

UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA

Faculté des Sciences Appliquées
Département de Génie Electrique



Mémoire

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et technologies

Filière : Génie électrique

Spécialité : Electrotechnique Industrielle

Présenté par :

BOUGOSSA Abdel Ali

LAGGOUN Ali

Thème:

Modélisation Et Conception De Moteur Synchrone à Aimant Permanent (MSAP)

Soumis au jury composé de :

M ^r Rezoug Mohamed Redha	MCA	Président	UKM Ouargla
M ^r Khelifa Moussa	MCB	Encadreur/rapporteur	UKM Ouargla
M ^r Taibi Djamel	MCA	Examineur	UKM Ouargla

Année universitaire 2020/2021

REMERCIEMENTS

Merci

Tout d'abord, nous remercions Dieu Tout-Puissant pour la bonne santé, la volonté et la patience qu'il nous a données tout au long de notre vie. une étude.

Nous adressons nos sincères remerciements à M. **Khelifa Moussa**, notre promoteur de ce travail, et ses conseils pertinents, ses conseils et sa sagesse pour sa grande patience et diligence envers nous, et pour ses suggestions qui ont grandement facilité ce travail.

Nous remercions (**Rezoug Mohamed Redha**) Maître de Conférences à l'Université de Ouargla pour l'honneur de présider le jury. de cette thèse.

Nous lui exprimons notre gratitude.

Nous adressons nos sincères remerciements au Professeur (**Taibi Djamel**) Maître de Conférences à l'Université de Ouargla, qui a gracieusement consacré son temps et ses compétences à juger ce travail, en lui souhaitant plein succès.

Nous tenons à exprimer nos sincères remerciements à ceux qui nous ont apporté leur soutien et ont contribué directement ou indirectement à l'élaboration de cette thèse.

Remerciements particuliers aux étudiants de deuxième année de master en génie électrique.

B. Abdel Ali

L.Ali

Dédicaces

Tout d'abord, je remercie Dieu Tout-Puissant de m'avoir donné le courage et la patience de faire ce travail malgré toutes les difficultés que j'ai rencontrées.

Je dédie ce travail à :

A ma mère que je remercie Dieu Tout-Puissant d'avoir dans ma vie est celle qu'elle mérite.

Le succès qu'elle a obtenu parce qu'elle a lutté et travaillé pour mon succès avec son amour, son soutien, tous les sacrifices qu'elle a faits et ses précieux conseils pour toute son aide. J'espère que vous recevrez à travers ce travail, si humble soit-il, l'expression de ma gratitude inépuisable et inexprimable. je t'aime maman ..

Comme mon cher père, que Dieu nous confie un lien et prolonge sa vie.

Mon père BACHIR, ma chère mère (SALIHA DARDOURI), mes chers frères Jamal et Faris et ma chère soeur qui n'ont cessé d'être pour moi des exemples de persévérance, de courage et de générosité.

A mon professeur,(Mohammed Massoudi), que Dieu ait pitié de lui, qui a été l'une des raisons de ma réussite.

A toute ma famille à Boukossa

A mes chers amis : Muhammad Segia, Noureddine abid Saed, Al-Sadiq Al-Doh

Au chef du département de génie électrique, le PROFESSEUR AL-WAZEN MUHAMMAD AL-AKHDAr, et à tous mes collègues de la spécialisation en génie électrique 2021

B.Abdelali

Dédicaces

Tout d'abord, je remercie Dieu Tout-Puissant de m'avoir donné le courage et la patience de faire ce travail malgré toutes les difficultés que j'ai rencontrées.

Je dédie ce modeste travail à :

Mes chers parents, qui ont fait de moi ce que je suis par leurs sacrifices et leur veille sur ma réussite, car le travail est le fruit de vous rester éveillé et fatigué, j'espère réaliser pour eux quelque chose de leurs rêves.

Mon cher père (MASSOUD) et ma chère mère (RABIA LUTIAM),

A mes frères qui m'ont toujours soutenu.

Et à tous les membres de la famille Laggoun des handicapés

A mes chers amis : MILOUD GHERIER , MOUHAMMED LAID LAGGOUN

Et à tous mes amis et à tous ceux qui ont contribué directement ou indirectement au couronnement et au sacre. Le succès de ce travail.

Et tous mes camarades de classe d'électrotechnique 2021.

Résumé

Le moteur synchrone à aimants permanents (MSAP) est de plus en plus utilisé dans le domaine industriel en raison de ses hautes performances et de sa supériorité par rapport aux autres types de moteurs. Ce travail porte sur l'aspect dynamique du moteur MSAP. La modélisation et la conception du moteur ont été étudiées.

La première partie traite de la définition des aimants permanents et de la définition et de la structure du moteur MSAP. La deuxième partie concerne la modélisation et l'établissement d'équations mathématiques et la simulation du moteur par Matlab / Smulink. Comme pour la troisième partie, nous concevons le moteur et extrayons des informations sur le champ et le flux et réalisons un modèle pour cela, et cette partie utilise le Programme Ansyse Maxwell. Enfin, la conclusion résume les principaux résultats obtenus.

Mots clés : moteur synchrone à aimants permanents (MSAP), méthode des éléments finis (MEF).

Abstract

Permanent magnet synchronous motor (MSAP) is being used more and more in the industrial field due to its high performance and superiority over other types of motors. This work focuses on the dynamic aspect of the MSAP engine. Modeling and engine design were studied.

The first part deals with the definition of permanent magnets and the definition and structure of the MSAP motor. The second part is concerned with modeling and setting mathematical equations and simulating the engine by Matlab / Smulink. As for the third part, we design the engine and extract information about the field and flow and make a model for it, and this part uses the Ansyse Maxwell program. Finally, the conclusion summarizes the main results obtained.

Keywords: permanent magnet synchronous motor (MSAP), finite element method (MEF).

ملخص

يتم استخدام محرك المغناطيس الدائم المتزامن (MSAP) أكثر فأكثر في المجال الصناعي بفضل أدائه العالي وتفوقه على أنواع المحركات الأخرى. يركز هذا العمل على الجانب الديناميكي لمحرك MSAP. تمت دراسة النمذجة وتصميم المحرك.

يتناول الجزء الأول تعريف المغناطيس الدائم وتعريف محرك MSAP وهيكله. الجزء الثاني يختص بنمذجة ووضع المعادلات الرياضية ومحاكاة المحرك بواسطة Matlab / Smulink أما بالنسبة للجزء الثالث نقوم بتصميم المحرك واستخراج المعلومات عن المجال والتدفق وعمل نموذج له ، ويستخدم هذا الجزء برنامج Ansys Maxwell. أخيراً ، يلخص الاستنتاج النتائج الرئيسية التي تم الحصول عليها.

الكلمات المفتاحية : محرك متزامن مغناطيسي دائم (MSAP) ، طريقة العناصر المحدودة (MEF).

Liste des Figure

Chapiter 01

Figure 1.1: Courbe de désaimantation.....	8
Figure 1.2: Images d'aimantes ferrites.	9
Figure 1.3:Images d'aimantes (ALNICO).....	9
Figure 1.4: Les Samarium Cobalt (Sm-Co).....	10
Figure 1.5: Néodyme-Fer-Bore (Nd-Fe-B).	10
Figure 1.6: Courbes de désaimantation des principaux types d'aimants.....	11
Figure 1. 7: principe de fonctionnement du MSAP.....	12
Figure 1.8: Stator et rotor de la machine à aimant permanent.....	14
Figure 1.9:Moteur à rotor intérieur.....	15
Figure 1.10 : Moteur à rotor extérieur.	16
Figure 1.11:Moteur à entrefer axial.....	16

Chapiter 02

Figure 2.1 :Schéma de la MSAP.	23
Figure 2.2:Schéma de la MSAP dans le repère abc.....	23
Figure 2.3:Machine équivalente au sens de Park	26
Figure 2.4: Schéma bloc d'une MSAP alimentée en tension.	30
Figure 2.5: Schéma Bloc MSAP dans Matlab/Simulink.	32
Figure 2.6:Résultats de Simulation du démarrage à vide.	33
Figure 2.7:Résultats de Simulation lors du démarrage Moteur.....	34

Chapiter 03

Figure 3.1:Organigramme des différentes étapes d'un design Maxwell.....	39
Figure 3.2:La fenêtre principale du logiciel Maxwell.	40
Figure3.3.Représentation de la géométrie de la machine en 3D.	40

Figure 3.4:Interface de sélection de machine dans RMxprt.	41
Figure 3.5:Fenêtre du gestionnaire de projet.	41
Figure 3.6:circuit Y3.	42
Figure 3.7 :Modèle d'oncoche.	44
Figure 3.8:Structure de stator.	45
Figure 3.9:Forme de pôle de type 5 dans (ANSYS – Maxwell RMxprt).	45
Figure 3.10:Structure de rotor.	46
Figure 3.11:Coupe transversale du moteur MSAP à 12 fentes, 14 pôles.	48
Figure 3.12:Rendement (%) Vitesse V/s (tr/min).	49
Figure 3.13:courant d'entrée Vs l'angle de couple.	49
Figure 3.14:Puissance de sortie (W) en fonction de l'angle de couple.	50
Figure 3.15:Tension induite par un conducteur de vitesse nominale.	50
Figure 3.16:Tracé de maillage 2D.	51
Figure 3.17:Le maillage par MEF du rotor et du stator.	51
Figure 3.18: Couple de déplacement (Nm) Temps V/s (ms).	52
Figure 3.19:Courants d'enroulement (A) Temps V/s (ms).	52
Figure 3.20:Intensité du champ magnétique (T).	53
Figure 3.21:Lignes de flux (Wb/m).	53
Figure 3.22:Intensité du champ magnétique (A/m).	54
Figure 3.23:Densité de courant électrique(A/m ²).	54
Figure 3.24:Coupe de la machine 3D.	55
Figure 3.25:Couple de déplacement (Nm) Temps V/s (ms).	55
Figure 3.26:Courants d'enroulement (A) Temps V/s (ms).	56
Figure 3.27:Intensité du champ magnétique (T).	56
Figure 3.28:Intensité du champ magnétique (A/m).	57
Figure 3.29:Densité de courant électrique (A/m ²).	57
Figure 3.30:Energy électrique (J/m ³).	58

Liste Des Tableaux

Chapiter 01

Tableau 1.1: Caracteristiques Des Aimants	11
Tableau 1.2 : Comparaison Des Differents Types De Moteurs Electriques.....	17

Chapiter 03

Tableau 3.1: Fenetre Des Proprietes De La Machine.....	42
Tableau 3.2: Fenetre Proprietes Du Circuit.....	43
Tableau 3.3: Fenêtre Propriétés du stator.. ..	43
Tableau 3.4:Fenetre Dimensions D'oncoche.	43
Tableau 3.5:Fenetre Proprietes Du Bobinage.....	44
Tableau 3.6:Parametres De Rotor.....	45
Tableau 3.7:Fenetre Proprietes Des Donnees Du Rotor.....	46
Tableau 3.8:Fenetre De Configuration De L'analyse.	47
Tableau 3.9: Donnees De Solution Pour 12 Buses, 14 Arbres, Moteur De 110 Kw.....	48

Liste des abréviations

<i>MSAP</i>	Machine Synchrone Aimants Permanents.
2D	Deux dimensions
3D	trois dimensions
BaCO ₃	Carbonate de Baryum
MEF	Méthode des Eléments Finis
SmCo	Samarium-Cobalt
Nd-Fe-B	Néodyme-Fer-Bore
SrCO ₃	Carbonate de Strontium

Liste des symboles

a, b, c	Axes liés aux enroulements triphasés.
d, q	Composantes de Park (lié au rotor) directe et quadrature.
p	Nombre de paires de pôles.
θ_m	la position mécanique du rotor par rapport au stator.
θ	Vitesse électrique du rotor.
$[p(\theta)]$	Matrice de transformation de Park.
$[p(\theta)]^{-1}$	Matrice de transformation inverse de Park.
$[V_s] = [V_{as} V_{bs} V_{cs}]^T$	Vecteur tensions statoriques.
V_s	Tension statorique.
V_{ds}, V_{qs}	Tensions statoriques sur l'axe direct et en quadrature.
I_a, I_b, I_c	Courant statorique de la phase a, b, c .
$[I_s] = [I_{as} I_{bs} I_{cs}]^T$	Vecteur courants statoriques.

i_{ds}, i_{qs}	Courants statoriques d'axe direct et enquadrature.
$\varphi_a, \varphi_b, \varphi_c$	Flux statorique de la phase a, b et c .
$[\Phi_s]$	Vecteur flux statoriques.
$\varphi_{ds}, \varphi_{qs}$	Flux statorique d'axe direct et enquadrature.
φ_f	Flux des aimants.
w_e	Energie emmagasinée dans le circuit magnétique.
R_s	Résistance d'une phase statorique.
L_{ss}	Inductance d'une phase statorique.
L_{s0}	Inductance propre d'une phase statorique.
M_{s0}	Inductance mutuelle entre deux phases statoriques.
L_{ds}, L_{qs}	Inductances d'axe directe et enquadrature.
Ω	Vitesse mécanique de rotation.
C_r	Couple résistant.
C_e	Couple électromagnétique.
J	Le couple d'inertie des masses tournantes.
f	Coefficient de frottement.
B	Induction magnétique
D	Déplacement électrique
H	Intensité du champ magnétique

SOMMAIRE

Résumé	I
Liste Des Figures	III
Liste Des Tableaux	V
Liste Des Abreviations Et Symboles	VI
Introduction Generale	1

Chapter 01

Généralités Sur Les Moteurs Synchrone A Aimants Permanents (Msap)

1.1. Introduction	6
1.2. Machines Synchrones A Aimants Permanents	6
1.2.1. Les Aimants Permanents	7
1.2.1.1. Definition Des Aimants Permanents.....	7
1.2.1.2. Aperçu Sur Son Historique	7
1.2.1.3. Propriete Des Aimants Permanents	7
1.2.1.4. Les Differents Types Des Aimants Permanents	8
a -Aimants Metalliques (Alnico)	8
b - Aimants En Ferrites	9
c -Aimants Terres-Rares	10
1.2.1.5. Caracteristiques Principales De Quelques Types D'aimants	11

1.2.2. Principe De Fonctionnement De La Msap.....	12
1.2.3. Constitution De La Machine Synchrone A Aimant Permanent (Msap).....	13
1.2.4. Types Des Moteurs Msap	14
a -Moteur A Rotor Interieur	15
b -Moteur A Rotor Exterieur.....	15
c -Moteurs A Entre Fer Axial	16
1.3. Comparaison De Moteurs Msap Avec Les Moteurs Les Plus Competitifs.....	17
1.4. Les Avantages Et Les Inconvenients Du (Msap)	18
1.4.1. Les Avantages.....	18
1.4.2. Inconvenients	19
1.5. Exemples D'applications De Moteur Msap	19
1.6. Conclusion.....	20

Chapiter 02

Modélisation du Moteurs Synchrone A Aimants Permanents (MSAP)

2.1. Introdiction	22
2.2. Modelisation De La Machine Synchrone A Aimants Permanents.....	22
2.2.1. Mise En Equations De La Machine Dans Le Repere (Abc).....	23
2.2.1.1.Equations Electriques	24
2.2.1.2. Equations Magnetiques	24

2.3. Transformation De Park	26
2.3.1. Equations Mecaniques	29
2.4. Schema Fonctionnelle De Msap	30
2.5. Representation D'état	30
2.5.1. Resultats De Simulation	32
2.5.1.1. Resultats De Simulation Demarrage A Vide	33
2.5.1.2. Interpretations Des Resultats	33
2.5.1.3. Interpretations Des Resultats	34
2.6. Conclusion.....	35

Chapter 03

Etude Paramétrique Et Calcul Electromagnétique De La (MSAP)

3.1. Introduction	37
3.2. Presentation De La Methode	37
3.3. Principe De La Methode Des Elements Finis.....	37
3.3.1. Les Principales Etapes De Construction D'un Modele Elements Finis	38
3.4. Presentation De Logiciel Ansys-Maxwell.....	38
3.4.1. Un Projet En Ansys-Maxwell.....	38
3.4.2. Organigramme De Travail Sur Logiciel Ansys Maxwell	39
3.5. Modele De La Machine Utilise	40

3.5.1. La Fenetre Projet.....	41
3.5.2. Les Composants De La Machine.....	42
les donnees de machine	42
les donnees de circuit.....	43
les donnees de stator	43
les donnees d'ouchoche	43
les donnees de enroulement	44
les donnees de rotor	45
les donnees de pole	46
3.5.3. La Fenetre De Configuration D'analyse	47
3.5.4. Les Donnees Resolution	47
3.6. Conception Msap Machine 2d/3d Dans Maxwell - Rmxprt.....	51
3.6.1. Resultats De Simulation	52
3.7. Modele 3d Msap Dans Ansys - Maxwell - Rmxprt.....	55
3.8. Conclusion.....	58
Conclusion Generale.....	60
Annexe A.....	62
Annexe B	63
Bibliographiques.....	64

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

L'électrotechnique est un domaine, comme beaucoup d'autres, caractérisé par le développement de l'électronique et de la microélectronique. Historiquement, les composants de l'électronique de puissance ont connu des évolutions importantes et de fortes augmentations de leurs performances (tension et courant, fréquences de fonctionnement, vitesse de commutation, etc) .

Cette évolution a permis de concevoir des transformateurs fixes capables d'alimenter des moteurs à courant alternatif à fréquence et vitesse variables. De plus, le collecteur mécanique de la machine à courant continu a été remplacé par des inductances de type à aimants permanents dans le cas où les machines sont à courant alternatif permettant de supprimer les contacts glissants. Le développement parallèle de l'électronique de puissance et des aimants permanents a conduit à la conception d'un nouveau type de machines synchrones excitées par aimants permanents, d'où le nom : Machine synchrone à aimant permanent (MSAP).

Aujourd'hui, les moteurs synchrones à aimants permanents sont recommandés pour une utilisation dans le monde industriel. En effet, il est fiable et présente de nombreux avantages par rapport aux autres types de machines à courant continu ou à courant alternatif.

Le moteur synchrone à aimant permanent a une vitesse de rotation proportionnelle à la fréquence d'alimentation, un couple massique élevé, un excellent rendement, un couple d'inertie faible et une capacité de surcharge élevée sur toute la plage de vitesse. Il ne prend pas non plus beaucoup de place contrairement aux moteurs à courant continu en éliminant la source d'excitation. Ainsi, sa construction est plus simple car il n'appartient pas à un collecteur mécanique qui provoque des défauts majeurs tels que la limitation de puissance, l'usure des balais et les pertes rotoriques. Ainsi, cela augmente sa durée de vie et évite une maintenance permanente. C'est ainsi que les moteurs synchrones à aimants permanents (MSAP) sont apparus et sont de plus en plus utilisés de nos jours dans de nombreuses applications industrielles telles que les équipements ménagers (machine à laver), les équipements informatiques (lecteurs DVD), les équipements médicaux et de santé, la propulsion sous-marine et l'électricité. Véhicules ainsi que machines-outils et applications éoliennes.

La machine synchrone à aimants permanents est un actionneur électrique très puissant qui a de faibles moments d'inertie lui conférant un dynamisme caractérisé par :

Constantes de temps très faibles et permet de concevoir des commandes de vitesse, de couple ou de positionnement avec une précision et des performances dynamiques très intéressantes (actionneurs de robots, servomoteurs, variateurs de vitesse...) Mais sa commande est plus complexe que celle d'une machine à courant continu ; Car le système est non linéaire et il est très difficile d'obtenir la séparation entre courant induit et courant inductif. Afin de faciliter notre étude, nous devons modéliser notre machine selon les axes dq, donc, nous aborderons le passage de la référence triphasée à la référence biphasée par transformée de Park et nous construirons les équations électriques et mécaniques pour le dispositif synchrone à aimants permanents.

Elle augmente le niveau des grandeurs locales (saturation, courant induit, harmonique spatiale, etc.), notamment dans les machines de moyenne et grande puissance . Les exigences d'efficacité et de performance à moindre coût de la part des fabricants, ont incité les chercheurs à développer des produits vers un processus de conception commun. Nous allons donc concevoir pour la machine synchrone à aimants permanents MSAP en partant du pré-dimensionnel, au bas d'expressions analytiques empiriques, jusqu'à une modélisation précise dans une méthode d'éléments finis. Un grand pas en avant avec l'avènement des ressources informatiques. En fait, cette méthode représente l'état de l'art dans le calcul numérique du champ magnétique des machines électriques. Elle permet également d'analyser le comportement d'une machine synchrone en calculant le champ électromagnétique.

Ce travail est divisé en trois chapitres :

Le chapitre 1 fournira quelques informations générales sur les machines synchrones à aimants permanents. Par conséquent, nous donnerons un aperçu des différents types d'aimants permanents ainsi que des principales structures des MSAP et de leurs diverses applications.

Le deuxième chapitre traitera de la modélisation des machines synchrones à aimants permanents. Cette modélisation est basée sur des paramètres électriques décrivant des phénomènes électromagnétiques (résistance et inductance) à partir d'hypothèses simplifiées. Le modèle MSAP est donné pour son agencement en formalisme biaxial, appelé modèle de Park.

Dans le chapitre trois, nous allons concevoir une machine synchrone à aimants permanents à l'aide du logiciel Ansys-Maxwell qui utilise la méthode des éléments finis de l'éthique de la

grâce. Une étude paramétrique de ce dispositif a également été réalisée pour observer l'effet des paramètres de l'aimant sur les performances spécifiques, c'est-à-dire le couple et les pertes, différents résultats de simulation.

Enfin, cette note sera clôturée par une conclusion générale et des perspectives.

Chapitre 1

Généralités sur les moteurs synchrone à aimants permanents (MSAP)

1.1. Introduction

Ces dernières années, les machines à aimants permanents sont apparues et sont devenues de plus en plus courantes dans de nombreux domaines et applications tels que la production d'énergie électrique, les chaînes éoliennes, les véhicules électriques hybrides, l'aéronautique, et même en concurrence avec les moteurs à courant continu qui ont dominé le domaine industriel et ce boom est dû aux progrès croissants dans le domaine des matériaux magnétiques Les terres rares telles que (SM-Co et Nd-Fe-B). En fait, ce développement de nouvel aimant permanent a amélioré les performances dynamiques, l'efficacité, le facteur de puissance et réduit les coûts de maintenance de ces machines par rapport aux machines traditionnelles.

