



École nationale polytechnique
Département
d'Électrotechnique



Projet de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'État en Électrotechnique

Conception d'une machine synchrone à aimants permanents à partir d'un circuit magnétique d'une machine asynchrone

Réalisé par :

M. SAYAH Salah Eddine
M. ROUIMEL Abdennour

Encadré par :

M. ROUBACHE Lazhar
M. BOUGHRARA Kamel

Soutenu le 24 Juin 2024, Devant le jury composé de :

M. Sebaa KARIM : ENP - Président
M. Tahmi REDOUANE : ENP - Examinateur



École nationale polytechnique
Département
d'Électrotechnique



Projet de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'État en Électrotechnique

Conception d'une machine synchrone à aimants permanents à partir d'un circuit magnétique d'une machine asynchrone

Réalisé par :

M. SAYAH Salah Eddine
M. ROUIMEL Abdennour

Encadré par :

M. ROUBACHE Lazhar
M. BOUGHRARA Kamel

Soutenu le 24 Juin 2024, Devant le jury composé de :

M. Sebaa KARIM : ENP - Président
M. Tahmi REDOUANE : ENP - Examinateur

Dédicace

“

À Je dédie ce mémoire : À mes parents que dieu les protège qui ont m'encouragé à poursuivre mes études À mes frères, et a toute ma famille À tous mes amis À la promotion de génie électrique (Électrotechnique)

À tous ceux qui me sont chers, à vous tous

Merci.

”

- SAYAH & ROUIMEL

Remerciements

Tout d'abord, je remercie Allah le tout puissant de m'avoir donné le courage et la patience nécessaires à mener ce travail à son terme.

Je tiens à remercier tout particulièrement mon encadrant **M.ROUBACHE Lazhar**, pour l'aide compétente qu'elle m'a apportée, pour sa patience et son encouragement. Son œil critique m'a été très précieux pour structurer le travail et pour améliorer la qualité des différentes sections.

Nos remerciements vont également à **M. BOUGHRARA Kamel**, co-encadreurs de cette thèse. Nous tenons à exprimer notre reconnaissance pour leur aide, leur disponibilité, leurs encouragements ainsi que leur apport scientifique tout au long de ce travail.

Que les membres de jury trouvent, ici, l'expression de mes sincères remerciements pour l'honneur qu'ils me font en prenant le temps de lire et d'évaluer ce travail.

Un grand merci aussi à tous nos camarades, nos amis et toutes les personnes qui ont été à nos côtés et nous ont soutenus d'une façon ou d'une autre. Vous êtes tellement nombreux que vous citer tous serait un trop grand défi. Sachez toutefois que vous êtes tous dans nos pensées.

Je souhaite aussi remercier l'équipe pédagogique et administrative de l'ENP pour leurs efforts dans le but de nous offrir une excellente formation.

Pour finir, je souhaite remercier toute personne ayant contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

ملخص

في هذا المشروع، نقدم منهجية شاملة لتحويل آلة غير متزامنة ذات قفص سنجابي إلى آلة متزامنة ذات مغناطيس دائم. نبدأ بمحاكاة تفصيلية للجهاز غير المتزامن باستخدام برنامج Ansys Electronic ، مما يسمح بإجراء تحليل متعمق لأدائه وسلوكه الديناميكي.

بعد ذلك، نستكشف أربعة تكوينات مختلفة لآلة المغناطيس الدائم المتزامنة: المغناطيسات المثبتة على السطح، والمغناطيسات المركزة، والمغناطيسات المدخلة، والمغناطيسات المدفونة. تتم دراسة كل تكوين ومحاكاته وتحليله بدقة لتحديد مزاياه وقيوده. بناءً على النتائج التي تم الحصول عليها، قمنا بتحديد التكوين الأمثل، وذلك باستخدام المغناطيسات المدخلة.

يتميز هذا التكوين بأدائه المتميز وسهولة تنفيذه، مما يجعله خيارًا جذابًا لتحويل الآلة غير المتزامنة ذات القفص السنجابي إلى آلة متزامنة ذات مغناطيس دائم. باختصار، توفر دراستنا طريقة منهجية لتحويل الفعال للآلة غير المتزامنة ذات القفص السنجابي إلى آلة متزامنة ذات مغناطيس دائم. وتمهد النتائج التي تم الحصول عليها الطريق لتطبيقات عملية وتحسينات كبيرة في الأداء وكفاءة الطاقة.

كلمات مفتاحية :

آلة متزامنة المغناطيس الدائم ، آلة غير متزامنة ، الدائرة المغناطيسية، تحليل العناصر المحدودة

Abstract

In this project, we present a comprehensive methodology for converting a squirrel-cage asynchronous machine into a permanent magnet synchronous machine. We begin with a detailed simulation of the asynchronous machine using the Ansys Electronic software, allowing for an in-depth analysis of its performance and dynamic behavior.

Next, we explore four different configurations for the permanent magnet synchronous machine : surface-mounted magnets, flux concentrating magnets, inserted magnets, and buried magnets. Each configuration is meticulously studied, simulated, and analyzed to determine its advantages and limitations. Based on the results obtained, we identify the optimal configuration, that with the inserted magnets. This configuration stands out for its superior performance and ease of implementation, making it an attractive choice for converting the squirrel-cage asynchronous machine into a permanent magnet synchronous machine.

In summary, our study provides a systematic approach for the efficient conversion of a squirrel-cage asynchronous machine into a permanent magnet synchronous machine. The results obtained pave the way for practical applications and significant improvements in performance and energy efficiency.

Keywords : Permanent Magnet Synchronous Machine (PMSM), Induction Machine (IM), Magnetic Circuit, Finite Element Analysis (FEA)

Résumé

Dans ce projet, nous présentons une méthodologie complète pour la conversion d'une machine asynchrone à cage d'écureuil en une machine synchrone à aimant permanent. Nous débutons par une simulation détaillée de la machine asynchrone à l'aide du logiciel Ansys Electronic, permettant ainsi une analyse approfondie de ses performances et de son comportement dynamique.

Ensuite, nous explorons quatre configurations différentes pour la machine synchrone à aimant permanent : aimants en surface, en concentration du flux, insérés et enterrés. Chaque configuration est minutieusement étudiée, simulée et analysée afin de déterminer ses avantages et ses limitations. À la lumière des résultats obtenus, nous identifions la configuration optimale, celle avec les aimants insérés. Cette configuration se distingue par ses performances supérieures et sa facilité de réalisation, ce qui en fait un choix attrayant pour la conversion de la machine asynchrone à cage d'écureuil en une machine synchrone à aimant permanent.

En résumé, notre étude propose une approche systématique pour la conversion efficace d'une machine asynchrone à cage d'écureuil en une machine synchrone à aimant permanent. Les résultats obtenus ouvrent la voie à des applications pratiques et à des améliorations significatives en termes de performances et d'efficacité énergétique.

Mots clés : Machine synchrone à aimants permanents (MSAP), Machine asynchrone (MAS), Circuit magnétique, Analyse par éléments finis (FEM)

Table des matières

Table des figures	
Liste des tableaux	
Liste des sigles et acronymes	
Introduction générale	15
1 Généralités sur les machines électriques triphasées	18
1.1 Introduction	19
1.2 Machine asynchrone	19
1.2.1 Description de la machine asynchrone	19
1.2.2 Composition de la machine asynchrone	19
1.2.3 Types des machines asynchrones	20
1.2.4 Avantages et inconvénients des machines asynchrones	22
1.2.5 Domaines d'applications des machines asynchrones	22
1.3 Machine synchrone	23
1.3.1 Présentation de la machine étudiée	23
1.3.2 Composition de la machine synchrone à aimant permanent	23
1.3.3 Types des machines synchrones à aimant permanent	24
1.3.4 Avantages et inconvénients des machines synchrones à aimant permanent	28
1.3.5 Domaines d'applications des machines synchrones à aimant permanent	29
1.4 Transformation d'un moteur asynchrone de type classique en moteur synchrone à aimant permanent	30
1.4.1 Comparaison entre la machine synchrone à aimant permanent et la machine asynchrone	30
1.4.2 Possibilités de faire la transformation	31
1.4.3 Études nécessaires au dimensionnement des nouvelles machines	31
1.5 Conclusion	32
2 Étude et simulation sur la machine asynchrone	34
2.1 Introduction	35
2.2 Machine asynchrone	35
2.2.1 Contexte de l'étude	35
2.2.2 Objectifs de l'étude	36
2.3 Méthodologie de modélisation et de simulation	36

2.3.1	Importance de l'analyse par logiciel de simulation Ansys Electronics	36
2.3.2	Présentation du logiciel Ansys Electronics	36
2.3.3	Présentation de la machine étudiée	38
2.3.4	Conception d'un moteur asynchrone triphasé dans Ansys	39
2.4	Caractéristiques de performance de la machine asynchrone	41
2.5	Simulation en magnétodynamique de la MAS	50
2.5.1	Courant dans le stator	50
2.5.2	Couple	51
2.6	Conclusion	52
3	Étude et simulation sur la machine synchrone à aimant permanent	53
3.1	Introduction	54
3.2	Machine synchrone	54
3.2.1	Objectifs de l'étude	54
3.2.2	Présentation des machines étudiées	55
3.3	Prototype de réalisation d'une MSAP à partir du même circuit magnétique de la MAS	55
3.3.1	Détails de la conception du rotor	56
3.4	Différentes topologies du rotor de la MSAP	56
3.4.1	Aimants en surface	57
3.4.2	Aimants insérés	62
3.4.3	Aimants enterrés	65
3.4.4	Aimants en concentration de flux	67
3.4.5	Analyse des facteurs d'influence de la densité de flux dans l'entrefer des MSAPs	70
3.5	Couple à courants constant pour le 4 configuration	71
3.6	Comparaison entre les différentes dispositions d'aimants dans la machine synchrone à aimants permanents	72
3.7	Conclusion	74
4	Étude paramétrique et simulation sur la machine synchrone à aimants permanents insérés	76
4.1	Introduction	77
4.2	Phase de conception	77
4.2.1	Caractéristique magnétique du circuit magnétique	78
4.3	Étude paramétrique du rotor	79
4.3.1	Influence de l'ouverture de l'aimant	79
4.3.2	Influence de l'aimantation	81
4.3.3	Influence de l'épaisseur de l'aimant	84
4.4	Comparaison entre l'influence des trois paramètres d'étude	84
4.5	Sélection des paramètres étudiés et simulation de la machine avec leurs valeurs	85
4.6	Comparaison entre le couple de la machine asynchrone et celui de la MSAP inséré	87
4.7	Conclusion	87
	Conclusion et perspectives	89

Table des matières

Référence 93

Table des figures

1.1	Stator d'une machine asynchrone	20
1.2	Rotor bobiné	21
1.3	Rotor à cage	21
1.4	Machine synchrone à aimant permanent	23
1.5	Rotor d'une machine synchrone à aimant permanent	24
1.6	Vue schématique des machines : flux radial, flux axial	24
1.7	Catégories de MSAP : Perspectives de construction mécanique	25
1.8	Machine synchrone à aimants permanents en surface	26
1.9	Machine synchrone à aimants permanents insérés	26
1.10	Machines synchrones à aimants permanents enterrés	27
1.11	Machine synchrone à aimants permanents à concentration de flux	28
2.1	Présentation du logiciel	37
2.2	Conception de l'encoche du stator et de l'enroulement du stator	40
2.3	Détails de conception des enroulements statorique	40
2.4	Conception de l'encoche du rotor et de l'enroulement du rotor	41
2.5	Famille de courbes couple en fonction de la vitesse.	42
2.6	Couple en fonction de la vitesse a fréquence constant.	42
2.7	Couple en fonction du glissement	43
2.8	Rendement en fonction de la vitesse et de la puissance	44
2.9	Facteur de puissance en fonction de la vitesse	45
2.10	Facteur de puissance en fonction de la puissance de sortie.	46
2.11	Puissance en fonction de la vitesse de rotation.	46
2.12	Courant de phase en fonction de la puissance	47
2.13	Courant de phase en fonction de la vitesse	48
2.14	Tension de phase en fonction de la vitesse	48
2.15	Géométrie en 2D de la MAS dans Maxwell	50
2.16	Courant dans le stator en fonction du temps	50
2.17	Régime permanents du courant stator	51
2.18	Couple électromagnétique en fonctionnement nominal	51
3.1	Courant d'alimentation de la MSAP.	56
3.2	Caractéristique B(H)	57
3.3	Géométrie de la MSAP en surface.	58
3.4	Carte de densité de flux 2D d'une MSAP en surface.	58
3.5	Évolution temporelle du flux dans une MSAP en surface.	60
3.6	Évolution temporelle de la tension d'induit dans une MSAP en surface.	60
3.7	Couple de la MSAP en surface à vide (couple de détente).	61

Table des figures

3.8	Couple de la MSAP en surface en charge	61
3.9	Densité de flux de l'entrefer dans une MSAP en surface.	62
3.10	Géométrie de la MSAP inséré.	62
3.11	Carte de densité de flux 2D d'une MSAP inséré.	63
3.12	Évolution temporelle du flux dans une MSAP inséré.	63
3.13	Évolution temporelle de la tension d'induit dans une MSAP inséré	63
3.14	Couple de la MSAP inséré à vide (couple de détente).	64
3.15	Couple de la MSAP inséré en charge	64
3.16	Densité de flux de l'entrefer dans une MSAP inséré.	64
3.17	Géométrie de la MSAP enterré.	65
3.18	Carte de densité de flux 2D d'une MSAP enterré.	65
3.19	Évolution temporelle du flux dans une MSAP enterré.	66
3.20	Évolution temporelle de la tension d'induit dans une MSAP enterré.	66
3.21	Couple de la MSAP enterré à vide (couple de détente).	66
3.22	Couple de la MSAP enterré en charge	67
3.23	Densité de flux de l'entrefer dans une MSAP enterré.	67
3.24	Géométrie de la MSAP en concentration du flux.	67
3.25	Carte de densité de flux 2D d'une MSAP en concentration de flux.	68
3.26	Évolution temporelle du flux dans une MSAP en concentration de flux.	68
3.27	Évolution temporelle de la tension d'induit dans une MSAP en concentration de flux.	68
3.28	Couple de la MSAP en concentration de flux à vide (couple de détente).	69
3.29	Couple de la MSAP en concentration de flux en charge	69
3.30	Densité de flux de l'entrefer dans une MSAP en concentration de flux.	69
3.31	Densité de flux de l'entrefer	70
3.32	Couple a courant constant dans une MSAP en surface.	71
3.33	Couple a courant constant dans une MSAP enterré.	71
3.34	Couple a courant constant dans une MSAP inséré	72
3.35	Couple a courant constant dans une MSAP en concentration de flux.	72
4.1	Caractéristique $V(B)$ du circuit magnétique	78
4.2	Tension de la phase A à vide	79
4.3	Flux de la phase A à vide	79
4.4	Couple de détente à vide	79
4.5	Tension de la phase A en charge	80
4.6	Flux de la phase A en charge	80
4.7	Couple en charge	80
4.8	Tension de la phase A à vide	81
4.9	Flux de la phase A à vide	82
4.10	Couple de détente à vide	82
4.11	Tension de la phase A en charge	82
4.12	Flux de la phase A en charge	83
4.13	Couple en charge	83
4.14	Flux de la phase A de la MSAP insères à vide.	85
4.15	Tension e la phase A de la MSAP insères à vide.	86
4.16	Couple électromagnétique d'une MSAP insères à vide.	86

Table des figures

4.17	Couple électromagnétique d'une MSAP insères en charge.	86
4.18	Couple électromagnétique d'une MSAP insères et d'une MAS.	87

Liste des tableaux

- 2.1 Paramètres de base de la machine étudiée 38
- 2.2 Tableau des dimensions 39
- 2.3 Tableau des caractéristiques de l'enroulement et des matériaux 40
- 2.4 Tableau des dimensions et caractéristiques des matériaux 41

- 3.1 Paramètres de base de la machine étudiée 55
- 3.2 Tableau de comparaison entre les différentes topologies du rotor 73

Liste des sigles et acronymes

MSAP	<i>Machine synchrone à aimant permanent</i>
MAS	<i>Machine asynchrone</i>
FFT	<i>Fast Fourier transform</i>
FEM	<i>Force électromotrice</i>
VDF	<i>Variateurs de fréquence</i>
TGV	<i>Train à Grande Vitesse</i>
Rmxprt	<i>Rotating Machinery Expert (fr :Expert Machines Tournantes)</i>

Introduction générale

Contexte

Les machines électriques se divisent en deux grandes catégories : les machines statiques et les machines tournantes, ces dernières étant subdivisées en machines à courant continu et à courant alternatif. Les machines à courant alternatif se répartissent en machines synchrones et asynchrones.

Historiquement, les moteurs à courant continu ont bien servi la plupart des équipements industriels, mais leur principal inconvénient réside dans le collecteur mécanique, peu adapté à certains environnements et générant des coûts d'entretien élevés. Ces limitations ont orienté la recherche vers des entraînements utilisant des machines à courant alternatif.

Au cours des vingt dernières années, le domaine de la conversion d'énergie électrique a été profondément transformé par l'essor de l'électronique de puissance et de la microinformatique. Les méthodes traditionnelles de variation de vitesse, tant mécaniques qu'électromécaniques, ont progressivement été supplantées par des systèmes intégrant des convertisseurs statiques et des moteurs électriques.

Le développement parallèle de l'électronique de puissance et des aimants permanents a permis la conception de machines synchrones excitées par des aimants permanents, connues sous le nom de Machines Synchrones à Aimant Permanent (MSAP).

Problématique

Les moteurs synchrones à aimants permanents (MSAP) sont largement reconnus pour leur compacité et leur rendement élevé, des caractéristiques particulièrement avantageuses pour les applications dans les moyens de transport électrique. En revanche, les machines asynchrones (MAS), bien que robustes et éprouvées, présentent des limitations en termes de performances énergétiques et de maintenance, surtout lorsqu'elles sont utilisées dans des environnements exigeants.

La problématique centrale de ce projet est de déterminer si et comment une machine asynchrone existante peut être convertie en une machine synchrone à aimants permanents sans modification majeure de son circuit magnétique, et d'évaluer les gains en termes de performance et de maintenance. Plus précisément, il s'agit de répondre aux questions suivantes :

- Quels sont les types de MSAP les plus adaptés pour une conversion à partir de MAS, en particulier pour des applications en traction électrique ?
- Comment les performances électromagnétiques des MSAP se comparent-elles à celles des MAS lorsqu'elles sont simulées avec les mêmes contraintes de circuit magnétique ?

Objectifs

L'objectif de ce projet est de comparer une machine asynchrone avec une machine synchrone à aimants permanents, en utilisant le même circuit magnétique, pour évaluer les améliorations potentielles en termes d'efficacité énergétique, de maintenance et de fiabilité. Ce projet vise à :

1. **Recherche bibliographique** : Étudier les différents types de MSAP (aimants en surface, aimants enterrés, aimants à concentration de flux) et leurs applications en traction électrique.
2. **Simulation** : Effectuer une simulation par éléments finis d'une machine asynchrone et proposer un prototype de conception d'une MSAP utilisant le même circuit magnétique.
3. **Évaluation des performances** : Calculer et comparer les performances électromagnétiques (couple, force radiale, etc.) des deux types de machines.
4. **Interprétation et conclusion** : Analyser les résultats pour déterminer les avantages et les inconvénients de la conversion des machines asynchrones en machines synchrones à aimants permanents.

Organisation du mémoire

Ce mémoire est organisé en quatre chapitres :

Le premier chapitre "**État de l'art**" aborde les généralités concernant les machines asynchrones, les différentes configurations des machines synchrones à aimants permanents (MSAP), et leur structure et leur fonctionnement. Nous y présentons également un aperçu des divers types d'aimants permanents utilisés dans ces machines.

Le deuxième chapitre "**Étude sur la machine asynchrone**" se concentre sur la conception et la modélisation d'un moteur asynchrone à cage d'écureuil, avec une analyse de performance réalisée à l'aide des logiciels ANSYS : Rmxprt et Maxwell 2D. Les quatre points majeurs abordés sont : la présentation du logiciel de simulation ANSYS, la description des paramètres géométriques et électromagnétiques de la machine, le calcul analytique des performances électromagnétiques en utilisant RmXprt, et le calcul par éléments finis et en magnétodynamique du couple de la machine en fonctionnement nominal.

Le troisième chapitre “**Étude sur la machine synchrone à aimant permanent**” se concentre sur l’étude et la comparaison des différentes configurations d’aimants permanents dans les machines synchrones. Il analyse leurs avantages, leurs limitations et leur impact sur les performances, tout en explorant les principes fondamentaux et les mécanismes sous-jacents à chaque configuration. Ce chapitre examine également les progrès récents, les tendances de recherche actuelles et les applications concrètes des machines synchrones à aimants permanents. Enfin, il aborde les perspectives futures et souligne l’importance de ces technologies dans la transition vers une production et une utilisation d’énergie plus durables et efficaces.

Le quatrième chapitre “**Étude paramétrique et simulation sur la machine synchrone à aimant permanent insérés**”. En réalisant une étude paramétrique des paramètres rotoriques de la MSAP à aimants insérés, notre analyse est approfondie. Cette analyse permettra de mieux comprendre l’impact de ces paramètres sur les performances globales de la machine, ce qui favorisera une conception plus précise et optimisée des MSAP pour diverses applications sur le marché industriel.

Finalement, nous terminerons notre étude en présentant une conclusion globale qui résumera les principaux résultats obtenus, les leçons tirées de l’étude et les conséquences concrètes de nos découvertes. Nous aborderons aussi les contraintes de notre étude et suggérerons des propositions pour des recherches ultérieures, dans le but de poursuivre l’amélioration de la conception et de l’efficacité des moteurs asynchrones et synchrones à aimants permanents. Notre objectif dans cette conclusion sera de présenter une vision globale cohérente et exhaustive de notre projet, en mettant en évidence les contributions importantes de notre travail dans le domaine de la conversion d’énergie électrique.

Chapitre 1

Généralités sur les machines électriques triphasées

1.1 Introduction

La machine asynchrone est couramment employée dans l'industrie et est un choix privilégié pour de nombreuses applications. La croissance de sa popularité s'explique par divers avantages importants, tels que sa puissance considérable, sa solidité, sa simplicité d'utilisation et son prix relativement abordable. Néanmoins, bien que généralement fiable, la machine asynchrone peut être confrontée à des problèmes électriques ou mécaniques, tout comme toute autre machine électrique [1].

Les industriels et les chercheurs se tournent vers les moteurs synchrones à aimants permanents (MSAP) qui sont de plus en plus couramment utilisés dans des applications de haute technologie en raison de leur performance élevée, de leur capacité à atteindre des vitesses élevées, de leur fonctionnement propre et de leur longévité. Ces moteurs, aussi connus sous le nom de moteurs à courant continu sans collecteur, se présentent comme des concurrents intéressants pour les machines à induction. Les moteurs à courant continu ou alternatif (MSAP) se sont imposés dans les systèmes d'entraînement en raison de leurs multiples avantages par rapport aux autres types de moteurs, tels qu'un couple massique élevé, un rendement exceptionnel, une maintenance réduite, un faible moment d'inertie et une capacité importante [2] [3].

1.2 Machine asynchrone

1.2.1 Description de la machine asynchrone

Grâce à leurs multiples bénéfices, les machines asynchrones jouent un rôle important. Elles ont l'avantage de ne pas avoir de contacts électriques glissants, ce qui les rend simples et robustes à construire. Leur puissance varie de quelques watts à plusieurs mégawatts, et elles sont connectées directement aux réseaux industriels à tension et fréquence constantes. Le terme "asynchrone" vient du fait que la vitesse du rotor et celle du champ magnétique tournant ne sont pas les mêmes. Ces machines transfèrent l'énergie électrique entre le stator et le rotor, ou vice versa, par induction électromagnétique. Elles répondent à la plupart des besoins de conversion d'énergie électrique en énergie mécanique.

1.2.2 Composition de la machine asynchrone

La machine à induction est composée d'un stator et d'un rotor, tous deux fabriqués à partir de tôles d'acier au silicium et comportant des encoches pour loger les enroulements. Le stator reste immobile, abritant les enroulements connectés à la source d'alimentation. Quant au rotor, il est monté sur un axe de rotation, sur lequel sont positionnés les enroulements, rendant ainsi ces derniers accessibles depuis l'extérieur.

Stator :

Le stator est composé de plusieurs bobines réparties dans des encoches, formant ainsi trois bobinages distincts. Lorsqu'elles sont alimentées par un système de tensions ou de courants triphasés, ces bobines génèrent un champ magnétique rotatif. Les machines tournantes à courants alternatifs sont divisées en deux grandes catégories selon les différentes configurations de bobinages. Les configurations de bobinages non régulières incluent des dispositions telles que les bobinages à trous ou à un nombre fractionnaire d'encoches par pôle et par phase. Les configurations régulières comprennent des arrangements comme les bobinages à pas diamétral, les bobinages à pas raccourci et les bobinages répartis [4].



FIG. 1.1 : Stator d'une machine asynchrone

Le rotor d'un moteur asynchrone n'est pas directement connecté à une source d'alimentation électrique. Il est composé de conducteurs en court-circuit à travers lesquels circulent des courants induits, appelés courants rotorique. Ces conducteurs peuvent prendre la forme d'un ensemble de bobinages (rotor bobiné) ou d'une cage d'écureuil.

1.2.3 Types des machines asynchrones

Il existe deux principaux types de rotors dans les moteurs asynchrones :

Rotor bobiné

Dans le rotor bobiné, les enroulements rotorique sont soigneusement disposés dans des encoches situées sur la périphérie du rotor. Ces enroulements sont enroulés de manière à former un enroulement triphasé avec un certain nombre de paires de pôles déterminé par la conception spécifique du moteur (noté "p"). Ils sont toujours connectés en configuration étoile, et les trois bornes ainsi formées sont reliées à la carcasse du stator à travers un dispositif composé de trois bagues rotatives et de trois balais fixes. Cela permet un transfert efficace du courant électrique entre le stator et le rotor, assurant ainsi le bon fonctionnement du moteur.

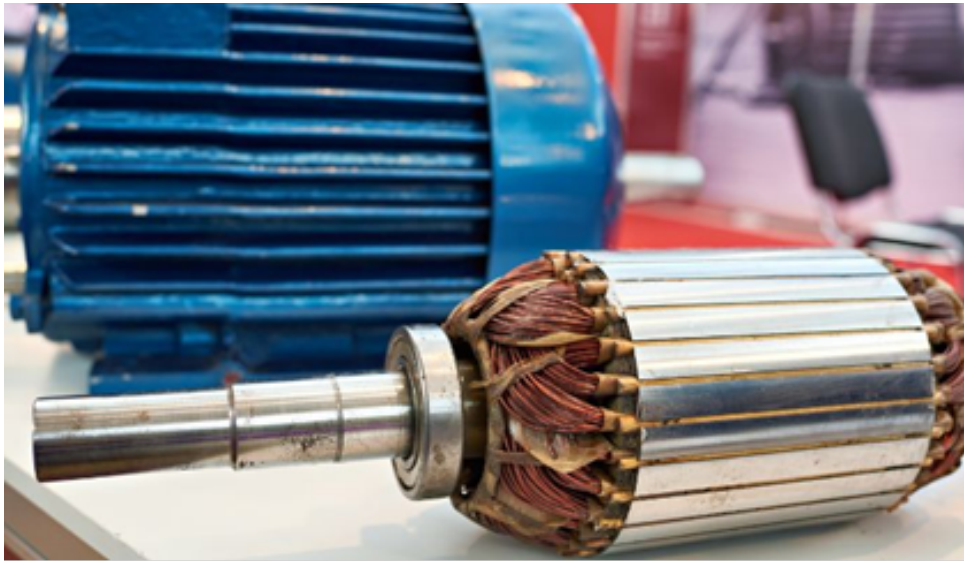


FIG. 1.2 : Rotor bobiné

Rotor à cage

Dans le cas du rotor à cage, qui est le type le plus courant dans les moteurs électriques, chaque encoche rotorique contient une barre conductrice. Pour les moteurs à forte puissance, ces barres sont généralement fabriquées en cuivre, tandis que pour les moteurs de faible à moyenne puissance, elles peuvent être fabriquées en alliage d'aluminium. Ces barres sont reliées à chaque extrémité du rotor par des anneaux métalliques qui réalisent le court-circuit entre elles. Contrairement au rotor bobiné, l'enroulement rotorique ainsi formé n'est pas accessible depuis l'extérieur, ce qui simplifie la conception et la construction du moteur tout en assurant des performances fiables et efficaces dans une gamme variée d'applications industrielles [5].

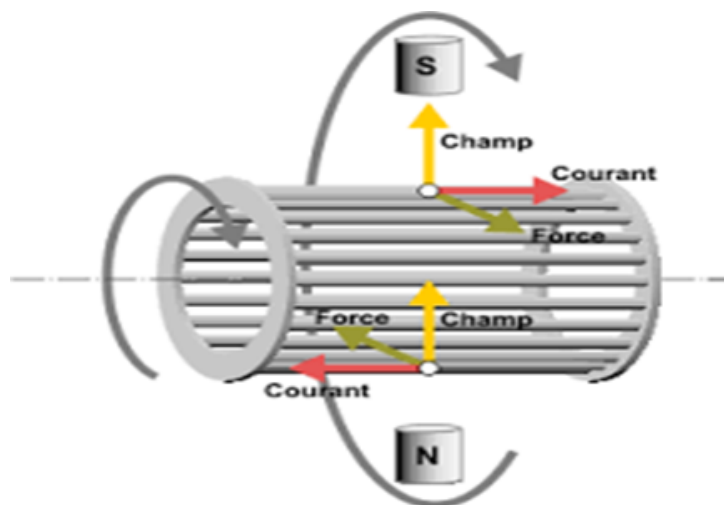


FIG. 1.3 : Rotor à cage

1.2.4 Avantages et inconvénients des machines asynchrones

Les moteurs asynchrones présentent plusieurs avantages et inconvénients :

Avantages :

- Simplicité de construction et de maintenance.
- Faible coût et robustesse.
- Efficacité énergétique plus élevée que les moteurs à courant continu.
- Bonnes caractéristiques de fonctionnement, de la charge à vide à la charge complète.
- Fiabilité élevée.
- Facilité d'utilisation et de commande.

