

M/621.745

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université 8Mai 1945 – Guelma
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrotechnique et Automatique



Mémoire de fin d'études
Pour l'obtention du diplôme de Master Académique

Domaine : Sciences et Technologie
Filière : Génie Electrique
Spécialité : Commande des machines électriques

Thème :
Pré-dimensionnement d'une machine synchrone
à aimants permanents

Présenté par :
➤ **Hannachi mouna**
➤ **Foughali atti aida**

Sous la direction de :
Mr. S. Mendaci

JUIN 2012



Remerciement



Louange à dieu, qui nous a donné vie et pour le parachèvement de ce modeste travail.

Avant tous nous tenons à offrir notre respect à notre encadreur

<< Mr Mendaci soufiane >> et nous le remercions vivement pour toute sa gentillesse, ses conseils fructueux son aide et sa orientation à l'élaboration de ce travail.

C'est avec un grand plaisir que nous apportons ce modeste travail à monsieur chef de département.

Nous tenons à remercier tous les enseignants de l'institut de génie électrotechnique et automatique qui ont contribués à notre formation durant les années d'études.

Par la signature de :

Hannachi mouna

Foughali atti aida

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

*Ceux qui me sont les plus chers au monde, qui avec tout leur
Amour et affection se sont sacrifiés pour réaliser mon
Bonheur et assurer mon avenir,*

Ma mère et mon père,

Auxquels j'exprime tout mon amour, affection et respect

Et que dieu les garde en vie.

A mes chers frères et sœurs :

Amina et Khaled qui ont partagé mes peines et mes joies.

A mes petits oiseaux

Arige, Ritage et Soundouss.

A ma belle famille, avec l'expression de ma profonde affection.

A mon cher frère et collègue de travail Mouna

*Au nom de l'amitié et en souvenir des meilleurs moments passés ensemble, je
dédie ce mémoire à mes amis :*

Khadidja, Sabrina, Nour elhouda, Nedjwa, Hanene, Rebiha.

*Mes chers amis que dieu exauce notre prière pour que le lien qui nous a uni
demeure solide.*

Ainsi toute ma promotion 2012.

A ceux qui m'aime

Et

Ceux qui j'aime.

AIDA

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

*Ceux qui me sont les plus chers au monde, qui avec tout leur
Amour et affection se sont sacrifiés pour réaliser mon
Bonheur et assurer mon avenir,*

Ma mère et mon père,

Auxquels j'exprime tout mon amour, affection et respect

Et que dieu les garde en vie.

A mes chers frères et sœurs :

Chahira, Wassila, Samiha, Lazhar et Salah.

A mes petits oiseaux

Midou et Aya.

A mon mari "Hocine"

A ma belle famille, avec l'expression de ma profonde affection.

A mon cher frère et collègue de travail Aida

Au nom de l'amitié et en souvenir des meilleurs moments passés ensemble, je

dédie ce mémoire à mes amis :

Khadidja, Samia, Sabrina, Nour elhouda, Nedjwa, Hanene, Rebiha.

*Mes chers amis que dieu exauce notre prière pour que le lien qui nous a uni
demeure solide.*

Ainsi toute ma promotion 2012.

A ceux qui m'aime

Et

Ceux qui j'aime.

MOUNA

Sommaire

Introduction générale.....	01
----------------------------	----

Chapitre I: Introduction sur les machines synchrones à aimants permanents

1. Introduction	03
2. Généralité sur les machines synchrones	03
2.1 Machines synchrones à rotor bobiné (MSRB).....	03
2.2 Machines synchrone à aimants permanents(MSAP).....	05
2.3 Machines synchrone à double excitation(MSDE).....	09
3. Bobinages des enroulements statoriques.....	12
4. Aimants permanents.....	14
4.1 Généralités.....	14
5. Méthode de modélisation des machines électriques.....	17
6. Conclusion.....	19