Dans ce chapitre, nous allons donner un aperçu des machines synchrones à aimants permanents. Cette vue d'ensemble couvre les matériaux magnétiques, les structures de machines à aimants synchrones et leurs domaines d'application.

1.2. Machines synchrones à aimants permanents

Machines synchrones à aimants permanents Le terme machine synchrone comprend toutes les machines dans lesquelles la vitesse de rotation de l'arbre de sortie est égale à la vitesse de rotation du champ tournant. Pour réaliser un tel procédé, le champ magnétique tournant est généré soit par un aimant permanent, soit par un circuit d'excitation. La position du champ magnétique du rotor est alors fixe par rapport au rotor, qui en fonctionnement normal force une vitesse de rotation identique entre le rotor et le champ tournant du stator [1]. Ce groupe de machines comprend en fait plusieurs sous-familles:

- A - Machines synchrones à rotor bobiné.
- b - Machines synchrones à fréquence variable.
- C - machines synchrones à aimants permanents.

Notre attention se porte particulièrement sur cette dernière catégorie. Dans les machines à aimants permanents, les aimants sont situés dans la partie tournante. Le stator est constitué d'une bobine sinusoïdale triphasée. Dans le cadre de son fonctionnement, il repose sur le principe de rotation d'un champ magnétique en liaison avec un rotor, d'où les nom de machines synchrones à aimants permanents (MSAP).

Les machines synchrones à aimants permanents, utilisées en mode moteur ou générateur, deviennent de plus en plus attractives car elles répondent aux exigences des nouvelles technologies. L'intérêt de ces machines tient en grande partie à leur puissance et leurs faibles pertes ainsi qu'à leur couple massique élevé.

Avant de passer à la présentation de ce type de machine électrique, nous commençons d'abord par présenter les aimants permanents [2].

1.2.1. Les aimants permanents

On appelle un aimant permanent tout corps ayant la capacité ou la propriété de conserver une très grande aimantation rémanente et qui est difficile de se désaimanter lorsqu'il est aimanté [3].

1.2.1.1. Définition des aimants permanents

Un aimant permanent est un matériau magnétique qui a la particularité d'avoir une bonne résistance à la désaimantation, c'est-à-dire une aimantation rigide qui ne varie pas obligatoirement en présence d'un champ magnétique extérieur [4] [5].

1.2.1.2. Aperçu sur son historique

L'aimant doit son origine au latin ADAMAS qui signifie fer, diamant [6]. Les aimants permanents ont vu le jour aux environs 600 ans avant J-C. Mais ce fut au début de ce siècle qu'eut lieu le véritable essor des aimants permanents dont ils ont pris leur place dans tous les domaines et surtout dans les machines électriques [7] [8].

1.2.1.3. Propriété des aimants permanents

Le choix des aimants permanents est primordial puisqu'ils interviennent beaucoup dans le couple de la machine.

Les aimants permanents sont principalement caractérisés par leurs cycles d'hystérésis et plus particulièrement par la courbe de désaimantation du deuxième quadrant du plan (B-H) comme le montre la **Fig** (1.1), cette courbe est caractérisée par :

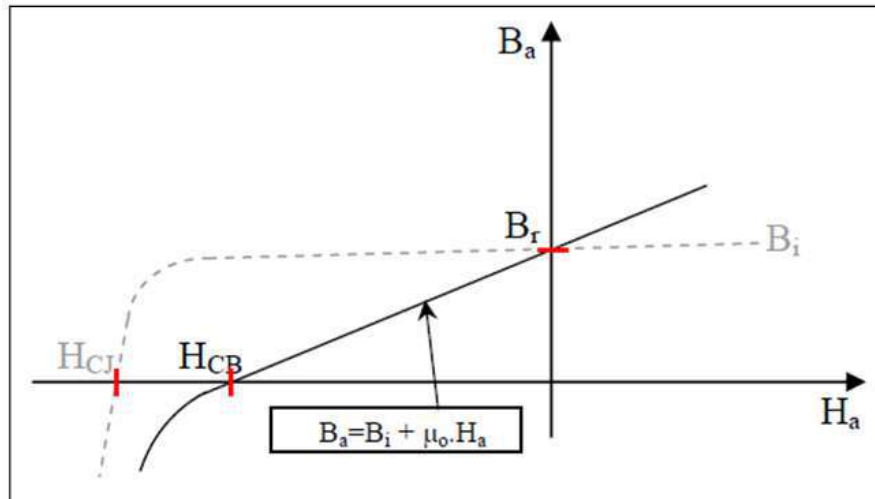


Figure 1.1: Courbe de désaimantation.

- a- L'induction rémanente (B_r), c'est -à-dire l'induction résiduelle au circuit fermé, ce qui signifie une induction de la puissance potentielle de l'aimant.
- b- Le champ coercitif (H_{cb}), caractérise le champ démagnétisant annulant l'induction, plus sa valeur est élevée plus l'aimant est stable.
- c- Produit d'énergie volumique (BH) max, ce produit est couramment appelé énergie spécifique de l'aimant ; cette énergie caractérise la qualité du matériau.

En effet pour un entrefer donné, le volume est d'autant plus faible, que l'énergie spécifique est élevée [2] [9].

1.2.1.4. Les différents types des aimants permanents

Un aimant permanent est un matériau ferromagnétique ayant la propriété de posséder une aimantation pratiquement constante en l'absence d'un champ démagnétisant relativement important. Cette aimantation provient des dipôles magnétiques, contenus dans ce matériau constitués d'ensembles de moments orbitaux et de spin d'électrons.

Les matériaux pour aimants permanents les plus utilisés dans les machines électriques sont classés en trois catégories :

a-Aimants métalliques (ALNICO)

Les aimants ALNICO ont un champ résiduel très élevé, mais un champ forcé très faible, ce qui provoque des problèmes de démagnétisation importants. Ces aimants ne peuvent pas être retirés de leur circuit magnétique, sinon ils seront retirés. La **Fig** (1.2) montre des images de l'aimant ALNICO [5].



Figure 1.2: Images d'aimants ALNICO.

b- Aimants en ferrites

Les ferrites sont des composants d'oxyde de Fer, de Baryum et de Strontium. Ils sont obtenus par frittage. Ils sont beaucoup plus robustes et relativement peu coûteux. Les ferrites trouvent l'essentiel de leurs applications dans les moteurs de faible puissance, utilisés dans l'industrie automobile [2].



Figure 1.3: Images d'aimants ferrites.

c-Aimants terres-rares

Les Samarium Cobalt (Sm-Co)

Ils sont beaucoup plus performants et autorisent une température de fonctionnement élevée (jusqu'à 300 °C) mais ils sont très coûteux en raison de la présence du Cobalt dans leur composition. Les Sm-Co sont utilisés dans des applications particulières (télécommunication, aéronautique), dont les propriétés de haute températures et la résistance à l'oxydation sont supérieures [2] [5] .



Figure 1.4: Les Samarium Cobalt (Sm-Co).

Néodyme-Fer-Bore (Nd-Fe-B)

Les aimants (Nd-Fe-B) ont des performances supérieures au Samarium Cobalt et ils sont beaucoup moins coûteux mais leur tenue à la température est moins bonne (jusqu'à 160 °C). Ce type d'aimant est utilisé principalement dans les micro-informatiques et les télécommunications. Ils constituent en particulier l'élément central des têtes de lecteurs [5].



Figure 1.5: Néodyme-Fer-Bore (Nd-Fe-B).

1.2.1.5. Caractéristiques principales de quelques types d'aimants

La Fig (1.6) présente la caractéristique de démagnétisation lorsqu'un champ extérieur est appliqué pour s'opposer à l'aimantation résiduelle pour les principaux types d'aimants :

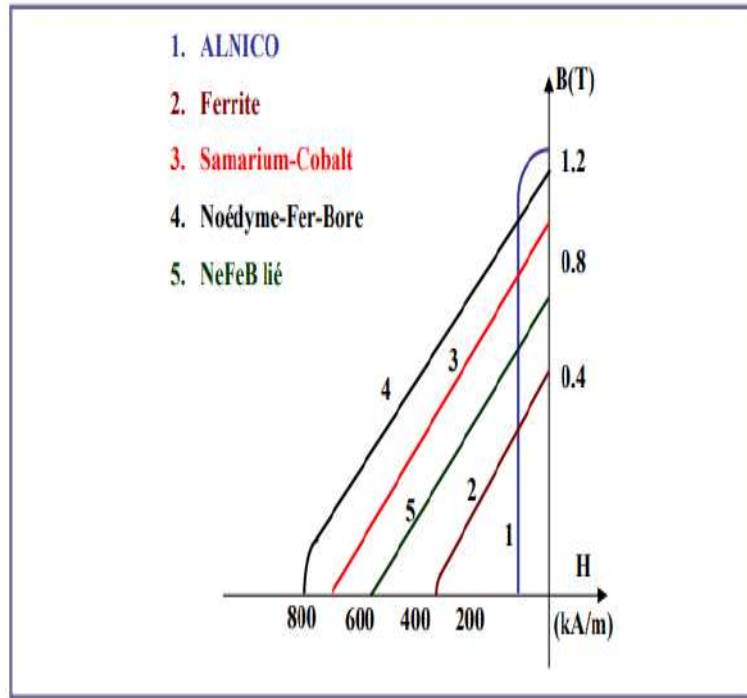


Figure 1.6: Courbes de désaimantation des principaux types d'aimants.

On peut aussi récapituler dans le **Tableau** (1.1) les caractéristiques des différents aimants précédents :

Tableau 1.1: Caractéristiques des aimants [8].

Matériaux	Br en Tesla	Hc en KA/m	T° de curie en °C	caractéristiques
Ferriles	à 0.40.2	200	300	Les moins chers
Alnico	1.2	50	850 à 750	Se démagnétisent trop facilement
Samarium cobalt	0.5	800	à 800700	Prix élevé à cause du cobalt
Néodyme Fer bore	1.3	1500	310	Prix en baisse (brevets), sujet à l'oxydation

1.2.2. Principe de fonctionnement de la MSAP

La machine électrique tournante est un dispositif électromagnétique destiné à transformer de l'énergie mécanique en énergie électrique (fonctionnement en générateur) [10] [11], ou, inversement, à transformer de l'énergie électrique en énergie mécanique (fonctionnement en moteur). Elle comprend principalement deux parties mobiles l'une par rapport à l'autre : l'inducteur qui crée un champ magnétique et l'induit dans lequel ce champ induit une force électromotrice, ces deux parties sont séparées par un entrefer [10][11][12].

Les bobines (phases) du stator sont reliées à une source triphasée de tensions sinusoïdales. La superposition des trois flux magnétiques créés par les trois bobines du stator produit un flux magnétique sinusoïdal tournant à la fréquence de la source de tension. Ce flux magnétique tournant interagit avec le flux de rotor dans l'entrefer qui sépare le stator du rotor et crée ainsi une force électromagnétique. Cette force se traduit par la rotation du rotor. La vitesse de rotation du rotor est proportionnelle à la fréquence de la source de tension [10][11][12].

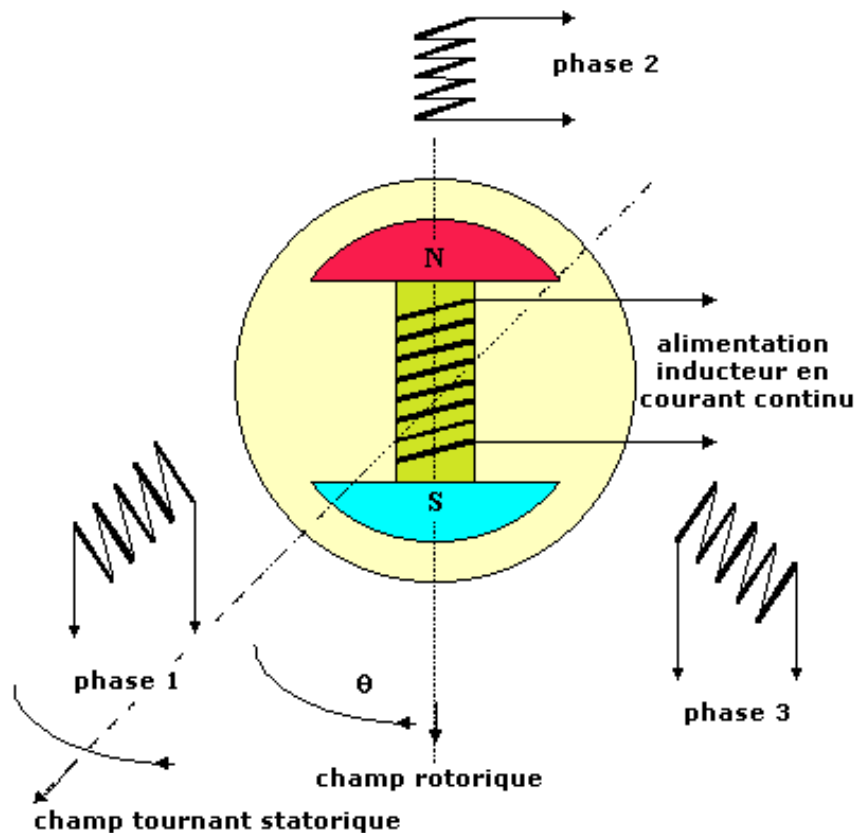


Figure 1.7: principe de fonctionnement du MSAP.

1.2.3. Constitution de la machine synchrone à aimant permanent (MSAP)

Une machine synchrone à aimant permanent (MSAP) est un système électromécanique qui transforme l'énergie électrique en énergie mécanique par l'intermédiaire des champs magnétiques. Cette énergie mécanique produit un mouvement de rotation et un couple mécanique [11].

La machine synchrone est constituée de deux parties, une partie mobile ou rotor constituant l'inducteur et une partie fixe ou stator portant les enroulements constituant l'induit. La mince zone entre les deux parties précédentes est appelée entrefer [5].

✚ **Stator** : il est similaire à celui de la machine asynchrone. Il se compose d'un bobinage distribué triphasé, tel que les forces électromotrices générées par la rotation du champ rotorique soient sinusoïdales ou trapézoïdales. Ce bobinage est logé dans les encoches creusées dans le circuit magnétique fixe. Ce dernier est feuilleté afin de réduire les courants de Foucault et de limiter les pertes dans le fer. Il est généralement construit en tôle à base d'alliage Fer-Silicium qui permet l'obtention d'une induction élevée [2].

✚ **Rotor** : les enroulements parcourus par un courant continu (dans le cas de la machine à rotor bobiné) sont remplacés par des aimants permanents alternants pôles nord et pôles sud. Le flux inducteur balaye les enroulements statoriques et y induit des forces électromotrices (f-é-m) alternatives [5].

L'interaction des champs rotorique et statorique donne naissance au couple électromagnétique. La **Fig** (1.8) présente une image des parties de la machine synchrone à aimant permanent (le stator et le rotor) :

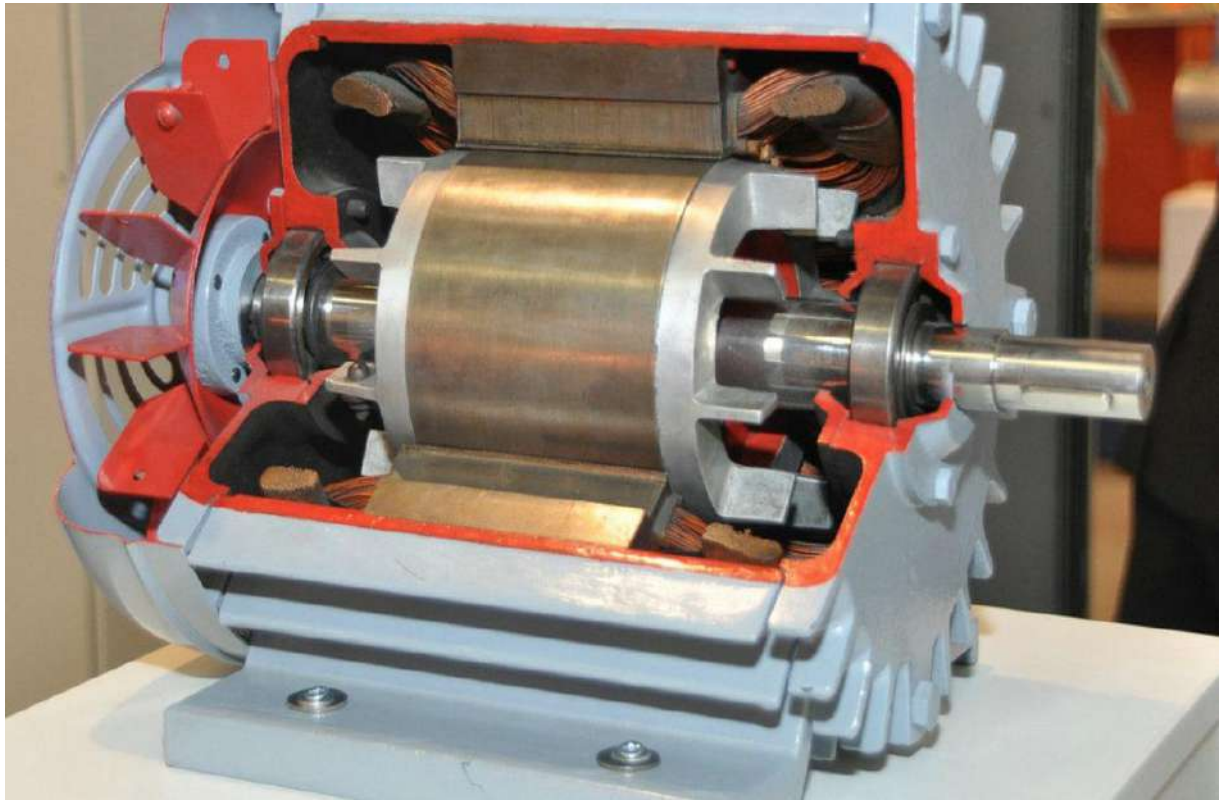


Figure 1.8: Stator et rotor de la machine à aimant permanent.

1.2.4. Types des moteurs MSAP

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

Il sera donc préférable d'utiliser un moteur à rotor intérieur avec des aimants à hautes énergies. Tandis que, pour une application où la vitesse doit rester la plus constante possible, telle que la motorisation d'un disque magnétique, un moteur à rotor extérieur du fait de son inertie, est préférable [13].

Trois grandes familles existent : les moteurs à rotor intérieur, à rotor extérieur ou à entrefer axial [6][13][14].

a-Moteur à rotor intérieur

Le moteur à rotor intérieur a une configuration classique. Le rotor est constitué d'aimants assemblés sur une douille magnétique. Le stator est similaire à celui des machines triphasées à induction [13][14]. La **Fig** (1.9) montre un exemple de moteur à rotor intérieur [6].

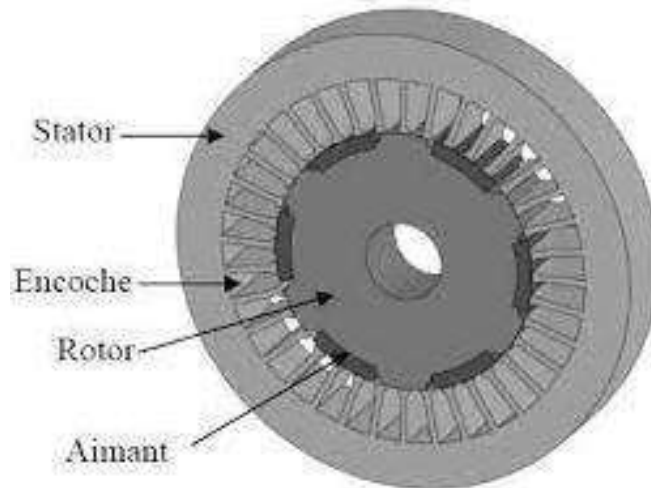


Figure 1.9: Moteur à rotor intérieur.

L'avantage majeur de cette structure est le ratio couple/vitesse qui est élevé. Néanmoins une difficulté de construction existe, il faut être capable de maintenir les aimants, même à vitesse élevée. Le plus souvent ils sont collés et frétés [13] [14] [6].

b-Moteur à rotor extérieur

La **Fig** (1.10) présente la section d'un moteur à rotor extérieur. Les tôles utilisées au stator ressemblent à celle de l'induit de la machine à courant continu à balais. Ce type de stator est simple à bobiner, car le fil se bobine directement sur le stator section par section. 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 coût et sa fragilité de fabrication [6].

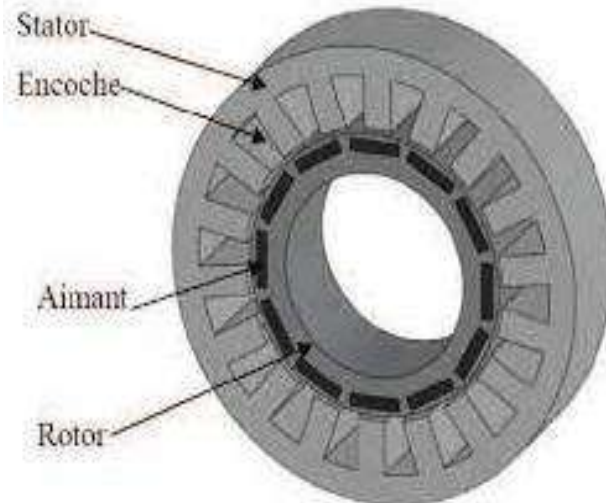


Figure 1.10 : Moteur à rotor extérieur.

Cependant, les machines à rotor extérieur ne sont utilisées que pour des applications à vitesse constante [14].

c-Moteurs à entrefer axial

Dans certaines applications à encombrement réduit, les machines à entrefer axial ont fait leur apparition (moteur de disque dur d'ordinateur, table tournante, ventilateur). Les aimants sont montés sur un disque magnétique mobile. Les bobines sont fixées en général sur le circuit imprimé avec les composants électroniques. Sous le circuit, une plaque métallique permet au champ de se refermer. La **Fig** (1.11) représente une coupe d'un moteur à entrefer axial.