Inconvénients :

- Faible facteur de puissance.
- Faible rendement par rapport d'autres types de machines [6].
- Vitesse de rotation variable par rapport à la vitesse du champ magnétique.
- Moins de contrôle précis sur la vitesse de rotation.
- Inconvénients liés à la vitesse de rotation variable, qui peut être un problème pour certaines applications.

1.2.5 Domaines d'applications des machines asynchrones

Les moteurs électriques asynchrones sont utilisés dans une grande variété d'applications en raison de leur simplicité de construction, de leur coût moindre, de leur robustesse, de leur fiabilité, de leur faible entretien et de leur capacité à démarrer directement sous charge. Les domaines d'application les plus courants pour les moteurs asynchrones incluent :

Transport : métro, trains, propulsion des navires.

Industrie : machines-outils, pompes, compresseurs, systèmes de pompage, ventilation

Électroménager : aspirateurs, ventilateurs, ventilo-convecteurs

Énergie renouvelable : éoliennes (utilisés en générateur, grâce aux progrès de l'électronique de puissance)

1.3 Machine synchrone

La machine synchrone se divise principalement en deux types : la machine synchrone à aimant permanent et la machine synchrone à rotor bobiné. La machine synchrone à aimant permanent utilise des aimants permanents pour créer le champ magnétique du rotor, ce qui la rend plus compacte, plus fiable et souvent plus efficace, avec des applications courantes dans les appareils domestiques et les véhicules électriques. En revanche, la machine synchrone à rotor bobiné dispose de bobinages sur le rotor alimentés en courant continu, permettant un contrôle précis du champ magnétique et du facteur de puissance.

1.3.1 Présentation de la machine étudiée

Dans cette étude, nous nous concentrerons sur l'analyse détaillée du fonctionnement de la machine synchrone, en examinant ses caractéristiques électromagnétiques et ses performances. Cette compréhension approfondie de la machine synchrone nous permettra d'identifier les domaines où des améliorations peuvent être apportées pour optimiser son fonctionnement et sa fiabilité.

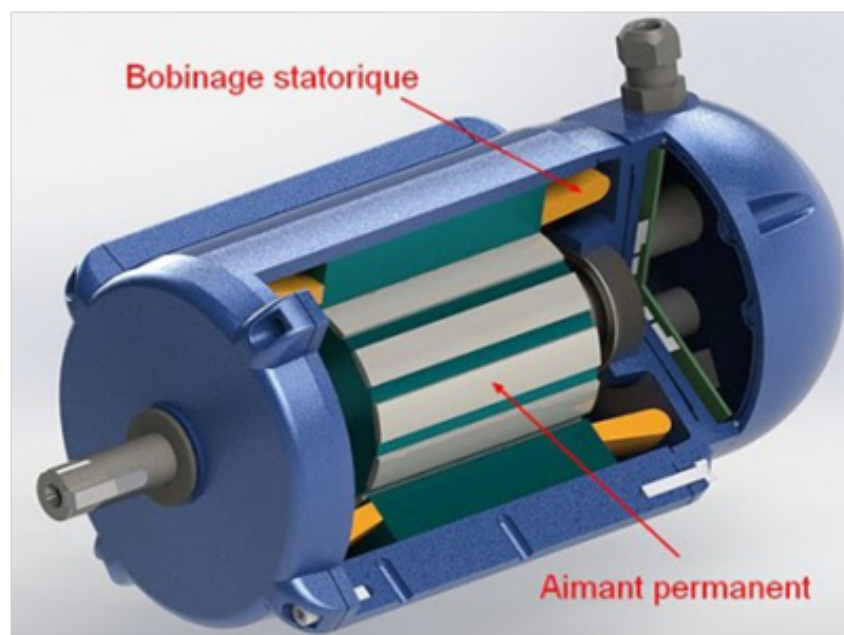


FIG. 1.4 : Machine synchrone à aimant permanent

1.3.2 Composition de la machine synchrone à aimant permanent

La machine synchrone à aimants permanents est composée d'un stator et d'un rotor. La partie fixe de la machine, appelée stator, abrite les enroulements connectés à la source électrique. Cependant, le rotor, qui est une partie mobile, est fixé sur l'axe de rotation.

Rotor :

Le rotor est fait d'un noyau de fer avec des aimants permanents fixés dessus. Ces aimants permanents agissent comme des sources d'excitation permanentes dans la machine.

Ils sont faits de matériaux magnétiques durs, ce qui signifie qu'une fois magnétisés, ils gardent leur aimantation même à des températures élevées. Les caractéristiques magnétiques de ces aimants permanents dépendent principalement des composés qui les forment, ainsi que de la microstructure du matériau, qui est influencée par le processus de fabrication.

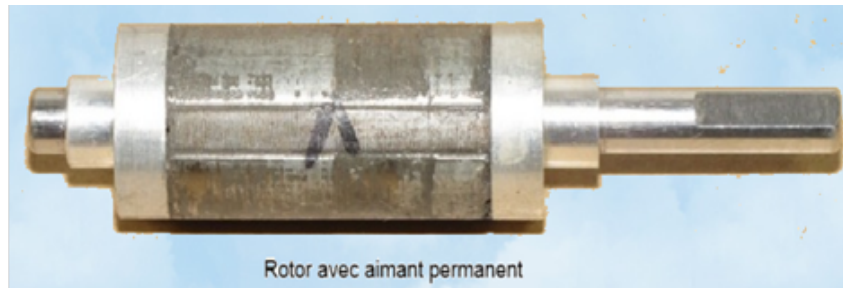


FIG. 1.5 : Rotor d'une machine synchrone à aimant permanent

Stator :

Le stator utilisé dans cette machine est identique à celui que l'on trouve dans une machine asynchrone classique. Il conserve toutes les caractéristiques et les propriétés structurelles de ce type de machine.

1.3.3 Types des machines synchrones à aimant permanent

Les machines synchrones à aimants permanents sont classées en fonction de la disposition des aimants sur le rotor. Leurs configurations comprennent des machines à flux radial, axial et transversal. La figure 1.6 suivante présente une représentation schématique des machines à flux radial et à flux axial.

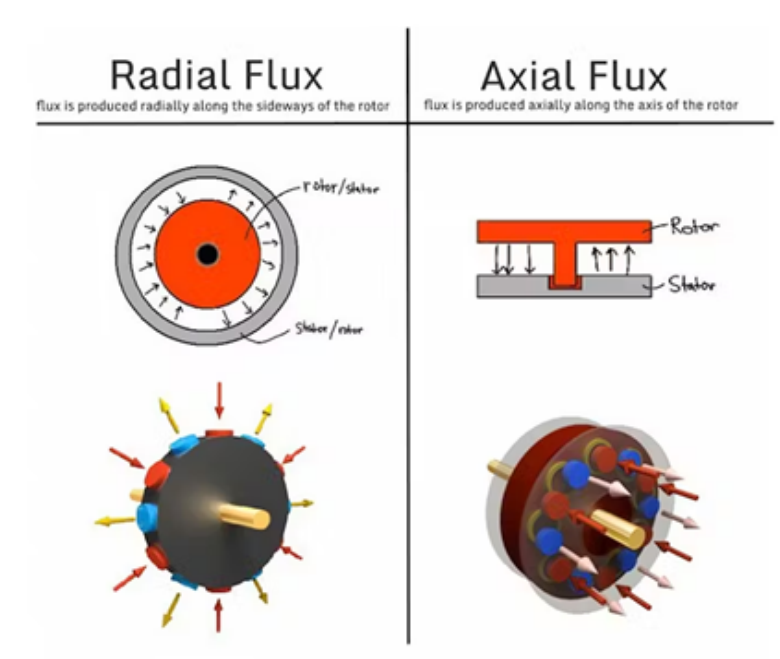


FIG. 1.6 : Vue schématique des machines : flux radial, flux axial

Dans ce qui suit, nous présentons les études concernant les machines synchrones à aimants permanents à flux radial :

La première machine à aimants permanents à émerger dans l'industrie était la machine synchrone à flux radial. Elle commence à surpasser la machine asynchrone grâce aux avancées dans le domaine de l'électronique de puissance et à l'amélioration des performances des aimants permanents. La première machine synchrone à flux radial créée avait un bobinage réparti et des aimants positionnés en surface. Elle a été utilisée avec succès dans des applications telles que l'équipement de turbocompresseurs (50 kW, 70 000 tr/min, 8 pôles) ou dans le secteur automobile (40 kW, 6 000 tr/min, 4 pôles) [1].

Cependant, un inconvénient majeur de cette configuration est que les aimants permanents sont disposés en surface, ce qui rend difficile leur utilisation dans des applications à haute vitesse. Le rotor de la machine peut être positionné à l'extérieur du stator pour remédier à cela et réduire le risque de décollement des aimants. Dans cette configuration, la force centrifuge fixe les aimants en surface sur le rotor [2] [3].

Plusieurs types de machines à aimants à structure cylindrique sont distingués en fonction de la disposition des aimants sur le rotor. Cependant, en raison de leur facilité de construction, les machines à aimants permanents montés en surface sont préférées pour les applications nécessitant de fortes puissances et une vitesse lente. Les machines à aimants à champ radial répondent bien aux contraintes rencontrées dans les propulsions en nacelle en raison de leur structure. En comparaison aux machines synchrones traditionnelles nécessitant des diamètres importants à vitesse lente et imposant donc des dimensions importantes à la nacelle, ce qui dégrade le rendement, ces machines semblent offrir une grande flexibilité dimensionnelle à la conception, permettant de réduire le rapport diamètre/hélice de 40% à 50% [7].

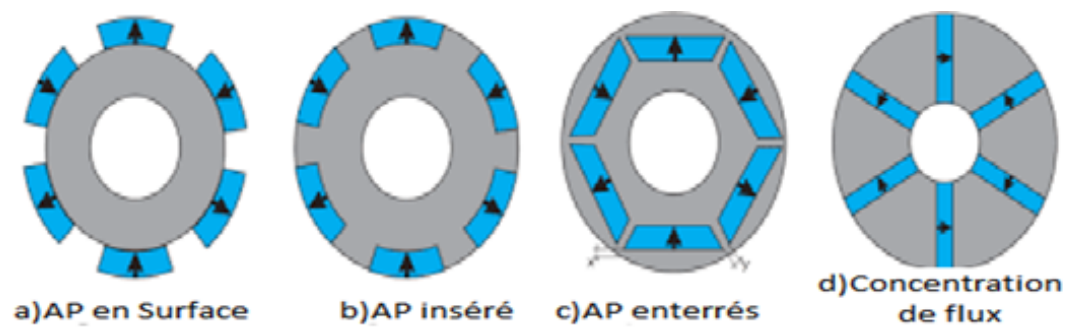


FIG. 1.7 : Catégories de MSAP : Perspectives de construction mécanique

Aimants en surface :

Ce type de machine est celui dont la configuration est la plus facile à construire, elle est classée parmi les machines à pôles lisses et se distingue par des aimants généralement en forme de tuile collés sur une culasse cylindrique. Comme indiqué sur la figure 1.8, dans ce type de machine, les aimants sont placés de manière radiale sur la surface du rotor. L'avantage principal de cette structure est sa simplicité de fabrication, qui entraîne des coûts de production relativement bas par rapport à d'autres machines à aimants.

Cependant, il présente des inconvénients, notamment l'exposition des aimants permanents aux champs de démagnétisation et la possibilité que les aimants se détachent du rotor en raison des forces centrifuges.

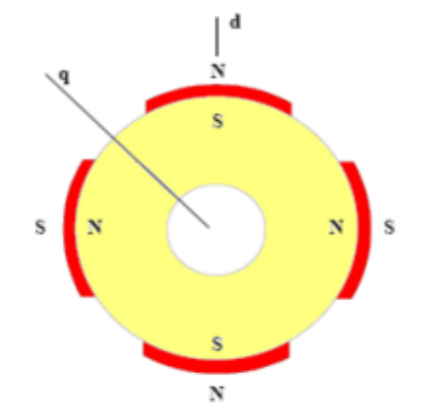


FIG. 1.8 : Machine synchrone à aimants permanents en surface

Parfois, un cylindre externe non ferromagnétique de haute conductivité est utilisé pour résoudre ces problèmes. Ce cylindre réduit la réaction de l'induit, réduit les forces centrifuges et protège les aimants permanents contre la démagnétisation. Il peut également fonctionner comme amortisseur et fournir un couple de démarrage asynchrone. La réactance synchrone des axes d et q est presque identique pour les aimants de type terres rares.

Aimants insérés :

Des encoches sont fabriquées dans le rotor afin de loger les aimants permanents, ce qui rend l'assemblage mécanique plus simple. Les espaces inter polaires entre les aimants permanents créent de la saillance dans le dispositif. Les aimants de type inséré sont également montés sur la surface du rotor, tout comme les machines avec des aimants en surface. Cependant, comme le montre la figure 1.9, le fer comble partiellement les espaces entre les aimants permanents. Une saillance est créée par le fer entre les aimants permanents, qui produit un couple réductant en plus du couple fourni par les aimants.

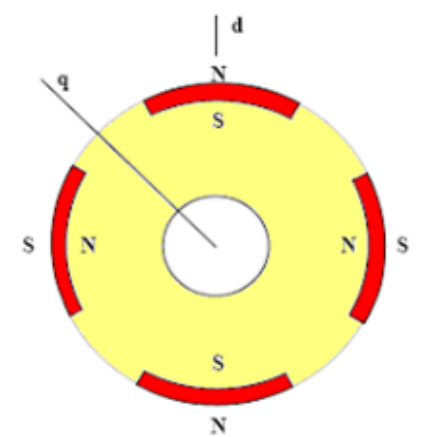


FIG. 1.9 : Machine synchrone à aimants permanents insérés

Aimants enterrés :

Les machines à aimants enterrés se distinguent par la présence d'aimants intégrés dans le rotor et orientés radialement, comme indiqué dans la figure 1.10. Ces machines ont des caractéristiques uniques grâce à cette configuration spécifique. En raison de la surface plus restreinte du pôle magnétique par rapport à celle du rotor, l'induction dans l'entrefer est inférieure à celle au sein de l'aimant. La réactance synchrone de l'axe-d est inférieure à celle de l'axe-q en raison de cette configuration. Les aimants bénéficient d'une protection accrue contre les forces centrifuges, ce qui les rend recommandés pour les applications à grandes vitesses.

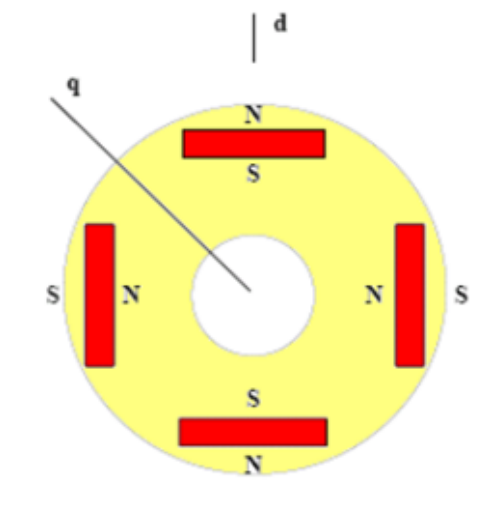


FIG. 1.10 : Machines synchrones à aimants permanents enterrés

Les machines synchrones à aimants permanents enterrés (MSAP enterrés) sont un type de machine électrique distinct. Ces machines offrent plusieurs avantages, notamment une protection accrue des aimants contre les forces centrifuges et une réduction du risque de détachement, en positionnant les aimants permanents à l'intérieur du rotor plutôt qu'en surface. Les MSAP enterrés sont célèbres pour leurs performances élevées, leur rendement optimal et leur adaptabilité à un large éventail d'applications, telles que la traction électrique, l'industrie automobile, les systèmes énergétiques et d'autres domaines où une efficacité et une densité de puissance importantes sont nécessaires.

Aimants à concentration de flux :

Une méthode alternative pour placer les aimants dans le rotor est de les encastrent profondément à l'intérieur. La figure 1.11 montre comment les aimants dans cette configuration sont orientés dans le sens de la circonférence. Grâce à la concentration du flux produit par les aimants permanents, les pôles magnétiques se forment au niveau des parties ferromagnétiques du rotor. Cette configuration a un avantage important par rapport à d'autres parce qu'elle permet de concentrer le flux émanant des aimants permanents dans le rotor, ce qui entraîne une induction plus puissante dans l'entrefer.

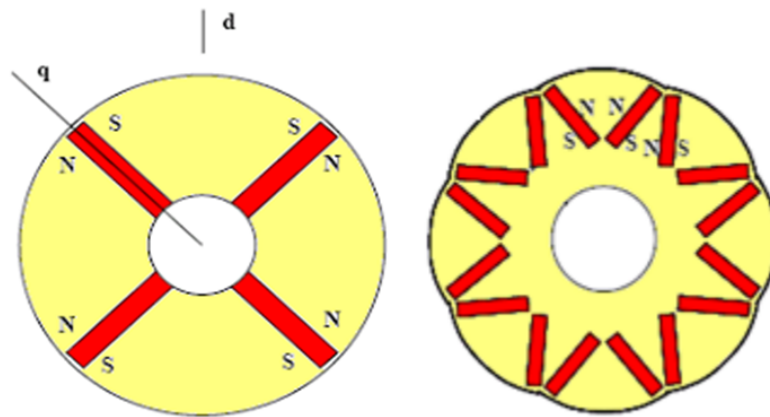


FIG. 1.11 : Machine synchrone à aimants permanents à concentration de flux

Cette configuration, similaire aux machines à aimants intérieurs, protège efficacement les aimants permanents contre la désaimantation et les contraintes mécaniques. En conséquence, cette méthode offre une solution pour maximiser la concentration du flux magnétique en favorisant une induction accrue dans l'entrefer tout en assurant la protection et la pérennité des aimants permanents.

1.3.4 Avantages et inconvénients des machines synchrones à aimant permanent

Avantages :

- Fiabilité élevée et gestion électronique simplifiée : Les MSAP offrent une fiabilité élevée et sont aisément gérées électroniquement, renforçant ainsi leur robustesse opérationnelle.
- Vitesse de rotation constante : Ces machines maintiennent une vitesse de rotation constante, synchronisée avec la fréquence d'alimentation, assurant une stabilité opérationnelle [8].
- Ondulations de couple réduites : Les MSAP présentent des ondulations de couple minimisées, améliorant la régularité de la rotation.
- Travail avec un facteur de puissance proche à 1 : Elles opèrent avec un facteur de puissance proche de l'idéal, contribuant à une efficacité énergétique accrue.
- Applications variées : Ces machines trouvent des applications étendues dans des secteurs exigeant des performances élevées, tels que la robotique, l'aérospatiale, les outils électriques, les énergies renouvelables, la médecine et les véhicules électriques.

Inconvénients :

- Coût élevé des matériaux magnétiques permanents : Les MSAP impliquent des coûts significatifs liés aux matériaux magnétiques permanents, notamment ceux à base de terres rares.
- Démarrage difficile : Le démarrage des MSAP peut être complexe, nécessitant parfois un dispositif d'appui pour le rotor.
- Dépendance à un variateur de fréquence : La présence d'aimants permanents peut imposer la nécessité d'un variateur de fréquence pour le démarrage.
- Efficacité réduite à haut régime : Les MSAP peuvent présenter une efficacité moindre à des régimes élevés en raison de l'inertie accrue due aux aimants lourds et de l'apparition du phénomène de back électromoteur.
- Poids et coût accrus : Par rapport aux moteurs asynchrones, les MSAP peuvent être plus lourds comparant au poids des barres rotorique en aluminium et plus coûteux, impactant la rentabilité globale.

1.3.5 Domaines d'applications des machines synchrones à aimant permanent

Ces machines ont un large éventail d'applications dans une variété de domaines, notamment l'équipement domestique, les voitures et les vélos électriques, le transport, l'aérospatial, les machines-outils, les servomoteurs, l'équipement médical et la propulsion des navires.

Ils sont employés pour des énergie allant des microwatts aux mégawatts. La machine synchrone à aimant permanent est utilisée pour les entraînements qui nécessitent une vitesse de rotation constante, tels que les grands ventilateurs, les compresseurs et les pompes centrifuges. Grâce au développement de l'électronique de puissance, l'association machine à aimants convertisseur de puissance a trouvé de nombreuses applications dans de nombreux domaines très divers tels que la robotique, la technologie de l'espace, ainsi que dans d'autres applications plus spécifiques (domestique...).

Le moteur synchrone peut ainsi être très utile dans de nombreuses applications, telles que [9] :

- Les équipements domestiques (machine à laver le linge).
- Les automobiles.
- Les outils électriques, jouets, système de vision et ses équipements.
- Les servomoteurs.
- Les applications robotiques.
- La production d'électricité.(Les éoliennes)

- La propulsions des véhicules électriques et la propulsion des sous-marins.
- Les machines-outils.
- Les applications de l'énergie de l'éolienne.

1.4 Transformation d'un moteur asynchrone de type classique en moteur synchrone à aimant permanent

1.4.1 Comparaison entre la machine synchrone à aimant permanent et la machine asynchrone

Le choix entre une machine asynchrone et une machine synchrone à aimant permanent dépendra des exigences spécifiques de l'application, ainsi que des coûts, de la maintenance et du contrôle de vitesse. En comparant une machine asynchrone et une machine synchrone à aimant permanent avec la même puissance, on peut déterminer :

1. Principe de fonctionnement :

La machine asynchrone fonctionne en induisant un courant dans le rotor pour créer un champ magnétique qui interagit avec le champ magnétique du stator, entraînant le mouvement du rotor de façon asynchrone. La machine synchrone à aimant permanent utilise des aimants permanents sur le rotor pour créer un champ magnétique fixe, synchronisé avec le champ magnétique du stator, ce qui entraîne le mouvement synchrone du rotor.

2. Efficacité énergétique :

La machine synchrone à aimant permanent a généralement une meilleure efficacité énergétique en raison de l'absence de pertes dans le rotor (pas de courants de Foucault) et de la possibilité de contrôler précisément l'excitation magnétique.

3. Réactivité :

La machine synchrone à aimant permanent à une meilleure réactivité et une meilleure réponse aux variations de charge et de vitesse en raison de sa conception synchrone et de la possibilité de contrôler précisément le champ magnétique.

4. Coût initial :

La machine asynchrone a tendance à être moins chère à l'achat que la machine synchrone à aimant permanent en raison de sa conception plus simple et de ses composants moins coûteux.

5. Maintenance :

La machine synchrone à aimant permanent nécessite généralement moins de maintenance que la machine asynchrone en raison de l'absence de pièces mobiles en contact et de la durabilité des aimants permanents.

6. Taille et poids :

La machine synchrone à aimant permanent est souvent plus compacte et légère que la machine asynchrone pour la même puissance de sortie, ce qui peut être un avantage dans les applications où l'espace et le poids sont limités.

7. Applications spécifiques :

La machine asynchrone est souvent préférée pour les applications nécessitant une puissance de démarrage élevée et une tolérance aux surcharges, comme les compresseurs et les pompes.

La machine synchrone à aimant permanent est souvent utilisée dans les applications nécessitant une haute efficacité énergétique, une réactivité élevée et un contrôle précis de la vitesse, comme les véhicules électriques et les applications industrielles haut de gamme.

1.4.2 Possibilités de faire la transformation

Les possibilités de transformation des moteurs asynchrones de type classique en moteurs synchrones à aimant permanent sont explorées à travers le processus de remanufacturation, en particulier pour les moteurs haute efficacité. La remanufacturation consiste à démonter scientifiquement les moteurs éliminés, en utilisant les pièces disponibles du moteur d'origine, et en remplaçant les composants nécessaires, tels que les roulements, enroulements, stator et rotor, par des matériaux de haute technologie. Cette approche vise à fabriquer des moteurs haute efficacité ou économes en énergie conformément à des normes spécifiques. Dans le cas des moteurs asynchrones, la récupération non destructive du stator et la récupération destructive du rotor sont envisagées. Les parties endommagées du moteur peuvent être recyclées et remanufacturées en d'autres pièces. La standardisation du processus de remanufacturation est essentielle pour garantir la qualité du produit final [10].

En outre, la transformation vers des moteurs synchrones à aimant permanent peut être réalisée en réutilisant les modèles de grands moteurs asynchrones avec des parties stator intactes ou de faible efficacité. Cette approche offre une solution durable pour optimiser le processus de recyclage des moteurs et contribuer à la réalisation des objectifs de développement circulaire et vert dans l'industrie des moteurs. La remanufacturation permet de maximiser l'utilisation des ressources, de réduire les déchets et de promouvoir l'efficacité énergétique. Cependant, en raison de la complexité des moteurs et des différences dans les matériaux et les environnements d'utilisation, la transformation nécessite une approche précise et une optimisation du processus pour minimiser les coûts tout en améliorant l'efficacité des moteurs.

1.4.3 Études nécessaires au dimensionnement des nouvelles machines

La réussite du processus et l'optimisation des performances de la nouvelle machine nécessitent des études approfondies pour transformer un moteur asynchrone de type classique en un moteur synchrone à aimant permanent. Voici quelques éléments essentiels des

recherches nécessaires pour dimensionner les nouvelles machines dans le cadre de cette transformation [10] :

- **Analyse des caractéristiques électromagnétiques :**
Avant de procéder à la transformation, il est essentiel de comprendre les caractéristiques électromagnétiques du moteur asynchrone d'origine. Cela inclut l'analyse des pertes de cuivre dans le stator et le rotor, ainsi que la distribution du champ magnétique. Ces données serviront de référence pour concevoir le nouveau moteur synchrone.
- **Modélisation et simulation :**
Il est essentiel d'utiliser des logiciels de modélisation et de simulation tels qu'Ansys Maxwell. Les modèles 2D et 3D du moteur peuvent être créés avec ces outils, ainsi que l'analyse du champ magnétique, la simulation du comportement électromagnétique et l'optimisation des paramètres du nouveau moteur synchrone.
- **Analyse des pertes :**
Une attention particulière doit être portée à l'analyse des pertes dans le moteur, notamment les pertes dans le cuivre du stator, les pertes dans les aimants permanents, et les pertes par courants de Foucault dans le rotor. Cela contribue à maximiser l'efficacité énergétique du nouveau moteur.
- **Optimisation des paramètres :**
Les caractéristiques du moteur synchrone à aimant permanent doivent être optimisées en fonction des exigences spécifiques de l'application, telles que la charge, la vitesse, et le couple. Cela inclut la détermination du nombre de pôles, la conception du rotor à aimant permanent, et la sélection des matériaux appropriés.
- **Analyse thermique :**
Une analyse thermique est importante pour évaluer les températures de fonctionnement du moteur sous différentes charges. Cela garantit que le nouveau moteur fonctionne de manière fiable et prolonge sa durée de vie en évitant des températures excessives qui pourraient entraîner des défaillances.
- **Études économiques :**
Des études économiques doivent également être menées pour comparer les coûts de la transformation aux avantages attendus, tels que l'économie d'énergie et la réduction des émissions. Pour justifier l'investissement dans la remanufacturation, une analyse coût-bénéfice peut être incluse.

1.5 Conclusion

Transformer une machine asynchrone en une machine synchrone à aimants permanents est un défi complexe qui demande une grande expertise en électromagnétisme, mécanique, matériaux et contrôle des systèmes. Chaque étape de ce processus doit être soigneusement analysée et améliorée pour assurer de bonnes performances, une fiabilité accrue et une rentabilité à long terme. Cette démarche souligne l'importance d'une approche méthodique

et d'une compréhension approfondie des principes fondamentaux pour garantir le succès de la transformation et maximiser les avantages de la machine résultante. En investissant dans une planification minutieuse et une mise en œuvre rigoureuse, il est possible de tirer pleinement parti des machines synchrones à aimants permanents.

Des considérations économiques importantes justifient la conversion des machines asynchrones en machines synchrones à aimants permanents (MSAP) après la maintenance des machines asynchrones, notamment pour les systèmes de grande puissance. Bien que fréquemment utilisées et fiables, les machines asynchrones peuvent entraîner des coûts de maintenance importants, surtout à mesure que la puissance augmente. En permettant une réduction des coûts opérationnels à long terme, la conversion vers des MSAP offre une alternative stratégique. Avec leur rendement et leur fiabilité accrus, les MSAP offrent une solution plus économique et durable tout en réduisant les dépenses liées à la maintenance. La migration vers des technologies plus sophistiquées fait partie d'une stratégie visant à optimiser les ressources et à assurer la pérennité des équipements industriels.

Chapitre 2

Étude et simulation sur la machine asynchrone

2.1 Introduction

On utilise fréquemment le moteur asynchrone dans l'industrie et il est une option privilégiée dans de nombreux dispositifs domestiques (machines à laver, sèche linge, tondeuse électrique...etc), ainsi que dans des dispositifs industriels (machine outil...). Elles sont également utilisées pour la traction ferroviaire dans les derniers modèles de TGV.

Bien que traditionnellement utilisés en service à vitesse fixe, les moteurs asynchrones sont de plus en plus utilisés avec des variateurs de fréquence (VFD) en service à vitesse variable. Ces variateurs offrent des opportunités d'économies d'énergie particulièrement importantes pour les moteurs asynchrones existants et potentiels dans les charges de ventilateurs centrifuges, de pompes et de compresseurs à couple variable, et même dans les véhicules électriques. Le variateur de fréquence (VDF) fait varier la fréquence et donc la vitesse ou le couple du moteur asynchrone selon les besoins de la charge. Les moteurs asynchrones à cage d'écureuil sont très largement utilisés tant dans les applications à vitesse fixe que dans les applications à fréquence variable.

Dans ce travail, nous avons modélisé un moteur asynchrone à cage d'écureuil et une analyse de performance a été réalisée dans divers logiciels Ansys : Rmxprt, Maxwell 2D.

Quatre points majeurs sont abordés dans ce chapitre : la présentation du logiciel de simulation ANSYS, la description des paramètres géométriques et électromagnétiques de la machine à étudier, le calcul analytique des performances électromagnétiques de la machine en utilisant l'outil RmXprt d'ANSYS, et le calcul par éléments finis et en magnétodynamique du couple de la machine en fonctionnement nominal.

