

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE
LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE AMMAR THELIDJI LAGHOUAT
FACULTE DE LA TECHNOLOGIE



DEPARTEMENT DE ELECTROTECHNIQUE

Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme de Master en Electromécanique
Option : Electromécanique

THÈME :

Etude par Simulation d'une génératrice a Rotor à Aimant Permanent

Réalisé par :

- Oubati Mohamed Abderaouf
- Belouafi Moulay Idriss

Dr :Youcefi Belkacem

Promotion 2023/2024

Résume :

Les machines à courant alternatif sont les plus utilisées dans l'industrie pour des applications de type servomoteur (robotique, machines, outils...). Parmi ces machines, nous citons la machine synchrone à aimants permanents (MSAP) qui est caractérisée par un couple massique important et un bon rendement par rapport aux autres types de machines. Son mode de contrôle est simple car le repère de commande est directement lié au rotor. La conception assistée par ordinateur (CAO) joue un rôle primordial dans la réalisation d'une machine électrique. L'objectif de ce travail est de modéliser les phénomènes électromagnétiques dans la Machine Synchrone à Aimant Permanent en fonctionnement génératrice par l'utilisation du logiciel COMSOL-Multiphysics, pour calculer les différentes grandeurs électromagnétiques tels que : le potentiel vecteur magnétique, l'induction magnétique et le champ magnétique et électrique

Abstract :

AC machines are the most used in the industry for servomotor type applications (robotics, machine tools, etc.). Among these machines, we mention the permanent magnet synchronous machine (MSAP) which is characterized by a high mass torque and good performance compared to other types of machines. Its control mode is simple because the control mark is directly linked to the rotor. Computer-aided design (CAD) plays a key role in the design of an electric machine. The aim of this work is to model the electromagnetic phenomena in the permanent magnet synchronous machine in generating operation by the use of the COMSOL-Multiphysics software, to calculate the different electromagnetic quantities such as : the magnetic vector potential, the magnetic induction and the magnetic field

ملخص :

آلات التيار المتردد هي الأكثر استخدامًا في الصناعة تطبيقات من النوع المؤازر (الروبوتات، الأدوات الآلية، إلخ). ومن بين التي تتميز بعزم دوران كبير وكفاءة جيدة مقارنة بالأنواع (MSAP) هذه الآلات نذكر آلة المغناطيس الدائم المتزامنة (CAD) الأخرى آلات. وضع التحكم فيه بسيط لأن علامة التحكم مباشرة مرتبطة بالدوار. يلعب التصميم بمساعدة الكمبيوتر دورًا حيويًا في إنشاء آلة كهربائية. الهدف من هذا العمل هو نمذجة الظواهر الكهرومغناطيسية في مولد المغناطيس الدائم حساب الكميات الكهرومغناطيسية COMSOL-Multiphysics المتزامنة في عملية التوليد من خلال استخدام برنامج مختلفة مثل: الجهد المتجه المغناطيسي والحث المغناطيسي والمجال المغناطيسي من أجل دراسة التأثير لعدة عوامل تتعلق بالقوة الدافعة الكهربائية المستحثة

Remerciements

Au terme de notre travail : on tient tout d'abord à remercier le bon dieu le tout puissant pour le courage, la patience et la santé Qu'il nous a donné pour suivre nos études.

Nous souhaitons exprimer nos reconnaissances qui sont innombrables. Cependant, ne pouvant pas dresser la liste exhaustive de tout le monde, dans la crainte d'oublier quelqu'un.

Nous commencerons volontiers par rendre hommage à toutes celles et à tous ceux, sans exception, qui ont contribué de près ou de loin à favoriser ce travail.

Nous exprimons notre gratitude et tout notre respect à notre promoteur Mr B.Yuocefi, de nous avoir suivis tout au long de notre travail.

Nous remercions vivement le jury d'avoir accepté de juger et de valoriser notre travail.

Dédicace



Je dédie Mon Travail avant tous A Mes Chers Parents.

*Ma jolie MERE symbole de sacrifice et qui est
tout pour Moi, pour Sa*

Tendresse profonde « Que Dieu Me les Protègent».

À Mon chers Frère

À mes cousins

*À Toute Ma famille, Mes collègues, Mes amis tous
par leur noms.*

*À toute les personnes que j'ai oubliées et que je
n'ai pas Citées et toute la promotion
Electromécanique.*

SOMMAIRE

Introduction Générale

CHAPITRE 1 : Généralités sur les Machines Synchrones à Aimants Permanents

I-Généralités	1
I.1.Introduction	1
I.2.Définition de la Machine Synchrone	1
I.3.Constitution de la Machine Synchrone	1
I.3.1.Le Stator	2
I.3.2.Le Rotor	2
I.4. Classements des Machines Synchrones	3
I.4.1 Machine Synchrone a Rotor Bobiné	3
I.4.2.Machine Synchrone à Rotor à Pôles Lisses	4
I.4.3.Machine Synchrone à Rotor à Pôles Saillants	5
I.4.4.Machine Synchrone à Aimant Permanent	6
I.4.4.1.Présentation de la Machine Synchrone à Aimant Permanent	6
I.4.4.2.Principe de Fonctionnement	7
I.5. Les Aimants Permanents	7
I.5.1 Valeur Magnétiques et Physiques des Aimants	8
I.5.2. Les différents types d'Aimants Permanents	9
I.5.2.1.Les Alnicos	9

I.5.2.2.Les Ferrites	10
I.5.2.3.Les Alliages Métaux – terres rares	11
I.6. Classifications des Machine Synchrone à Aimant Permanent	11
I.6.1 Sens d'alimentation	11
I.6.1.1 Machine Synchrone à Flux Radial	12
I.6.1.2 Machine Synchrone à Flux Axial	19
I.7. Alimentation de la Machine Synchrone à Aimant Permanent	19
I.7.1 Moteurs BDCM	20
I.8 Les MSAP	20
I.8 Avantages de la MSAP	21
I.9 1Inconvénients de la MSAP	21
I.10. Les domaines d'application	22
I.9.2 Conclusion	23

CHAPITRE II Modélisation sur les Machines synchrones à aimants permanents

II.1.Introduction	25
II.2. Modélisation de la MSAP à Concentration de Flux	25
II.2.1. Hypothèse et Simplification	26
II.2.2. Description de la Machine	27
II.2.3. Equations du Champ Electromagnétique	28
II.2.3.1. Les Relations Constitutives du Milieu	29
II.2.3.2. Formulation du Modèle Magnétostatique	30
II.3. La Méthode des Eléments Finis	32
II.3.2. Le Principe du Calcul par Eléments Finis	36
II.3.3. Les Etapes Principales de la Mise en Œuvre de la MEF	37
II.3.4. Discrétisation et Approximation	38
II.3.5. Formulation Eléments Finis	39
II.3.6. Résolution du Modèle Magnétostatique par la MEF	40
II.4. conclusion	40

CHAPITRE III résultat de simulation de la Génératrice a Rotor a Aimant Permanent

III.1 Introduction	42
III.2 Prise en main du logiciel	42
III.3. Les potentialités et les performances de COMSOL Multiphysics	43

III.4. . Définition des paramètres de la GSAP	43
III.4.1. Construction géométriques de la machine étudiée	44
III.4.2 Affectation des propriétés physiques de chaque domaine	44
III.4.3 Paramètres et calcul du maillage	45
III.4.4 Résolution du problème	45
III .5 Résultats de simulation	46
Conclusion générale	

Liste des figures

Figure I.1 : stator et rotor de la Machine à Aimant	1
Figure I.2 : Machine Synchrone à Pole lisse	4
Figure I.3 : Machine Synchrone à Pole Saillant	5
Figure I.4 : La courbe hystérésis de l'Aimant Permanent	7
Figure I.5 : Aimants AlNiCo	8
Figure I.6 : Aimants ferrites	9
Figure I.7 : Aimants terres-rares	10
Figure I.8 : Vue schématique des Machines	10
Figure I.9 : Exemple de structures à Rotor Interne et à Rotor Externe	11
Figure I.10 : Machine Synchrone à Aimants avec Rotor Intérieur	12
Figure I.11 : Machine Synchrone à Aimant Permanent montés en surface.	13
Figure I.12 : Aiment Permanent en surface	13
Figure I.13 : Machine Synchrone à Aimants Permanents insérés.	14
Figure I.14 : Aimants Permanents insérés	14
Figure I.15 : Machine Synchrone à Aimants Permanent enterrés	15
Figure I.16 : Structure à Aimants enterrés : (a) avec concentration de flux, (b) structure classique	15
Figure I.17 : Aimants Permanents à concentration de flux	16
Figure I.18 : Machine Synchrone à Aimants avec Rotor extérieur.	16

Figure I.19 : Différentes configurations d'une Machine à flux axial	17
Figure I.20 : Principales applications des MSAP	21
Figure II.1 : Organigramme de la méthode des éléments finis	32
Figure II.2 : Élément triangulaire	36
Figure. III.1 : Fenêtre de paramètres	43
Figure III.2. La géométrie de la génératrice étudiée (GSAP).	44
Figure III.3 Le maillage du domaine d'étude.	45
Figure. III.4 : Potentiel magnétique, composante z [Wb/m]	46
Figure III.5. Champ électrique composant z (a) et norme (b) [V/m]	47
Figure III.6. Densité d'énergie magnétique [J/m^2]	48
Figure III.7. Densité de flux magnétique, norme [T]	49
Figure III.8 Champ magnétique, norme [A/m]	50
Figures III.9 Flux de puissance, moyenne temporelle, norme [W/m^2]	51

Nomenclature

Nomenclature

$\vec{B}$: Vecteur induction magnétique [T].

A : vecteur de potentiel magnetique [Wb/m]

B_r : induction rémanente [T].

$\vec{D}$: Induction électrique(C/m^2)

$\vec{E}$: Vecteur champ électrique [V/m].

$\vec{j}$: Densité de courant [$A.m^{-2}$]

$\vec{H}$: Vecteur Champ magnétique [A /m].

M_x et M_y : Aimantation dans les directions x et y

μ_0 : Perméabilité magnétique de vide [$H.m^{-1}$].

ρ : Charges volumiques [C/m^3].

μ_r : Perméabilité magnétique relative du milieu.

μ : Perméabilité magnétique absolue du milieu [H/m].

$d\Gamma$: Période spatiale (suivant le contour Γ).

ϕ_i :Fonction de pondération ou de projection.

Abréviations

MSAP : Machine synchrone à aimants permanents.

MEF : Méthode des éléments finis.

EDP : Equation aux dérivées partielles.

BDCM: Brushless DC motor

Introduction générale

Introduction générale

Aujourd'hui, les machines synchrones à aimants permanents (MSAP) sont très recommandées dans le domaine industriel. Ceci est dû au fait qu'elles sont simples, fiables et moins encombrantes que les machines à courant continu. Ainsi, leur construction est plus simple puisqu'elles n'ont pas de commutateurs mécaniques. Par conséquent, ceci augmente leur durée de vie et évite les entretiens permanents. Elles peuvent être utilisées dans un environnement explosif car aucune étincelle n'est produite. Elles peuvent aussi fournir des puissances importantes par rapport à leur masse contrairement aux machines à courant continu qui demandent plus de sources d'alimentation et ont une puissance massique plus faible. Grâce aux qualités techniques précédentes, on s'est intéressé beaucoup au MSAP en robotique, système de traction, technologie spatiale et dans des applications domestiques. La machine synchrone à aimant permanent (MSAP) occupe une large utilisation dans le milieu industriel à cause de son rendement important.

Dans ce mémoire, nous présentons une approche pour l'élaboration d'un modèle de machine (génératrice) synchrone à aimants permanents. Nous nous intéressons aux performances de ces prototypes, obtenues à partir de calculs numériques en utilisant la méthode des éléments finis via le logiciel de calcul Comsol Multiphysics.

Le premier chapitre : à travers une étude bibliographique, est consacré à des généralités sur la machine synchrone et les différents types de machines (générateur) synchrones à aimants permanents (GSAP) classées selon la disposition des aimants permanents dans le rotor de la machine, et à la fin de ce chapitre on aborde le fonctionnement de cette machine ainsi que les domaines d'application.

Le deuxième chapitre : concerne la modélisation de la machine synchrone à aimants permanents. Ce modèle basé sur les équations du champ électromagnétique a été présenté, dont on a présenté la méthode des éléments finis et le logiciel utilisé pour la résolution des équations du champ électromagnétique appliquées à la GSAP.

Dans le troisième chapitre : on a commencé par présenter notre machine d'étude qui est la GSAP, ainsi que leurs caractéristiques géométriques. Plusieurs simulations concernant les flux magnétiques engendrés dans les phases de la machine étudiée sont effectuées, la caractéristique de l'induction magnétique et les tensions, avec le logiciel Comsol Multiphysics en effectuant des modifications sur les paramètres géométriques de notre machine



Chapitre I

Généralités sur les Machines Synchrones à Aimants Permanents

I- Généralités

I.1 Introduction

Le terme machine synchrone regroupe toutes les machines dont la vitesse de rotation de l'arbre de sortie est égale à la vitesse de rotation du champ tournant. Pour obtenir un tel fonctionnement, le champ magnétique rotorique est généré soit par des aimants, soit par un circuit d'excitation. La position du champ magnétique rotorique est alors fixe par rapport au rotor, ce qui impose un fonctionnement normal une vitesse de rotation identique entre le rotor et le champ tournant statorique.

I.2 définition de la Machine Synchrone

La Machine Synchrone est un système électrique permettant de convertir de l'énergie mécanique en énergie électrique « Génératrice » ou inversement « moteur ». Le type de machine qui fournit l'énergie électrique appelée par le réseau de distribution dans les centrales électriques est appelé alternateur. Néanmoins, on la rencontre peu dans les applications domestiques, car elle est plus coûteuse à fabriquer et moins robuste que la machine asynchrone [1].

I.3 Constitution de la Machine Synchrone

La machine synchrone comporte deux parties distinctes :

- Une partie fixe appelée stator

Une partie mobile appelée rotor inducteur où roue polaire alimentée en courant continu ou dotée d'aimants permanents.

I.3.1 Le Stator

Le stator est formé d'un circuit magnétique feuilleté portant un enroulement triphasé réparti dans des encoches. Ce bobinage constitue l'induit de la machine car il est le siège de force électromotrice induite par le champ tournant [1].

I.3.2 Le Rotor

Le rotor porte en général un bobinage placé dans des encoches ou sur des pôles saillants. Cet enroulement, destiné à être alimenté en continu, constitue l'inducteur de la machine car il sert à créer le champ magnétique qui va balayer les conducteurs de l'induit. L'excitation peut également être produite par des aimants permanents montés en surfaces ou enterrés. Une variante particulière ne comporte aucune excitation au rotor et utilise les variations de réluctance [1].