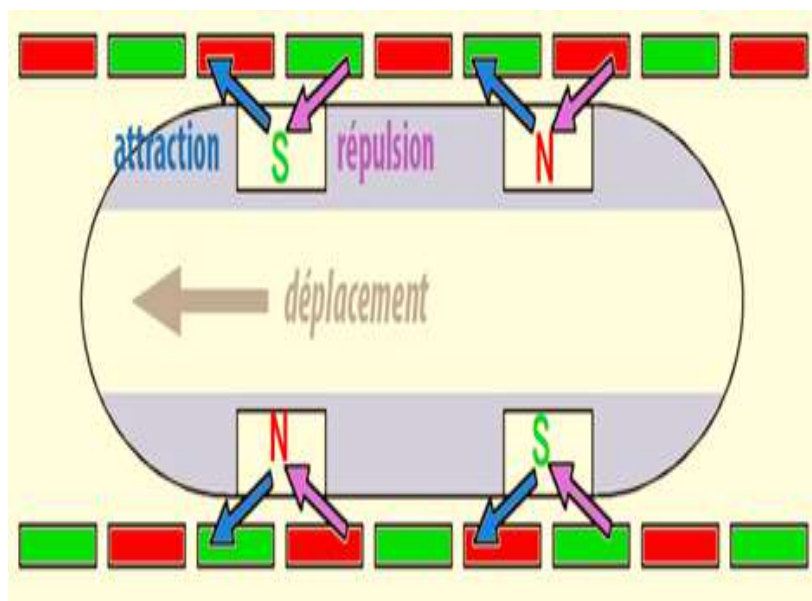


Figure 1.11: Moteur à entrefer axial.

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

Les avantages du moteur à entrefer axial sont : un faible coût, sa forme plate et l'absence de couple réactif à faible vitesse [15].

1.3. comparaison de moteurs MSAP avec les moteurs les plus compétitifs

Tableau 1.2 : Comparaison des différents types de moteurs électriques.

Type de moteur	Aventages	Inconvénients
Moteur asynchrone à cage d'écureuil	Fabrication maîtrisée, Puissance massique élevée, moteur robuste , montée en survitesse aisée	rendement, électronique coûteuse Commande complexe , pertes Joule rotor
Moteur synchrone à réluctance Variable	Coût moindre montée en survitesse aisée	Sur dimensionnement de l'alimentation, bruit et vibrations, Ondulations de couple.
Moteur synchrone à aimants permanents	Technologie de venue courante , très bon rendement , Puissance massique élevée , pas d'échauffement au rotor , refroidissement aisé	ondulations de couple, coût des aimants, technologie coûteuse, survitesse pénalisante
moteur synchrone à excitation bobinée	Bon rendement, Puissance massique faible	Fragilité du balais , Technologie peu courante dans la gamme

1.4. Les avantages et les inconvénients du (MSAP)

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) [2].

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

1.4.1. Les avantages

- ✚ Puissances massiques et volumique importantes et élevées [6].
- ✚ Fonctionnement en survitesse [16].
- ✚ Grande fiabilité [17].
- ✚ Absence de contacts glissants [18].
- ✚ Moins des pertes de cuivre, les pertes viennent surtout du stator d'où le rendement du moteur est améliorées,[19] ce qui facilite l'évaluation de la chaleur due aux pertes dans la machine. Ainsi, il y a suppression d'équipement de refroidissement au rotor. [6]
- ✚ Construction et maintenance plus simple, [19] parce que suppression des bagues et des ballait [17].
- ✚ Un bon rendement [16].
- ✚ Possibilité de supporter des surcharges transitoires importantes et un bon comportement dynamique en accélération et en freinage [18].
- ✚ Une faible inertie et un couple massique élevé [19].
- ✚ Une meilleure performance dynamique [19].

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

1.4.2. Inconvénients

Comme inconvénients de la MSAP on cite :

- ✚ Technologie coûteuse liée au coût des aimants [6].
- ✚ Interaction magnétique due au changement de structure [18].
- ✚ Diminution de l'aimantation selon loi logarithmique en fonction du temps [6].
- ✚ Ondulations de couple [16] [19].
- ✚ Influence des vibrations et des chocs sur la structure de la machine [17] [6].
- ✚ Commutateur mécanique remplacé par un autre électronique, ce qui a pour effet de rendre le contrôle du moteur plus complexe et coûteux que celui d'un moteur à courant continu [19].
- ✚ Et Le principal inconvénient de la machine à aimants est que son flux inducteur est difficile à régler de ce fait la commande du moteur est effectuée par action extérieure en particulier dans le cas d'inducteur à pôle saillants [10].

1.5. Exemples d'applications de moteur MSAP

Le moteur synchrone à aimants permanents est utilisé dans une large gamme de puissance, allant des centaines des watts (servomoteur) à plusieurs méga watts (système de propulsion des navires) [10] [6] , C'est ainsi que le moteur synchrone peut être très utile dans de nombreuses applications, comme :

- ✚ les automobiles électrique [18] [6].
- ✚ les équipements domestiques (machine à laver le linge) [17].
- ✚ les équipements de technologie de l'information (DVD drives) [16].
- ✚ les servomoteurs [5].
- ✚ les applications robotiques [10].
- ✚ la production d'électricité [5].
- ✚ la propulsions des sous marins et la propulsion des vehicules électriques [14].
- ✚ les machines-outils [10] [16].
- ✚ les application de l'énergie de l'éolienne [6].
- ✚ les outils électriques, jouets, système de vision et se équipements [18].
- ✚ les équipements de soins médicaux et de santé (fraise de dentiste) [6].
- ✚ Applications aux fortes puissances [16].

1.6. conclusion

Dans ce chapitre, nous avons fourni des informations générales sur les machines synchrones à aimants permanents, puis mentionné certains aspects structurels des différents types d'aimants permanents. Grâce à notre discussion sur les caractéristiques des machines synchrones à aimants permanents, leurs différents types et les avantages et inconvénients de chaque configuration, nous avons constaté qu'elles constituent la meilleure alternative dans le monde industriel, avec de meilleures performances dynamiques, résistance et densité. . MSAP est apparu dans de nombreux domaines.

Le chapitre suivant sera consacré à une présentation sur la modélisation et la simulation des machines synchrones à aimants permanents MSAP.

Chapitre 2

Modélisation du moteur synchrone à aimants permanents (MSAP)

2.1. Introduction

Tout système physique nécessite une étude de modélisation, elle est à l'origine de la simulation du système face à différentes sollicitations et d'appréhender par la suite des mécanismes régissant son fonctionnement. Historiquement, la machine synchrone est modélisée par des équations non linéaires. Les inductances, les coefficients des équations dynamiques dépendant de la position du rotor sont à l'origine de ce non linéarité.

Dans ce chapitre, nous nous intéressons à l'établissement de modèle de la **MSAP** en fonctionnement sain avec résultat de simulation.

En effet, la modélisation comportementale sera utilisée pour disposer d'un modèle adapté à la simulation du fonctionnement.

2.2. Modélisation de la machine synchrone à aimants permanents

L'étude de tout système physique nécessite une modélisation. Ce qui nous permet d'étudier le comportement de ce système face aux différentes sollicitations et comprendre ainsi les mécanismes régissant son fonctionnement, [17] La modélisation de la MSAP fait l'objet de nombreuses études en moyenne et grande puissance. La mise sous forme d'un modèle mathématique d'une MSAP facilite largement son étude.

Les phénomènes physiques inhérents au fonctionnement du système peuvent être partiellement ou totalement pris en compte dans un modèle. Ils découlent plusieurs niveaux de modélisation liés aux hypothèses simplificatrices associées. Plus le nombre des hypothèses est grand, plus le modèle nous permet à une étude et une exploitation plus aisée même si l'on affecte la précision du modèle. Ces simplifications proviennent des propriétés des machines à courants alternatifs [19].

Pour ce la on suppose que [19] :

- ✚ Le circuit magnétique de la machine est non saturé.
- ✚ Répartition sinusoïdale de la f.e.m .
- ✚ l'effet de la température sur les résistances et hystérésis et courants de Foucault est négligé.
- ✚ L'effet de peau qui augmente les résistances et réduit les inductances est négligé.
- ✚ L'entrefer est d'épaisseur uniforme.
- ✚ L'effet d'encoche est négligé .

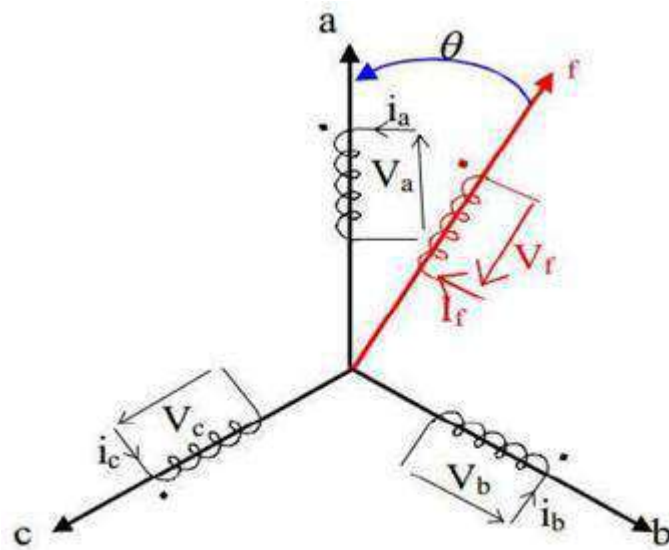


Figure 2.1 :Schéma de la MSAP.

2.2.1. Mise en équations de la machine dans le repère (abc) :

La Fig (2.2) donne la représentation des enroulements pour une machine synchrone triphasée à aimants permanents [20].

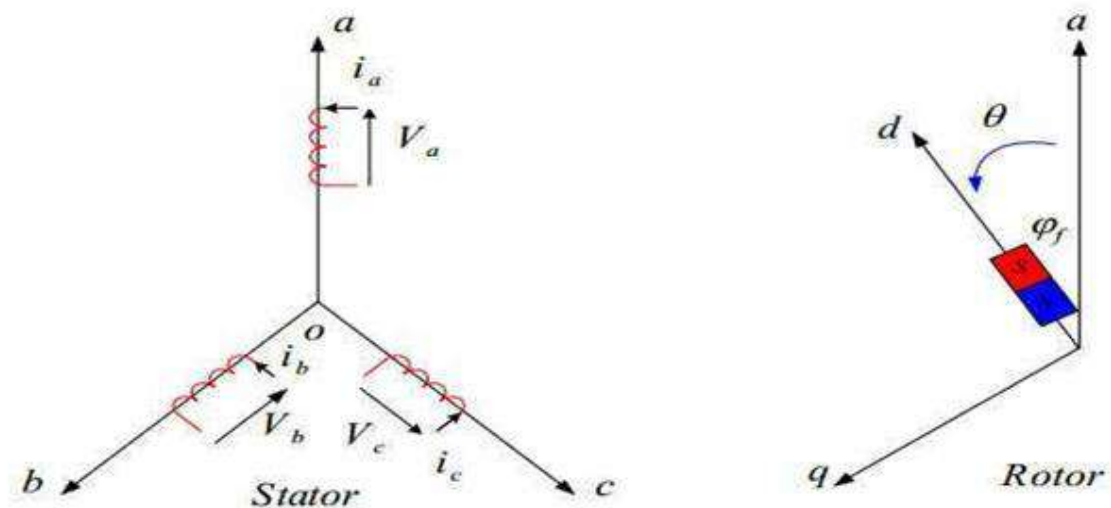


Figure 2.2:Schéma de la MSAP dans le repère abc.

Le comportement de la machine est entièrement défini par trois types d'équations à savoir [20]:

✚ Equations électriques.

✚ Equations magnétique.

✚ Equations mécaniques.

2.2.1.1. Equations électriques :

Les équations électriques du stator d'une machine synchrone triphasée à aimants permanents sans amortisseurs s'écrivent [20] :

$$[V_s] = [R_s][I_s] + \frac{d}{dt} [\Phi_s] \quad (2.1)$$

Avec :

$$[V_s] = [V_{as} \ V_{bs} \ V_{cs}]^T, \quad [I_s] = [I_{as} \ I_{bs} \ I_{cs}]^T, \quad [\Phi_s] = [\Phi_{as} \ \Phi_{bs} \ \Phi_{cs}]^T$$

$$[R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix}$$

Ou :

$$[V_s] = [V_{as} \ V_{bs} \ V_{cs}]^T \quad : \text{Vecteur tensions statoriques.}$$

$$[I_s] = [I_{as} \ I_{bs} \ I_{cs}]^T \quad : \text{Vecteur courants statoriques.}$$

$$[\Phi_s] = [\Phi_{as} \ \Phi_{bs} \ \Phi_{cs}]^T \quad : \text{Vecteur flux statoriques.}$$

$$[R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \quad : \text{Matrice résistance du stator.}$$

2.2.1.2. Equations magnétiques :

Les flux statoriques et rotoriques ont pour expression [21] :

$$[\Phi_s] = [L_{ss}] [i_s] + [\Phi_{f_{abc}}] \quad (2.2)$$

Et :

$$[\Phi_f] = \Phi_{sf} \begin{bmatrix} \cos(\theta) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix}$$

Φ_{sf} : Valeur crête (constante) du flux créé par l'aimant permanent à travers les enroulements statoriques. Φ_{sf}

θ : Position absolue du rotor en degré électrique.

$[L_{ss}]$: Étant la matrice des inductances statoriques.

Dans la machine à pôles saillants, la matrice des inductances propres statoriques $[L_{ss}]$ est fonction de la position. Elle contient deux termes : $[L_{s0}]$ qui est constant, et $[L_{s2}(\theta)]$ qui est en fonction de l'angle $\theta = p \theta_m$.

θ : étant l'angle électrique .

θ_m : est la position mécanique du rotor par rapport au stator.

$$[L_{ss}] = [L_{s0}] + [L_{s2}(\theta)] \quad (2.3)$$

Le terme $[L_{s0}]$ a pour expression :

$$[L_{ss}] = [L_{s0}] \begin{bmatrix} L_{s0} & M_{s0} & M_{s0} \\ M_{s0} & L_{s0} & M_{s0} \\ M_{s0} & M_{s0} & L_{s0} \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

Le terme $[L_{s2}(\theta)]$ s'écrit , dans le cadre de la théorie du premier harmonique :

$$[L_{s2}(\theta)] = L_{s2} \begin{bmatrix} \cos(2\theta) & \cos2(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos2(\theta + \frac{4\pi}{3}) \\ \cos2(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos2(\theta + \frac{4\pi}{3}) & \cos(2\theta) \\ \cos2(\theta + \frac{4\pi}{3}) & \cos(2\theta) & \cos2(\theta - \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

$$[V_s] = [R_s][I_s] + \frac{d}{dt} ([L_{ss}][I_s] + [\Phi_f]) \quad (2.6)$$

On remarque que l'équation (2.6) est non linéaire et couplée pour supprimer ce problème on adopte des changements de variable et des transformations qui réduisent la complexité du système. Dans ce cas nous procédons à la Transformation de Park, qui consiste à transformer les enroulements immobiles (a, b, c) par des enroulements (d, q) tourne avec le rotor.

2.3. Transformation de Park

A l'aide de la transformation de Park, on passe des grandeurs statoriques réelles (tension, flux, courant) à leurs composantes fictives appelés les composantes d-q [21].

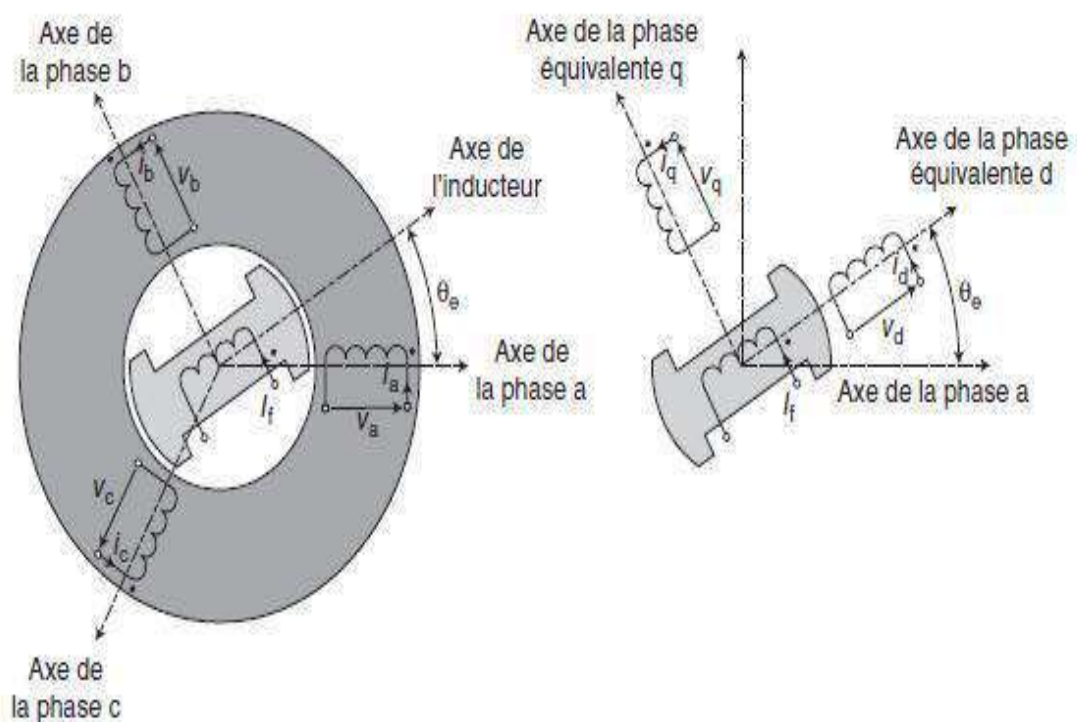


Figure 2.3: Machine équivalente au sens de Park .

Dans le système d'équations (2.6) effectuons le changement de la variable suivant [21]:

$$[p(\theta)][V_{dqhs}] = [V_s] \quad (2.7)$$

$$[p(\theta)][I_{dqhs}] = [I_s]$$

Avec :

$$[p(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

$[P(\theta)]$ étant la matrice de la transformation de Park qui permet le passage des grandeurs statorique $[V_s]$, $[\Phi_s]$ et $[I_s]$ à leurs composants relatives $[V_{dqhs}]$ et $[I_{dqhs}]$.

L'application de la transformation de Park à l'équation (2.8) donne :

$$[p(\theta)][V_{dqhs}] = [R_s] [p(\theta)][I_{dqhs}] + \frac{d}{dt} ([L_{ss}] [p(\theta)][I_{dqhs}]) + \frac{d[\Phi_f]}{d\theta} \frac{d\theta}{dt} \quad (2.9)$$

Avec :

$$\frac{d}{dt} = s$$

$$[R_s] = [R_s] \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Si on prémultiplie tous ces termes par $[P(\theta)]^{-1}$ et en sachant que :

On peut :

Écrire les équations simplifiées des tensions :

$$[V_{dqhs}] = [R_s][I_{dqhs}] + [p(\theta)]^{-1} \frac{d}{dt} ([L_{ss}] [p(\theta)][I_{dqhs}]) + \frac{d[\Phi_f]}{d\theta} \frac{d\theta}{dt} \quad (2.10)$$

Avec :

$$[p(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

Les équations électriques dans le repère de Park :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{d}{dt} \Phi_{ds} - \omega \Phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + \frac{d}{dt} \Phi_{qs} - \omega \Phi_{ds} \end{cases} \quad (2.12)$$

Les flux s'écrivent :

$$\begin{cases} \Phi_{ds} = L_d I_d + \Phi_f \\ \Phi_{qs} = L_q I_q \end{cases} \quad (2.13)$$

En introduisant (2.13) dans (2.12) on aura Le modèle électrique du MSAP sous la forme suivante :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} + L_{ds} \frac{d}{dt} I_{ds} - \omega L_{qs} I_{qs} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + L_{qs} \frac{d}{dt} I_{qs} - \omega L_{ds} I_{ds} + \omega \Phi_{ds} \end{cases} \quad (2.14)$$

Expression de la puissance et du couple électromagnétique Selon Park, l'expression de la puissance s'écrit comme suit :

$$p(t) = V_{ds} I_{ds} + V_{qs} I_{qs} \quad (2.15)$$

En remplaçant V_{ds} et V_{qs} par leur expressions il vient :

$$P(t) = \frac{2}{3} \left[R_s (I_{ds}^2 + I_{qs}^2) - (I_{ds} \frac{d}{dt} \Phi_{ds} + I_{qs} \frac{d}{dt} \Phi_{qs}) + \frac{d}{dt} (\Phi_{ds} I_{qs} - \Phi_{qs} I_{ds}) \right] \quad (2.16)$$

D'où:

- ✚ Le 1er terme représente la chute de tension Ohmiques (pertes par effet joule).
- ✚ Le 2ème terme représente la variation de l'énergie magnétique emmagasinée.
- ✚ Le 3ème terme représente la puissance transférée du stator au rotor à travers l'entrefer (puissance électromagnétique).

2.3.1. Equations mécaniques :

$$P_e = C_e \cdot \Omega \quad (2.17)$$

D'où:

$$C_e = \frac{3}{2} p [\Phi_{ds} I_{qs} - \Phi_{qs} I_{ds}] \quad (2.18)$$

En remplaçant Φ_{ds} et Φ_{qs} par leur expressions il vient :

$$C_e = \frac{3}{2} p [(L_{ds} - L_{qs}) I_{ds} I_{qs} - \Phi_f I_{qs}] \quad (2.19)$$

Avec :

p : nombre de paire de pôles.

L'équation de mouvement de la machine est :

$$C_e - C_r - f\Omega = J \frac{d\Omega}{dt} \quad (2.20)$$

Avec :

J : Le couple d'inertie des masses tournantes .