2.2 Machine asynchrone

2.2.1 Contexte de l'étude

Le fonctionnement de la machine asynchrone repose sur le principe de l'induction électromagnétique. Elle se compose principalement de deux parties principales : le stator et le rotor. Le stator est la partie fixe de la machine et est composé de bobinages de cuivre enroulés autour de dents de fer laminées. Ces bobinages sont alimentés en courant alternatif, ce qui crée un champ magnétique tournant dans le stator. Le rotor, quant à lui, est la partie mobile de la machine et peut être de deux types principaux : à cage d'écureuil ou à bobinage.

Dans notre étude, nous examinons un moteur à cage d'écureuil. Le rotor est composé d'une structure en forme de cage avec des conducteurs en aluminium. Ces conducteurs se trouvent dans les encoches d'un tambour en fer laminé et forment une boucle à l'intérieur. Quand le champ magnétique tournant du stator provoque un courant dans les conducteurs du rotor, cela génère un champ magnétique à son tour, ce qui provoque le déplacement du rotor. Pour concevoir des moteurs asynchrones plus efficaces, des prédictions précises du comportement du moteur sont nécessaires. La méthode des éléments finis nous permet

d'obtenir les caractéristiques de calcul des moteurs asynchrones sans construire physiquement un prototype. Dans notre travail, un moteur asynchrone triphasé à cage d'écuréuil est modélisé, analysé et simulé dans ANSYS Electronics. Les lignes de flux magnétique, la densité de flux magnétique et la force du champ magnétique sont analysées et animées.

2.2.2 Objectifs de l'étude

L'objectif principal de l'étude du comportement de la machine asynchrone à l'aide du logiciel Ansys Electronics est de déterminer dans quelle mesure il est possible de convertir cette machine en une machine synchrone à aimant permanent. Cette conversion pourrait offrir plusieurs avantages en termes d'efficacité énergétique, de performances et de fiabilité. Pour atteindre cet objectif, il est nécessaire d'analyser en profondeur le fonctionnement électromagnétique de la machine asynchrone, y compris la distribution du champ magnétique, les pertes énergétiques et les performances dans différentes conditions de fonctionnement. En utilisant les fonctionnalités avancées du logiciel Ansys Electronics, il sera possible de modéliser avec précision la machine asynchrone et d'explorer les modifications nécessaires pour la convertir en une machine synchrone à aimant permanent. Les résultats de cette étude aideront à orienter le processus de conception vers des solutions plus efficaces et performantes.

2.3 Méthodologie de modélisation et de simulation

2.3.1 Importance de l'analyse par logiciel de simulation Ansys Electronics

L'utilisation de logiciels de simulation, en particulier l'analyse par éléments finis avec Ansys Electronics, est essentielle pour étudier les machines asynchrones. Cette méthode offre la possibilité d'étudier en détail le comportement électromagnétique de la machine, en tenant compte des interactions complexes entre ses divers éléments. La méthode des éléments finis permet aux ingénieurs de fragmenter la machine en éléments plus petits pour lesquels les équations électromagnétiques sont résolues de manière numérique. L'utilisation de cette méthode permet une étude approfondie des champs magnétiques, des flux de courant, des pertes d'énergie et d'autres phénomènes électromagnétiques, ce qui permet de mieux comprendre le fonctionnement de la machine.

2.3.2 Présentation du logiciel Ansys Electronics

Ansys Electronics est une suite logicielle puissante conçue pour la simulation électromagnétique avancée. Elle permet aux ingénieurs de modéliser, simuler et analyser une large gamme de dispositifs électriques et électroniques, allant des composants individuels aux systèmes complets. Le logiciel offre des fonctionnalités de pointe pour la modélisation 3D, la résolution de problèmes multiphysiques, l'analyse de circuits électriques et la visualisation des résultats. Ansys Electronics est largement utilisé dans diverses industries

telles que l'automobile, l'aérospatiale, l'énergie, les télécommunications et l'électronique grand public pour concevoir et optimiser des produits innovants et fiables.

Ansys Electronics RMXprt est une fonctionnalité existant dans Ansys qui permet d'analyser des systèmes électromécaniques, spécialisée dans la modélisation des performances des moteurs électriques. Il propose une plateforme facile à utiliser pour simuler et prédire les caractéristiques de divers moteurs électriques, tels que les moteurs à courant continu, les moteurs à induction et les moteurs synchrones ainsi que les générateurs.

Les principales caractéristiques de Ansys Electronics RMXprt sont les suivantes :

1. **Configuration des moteurs** : Permet de définir les paramètres de base du moteur, tels que la puissance, la tension, la fréquence, le type de moteur, etc.
2. **Modélisation des circuits électriques** : Intègre des outils pour modéliser les circuits électriques du moteur, y compris les bobines, les enroulements et les connexions électriques.
3. **Prédiction des performances** : Utilise des équations de circuits électriques et magnétiques pour prédire les performances du moteur, telles que le couple, la vitesse, l'efficacité, etc.
4. **Analyse des résultats** : Fournit des outils d'analyse pour interpréter les résultats de simulation et évaluer les performances du moteur dans différentes conditions de fonctionnement.

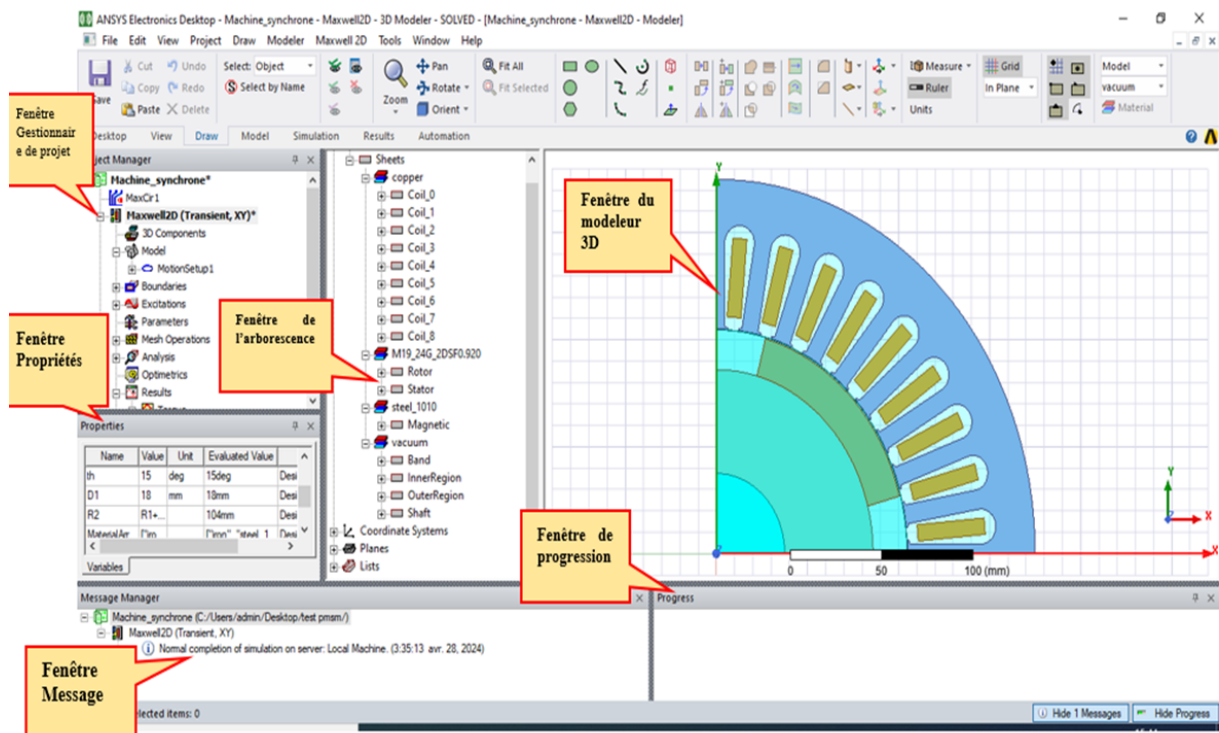


FIG. 2.1 : Présentation du logiciel

Le logiciel ANSYS Electronic propose une interface intégrale et conviviale pour concevoir, simuler et analyser des systèmes électroniques. La zone de travail principale de cette interface permet aux utilisateurs d'interagir avec leurs modèles, de créer des schémas de circuits et de créer des géométries pour la simulation. La barre de menu et la barre d'outils situées en haut de l'interface permettent d'accéder rapidement aux fonctionnalités principales, tandis que sur le côté gauche, l'explorateur de projet facilite la navigation entre les projets et les fichiers qui leur sont associés. Le gestionnaire de composants permet également aux utilisateurs d'accéder à une bibliothèque de composants électroniques pré-programmés, ce qui facilite la conception. L'interface intègre également les fonctionnalités de pré-traitement et de maillage, ainsi que l'analyse post-traitement des résultats, ce qui permet d'offrir un flux de travail complet et cohérent. La console de messages située en bas de l'interface offre des renseignements sur le système et des notifications afin de simplifier le dépannage et la résolution des problèmes.

2.3.3 Présentation de la machine étudiée

Dans cette étude, nous concentrerons sur l'analyse détaillée du fonctionnement de la machine asynchrone, en examinant ses caractéristiques électromagnétiques et ses performances. Cette compréhension approfondie de la machine asynchrone nous permettra d'identifier les domaines où des améliorations peuvent être apportées pour optimiser son fonctionnement et sa fiabilité.

Nous avons débuté notre projet en nous appuyant sur un exemple fourni par RMXprt, que nous avons ensuite adapté en modifiant les dimensions pour correspondre à celles d'une machine de 3.2 kilowatts. Ces ajustements dimensionnels ont été essentiels pour nous permettre d'obtenir des résultats plus précis et représentatifs, en alignant notre simulation sur des conditions réelles.

Paramètre	Symbole	Valeur et unité
Puissance de la machine	P_u	3200 Watts
Perméabilité relative des barres du rotor	μ_r	1.000021
Conductivité (siemens/m)	σ	38000000
Nombre de conducteurs par encoche	N_c	32
Nombre d'encoches statorique	Q_s	36
Nombre des barres rotorique	Q_r	28
Nombre de paires de pôles	P	2
Fréquence	f	50 Hz
Diamètre externe du stator	R_{sext}	350 mm
Diamètre interne du stator	R_{sin}	210 mm
Diamètre externe du rotor	r_{ext}	209 mm
Diamètre interne du rotor	r_{in}	60 mm
Épaisseur de l'entrefer	e	1 mm
Longueur de la machine	L_u	280 mm

TAB. 2.1 : Paramètres de base de la machine étudiée

2.3.4 Conception d'un moteur asynchrone triphasé dans Ansys

La conception, la sélection des matériaux, la production et la vérification des performances (essais) sont les principales étapes de la fabrication de tout moteur électrique. Dans le logiciel "ANSYS Maxwell", nous pouvons créer un modèle de calcul et obtenir les paramètres électromagnétiques sous une forme visuelle pratique. Il tient également compte de la non-linéarité du matériau magnétique, des pertes dans le fer ainsi que de l'influence des encoches d'enroulement, etc. RMXprt est un outil de conception de machines électriques basé sur des modèles qui fournit des calculs analytiques rapides des performances des machines et une création de géométrie 2D et 3D pour des calculs détaillés par éléments finis. Ce rapport se concentre sur l'utilisation du logiciel ANSYS RMXprt pour la sélection des matériaux, la conception de la machine et l'obtention des caractéristiques de performance d'un moteur asynchrone triphasé.

1. Détails de conception du stator

La conception des encoches statoriques d'une machine asynchrone repose sur la prise en compte de différentes dimensions et formes afin de garantir un bon fonctionnement de la machine. Les encoches statoriques sont généralement caractérisées par leur largeur, leur profondeur et leur forme. La largeur des encoches est importante car elle détermine la superficie disponible pour les bobinages, souvent en fonction de la densité de courant souhaitée dans les bobines et de la capacité à dissiper la chaleur générée. La profondeur des encoches influence la distribution du champ magnétique et la densité de flux dans le stator, ce qui a un impact sur les performances de la machine.

Les encoches peuvent prendre différentes formes, telles que des encoches trapézoïdales, en coin ou en forme de dents, chacune présentant ses propres avantages en termes de réduction des pertes par courant de Foucault et d'amélioration du couple électromagnétique. Ces dimensions et formes sont minutieusement étudiées et optimisées afin de maximiser l'efficacité, la fiabilité et les efficacités de la machine asynchrone. Les dimensions des encoches du stator sont les suivantes :

Dimensions	Valeur
h_{s0}	0.8 mm
h_{s1}	0.52 mm
h_{s2}	39.48 mm
b_{s0}	6 mm
b_{s1}	9.6 mm
b_{s2}	16.4 mm

TAB. 2.2 : Tableau des dimensions

Détails de l'enroulement du stator :

Paramètre	Valeur
Type d'enroulement	Enroulement complet
Résistivité du fil (ohm.mm ² /m)	0,0217
Taille du fil	1,12 mm
Facteur d'empilage	0,92
Type d'acier	M19_26G

TAB. 2.3 : Tableau des caractéristiques de l'enroulement et des matériaux

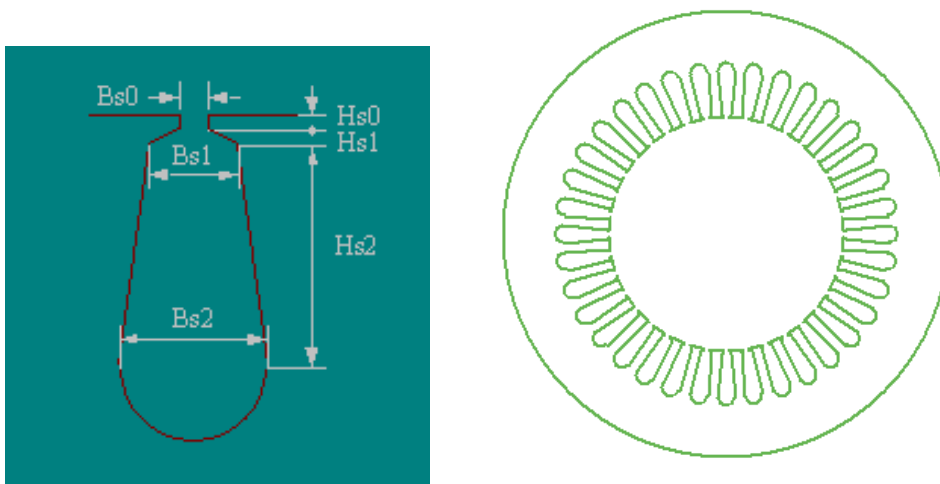


FIG. 2.2 : Conception de l'encoche du stator et de l'enroulement du stator

Disposition des enroulements stator :

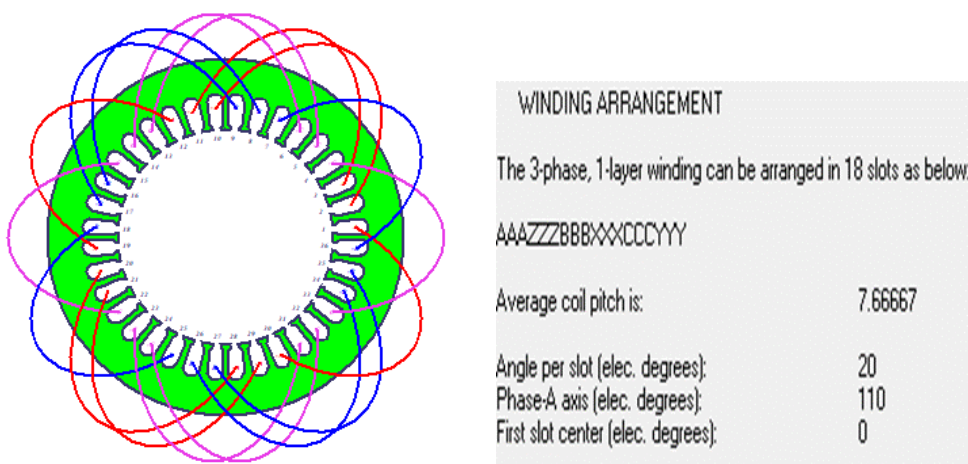


FIG. 2.3 : Détails de conception des enroulements statorique

2. Détails de la conception du rotor

Dans une machine asynchrone à barres, les encoches rotoriques sont spécialement

élaborées pour recevoir les barres conductrices du rotor, garantissant ainsi un ajustement précis et une transmission efficace du courant. Ils sont conçus de manière à réduire les pertes par courant de Foucault et à optimiser le flux magnétique, ce qui contribue à améliorer les performances globales de la machine.

Dimensions des encoches du rotor :

Dimensions	Valeur
h_{s0}	0.5 mm
h_{s1}	0.66 mm
h_{s2}	14.34 mm
b_{s0}	2 mm
b_{s1}	6.6 mm
b_{s2}	6.6 mm
Longueur	280 mm
Facteur d'empilement	0.92
Type d'acier	M19_26G

TAB. 2.4 : Tableau des dimensions et caractéristiques des matériaux

Bobinage du rotor : Type de conducteur en barres – aluminium

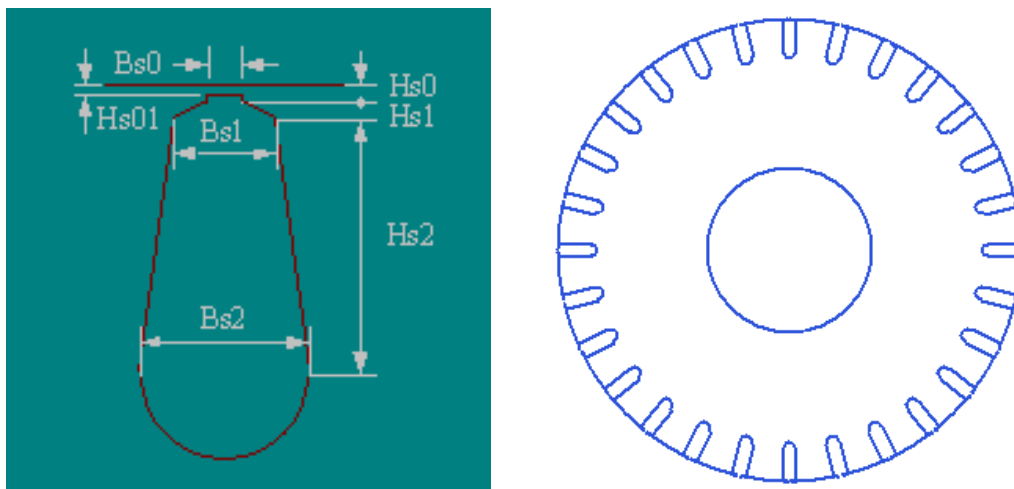


FIG. 2.4 : Conception de l'encoche du rotor et de l'enroulement du rotor

2.4 Caractéristiques de performance de la machine asynchrone

- Couple

Le variateur de fréquence produit toute une série de courbes Couple, Vitesse, chacune ayant une vitesse synchrone correspondant à la fréquence fournie au moteur

à chaque instant. Il est nécessaire d'adapter la tension d'alimentation du moteur en fonction de la fréquence afin de maintenir le courant dans le chemin de magnétisation fixe. Il s'agit de maintenir un rapport V/f stable. Le champ magnétique est généré par ce courant de magnétisation, ce qui entraîne le courant du rotor et génère le couple. Ainsi, pour permettre au moteur de développer un couple maximal à n'importe quelle vitesse, ce courant doit être maintenu.

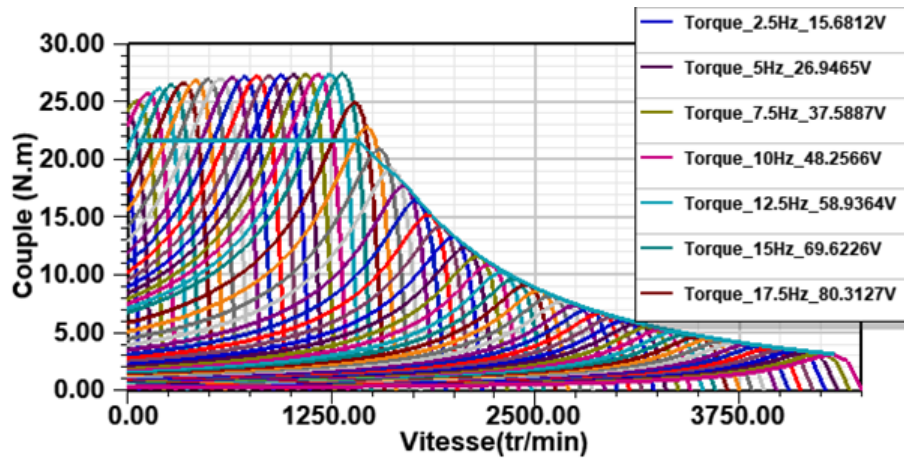


FIG. 2.5 : Famille de courbes couple en fonction de la vitesse.

$$T = \frac{P_{\text{mec}}}{2\pi \left(\frac{n}{60}\right)} \quad (2.1)$$

où :

- T : couple ($N.m$)
- $P_{\text{mec}} = 3 * I_2^2 * \frac{R_2}{g}$: puissance mécanique (W)
- n : vitesse (tours/min)
- g : glissement

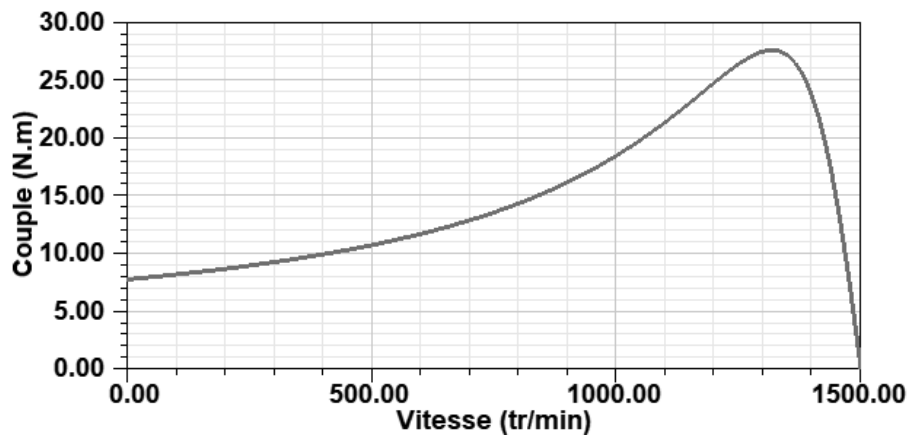


FIG. 2.6 : Couple en fonction de la vitesse a fréquence constant.

Le glissement est défini comme la différence entre la vitesse synchrone du champ magnétique rotatif du stator et la vitesse de rotation réelle du rotor, exprimée en

pourcentage de la vitesse synchrone. À mesure que le glissement augmente, le couple de la machine asynchrone augmente également, jusqu'à atteindre un point où le couple maximal, appelé couple de démarrage, est produit. Ce point correspond généralement à un glissement d'environ 8 à 9%.

Après le démarrage, le couple diminue avec l'augmentation du glissement, et la courbe de couple versus glissement devient généralement plus plate.

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (2.2)$$

où :

- s : glissement
- n_s : vitesse synchrone (tours/min)
- n : vitesse (tours/min)

Le couple en fonction du glissement :

$$T = \frac{3 \cdot V^2 \cdot \frac{R_2}{s}}{\omega_s \cdot \left[\left(R_1 + \frac{R_2}{s} \right)^2 + (X_1 + X_2)^2 \right]} \quad (2.3)$$

où :

- V : tension (V)
- R_1 : résistance du stator (Ω)
- R_2 : résistance du rotor (Ω)
- X_1 : réactance du stator (Ω)
- X_2 : réactance du rotor (Ω)
- ω_s : vitesse angulaire synchrone en rad/s (convertie de tours/min par $\omega_s = \frac{2\pi n_s}{60}$)

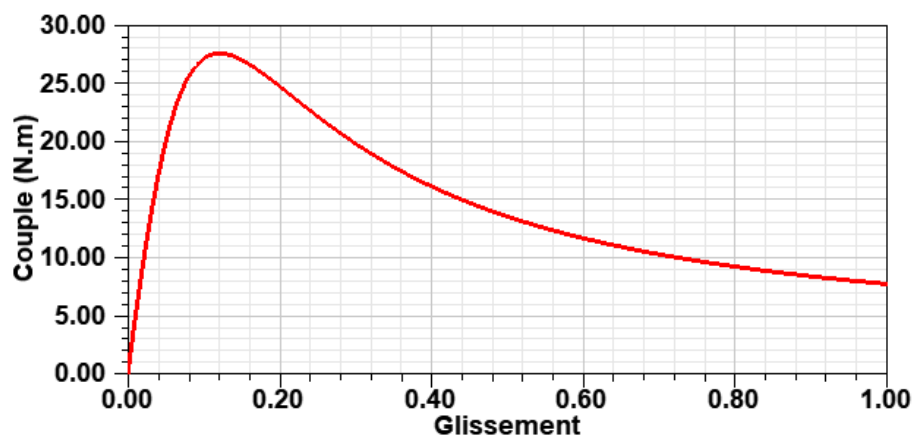


FIG. 2.7 : Couple en fonction du glissement

• Rendement

Le rendement d'une machine électrique augmente généralement avec la vitesse de fonctionnement, jusqu'à un certain point. À des vitesses plus basses, les pertes mécaniques, magnétiques et électriques internes peuvent être relativement plus élevées par rapport à la puissance de sortie, entraînant une efficacité réduite. Cependant, à mesure que la vitesse augmente, ces pertes internes deviennent proportionnellement moins importantes par rapport à la puissance de sortie, ce qui entraîne une amélioration du rendement.

$$\eta = \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}} \tag{2.4}$$

où :

- η : rendement
- P_{out} : puissance de sortie (W)
- P_{in} : puissance d'entrée (W)

$$\eta = \frac{T \cdot \left(\frac{2\pi n}{60}\right)}{P_{\text{in}}} \tag{2.5}$$

où :

- T : couple (Nm)
- n : vitesse (tours/min)
- P_{in} : puissance d'entrée (W)

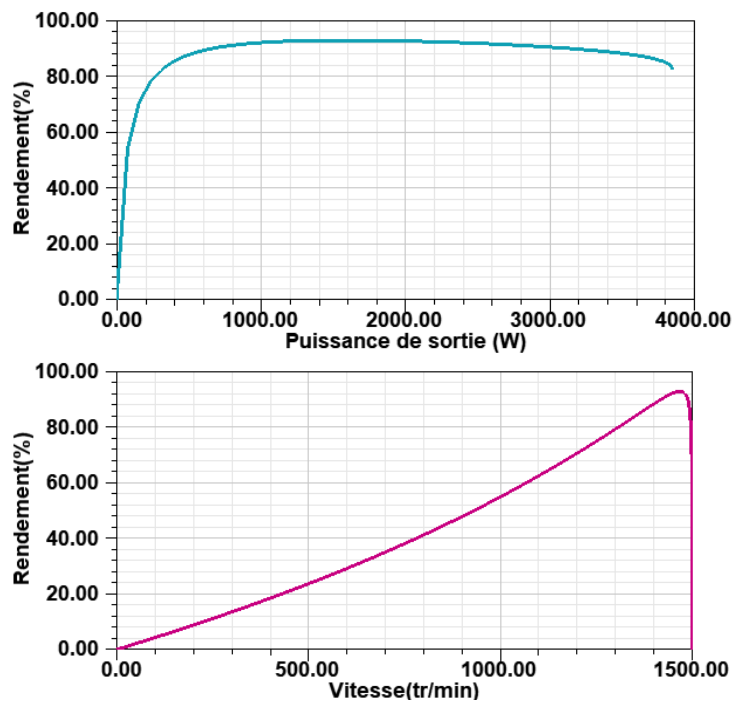


FIG. 2.8 : Rendement en fonction de la vitesse et de la puissance

• Facteur de puissance

Description du graphe

Le graphe de la figure 2.9 montre l'évolution du facteur de puissance du moteur en fonction de sa vitesse de rotation. Le facteur de puissance est une grandeur sans dimension qui représente le rapport entre la puissance active (puissance réellement consommée par le moteur) et la puissance apparente (puissance totale fournie par le réseau électrique). Un facteur de puissance élevé indique que le moteur est efficace et qu'il consomme peu de puissance réactive (puissance nécessaire pour créer le champ magnétique du moteur).

Le facteur de puissance augmente avec la vitesse de rotation du moteur. Cela signifie que le moteur est plus efficace à haute vitesse qu'à basse vitesse. Plusieurs explications peuvent être avancées pour ce phénomène :

Réduction des pertes par frottement : À basse vitesse, les pertes par frottement dans le moteur sont plus importantes. Ces pertes entraînent une consommation de puissance réactive, ce qui diminue le facteur de puissance. À haute vitesse, les pertes par frottement sont moins importantes, ce qui permet d'améliorer le facteur de puissance. Meilleure induction du champ magnétique : À haute vitesse, le champ magnétique du moteur est mieux induit, ce qui réduit la consommation de puissance réactive et améliore le facteur de puissance.