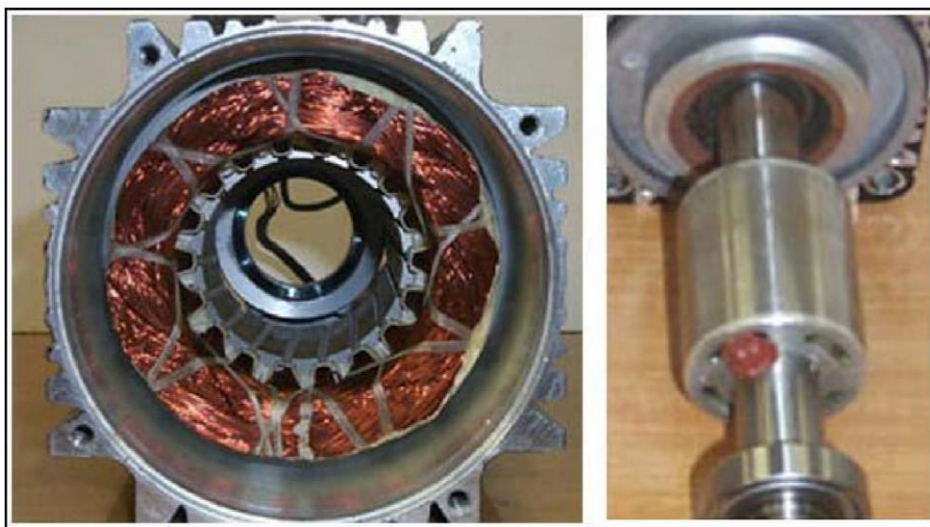


Figure I.1 : stator et rotor de la machine à aimant permanent.

I.4 Classification des Machines Synchrones

Le moteur synchrone est utilisé dans une large gamme de puissance allant de Watt au Méga Watt, dans les applications aussi diverses que le positionnement, la synchronisation, l'entraînement à vitesse constante et la traction. A ces nombreux domaines d'emplois, correspondant autant de technologies différentes, dans les plus répandues peuvent être scindées en deux grandes familles :

- Les moteurs synchrones à inducteur bobiné, à pôles saillant ou pôles lisses.
- Les moteurs synchrones à aimants permanents, avec ou sans pièces polaires.

Le domaine d'utilisation privilégié des moteurs synchrones à inducteur bobiné pour les fortes puissances. Les machines à pôles lisses comportent deux ou quatre pôles, celles à pôles saillants en comportent au moins quatre. La technologie employée est essentiellement liée à la faisabilité même du rotor et à la vitesse de rotation [2].

Avec l'avènement 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 connu ces dernières années un grand essor. Elles ont été adoptées dans de nombreuses applications de hautes performances telles que la robotique, l'aérospatiale, les outils électriques, la production des sources d'énergie renouvelables, les divers équipements médicaux, les véhicules électriques, etc. Pour toutes ces applications, les MSAP sont parfois préférables aux autres machines traditionnelles [2].

I.4.1 Machine Synchrone à Rotor Bobiné

Ce genre de machine est constitué d'un rotor qui comporte des bobines. On alimente ces bobines par des courant continu par l'intermédiaire des contacts glissantes balais –bague pour générer le flux magnétique inducteur dans l'entrefer.

On distingue deux types de machines synchrones à rotor bobiné :

- Les machines à pôle lisses
- Les machines à pôle saillant

La machine à pôles lisses à une réluctance constante quelle que soit la position de rotor. Par contre, la machines à pôles saillants à un entrefer magnétique variable suivant la position des pôles, ce qui entraine une variation de réluctance [3]

I.4.2 Machine Synchrone à Rotor à Pôles lisses

Ce type de machine est souvent utilisé pour des applications de fortes puissances et grande vitesse. Des frettes en acier amagnétique peuvent être utilisées afin de maintenir en place les têtes des bobines. Les machines à pôles lisses sont caractérisées par une distance constante entre les deux parties ferromagnétiques statorique et rotorique le long de la périphérie de l'entrefer ; l'encoche du stator et/ou du rotor est négligé et magnétiquement assimilé à un entrefer constant [4].

Le rotor à pôles lisses et utilisé dans les machines synchrones bipolaires ou tétras polaires qui fonctionnent aux vitesses de 3000 ou 1500 tours par minute. Le rotor à pôles saillants ne convient pas pour de telles machines à cause des difficultés que présente la fixation des enroulements d'excitation concentrés en cas d'un nombre de pôles faible (surtout dans les machines bipolaires). C'est pourquoi les machines bipolaires et tétra polaires utilisent exclusivement des rotors lisses bien que les rotors à pôles saillant reviennent moins chers [5].

Le courant inducteur est généralement injecté au rotor par l'intermédiaire de bagues sur lesquelles frottent des balais [6].

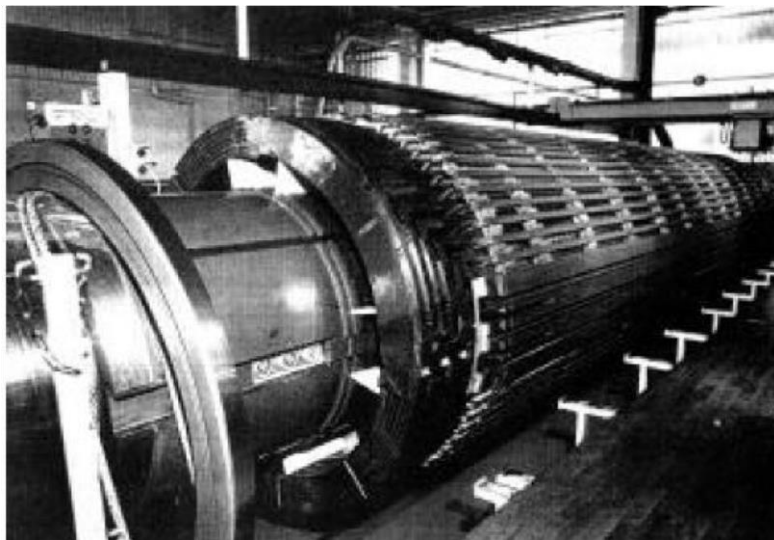


Figure. I.2 : Machine Synchrone à Pôles Lisses

I.4.3 Machine Synchrone à Rotor à Pôles Saillants

Ces machines possèdent un enroulement inducteur monophasé constitué de bobines enroulées autour de pôles ferromagnétiques et mises en série de façon à assurer l'alternance des pôles. On agit sur la forme de l'épanouissement polaire pour obtenir une répartition, proche d'une sinusoïdale, de l'induction dans l'entrefer. Cette structure est ainsi caractérisée par sa simplicité de réalisation et de maintenance.

Par contre, pour des raisons mécaniques, elle ne prête généralement qu'à des applications où la vitesse ne dépasse pas 1000 tours par minute.

La principale difficulté pour l'étude de ces machines est liée à l'anisotropie géométrique (entrefer variable), et donc magnétique du rotor, qui entraîne une dépendance des différentes mutuelles et de la plupart des inductances à la position Θ du rotor par rapport au stator. La réactance d'induit varie alors en fonction de l'état de charge de la machine [7].

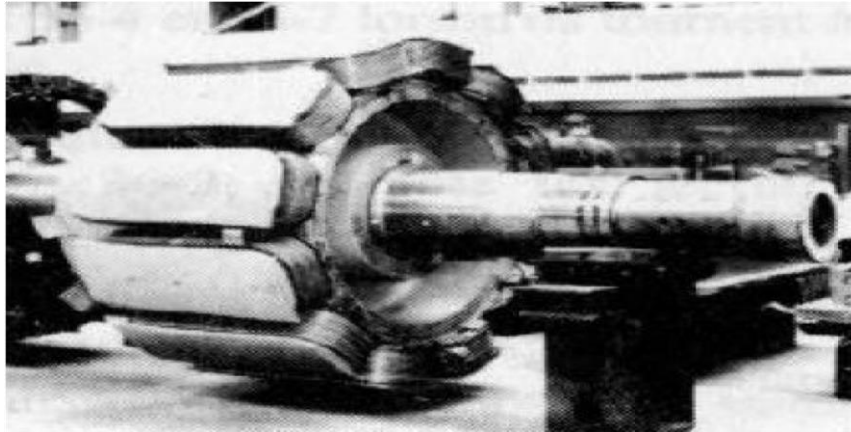


Figure.I.3 : Machine Synchrone à Pôles Saillants

I.4.4 Machine Synchrone à Aimants Permanents

Dans les machines synchrones à aimants permanents, les aimants sont aussi situés sur la partie tournante. Le stator est constitué d'un enroulement triphasé distribué sinusoïdalement. Concernant son fonctionnement, il est basé sur le principe de rotation du champ magnétique en synchronisme avec le rotor ; d'où le nom de machine synchrone à aimants permanents. Dans la plupart des applications, un onduleur est nécessaire pour avoir une alimentation avec une tension et une fréquence variable [7].

I.4.4.1 Présentation de la machine Synchrone à aimants permanents

Les machines à aimants permanents sont largement utilisées dans des applications à haute vitesse, la structure attractive de cette machine est caractérisée par une grande puissance massique, un bon facteur de puissance et un excellent rendement. Néanmoins, la construction du rotor avec des aimants permanents engendre des difficultés particulières au niveau mécanique : les forces centrifuges qui sont appliquées directement sur les aimants risquent d'arracher ces derniers. Sur le plan

thermique où l'échauffement dû aux pertes hystérésis (provenant de la pulsation du flux et les harmoniques du courant) peuvent démagnétiser les aimants [8].

I.4.4.2 Principe de Fonctionnement

Les générateurs à base des machines synchrones sont la source primaire de toute énergie électrique. Entraînées par des turbines hydrauliques, à vapeur ou éoliennes, ces machines constituent les plus gros convertisseurs d'énergie au monde. Elles transforment l'énergie mécanique en énergie électrique avec des puissances allant jusqu'à 1500 MW. L'inducteur de la génératrice synchrone, entraîné mécaniquement, crée un champ à répartition spatiale variable dans les bobinages statoriques. Les forces-électro-motrices

(f-é-m) dans ces bobinages provoquent la circulation des courants induits qui créent à leur tour un champ statorique dans l'entrefer qui tourne à la même vitesse que celui de champ inducteur

I.5 Les Aimants Permanents

Les matériaux utilisés pour leurs propriétés magnétiques se classent en fonction de la largeur de leurs cycles hystérésis (figure I.4) et forment deux grandes familles. La première est celle des matériaux magnétiques durs (à large cycle), appelée communément « aimant permanent » car leurs aimantations ne varient pas sous l'effet d'un champ magnétique extérieur [8]. La seconde est celle des matériaux magnétiques dits « doux » qui ne manifestent de propriétés magnétiques qu'en présence d'une excitation externe.

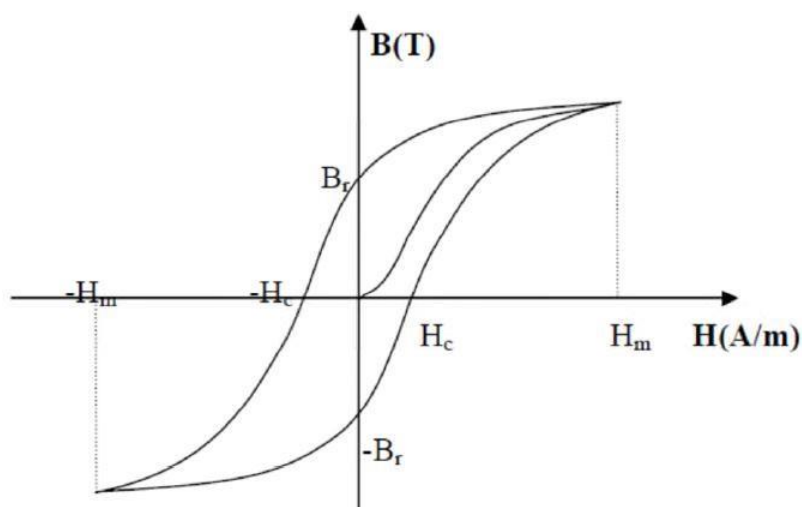


Figure I.4 : La courbe d'hystérésis de l'aimant permanent

I.5.1 Valeur magnétiques et physiques des Aimants

Les aimants ont des valeurs magnétiques et physiques comme suit :

- **Le produit d'énergie ($B \times H$) maximal**

Représente la valeur de la qualité d'un aimant. Plus le produit d'énergie est élevé, plus il y a d'énergie dans le matériau magnétique. Le produit d'énergie ressort des plus grandes valeurs de B et de H indiquées sur la courbe de démagnétisation.

- **La rémanence B_r** est indiquée en **Tesla (T)** ou en **milli tesla (mT)**, et en Gauss (G) dans le système CGS. La rémanence est la magnétisation résiduelle ou la densité de flux qui subsiste dans un aimant qui a été magnétisé en circuit fermé jusqu'à saturation.

- **La force du champ coercitif H_c** : est la force du champ contraire nécessaire en kA/m (Ou Oersted Oe) que l'on doit utiliser pour démagnétiser un aimant. Plus la valeur est élevée, plus la résistance à la démagnétisation est importante. On distingue BHC de JHC . La force du champ coercitif JHC est très significative pour tous les matériaux magnétiques ayant une rémanence faible et une force de champ coercitif élevée, comme c'est le cas du Baffe. JHC résulte du cycle d'hystérésis.

- **La perméabilité** est la capacité de conduction magnétique. Pour presque tous les matériaux magnétiques, la perméabilité est à peine supérieure à celle de l'air, alors qu'elle est plus de mille fois supérieure pour le fer.

- **Le coefficient de température** indique la diminution réversible de la rémanence en % pour 1°C d'accroissement de température à partir de la température ambiante de 20°C .

- **La température maximale d'utilisation** n'est qu'une valeur approximative étant donné qu'elle est fonction du dimensionnement des aimants (rapport L/D). La valeur indiquée n'est obtenue que si le produit de B et H est au maximum (voir "Dimensionnement de l'aimant").

- **La densité** ou la masse spécifique sont indiquées en g/cm^3 . Si le **point de Curie** est atteint, tout matériau magnétique perd son magnétisme [9].

I.5.2 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 : [7]

I.5.2.1 Les Al Nico

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, leur composition métallique est le siège des pertes fer, et le procédé de fabrication induit une direction privilégiée de l'aimantation, qui est la plus grande longueur. Actuellement, en raison de leur basse qualité, ils ne sont presque plus utilisés.



Figure I.5. Aimants AlNiCo

I.5.2.2 Les Ferrites

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



Figure I.6. Aimants ferrites

I.5.2.3 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

Al Nico 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.



Figure I.7. Aimants terres-rares

I.6 Classifications des Machine Synchrone à Aimants Permanents

Il existe plusieurs concepts de machines synchrones à aimants permanents. Nous pouvons classer les MSAP selon le placement des aimants permanents sur le rotor .Leurs différentes structures incluent les machines à flux radial (RFPM) et à flux axial (AFPM). Une vue schématique des deux types de machines à aimants est donnée par (Figure I.8).