C_r : Couple résistant (ou statique) imposé par la charge mécanique .

C_e : Couple électromagnétique .

Ω : vitesse mécanique de rotation .

f : Coefficients des frottements visqueux.

Φ_f : Flux des aimants permanents.

2.4. Schéma Fonctionnelle De MSAP :

D'après les équations (2.14), (2.19) et (2.20), on obtient le système d'équations suivant :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d}{dt} I_{ds} = \frac{1}{L_{ds}} (V_{ds} - R_s I_{ds} + \omega L_{qs} I_{qs}) \\ \frac{d}{dt} I_{qs} = \frac{1}{L_{qs}} (V_{qs} - R_s I_{qs} + \omega L_{ds} I_{ds} - \omega \Phi_f) \\ C_e = \frac{3}{2} p [(L_{ds} - L_{qs}) I_{ds} I_{qs} - \Phi_f I_{qs}] \\ \frac{d\Omega}{dt} = \frac{1}{J} (C_e - C_r - f \Omega) \end{array} \right. \quad (2.21)$$

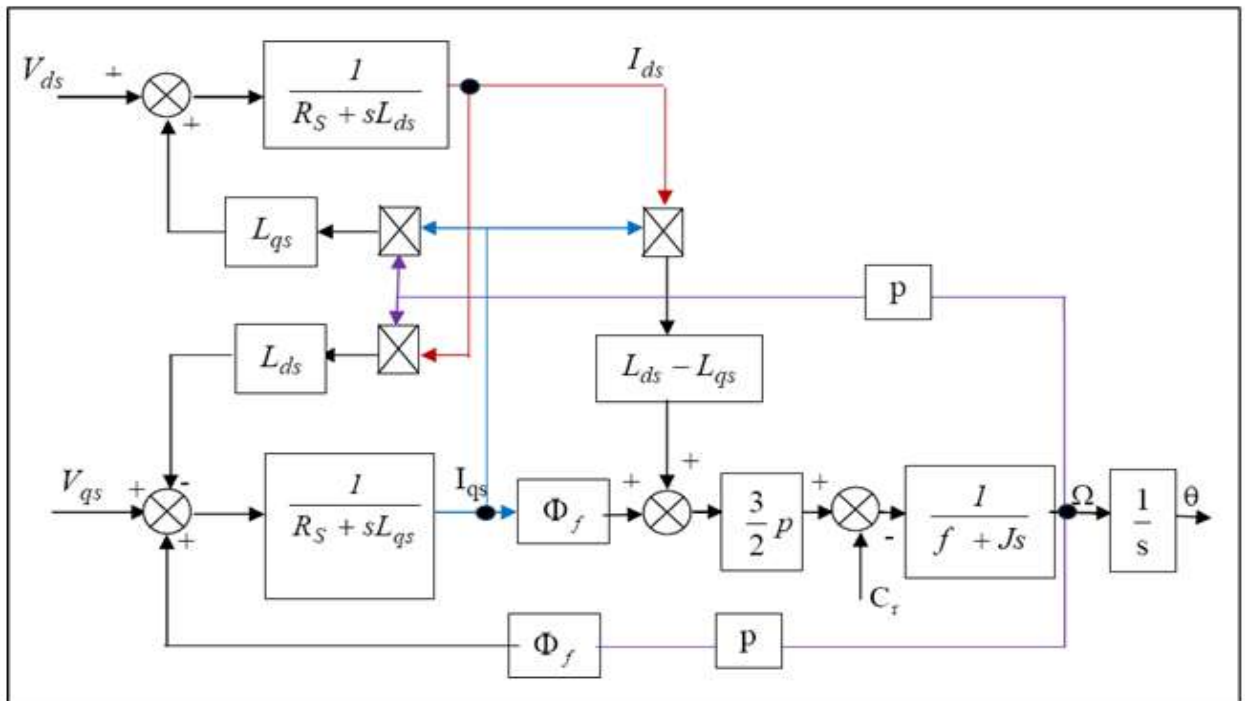


Figure 2.4: Schéma bloc d'une MSAP alimentée en tension.

2.5. Représentation d'état :

Le modèle général d'entrée-sortie de la machine synchrone à aimants permanent, est lié au choix du vecteur d'état. Dans le cas des équations électriques du MSAP, dans le repère lié au rotor, les composantes du vecteur d'entrée de la machine sont les tensions V_{ds} et V_{qs} et les courants I_{ds} et I_{qs} statoriques sont les composantes du vecteur de sortie. Notre objectif dans ce qui suit est de mettre les équations sous la forme d'équation d'état suivante [11]:

$$\begin{cases} [X'] = [A][X] + [B][U] \\ [Y] = [C][X] + [D][U] \end{cases} \quad (2.22)$$

[A]: Matrice fondamentale qui caractérise le système.

[B] : Matrice d'entrée .

[C] : Vecteur de commande .

[X] : Vecteur d'état (posons , $[X] = [I_{ds} \ I_{qs}]^T$) .

[C] : Matrice de sortie .

[D] : Matrice de transfert direct .

Sous forme matricielle on peut écrire le système d'équation (2.17) comme suit :

$$\frac{dx}{dt} = [A][X] + [B][U] \quad (2.23)$$

Avec :

$$[X] = (I_{ds} \ I_{qs})^T \quad (2.24)$$

$$[V] = [V_{ds} \ V_{qs} \ \Phi_f]^T \quad (2.25)$$

Et :

$$\begin{bmatrix} I_{ds}' \\ I_{qs}' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L_{ds}} & -\omega \frac{L_{qs}}{L_{ds}} \\ -\omega \frac{L_{ds}}{L_{qs}} & -\frac{R_s}{L_{qs}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_{ds}} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_{qs}} & -\frac{\omega}{L_{qs}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \\ \Phi_f \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

Et on pose :

$$[A] = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L_{ds}} & -\omega \frac{L_{qs}}{L_{ds}} \\ -\omega \frac{L_{ds}}{L_{qs}} & -\frac{R_s}{L_{qs}} \end{bmatrix} \quad \text{Et} \quad [B] = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_{ds}} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_{qs}} & -\frac{\omega}{L_{qs}} \end{bmatrix}$$

On peut écrire la matrice [A] comme suit:

$$[A] = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L_{ds}} & 0 \\ 0 & -\frac{R_s}{L_{qs}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\frac{L_{qs}}{L_{ds}} \\ -\frac{L_{ds}}{L_{qs}} & 0 \end{bmatrix} \omega \tag{I.27}$$

On peut écrire la matrice [B] comme suit:

$$[B] = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_{ds}} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_{qs}} & 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{L_{qs}} \end{bmatrix} \omega \tag{2.28}$$

La simulation a été effectuée par le logiciel Simulink sous MATLAB ,la structure en schéma-bloc de cette simulation est présentée par la figure suivante:

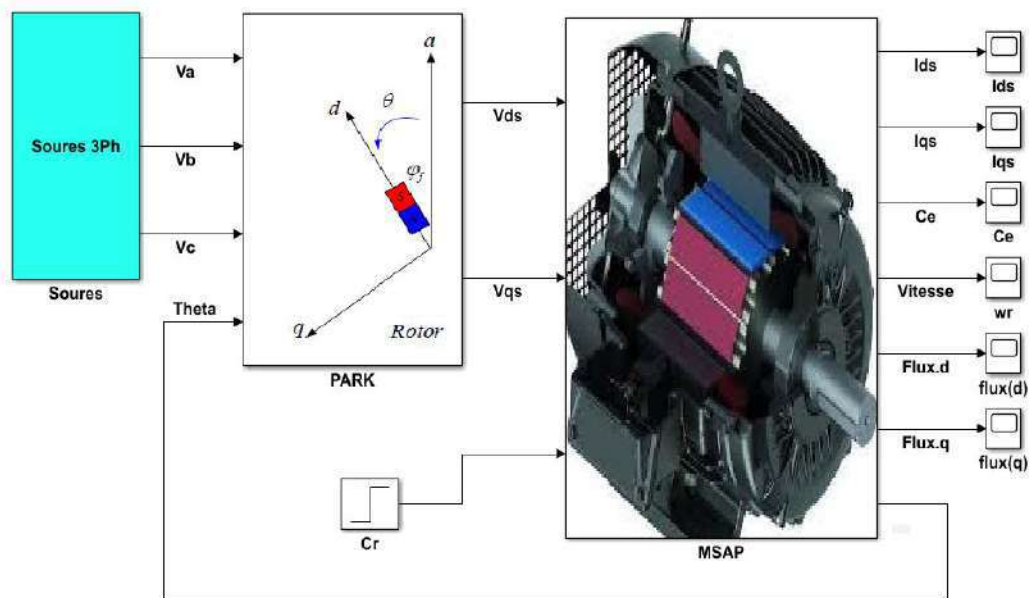


Figure2.5: Schéma Bloc MSAP dans Matlab/Simulink.

2.5.1. Résultats de simulation :

Les paramètres de la machine utilisés sont indiqués dans l'annexe.

Nous avons présenté sur la **Fig(2.6)**, **Fig(2.7)**, la vitesse ω (rad/s), le couple Electromagnétique Cem (N.m), les deux composantes du courant sur l'axe directe et en quadrature (I_{qs} , I_{ds}), de la MSAP qui est alimentée par une source de tension triphasée.

2.5.1.1. Résultats de Simulation démarrage à vide :

En première étape, on a simulé le fonctionnement de la machine synchrone à vide, (sans application du couple de charge). La **Fig (2.6)** présente les résultats de la simulation :

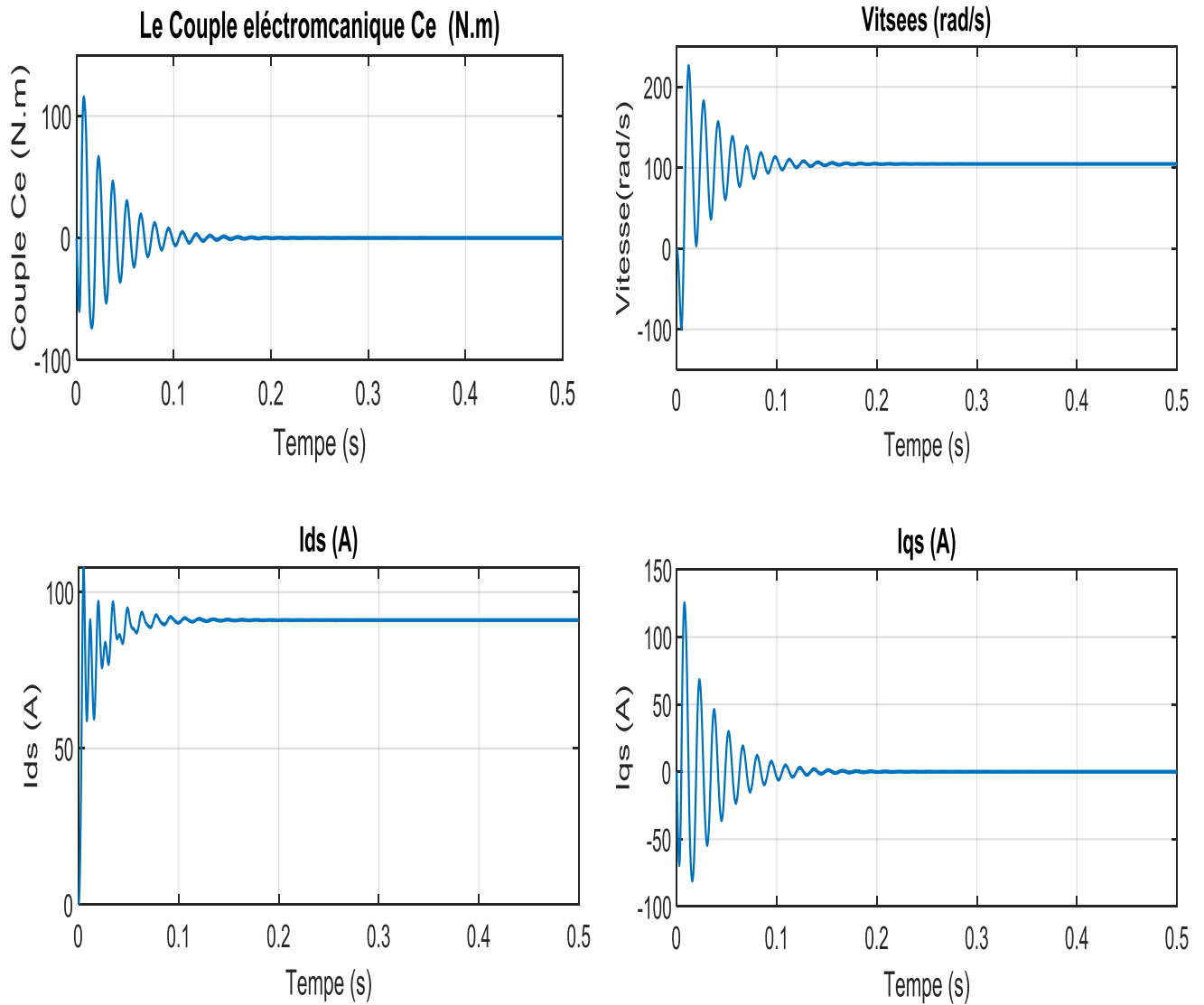


Figure 2.6 : Résultats de Simulation du démarrage à vide.

2.5.1.2. Interprétations des résultats :

Pendant le régime transitoire, la vitesse est fortement pulsatoire, présentant au premier instant de démarrage des battements importants, et atteint sa valeur nominale de 105 rad/sec, la vitesse négative est due aux contraintes de démarrage.

La courbe du couple électromagnétique présente au démarrage des battements importants dans un intervalle de temps court, puis se stabilise à zéro puisque la machine est à vide.

Pour les courants I_{qs} et I_{ds} au début de démarrage on voit des pics de courant assez important et cela s'explique par la faible vitesse de démarrage, ensuite ils se stabilisent à leurs valeurs nominales après un temps assez court.

Résultats de Simulation lors du démarrage avec l'application de couple au régime permanent ($C_r=3\text{N.m}$ à $t=0.5\text{s}$) :

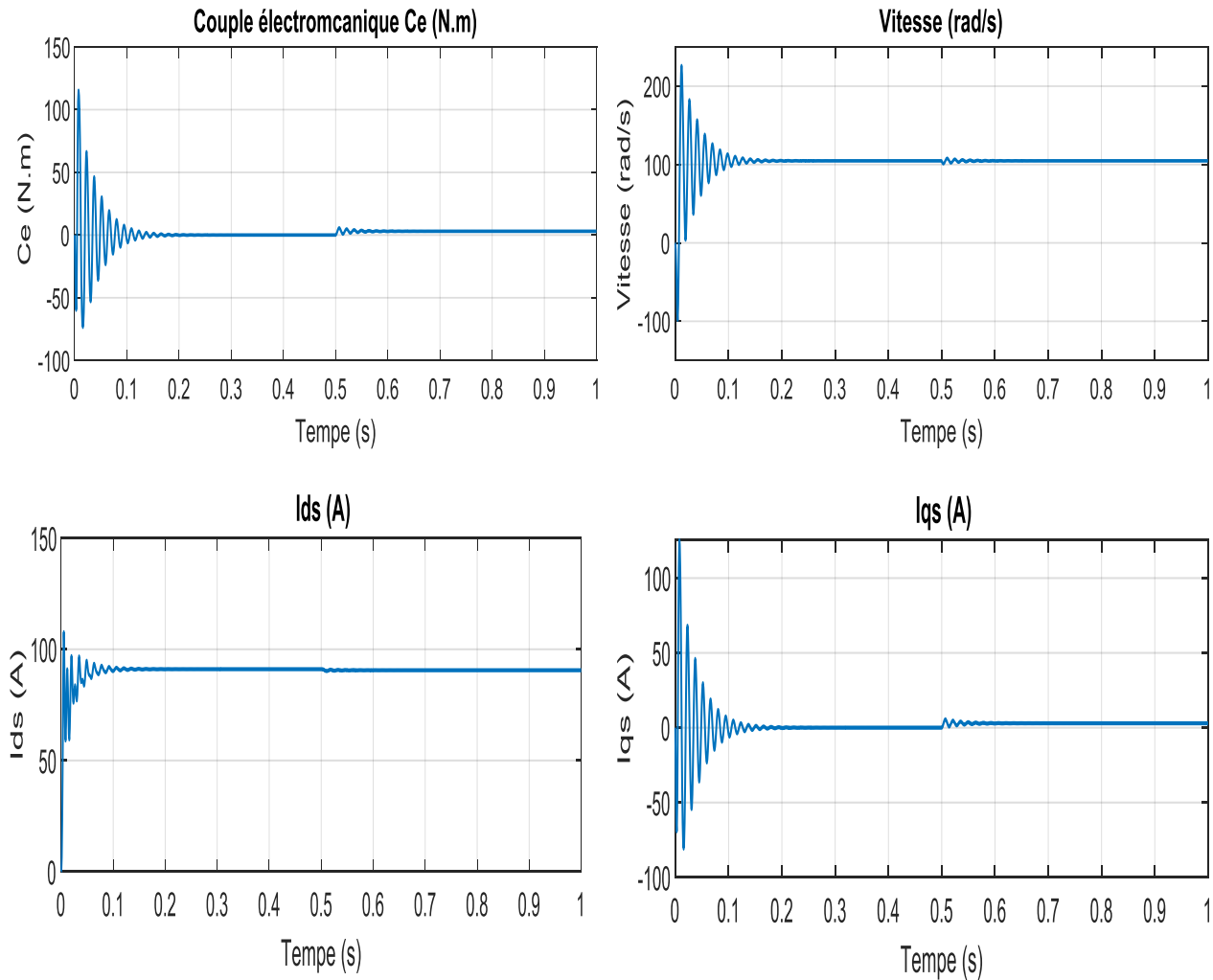


Figure 2.7 : Résultats de Simulation lors du démarrage avec l'application de couple au régime permanent ($C_r=3\text{N.m}$ à $t=0.5\text{s}$).

2.5.1.3. Interprétations des résultats :

La Fig (2.7) montre l'évolution des grandeurs précédentes avec l'application d'un échelon du couple résistant ($C_r=3\text{N.m}$) à l'instant ($t=0.5\text{s}$), nous remarquons une diminution de la vitesse de rotation suivie d'une augmentation du couple électromagnétique à une valeur compensant la charge appliquée. Suivi d'un appel supplémentaire du courant illustré par une augmentation des courants I_{qs} et I_{ds} .

2.6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous présentons les principes de base d'une machine synchrone à aimants permanents (MSAP), ainsi que leur modélisation sous forme d'équations mathématiques.

Le modèle MSAP a été créé dans Park Standard afin de rendre le système linéaire et de faciliter l'étude. Nous avons alors abordé la modélisation de la portion nutritionnelle. Nous avons effectué une simulation sur cet appareil. D'après les résultats de simulation que nous pouvons obtenir, les réponses sont très rapides et assez stables, suivies d'un apport de courant supplémentaire en cas de charges.

Chapitre 3

Etude Paramétrique Et Calcul Electromagnétique De La MSAP

3.1. Introduction

La méthode des éléments finis est l'une des méthodes les plus utilisées pour résoudre les équations aux dérivées partielles résultant de la modélisation électromagnétique des machines électriques tournantes. Sa particularité réside dans le fait qu'il permet de prendre en compte les phénomènes inhérents au fonctionnement de ces machines, tels que le phénomène de saturation magnétique ainsi que les mouvements relatifs des pièces en rotation. La mise à l'échelle de la machine permet de spécifier les caractéristiques et les paramètres de la machine afin de répondre à des besoins très spécifiques. Ces besoins sont souvent formulés dans des cahiers des charges qui précisent les performances attendues d'une machine et les nombreuses contraintes auxquelles elle doit répondre. Dans ce dernier chapitre, nous déterminons les performances électromagnétiques d'une machine synchrone permanente à aimant enterré, agissant comme un moteur, à l'aide du logiciel ANSYS-Maxwell. Dans ce chapitre, nous allons mener une étude paramétrique pour modéliser les effets de certains paramètres sur les performances de la machine MSAP.

3.2. Présentation de la méthode

La méthode des éléments finis est 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 magnétique [22]. C'est une méthode générale qui s'applique à de nombreux problèmes rencontrés dans la pratique : électrique, thermique, mécanique...etc., linéaires ou non linéaires, définies dans un domaine géométrique quelconque à une, deux ou trois dimensions. Elle fut développée et appliquée initialement en génie Civil et en mécanique, elle n'a trouvé son application en électromagnétisme que vers les années 1970 [23] [24].

3.3. Principe de la méthode des éléments finis

Le principe de la méthode des éléments finis est basé sur une formulation intégrale du problème aux dérivées partielles et de leurs conditions aux limites. Le principe bien connu de la méthode est de discrétiser le domaine d'étude en de multiples éléments pour transformer les systèmes d'équations aux dérivées partielles en un système matriciel d'équations dont la résolution fournit une solution approchée du problème.

3.3.1. Les principales étapes de construction d'un modèle éléments finis

Les principales étapes de la mise en oeuvre de la méthode des éléments finis sont les suivantes [25] :

- ✚ Discrétisation du milieu continu en sous domaines .
- ✚ Construction de l'approximation nodale par sous domaine .
- ✚ Calcul des matrices élémentaires correspondant à la forme intégrale du problème .
- ✚ Assemblage des matrices élémentaires .
- ✚ Prise en compte des conditions aux limites .
- ✚ Résolution du système d'équations.

3.4. Présentation de logiciel ANSYS-Maxwell

ANSYS-Maxwell version 16.0 est un logiciel commercial qui calcule les champs électromagnétiques dans le domaine fréquentiel et temporel, et permet d'analyser le comportement électromagnétique d'une structure. Pour analyser ce comportement en détails, le logiciel met à notre disposition des outils d'interprétation post-traitement. Il effectue des calculs électromagnétiques par résolution des équations de Maxwell à l'aide de la méthode des éléments finis. Cette dernière est basée sur la description géométrique de la structure sous forme d'un maillage. Elle consiste à diviser l'espace en petits éléments homogènes mais de taille pratiquement très variable, ce qui constitue l'un des points forts de cette méthode [26] .