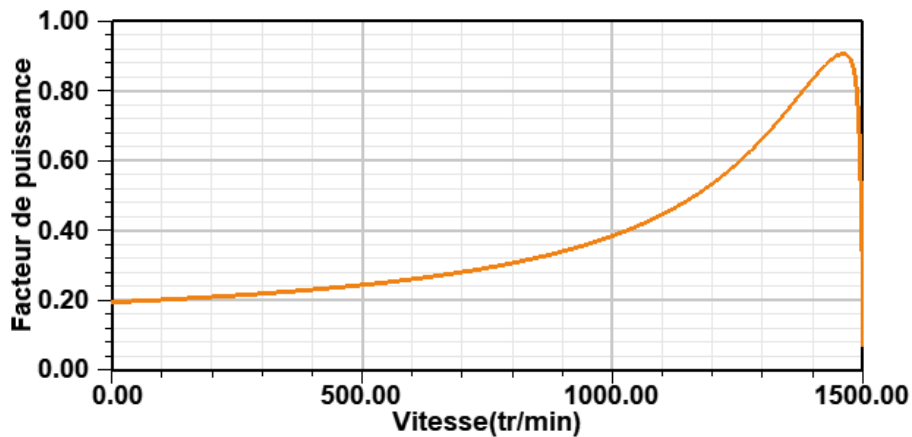


FIG. 2.9 : Facteur de puissance en fonction de la vitesse

$$PF = \frac{P_{out}}{U \cdot I \cdot \sqrt{3}} = \frac{P_{in}}{m * U_1 * I_1} \quad (2.6)$$

où :

- PF : facteur de puissance
- P_{out} : puissance de sortie (W)
- U : tension composée (V)
- I : courant de ligne (A)
- m : facteur de transformation

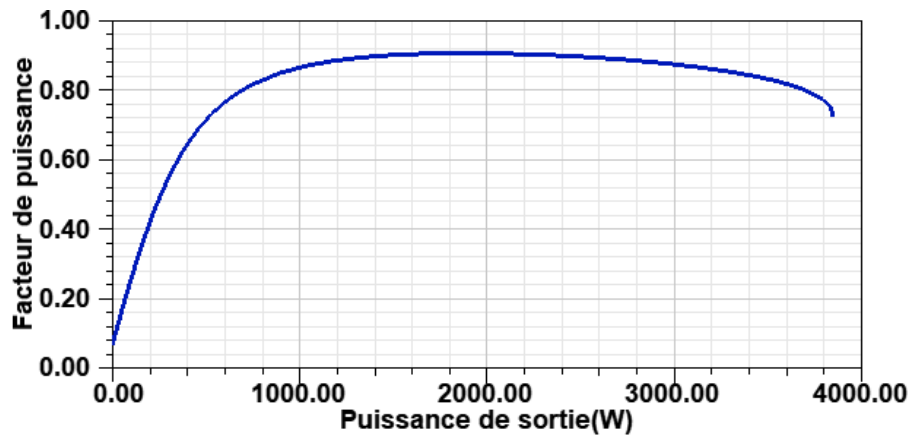


FIG. 2.10 : Facteur de puissance en fonction de la puissance de sortie.

• **Puissance**

Dans une machine asynchrone, la relation entre la puissance et la vitesse de rotation peut suivre une progression caractéristique. Initialement, à des vitesses de rotation basses, la puissance de sortie du moteur est généralement faible en raison de la faible vitesse de rotation de l'arbre moteur. Cependant, à mesure que la vitesse de rotation augmente, la puissance de sortie augmente également de manière linéaire, en raison de l'augmentation du travail réalisé par le moteur par unité de temps[11].

La puissance de sortie (P_{out}) d'une machine en fonction du couple (T) et de la vitesse de rotation (n) peut être exprimée par la formule suivante :

$$P_{out} = T \cdot \left(\frac{2\pi n}{60} \right) \tag{2.7}$$

où :

- P_{out} : puissance de sortie en watts (W),
- T : couple en newton-mètres (Nm),
- n : vitesse de rotation en tours par minute (tours/min).

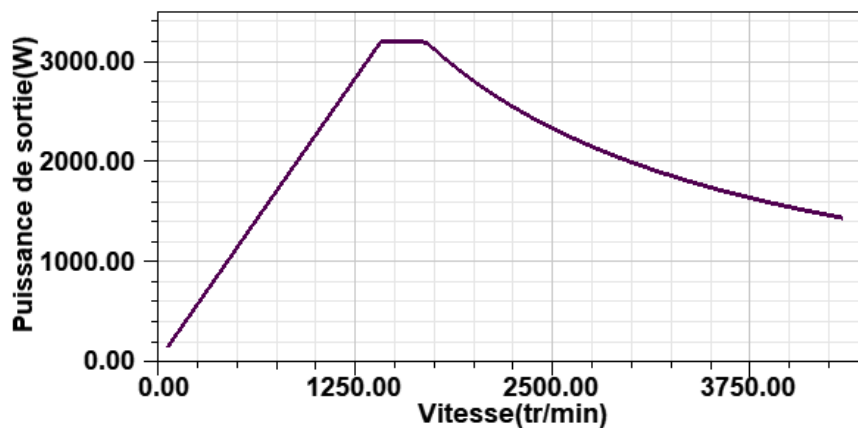


FIG. 2.11 : Puissance en fonction de la vitesse de rotation.

- **Courant de phase**

Dans une machine asynchrone, le courant de phase en fonction de la vitesse de rotation peut suivre un schéma caractéristique Comme le montre la figure 2.12. Initialement, à des vitesses de rotation basses, le courant de phase peut être relativement élevé en raison du besoin de surmonter la résistance initiale de la charge et de produire un couple de démarrage suffisant. À mesure que la vitesse de rotation augmente, le courant de phase peut diminuer progressivement, car le moteur atteint son régime nominal et fonctionne plus efficacement.

$$I = \frac{T \cdot \left(\frac{2\pi n}{60}\right)}{V \cdot PF \cdot \sqrt{3}} \quad (2.8)$$

où :

- I : courant de phase (A)
- T : couple (Nm)
- n : vitesse (tours/min)
- V : tension de ligne (V)
- PF : facteur de puissance

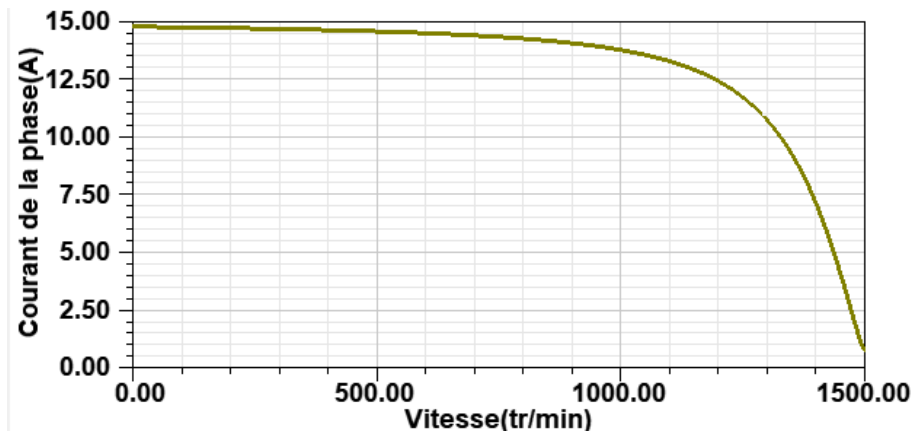


FIG. 2.12 : Courant de phase en fonction de la puissance

Initialement, à des niveaux de puissance faibles, le courant de phase peut être relativement bas, car le moteur ne fournit pas beaucoup de puissance à la charge. Cependant, à mesure que la puissance électrique augmente, le courant de phase nécessaire pour alimenter la charge augmente également[11].

$$I = \frac{P_{out}}{V \cdot PF \cdot \sqrt{3}} \quad (2.9)$$

où :

- I : courant de phase (A)
- P_{out} : puissance de sortie (W)

- V : tension de ligne (V)
- PF : facteur de puissance

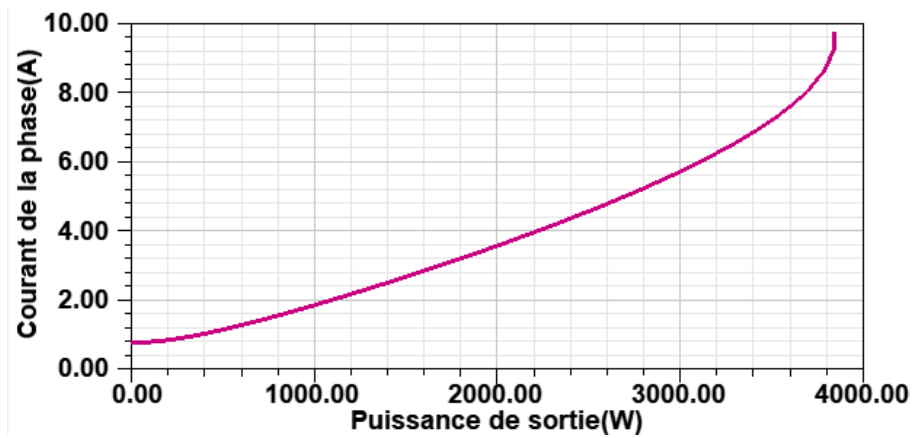


FIG. 2.13 : Courant de phase en fonction de la vitesse

- Tension de la phase A

Dans un moteur asynchrone triphasé, le moteur démarre à partir de zéro vitesse. À mesure qu'il augmente jusqu'à sa vitesse de nominale, ici la vitesse de nominale est de 1423.49 tr/min, la tension augmente avec l'augmentation de la vitesse jusqu'à sa valeur nominale, tandis que le flux reste constant. Au-delà de la vitesse de nominale, la tension reste constante et le flux est affaibli. Cela résulte en une puissance de sortie constante. Comme le montre la figure 2.14.

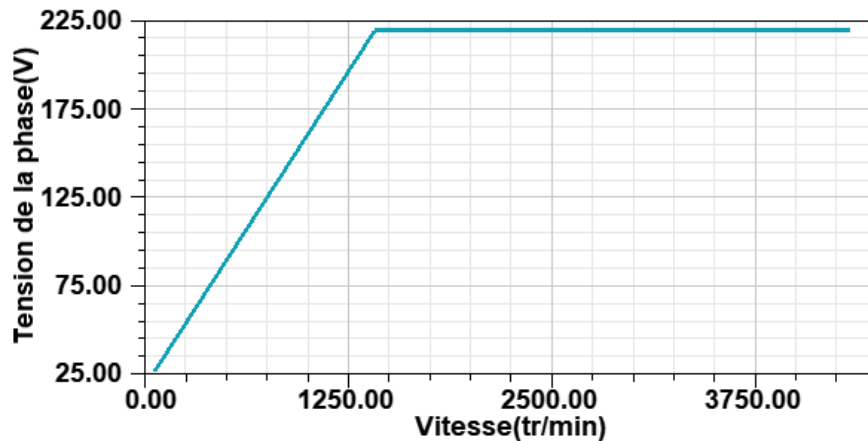


FIG. 2.14 : Tension de phase en fonction de la vitesse

Formule de tension de la phase

La figure 2.14 montre la relation entre la vitesse de rotation (tr/min) et la tension par phase (en volts, V). On observe une augmentation linéaire de la tension avec la vitesse jusqu'à une certaine valeur, puis la tension reste constante malgré une augmentation de

la vitesse. La tension par phase E dans une machine synchrone à aimants permanents peut être exprimée par la formule suivante :

$$E = K_e \cdot \omega \quad (2.10)$$

où :

- E est la tension par phase en volts (V).
- K_e est la constante de tension (ou constante d'induction) de la machine en volts par radian par seconde (V/(rad/s)).
- $\omega = \frac{2\pi n}{60}$ est la vitesse angulaire en radians par seconde (rad/s).

$$E = \begin{cases} K_e \cdot \frac{2\pi n}{60} & \text{si } n \leq n_{\text{sat}} \\ E_{\text{sat}} & \text{si } n > n_{\text{sat}} \end{cases} \quad (2.11)$$

où :

- n_{sat} est la vitesse de saturation en tr/min.
- E_{sat} est la tension de saturation en volts.

2.5 Simulation en magnétodynamique de la MAS

En utilisant les solveurs de champs électromagnétiques avancés de Maxwell et en les reliant à la simulation des systèmes, nous pouvons comprendre les performances des systèmes électromécaniques bien avant de construire un prototype matériel. Le maillage du moteur conçu dans Rmxprt est réalisé dans Ansys Maxwell 2D. L'analyse par éléments finis du moteur asynchrone triphasé est également effectuée dans Ansys Maxwell 2D.

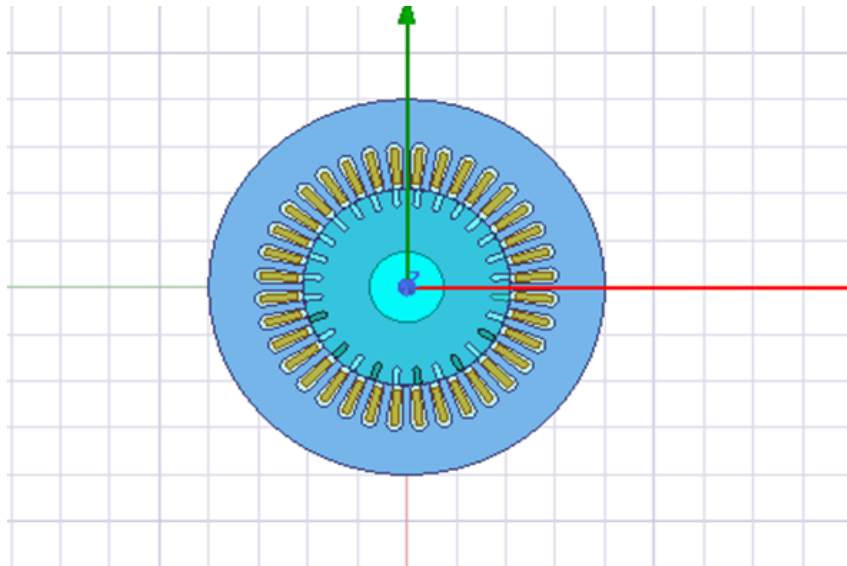


FIG. 2.15 : Géométrie en 2D de la MAS dans Maxwell

2.5.1 Courant dans le stator

La forme d'onde du courant indique qu'un courant extrêmement important est produit lors du démarrage initial. Cela est dû au fait que la tension inverse au démarrage initial est faible et que presque toute la tension d'alimentation est appliquée aux bobines du stator. À l'état stable, le courant alternatif triphasé a une amplitude de moins de 12 A. Nous pouvons observer que le champ magnétique tournant est établi dans l'enroulement du stator.

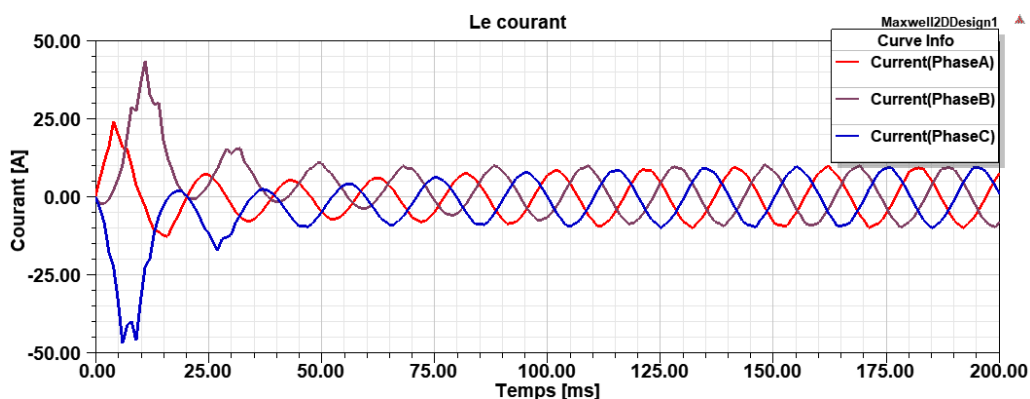


FIG. 2.16 : Courant dans le stator en fonction du temps

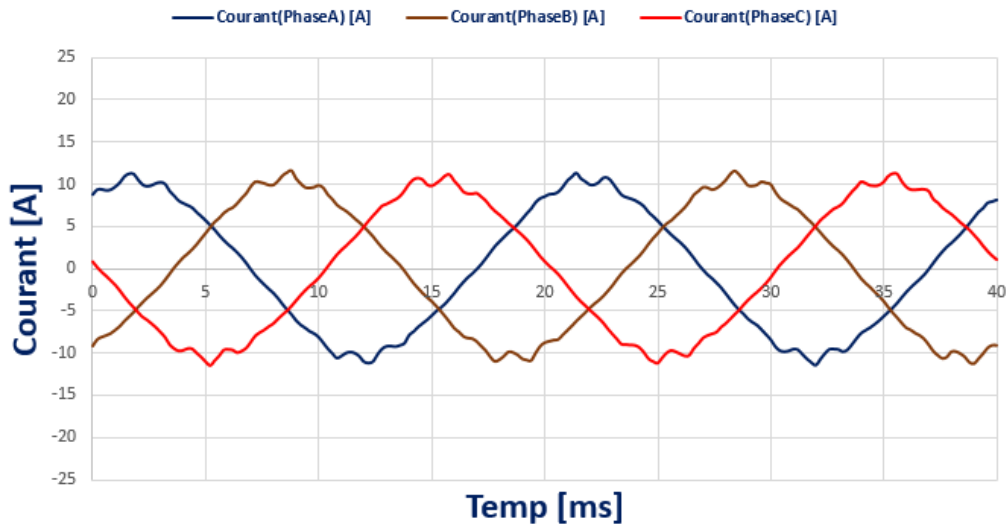


FIG. 2.17 : Régime permanents du courant stator

2.5.2 Couple

Le couple de rappel (Cogging torque) des moteurs asynchrones désigne le fait que le couple de sortie du moteur varie régulièrement en raison de l'interaction entre les dents du rotor et du stator. Il est possible que ces variations de couple se produisent même sans alimentation du moteur, ce qui entraîne une rotation inégale à basse vitesse. Les performances du moteur, son efficacité et les niveaux de bruit peuvent être considérablement influencés par le couple de rappel, surtout dans les applications qui requièrent un contrôle précis. Il est important de saisir et réduire le nombre de rappels afin d'améliorer la conception et le fonctionnement du moteur. En général, le diagramme du couple met en évidence ces variations périodiques, offrant ainsi des renseignements précieux sur le fonctionnement du moteur dans différentes conditions de fonctionnement.

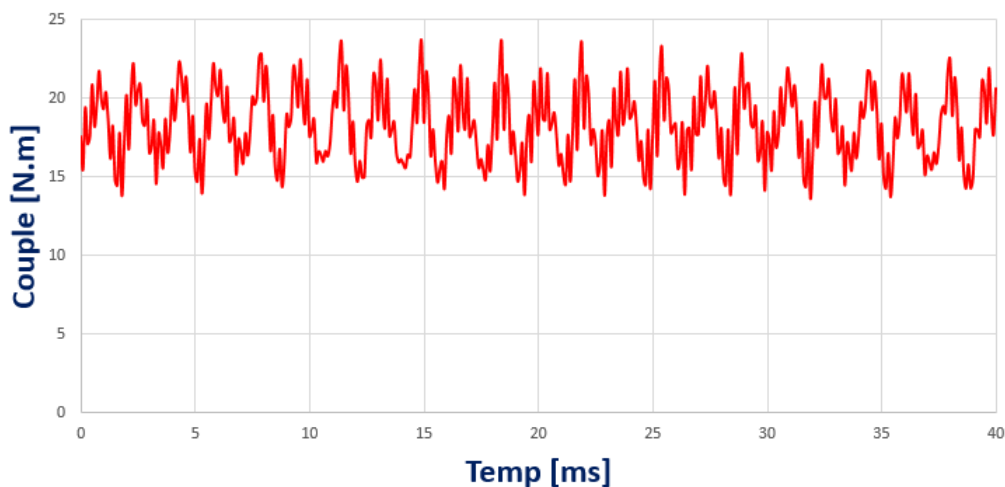


FIG. 2.18 : Couple électromagnétique en fonctionnement nominal

2.6 Conclusion

La modélisation de la machine asynchrone à l'aide du logiciel Ansys a permis d'obtenir une représentation détaillée et précise de sa géométrie, ainsi que des distributions de champ électromagnétique à l'intérieur de la machine. Les dimensions, les matériaux et les propriétés électromagnétiques des composants ont été pris en compte de manière appropriée dans le modèle, garantissant ainsi des résultats fiables et cohérents.

Dans cette étude, nous avons analysé un moteur asynchrone triphasé en utilisant les logiciels ANSYS Maxwell 2D et RMXprt. La conception et l'analyse du moteur asynchrone ont été réalisées, mettant en évidence l'évolution technologique qui rend les outils de la méthode des éléments finis de plus en plus pratiques pour l'analyse des machines. Ces outils permettent de choisir adéquatement les matériaux, fournissent des informations sur la consommation de matériaux, et offrent une visualisation en 2D de la géométrie du moteur conçu, tout en permettant des ajustements précis.

Les conclusions de cette modélisation ont des implications significatives pour la conception et l'étude des performances des machines asynchrones dans divers secteurs industriels. En améliorant notre compréhension du fonctionnement électromagnétique de la machine, les ingénieurs peuvent optimiser son efficacité énergétique, sa fiabilité et sa durabilité. De plus, l'utilisation de la modélisation de la machine asynchrone avec Ansys permet de simuler des scénarios de défaillance et de mettre en œuvre des stratégies de maintenance préventive.

Pour les futures recherches, il serait intéressant d'explorer davantage les possibilités d'optimisation de la conception de la machine asynchrone en utilisant des techniques avancées d'analyse par éléments finis. Cela pourrait inclure l'exploration des nouveaux matériaux pour les composants de la machine, l'optimisation de la disposition des enroulements, et l'étude de l'impact des différentes configurations géométriques sur les performances électromagnétiques et mécaniques. De plus, des études sur la modélisation du comportement thermique de la machine pourraient également être envisagées pour une compréhension plus approfondie de son fonctionnement dans des conditions réelles d'utilisation.

Chapitre 3

Étude et simulation sur la machine synchrone à aimant permanent

3.1 Introduction

L'électromagnétisme occupe une place primordiale dans l'ingénierie électrique, et les machines synchrones à aimant permanent constituent un domaine de recherche et d'application prometteur. Leur conception innovante repose sur l'utilisation d'aimants permanents pour générer le champ magnétique nécessaire au bon fonctionnement de la machine, ce qui présente des avantages significatifs en termes de performances et d'efficacité énergétique.

L'objectif de ce chapitre est d'examiner en détail les machines synchrones à aimant permanent, en mettant l'accent sur les diverses configurations d'aimants. Ces aimants, qu'ils soient internes ou externes, ont un impact significatif sur les caractéristiques électromagnétiques et mécaniques de la machine, ainsi que sur ses performances globales dans différentes applications. Pour atteindre cet objectif, nous utiliserons le logiciel ANSYS Electronics (Maxwell 2D), un outil puissant permettant de réaliser des modélisations et des analyses électromagnétiques avancées. Ce logiciel nous permettra de simuler et d'évaluer diverses configurations d'aimants permanents dans les machines synchrones, ce qui nous fournira des informations précieuses pour comprendre leur comportement et leurs performances.

Ce chapitre vise à étudier et à comparer les différentes configurations d'aimants permanents employées dans les machines synchrones, en analysant leurs bénéfices, leurs limites et leur influence sur les performances. Nous pourrions ainsi mieux comprendre les défis de conception et d'optimisation de ces systèmes électromécaniques avancés en explorant les principes fondamentaux et les mécanismes sous-jacents à chaque configuration d'aimants. Nous examinerons en détail les progrès récents dans ce domaine, les tendances actuelles de recherche et les applications concrètes des machines synchrones à aimant permanent. De plus, nous aborderons les horizons futurs et les possibilités de croissance pour ces technologies, en soulignant leur importance capitale dans la transition vers une production et une utilisation d'énergie plus durables et performantes.

3.2 Machine synchrone

3.2.1 Objectifs de l'étude

Cette étude, réalisée avec le logiciel Ansys Electronics, vise principalement à étudier le comportement de la machine synchrone en analysant ses diverses configurations d'aimants permanents. L'objectif est d'évaluer la possibilité d'améliorer l'efficacité énergétique, les performances et la fiabilité du système en intégrant des aimants permanents dans une machine synchrone existante. Afin d'y parvenir, il est nécessaire d'effectuer une analyse approfondie du fonctionnement électromagnétique de la machine synchrone, en incluant la répartition du champ magnétique, les pertes énergétiques et les performances dans différentes conditions de fonctionnement.

Grâce aux caractéristiques avancées d'Ansys Electronics, nous serons en mesure de représenter de manière précise la machine synchrone et d'explorer les ajustements requis pour cette optimisation. Les conclusions de cette étude guideront la conception vers des solutions plus performantes et efficaces.

3.2.2 Présentation des machines étudiées

Dans cette étude, nous examinons attentivement les différentes dispositions d'aimants permanents utilisées dans les machines synchrones. Nous étudions de manière approfondie l'impact de ces diverses dispositions d'aimants sur le fonctionnement électromagnétique et les performances générales de ces machines. En examinant attentivement chaque disposition, notre objectif est de saisir les bénéfices, les contraintes et les conséquences pratiques de chaque configuration sur des aspects essentiels tels que l'efficacité énergétique, la puissance et la fiabilité.

Nous avons pour objectif de mieux appréhender ces systèmes électromécaniques complexes afin de guider leur conception, leur optimisation et leur utilisation dans divers domaines industriels et technologiques.

Paramètre	Symbole	Valeur et unité
Nombre de conducteurs par encoche	N_c	32
Nombre d'encoches statorique	Q_s	36
Nombre des aimants	N_{aimant}	4
Nombre de paires de pôles	p	2
Fréquence	f	50 Hz
Diamètre externe du stator	R_{sext}	350 mm
Diamètre interne du stator	R_{sin}	210 mm
Diamètre externe du rotor	r_{ext}	209 mm
Diamètre interne du rotor	r_{in}	75 mm
Épaisseur de l'entrefer	e	1 mm
Longueur de la machine	L_u	280 mm
L'ouverture de l'aimant	alpha	60°
L'aimantation de l'aimant	B_r	0.6

TAB. 3.1 : Paramètres de base de la machine étudiée

3.3 Prototype de réalisation d'une MSAP à partir du même circuit magnétique de la MAS

La méthodologie de conception vise à développer un prototype de machine modifiée utilisant des aimants permanents, établissant ainsi les fondations pour des stratégies d'optimisation futures. L'objectif est de concevoir une solution offrant une efficacité accrue tout en minimisant l'impact sur les moteurs déjà déployés dans l'industrie, fournissant

Chapitre 3. Étude et simulation sur la machine synchrone à aimant permanent

ainsi aux entreprises une méthode simple mais efficace pour améliorer leur efficacité énergétique sans nécessiter le remplacement de l'installation entière.

Dans ce projet, l'accent est mis sur la conception d'un rotor modifié pour un moteur asynchrone triphasé. L'idée est de modifier le rotor standard d'un moteur à induction en intégrant des aimants permanents, tout en préservant le stator et le châssis existants.

L'approche de conception est axée sur la facilité de production pour les fournisseurs de moteurs. Ainsi, la modification se limite à la conception du rotor, évitant ainsi la nécessité de reconfigurer toute la chaîne de production. Cette mise à niveau permettra aux moteurs asynchrones déjà en service dans diverses applications industrielles de passer à une technologie à aimant permanent avec un impact minime. De plus, cette amélioration de l'efficacité peut être réalisée sans augmenter la taille du moteur.

3.3.1 Détails de la conception du rotor

Dans le domaine des machines synchrones à aimant permanent, la disposition des aimants permanents dans le rotor est un aspect critique qui influe considérablement sur les performances et l'efficacité du système. Quatre types principaux de rotors sont largement utilisés, chacun présentant des caractéristiques distinctes en termes de conception, de performance et de fiabilité. Dans cette étude, nous explorerons en détail chaque disposition d'aimants permanents, à savoir l'aimant en surface, l'aimant enserré, l'aimant enterré et l'aimant en concentration de flux. Nous examinerons les avantages, les limitations et les considérations de conception associées à chaque type de rotor, fournissant ainsi un aperçu approfondi de leurs caractéristiques et de leurs applications dans les machines synchrones à aimant permanent.

3.4 Différentes topologies du rotor de la MSAP

Dans notre étude sur la possibilité de concevoir une MSAP à partir d'un même circuit magnétique qu'une machine asynchrone, nous avons utilisé une alimentation en courant sinusoïdal pour la MSAP avec un courant nominal de 12 A, comme indiqué dans figure[12].

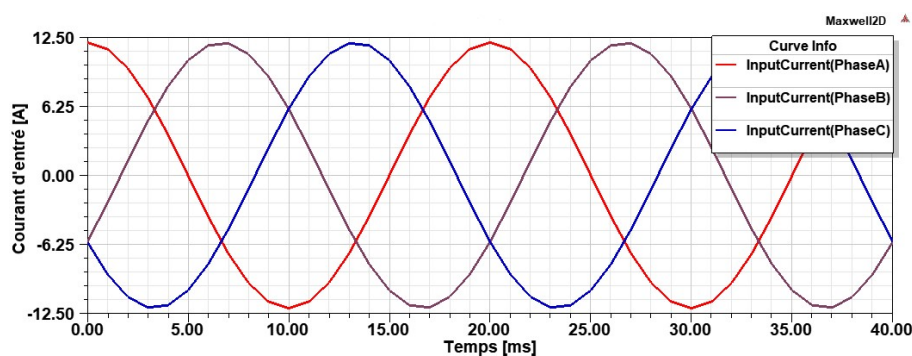


FIG. 3.1 : Courant d'alimentation de la MSAP.

Chapitre 3. Étude et simulation sur la machine synchrone à aimant permanent

Dans la réalité, il existe deux types d'alimentation pour les machines synchrones à aimant permanent : l'une utilisant un courant avec une forme d'onde sinusoïdale et l'autre avec un courant de forme carrée, c'est-à-dire un signal trapézoïdal. Ces deux types d'alimentation permettent d'obtenir respectivement une force électromotrice (FEM) de forme sinusoïdale et trapézoïdale.

Le graphique de la caractéristique magnétique $B(H)$ d'un circuit magnétique d'une machine synchrone montre comment l'induction magnétique B (en Tesla) varie en fonction du champ magnétique H (en A/m). Initialement, B augmente rapidement avec H , indiquant une forte réactivité du matériau. Ensuite, la courbe atteint une asymptote, reflétant une saturation (dans notre cas l'induction de saturation $B= 1.2$ Tesla) où B change peu malgré une augmentation de H . Cette saturation indique que le matériau a atteint sa capacité maximale de magnétisation[13] [14].