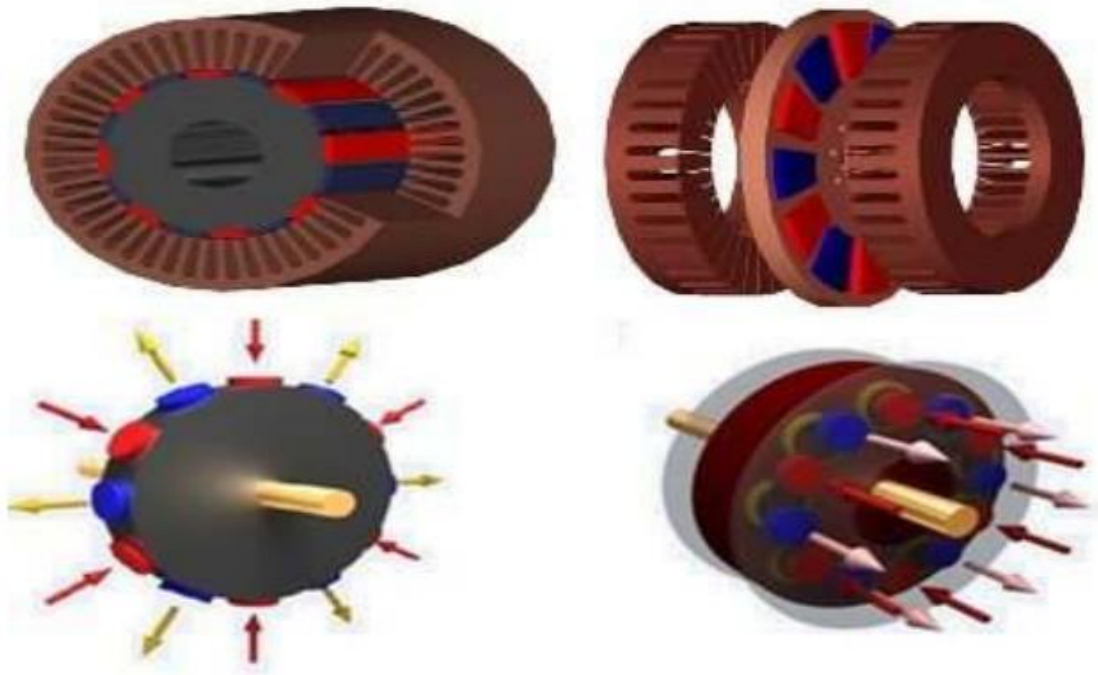


Figure I.8: Vue schématique des machines

I.6.1 Sens d'alimentation

I.6.1.1 Machine Synchrone à Flux Radial

La Machine synchrone à flux radial (RFPM) est la machine à aimants 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 (Figure I.11). Les différents types de rotor de machines à flux radial sont munis d'aimants montés soit en surface, soit encastrés ou enterrés)

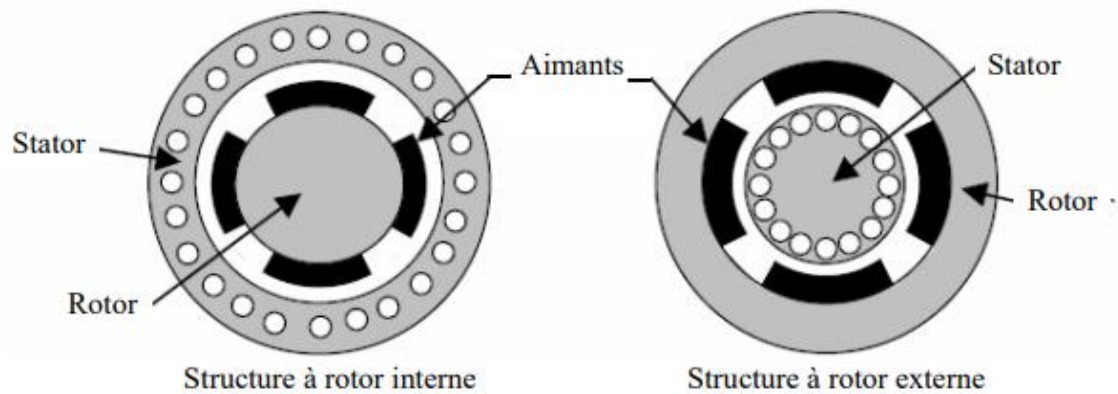


Figure I.9 : Exemple de structures à rotor interne et à rotor externe

a) Machine Synchrone à Aimants avec Rotor Intérieur

La Machine synchrone à aimants avec rotor intérieur à une configuration classique. Le rotor est constitué d'aimants assemblés sur une douille magnétique.

Le stator est similaire à celui de machine triphasée à induction, la figure (I.12) représente le schéma de principe du moteur à rotor intérieur. [13]

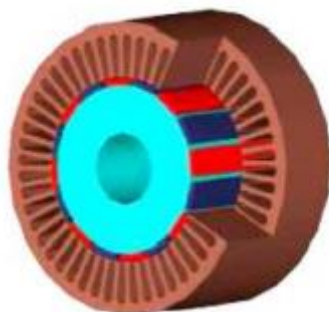


Figure I.10 : Machine synchrone à Aimants avec rotor intérieur.

• Rotor de la Machine à Aimant Permanent

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

- Aimants en surface ;
- Aimants insérés ;

- Aimants enterrés ;
- Aimants à concentration de flux

○ **Machine Synchrone 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.

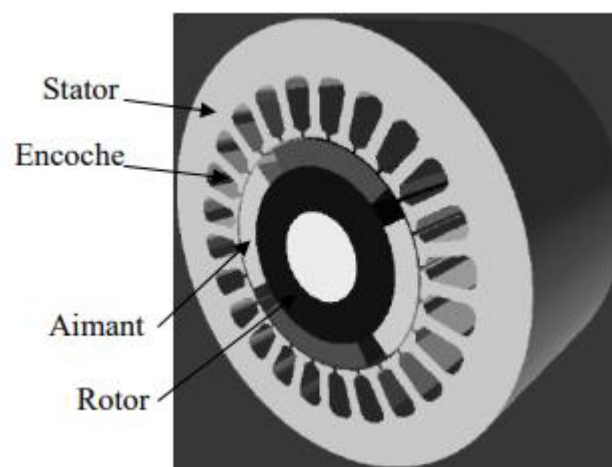


Figure I.11: Machine synchrone à aimants permanents montés en surface.

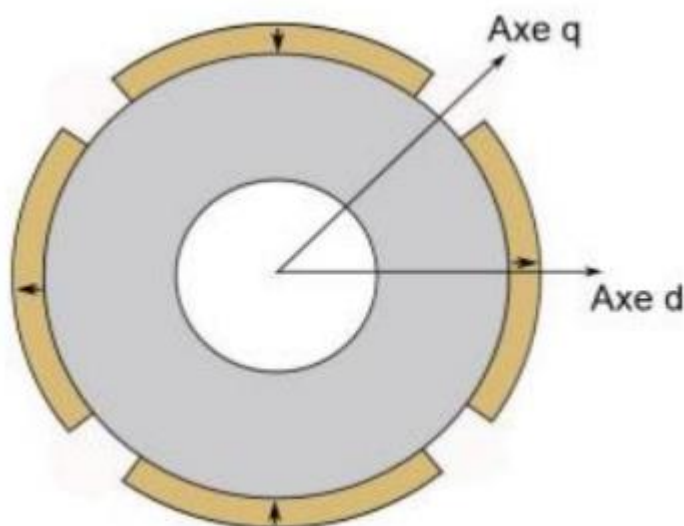


Figure I.12 : Aiment permanent en surface

- **Machine Synchrone 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.

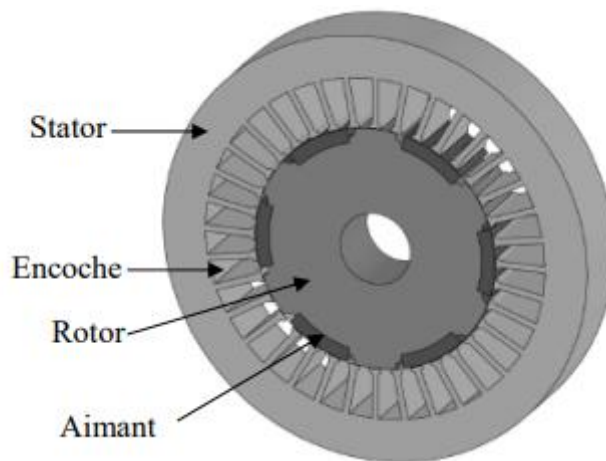


Figure I.13 : Machine synchrone à aimants permanents insérés.

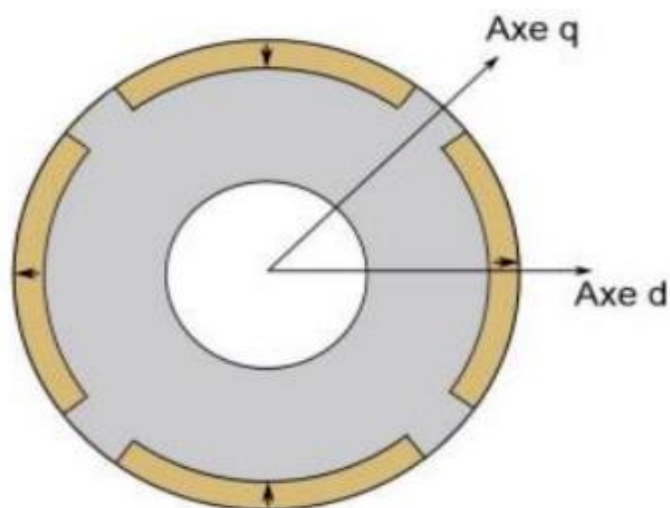


Figure I.14 : Aimants permanents insérés

- **Machine Synchrone à Aimants Permanents enterrés**

Cette structure est déduite de celles avec des aimants permanents montés en surface. On place sur les aimants des pièces polaires 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.

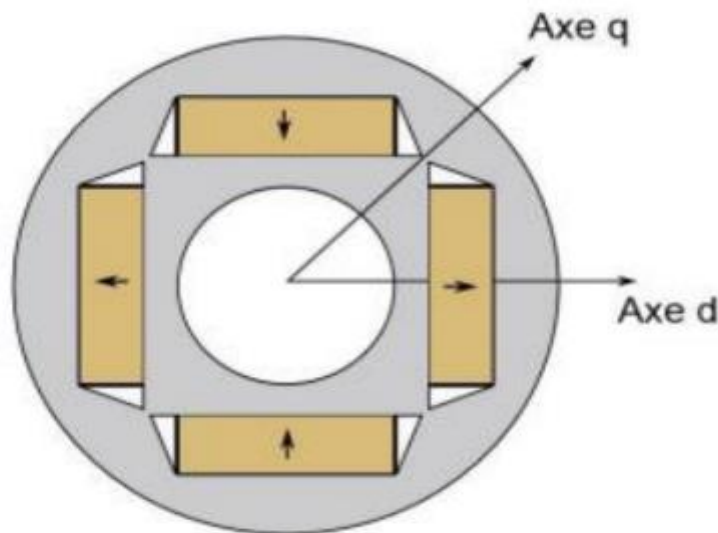


Figure I.15 : Machine synchrone à aimants permanent enterrés

- **Machine Synchrone à Aimants Permanents à concentration de flux (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 [14].

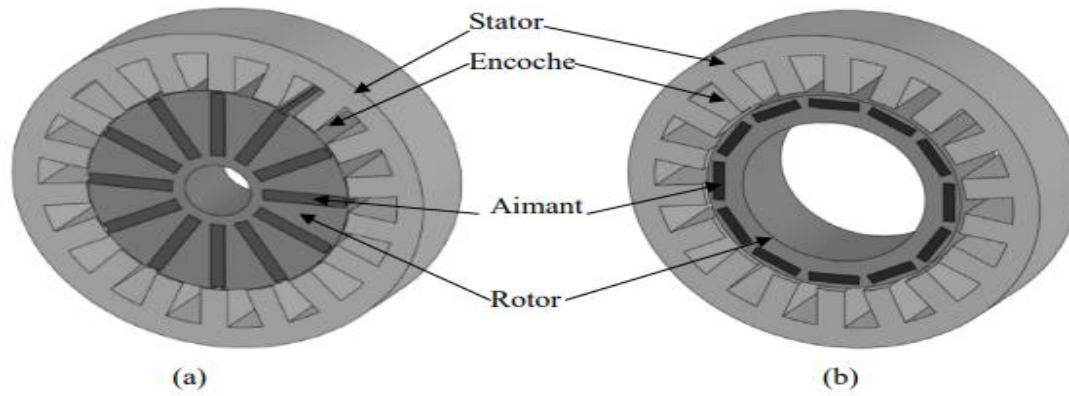


Figure I.16 : Structure à aimants enterrés:(a) avec concentration de flux, (b) structure classique

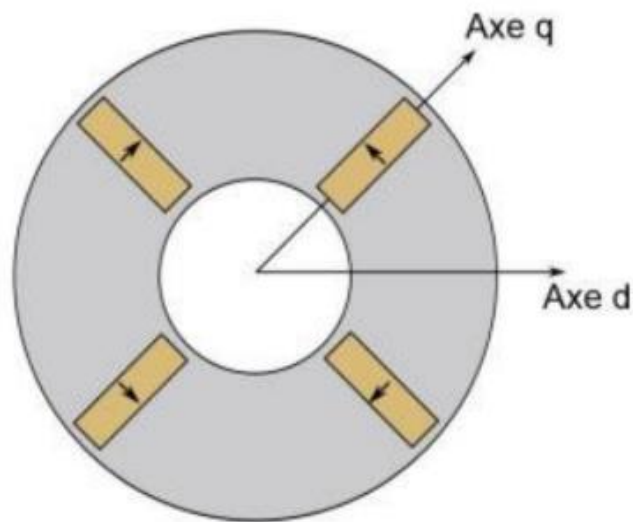


Figure I.17 : Aimants Permanents à concentration de flux

b) Machine Synchrone à Aimants avec Rotor extérieur.

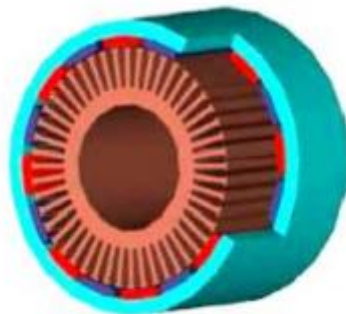


Figure I.18 : Machine Synchrone à Aimants avec Rotor extérieur.

Les tôles au stator ressemblent à celle de l'induit de la machine à courant continu à balais. Ce type de stator est simple à bobiner, car le fil se bobine directement sur le stator section par section [13].

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

Cette structure est fréquemment utilisée dans les applications de ventilation pour son faible cout et sa facilité de fabrication. Cependant les machines à rotor extérieur ne sont utilisées que pour des applications à vitesse constante car le mobile à une inertie importante de par sa position externe.

I.6.1.2 Machine Synchrone à Flux Axial

Les moteurs discoïdes sont pourvus de disque fixes bobinés. Les bobines sont fixées en général sur un circuit imprimé avec les composants électroniques. Sous le circuit une plaque métallique permet au champ de se refermer et un disque mobile supporte les aimants permanents. L'avantage déterminant de la structure discoïde par apport aux structures cylindrique provient de l'optimisation de la surface utile de génération du couple, qui se traduit par une puissance volumique importante [13].

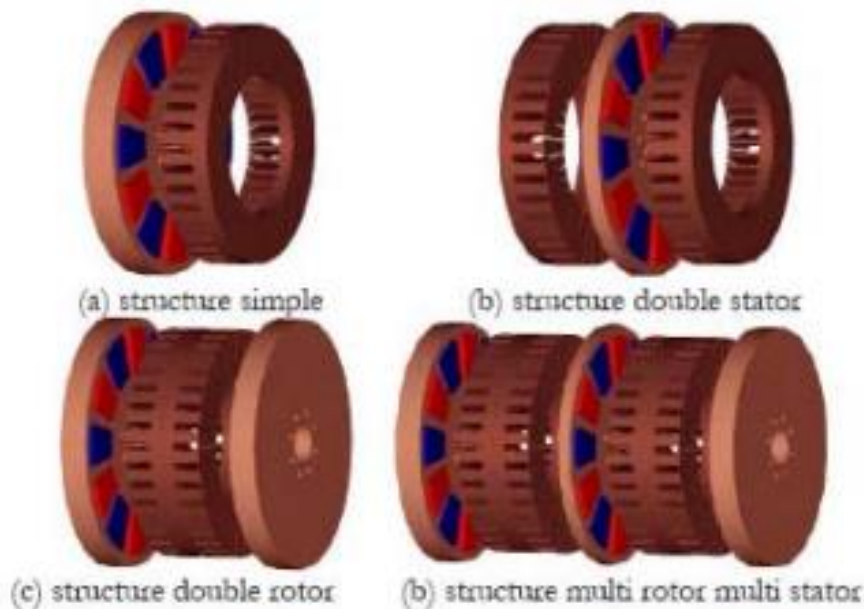


Figure I.19 : Différentes configurations d'une Machine à flux axial.