Un projet Maxwell est un dossier qui contient un ou plusieurs modèles appelés design, chaque modèle contient une structure géométrique, ses conditions aux limites et les matériaux utilisés, ainsi que les solutions de champs électromagnétiques et les interprétations post traitement. Tous ces composants peuvent être atteints par la fenêtre Project Manager dans l'environnement maxwell [27] .

3.4.1. Un projet en ANSYS-Maxwell

La fenêtre ANSYS-Maxwell a plusieurs panneaux facultatifs :

- ✚ **Le Project Manager:** contient un arbre de conception qui énumère la structure du projet.
- ✚ **Le Message Manager:** permet d'afficher tous les erreurs avant de commencer la Simulation
- ✚ **La fenêtre de Propriété :** pour les affichages et permet de changer les paramètres des attributs du modèle.

- ✚ La fenêtre de Progress: affiche les progressions de la solution.
- ✚ La fenêtre de 3D Modeler : contient le modèle et son arbre pour la conception Active .

3.4.2. Organigramme de travail sur logiciel ANSYS Maxwell [28].

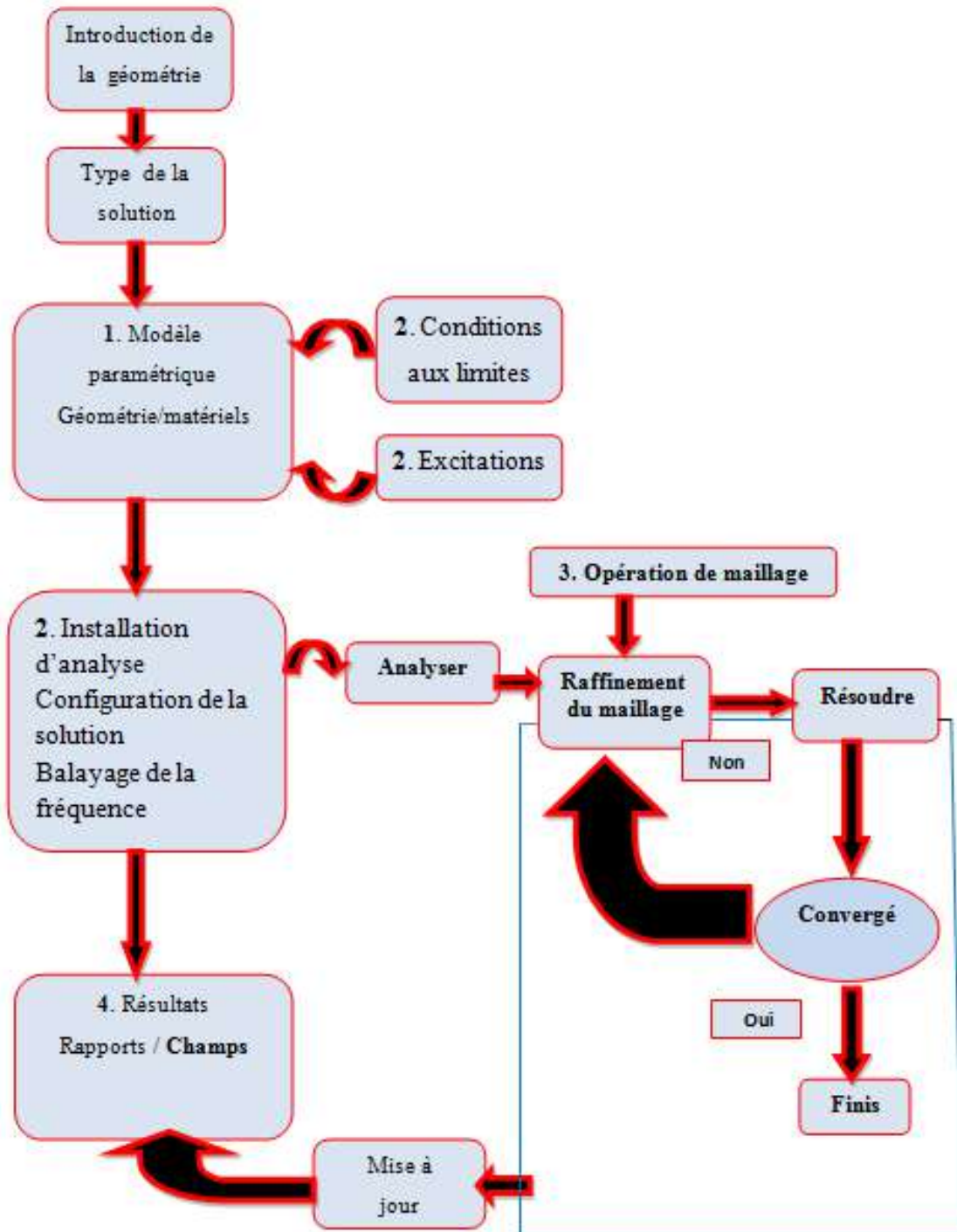


Figure 3.1: Organigramme des différentes étapes d'un design Maxwell.

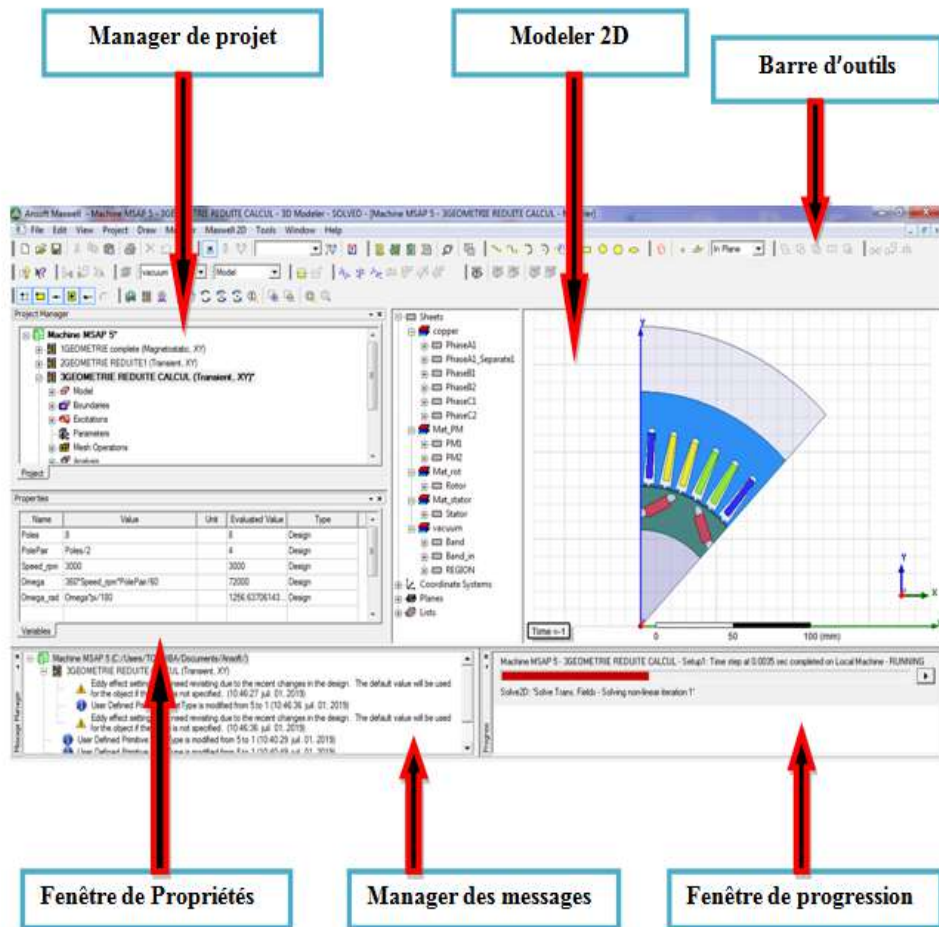


Figure 3.2:La fenêtre principale du logiciel Maxwell.

3.5. Modèle de la machine utilisé:

La MSAP à étudier est une machine à 12 encoches présentant un rotor à aimants enterrés comme le montre

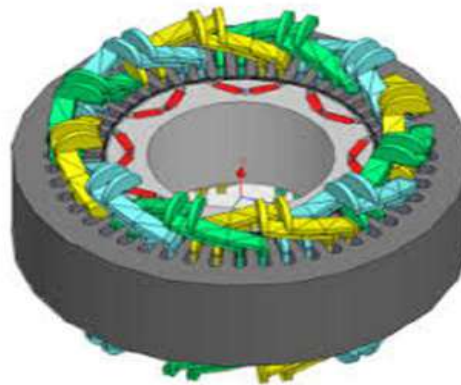


Figure 3.3:Représentation de la géométrie de la machine en 3D.

La fenêtre de sélection de machine de la **Fig (3.4)** comprend toutes les machines tournantes CA et CC possibles dans le mainframe Maxwell RMxprt, chaque machine ayant ses propres dimensions et propriétés mécaniques prédéfinies.

Lors de la sélection d'une machine, une interface utilisateur graphique s'ouvre sur l'écran qui comprend cinq fenêtres et quatre barres d'outils ayant chacune diverses fonctions, parmi lesquelles la plus importante est la fenêtre de projet [29].

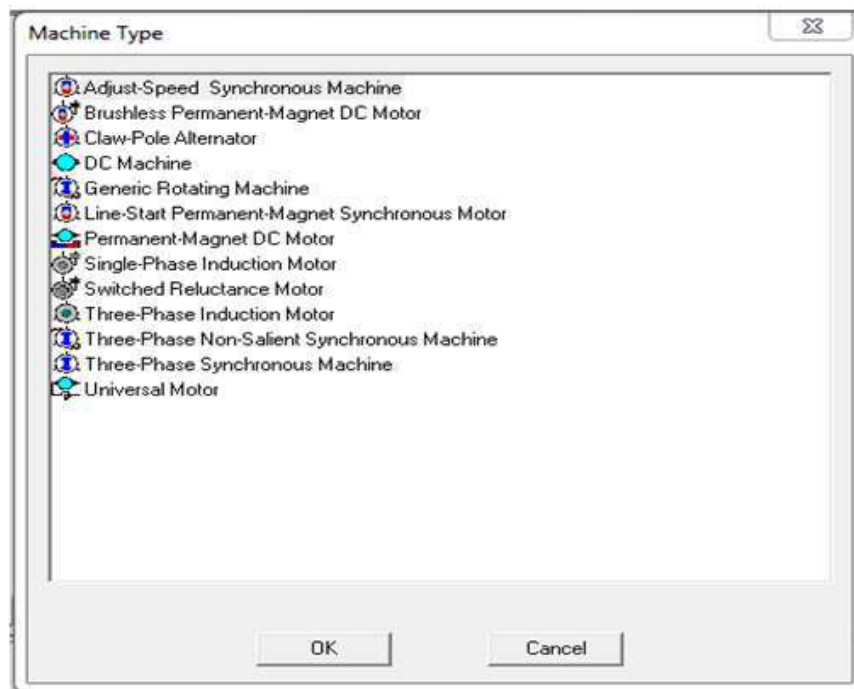


Figure 3.4:Interface de sélection de machine dans RMxprt.

3.5.1. La fenêtre Projet de la Fig (3.5) comprend une liste déroulante de ses principaux composants.

- ✚ Machine
 - Circuit
- ✚ Stator
 - oncoche
 - Enroulement
- ✚ Rotor
 - Pôle
 - Arbre
- ✚ Analysis
- ✚ Optimetrics
- ✚ Results

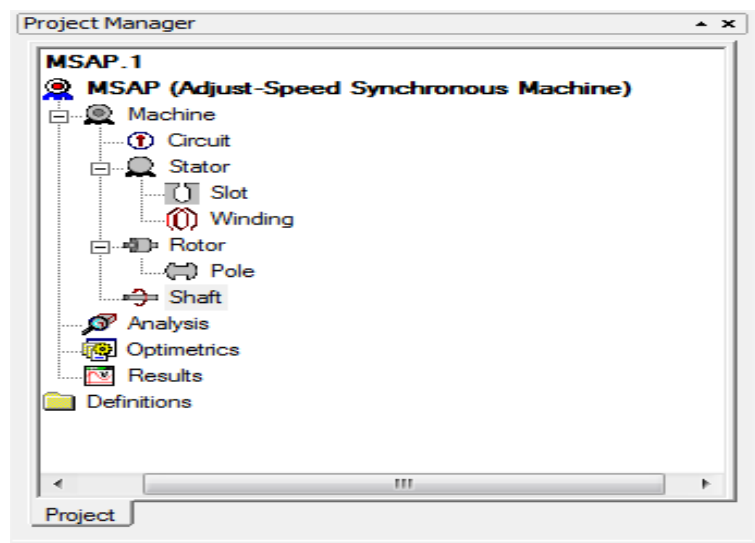


Figure 3.5:Fenêtre du gestionnaire de projet.

3.5.2. Les composants de la machine:

La fenêtre des propriétés de la machine comprend des informations générales, le nombre de pôles doit être un nombre entier pair, la position du rotor peut être un rotor interne ou externe, la perte de friction et d'enroulement (résistance à l'air) ainsi que la vitesse de référence sont définies par l'utilisateur quantités [29].

➤ **Les Donnés de Machine :**

Tableau 3.1 : Fenêtre des propriétés de la machine.

Paramètre	Valeur	Unité
Nombre d'encoches	12	
Nombre de Pole	14	
Position du rotor	rotor intérieur	
Perte friction	10	W
Perte au vent	10	W
vitesse de référence	15000	tr/min
type de contrôle	Dc	
type de circuit	Y3	
Fréquence	50	Hz

Le type de circuit peut être:

1. Y3 - Type Y, 3 Φ
2. L3 - Type de boucle, 3 Φ
3. S3 – Type étoile, 3 Φ
4. C2 – Type croisé, 2 Φ
5. L4 - Type de boucle, 4 Φ
6. S4 – Type étoile , 4 Φ

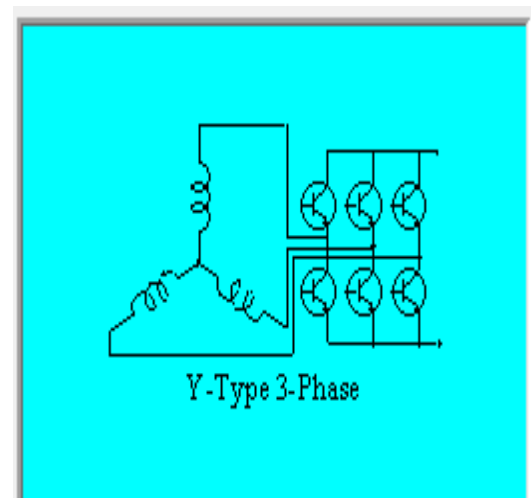


Figure 3.6: circuit Y3.

➤ **Les Donnés de Circuit :****Tableau 3.2 :**Fenêtre Propriétés du circuit.

Paramètre	Valeur	Unité
Largeur d'impulsion de déclenchement	120	deg
Chute de transistor	2	V
Chute de diode	2	V

➤ **Les Donnés de Stator :**

Les caractéristiques du stator étudié sont données au Tableau suivant :

Tableau 3.3:Fenêtre Propriétés du stator.

Paramètre	Valeur	Unité
Diamètre extérieur	300	mm
Diamètre intérieur	217	mm
Longueur	75	mm
Facteur d'empilement	0.95	
Type d'acier	steel_1008	
Nombre d'emplacements	12	
Type d'emplacement	4	
Largeur d'inclinaison	0	

➤ **Les donnés d'oncoche :****Tableau 3.4:**Fenêtre Dimensions d'oncoche.

Paramètre	Valeur	Unité
Hs0	2	mm
Hs1	3	mm
Hs2	17	mm
Bs0	11	mm
Bs1	23.5	mm
Bs2	29	mm
Rs	2	mm

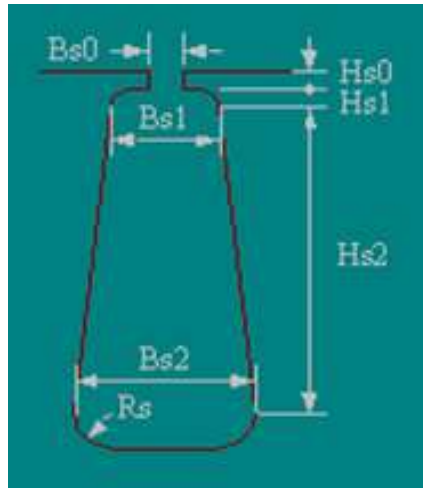


Figure 3.7 :Modèle d'oncoche.

➤ Les Donnés de Enroulement :

Tableau 3.5:Fenêtre Propriétés du bobinage.

Paramètre	Valeur	Unité
Couches d'enroulement	1	
Type d'enroulement	Entièrement enroulé	
Branches parallèles	1	
enroulement du stator	4	
Conducteurs par emplacement	0	
Nombre de brins	0	
Enroulement de fil	0	
Taille de fil	Diameter: 1.369	mm

La figure suivante montre le stator seul sans bobinage :

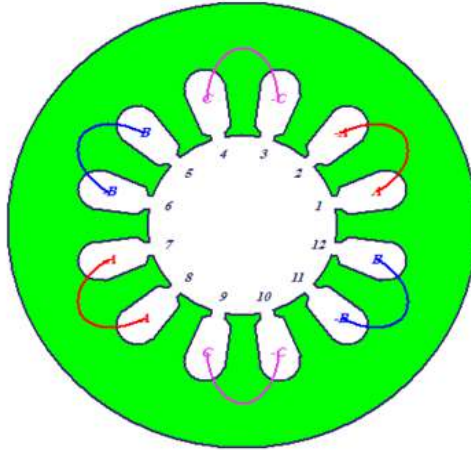


Figure 3.8: Structure de stator.

➤ Les Donnés de Rotor:

Tableau 3.6: Paramètres de rotor.

Paramètre	Valeur	Unité
Diamètre extérieur	210	mm
Diamètre intérieur	145	mm
Longueur	75	mm
type Acier	steel_1008	
Facteur d'empilement	0.95	
Type de poteau	5	

En raison de la géométrie de rotation externe de la machine MSAP, nous utilisons le type d'arbre .x pour l'analyse illustrée ci-dessous sur la Fig(3.9) .

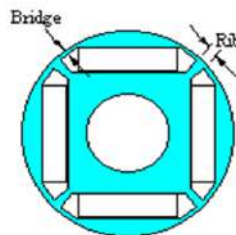
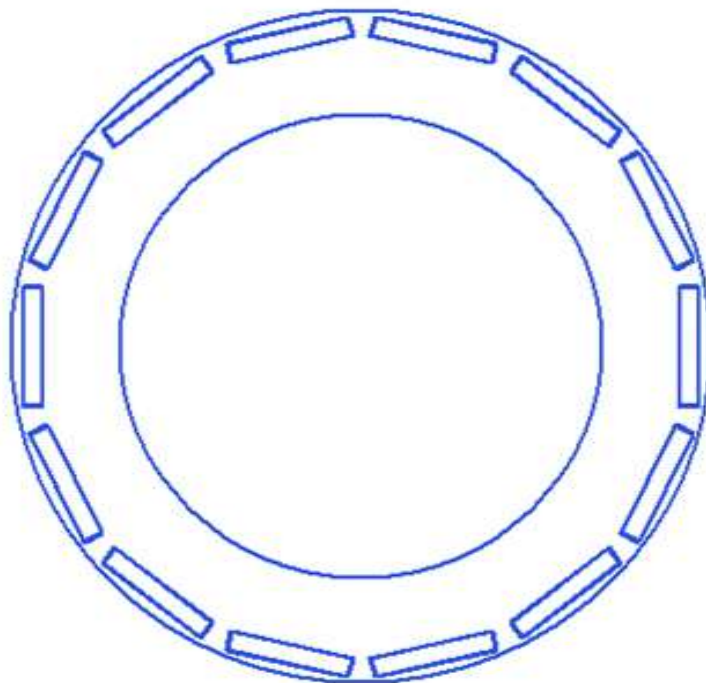


Figure 3.9: Forme de pôle de type 5 dans (ANSYS – Maxwell RMxprt).

➤ Les Donnés de Pôle:

Tableau 3.7: Fenêtre Propriétés des données du rotor.

Paramètre	Valeur	Unité
Embrasser	0.8	
Pont	2	
Type d'aimant	NdFe35	
Largeur de l'aimant	38	
Épaisseur del'aimant	6	

**Figure 3.10:** Structure de rotor.

3.5.3. La fenêtre de configuration d'analyse

illustrée à la **Tableau_8** du moteur MSAP dans **RMxprt** est utilisée pour définir les paramètres d'entrée/sortie nominaux du moteur. Le type de fonctionnement est moteur dans ce cas.

Le type de charge peut être :

1. Vitesse constante - La vitesse du moteur est constante.
2. Puissance constante - La puissance de sortie du moteur est constante.
3. Couple constant – Le couple reste constant quelle que soit la vitesse
4. Couple linéaire - Le couple augmente linéairement avec la vitesse
5. Charge du ventilateur - La charge varie de manière non linéaire avec la vitesse

Le champ Puissance de sortie nominale décrit la puissance développée à l'arbre du moteur. Le champ Tension nominale représente la tension RMS ligne à ligne. La vitesse nominale définit la vitesse de sortie du moteur à laquelle les mesures sont enregistrées. La température de fonctionnement, comme son nom l'indique, sert à quantifier la température fonctionnelle du moteur [29].

Tableau 3.8:Fenêtre de configuration de l'analyse.