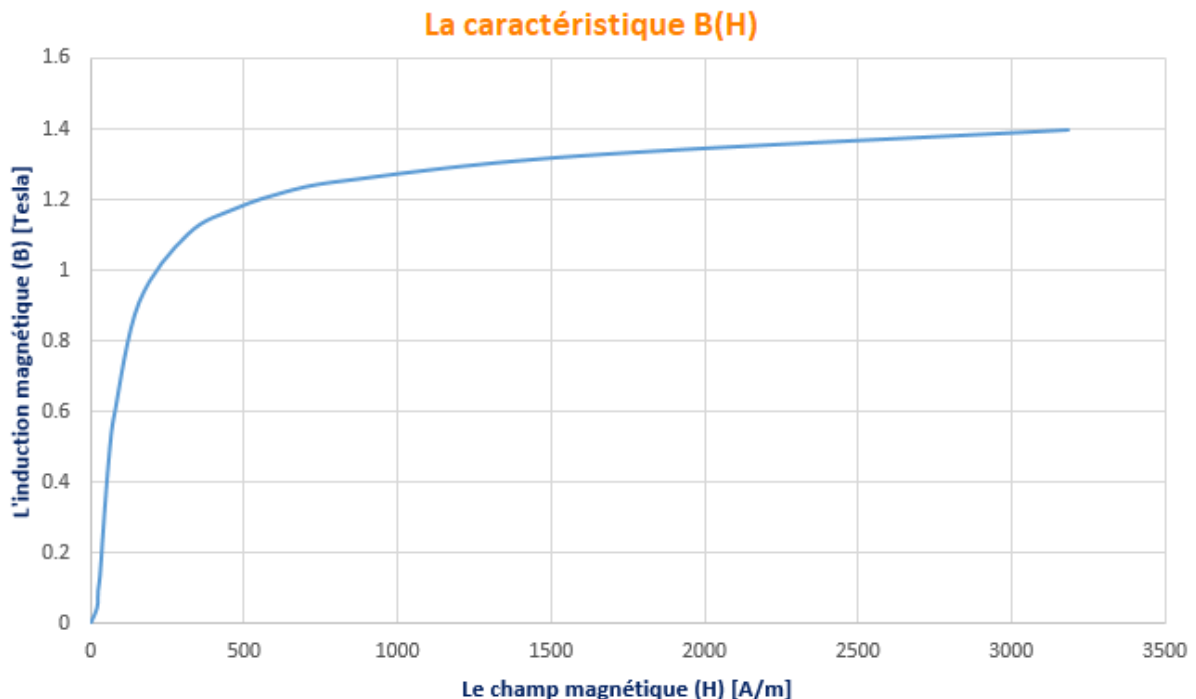


FIG. 3.2 : Caractéristique $B(H)$

3.4.1 Aimants en surface

L'aimant en surface, comme son nom l'indique, implique la fixation des aimants directement sur la surface extérieure du rotor. Cette disposition permet une excellente densité de flux magnétique, ce qui se traduit par des performances élevées.

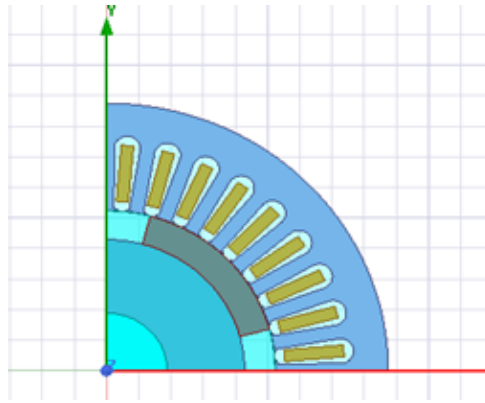


FIG. 3.3 : Géométrie de la MSAP en surface.

De plus, elle facilite la dissipation de la chaleur, contribuant ainsi à la fiabilité thermique du système. Cependant, cette configuration peut être sujette à des problèmes de rétention magnétique, nécessitant des solutions de fixation robustes pour éviter tout décollement des aimants.

a. Induction B :

La carte de densité de flux 2D d'une machine synchrone à aimants permanents (MSAP) à vide visualise la distribution des champs magnétiques à travers les différentes régions de la machine. Elle met en évidence les zones de forte concentration de flux magnétique, typiquement près des aimants permanents et des pôles, ainsi que les régions de faible densité dans les espaces inter-pôles.

Cette carte significative représente la densité de flux 2D obtenue par la méthode des éléments finis avec le logiciel *Ansys*, en condition de fonctionnement à vide.

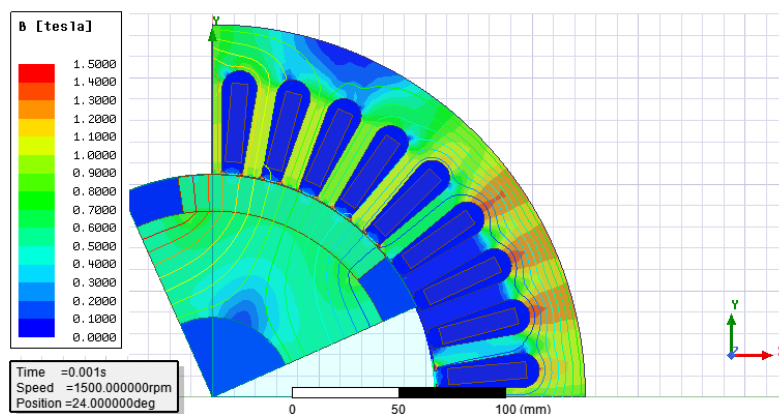


FIG. 3.4 : Carte de densité de flux 2D d'une MSAP en surface.

b. Flux :

Dans *Ansys Maxwell*, la relation entre le flux magnétique (Φ) et l'induction magnétique (B) est étudiée en résolvant les équations de Maxwell pour déterminer la distribution des champs électromagnétiques dans la machine.

Dans Ansys Maxwell, le domaine de solution est divisé en éléments finis, où les équations de Maxwell sont résolues numériquement pour obtenir la distribution des champs.

Induction Magnétique (B) et Flux Magnétique (Φ) dans Ansys Maxwell

L'analyse des champs électromagnétiques dans les machines électriques, telle que les machines synchrones à aimants permanents, repose sur la compréhension de la distribution du flux magnétique (Φ) et de l'induction magnétique (B). Dans Ansys Maxwell, ces quantités sont calculées et visualisées pour évaluer la performance et optimiser la conception des machines électriques.

Induction Magnétique (B)

Calcul de B Dans Ansys Maxwell, l'induction magnétique (B) est calculée à chaque point du domaine de solution en tenant compte de la distribution des courants électriques et des propriétés des matériaux dans la machine [16].

Équations de Base : B est lié au champ magnétique H par la relation :

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (3.1)$$

où :

- \mathbf{B} est l'induction magnétique en Tesla (T).
- μ est la perméabilité magnétique du matériau ($\mu = \mu_0 \cdot \mu_r$), où μ_0 est la perméabilité du vide ($4\pi 10^{-7}$ H/m) et μ_r est la perméabilité relative du matériau.
- \mathbf{H} est le champ magnétique en A/m.

Méthode de Calcul :

- Ansys Maxwell résout les équations de Maxwell pour les champs électromagnétiques à l'aide de la méthode des éléments finis (FEM).
- Pour chaque point du domaine, Ansys calcule \mathbf{H} en fonction des courants électriques dans les enroulements et des propriétés des matériaux.
- En multipliant \mathbf{H} par la perméabilité μ , Ansys obtient \mathbf{B} pour chaque point.

Flux Magnétique (Φ)

Calcul de Φ Le flux magnétique Φ est calculé en intégrant l'induction magnétique B sur une surface définie S .

Formule de Base : Le flux magnétique Φ est donné par :

$$\Phi = \int_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A} \quad (3.2)$$

où :

- Φ est le flux magnétique en Weber (Wb).
- S est la surface à travers laquelle le flux est calculé.
- $d\mathbf{A}$ est un élément de surface vectoriel (sa magnitude est la surface de l'élément, et sa direction est perpendiculaire à la surface).

Ces courbe de flux présenté ici a été réalisé à l'aide du logiciel *Ansys*, en utilisant la méthode des éléments finis,

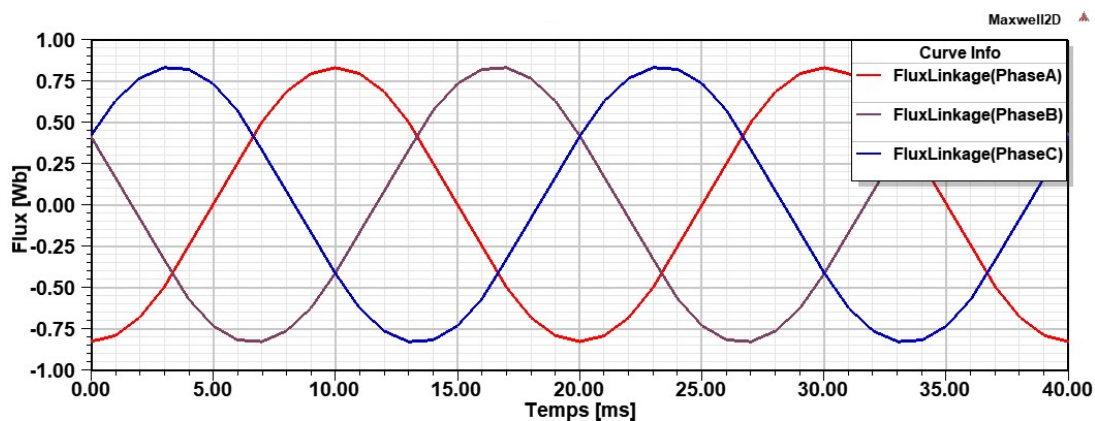


FIG. 3.5 : Évolution temporelle du flux dans une MSAP en surface.

c. Tension d'induit (FEM à vide) :

Ces tensions s'établissent à vide, il s'agit donc d'une force électromotrice à vide .Ce calcul a été effectué en utilisant la méthode des éléments finis avec le logiciel *Ansys Maxwell*, la FEM est calculée à partir du flux magnétiques (Φ).

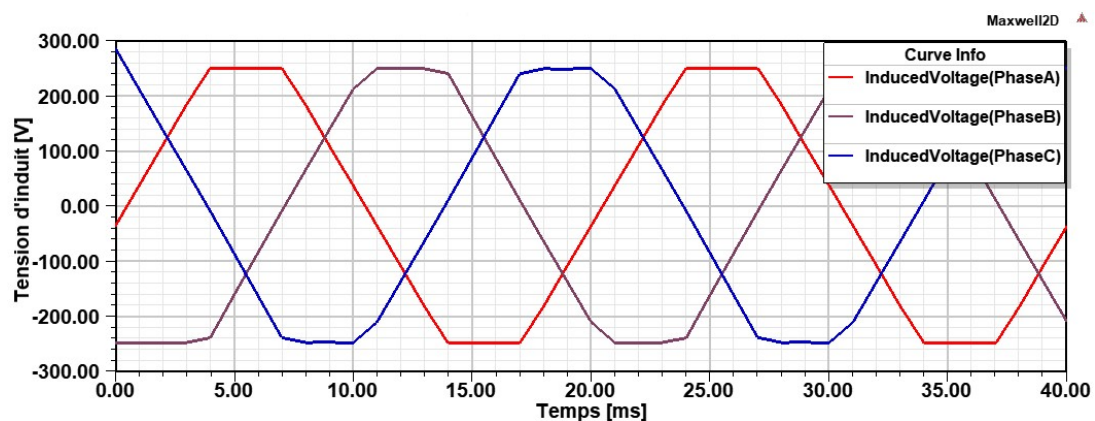


FIG. 3.6 : Évolution temporelle de la tension d'induit dans une MSAP en surface.

d. Couple

Le couple de détente, également appelé couple de réluctance ou "cogging torque" en anglais, est un couple non désiré qui se manifeste dans les machines électriques à aimants permanents, notamment dans les machines synchrones à aimants permanents. Ce couple résulte des variations périodiques de la réluctance magnétique du chemin du flux, causées par l'interaction entre les aimants permanents du rotor et les encoches du stator, c'est à dire le couple de détente provient de l'interaction entre les champs magnétiques des aimants permanents du rotor et la structure dentée du stator.

Il s'agit du couple à vide, c'est-à-dire du couple de détente, dont les résultats ont été obtenus à l'aide du logiciel *Ansys*.

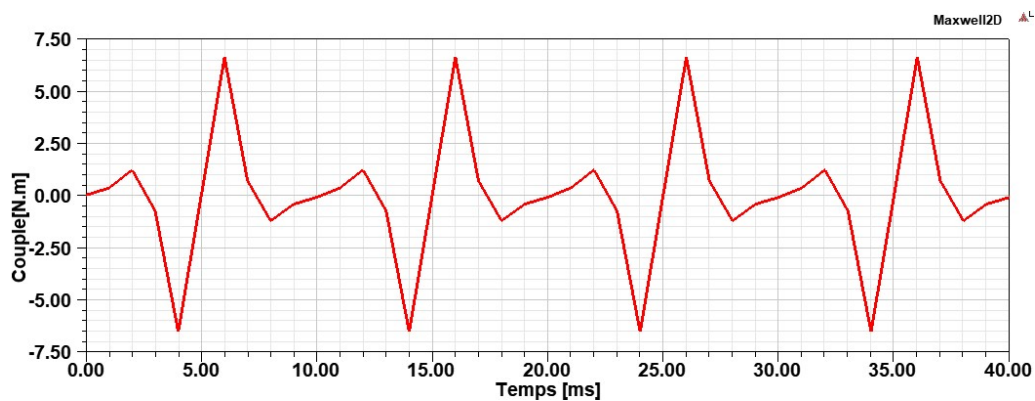


FIG. 3.7 : Couple de la MSAP en surface à vide (couple de détente).

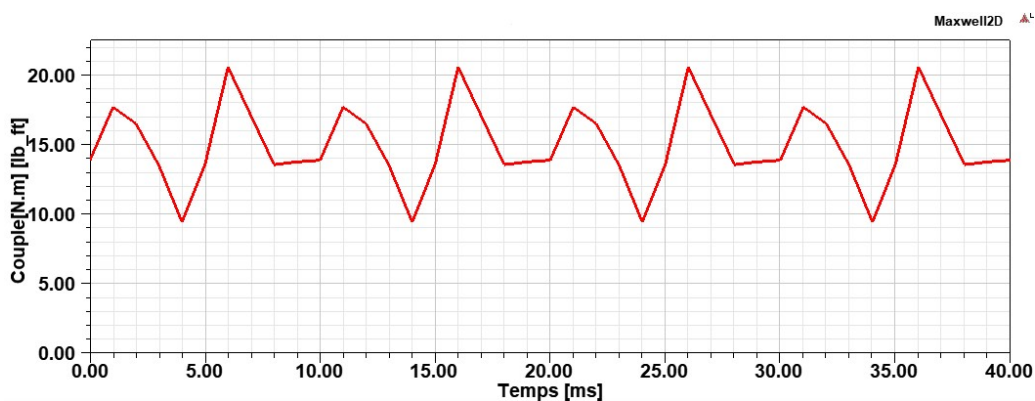


FIG. 3.8 : Couple de la MSAP en surface en charge .

e. Densité de flux de l'entrefer

La densité de flux dans l'entrefer, mesurée en Tesla, est une mesure de l'induction magnétique totale présente dans cette région critique de la machine. Cette densité de flux est calculée en tenant compte des deux composantes principales du champ magnétique : la composante radiale (B_{radial}) et la composante tangentielle ($B_{\text{tangentielle}}$). Pour déterminer l'induction totale, on utilise la relation suivante :

$$B_{\text{total}} = \sqrt{B_{\text{radial}}^2 + B_{\text{tangentielle}}^2}$$

Chapitre 3. Étude et simulation sur la machine synchrone à aimant permanent

Cela signifie que la densité de flux totale dans l'entrefer est obtenue en prenant la racine carrée de la somme des carrés de B_{radial} et $B_{\text{tangentielle}}$. Ce calcul permet de saisir la contribution combinée des deux composantes du champ magnétique, donnant ainsi une mesure précise de l'intensité du flux magnétique traversant l'entrefer.

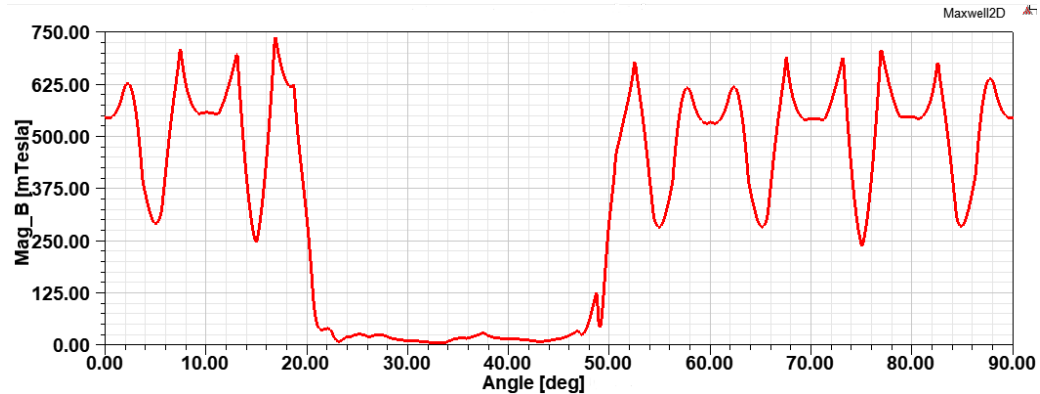


FIG. 3.9 : Densité de flux de l'entrefer dans une MSAP en surface.

3.4.2 Aimants insérés

L'aimant inséré consiste à placer les aimants à l'intérieur des encoches spécialement conçues dans le rotor. Cette disposition offre une meilleure protection mécanique aux aimants tout en maintenant une distribution plus uniforme du champ magnétique.

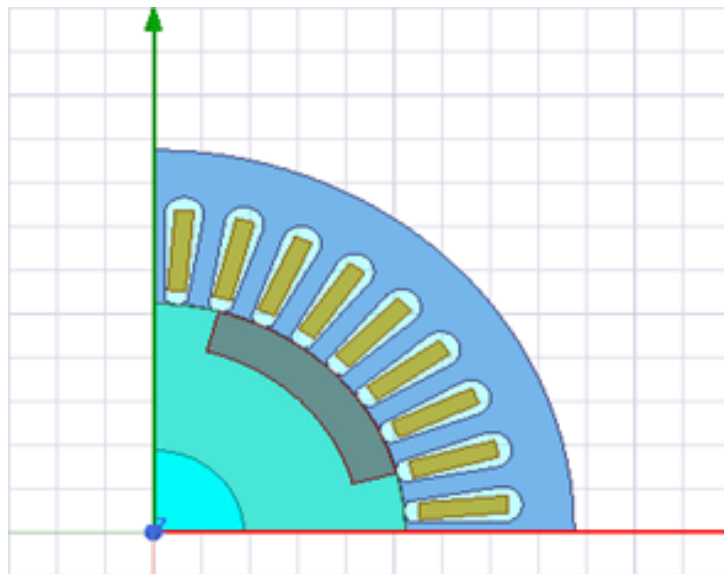


FIG. 3.10 : Géométrie de la MSAP inséré.

Cependant, l'insertion des aimants dans les encoches peut entraîner des contraintes mécaniques importantes, nécessitant une conception minutieuse du rotor pour éviter les dommages. Malgré ces défis, cette configuration est largement utilisée dans les applications nécessitant à la fois des performances élevées et une robustesse mécanique.

a. Induction B :

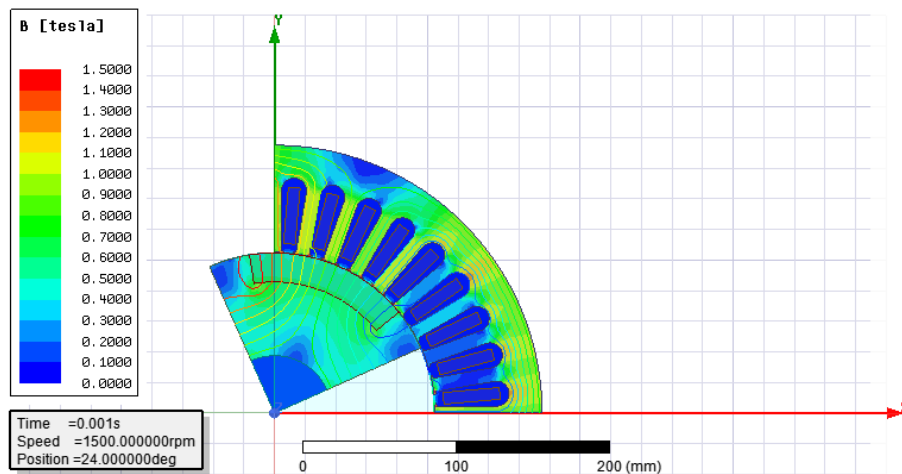


FIG. 3.11 : Carte de densité de flux 2D d'une MSAP inséré.

b. Flux :

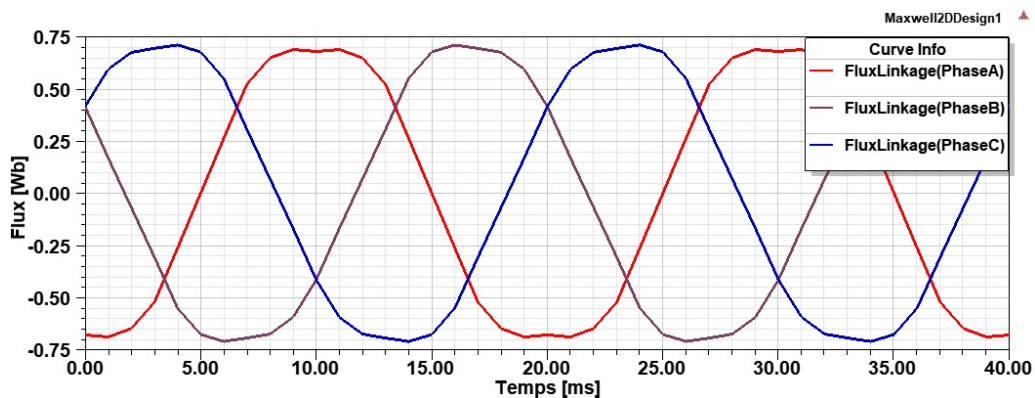


FIG. 3.12 : Évolution temporelle du flux dans une MSAP inséré.

c. Tension d'induit (FEM à vide) :

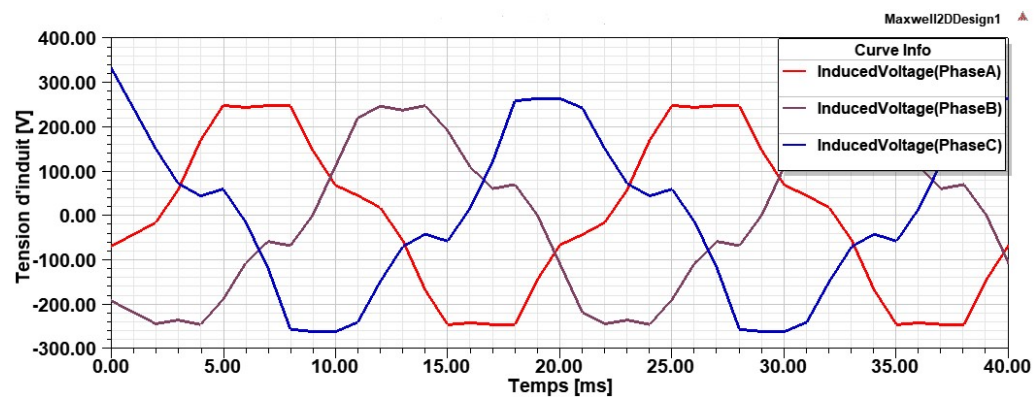


FIG. 3.13 : Évolution temporelle de la tension d'induit dans une MSAP inséré

d. Couple

L'effet dentaire est la principale cause de l'effet de cogging. Il est dû à la structure géométrique des aimants permanents du rotor et des encoches du stator. Lorsque les aimants permanents du rotor s'alignent avec les encoches du stator, le couple produit diminue. À l'inverse, lorsque les aimants permanents du rotor se trouvent entre les encoches du stator, le couple produit augmente.

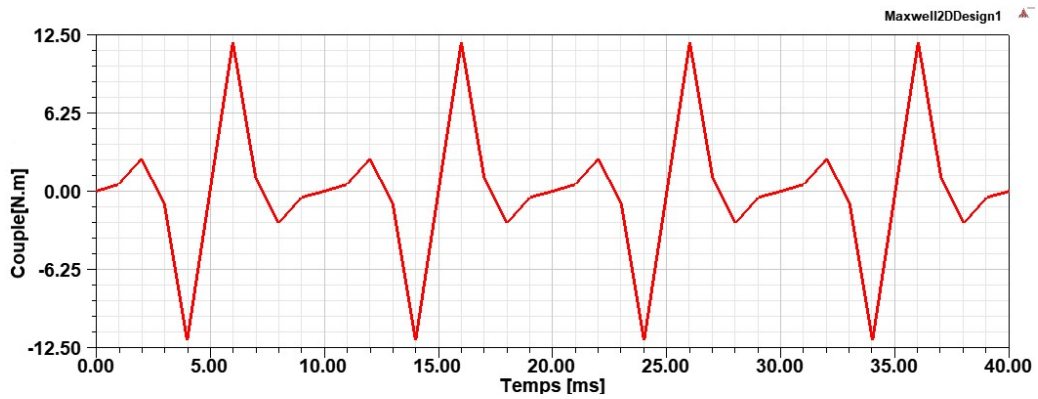


FIG. 3.14 : Couple de la MSAP inséré à vide (couple de détente).

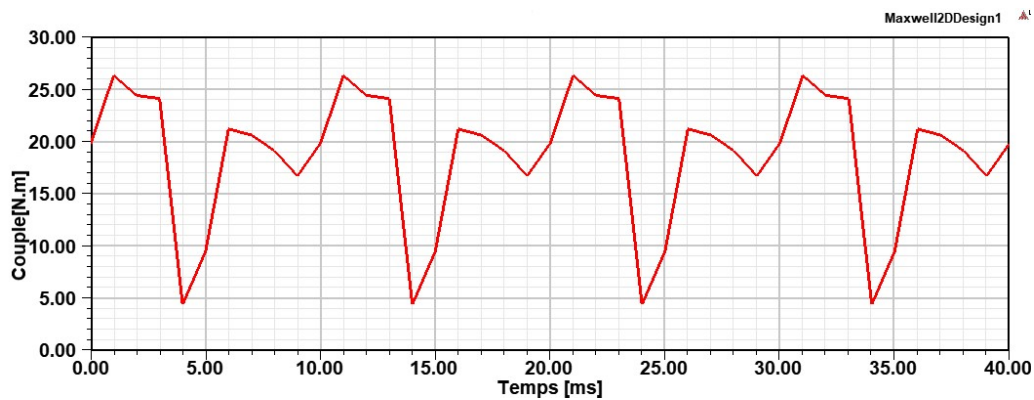


FIG. 3.15 : Couple de la MSAP inséré en charge .

e. Densité de flux de l'entrefer

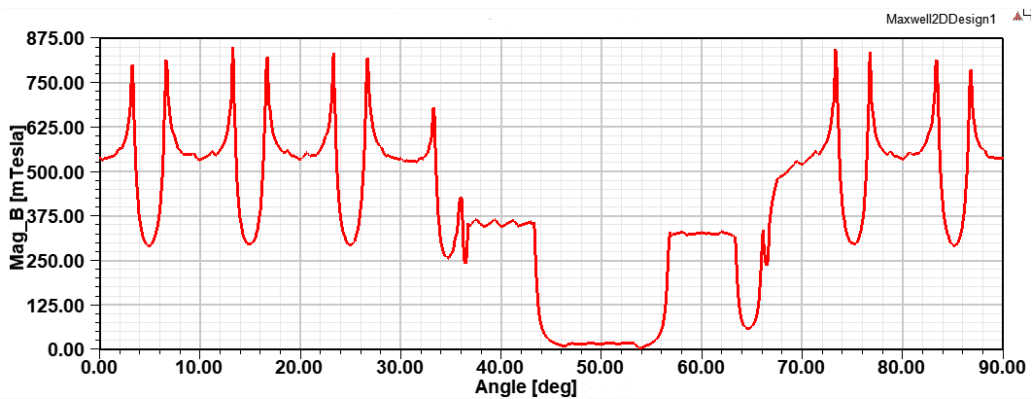


FIG. 3.16 : Densité de flux de l'entrefer dans une MSAP insérée.

3.4.3 Aimants enterrés

Dans l'aimant enterré, les aimants sont insérés dans des rainures sous la surface du rotor. Cette disposition offre une meilleure protection mécanique aux aimants tout en assurant une distribution plus uniforme du champ magnétique. Cependant, la fabrication de cette configuration peut être plus complexe en raison de la nécessité de créer des rainures précises dans le rotor.