Ces moteurs sont de construction simple, donc de faible coût. Cette structure fait objet d'une attention particulière, son application touche particulièrement le domaine où la minimisation et la miniaturisation est de rigueur (moteur de disque dur d'ordinateur, tables tournants, ventilateur), la Figure I.21 représente les différentes configurations d'une machine à flux axial. Malgré sa puissance volumique élevée, on souligne toutefois l'existence de contraintes mécaniques liées axiales et des contraintes thermiques dues à la difficulté d'évacuation des pertes joules statorique [13].

I.7 Alimentation de la Machine Synchrone à Aimants Permanents

On distingue deux grandes familles pour les machines synchrones à aimants permanents [15].

- Les machines synchrones à aimants permanents à forces électromotrices (f.é.m.), trapézoïdales, dites BDC ;
- Les machines synchrones à aimants permanents à (f.é.m.), sinusoïdales, dites MSAP.

I.7.1 Moteurs BDCM

Dans ce type de moteur les phases sont alimentées par des courants en créneaux fonction de la position du rotor. Ce régime de fonctionnement est très proche de celui des machines à courant continu sauf que les aimants tournent et la commutation dans les conducteurs statoriques est assurée par l'électronique [13]. Ce type de machines est très utilisé à cause de la simplicité de sa commande une seule boucle de courant suffit, donc peu coûteuse ; cependant un simple retard de commutation peut causer un grand couple pulsatoire. Cela est l'inconvénient majeur qui fait que ce type de machine n'est utilisé qu'aux grandes puissances, et l'onduleur de tension contrôlé en courant.

I.7.2 Les MSAP

Ils sont alimentés par des courants sinusoïdaux, ce qui réduit l'ondulation du couple causée par la commutation, ils ont un fonctionnement plus proche de celui de la machine synchrone classique : le rotor bobiné est remplacé par un rotor à aimants permanents. Dans ce cas on cherche à avoir une (F.é.m.), sinusoïdale [12], ces machines présentent plusieurs avantages comparés aux (BDCM) comme : les capacités de contrôles du couple, rendement ainsi que le fonctionnement dans une large gamme de puissance, pour les entraînements de précision (robotique).

I.8 Avantages de la MSAP

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

- Puissances massiques élevées
- Absence de contacts glissants
- Un bon rendement
- Absence des balais et d'alimentation continue
- Possibilité de supporter des surcharges transitoires importantes et un bon comportement dynamique en accélération et en freinage,
- En fonctionnement générateur, la machine à aimants permanent ne nécessite aucune alimentation électrique,
- Fonctionnement en survitesse.

Cette machine est donc bien indiquée pour les systèmes embarqués et peut être employée pour des systèmes de faible puissance (petits générateurs) ou de puissance plus importante (jusqu'à quelques dizaines de MW en fonctionnement générateur) [16].

I.9 Inconvénients de la MSAP

Comme inconvénients de la MSAP on cite :

- Technologie coûteuse liée au coût des aimants
- Interaction magnétique due au changement de structure
- Ondulations de couple,
- Limites de puissance
- Difficulté de réparation
- Diminution de l'aimantation selon loi logarithmique en fonction du temps

I.10 Les Domaines d'Application

Les générateurs à aimants permanents (GSAP) sont des dispositifs électromécaniques qui convertissent l'énergie mécanique en énergie électrique. Grâce à leurs nombreux avantages, tels que leur rendement élevé, leur fiabilité et leur compacité, ils trouvent une multitude d'applications dans divers secteurs

Énergies renouvelables :

- Éoliennes
- Hydroélectricité
- Photovoltaïque
- Les équipements de technologie de l'information (DVD drives).

Les Transports :

- Véhicules électriques
- Trains

L'industrie :

- Automatisation industrielle
- Pompes et compresseurs
- La propulsion des véhicules électriques et la propulsion des sous-marins
- Systèmes de secours

Les machines-outils, Elles sont utilisées pour des puissances allant de la gamme des microwatts à celle des mégawatts. La figure (1.21) illustre quelques applications de ces machines. Toutefois leur domaine d'utilisation privilégié reste les puissances à quelques dizaines de Kilowatts ou l'aimant permanent permet d'obtenir à taille égale, une induction dans l'entrefer plus élevée que les machines à rotor bobiné [18].

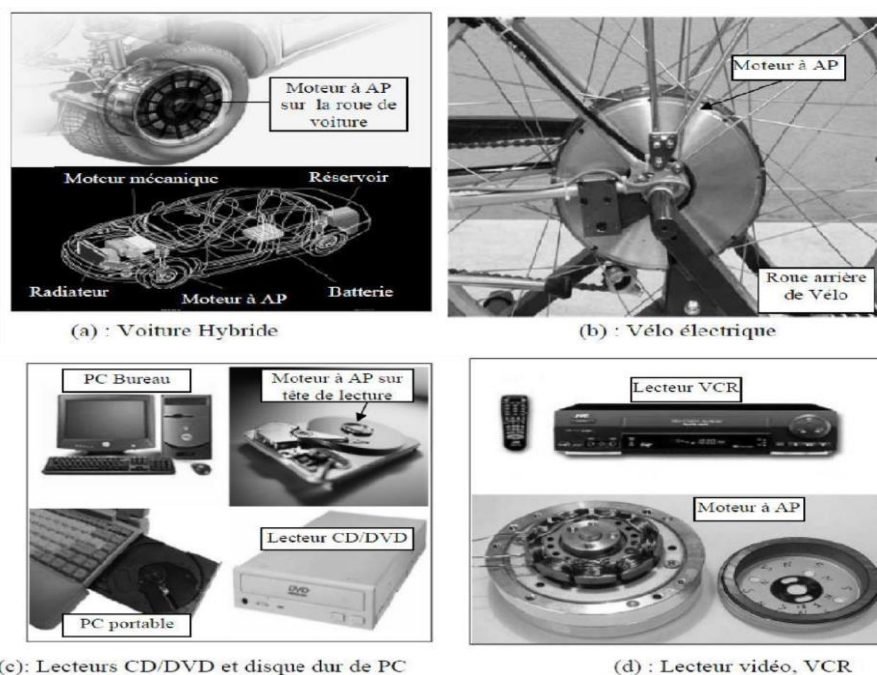


Figure 1.20: Principales applications des Machines Synchrones à Aimants Permanents

I.11 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté la constitution de la machine synchrone et ses différentes conceptions ainsi que ses classifications. Puis on a exposé les différents types d'aimants les plus utilisés pour les machines tournantes. Et à la fin de ce chapitre on a présenté les machines à aimants permanents qui peuvent être construits avec plusieurs configurations rotoriques et leur classification globale en termes de placement des aimants, Le générateur synchrone à aimant permanent fera l'objet de notre étude.

Chapitre II

Modélisation de la Machine

Synchrone à Aimants

Permanents

II.1. Introduction :

Dans cette étude, la simulation de la Génératrice Synchrone à Aimant Permanent se fait à l'aide du logiciel de simulation COMSOL Multiphysics. Ce dernier utilise la méthode des éléments finis pour la résolution des équations du champ électromagnétique.

La méthode des éléments finis est l'une des méthodes numériques les plus utilisées, actuellement, pour résoudre d'une manière efficace les équations aux dérivées partielles des problèmes physiques.

Dans ce chapitre, on s'intéressera à la modélisation de la machine synchrone à aimants permanents par les équations Maxwell. Nous présenterons, succinctement, la méthode des éléments finis sa mise en œuvre matérialisée par le logiciel COMSOL Multiphysics utilisé pour le calcul de cette machine.

II.2. Modélisation de la MSAP à concentration de flux

II.2.1. Hypothèse et simplification

Dans notre travail, nous avons considéré le modèle d'étude (2d) bidimensionnel (les effets d'extrémités sont supposés négligeables).

II.2.2. Description de la machine

La structure à étudier est une Générateur Synchrone à Aimants Permanents

II.2.3. Equations du champ électromagnétique

Dans tous les problèmes qui nécessitent la détermination du champ électromagnétique qui règne à chaque instant aux divers points d'un système physique, en particulier les problèmes relatifs au calcul du champ magnétique dans les machines électriques, on a à utiliser les équations de Maxwell [13].

La loi de Faraday, le théorème d'Ampère et le théorème de Gauss ont été réunis par James Clark Maxwell (1831-1879). Ce savant a été capable de donner la formulation la plus complète de l'électromagnétisme liant les grandeurs électriques et magnétiques dans les quatre équations aux dérivées partielles suivantes : [13]

- **Equation Maxwell-Faraday:**

$$\overrightarrow{rot} \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (II.1)$$

$\vec{E}$: vecteur champ électrique [V/m].

$\vec{D}$: Vecteur induction électrique [C/m₂].

• **Equation Maxwell-Ampère**

$$\overrightarrow{\text{rot}} \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (\text{II.2})$$

Avec :

$\vec{H}$: vecteur champ magnétique.

$\vec{j}$: vecteur Densité de courant [A.m⁻²]

μ_0 : perméabilité magnétique du vide [H/ m]. $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$:

$\frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$: Densité de courant déplacement [A.m⁻²]. Cette dernière est négligeable dans les cas quasi-stationnaires.

$$\overrightarrow{\text{rot}} \vec{H} = \vec{j} \quad (\text{II.3})$$

• **Equation Maxwell-Gauss**

$$\text{div} \vec{D} = \rho \quad (\text{II.4})$$

ρ : Charges volumiques [C/m³].

• **Equation de conservation de flux magnétique**

$$\text{div} \vec{B} = 0 \quad (\text{II.5})$$

$\vec{B}$: Vecteur induction magnétique [T].

II.2.3.1. Les relations constitutives du milieu

La résolution des équations de Maxwell ne peut s'effectuer sans la relation constitutive du milieu. Une relation constitutive décrit localement le comportement des grandeurs électromagnétique dans un matériau donné. [13]

Relation magnétique :

$$\text{Pour les aimants permanents : } \vec{B} = \mu \vec{H} + \vec{B}_r \quad (\text{II.6})$$

$$\text{Pour les milieux ferromagnétiques : } \vec{B} = \mu \vec{H} \quad (\text{II.7})$$

Avec :

$$\mu = \mu_0 \mu_r \quad (\text{II.8})$$

$\vec{B}_r$ Induction magnétique rémanente (cas d'aimants permanents) [T]

μ_r : Perméabilité magnétique relative du milieu.

μ : Perméabilité magnétique absolue du milieu [H/m].

Les relations précédentes sont données dans le cas le plus général : dans un matériau ferromagnétique sans induction rémanente, le terme $\mathbf{B}_r$ de l'équation devient nul.

Dans le cas des aimants permanents, l'induction rémanente $\mathbf{B}_r$ s'exprime en fonction du vecteur aimantation $\mathbf{M}$ comme suit :

$$\vec{B}_r = \mu_0 \vec{M} \quad (\text{II.9})$$

II.2.3.2. Formulation du modèle magnétostatique

La détermination du champ magnétique dans un système peut être obtenue à partir des équations de Maxwell en utilisant, soit le potentiel scalaire ou le potentiel vecteur.

Le domaine d'étude contient plusieurs sources de courants, le potentiel vecteur est alors utilisé [15].

Les équations de Maxwell s'écrivent dans ce cas :

$$\vec{B} = \text{rot} \vec{A} \quad (\text{II.10})$$

$$\text{rot} \vec{H} = \mathbf{j} \quad (\text{II.11})$$

Dans le fer :

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (\text{II.12})$$

Dans les aimants :

$$\vec{B} = \mu \vec{H} + \vec{B}_r \quad (\text{II.13})$$

Le système peut être remplacé par :

$$\text{rot} \left(\frac{1}{\mu} \text{rot} \vec{A} \right) = \vec{j} + \frac{\mu_0}{\mu} \text{rot} \vec{M} \quad (\text{II.14})$$

Dans le cas bidimensionnel le potentiel $\rightarrow$ vecteur magnétique $\vec{A}$ et la densité de courant n'ont qu'une seule composante suivant l'axe OZ, donc

$$\vec{A} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ A \end{bmatrix} \vec{j} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ j \end{bmatrix} \quad (\text{II.15})$$

L'induction magnétique ainsi que l'aimantation du matériau n'ont que deux composantes qui varient dans le plan (X, Y) et le problème peut être considéré bidimensionnel

$$\vec{B} = \begin{bmatrix} \frac{\partial A}{\partial y} \\ \frac{\partial A}{\partial x} \\ 0 \end{bmatrix} \vec{M} = \begin{bmatrix} Mx \\ My \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\text{II.16})$$

Après la transformation de l'équation, on obtient l'équation différentielle à résoudre :

$$\frac{1}{\mu} \left(\left(\frac{\partial^2 A}{\partial X^2} \right) + \left(- \frac{\partial^2 A}{\partial Y^2} \right) \right) = J + \frac{\mu_0}{\mu} \left(\left(\frac{\partial My}{\partial x} \right) - \left(\frac{\partial Mx}{\partial y} \right) \right) \quad (\text{II.17})$$

Dans le cas de la machine à aimants permanents **J** représente la densité de courant dû au courant dans le bobinage statorique. La résolution de l'équation (II .17), en spécifiant les conditions aux limites du domaine d'étude, est effectuée par la méthode des éléments finis.

II.2.3. 3. Modélisation de l'aimant permanent

Les aimants peuvent être représentés soit par un modèle Ampérien dans le cas où l'on utilise le potentiel vecteur, ou par un modèle Colombien si le potentiel scalaire est utilisé.

L'aimant dans le modèle Ampérien peut être représenté par deux densités de courant :

Une densité volumique [15] :

$$\vec{j}_{va} = \overrightarrow{rot} \vec{M} \quad (\text{II.18})$$

Une densité superficielle :

$$\vec{j}_{sa} = \vec{n} \wedge \vec{M} \quad (\text{II.19})$$

Où $\vec{n}$ est le vecteur normal à la surface de l'aimant.