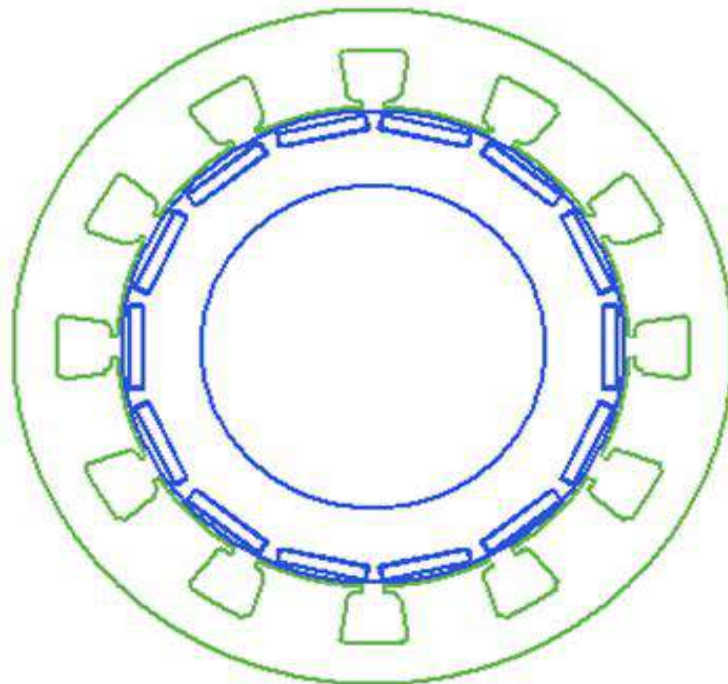
Paramètre	Valeur	Unité
Nom	Setup1	
Type d'opération	moteur	
Type de charge	Puissance constante	
Puissance de sortie nominale	110	KW
Tension nominale	300	V
Vitesse nominale	15000	tr/min
Température de fonctionnement	75	°C

3.5.4. Les Données résolution

RMxprt fournit une gamme complète de types de données et de variables, certains paramètres de sortie et tracés importants sont décrits.

Tableau 3.9: Données de solution pour 12 buses, 14 arbres, moteur de 110 kw.

Paramètre	Valeur	Unité
Tension de crête induite par la ligne	229.382	V
Courant DC d'entrée	376.775	A
Courant de phase efficace	481.667	A
Charge thermique d'induit	209.388	A ² /mm ³
Charge électrique spécifique	33913.9	A_per_meter
Densité de courant d'induit	6174100	A_per_m ²
Perte de friction et de dérive	20	W
Perte de noyau de fer	0.0332072	W
Perte de cuivre d'armature	459.836	W
Perte de transistor	2033.57	W
Perte de diode	515.475	W
Perte totale	3028.91	W
Puissance de sortie	110.004	KW
La puissance d'entrée	113.033	KW
Efficacité	97.3203	%
Vitesse synchrone	15000	tr/min
Couple nominal	70.0305	Nm
Angle de couple	65.3796	deg
Puissance de sortie maximale	122535	W

**Figure 3.11:** Coupe transversale du moteur MSAP à 12 fentes, 14 pôles.

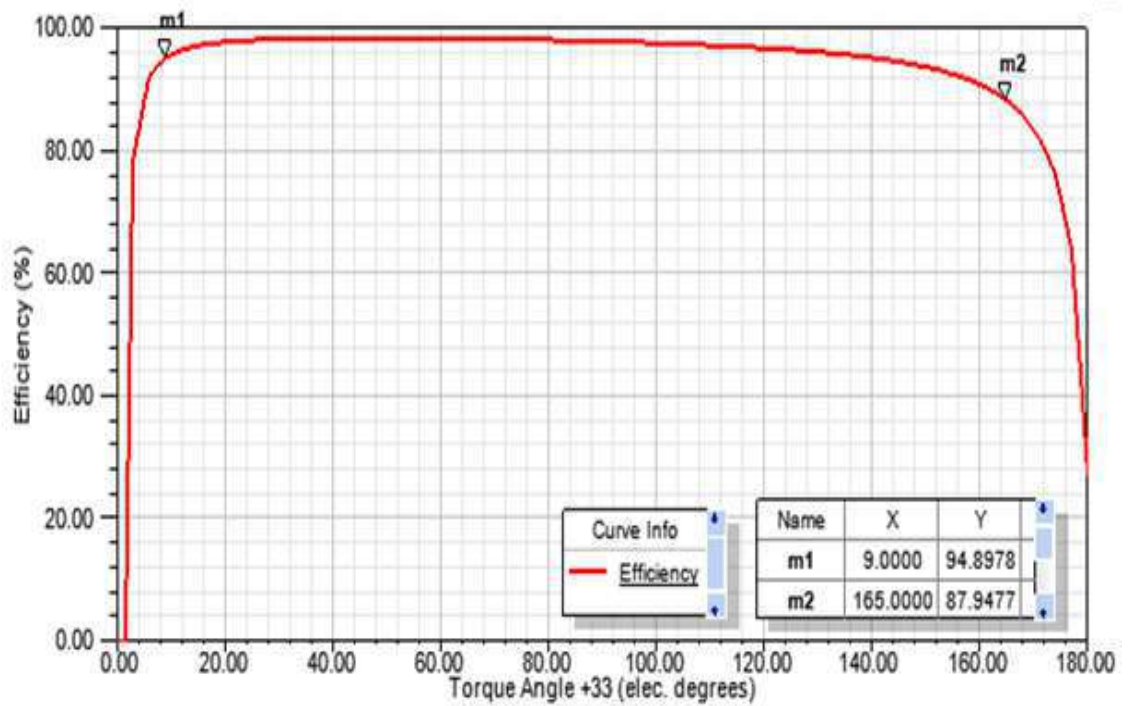


Figure 3.12:Rendement (%) Vitesse V/s (tr/min).

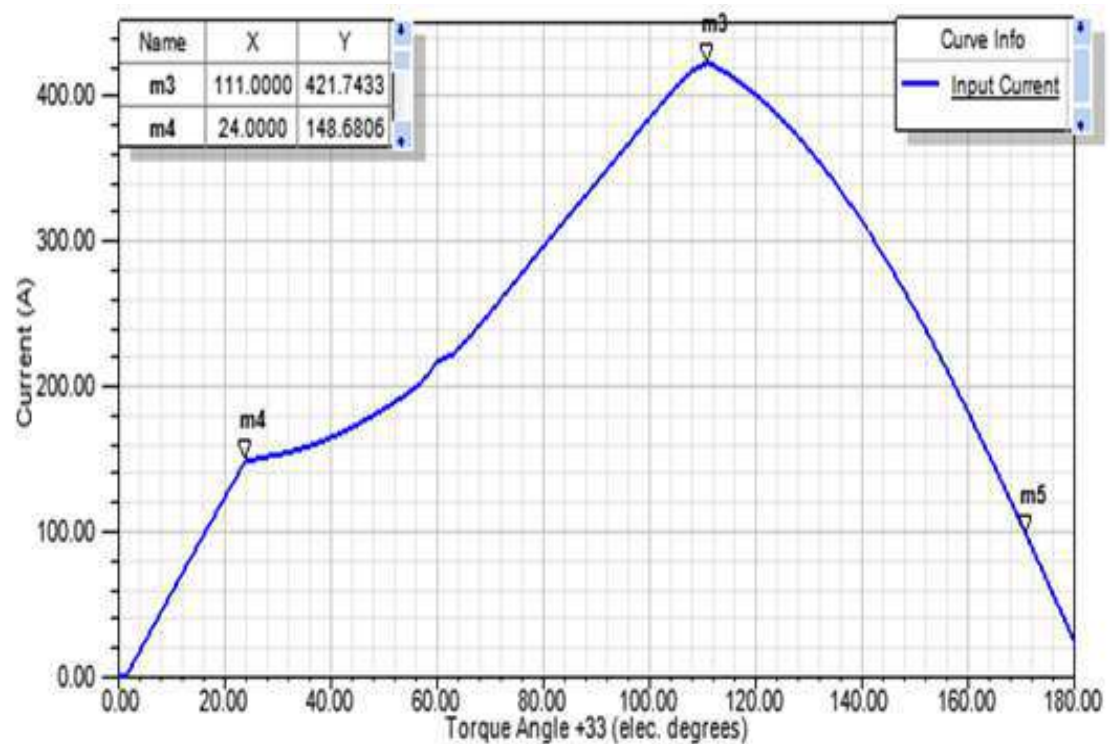


Figure 3.13:courant d'entrée Vs l'angle de couple.

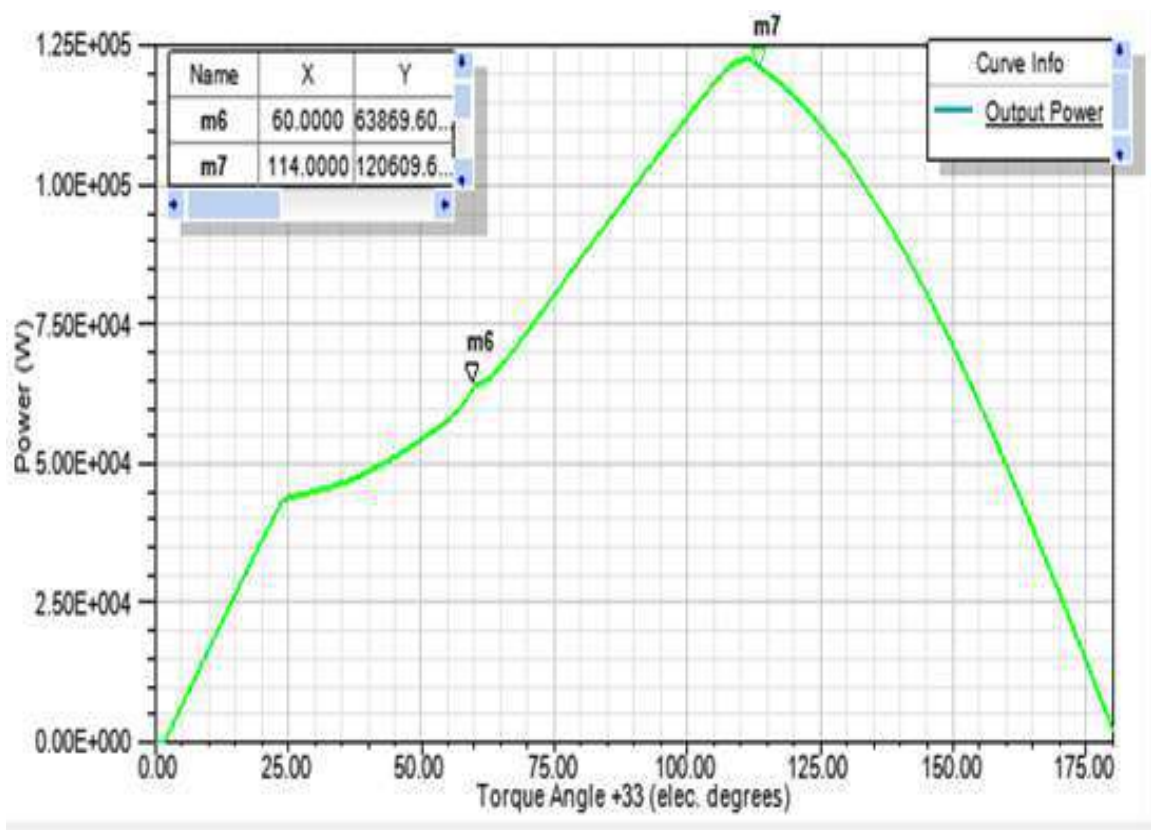


Figure 3.14: Puissance de sortie (W) en fonction de l'angle de couple.

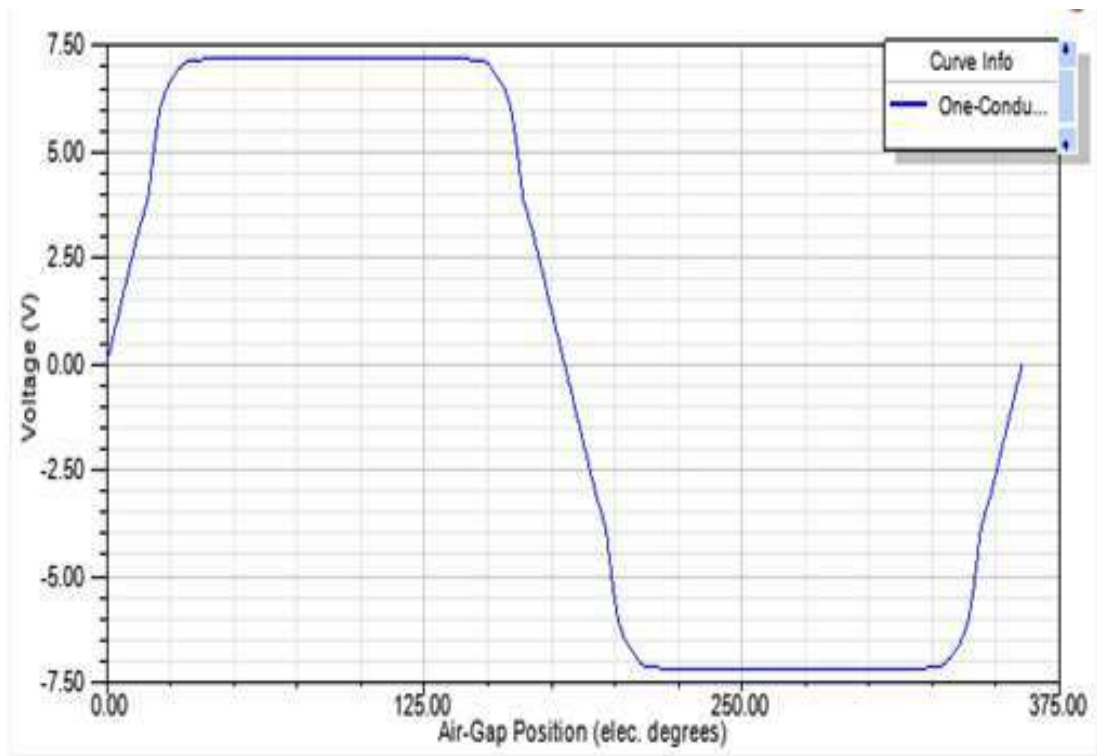


Figure 3.15: Tension induite par un conducteur de vitesse nominale.

3.6. Conception MSAP Machine 2D/3D dans Maxwell - RMxprt

Le modèle 2D est représenté ci-dessous avec son tracé de maillage FE de la machine, les sections grises sont en acier électrique, les sections vertes sont des aimants permanents, tandis que les sections dorées sont des conducteurs en cuivre.

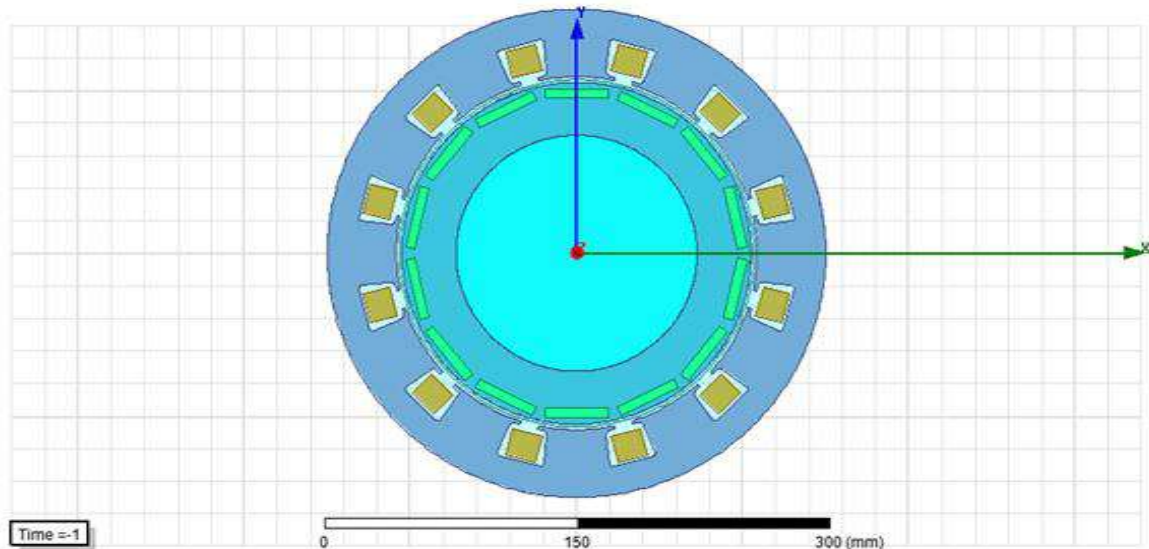


Figure 3.16: Tracé de maillage 2D.

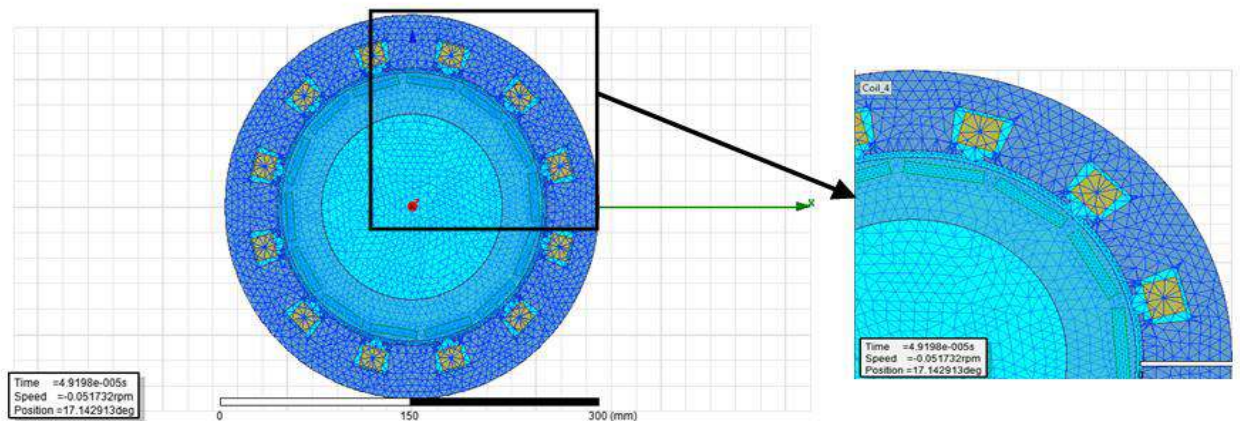


Figure 3.17: Le maillage par MEF du rotor et du stator.

3.6.1. Résultats de simulation :

La simulation s'effectue dans le cas magnétodynamique, les résultats sont enregistrés pour des temps bien définis.

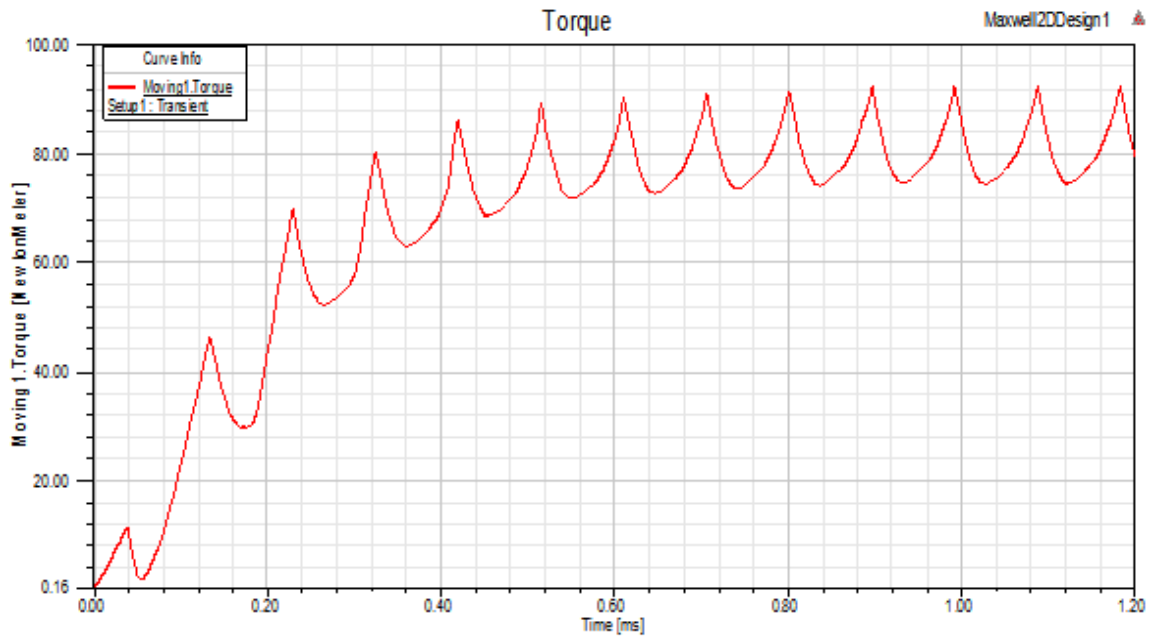


Figure 3.18: Couple de déplacement (Nm) Temps V/s (ms).

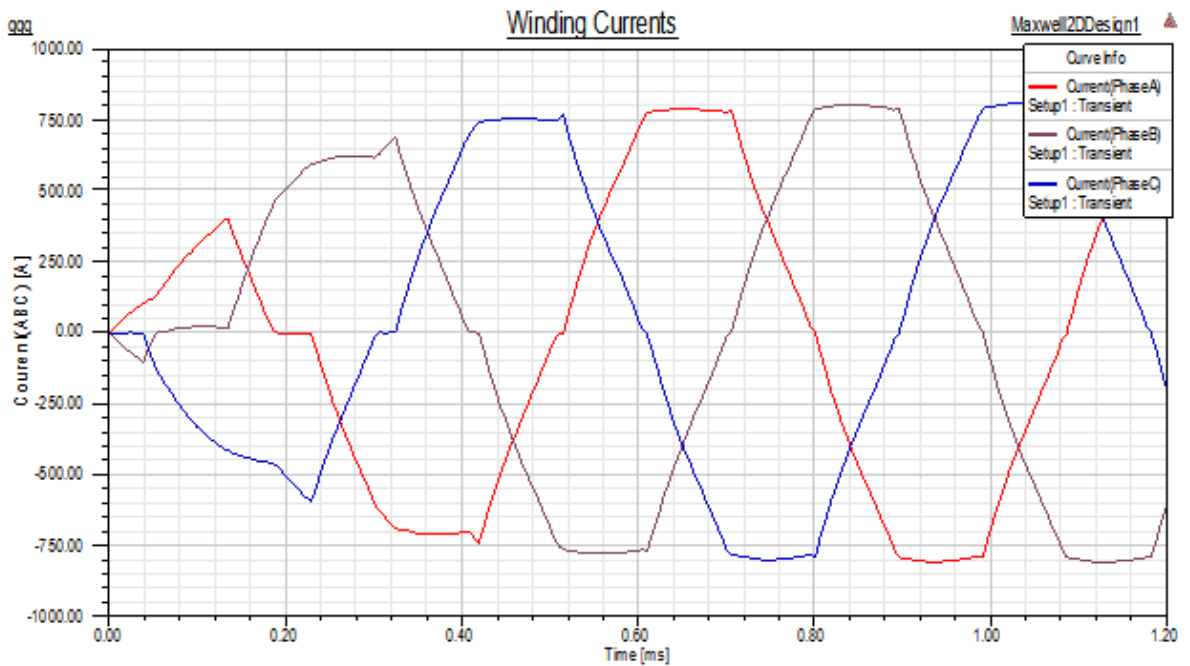


Figure 3.19: Courants d'enroulement (A) Temps V/s (ms).