Chapitre II : Développement d'une démarche de conception préliminaire des MSAP

1. Introduction.....	20
2. Etapes de dimensionnement.....	20
Pré-dimensionnement (dimensionnement rapide).....	20
2.2 Dimensionnement optimal (final).....	21
2.3 Validation par éléments finis (vérification)	21
3. Méthode de pré-dimensionnement rapide de la machine synchrone à aimants permanent.....	22
3.1 Configuration de la machine.....	22
3.2 Définition des paramètres.....	22
3.3 Démarche de dimensionnement.....	23
4. conclusion	32

Chapitre III : Dimensionnement d'une MSAP destinée par la traction électrique

1. Introduction	33
2. définition du cahier des charges.....	33
3. dimensionnement de la MSAP.....	35
4. Validation des résultats.....	35
5. Conclusion.....	39
Conclusion générale.....	40

Introduction générale

Il est connu qu'une démarche de conception de systèmes électromagnétiques fasse appel à plusieurs outils logiciels pour étudier tous les phénomènes physiques qui caractérisent son fonctionnement. Ces outils sont souvent de natures diverses s'étendant des bases de données et tableurs aux logiciels de modélisation propres à la physique traitée et ne présentant aucun lien entre eux. Méthodiquement, ces techniques pénalisent la conception, en particulier le dimensionnement, par un coût élevé du temps de mise en œuvre. Ceci justifie l'orientation vers des plates-formes logicielles mettant en œuvre des modèles multi physiques permettant de concevoir des systèmes complexes en modélisant l'ensemble des phénomènes couplés caractérisant leur fonctionnement.

Un modèle multi physique peut être analytique et/ou numérique, et l'utilisation d'un type ou l'autre de ces deux modèles dépend des objectifs recherchés. Dans les premières phases de la conception, où il est nécessaire de prendre en compte un grand nombre de paramètres et de modéliser leurs interactions, les modèles analytiques sont préférables car ils sont rapides. Dans une seconde phase du processus de conception, où on cherche à améliorer les performances d'un composant par la prise en compte des phénomènes négligés ou encore difficiles à modéliser analytiquement, des modèles plus fins, éventuellement numériques, sont mieux adaptés. Les deux approches sont alors complémentaires et intégrables dans une méthodologie de conception qui repose sur l'association des deux. L'approche analytique répond aux spécifications d'un cahier des charges moyennant un certain

niveau d'hypothèses. L'approche numérique, fondée sur la MEF, analyse finement une structure prédéfinie en accédant aux grandeurs locales et aux évolutions spatio-temporelles.

Le présent travail a pour but de présenter un outil de dimensionnement rapide des machines électriques, en particulier pour les dispositifs électromécaniques excités par des aimants permanents. La méthode proposée est basée sur les équations analytiques des performances et de la structure de la machine. Cette méthode est alors une démarche analytique simple et facile à implémenter pour le dimensionnement des structures des machines synchrones à aimants permanents (MSAP).

Dans le premier chapitre introductif sont présentées quelques généralités sur les MSAP et leurs éléments constitutifs (point de fonctionnement de l'aimant, différents types de bobinage en fonction d'une application donnée, structures rotoriques usuelles excitées par des aimants permanents).

Une démarche complète pour le dimensionnement rapide des MSAP est ensuite exposée dans le deuxième chapitre.

Le dernier chapitre sera consacré à utilisation de la démarche développée précédemment pour déterminer les dimensions d'une MSAP destinée pour la traction dans un véhicule électrique urbain d'une puissance de 20 kW. Une validation de la structure trouvée sera réalisée par l'utilisation d'un modèle analytique plus précis développé dans le cadre d'un autre projet de fin d'étude [7].

CHAPITRE I :

Introduction sur les machines synchrones à aimants permanents

1. Introduction :

Ce chapitre sera consacré à une présentation des différentes structures des machines synchrones. L'accent sera mis sur la machine synchrone à aimants permanents MSAP qui est favorisée actuellement pour plusieurs applications notamment : la traction dans les voitures électriques et hybrides, la robotique, etc.