Dans notre étude, les aimants utilisés présentent une aimantation radiale rigide et uniforme de sorte que :

$$\overrightarrow{rot} \vec{M} = 0 \quad (\text{II.20})$$

Ce qui donne :

$$\vec{j}_{va} = 0 \quad (\text{II.21})$$

Dans ces conditions le modèle Ampérien en bidimensionnel équivalent à l'aimant peut être représenté par des densités superficielles de courants situés sur les flancs des aimants et circulant suivant l'axe $\vec{az}$

II.2.3.4. L'équation à résoudre dans les différentes parties de la machine

• Dans les aimants

$$\vec{B}r + \mu_0 \vec{M} \Rightarrow \vec{M} = \frac{\vec{B}r}{\mu_0} \Rightarrow \text{rot} \left(\frac{\vec{B}r}{\mu_0} \right) \text{rot}(\vec{M}) = \left(\frac{\partial M_y}{\partial x} \right) - \left(\frac{\partial M_x}{\partial y} \right) \quad (\text{II.22})$$

$$\frac{1}{\mu} \left(\left(-\frac{\partial^2 A}{\partial x^2} \right) + \left(-\frac{\partial^2 A}{\partial y^2} \right) \right) = \frac{\mu_0}{\mu} \left(\left(\frac{\partial M_y}{\partial x} \right) - \left(\frac{\partial M_x}{\partial y} \right) \right) \quad (\text{II.23})$$

Comme : $\mu_0 = \mu : \left(\frac{\partial M_y}{\partial x} \right) - \left(\frac{\partial M_x}{\partial y} \right) = 0 \quad (\text{II.24})$

Avec :

μ : Perméabilité absolue de l'aimant

M_x et : Aimantation dans les directions x et y

• Dans l'entrefer

$$\frac{1}{\mu} \left(\left(-\frac{\partial^2 A}{\partial x^2} \right) + \left(-\frac{\partial^2 A}{\partial y^2} \right) \right) = 0 \quad (\text{II.25})$$

Avec μ : Perméabilité absolue de fer

• Dans le fer

- Si $\mu = \text{variable} : \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial y} \right) = 0 \quad (\text{II.26})$
- Si $\mu = \text{cst} : \frac{\partial^2 A}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A}{\partial y^2} = 0$

II.3. La méthode des éléments finis

II.3.1. Présentation la méthode des éléments finis

Historiquement, les premiers développements de la méthode des éléments finis ont été proposés par Richard Courant dans les années 1940, mais ce sont les mécaniciens qui ont développé, popularisé et démontré l'efficacité de cette méthode dans les années 1950-1960.

En 1970, Silvester et son équipe de l'université MC Gill à Montréal se sont intéressés, à l'adaptation de cette méthode, à la résolution des problèmes elliptiques de l'Electrotechnique.

La méthode des éléments finis est fréquemment utilisée pour modéliser précisément et finement des systèmes électrotechniques. Cette méthode permet de tenir compte de la géométrie de la machine et permet une approche systématique des problèmes magnétiques.

De plus un couplage entre les grandeurs électriques, mécaniques et magnétique peut être réalisé. [13]

Les éléments finis permettent également une étude tridimensionnelle, ce qui apporte une très grande finesse dans la connaissance du système.

La méthode des éléments finis est l'une des méthodes numériques les plus utilisées actuellement pour résoudre d'une manière efficace les équations différentielles aux dérivées

Partielles des problèmes physiques. Cette méthode s'organise autour de ces étapes principales :

- Définition des paramètres de la structure
- Création des paramètres qui définissent la géométrie
- Définition des zones et attributions des matériaux
- Application des conditions aux limites
- Création du maillage de la structure

Les différentes étapes de la résolution par la méthode des éléments finis des équations du champ électromagnétique dans un domaine bien défini sont représentées par l'organigramme suivant :

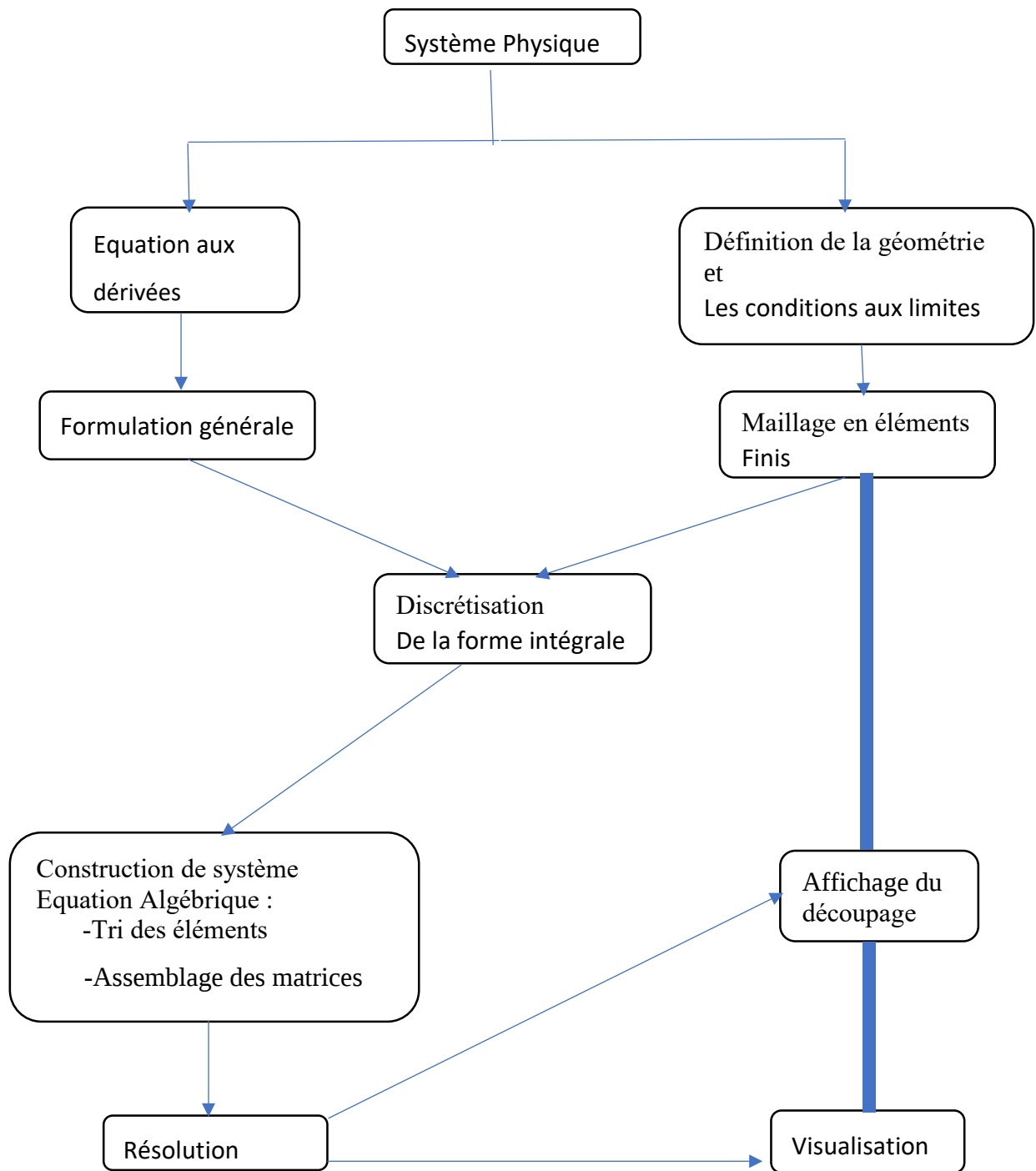


Figure. II.1. Organigramme de la méthode des éléments finis [22]

- **Conditions aux limites**

Conditions aux limites Généralement, on rencontre quatre types.

- **Condition de type Dirichlet**

Cette condition impose la valeur exacte de l'inconnue (à savoir le potentiel vecteur) sur la frontière considérée du domaine de résolution.

$$A = g_0 \quad (\text{II.27})$$

Avec :

A : Fonction inconnue du problème

g_0 : Une constante

On parle de condition de Dirichlet homogène quand $A=0$ le long de la frontière considérée du domaine.

- **Condition de type Neumann**

C'est une condition qui nous renseigne sur la valeur de la composante normale de l'inconnue sur la limite du domaine étudié.

$$\frac{\partial A}{\partial n} = h_0 \quad (\text{II .28})$$

Habituellement, on parle de Neumann homogène sur les plans de symétrie, quand

$\frac{\partial A}{\partial n} = 0$, le long de la frontière considérée du domaine.

- **Condition mixte Dirichlet-Neumann (de robin)**

C'est la combinaison des deux types de conditions aux limites. Elle s'exprime par :

$$aA + b \frac{\partial A}{\partial n} = c \quad (\text{II .29})$$

Avec :

a et b : Constantes définies sur le domaine d'étude C : La valeur de l'inconnue sur la frontière.

- **Condition de périodicité et d'anti-périodicité** Elles sont dites aussi cycliques et anticycliques

$$A|_{\Gamma} = k. A|_{\Gamma} + d\Gamma \quad (\text{II.30})$$

Avec :

A : fonction inconnue

$d\Gamma$: Période spatiale (suivant le contour Γ).

$K : 1$: Cyclique

$K=-1$: anticyclique.

Ces deux conditions sont utilisées pour exploiter la symétrie inhérente dans quelques problèmes, afin de réduire les dimensions du domaine d'étude, ainsi que dans ceux à frontière ouvertes [13].

II.3.2. Le principe du calcul par éléments finis

Le principe du calcul par éléments finis est de diviser la structure de la machine étudiée en nombre important d'éléments de dimensions finies puis de résoudre les équations de Maxwell sur chacun de ces éléments. Les conditions aux limites de chaque élément sont fixées par les éléments voisins. La combinaison de tous ces éléments de

calcul permet alors de connaître l'état magnétique de la structure complète et donc d'effectuer des calculs de flux, de force, et d'inductance...

L'intérêt de cette méthode de calcul est qu'elle permet, comme tout calcul théorique, d'avoir accès aux trois étapes de manière indépendante. La méthode des éléments finis discrétise une formulation intégrale de l'équation aux dérivées partielles pour conduire à un système d'équations algébriques qui fournit une solution approchée du problème étudié. Le domaine d'étude est décomposé en un nombre fini d'éléments polygonaux qui forment le maillage. La valeur du potentiel vecteur est déterminée sur tous les sommets des polygones (les sommets sont appelés les nœuds du maillage). En employant des fonctions d'interpolation appropriées, la solution en tout point du domaine sera déterminée en fonction des valeurs aux sommets de l'élément. Pour transformer un système d'équations aux dérivées partielles par une formulation intégrale, les processus les plus souvent utilisés sont la méthode des résidus pondérés ou la méthode variationnelle.

II.3.3. Les étapes principales de la mise en œuvre de la méthode des éléments finis

La mise en œuvre de la méthode des éléments finis repose sur trois étapes essentielles :

- Formulation des équations aux dérivées partielles à partir des lois physiques.
- Transformation des équations en un système algébrique qu'il convient de résoudre pour obtenir la solution du problème posé.
- Exécution des problèmes sur ordinateur à partir de logiciels appropriés.

II.3.4. Discrétisation et approximation

L'idée fondamentale de la méthode des éléments finis est de subdiviser la région à étudier en petites sous régions appelées élément finis constituant le maillage. Les fonctions inconnues sont approximées sur chaque élément fini par simple fonction appelée fonction de forme qui est continue et définie sur chaque élément seul.

La forme des éléments est directement liée à la dimension du problème (2D ou 3D).

Pour une géométrie en (2D), on utilise généralement des triangles ou des quadrilatères ; pour une géométrie en (3D), on utilise les tétraèdres, les prismes ou les hexaèdres.

La discrétisation est une étape importante dans l'analyse éléments finis car la précision des résultats dépend de la méthode de la méthode de discrétisation et de finesse de cette subdivision en sous-domaines.

La fonction inconnue est approchée dans chaque élément par une fonction d'interpolation nodale, faisant intervenir les valeurs de l'inconnue aux nœuds de ce S éléments ainsi les coordonnées géométriques de ces nœuds.

L'inconnue A est décrite dans chaque élément e par une combinaison linéaire des valeurs

Al aux nœuds :

$$A^e = \sum_{j=1}^3 a_j^e A_j^e \quad (\text{II.31})$$

Les a sont les fonctions de pondération devant vérifier :

$$a_j^e(X_j, Y_j) = \begin{cases} 1 & \text{si } i = j \\ 0 & \text{si } i \neq j \end{cases} \quad (\text{II.32})$$

Dans le cas du calcul du champ dans les structures électromagnétiques, les éléments de forme triangulaire sont les plus utilisés. Cette subdivision exclusivement triangulaire du premier ordre a l'avantage de s'adapter à toute configuration géométrique et permet de traiter des expressions simples.

Dans le cas de l'élément triangulaire représenté sur la figure, les fonctions de pondération sont :

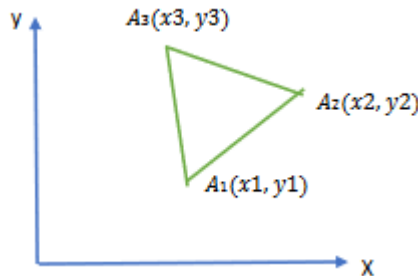


Figure II.2 : Élément triangulaire

$$a_1 = \frac{1}{2\Delta} [(x_2 y_3 - x_3 y_2) + (y_2 - y_3)x + (x_3 - x_2)y] \quad (\text{II.33})$$

$$a_2 = \frac{1}{2\Delta} [(x_3 y_1 - x_1 y_3) + (y_3 - y_1)x + (x_1 - x_3)y] \quad (\text{II.34})$$

$$a_3 = \frac{1}{2\Delta} [(x_1 y_2 - x_2 y_1) + (y_1 - y_2)x + (x_2 - x_1)y] \quad (\text{II.35})$$

Où :

$$\Delta = \begin{vmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \end{vmatrix} = (x_1 y_2 - x_2 y_1) + (x_3 y_1 - x_1 y_3) + (x_2 y_3 - x_3 y_2) \quad (\text{II.36})$$

D'où : $\Delta = [(x_1 y_2 - x_2 y_1) + (x_3 y_1 - x_1 y_3) + (x_2 y_3 - x_3 y_2)]/2 \quad (\text{II.37})$

II.3.5. Formulation éléments finis

La MEF transforme les EDP de la grandeur recherchée en système d'équations Algébriques dont la solution fournit une approximation de cette grandeur en une grille discrète de points du plan ou de l'espace. Les éléments finis procèdent par une fonction intégrale du problème physique associé. Ce dernier peut se mettre sous la forme :

$$(u) = f \quad \text{Sur le domaine}$$

$$\Omega. (u) = \mu_0 \quad \text{Sur la frontière } \tau$$

Ou :

L est un opérateur différentiel,

G est opérateur qui définit une condition à la limite,

f et μ_0 sont des fonctions respectivement définies sur Ω et τ ,

Et u est une fonction inconnue. Pour obtenir le système algébrique, on peut utiliser la méthode variation elle ou la méthode des résidus pondérés. La méthode variationnelle traite une fonctionnelle d'énergie équivalente au problème différentiel, définie par intégrale faisant appel à la fonction et ses dérivées. La méthode des résidus pondérés (méthode de Galerkin) consiste à chercher la solution approchée du problème en partant directement des EDP. LA méthode

Galerkin (appelée également méthode projective) consiste à choisir des fonctions u qui annule, en tout point du domaine, la forme intégrale suivante :

$$(u) = \int \phi_i [(u) - f)] \quad (\text{II .38})$$

ϕ_i :Fonction de pondération ou de projection.

La méthode la plus employée est la méthode de Galerkin car utilisé des fonctions de Projection ϕ_i , identique aux fonctions de forme a_i de la fonction d'approximation, pour obtenir un système algébrique symétrique dont la résolution devient relativement rapide.

Cette méthode s'applique indépendamment de connaissance de la fonctionnelle d'énergie [21].