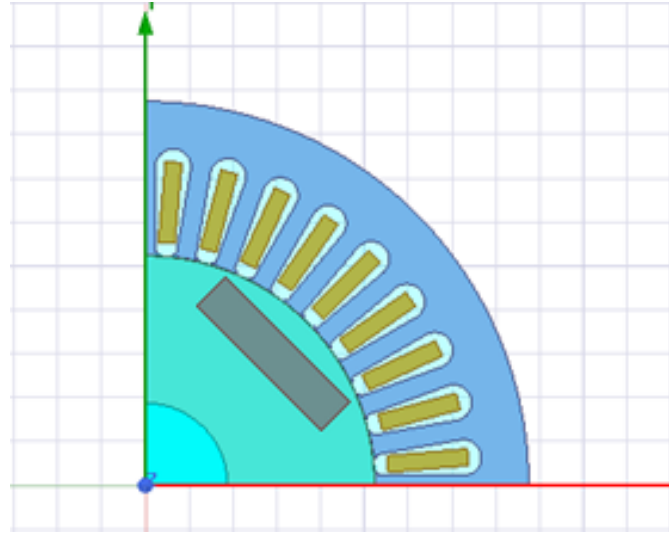


FIG. 3.17 : Géométrie de la MSAP enterré.

a. Induction B :

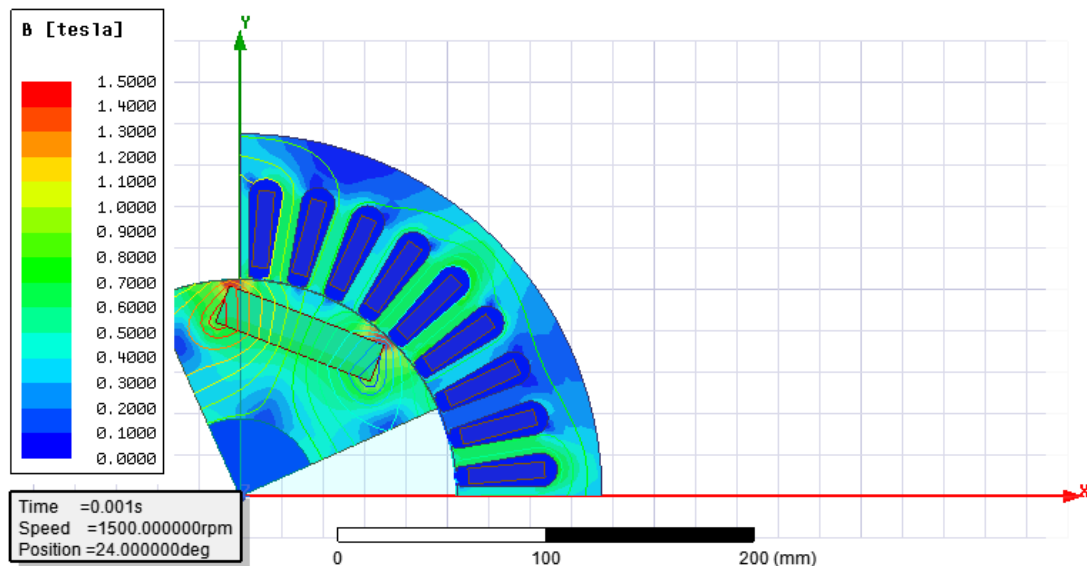


FIG. 3.18 : Carte de densité de flux 2D d'une MSAP enterré.

b. Flux :

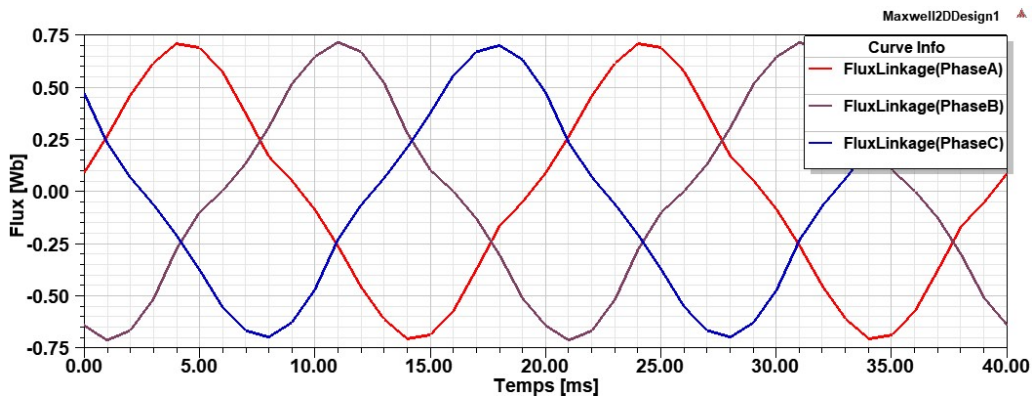


FIG. 3.19 : Évolution temporelle du flux dans une MSAP enterré.

c. Tension d'induit (FEM à vide) :

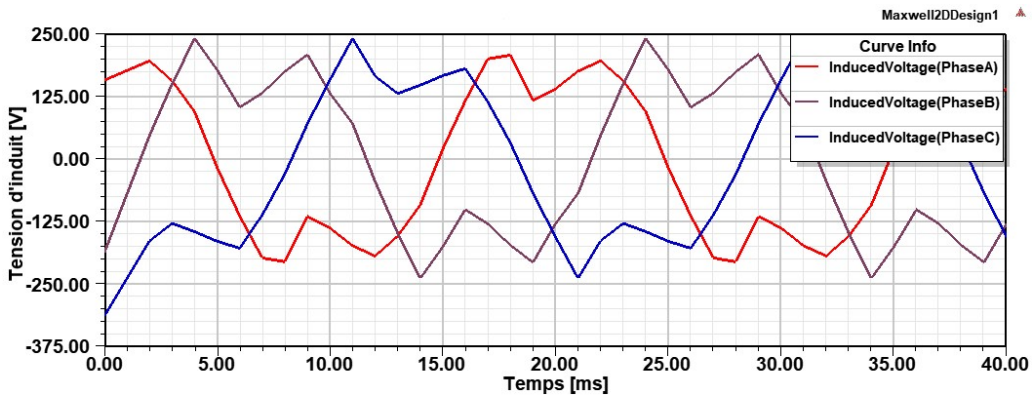


FIG. 3.20 : Évolution temporelle de la tension d'induit dans une MSAP enterré.

d. Couple

Les encoches du stator créent des variations périodiques de la réluctance, ce qui entraîne une attraction ou répulsion périodique du rotor, générant ainsi un couple variable.

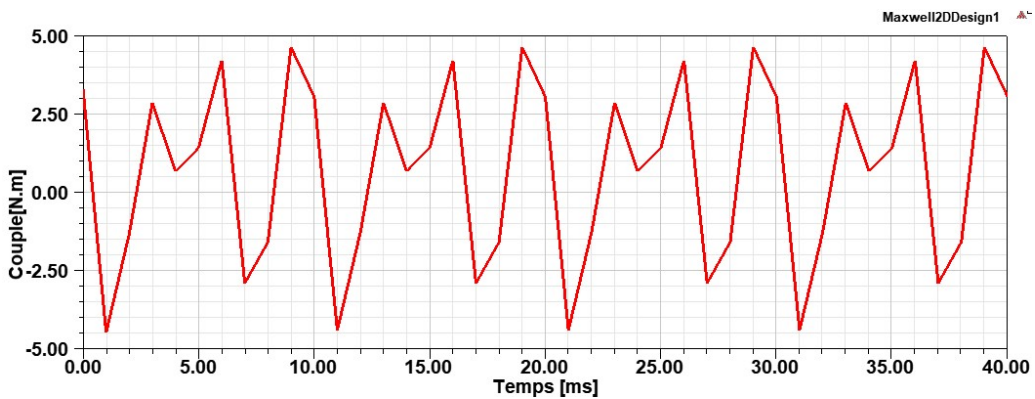


FIG. 3.21 : Couple de la MSAP enterré à vide (couple de détente).

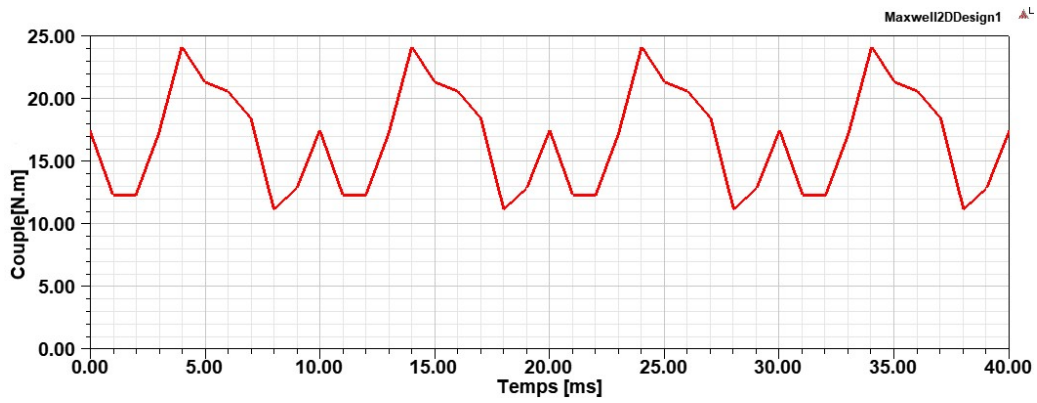


FIG. 3.22 : Couple de la MSAP enterrée en charge .

e. Densité de flux de l'entrefer

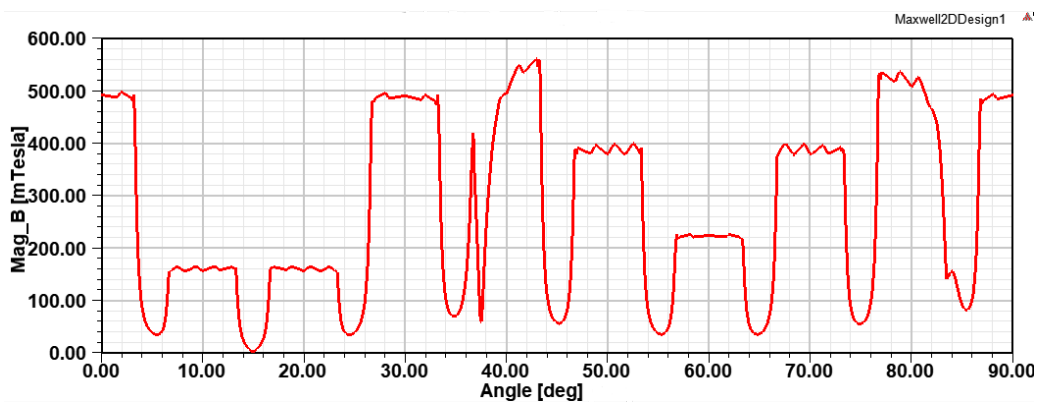


FIG. 3.23 : Densité de flux de l'entrefer dans une MSAP enterrée.

3.4.4 Aimants en concentration de flux

L'aimant en concentration de flux consiste à concentrer les aimants dans des zones spécifiques du rotor pour maximiser la densité de flux magnétique. Cette configuration offre une haute efficacité en termes de conversion d'énergie, mais nécessite une conception et une fabrication précises pour assurer un alignement optimal des aimants.

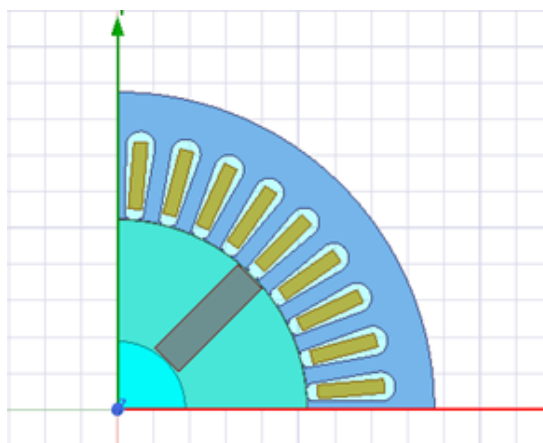


FIG. 3.24 : Géométrie de la MSAP en concentration du flux.

a. Induction B :

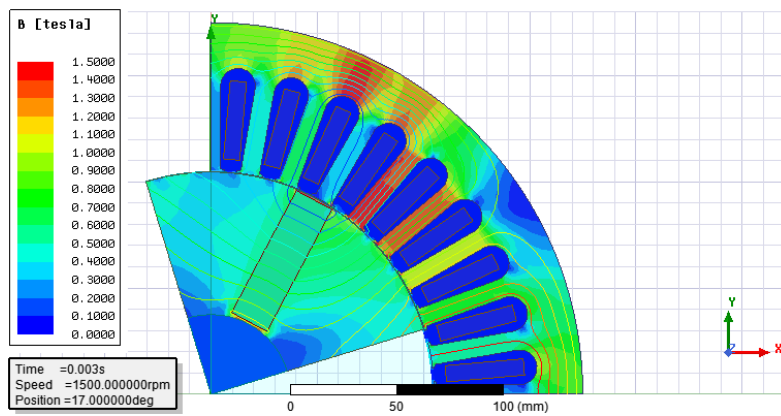


FIG. 3.25 : Carte de densité de flux 2D d'une MSAP en concentration de flux.

b. Flux :

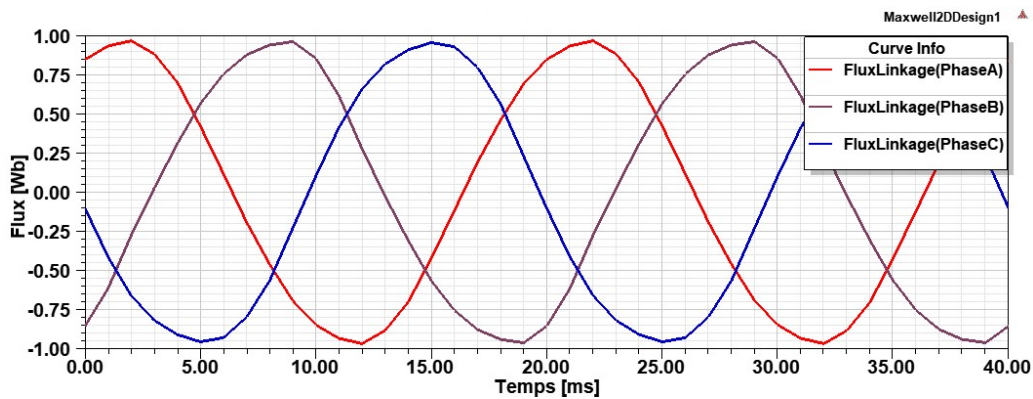


FIG. 3.26 : Évolution temporelle du flux dans une MSAP en concentration de flux.

c. Tension d'induit (FEM à vide) :

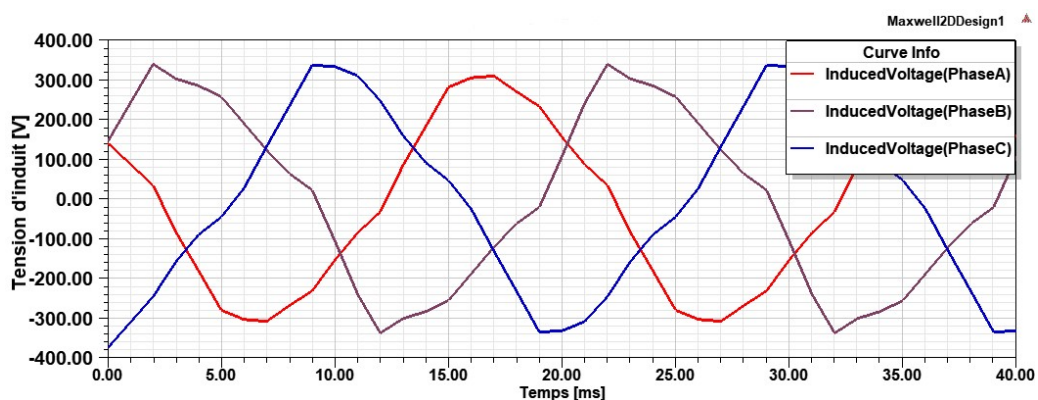


FIG. 3.27 : Évolution temporelle de la tension d'induit dans une MSAP en concentration de flux.

d. Couple

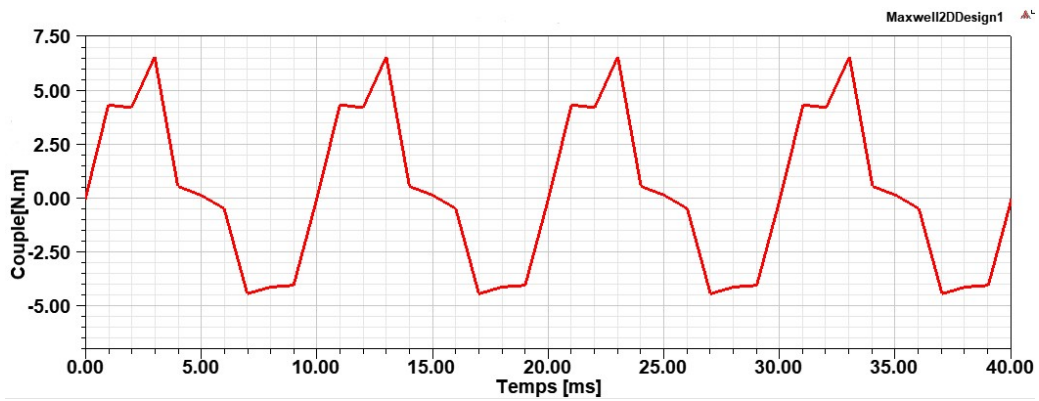


FIG. 3.28 : Couple de la MSAP en concentration de flux à vide (couple de détente).

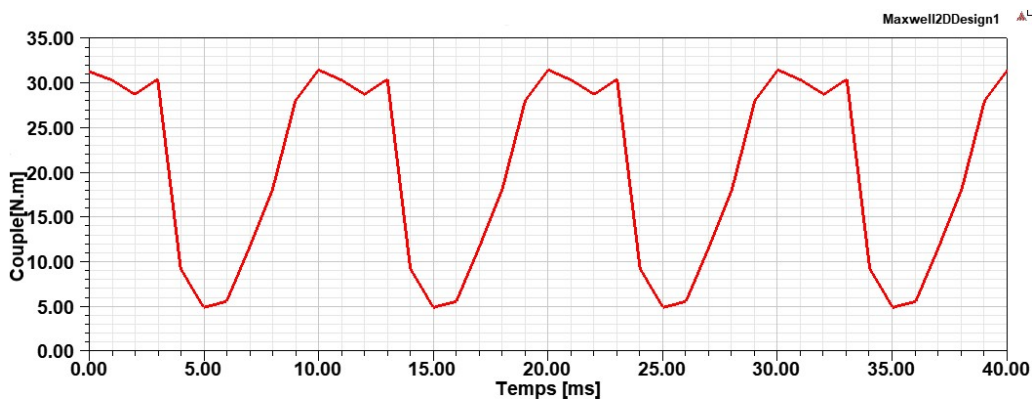


FIG. 3.29 : Couple de la MSAP en concentration de flux en charge .

e. Densité de flux de l'entrefer

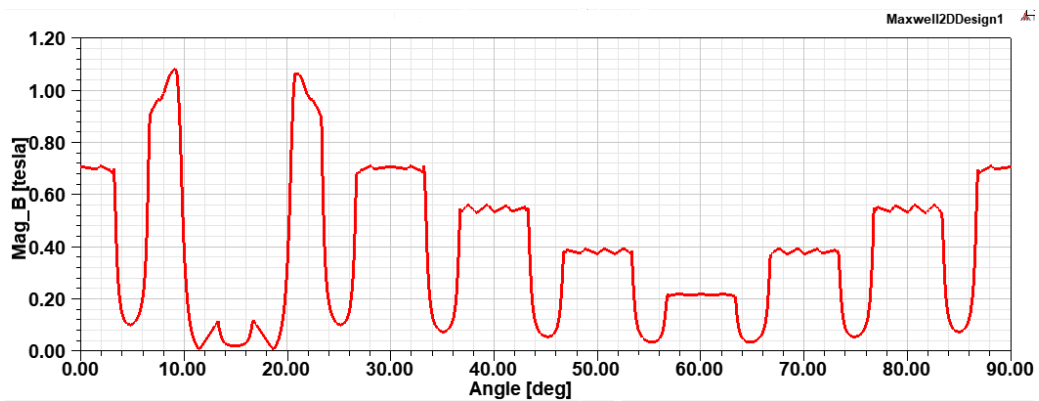


FIG. 3.30 : Densité de flux de l'entrefer dans une MSAP en concentration de flux.

3.4.5 Analyse des facteurs d'influence de la densité de flux dans l'entrefer des MSAPs

Dans une certaine mesure, le couple de sortie et le potentiel électrique d'induction des MSAP dépendent de la distribution du flux dans l'entrefer. La densité de flux dans l'entrefer influe directement sur les performances des machines, c'est pourquoi la recherche sur la densité de flux dans l'entrefer des MSAP est très importante.

Pour étudier les facteurs d'influence de la densité de flux dans l'entrefer des MSAP, une analyse par éléments finis (FEA) a été menée. Le package d'analyse FEA utilisé est le modèle Maxwell 2D d'ANSYS. Les facteurs d'influence de la densité de flux dans l'entrefer des MSAP sont les suivants :

- Longueur de l'entrefer
- Nombre de paires de pôles

A. L'influence de la variété de la longueur de l'entrefer sur la densité de flux dans l'entrefer :

La longueur de l'entrefer affecte la forme de la distribution de la densité de flux dans l'entrefer. Cela est principalement dû au flux de fuite autour de l'extrémité de l'aimant, qui augmente avec la longueur de l'entrefer. Pour un type d'aimant donné, l'augmentation de la longueur de l'entrefer entraînera une réduction de la densité de flux maximale.

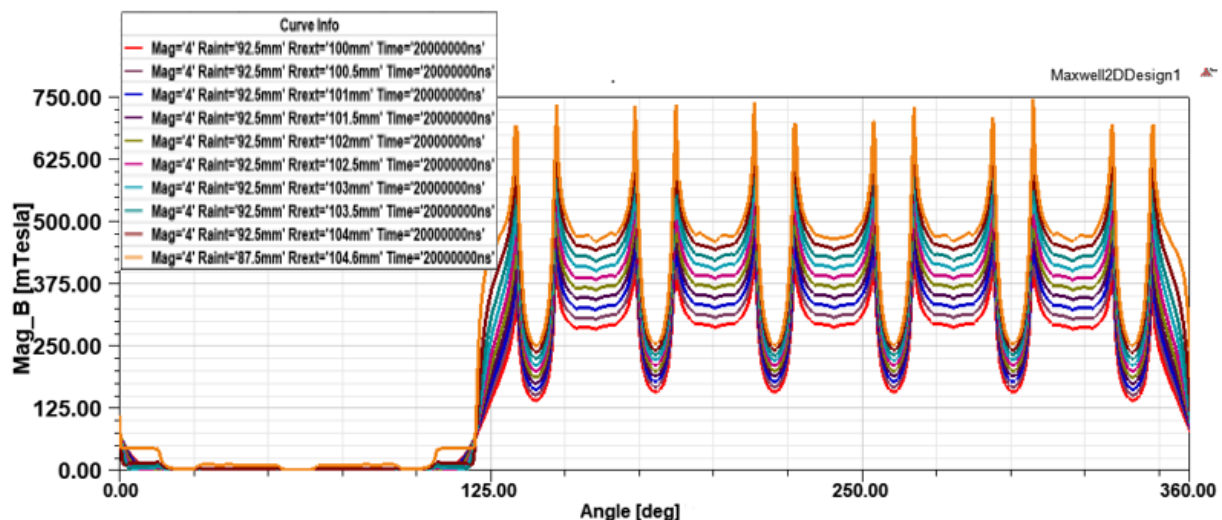


FIG. 3.31 : Densité de flux de l'entrefer

B. L'influence du nombre de paires de pôles sur la densité de flux dans l'entrefer

L'augmentation du nombre de paires de pôles peut augmenter la densité de flux dans l'entrefer jusqu'à un certain point optimal. Pour les machines synchrone à aimant permanent, un nombre spécifique de paires de pôles peut conduire à une densité de flux suffisamment élevée pour exploiter la fonction de concentration de flux.

3.5 Couple à courants constant pour le 4 configuration

Dans notre étude de simulation de la machine synchrone à aimants permanents, nous avons considéré un courant constant, ce qui signifie que nous fixons le temps à zéro. Par conséquent, cette étude est appelée une étude statique. Dans ce cadre, les valeurs des phases de courant A, B et C sont respectivement 12 A, -6,25 A et -6,25 A.

Le couple à courant constant est généralement appelé couple statique. Ce couple est souvent exprimé sous forme alternative. Contrairement à cela, le couple réel est toujours positif. Cependant, il peut arriver que la valeur moyenne de ce couple statique soit égale à zéro.

a) En surface

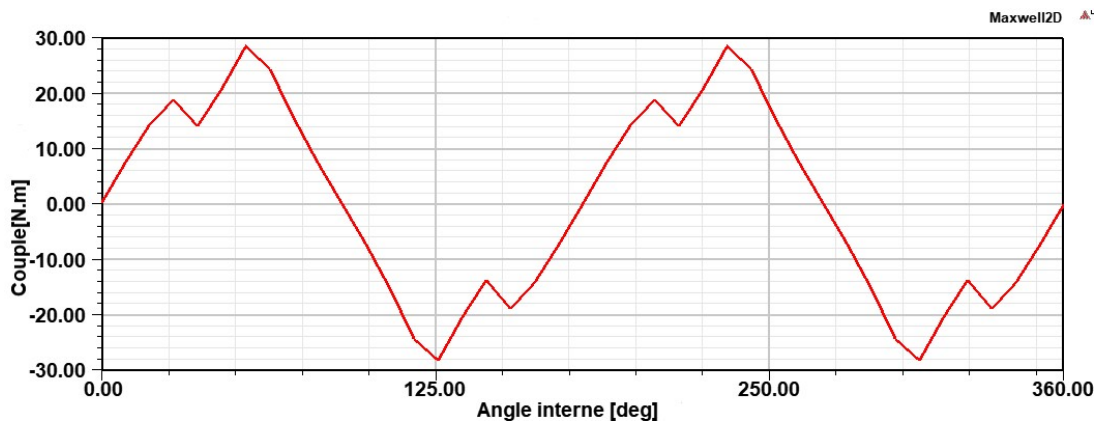


FIG. 3.32 : Couple a courant constant dans une MSAP en surface.

b) Enterré

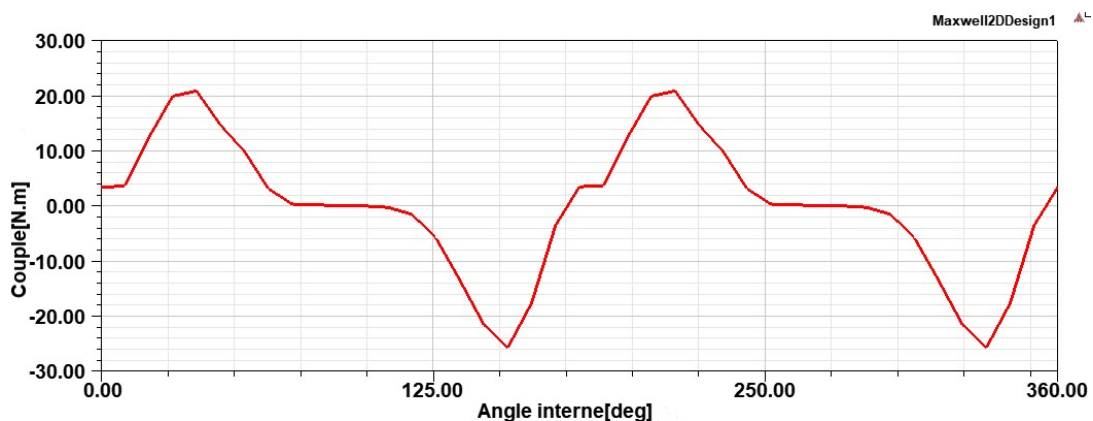


FIG. 3.33 : Couple a courant constant dans une MSAP enterré.

c) Inséré

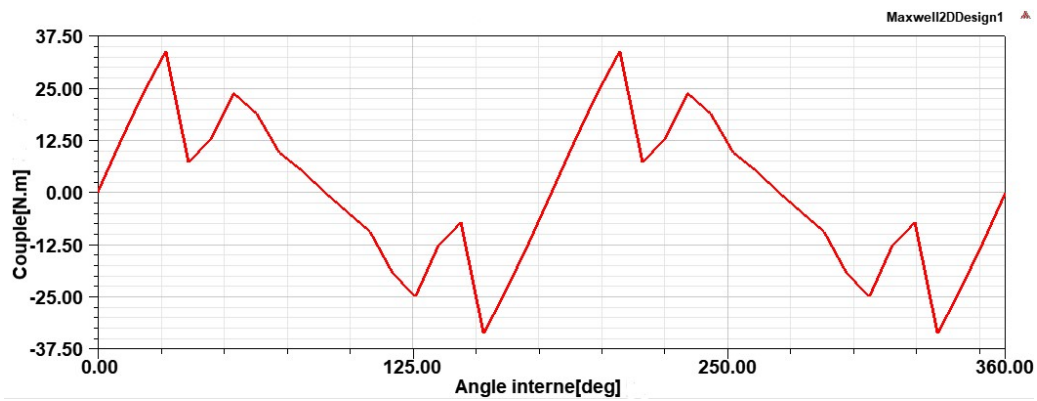


FIG. 3.34 : Couple a courant constant dans une MSAP inséré

d) En concentration de flux

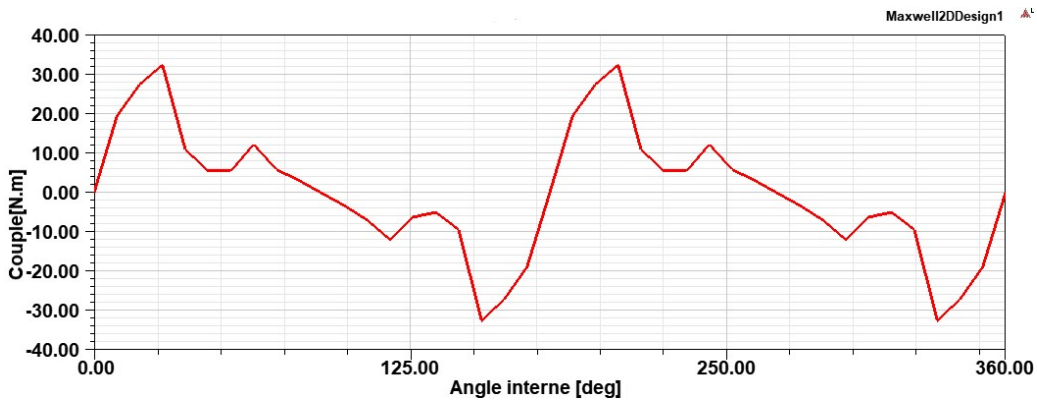


FIG. 3.35 : Couple a courant constant dans une MSAP en concentration de flux.

Le MSAP à aimants insérés a le couple à courant constant le plus élevé (33.75 N.m). Un couple élevé dans cette configuration permet de générer plus de force de rotation, améliorant ainsi la capacité de la machine à déplacer des charges lourdes et à accélérer rapidement. Cela se traduit par de meilleures performances en termes de puissance et d'efficacité pour des applications exigeantes.

3.6 Comparaison entre les différentes dispositions d'aimants dans la machine synchrone à aimants permanents

La conception des machines synchrones à aimants permanents repose sur la disposition stratégique des aimants afin de faire une comparaison

Dans cette analyse comparative, nous explorerons les différentes configurations d'aimants permanents dans les machines synchrones, en mettant l'accent sur leur impact sur

Chapitre 3. Étude et simulation sur la machine synchrone à aimant permanent

l'amplitude du fondamental de la tension, couple de détente max, couple électromagnétique moyen, flux max, et densité de flux de l'entrefer max à vide. Cette étude permettra une meilleure compréhension des avantages et des inconvénients de chaque disposition d'aimants permanents.