Les avantages de la MSAP par rapport aux autres machines sont nombreux : la puissance massique très élevée, un bon rendement, rapport puissance/volume meilleur par rapport aux autres machines.

2. Généralité sur les machines synchrones

Il existe trois types de MS : les moteurs synchrones à rotors bobinés (MSRB), les moteurs synchrones à aimants permanents (MSAP) et les moteurs à double excitation (MSDE). Les performances sont très différentes pour les uns et pour les autres [1-3].

2.1 Machines synchrones à rotor bobiné (MSRB):

Le stator de cette machine est identique à celui de la machine asynchrone, trois bobines alimentées par des courants alternatifs, par contre, le bobinage

rotorique est alimenté par un courant en continu via un système de contacte glissant (balais - bagues). La figure I.1 une MSRB à pôles saillants.

Un avantage du MSRB est de pouvoir régler très facilement le flux inducteur. Cela permet d'augmenter simplement la plage de vitesse du moteur en diminuant le courant d'excitation, c'est-à-dire en diminuant le flux d'excitation. Cependant, les contacts glissants limitent le fonctionnement aux très hautes vitesses de la machine à cause de l'usure des balais. En plus, le refroidissement des bobinages rotoriques est un peu compliqué.

En général, à cause des pertes joules rotoriques, les machines synchrones à rotor bobiné possèdent un rendement plus faible que celles à excitation par aimants permanents. De plus pour une même gamme de puissance, les machines à rotor bobiné sont 30% plus lourdes que les machines à aimants permanents.



Figure I.1. Machine synchrone à rotor bobiné à pôles saillants.

2.2 Machines synchrones à aimants permanent (MSAP):

De nos jours, pour les machines synchrones à aimants permanents il existe trois types de structures : la structure à flux radial, la structure à flux axial et la structure à flux transverse. La machine à flux radial est la plus répandue et la plus utilisée. Le flux dans l'entrefer est radial (ou perpendiculaire) à l'axe de rotation de la machine (Figure I.2). Pour la machine à flux axial, le flux dans l'entrefer est axial (ou tangentiel) à l'axe de rotation de la machine (Figure I.3). Pour des applications très spécifiques, telles que l'entraînement direct et les vitesses lentes, les concepteurs ont introduit la machine à flux transverse (Figure I.4). Le flux est à la fois perpendiculaire et tangentiel à l'axe de rotation de la machine. Pour la suite de la recherche bibliographique, on s'intéresse uniquement à la machine à flux radial [1-2].