D'où :

$$(u) = \int a_i [(u) - f)] = 0 \quad (\text{II .39})$$

: Fonction de pondération, elle est identique à la fonction d'approximation

II.3.6. Résolution du modèle magnétostatique par la MEF

Résoudre par éléments finis les équations aux dérivées partielles qui décrivent le modèle magnétostatique, présenté précédemment, revient à appliquer la méthode projective de Galerkin [23] :

$$\iint a_i \times EDP d\Omega = 0 \quad (\text{II.40})$$

Dans notre étude modèle magnétostatique et coordonnées cartésiennes.

$$\iint a_i \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A_z}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) \right] dx dy = \iint a_i \left[\frac{\mu_0}{\mu} \left(\frac{\partial M_y}{\partial x} - \frac{\partial M_x}{\partial y} \right) \right] dx dy \quad (\text{II.41})$$

L'application du théorème de Green à l'équation (II.24) permet à la fois d'évacuer les dérivées secondes de son premier terme et d'explicitier les conditions aux limites :

$$\iint a_i \left[-\frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A_z}{\partial y} \right) \right] dx dy = \iint \frac{1}{\mu} \left[\frac{\partial a_i}{\partial x} \frac{\partial A_z}{\partial x} + \frac{\partial a_i}{\partial y} \frac{\partial A_z}{\partial y} \right] dx dy - \int a_i \frac{1}{\mu} \frac{\partial A_z}{\partial n} d\Gamma \quad (\text{II.42})$$

Dans le cas des conditions aux limites de type Dirichlet $A = \text{constante}$ ou type Neumann $\frac{\partial A}{\partial n} = 0$ (dite condition Neumann homogène), le terme sur la frontière s'annule. L'équation devient alors :

$$-\iint \frac{1}{\mu} \left[\frac{\partial a_i}{\partial x} \frac{\partial A_z}{\partial x} + \frac{\partial a_i}{\partial y} \frac{\partial A_z}{\partial y} \right] dx dy = \iint a_i \left[\frac{\mu_0}{\mu} \left(\frac{\partial M_y}{\partial x} - \frac{\partial M_x}{\partial y} \right) \right] dx dy \quad (\text{II.43})$$

Sachant que le potentiel vecteur magnétique A_z peut-être discrétisés sous la forme

$$A_z = \sum_{j=1}^n a_j A_{zj} \quad (\text{II.44})$$

Pour tous les nœuds du domaine d'étude. Cela nous amène à écrire l'équation (II.43) comme suit :

$$-\iint \frac{1}{\mu} \left[\frac{\partial a_i}{\partial x} \frac{\partial a_j}{\partial x} + \frac{\partial a_i}{\partial y} \frac{\partial a_j}{\partial y} \right] A_{zj} dx dy = \iint a_i \cdot j_{sz} dx dy + \iint a_i \left[\frac{\mu_0}{\mu} \left(\frac{\partial M_y}{\partial x} - \frac{\partial M_x}{\partial y} \right) \right] dx dy \quad (\text{II.45})$$

On obtient en finalité un système algébrique matriciel à résoudre :

$$[I][A] = [I] + [M] \quad (\text{II.46})$$

$$I_{ij} = -\iint \frac{1}{\mu} \left[\frac{\partial a_i}{\partial x} \frac{\partial a_j}{\partial x} + \frac{\partial a_i}{\partial y} \frac{\partial a_j}{\partial y} \right] dx dy \quad (\text{II.47})$$

$$J_i = \iint a_i \cdot j_{sz} dx dy \quad (\text{II.48})$$

$$M_i = \iint a_i \left[\frac{\mu_0}{\mu} \left(\frac{\partial M_y}{\partial x} - \frac{\partial M_x}{\partial y} \right) \right] dx dy \quad (\text{II.49})$$

A : Inconnues du domaine. Ω

II.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la méthode des éléments finis et appliqué les équations de maxwell sur notre machine GSAP.

Nous avons présenté le modèle bidimensionnel de la machine étudiée (Générateur Synchrone à Aimants Permanent) en utilisant le potentiel vectoriel magnétique.

Au chapitre III seront présentés la description du logiciel de calcul utilisé et exploités et les résultats du calcul numérique de notre machine.

Chapitre III

Résultats de Simulation de la génératrice à Rotor à Aimants Permanent

III. 1 Introduction

Le chapitre suivant a pour objectif de simuler le comportement magnétodynamique d'un Générateur synchrone à aimant permanent. Les résultats de simulations à caractère électrique et magnétique seront largement présentés. Ces résultats sont obtenus à partir du logiciel COMSOL Multiphysics qui est basé sur la méthode des éléments finis adoptée comme une méthode de résolution des équations aux dérivées partielles caractéristique au problème traité. L'objectif de ce travail est d'étudier l'influence de la vitesse de rotation et l'induction magnétique rémanente sur la force électromotrice développée par le Générateur à Rotor à Aimant Permanent (GSAP) par l'utilisation du logiciel COMSOL-Multiphysics. Ce dernier permet de calculer les différentes grandeurs électromagnétiques tels que : le potentiel vecteur magnétique, l'induction magnétique, le champ magnétique et la force électromotrice.

III.2 Prise en main du logiciel

Le processus de modélisation et de simulation numérique sous Comsol Multiphysics implique plusieurs étapes :

- La définition globale des paramètres et des variables liées au modèle.
- La définition de sa géométrie.
- La prise en compte des différents phénomènes physiques qui peuvent exister dans le problème considéré.
- La résolution du problème à l'aide d'un des différents solveurs.
- La visualisation des résultats

Lors du lancement de COMSOL, l'assistant Modelé (Model Wizard) permet de définir toutes les étapes de la modélisation brièvement évoquées ci-dessus. Ces étapes sont les suivantes :

- Exécutez l'Assistant Modelé ce qui implique de choisir le système de coordonnées pour le modèle, la physique pertinente au problème, et le type d'études que l'on souhaite effectuer (stationnaire ou en fonction du temps).
- Définir les paramètres, les équations et les variables pertinentes pour le modèle (dans le répertoire Définitions Globales).
- Définir la géométrie du modèle (Geometry).
- Sélectionnez le ou les matériaux adéquats du modèle dans le répertoire (Materials).

- Choisir les conditions initiales et aux limites de votre modèle pour chaque physique utilisée.
- Choisir la taille des éléments à utiliser pour le maillage ainsi que les différents types de maillage qui existent.
- Régler les paramètres du solveur et lancer les calculs dans le répertoire études (Study).
- Afficher les résultats souhaités de la manière la plus significative dans le répertoire résultat (Result)

III.3. Les potentialités et les performances de COMSOL Multiphysics :

Les potentialités de Comsol Multiphysics sont nombreuses et cela dépend du nombre d'application qui permet de résoudre grâce à son environnement complet pour le calcul scientifique. Il est capable de coupler et de résoudre des équations dans différents domaines tels que la mécanique des fluides et le transfert thermique, l'électromagnétisme, la dynamique des fluides et la chimie, MEMS et Mécanique des Structures. Il offre également plusieurs solveurs de très haut niveau de performance capable de traiter des problèmes avec des temps de résolution optimaux. Ceci et d'autres caractéristiques font de COMSOL un environnement inégalé de modélisation pour la conception industrielle, la recherche & développement et l'enseignement. COMSOL a été utilisé pendant cette étude pour modéliser et simuler numériquement une Générateur synchrone à aimants permanents.

III.4. Définition des paramètres de la GSAP :

Premièrement, il faut définir les paramètres physiques qui définissent le domaine d'étude : longueur de la génératrice (GSAP), la vitesse de rotation qui entraîne la cette génératrice, etc

Nom	Expression	Valeur	Description
rpm	60[1/min]	1[1/s]	Tours par minute
A	$\pi \cdot (1.5[\text{cm}])^2$	(7.068583e-05)	Section transversale du fil du stator
L	0.4[m]	0.4[m]	Longueur du générateur
NN	1	1	Nombre de tours dans le bobinage du stator

Figure III.1 : Fenêtre de paramètres

III.4.1. Construction géométriques de la machine étudiée :

La première chose à faire une fois le programme ouvert est de dessiner la géométrie de notre génératrice étudiée

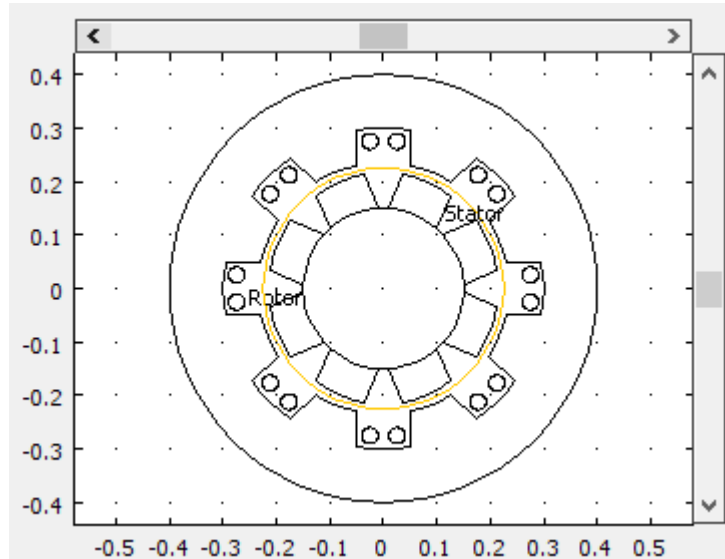


Figure III.2. La géométrie de la génératrice étudiée (GSAP).

III.4.2 Affectation des propriétés physiques de chaque domaine :

Le but ici est d'affecter les propriétés physiques dans chaque domaine d'étude tels que : la conductivité électrique, la perméabilité magnétique etc. Les paramètres sont évidemment liés à notre modèle physique étudié. Pour résoudre l'équation aux dérivées partielles du problème en question, il est nécessaire de définir un certain nombre de conditions aux limites à chaque frontière de domaine est associé un segment orienté. Il est possible de donner des valeurs de condition aux limites pour chacun de ces segments. Les options seront différentes suivant qu'il s'agisse ou non d'une frontière intérieure au système.

III.4.3 Paramètres et calcul du maillage :

Le logiciel COMSOL Multiphysics propose des outils de maillage automatique. On peut également définir une séquence de maillage, c'est-à-dire on peut raffiner le maillage dans une région bien défini pour la précision de calcul.

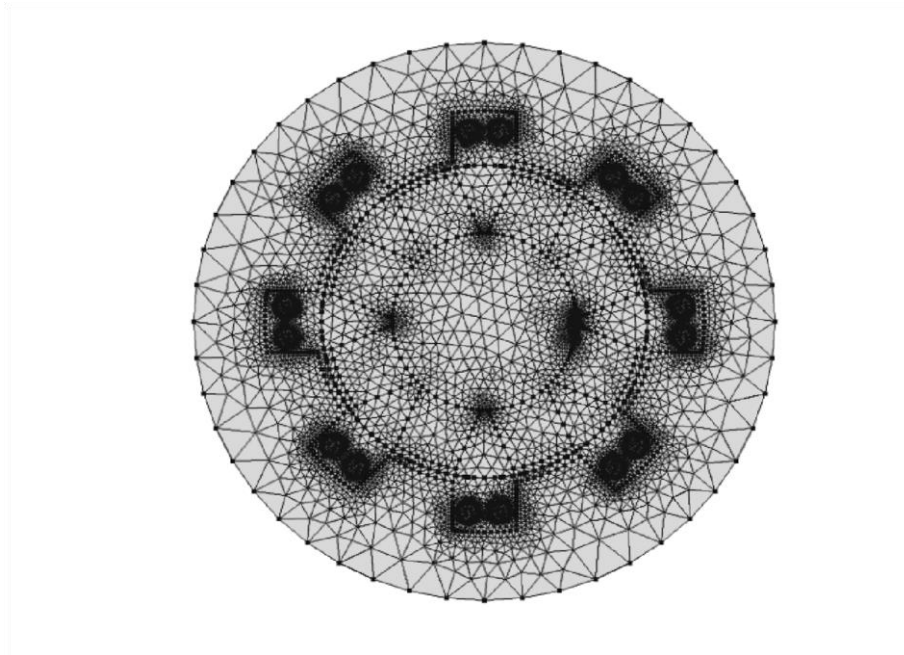
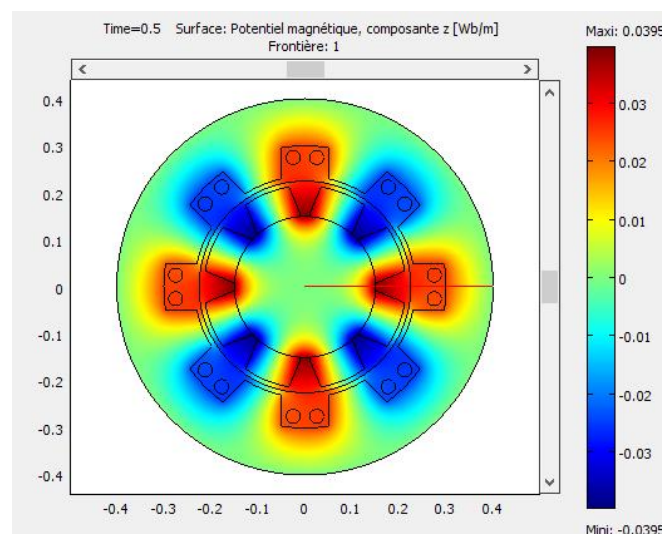


Figure III.3 Le maillage du domaine d'étude.

III.4.4 Résolution du problème :

Lorsque le problème est complètement défini, l'étape suivante est de résoudre l'équation magnétodynamique dans notre génératrice étudiée. Il est possible d'accéder à au menu qui offre le logiciel COMSOL-Multiphysics pour choisir la méthode de résolution des équations algébriques obtenus par la méthode des éléments finis. De même, lors de la résolution d'un problème multi- physique, il est possible de ne résoudre que pour une certaine partie des variables.