Topologies du rotor	Aimants en surface	Aimants insérés	Aimants enterrés	Aimants en concentration de flux
Amplitude du fondamental de la tension [V]	133.7	126.85	100.93	149.76
Couple de détente max (cogging torque) [N.m]	6.5	11.875	4.5	6.5
Couple électromagnétique moyen [N.m]	14.5	15	17.5	18
Flux max [wb]	0.825	0.7	0.7	0.95
Densité de flux de l'entrefer max à vide [T]	0.7125	0.8625	0.560	1.08

TAB. 3.2 : Tableau de comparaison entre les différentes topologies du rotor

Analyse des Performances

- **Amplitude du fondamental de la tension** : La machine avec **aimants en concentration de flux** a l'amplitude de tension la plus élevée (149,76 V), ce qui est favorable pour des applications nécessitant une haute tension.
- **Couple de détente max (Cogging Torque)** : La **machine avec aimants enterrés** présente le couple de détente le plus faible (4,5 N.m), ce qui réduit les vibrations et le bruit, avantageux pour des applications nécessitant un fonctionnement stable et silencieux.
- **Couple électromagnétique moyen** : La **machine avec aimants en concentration de flux** montre le couple électromagnétique moyen le plus élevé (18 N.m), offrant ainsi une puissance de couple supérieure, bénéfique pour des applications nécessitant un couple élevé.

- **Flux max** : La machine avec aimants en concentration de flux a le flux maximal le plus élevé (0,95 wb), favorisant une induction magnétique maximale.
- **Densité de flux de l'entrefer max à vide** : La machine avec aimants en concentration de flux possède la densité de flux de l'entrefer la plus élevée (1,08 T), ce qui améliore la capacité de la machine à maintenir une induction magnétique forte.

Recommandation

Machine la Plus Performante : Aimants en Concentration de Flux

La machine avec **aimants en concentration de flux** se distingue comme la plus performante globalement, avec des avantages significatifs en termes de tension, couple électromagnétique, flux maximal et densité de flux de l'entrefer. Cette configuration est idéale pour des applications nécessitant une puissance et une densité de flux maximales, tout en offrant un couple de détente modéré qui assure un fonctionnement relativement stable.

Pour les applications où la réduction des vibrations est primordiale, la machine avec **aimants enterrés** serait une bonne alternative en raison de son faible couple de détente, malgré des performances légèrement inférieures en termes de tension et de couple électromagnétique.

3.7 Conclusion

L'étude de la machine synchrone à aimant permanent par le biais d'Ansys a fourni des perspectives précieuses sur la conversion d'une machine asynchrone en une machine synchrone à aimant permanent. En analysant les différentes configurations d'aimants, y compris les aimants en surface, les aimants insérés, les aimants enterrés et les aimants en concentration de flux, nous avons pu évaluer leur impact sur le couple, notamment le cogging torque, le pic de couple et le couple moyen. Cette comparaison a permis de mieux comprendre les avantages et les inconvénients de chaque disposition d'aimants en termes de performances de la machine.

Les résultats ont montré que la conversion vers une machine synchrone à aimant permanent peut offrir des améliorations significatives en termes d'efficacité et de performance par rapport à une machine asynchrone conventionnelle. Cette amélioration notable du rendement découle principalement de la suppression de la perte par courant de Foucault dans le rotor, caractéristique des machines asynchrones.

Dans le cadre de notre étude, nous avons décidé de privilégier la conception de la MSAP avec des aimants insérés. Cette décision découle en grande partie de la facilité de conception, notamment en utilisant une chaîne de production déjà existante pour les machines asynchrones à rotor en barre. De plus, les MSAP à aimants insérés présentent moins de contraintes au niveau de la fixation des aimants, par rapport aux modèles à aimants

Chapitre 3. Étude et simulation sur la machine synchrone à aimant permanent

en surface où l'utilisation d'adhésifs peut être nécessaire, entraînant des complications potentielles au niveau de la conception et de la maintenance.

Cependant, il est important de reconnaître que chaque configuration de MSAP présente des avantages et des inconvénients spécifiques, et que le choix final dépendra des besoins spécifiques de chaque application.

Dans le chapitre suivant, nous approfondirons notre analyse en effectuant une étude paramétrique des paramètres rotoriques de la MSAP à aimants insérés. Cette analyse nous permettra de mieux comprendre l'impact de ces paramètres sur les performances globales de la machine, contribuant ainsi à une conception plus précise et optimisée des MSAP pour différentes applications industrielles .

Chapitre 4

Étude paramétrique et simulation sur la machine synchrone à aimants permanents insérés

4.1 Introduction

Dans le paysage contemporain où l'énergie est devenue une ressource précieuse et où la compétitivité économique exige des solutions innovantes, l'optimisation des machines électriques est devenue une préoccupation majeure. Parmi ces machines, la transition de la machine asynchrone à barre vers la machine synchrone à aimant inséré émerge comme une réponse prometteuse, offrant des performances accrues tout en réduisant les coûts de production. Cette évolution s'inscrit dans une tendance plus large où l'industrie cherche continuellement à améliorer l'efficacité énergétique et à minimiser l'empreinte environnementale de ses produits. L'objectif principal de ce chapitre est de mener une étude paramétrique approfondie de la machine synchrone à aimant inséré, en se concentrant sur trois paramètres clés : l'ouverture de l'aimant, l'aimantation "B" et l'épaisseur de l'aimant. Ces variables jouent un rôle déterminant dans la performance globale de la machine, influençant directement des aspects importants tels que l'efficacité énergétique, le rendement et les coûts de production.

Pour atteindre cet objectif, nous partirons de la chaîne de production existante de la machine asynchrone à barre, en préservant le stator intact, et nous concentrerons sur des modifications spécifiques du rotor pour le transformer en une configuration à aimant inséré. Cette approche présente plusieurs avantages. Premièrement, elle permet de minimiser les coûts liés à la refonte de l'ensemble de la machine en capitalisant sur l'infrastructure préexistante. Deuxièmement, elle offre une transition en douceur vers une technologie plus avancée tout en maintenant la continuité opérationnelle de la chaîne de production.

Il est essentiel de souligner que cette transition des machines asynchrones vers des machines synchrones à aimant inséré n'est pas seulement motivée par des considérations économiques, mais aussi par des impératifs environnementaux. Les coûts élevés associés à la fabrication, à la maintenance et au recyclage des matériaux des machines asynchrones incitent à explorer des alternatives plus durables et rentables. En outre, les machines synchrones à aimant inséré offrent des performances améliorées, ce qui les rend particulièrement attractives dans un paysage industriel où l'efficacité et la compétitivité sont des éléments clés.

4.2 Phase de conception

Dans cette phase de conception, nous suivrons une méthodologie similaire à celle employée pour la conception du stator de la machine asynchrone (MAS). Notre objectif est de réaliser une machine synchrone à aimants permanents (MSAP) en utilisant la même chaîne de production que celle de la MAS, afin d'optimiser les ressources et les coûts de fabrication.

Pour ce faire, nous conserverons la conception existante du rotor de la MAS, tout en apportant des modifications précises pour adapter la structure aux besoins spécifiques de la MSAP. En particulier, nous n'installerons pas les barres rotoriques traditionnelles utilisées dans la MAS. À la place, nous utiliserons un centre de fraisage pour créer les cavités nécessaires à l'insertion des aimants permanents. Cette étape de fraisage est très

importante car elle doit être réalisée avec une grande précision pour garantir une répartition homogène et équilibrée des aimants, ce qui est essentiel pour le bon fonctionnement de la MSAP.

Une fois les cavités usinées, les aimants seront installés dans les espaces prévus. Cette opération nécessite une manipulation minutieuse des aimants pour assurer leur alignement correct et éviter toute perturbation magnétique indésirable. Le choix des aimants et leur orientation doivent être optimisés en fonction des spécifications de la machine pour maximiser l'efficacité et la performance.

4.2.1 Caractéristique magnétique du circuit magnétique

La caractéristique magnétique du circuit magnétique stator $V(B)$ se réfère à la relation entre l'induction magnétique (B), la tension induite (V) et le champ magnétique (H) dans le stator, en utilisant le matériau M19-24G-2DSF0.20 qui représente une caractéristique magnétique (figure 3.2), selon les lois de conservation du flux de Maxwell, la saturation du circuit magnétique atteint 1,2 Tesla, tandis que celle de l'aimant est égale à 0,6 Tesla (en raison de la superficie de l'ouverture de l'aimant, qui est presque deux fois plus grande que celle des dents du stator.). Cela signifie que le flux magnétique généré par l'aimant se concentre principalement dans les dents statoriques. La différence de saturation s'explique par la géométrie du circuit magnétique. Ce matériau, avec une saturation magnétique, présente de faibles pertes par hystérésis et courants de Foucault, influençant ainsi les performances du stator. La relation $V(B)$, selon la loi de Faraday, indique que la tension induite dépend des variations du flux magnétique. En simulation avec ANSYS, ces relations aident à optimiser la conception du stator pour éviter la saturation, réduire les pertes et améliorer l'efficacité et la performance globale de la machine électrique.

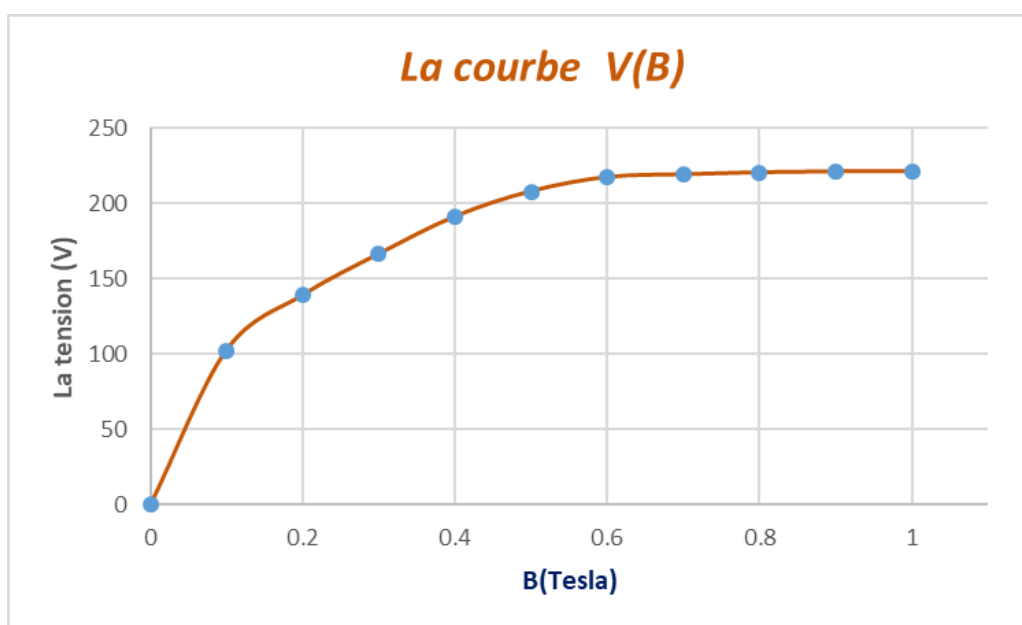


FIG. 4.1 : Caractéristique $V(B)$ du circuit magnétique

4.3 Étude paramétrique du rotor

Pour améliorer les performances des machines électriques, il est essentiel d'optimiser les paramètres du rotor en utilisant des études paramétriques. Cela permettra de maximiser l'efficacité, de réduire les pertes, et d'assurer une performance stable et durable des machines électriques.

L'ouverture de l'aimant alpha, l'épaisseur de l'aimant et l'aimantation sont les paramètres qui influencent sur les performances d'une machine synchrone à aimants permanents (MSAP) insérée.

4.3.1 Influence de l'ouverture de l'aimant

a) À vide

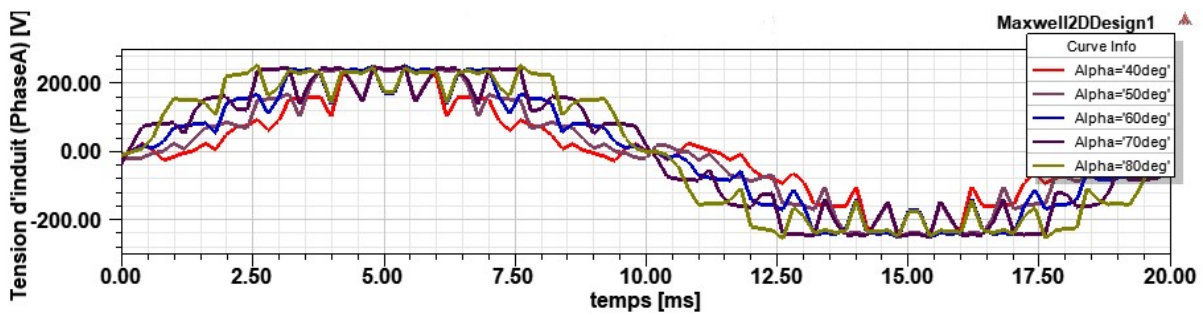


FIG. 4.2 : Tension de la phase A à vide

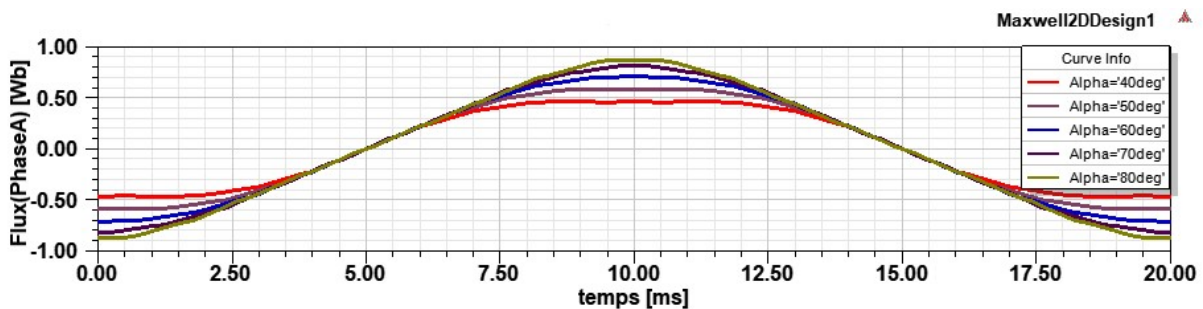


FIG. 4.3 : Flux de la phase A à vide

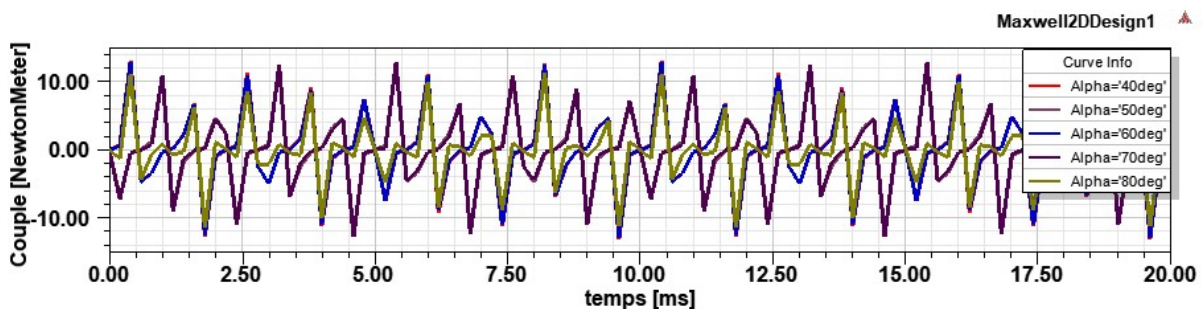


FIG. 4.4 : Couple de détente à vide

b) En charge

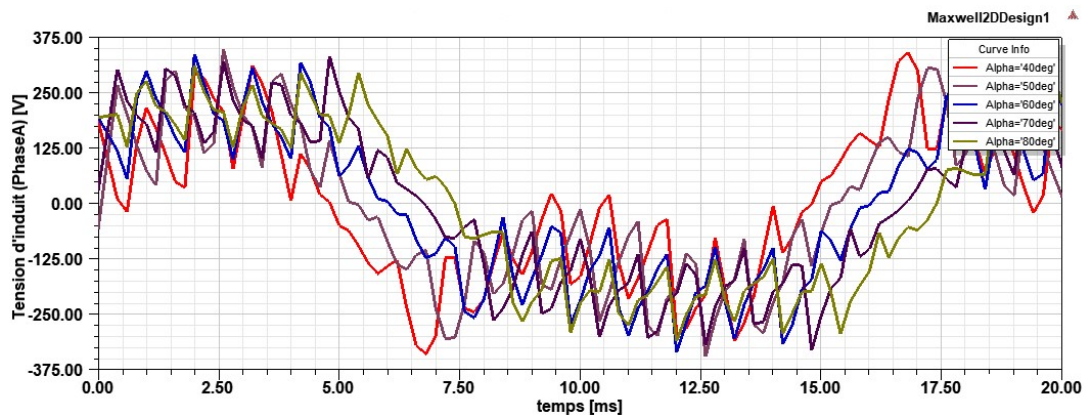


FIG. 4.5 : Tension de la phase A en charge

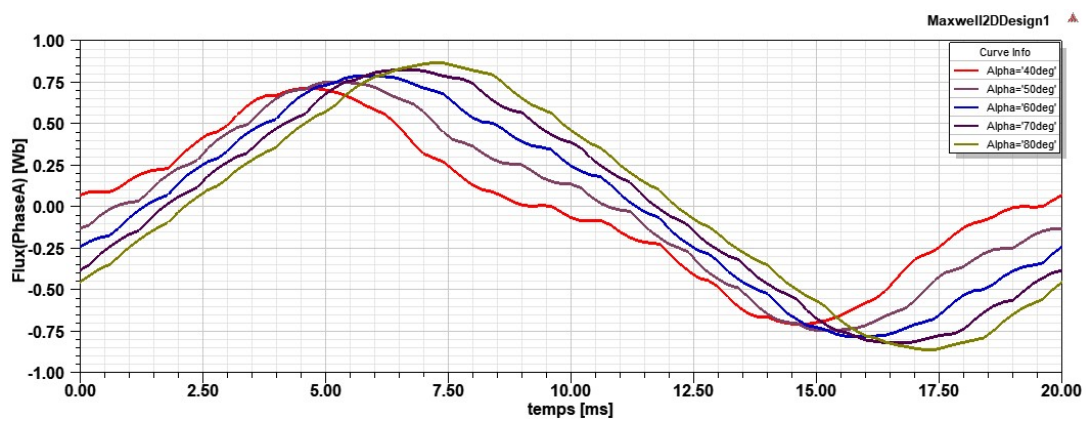


FIG. 4.6 : Flux de la phase A en charge

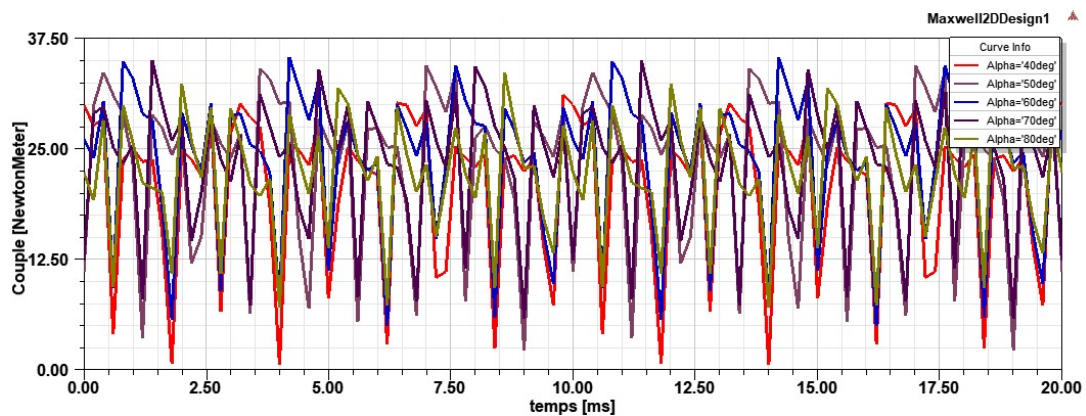


FIG. 4.7 : Couple en charge

***Interprétation des résultats**

Dans l'analyse des résultats à vide, l'augmentation de l'ouverture de l'aimant (alpha) montre une augmentation proportionnelle du flux magnétique, suggérant un meilleur couplage dans l'entrefer et une densité de flux accrue. Malgré cette variation du flux, la tension

Chapitre 4. Étude paramétrique et simulation sur la machine synchrone à aimants permanents insérés

d'induit reste relativement stable, ce qui indique une régulation efficace. On remarque que l'augmentation de l'ouverture de l'aimant provoque la réduction du cogging torque qui apporte plusieurs améliorations significatives, notamment la réduction des vibrations et du bruit, une augmentation du rendement énergétique, une meilleure stabilité du système et une tension de sortie plus stable. Cela contribue à optimiser les performances, l'efficacité et la fiabilité de la MSAP.

En charge, la tendance du flux magnétique à augmenter avec l'ouverture de l'aimant persiste, ce qui favorise un meilleur couplage électromagnétique. Parallèlement, une augmentation de l'ouverture de l'aimant conduit à une variation réduite de la tension d'induit, ce qui se traduit par une force électromotrice accrue. Le couple moyen est optimal pour une ouverture d'aimant de 80 degrés, ce qui suggère un équilibre efficace entre le flux magnétique et l'interaction électromagnétique.

En somme, ces observations mettent en lumière l'importance de l'ouverture de l'aimant permanent dans la performance globale de la machine synchrone à aimant permanent. Ces résultats guident ainsi l'optimisation de la conception et des performances de la machine en ajustant judicieusement l'ouverture de l'aimant.

4.3.2 Influence de l'aimantation

Ici, dans les deux essais à vide et en charge nous commençons notre étude avec une alimentation correspondant à une induction magnétique de 0.1 Tesla, jusqu'à la valeur 0.7 Tesla. On a trouver les résultat suivants .

a) À vide

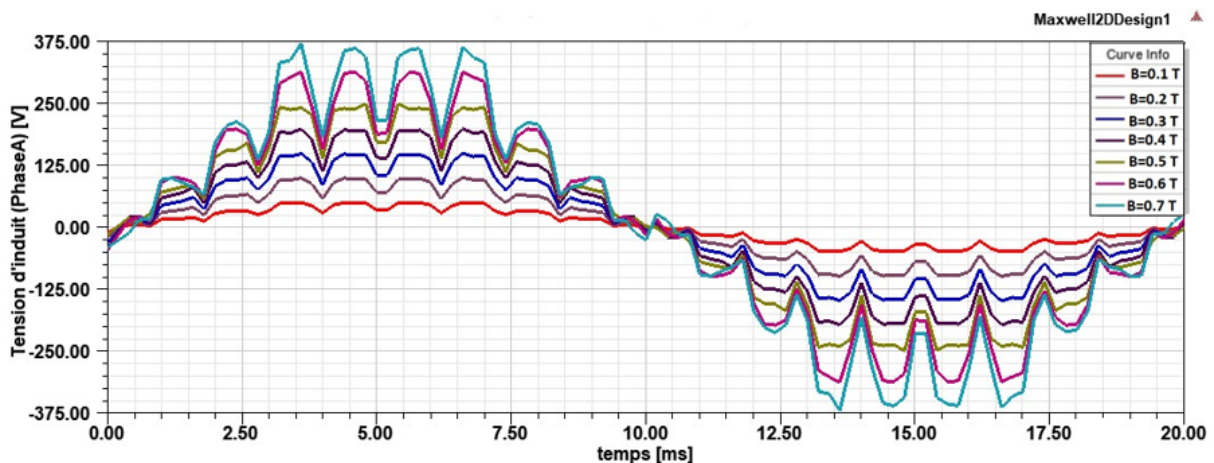


FIG. 4.8 : Tension de la phase A à vide

Chapitre 4. Étude paramétrique et simulation sur la machine synchrone à aimants permanents insérés

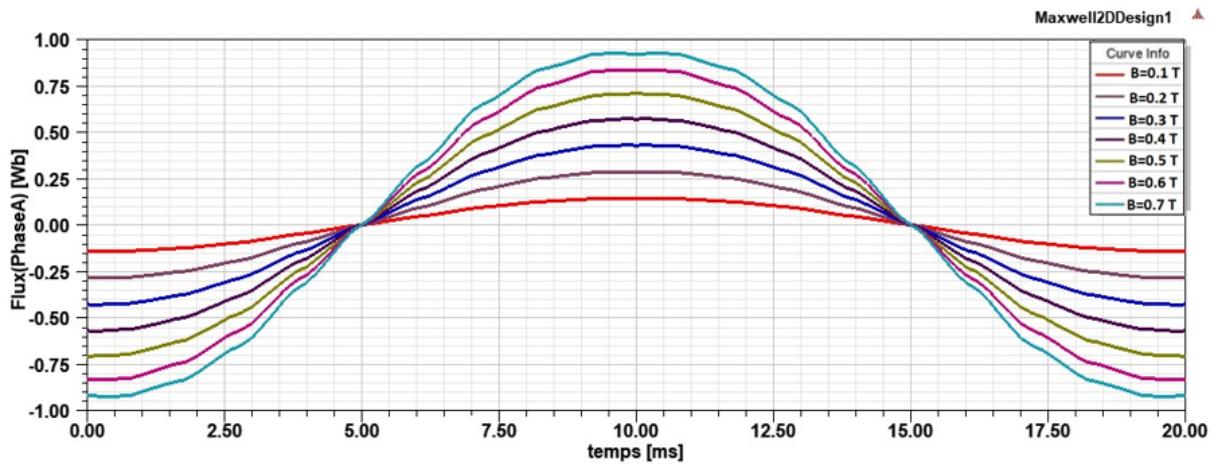


FIG. 4.9 : Flux de la phase A à vide

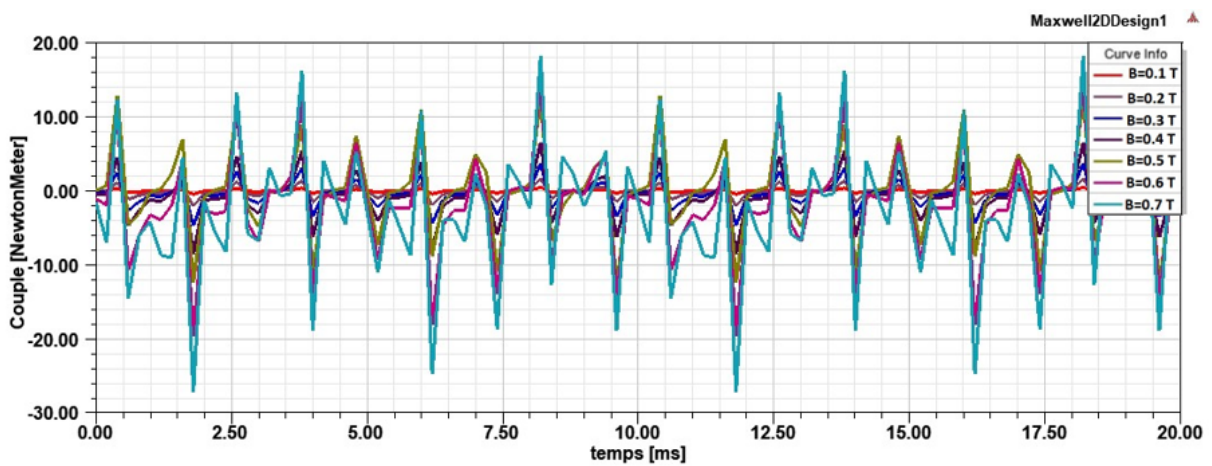


FIG. 4.10 : Couple de détente à vide

b) En charge

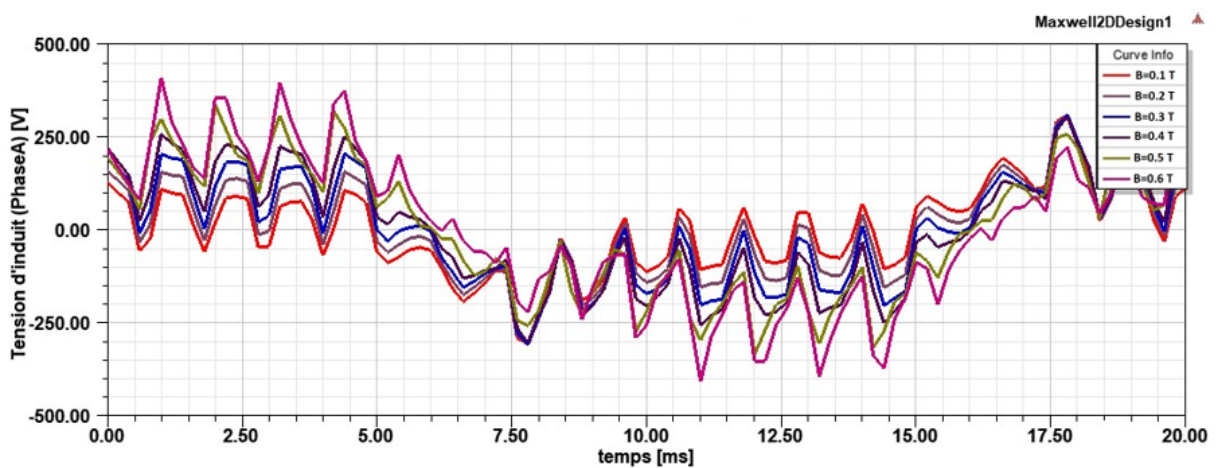


FIG. 4.11 : Tension de la phase A en charge

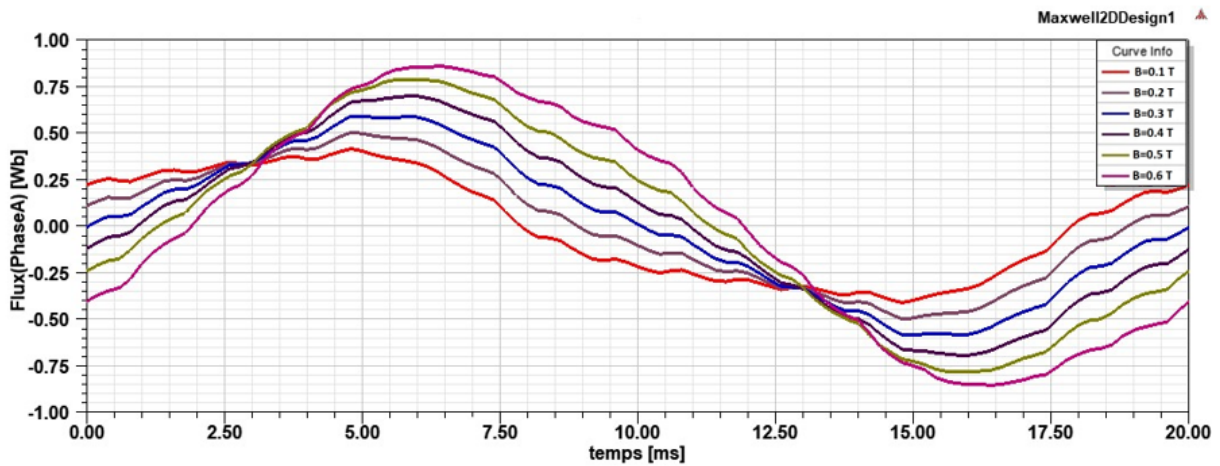


FIG. 4.12 : Flux de la phase A en charge

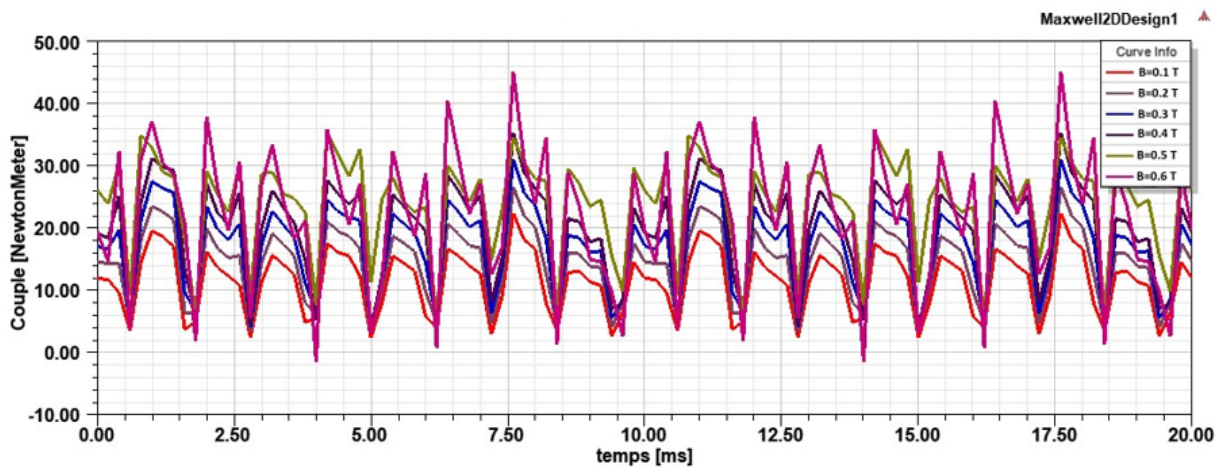


FIG. 4.13 : Couple en charge

*Interprétation des résultats

D'après les résultats obtenus dans ANSYS, nous observons que :

À partir de 0.6 Tesla, nous observons que le circuit magnétique du stator, notamment les dents du stator, atteint un état de saturation. La saturation magnétique se produit lorsque l'augmentation du champ magnétique H n'entraîne plus une augmentation proportionnelle de l'induction magnétique B . En d'autres termes, au-delà de 0.6 Tesla, le matériau magnétique des dents du stator ne peut plus efficacement canaliser le flux magnétique supplémentaire.