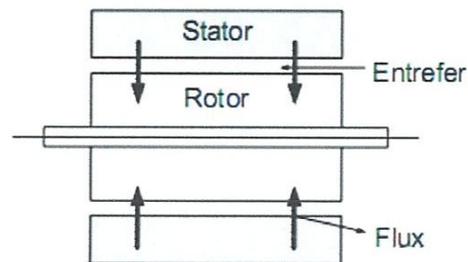


Figure I.2. Machine synchrone flux radial

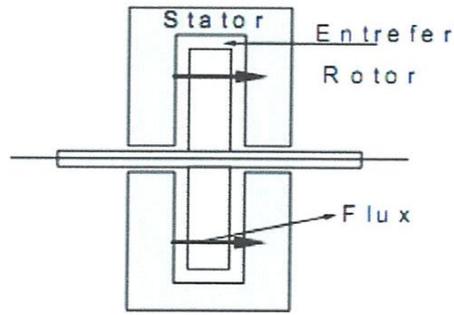


Figure I.3. Machine synchrone flux axial

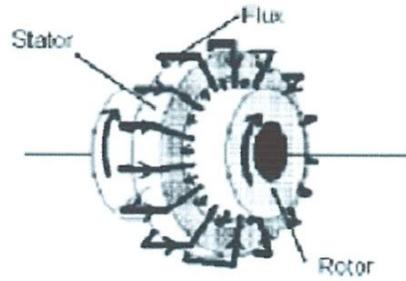
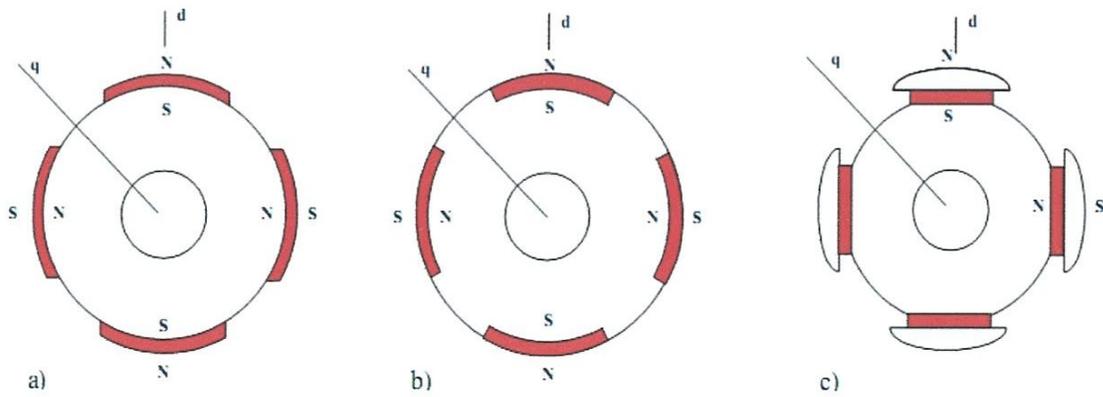


Figure I.4. Machine synchrone flux transverse



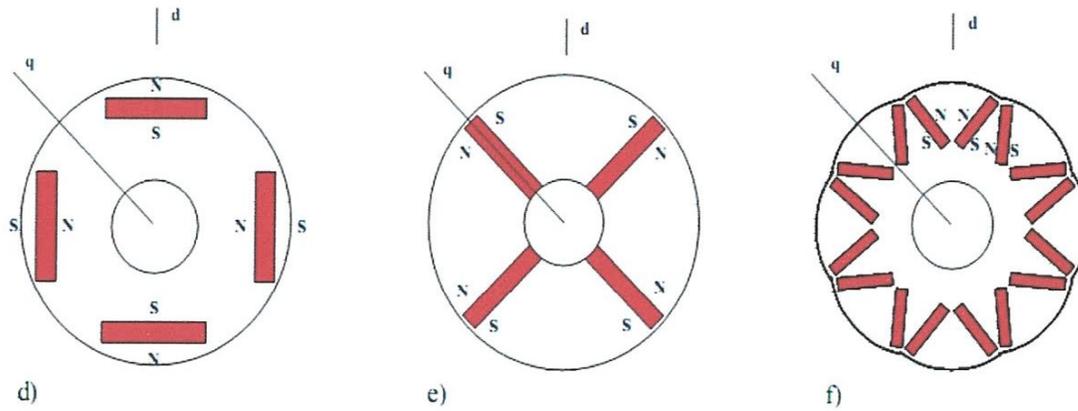


Figure I.5. Rotors à aimants permanents : a) aimants surfaciques radiales, b) aimants insérés, c) aimants surfaciques avec pièces polaires, d) aimants enterrés transversalement, e) aimants enterrés radialement, f) aimants enterrés en forme V.

Le stator des machines synchrones à aimants permanents à flux radial est semblable à celui de la machines à rotor bobinés. Par contre, l'excitation est créée par les aimants permanents. Il existe plusieurs sortes de configurations pour le placement des aimants permanents dans le rotor, nous avons représenté dans la figure I.5 les rotors des plus communes d'entre elles [2-3].

Les avantages communs dont disposent ces moteurs sont les valeurs élevées des rapports couple/masse et puissance/masse ainsi que leur bon rendement, puisque il n'y a pas de courants rotoriques. Aussi, Ils permettent un fonctionnement à facteur de puissance proche de l'unité et leur contrôle, quoique plus compliqué que celui du moteur à courant continu, paraît plus simple que celui du moteur asynchrone.