III .5 Résultats de simulation :



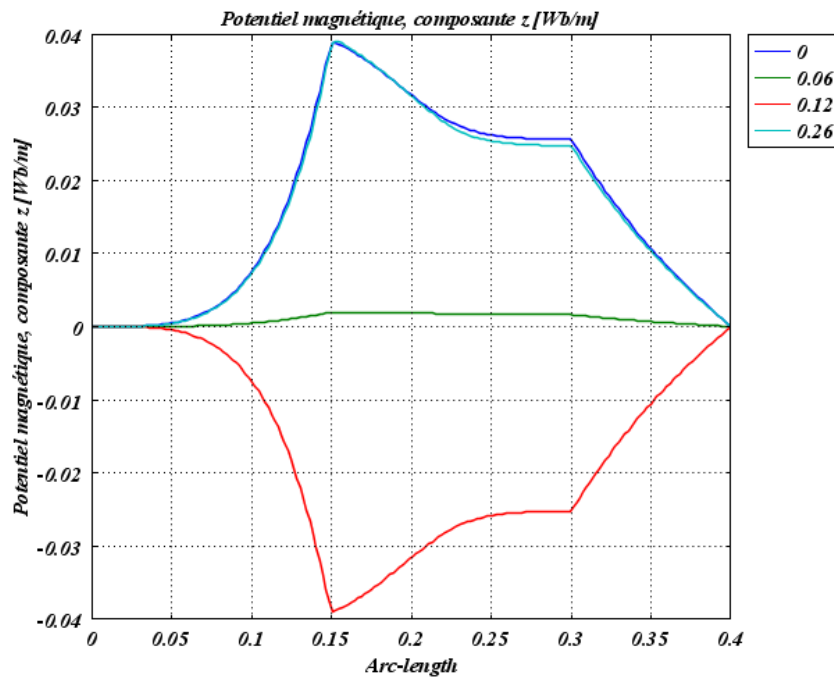
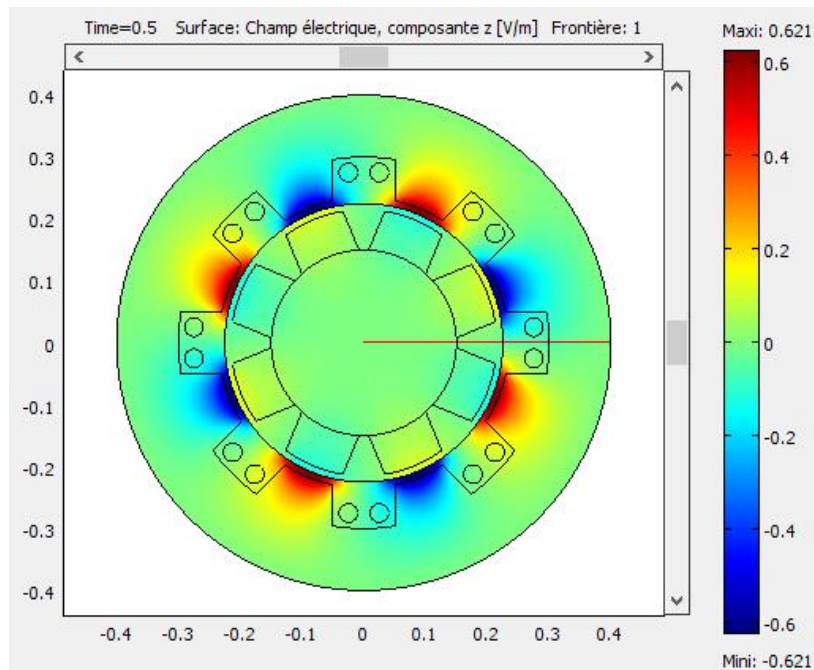
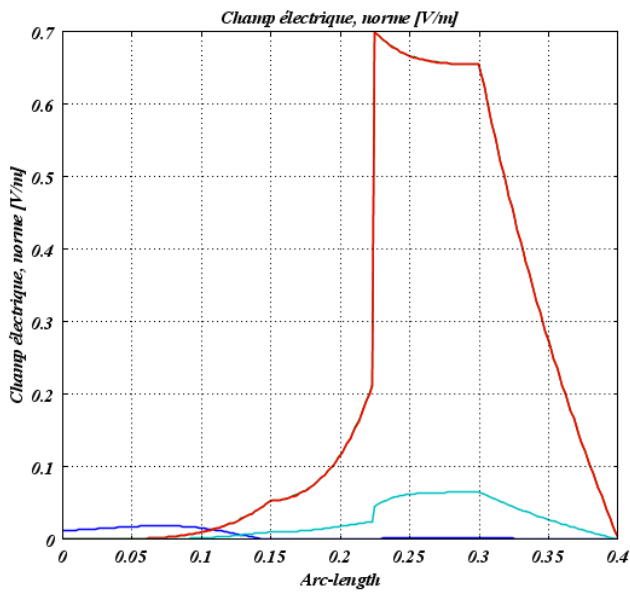


Figure III.4 Potentiel magnétique, composante z [Wb/m]

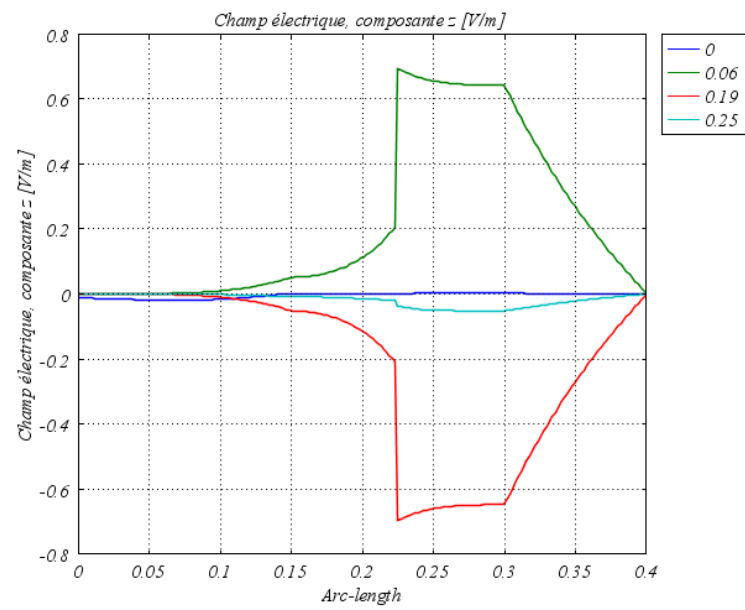
Dans les temps (0 et 0.06 s ,0.12 s 0.26 s)

D'après ces résultats, nous remarquons que la distribution de potentiel vecteur magnétique est intense aux voisinages des aimants permanents et des bobines du stator, il atteint des valeurs maximales à cause de la présence de l'induction magnétique rémanente. Par contre la distribution de potentiel vecteur magnétique dans l'air est faible. On voit bien que les vecteurs de l'induction magnétique sont canalisés dans le circuit magnétique du stator à cause de la perméabilité magnétique importante du matériau. Nous remarquons aussi que la distribution de potentiel vecteur magnétique devient plus en plus intense avec l'augmentation de l'induction rémanente. On peut dire que le potentiel vecteur magnétique est proportionnel à l'induction magnétique rémanente





a

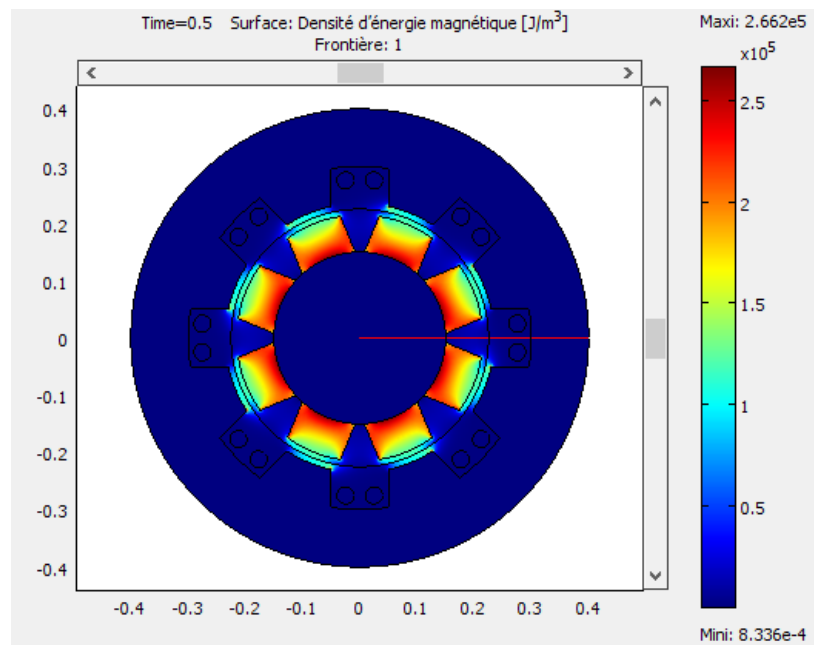


b

Figure III.5 Champ électrique composant z (a) et norme (b) [V/m]

Où l'on remarque un changement du champ électrique, compris entre 0,7 V/m valeur maximale et -0,7 V/m valeur minimale sur l'entrefer statorique dans le temps 0 s le champ Presque 0 V/m.

Et en 0.06 et 0.19 s le champ Il est égal à 0,7 V/m mais du signal opposé



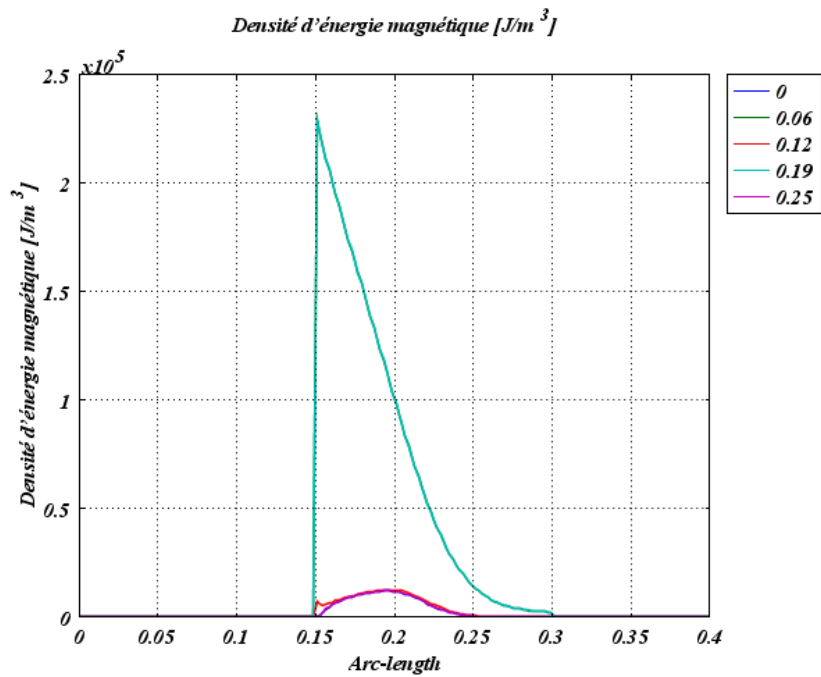
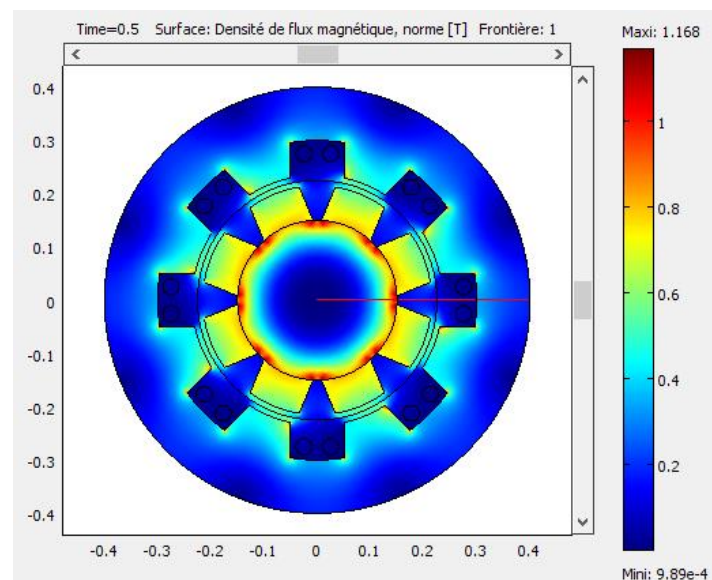


Figure III.6 Densité d'énergie magnétique [J/m^3]

Où l'on remarque un figure montre le Densité d'énergie magnétiques entre les différentes parties du générateur, densité d'énergie magnétique est plus intense au niveau des pôles du générateur (les Aimant répétées autour de l'axe). Ces interactions magnétiques sont responsables de la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique dans le générateur. Par conséquent, l'amélioration ou la modification de la conception de ces zones pourrait entraîner une amélioration des performances globales du générateur



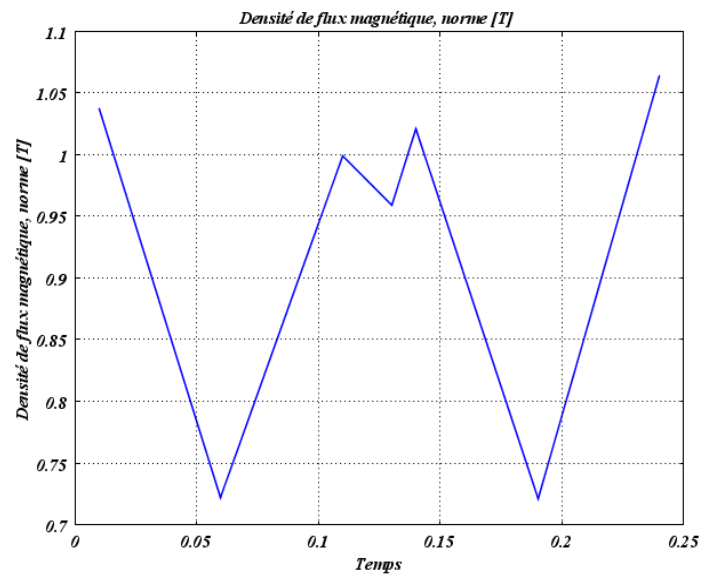
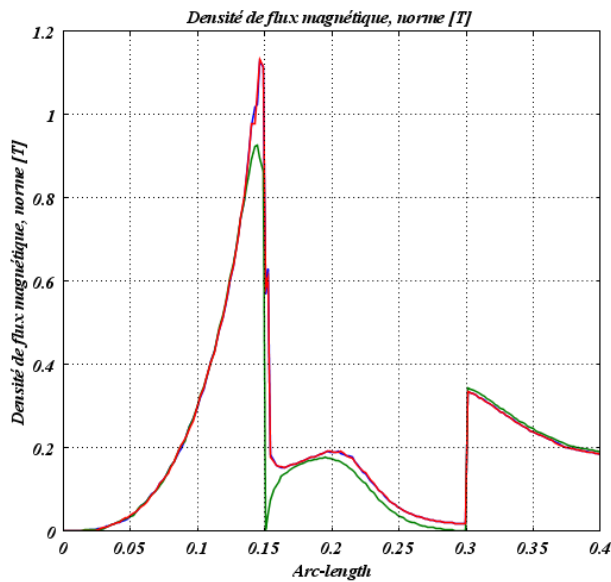
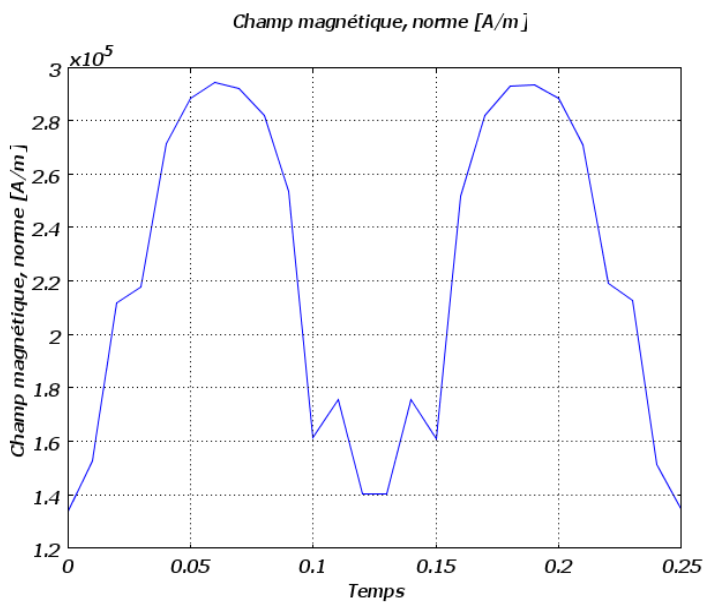
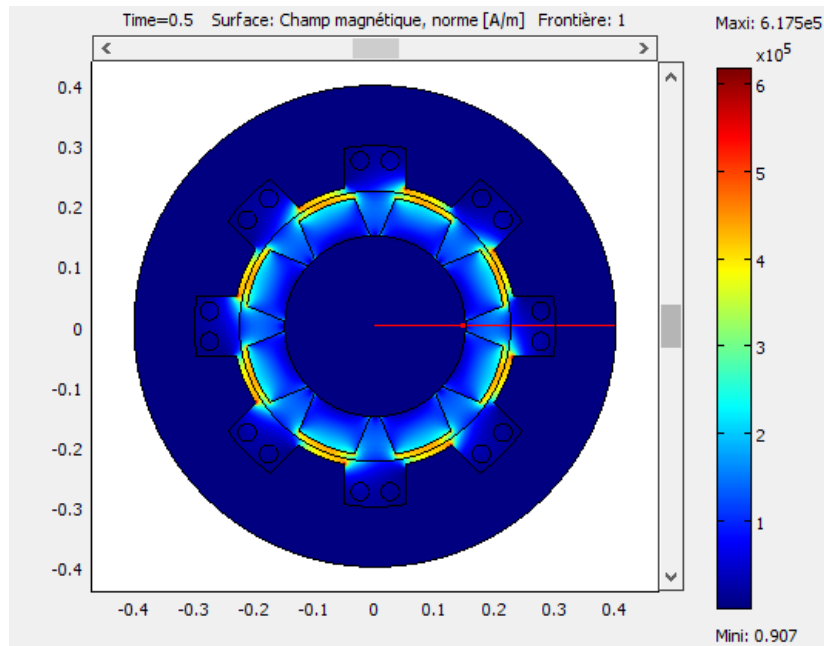