Saturation des dents du stator

La saturation des dents du stator a plusieurs implications négatives :

- **Perte d'efficacité :** Lorsque les dents du stator sont saturées, toute augmentation supplémentaire du champ magnétique résulte en une augmentation disproportionnée des pertes par hystérésis et par courants de Foucault, diminuant ainsi l'efficacité globale de la machine.

- **Chauffage excessif** : La saturation magnétique conduit à une dissipation d'énergie accrue sous forme de chaleur, ce qui peut entraîner un chauffage excessif des composants du stator. Cela peut, à long terme, endommager les isolations et réduire la durée de vie de la machine.
- **Distorsion des champs magnétiques** : La saturation provoque une distorsion des champs magnétiques dans le circuit, affectant la régularité et la performance de la machine. Cela peut entraîner des vibrations et du bruit accrus, ainsi qu'une augmentation du couple de détente par rapport au couple produit.

4.3.3 Influence de l'épaisseur de l'aimant

Impact de l'épaisseur de l'aimant sur les performances de la machine en charge

Nous avons constaté que la modification de l'épaisseur de l'aimant n'a pas d'impact significatif sur les performances de la machine. Cette observation suggère que, malgré les variations de l'épaisseur de l'aimant, les principales caractéristiques opérationnelles telles que la densité de flux, le couple et l'efficacité globale de la machine restent relativement constantes.

Par conséquent, dans le cadre de la conception et de l'optimisation des machines électriques, il est possible de privilégier des ajustements d'épaisseur d'aimant qui favorisent des aspects tels que la réduction des coûts ou la facilité de fabrication sans compromettre les performances de la machine.

*Interprétation des résultats

En se référant aux résultats obtenus à partir du logiciel ANSYS Electronics, que ce soit à vide ou en charge, il est observé que la variation de l'épaisseur de l'aimant à travers le rayon intérieur de celui-ci n'a aucun effet perceptible sur le flux magnétique, la tension d'induit et le couple de la machine synchrone à aimant permanent inséré.

4.4 Comparaison entre l'influence des trois paramètres d'étude

L'étude des paramètres de la machine synchrone à aimant permanent met en lumière des conclusions significatives. L'ouverture de l'aimant joue un rôle important, influençant de manière notable le flux magnétique, la tension d'induit et le couple, à la fois à vide et en charge. Des valeurs optimales d'ouverture de l'aimant sont observées, avec une augmentation proportionnelle du flux magnétique jusqu'à un certain point, indiquant un meilleur couplage dans l'entrefer. Cependant, au-delà de cette limite, la saturation magnétique des dents du stator compromet l'efficacité globale de la machine, entraînant des pertes par hystérésis et des courants de Foucault excessifs, ainsi qu'un risque de surchauffe. Parallèlement, la modification de l'épaisseur de l'aimant ne semble pas influencer

de manière significative les performances en charge de la machine, offrant ainsi des possibilités d'ajustement pour des considérations économiques et de fabrication. En somme, ces résultats mettent en évidence l'importance critique de l'optimisation de l'ouverture de l'aimant pour maximiser l'efficacité et la durabilité de la machine, tout en soulignant les implications néfastes de la saturation magnétique des dents du stator au-delà de certaines valeurs.

4.5 Sélection des paramètres étudiés et simulation de la machine avec leurs valeurs

Nous avons choisi une ouverture d'aimant de 80 degrés, une aimantation de 0.6 Tesla et un rayon intérieur de l'aimant (R_{aimant}) de 92.5 mm pour avoir une épaisseur d'aimant minimale. Ces paramètres ont été sélectionnés pour optimiser les performances de la machine synchrone à aimant permanent. L'ouverture de l'aimant de 80 degrés permet un équilibre optimal entre le flux magnétique et l'interaction électromagnétique, maximisant ainsi le couple moyen. Une aimantation de 0.6 Tesla a été choisie pour assurer une densité de flux adéquate, tout en minimisant les pertes par hystérésis et les courants de Foucault. Enfin, un rayon intérieur de 92.5 mm et une épaisseur d'aimant minimale permettent de réduire le poids et le coût de l'aimant, tout en maintenant une performance électromagnétique optimale. Cette combinaison de paramètres assure une efficacité énergétique maximale et une performance stable de la machine dans diverses conditions de fonctionnement.

Pour une simulation après la sélection des paramètres dans la conception d'une machine synchrone à aimants permanents insérés (MSAP), nous avons obtenu les résultats suivants :

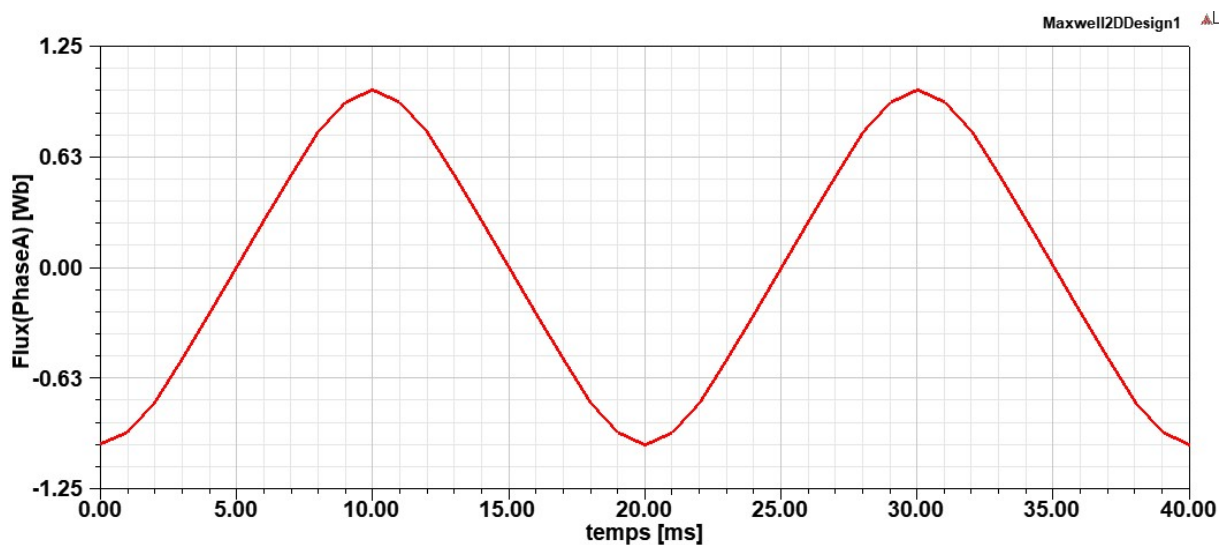


FIG. 4.14 : Flux de la phase A de la MSAP insérée à vide.

Chapitre 4. Étude paramétrique et simulation sur la machine synchrone à aimants permanents insérés

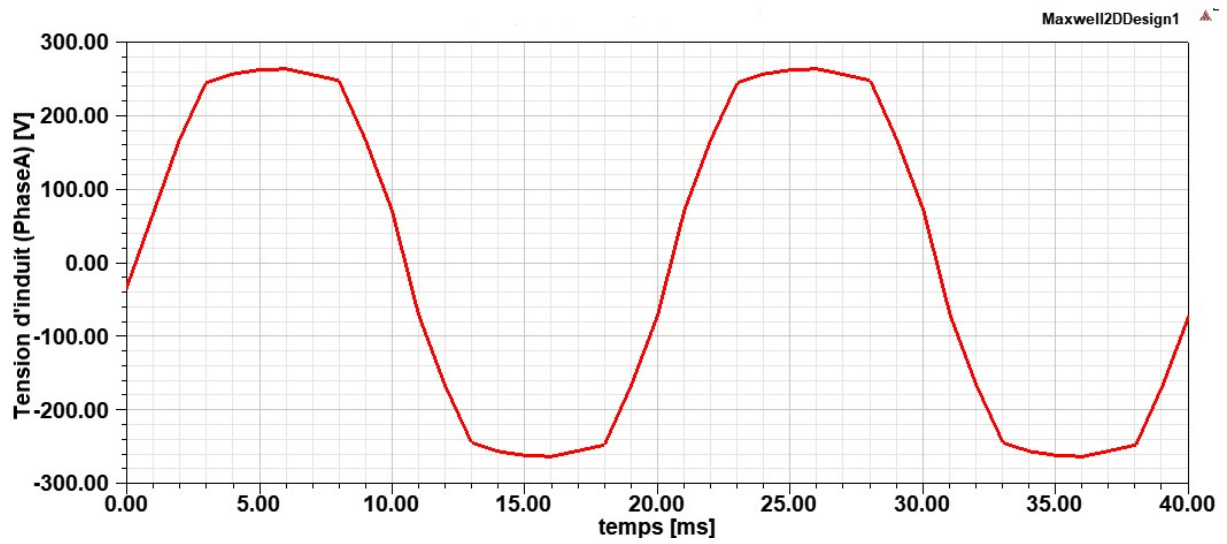


FIG. 4.15 : Tension e la phase A de la MSAP insères à vide.

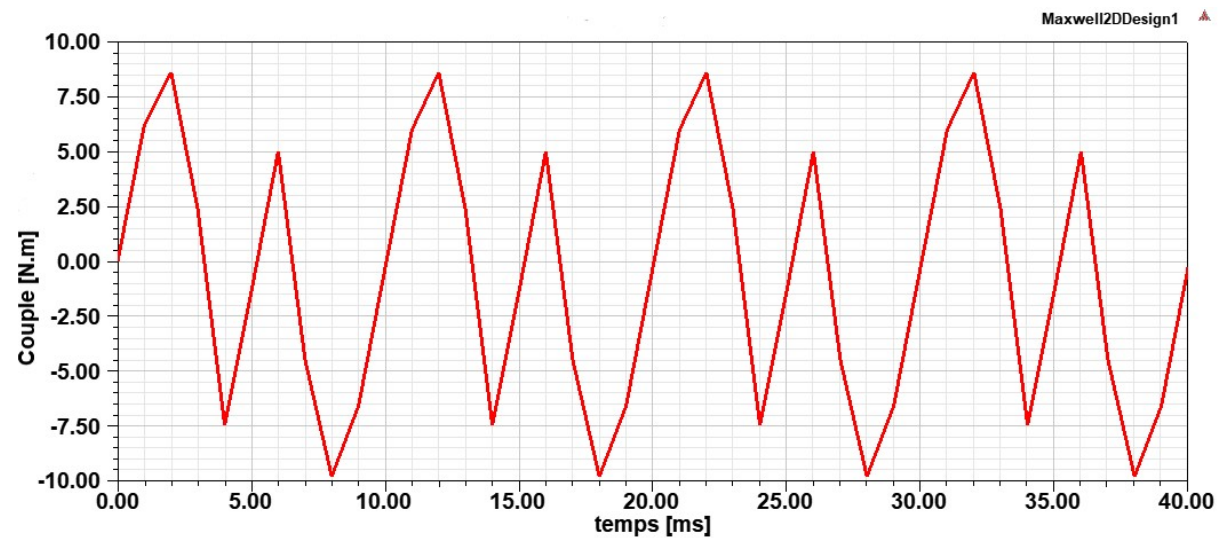


FIG. 4.16 : Couple électromagnétique d'une MSAP insères à vide.

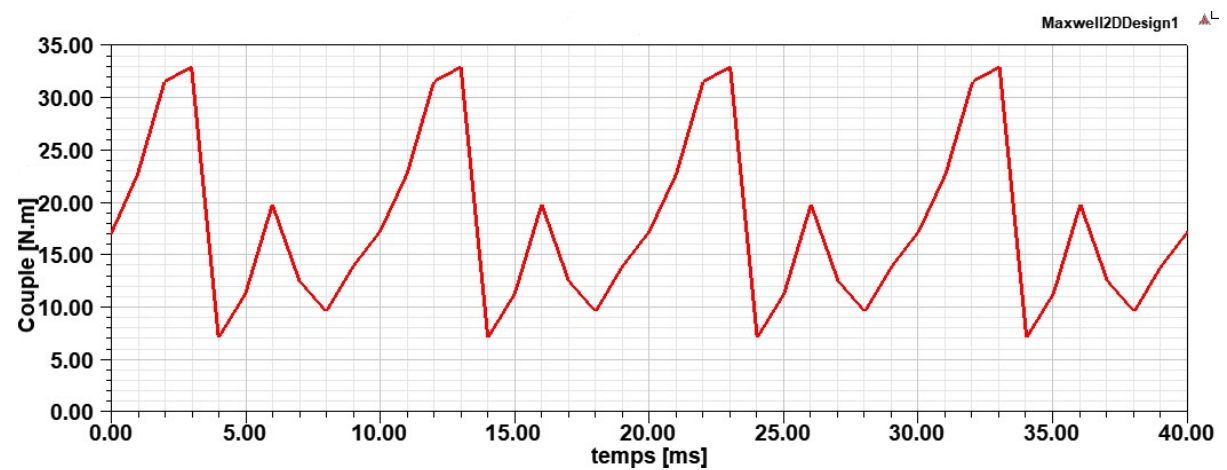


FIG. 4.17 : Couple électromagnétique d'une MSAP insères en charge.

4.6 Comparaison entre le couple de la machine asynchrone et celui de la MSAP inséré

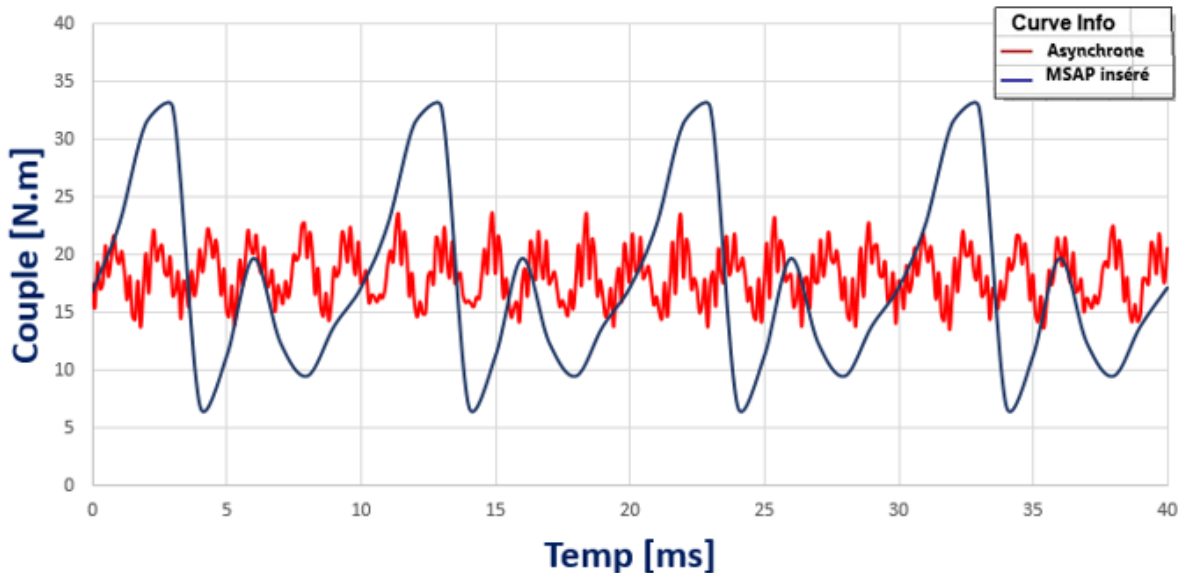


FIG. 4.18 : Couple électromagnétique d'une MSAP insérées et d'une MAS.

L'analyse du graphe représentant le couple en fonction du temps pour la machine asynchrone (MAS) et la machine à aimant permanent insérée (MSAP) révèle que le couple moyen de la MAS est d'environ $18 \text{ N} \cdot \text{m}$, tandis que celui de la MSAP insérée est de $20 \text{ N} \cdot \text{m}$. Cela indique que la MSAP insérée génère un couple supérieur de $2 \text{ N} \cdot \text{m}$ par rapport à la MAS, ce qui constitue un avantage en termes de performance et d'efficacité. Cependant, il est également observé que l'ondulation du couple, c'est-à-dire les variations du couple autour de sa valeur moyenne, est plus importante dans la MSAP insérée que dans la MAS. Cette ondulation accrue peut être due à la nature des machine à aimants permanents, et que la structure du stator n'ai pas optimal pour la conception des MSAPs. Malgré ces variations, le couple moyen plus élevé de la MSAP insérée offre des avantages significatifs qui peuvent compenser les ondulations dans de nombreuses applications pratiques.

4.7 Conclusion

L'étude paramétrique et simulation sur la machine synchrone à aimant permanent insérés, nous avons entrepris une phase de conception suivant une méthodologie similaire à celle utilisée pour la conception du stator de la machine asynchrone (MAS). Notre objectif était de réaliser une machine synchrone à aimants permanents (MSAP) en utilisant la même chaîne de production que celle de la MAS, afin d'optimiser les ressources et les coûts de fabrication.

Chapitre 4. Étude paramétrique et simulation sur la machine synchrone à aimants permanents insérés

Pour ce faire, nous avons conservé la conception existante du rotor de la MAS, en modifiant précisément la structure pour répondre aux besoins spécifiques de la MSAP. Les barres rotoriques traditionnelles ont été remplacées par des cavités usinées pour l'insertion des aimants permanents, une étape cruciale nécessitant une grande précision.

L'étude paramétrique a mis en évidence l'importance de l'ouverture de l'aimant (α), de l'épaisseur de l'aimant et de l'aimantation sur les performances de la MSAP. L'augmentation de l'ouverture de l'aimant améliore le flux magnétique et réduit le cogging torque, améliorant ainsi la stabilité, la performance et l'efficacité de la machine. Cependant, la saturation magnétique des dents du stator au-delà de 0.6 Tesla entraîne des pertes d'efficacité et un risque de surchauffe.

L'épaisseur de l'aimant n'a pas d'impact significatif sur les performances, permettant ainsi des ajustements pour des considérations économiques sans compromettre les performances. Nous avons choisi une ouverture de phase de 80 degrés, une aimantation de 0.6 Tesla et un rayon intérieur de l'aimant de 92.5 mm pour optimiser les performances tout en minimisant les coûts et le poids.

Enfin, la comparaison entre le couple de la MAS et celui de la MSAP insérée a montré que la MSAP insérée génère un couple moyen supérieur de $6 \text{ N} \cdot \text{m}$, bien que présentant des ondulations de couple plus importantes. Malgré ces fluctuations, le couple moyen plus élevé de la MSAP insérée constitue un avantage majeur en termes de performance et d'efficacité, faisant de la MSAP insérée une solution optimisée et performante par rapport à la MAS.

Conclusion et perspectives

Conclusion générale

La transformation d'une machine asynchrone en une machine synchrone à aimants permanents représente un défi multidimensionnel, impliquant des connaissances approfondies en électromagnétisme, mécanique, matériaux et contrôle des systèmes. Cette démarche complexe nécessite une analyse rigoureuse à chaque étape pour assurer des performances optimales, une fiabilité accrue et une rentabilité à long terme. L'importance d'une approche méthodique et d'une compréhension solide des principes fondamentaux est primordiale pour garantir le succès de la transformation et maximiser les avantages de la machine résultante. En investissant dans une planification minutieuse et une mise en œuvre rigoureuse, il est possible d'exploiter pleinement les machines synchrones à aimants permanents, offrant ainsi une solution plus économique et durable par rapport aux machines asynchrones, notamment dans les applications de grande puissance.

La modélisation de la machine asynchrone avec le logiciel Ansys a permis d'obtenir une représentation détaillée de sa géométrie et des distributions de champ électromagnétique, garantissant des résultats fiables et cohérents. Cette modélisation facilite la conception et l'analyse des moteurs asynchrones, mettant en évidence les avantages de l'utilisation des méthodes des éléments finis. Ces outils permettent d'optimiser les matériaux, de visualiser la géométrie en 2D et de réaliser des ajustements précis. Les résultats obtenus ont des implications significatives pour la conception et l'amélioration des performances des machines asynchrones, tout en permettant de simuler des scénarios de défaillance et de mettre en œuvre des stratégies de maintenance préventive.

L'étude de la machine synchrone à aimants permanents, également via Ansys, a fourni des perspectives précieuses sur la conversion des machines asynchrones. En comparant différentes configurations d'aimants, nous avons évalué leur impact sur le couple et les performances globales de la machine. La conversion vers une machine synchrone à aimants permanents offre des améliorations significatives en termes d'efficacité et de performance, principalement grâce à la diminution des pertes par courant de Foucault dans le rotor. La conception privilégiée avec des aimants insérés a été choisie pour sa facilité de mise en œuvre et de maintenance.

Enfin, l'analyse des paramètres du rotor a mis en évidence l'importance de la conception précise pour optimiser les performances électromagnétiques de la machine. L'utilisation d'outils de modélisation et de simulation a permis de comprendre en profondeur les interactions électromagnétiques et d'évaluer l'impact des différents paramètres de conception sur les performances de la machine. Ces avancées dans la modélisation numérique ouvrent la voie à des développements futurs de machines électriques plus performantes et économes en énergie.

Ce projet a démontré l'importance de la transformation des machines asynchrones en machines synchrones à aimants permanents pour des performances améliorées et une efficacité énergétique accrue. Les outils de modélisation et de simulation jouent un rôle important dans l'optimisation des conceptions, permettant ainsi d'adapter les machines aux exigences spécifiques des applications industrielles. Ces recherches offrent des perspectives prometteuses pour le développement futur de machines électriques.

Perspectives

- **Innovation technologique**

La conversion des machines asynchrones en machines synchrones à aimants permanents (MSAP) ouvre la voie à des innovations significatives dans le domaine des machines électriques. En exploitant les avantages des aimants permanents, tels que l'absence de besoin d'excitation externe, ces nouvelles machines peuvent offrir des performances supérieures en termes de rendement énergétique et de densité de puissance.

- **Optimisation des ressources**

Réutiliser le circuit magnétique existant d'une machine asynchrone pour concevoir une MSAP représente une approche économique et écologique. Cette méthode permet de réduire les coûts de fabrication et de minimiser l'impact environnemental lié à la production de nouveaux matériaux.

- **Amélioration de l'efficacité énergétique**

Les MSAP sont réputées pour leur efficacité énergétique élevée, notamment grâce à la réduction des pertes liées à l'excitation et à la meilleure gestion des flux magnétiques. Cela les rend particulièrement adaptées pour des applications nécessitant des machines avec un facteur de puissance élevé et une faible consommation d'énergie.

- **Flexibilité d'applications**

En modifiant une machine asynchrone en MSAP, il est possible de créer des moteurs et des générateurs adaptés à une large gamme d'applications industrielles, y compris les véhicules électriques, les systèmes de génération distribuée, et les équipements industriels nécessitant une régulation précise de la vitesse et de la position.

- **Avancées en conception et simulation**

L'utilisation de logiciels avancés comme Ansys Maxwell pour simuler et optimiser les machines MSAP issues de circuits magnétiques de machines asynchrones permet de développer des designs plus performants, avec des analyses précises des distributions de flux et des comportements électromagnétiques complexes. Cela accélère le processus de conception et réduit les risques d'erreurs.

Appréciation personnelle

La conversion d'une machine asynchrone en une machine synchrone à aimants permanents représente un champ d'étude fascinant qui allie les avantages de deux technologies de machines électriques. Personnellement, je trouve cette démarche non seulement innovante mais aussi stratégique, car elle permet de tirer parti des infrastructures existantes tout en intégrant les avantages des aimants permanents, comme l'amélioration de l'efficacité énergétique et la réduction des besoins en maintenance et il est nécessaire d'apporter des

modifications au stator pour diminuer les ondulations de couple, augmenter le flux et ainsi améliorer davantage les performances de la machine synchrone à aimants permanents

Ce processus de transformation, en utilisant des outils de simulation avancés comme Ansys Maxwell, permet d'optimiser les designs de manière itérative et précise, réduisant ainsi les coûts de développement et augmentant la fiabilité des machines. La possibilité de réutiliser des composants existants en fait également une solution respectueuse de l'environnement, alignée avec les objectifs de durabilité croissante dans l'industrie électrique.

L'évolution vers des machines synchrones à aimants permanents à partir de machines asynchrones existantes offre un potentiel énorme pour les industries cherchant à améliorer leur efficacité et leurs performances tout en réduisant leurs coûts et leur empreinte écologique. Cela témoigne de la manière dont les avancées technologiques peuvent être intégrées pour répondre aux besoins contemporains en matière de performances et de durabilité.

Référence

[1] **R. Lateb** : "Modélisation des machines asynchrones et synchrones à aimants avec prise en compte des harmoniques d'espace et de temps", Thèse de doctorat d'I.N.P. L, de Nancy (France), octobre. 2006.

[2] **M. Belkadi** : "Calcul numérique d'une machine synchrone à aimant permanent à pôles lisses", Thèse magister d'état, ENP, Alger, Algérie.

[3] **R. Ibtouen** : "Contribution au dimensionnement électromagnétique d'une machine synchrone autopilotée à aimants insérés", Thèse doctorat d'état, ENP, Alger, Algérie, avril.1993.

[4] **M. Khov** : "Surveillance et diagnostic des machines synchrones à aimants permanents : Détection des court-circuits par suivi paramétrique", Thèse de doctorat, université de Toulouse, 2009.

[5] **Suhail Zaki Farooqui** : "Conversion of squirrel cage induction motors to wind turbine PMG", Faculty of Engineering Sciences, National University of Sciences & Technology

[6] **Tae-Kil Kim** : "Experimental comparison of induction motor and IPMSM with identical stator" IEEE, 2023.

[7] **D. K. Athanasopoulos** : "Electromagnetic Analysis of a PMSM with Different Rotor Topologies" IEEE.

[8] **Maria Ya** : "Method of Converting an Induction Motor to a Permanent Magnet Synchronous Motor (Ls-PMSM) with Linear Starting Using FEA for Mechatronic Systems", Conference Paper IEEE, 2019.

[9] **Y. BENHADDA** : Cours "MACHINES ÉLECTRIQUES APPROFONDIES" p37,38

[10] **Zheng Li** : "Implementation and analysis of remanufacturing large-scale asynchronous motor to permanent magnet motor under circular economy conditions", ELSEVIER.

[11] **David FOLIO** : Cours "SUPPORT DE COURS D'ÉLECTRICITÉ/ ÉLECTROTECHNIQUE"

[12] **P. Ponomarev** : "Tooth-coil Permanent Magnet Synchronous Machine Design for Special Applications", PhD dissertation, Dept. of Electrical Engineering, Lappeenranta University of Technology, Finland, Oct 2013.

[13] **L. Lechevallier, J. Le Breton** : "Aimants permanents", Technique de l'ingénieurD2 102.

[14] **M. Dubois** : "matériaux de l'électrotechnique", IGEE-403, 2006.

[15] **OyesteinKrovel** : Design of Large Permanent Magnetized Synchronous Electric Machines , Thèse de Doctorat, Norwegian University of Science and Technology, Février 2011.

[16] **Pierre Mayé** : Livre "Aide-Mémoire Électrotechnique" p23,30