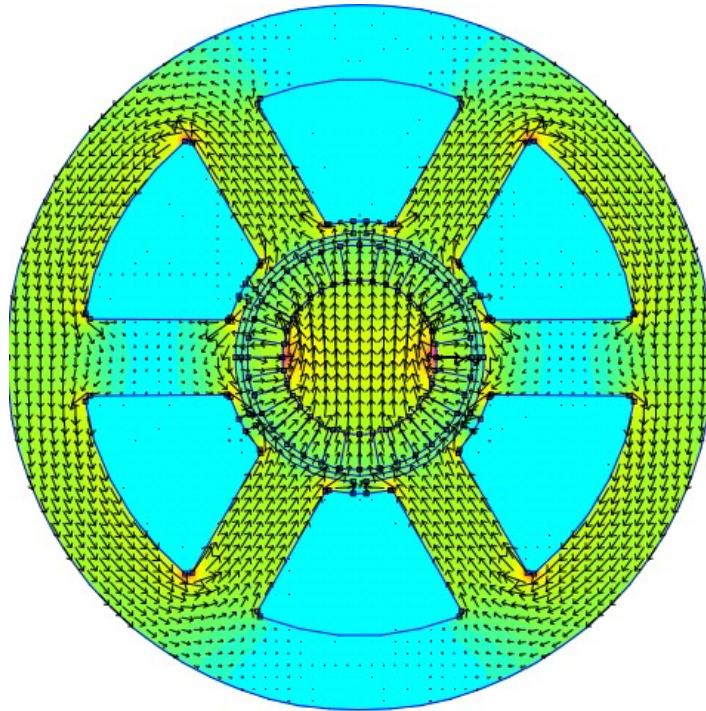


Figure III.7.a Distribution du champ de la densité du flux magnétique

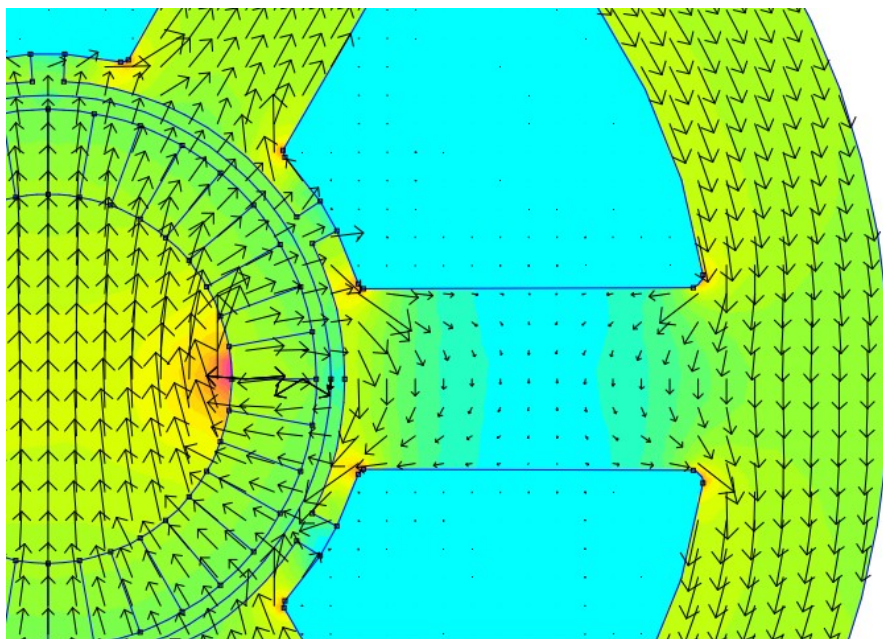


Figure III.7.b Distribution du champ de la densité du flux magnétique

La figure III.8 montre l'induction radiale relevée d'un contour tracé dans l'entrefer de la machine, dans cette figure l'induction normale au milieu de l'entrefer est en fonction de la position en degrés mécaniques, chaque point du milieu de l'entrefer est repéré par un angle mécanique. La machine présente une induction radiale équilibrée sous les deux pôles de la machine, il y a évidemment une perturbation à cause de la denture où on peut clairement visualiser les perturbations des 06 dents statoriques.