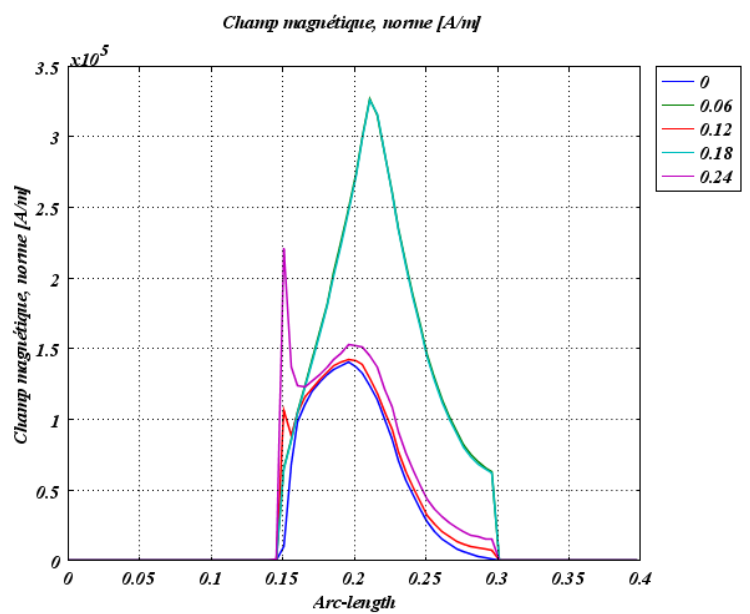
Figure III.7 Densité de flux magnétique, norme [T]

D'après ces résultats, nous remarquons que la distribution de potentiel vecteur magnétique est intense aux voisinages des aimants permanents et des bobines du stator, il atteint des valeurs Où l'on remarque un changement le Densité de flux magnétique Les zones rouges et jaunes dans l'image représentent une densité de flux magnétique élevée, atteignant jusqu'à

1.168 teslas selon l'échelle à droite. Cela indique une concentration élevée de champ magnétique dans ces régions. Les zones bleues montrent une densité de flux plus faible, où le champ magnétique est beaucoup plus réduit. Cela correspond aux zones où les interactions magnétiques sont moins intenses. Le centre du générateur et les bords des dents du stator présentent les niveaux les plus élevés de densité de flux, ce qui signifie qu'une grande partie du flux magnétique se concentre autour des aimants permanents et des parties bobinage du stator.



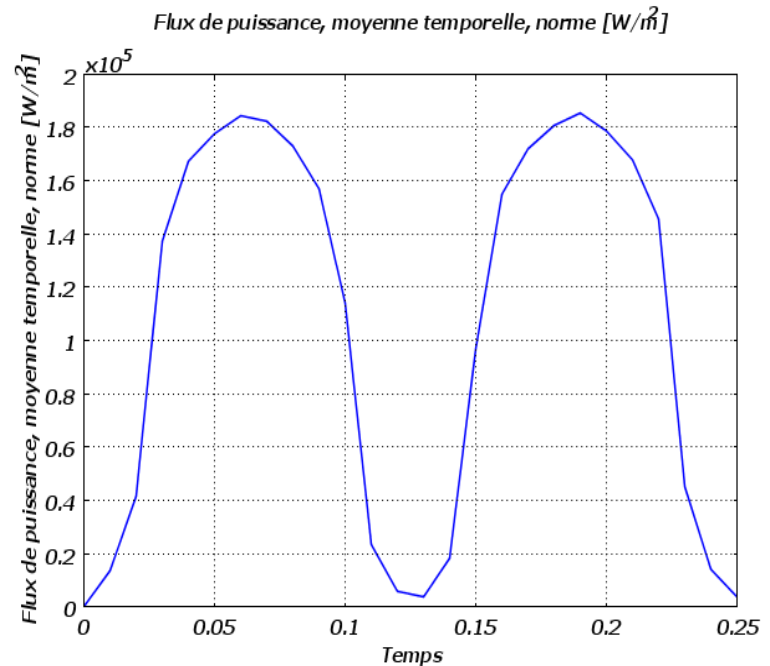
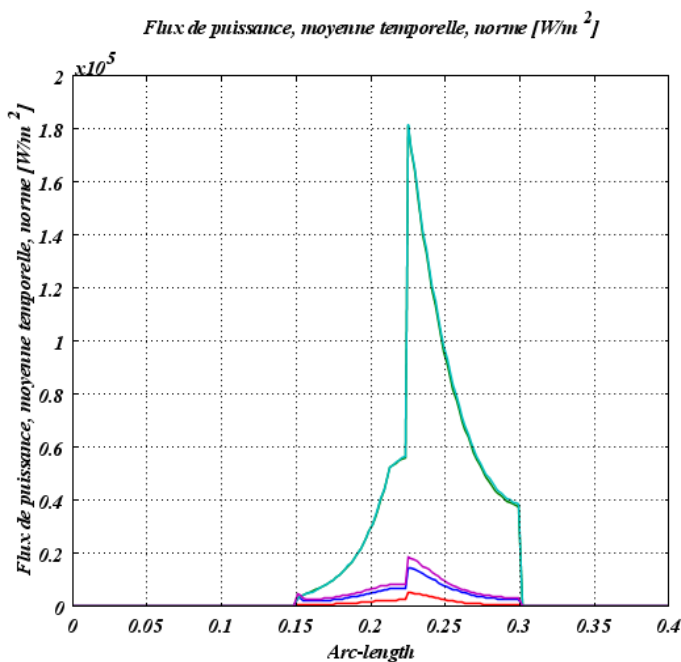
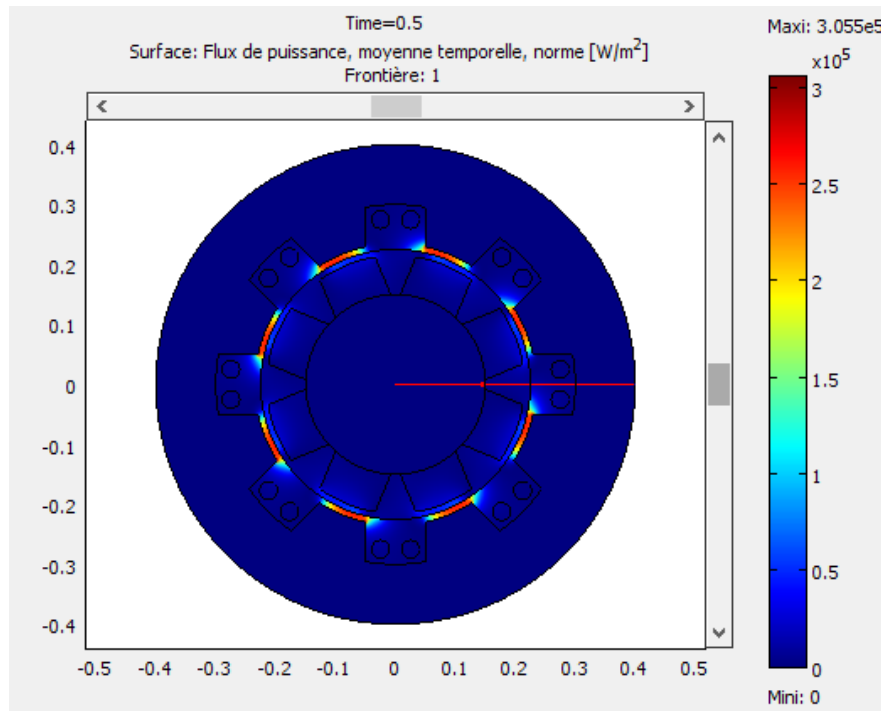
a



b

Figure III.8 Champ magnétique, norme [A/m]

Le champ magnétique change au point de coordonnées $x = 0,21$ $y = 0$, car on remarque une forte augmentation jusqu'à $2,9 \cdot 10^5$ [A/m] puis il revient à $1,4$ [A/m] dans une période de $0,125$ s



figures III.9 Flux de puissance, moyenne temporelle, norme [W/m^2]

zones à forte densité flux de puissance Les zones qui apparaissent en rouge ou orange indiquent des zones à fortes pertes thermiques, pouvant entraîner une surchauffe de ces zones. Ces zones peuvent être les enroulements du générateur ou des zones de contact entre des pièces mobiles et fixes. Zones à faible densité de débit La répartition générale du flux de chaleur sur l'image montre comment la chaleur se propage à l'intérieur du générateur. Ces informations peuvent être utilisées pour identifier les zones critiques nécessitant un refroidissement supplémentaire

Conclusion :

Le logiciel de simulation Comsol donne la possibilité d'ajouter différents phénomènes physiques aux model étudié dont il nous a permet d'étudier plusieurs aspects sur la machine synchrone à aimants permanents.

Dans ce chapitre nous avons présenté le logiciel de simulation Comsol Multiphysics, la géométrie de model de la GSAP à étudier les paramètres à introduire dans le logiciel de simulation ainsi que les résultats de la simulation.

CONCLUSION

Générale

Conclusion générale :

Le travail présenté porte l'objet de la simulation de la machine synchrone à aimant permanent par le logiciel de simulation Comsol Multiphysics, ce logiciel de simulation calcule ses résultats en utilisant la méthode des Elément finis. Dans la conception moderne des machines électriques, la méthode des éléments finis après un essor considérable avec l'avènement des moyens informatiques. Cette méthode permet de résoudre directement les équations de la physique avec un minimum d'hypothèses et permet aussi de coupler les équations de la physique aux équations des circuits électriques composant le convertisseur statique.

Dans le premier chapitre nous avons présenté des généralités sur la machine synchrone à aimants permanents ; son principe de fonctionnement, ses constituants, ses avantages et inconvénients, ses domaines d'applications, le dimensionnement et le type des aimants permanents les plus utilisés.

Dans le deuxième chapitre, nous avons fait une description sur le prototype de la machine synchrone à étudier, la modélisation de la machine synchrone à aimants permanents et on a présenté la méthode des éléments finis.

Dans le troisième chapitre nous avons présenté le paramètre géométrique de prototypes de la GSAP étudiés et les résultats de simulations obtenus par le logiciel Comsol.

Ce qui nous a permis de montrer la densité de flux B et d'énergie le flux utile transmis aux dents statoriques et les champs électrique et magnétique et le potentiel magnétique

Références bibliographie

- [1] [1] JEAN NIAR –JEAN-CLAUDE GALLOIS –MICHEL YBILENSKY- AN-PIERRE LIBERSAC électricité machines électriques et électronique
- [2] [2] GUY STURTZER Electrotechnique, Modélisation et commande des moteurs triphasés
- [3] A, F Jawad "Etude du problème inverse en électromagnétisme en vue de la localisation des défauts de désaimantation dans les actionneurs à aimants permanents ". Thèse de Doctorat l'Université de technologie de Belfort-Montbéliard, 05 décembre 2008.
- [4] Z. WU : « Conception Optimal d'une entraînement électrique pour la chaîne de traction d'un véhicule hybride électrique. », Thèse de Doctorat , Université de Franche-Comté, 21 Mars2012.
- [5] M .Kostenko et L. Piotrovki : « Machines électriques .», Tome 2,Editions Mir, Moscou 1979.
- [6] R. Le Doeuff, M.E.H. Zaim: « Machines électrique tournantes. », Editions Lavoisier, Paris, 2009.
- [7] J.A. Farooq : « Etude du problème inverse en électromagnétique en vue de la localisation des défauts de désaimantation dans les actionneurs à aimants permanents. », Thèse de doctorat, Université BELFORT-MONTBELIARD ,5 décembre 2008.
- [8] G. Lacroux, « les aimants permanents », Edition technique et documentation ,1989.

- [9] Transmissions magnétiques Aimants pour l'industrie, IBSMagnetic
- [10] Boukais Boussad, «contribution à la modélisation des systèmes couples machines convertisseurs : application aux machines à aimant permanents (BDCM-PMSM)», Thèse de doctorat à université MOULOUD MAMMERI TIZI-OUZOU, Février 2012
- [11] Bernard Multon: « Application des aimants aux machines électriques. », notes de cours version 2009, Ecole normale supérieure de Cachan, <http://emecatronique.bretagne.ens.cachan.fr>
- [12] H.Lyes, A. Jugurtha ; « étude et simulation de la machine synchrone a aimants permanents. », Mémoire de DEUA en électrotechnique, Université de bejaia, 2011.
- [13] M. Ounnadi : « Elaboration d'un modèle d'étude en régime dynamique d'une machine à aimants permanents. », Mémoire d'ingénieur, Université Tizi-ouzou, 2011.
- [14] S. Hamecha, Ep.Bourekache. *Etude Et Commande D'une Eolienne A Base D'une Machine Synchrone A aimants Permanents*, Mémoire de Magister, Université mouloud mammeri de TiziOuzou, 2013
- [15] M. Messadi : « Commande backstepping appliquée à la Machine synchrone à aimants permanents. » Mémoire de magister en électrotechnique, Université Hadj Lakhder de Batna, 16 janvier 2012.
- [16] M.D. Bidart. *Commande Coopérative Des Systèmes Monoconvertisseurs Multimachines Synchrones*, Thèse de Doctorat, L'Institut national polytechnique de Toulouse (INP Toulouse), 2011
- [17] BardadiBendaha Mansour « identification des paramètres d'une machine synchrone a aimant permanent en vue d'une intégration dans des simulateurs en temps réel »Thème Magistère en Electronique Université des Sciences et de la Technologie d'Oran 04/02/2015

- [18] H.Chawab « strategie de commande d'actionneurs synchrones a aimants permanents intégrant la sureté de fonctionnement ».Thèse de doctorat, université de haute Alsace ,2004
- [19] S. Ramdani. Commande par Backstepping du Moteur à Aimants Permanents Alimenté par Onduleur de Tension, mémoire de Master, Université de Tlemcen, 2013.
- [20] C. Guerroudj, " Etude et Conception D'une Machine a Aimants Permanents a Double Saillance (DSPM) Pour Des Application à Basse Vitesse De Rotation ", Mémoire de Magister, Université A.MIRA De Bejaia, 2012.
- [21] M. Amarouche: « Etude et optimisation des machines électrique à double excitation. », Mémoire de Master, Université Bejaia, 2013.
- [22] Nasser Fekiri, transfert de chaleur dans de seulement micro et Mano structuré : simulation et expérimentation par thermographie infrarouge et macroscopie ST hm, Rapport de stage, Université de LORRAINE, 2013.