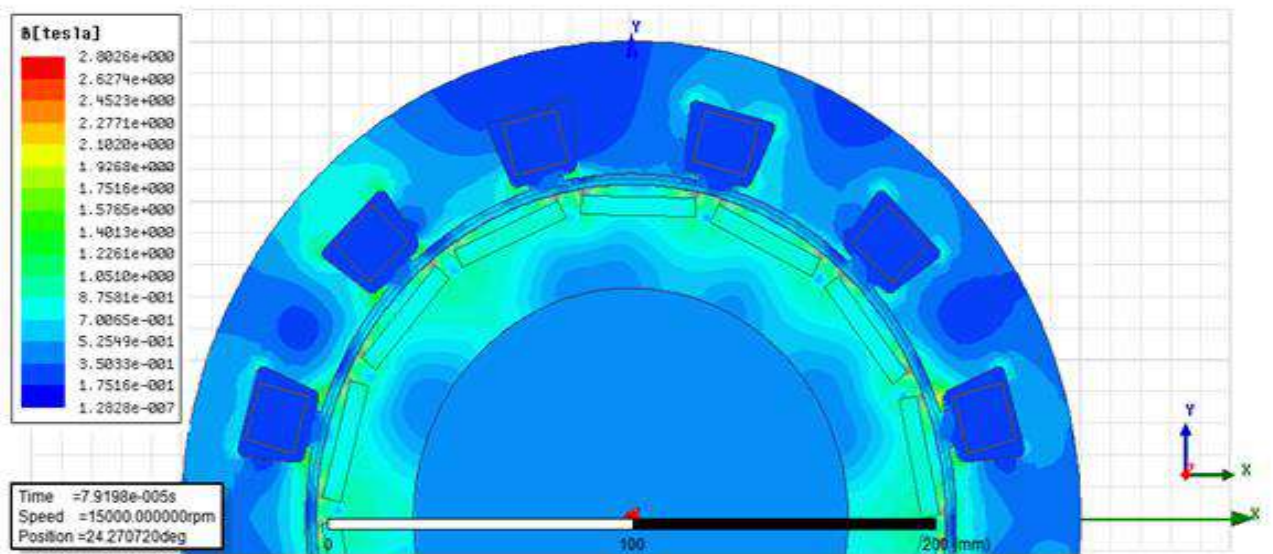


Figure .320: Intensité du champ magnétique (T).

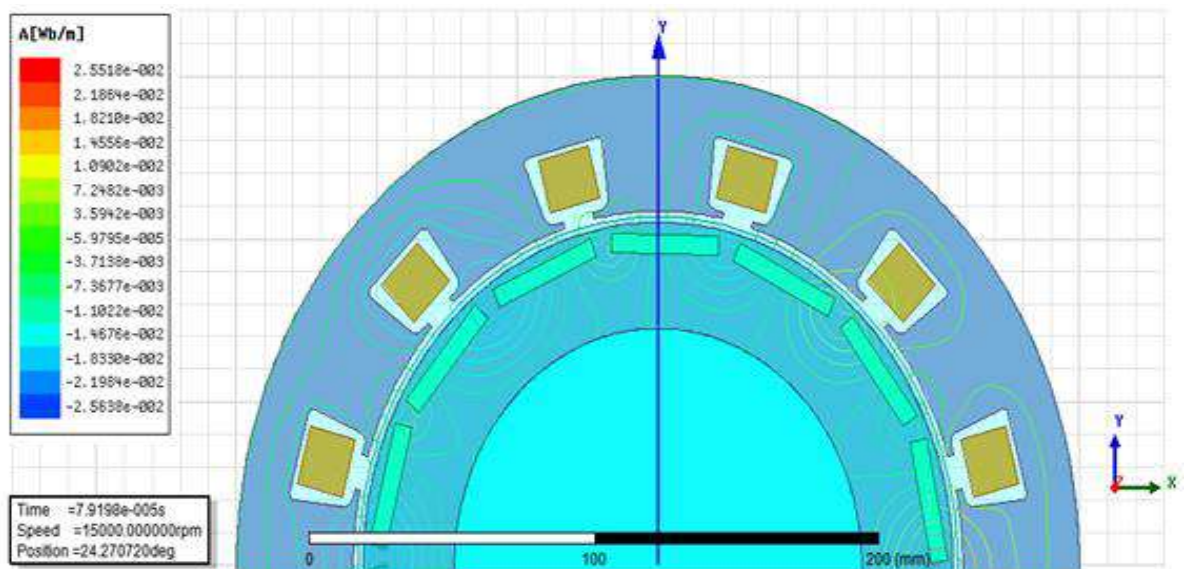


Figure .321: Lignes de flux (Wb/m).

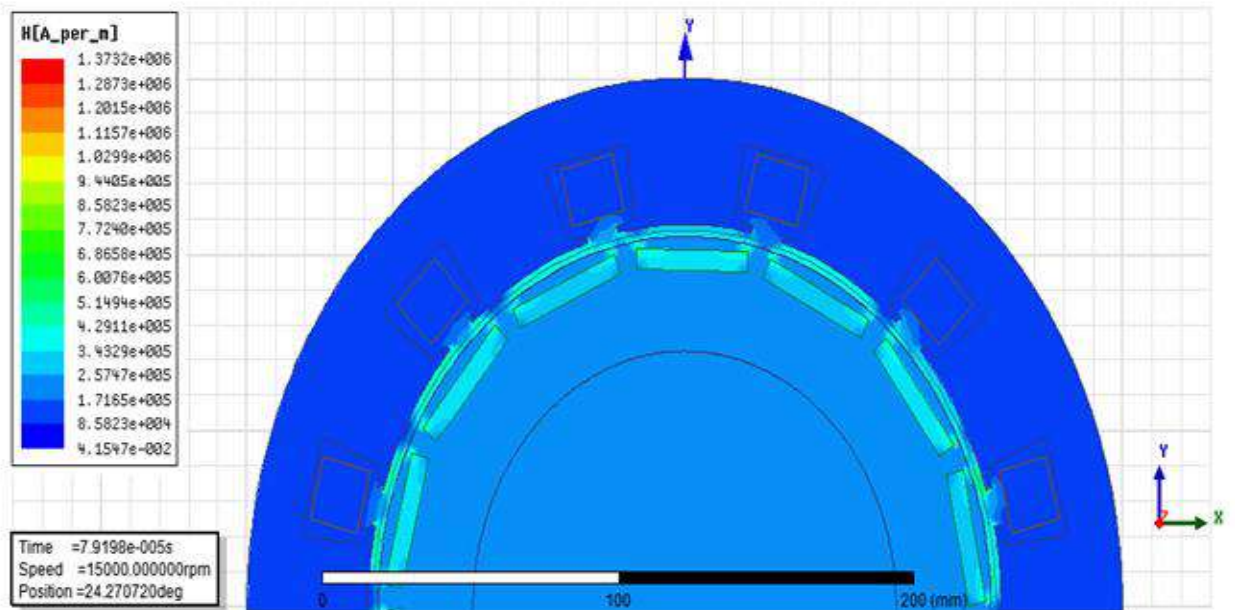


Figure .322: Intensité du champ magnétique (A/m).

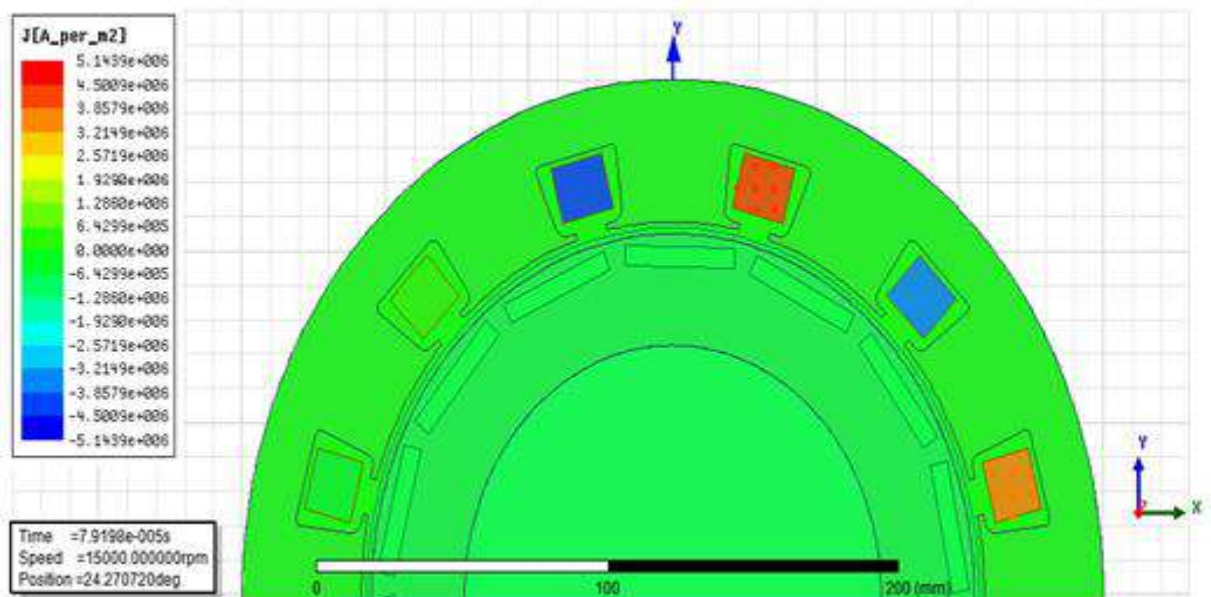


Figure .323: Densité de courant électrique (A/m²).

3.7. Modèle 3D MSAP dans ANSYS - Maxwell - RMxprt

Le modèle 3D de la machine est illustré ci-dessous, les sections grises sont en acier électrique, les sections vertes sont des aimants permanents et les sections en or sont des conducteurs en cuivre.

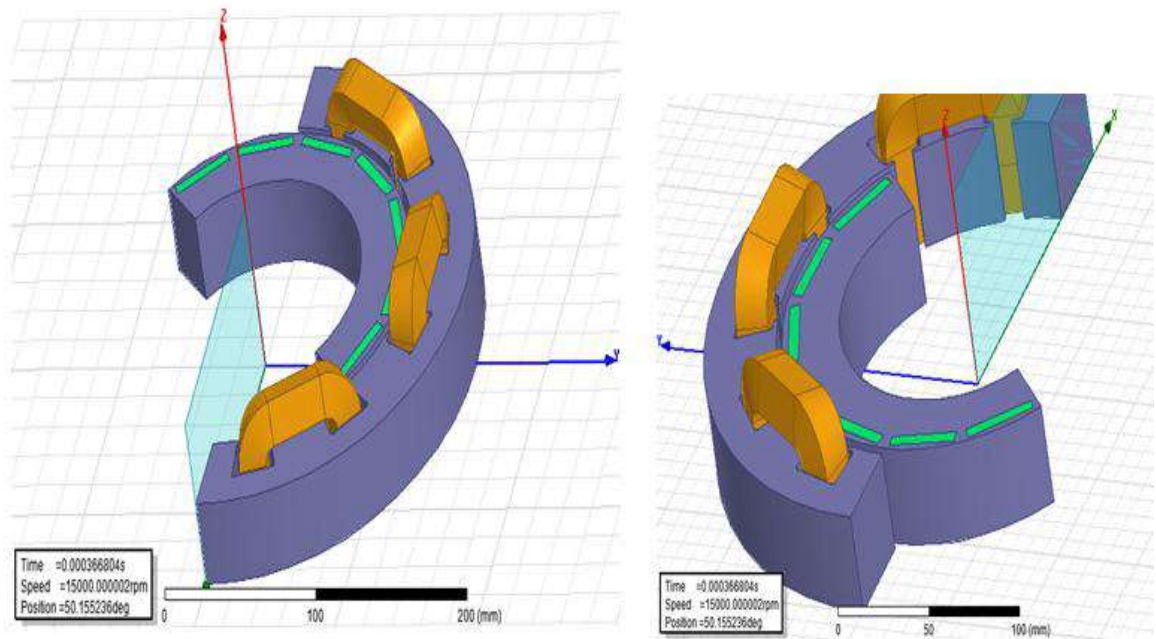


Figure 3.24: Coupe de la machine 3D.

3.7.1 Résultats de simulation:

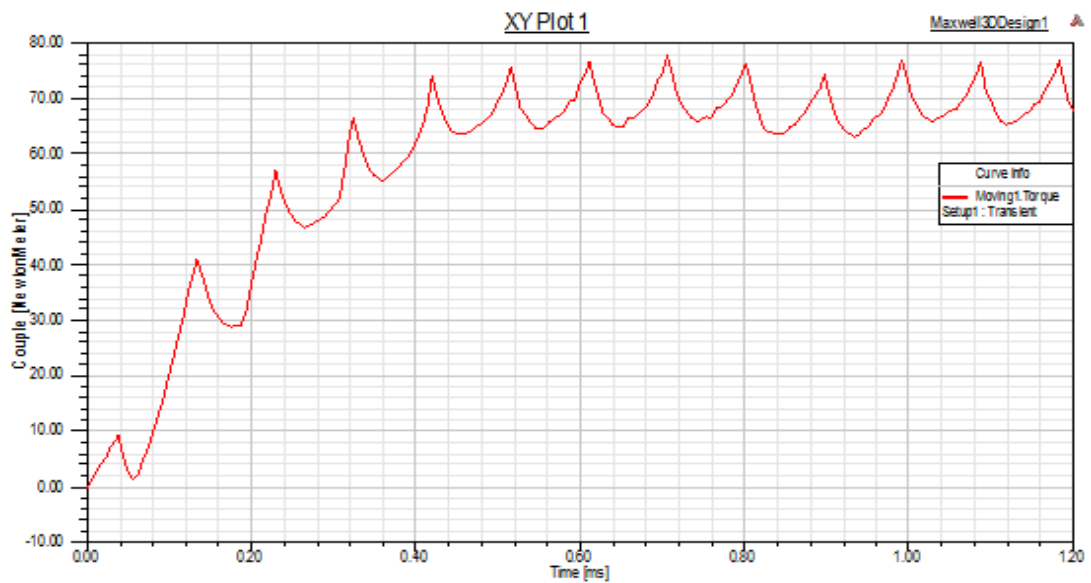


Figure 3.25: Couple de déplacement (Nm) Temps V/s (ms).

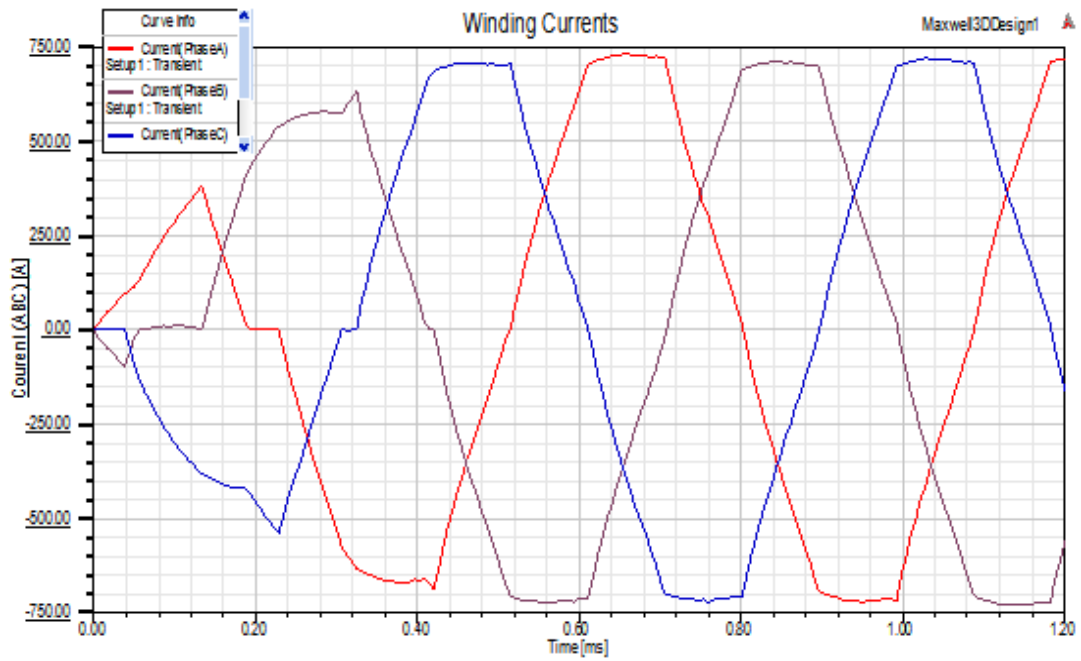


Figure 3.26: Courants d'enroulement (A) Temps V/s (ms).

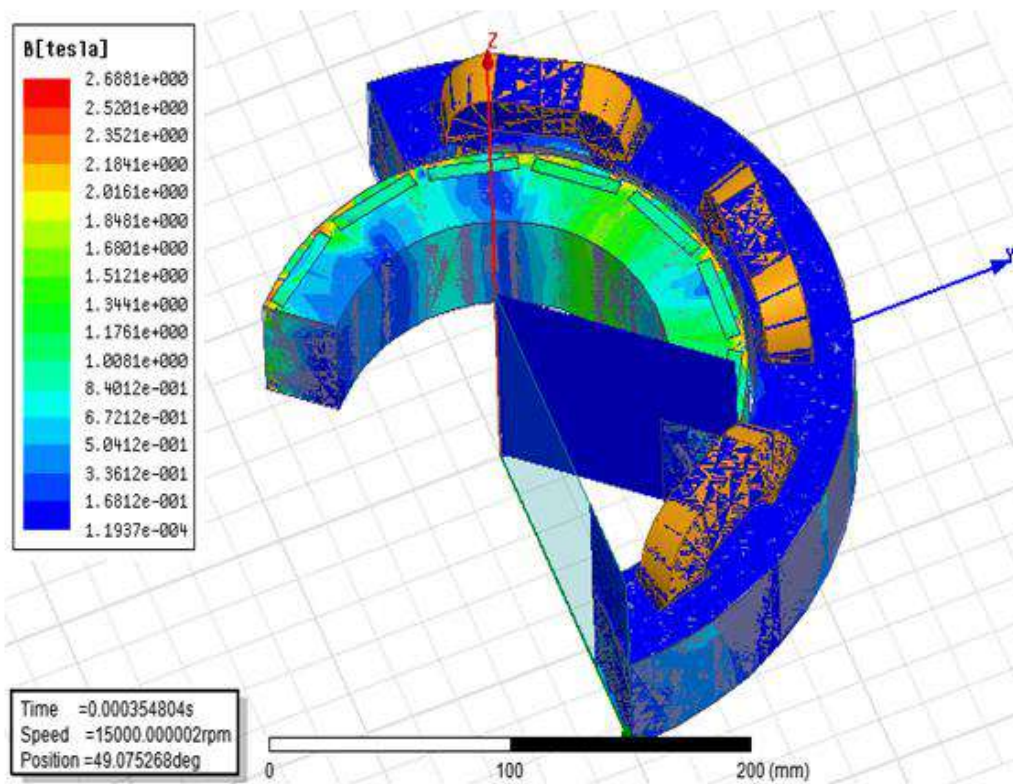


Figure 3.27: Intensité du champ magnétique (T).

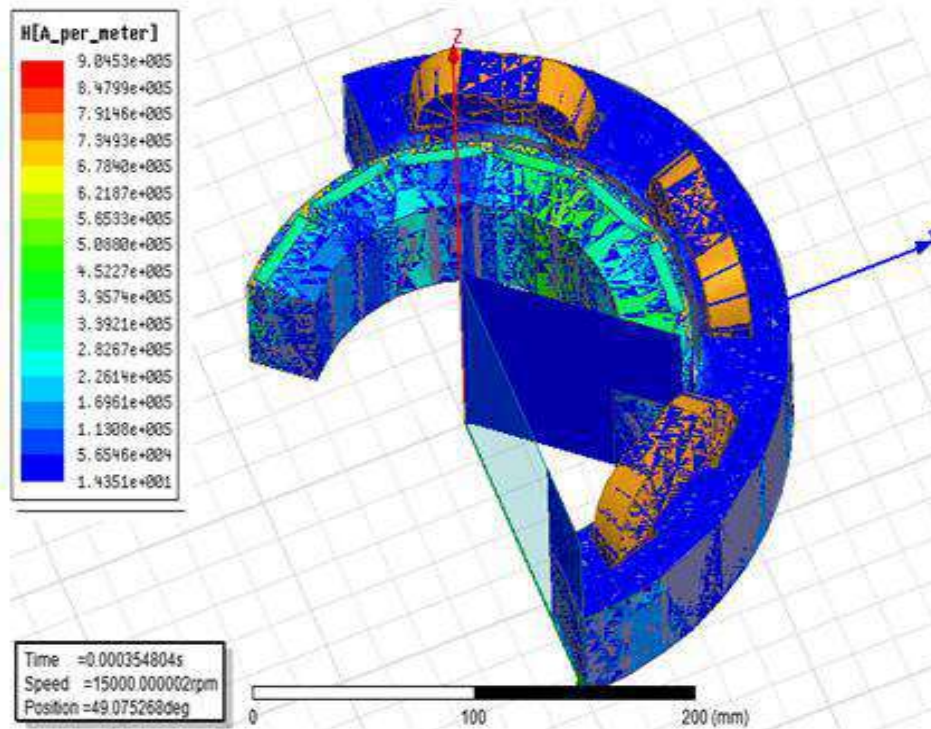


Figure 3.28: Intensité du champ magnétique (A/m).