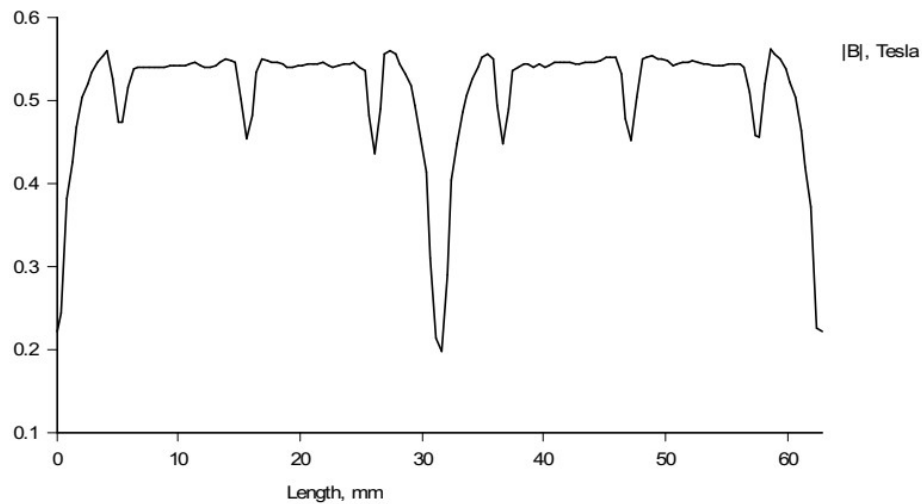


Figure III.8 Module de l'induction magnétique dans l'entrefer de la machine

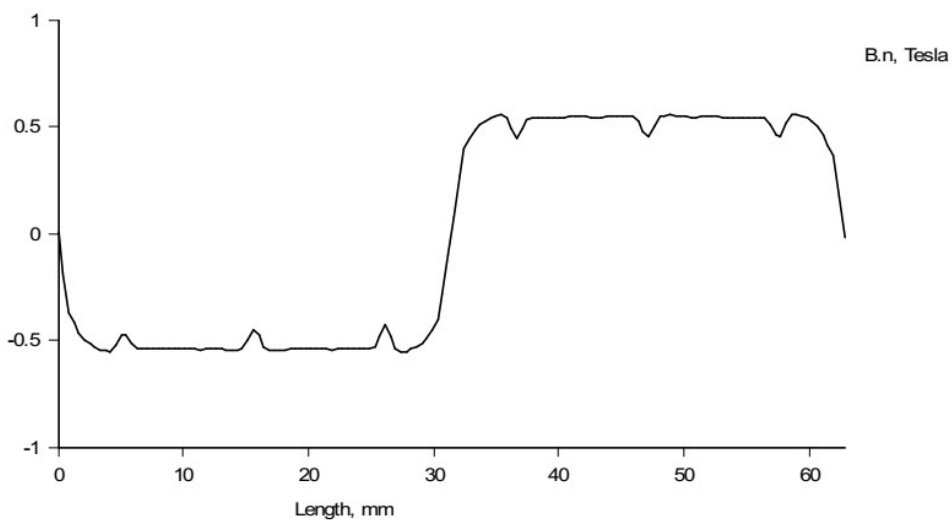


Figure III.9 Induction radiale dans l'entrefer de la machine

III.5 Conclusion

Ce chapitre a été réservé à l'élaboration du modèle élément finis dédié à la simulation de la machine synchrone à aimants permanents. Malgré que cette modélisation magnétostatique

n'offre pas assez de résultats, mais elle reste très fidèle au comportement magnétique de la machine. La distribution des lignes de flux et de l'induction magnétique ont été bien obtenues. Aussi l'induction magnétique radiale dans l'entrefer a été bien visualisée.

Conclusion générale

Le travail de ce mémoire a consisté en une recherche et une description de la machine synchrone à aimants permanents (MSAP). Le choix s'est porté sur la MSAP pour ses nombreux avantages, mentionnons sa simplicité de construction (pas de collecteurs mécaniques, ce qui évite un entretien permanent), moins gênante, moins de sources d'alimentation que les machines à courant continu ou asynchrones. Et aussi, elle peut fournir des puissances importantes par rapport à sa masse comparée à la machine synchrone à rotor bobiné. Grâce aux qualités techniques précédentes, la MSAP s'est vue propulsée dans des applications telles que ; robotique, systèmes de traction, remplacement des actionneurs hydrauliques et pneumatiques, ...etc. Notre mémoire a été divisé en trois chapitres :

Le premier chapitre a traité les généralités sur la machine synchrone à aimants permanents qui apparaît comme une solution technologique pertinente.

Dans le deuxième chapitre, nous avons présenté le modèle magnétostatique vectoriel de la machine et ses équations, ce dernier tient compte de la topologie et de la dimension de la machine. De plus il a la possibilité de manipuler le circuit magnétique de fer, ce qui permet d'introduire la courbe $B(H)$ avec saturation dans les calculs. En d'autres termes, cette méthode et le logiciel utilisé permettent de modéliser la machine de la manière la plus fine possible.

Après simulation, les résultats obtenus du modèle éléments finis sont très satisfaisants. Ils sont en parfaite concordance avec ceux de la littérature.