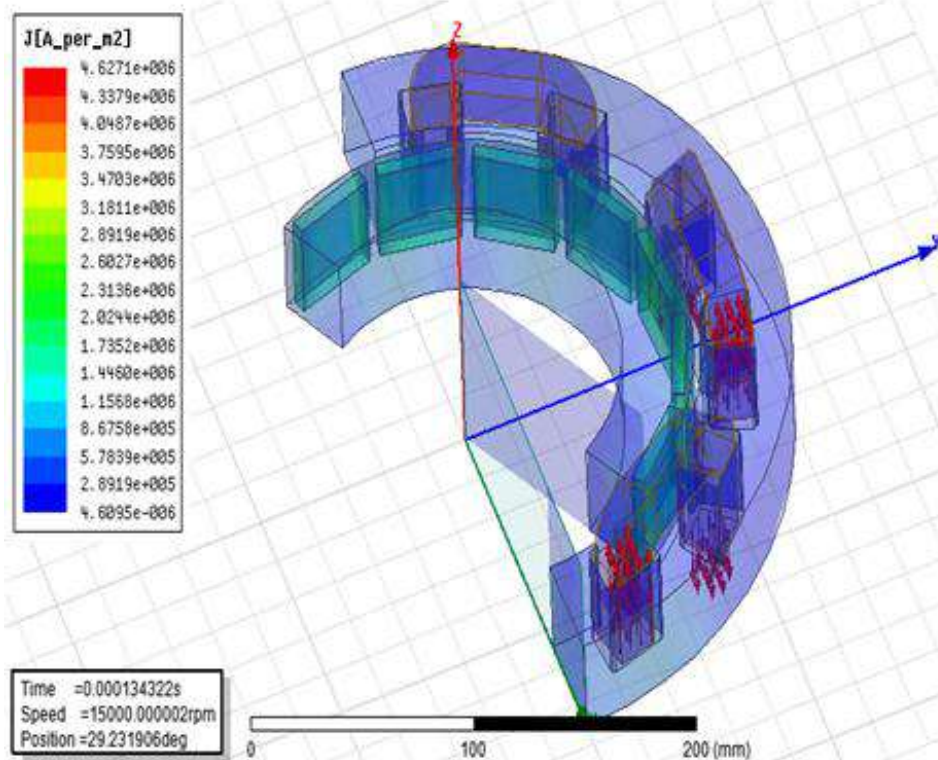


Figure 3.29: Densité de courant électrique (A/m²).

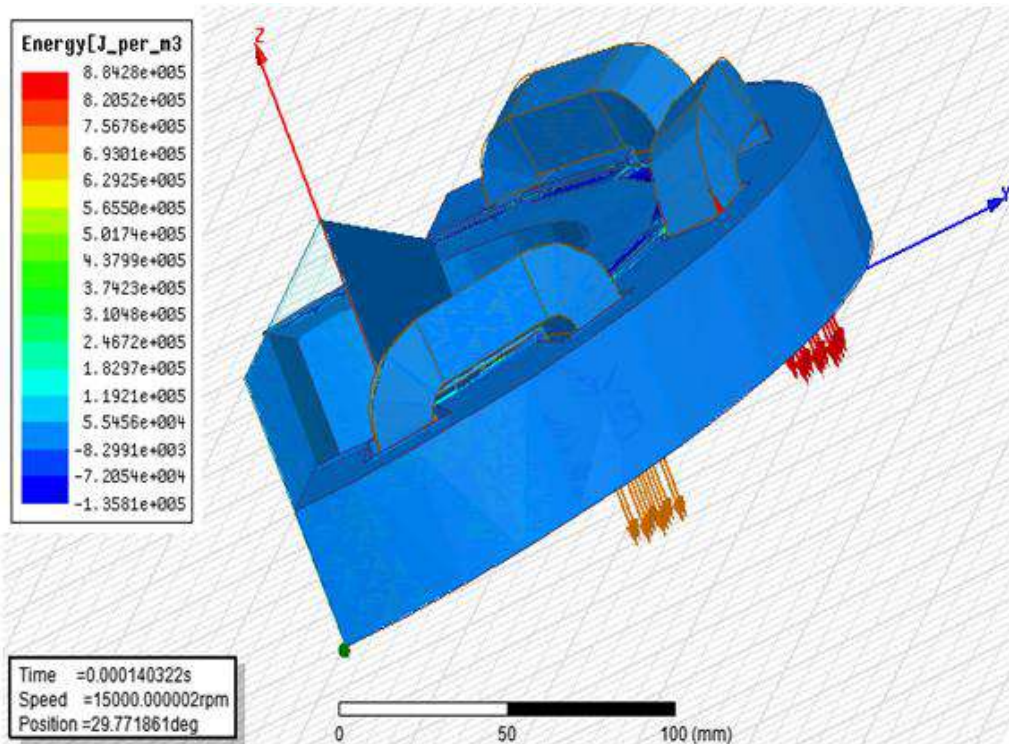


Figure 3.30:Energy électrique (J/m3).

3.8. Conclusion

Au cours des 20 dernières années, le moteur MSAP a fait ses preuves dans de nombreux domaines. En tant que moteur haute performance.

Dans ce chapitre, nous concevons et simulons un moteur MSAP 110 kW, 300 V, 1500 tr/min avec le logiciel Maxwell 16.0 RMxprt. Ce logiciel permet de concevoir des moteurs en utilisant la technologie Maxwell 2D/3D. Les résultats de l'analyse initiale de la machine ont été présentés dans l'unité Maxwell analyse RMxprt, qui ont été représentés par l'efficacité et le bon couple obtenus par 70 Nm, et la forme du flux magnétique. nous la forme du flux et les champs magnétiques ainsi que les résultats ont montré que les valeurs que nous avons entrées dans La conception est bonne et le moteur donne de bonnes performances.

CONCLUSION

GENERALE

Conclusion Generale

Les exigences croissantes en matière de technologie dans le monde ont conduit à une utilisation accrue des machines à aimants permanents, en particulier dans les applications industrielles nécessitant beaucoup d'espace et d'énergie, et sont également apparues dans le domaine de la production d'énergie électrique. Les performances de ces structures peuvent être augmentées en développant des modèles d'étude qui représentent au mieux leur comportement dynamique.

Le but de notre recherche était d'étudier et de concevoir des machines synchrones à aimant permanent dans des simulateurs afin de déterminer leur comportement. L'étude a été menée en trois phases (les deux chapitres).

Où, tout d'abord, nous avons donné des généralités pour les machines synchrones à aimants permanents, qui incluent les caractéristiques des aimants permanents, les différentes structures des machines synchrones à aimants permanents, les avantages et les inconvénients de ce type de machines, et enfin leurs domaines d'application.

Le deuxième chapitre est consacré à la modélisation de la machine électrique à étudier (machine synchrone à aimants permanents) à l'aide du programme Matlab/Smulink et à la réalisation d'une étude analytique pour celle-ci. Dans cette étude, nous expliquons le modèle analytique de la machine MSAP en utilisant le modèle de Park et les équations d'actionneurs électromécaniques et obtenons de bons résultats en condition de vide et en condition de charge.

Dans le troisième chapitre nous avons conçu la machine étudiée, où nous avons présenté les modèles électromagnétiques et leur précision par la méthode des éléments finis, nous nous sommes intéressés au calcul des quantités électromagnétiques à l'aide du programme Ansys-Maxwell 16.0 pour l'appareil. Il permet également de connaître les valeurs de champ à tous les nœuds du dispositif, les courants induits ainsi que les pertes associées à ces courants dans l'aimant permanent. Toutes ces considérations éliminent de nombreuses hypothèses simplificatrices et nous permettent de nous rapprocher de plus en plus de la réalité.

Les résultats obtenus ont montré que le choix correct des paramètres géométriques est d'une grande importance si l'on veut assurer une meilleure performance du système. Comme perspectives d'avenir, nous pouvons penser à améliorer la même entreprise. En introduisant la commande du moteur et l'alimentation triphasée de l'appareil dans l'étude 3D à l'aide du logiciel

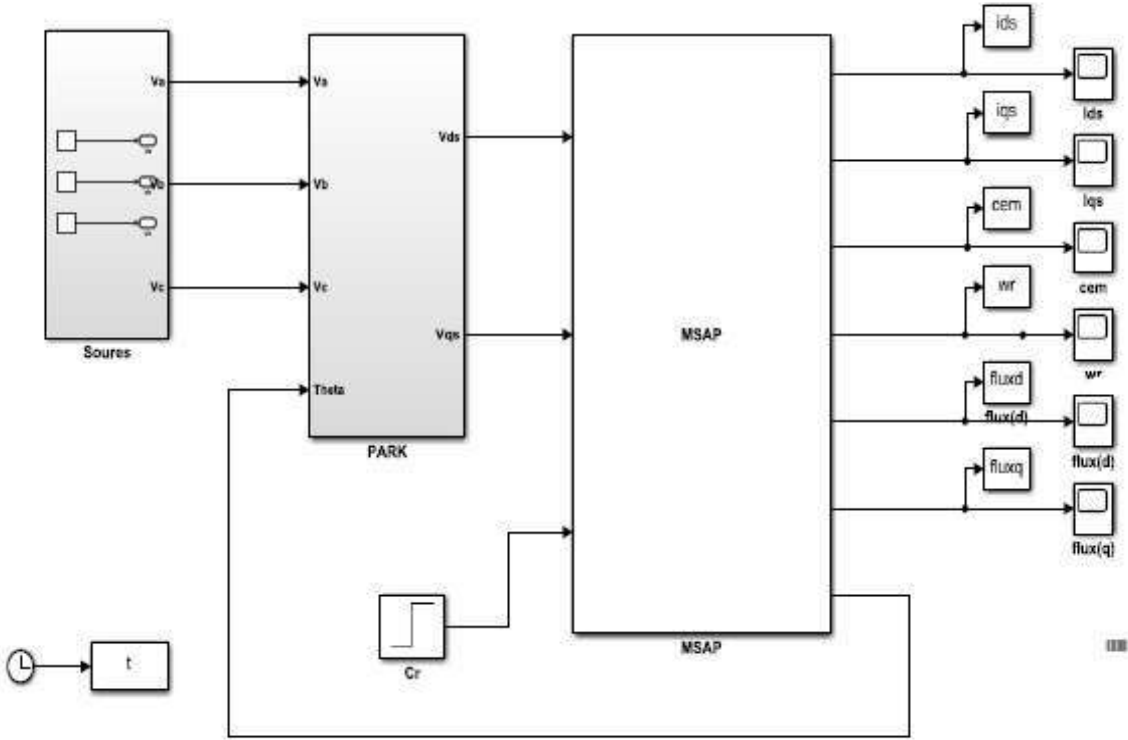
ANSYS Maxwell 3D, nous souhaitons pouvoir réaliser des prototypes pour de meilleures performances.

Enfin, à l'avenir, j'aimerais ajouter le processus de contrôle du moteur à un programme ANSYS Maxwell.

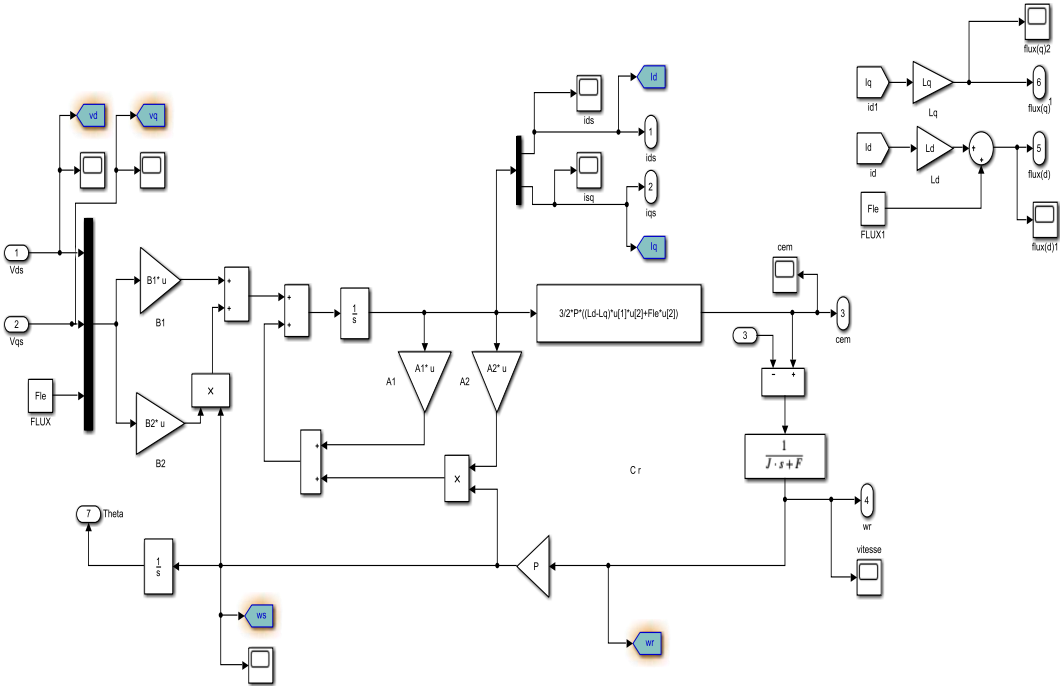
Annexes

Annexe A:

A1 : Schéma complet de simulation:

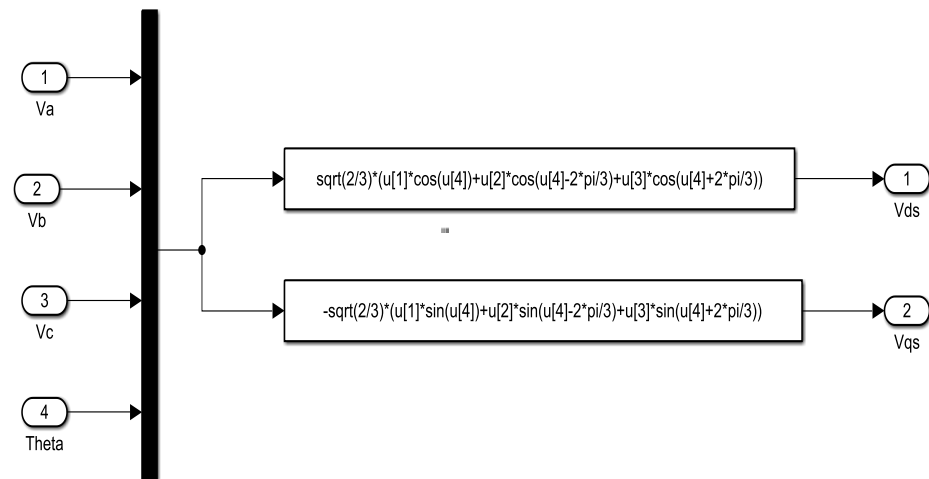


A2 : Bloc Machine Synchrone a aiment permanent:



Annexes

A3 : Park direct:



Annexe B:

B : Paramètres de la machine synchrone à aimants permanents:

$R_s=1.4;$

$L_{ds}=0.0066;$

$L_{qs}=0.0058;$

$J=0.00176;$

$F=0.0003818;$

$P=3;$

$Fle=0.1546;$

$A1=[-R_s/L_{ds} \ 0 \ ; \ 0 \ -R_s/L_{qs}];$

$A2=[0 \ L_{qs}/L_{ds} \ ; \ -L_{ds}/L_{qs} \ 0];$

$B1=[1/L_{ds} \ 0 \ 0 \ ; \ 0 \ 1/L_{qs} \ 0];$

$B2=[0 \ 0 \ 0 \ ; \ 0 \ 0 \ -1/L_{qs}];$

Charge ($cr=3 \ t=0.5$)

Bibliographiques

- [1] Annane Adel ,«Analyse du comportement du moteur Synchrone dans les entraînements électrique à vitesse variable »,mémoire de Magister en électrotechnique ,Université Badji Mokhtar Annaba,Faculté des sciences de l'ingénieur,Département d'électromécanique.2010
- [2] Boufenar Samir, Latreche Zakaria «Dimensionnement et Modélisation de la machine synchrone à aimant permanent» diplôme de Master Académique en Electrotechnique de Université Mohamed Seddik Ben Yahia .2019
- [3] M.Ounnadi, « Elaboration d'un model en régime dynamique d'une machine à aimant permanent », Mémoire de Magister, Université de Tizi-Ouzou. 2011
- [4] S. hamache et Dj. ghemari « Modélisation par Eléments finis d'une machine Synchrone à Aimants Permanents», Mémoire d'ingénieur à université de Bejaia. 2005.
- [5] Y. Sara , B. Souad , « Modélisation et diagnostic des défaillances d'une MSAP par analyse de ses grandeurs électromagnétiques» diplôme de Master Université Mohammed seddik Ben Yahia – Jijel 2019
- [6] Oussama DJAIDJA ,«Conception d'une commande FTC a base de projection pour les machines synchrones aaimants permanents» diplôme de Master Académique en Electrotechnique de Université Mohamed Boudiaf - M'sila. 2018
- [7] F. L-Lagarrigue ,«Contribution à l'identification, l'estimation et la commande de Moteurs Synchrones à Aimants Permanents (MSAP)» Thèse De Doctorat D'état école Centrale De Lille . 2012
- [8] L. Chédot, «Contribution à l'étude des machines Synchrones à aimants permanents internes à large espace de fonctionnement.Application à l'alternateur» Ce manuscrit concerne une Thèse CIFRE dont les résultats appartiennent à la société Valeo Systèmes Electriques. 2004
- [9] D. Ilyes , « Calcul analytique du champ dans une machine synchrone à aimants permanents à pôles lisses», Université Mouloud Mameri De Tizi-Ouzou, 27 septembre 2017

- [10] M. Nassim , G. Mohammed «Commande en vitesse et en position d'une MSAP », diplôme de Master Académique en Electrotechnique de l'Université de Msila. 2017
- [11] A.brahimi , K.Abdelmounaim ,«Détection De Défaut Statorique Par Suivi Paramétrique D'un Moteur Synchrone A Aimants Permanents» diplôme de Master Université Kasdi Merbah Ouargla. 2014
- [12] Macamo Bernardo Amizado, Maiga Djibril «Diagnostic des défauts statoriques d'un moteur Synchrone à aimant permanent », diplôme de Master Académique en Electrotechnique de Université Saad Dahlab De Blida. 2017
- [13] F.Gillon ,« Modelisation Et Optimisation Par Plans d'expériences D'un Moteur Acommutations Electroniques » These présentée A l'universite Des Sciences Et Technologies De Lille. 1997
- [14] M. Ahmed , «Etude numérique de la machine synchrone à aimants permanents» diplôme de Master Académique en Electrotechnique de Université De M'sila. 2013
- [15] CH.Miloud, A.Toufik, L. Mohamed, «Modélisation d'une MSAP rotor externe»,Memoire D'ingenieur D'etat En Génie Electrotechnique ,2012
- [16] S. Nawel ,CH.Ammaria «COMMANDE DU MOTEUR SYNCHRONE A AIMANTS PERMANENTS PAR BACKSTEPPING» Mémoire de Master, Université de aboubekr belkaid Tlemcen, 2015
- [17] A.Houssem, A.Wafaa, «Synthèse de lois de commande non-linéaires pour un entraînement électrique à vitesse variable basé sur un moteur synchrone à aimants permanents» diplôme de Master Université Abou Bekr Belkaïd Tlemcen. 2013
- [18] T.AbdeLkarim , «Estimation de la vitesse de la machine synchrone à aimants permanents en utilisant le filtre de Kalman étendu» diplôme de Master Académique en Electrotechnique de Université Larbi Ben M'hidi De Oum El Bouaghi .2018
- [19] B.Abde Raouf ,«Commande vectorielle de la machine synchrone à aimants permanents MSAP» Master en Electrotechnique, Université Mohamed Khider Biskra .2014

- [20] B.Noureddine, «Commande par Mode de Glissement d'Ordre Supérieur de la Machine Synchrones à Aimants Permanents» Magister en Electrotechnique, Université Ferhat Abbas Setif .2014
- [21] BARDADI BENDAHA Mansour, «Identification des paramètres d'une machine Synchrones à aimant permanent en vue d'une intégration dans des simulateurs en temps réel» diplôme de Master Académique en Electrotechnique de Université d'Oran. 2015
- [22] Zedjiga ARAB, Nawal LIMANI , « Etude paramétrique d'une machine à aimants permanents par la méthode des éléments finis », Mémoire de Master Académique Université Mouloud Mammeri De Tizi-Ouzou 2014
- [23] Y. Boutora, « Calcul d'une BDCM excitée par des aimants à aimantation parallèle »,Mémoire de Magister, UMMTO . 2000
- [24] T. Merzouki, « Modélisation Couplée ElectriqueMagnétique Mécanique des Machines Asynchrones à Cage en Régime Transitoire par la Méthode des Eléments Finis », Mémoire de Magister, UMMTO .2009
- [25] H.Oudin, « Méthode des éléments finis », Edition Central Nantes 26 – 1 . Nov 2008.
- [26] Djamel Khrouche, «Analyse et conception des antennes microrubans alimentées par guide d'onde coplanaire», Mémoire de Master, Université mohamed Boudiaf-Msila. 2016
- [27] Ch. Hocine, B. antar, «Etude paramétrique d'une machine synchrones à aimants par logiciel ANSYS Maxwell », master en électrotechnique, université de jijel . 2019
- [28] S.A.Zaina , A .Chabha, «Modélisation de machines linéaires à induction en utilisant le logiciel ANSYS Maxwell », Mémoire de Magister, Université de Tizi-Ouzou . 2016
- [29] Prathamesh Mukund Dusane , " Simulation of a Brushless DC Motor in ANSYS – Maxwell 3D " , MASTER THESIS University in Prague .2016