Cependant le prix des aimants est élevé et ne permet pas, à ce jour, de satisfaire la contrainte sur le prix de vente. Le fonctionnement en défluxage dans la zone de fonctionnement à puissance constante est difficile (commande de la machine complexe, risque de désaimantation, pertes électriques supplémentaires dues à l'augmentation du courant statorique).

Il existe, par ailleurs, d'autres inconvénients ou avantages, selon le type de machine à aimants permanents :

- ✓ Pour la machine de la figure I.5.a, il est nécessaire de fretter pour maintenir les aimants, et éviter qu'ils ne se désolidarisent du rotor à cause des forces centrifuges. Cette frette, qui est bien sûr amagnétique, pour éviter le court-circuit des aimants, constitue un entrefer additionnel qui vient se rajouter à l'entrefer mécanique, et augmente ainsi la valeur de l'entrefer réel. De plus, les aimants possèdent une perméabilité relative proche de celle de l'air. Les enroulements d'induit (stator) voient donc une réluctance magnétique assez importante, la réaction magnétique d'induit s'en trouve affectée, relativement faible pour ce type de machine. Une difficulté de défluxage s'ensuit. D'autre part, il existe un risque de démagnétisation irréversible des aimants par la réaction magnétique d'induit qui les traverse, même si elle est a priori assez faible.

- ✓ Pour les machines des figures I.5, b et c, le maintien des aimants en place est plus simple. Ces machines souffrent globalement des mêmes problèmes que la précédente. Cependant elles possèdent un avantage par rapport à la précédente. La présence d'un couple réluctant, dû aux saillances du rotor, permet d'augmenter le couple massique d'environ 20%.

- ✓ Pour le rotor de la figure I.5.d, comme pour la machine de la figure I.5, b et c, il existe un couple réluctant qui permet d'améliorer les performances en termes de couple. De plus l'entrefer pour ce type de rotor peut être minimisé par rapport aux deux autres machines précédentes, les aimants étant naturellement tenus par les tôles rotor.

Cela permet d'avoir une réaction magnétique d'induit relativement plus élevée que pour les précédentes configurations, et par suite un meilleur défluxage. La Toyota "PRIUS" est équipée d'une structure de ce type [2]. Pour les quatre structures des figures I.5, a, b, c et d, il faut utiliser des aimants terres rares ($B_r \geq 1$ T) afin d'avoir de bonnes performances. Ces aimants sont les plus coûteux sur le marché, par comparaison, les aimants ferrites ($B_r = 0,4$ T) coûtent eux 25 fois moins cher.

- ✓ La figure I.5, e et f, représente le rotor des machines à aimants permanents dite à concentration de flux. L'utilisation du principe de la concentration de flux, permet d'avoir une valeur d'induction assez élevée tout en utilisant des aimants ferrites. Cela permet d'avoir de bonnes performances en couple avec un coût réduit. En terme de défluxage, les performances de ce type de machine ne sont pas très bonnes. Le risque de démagnétisation existe, ici aussi, car le flux de réaction magnétique d'induit traverse les aimants.

Nous avons présenté, dans ce qui a précédé, les différents types de machines électriques à aimants permanents et l'accent a été mis sur les machines à flux radial. Mais cette liste est loin d'être exhaustive, tellement le domaine des machines électriques est vaste. On est même loin d'avoir fait le tour des machines à flux radial. Le problème du choix d'un actionneur pour une application donnée est loin d'être résolu, et ce n'est qu'avec le temps en ayant le recul nécessaire que des solutions verront le jour.

2.3 Machines synchrones à double excitation (MSDE):

Les machines synchrones double excitation permettent de lever un des inconvénients majeurs des MSAP en permettant de contrôler le flux inducteur et donc d'améliorer le fonctionnement sur une large plage de vitesses tout en

ne sacrifiant pas le facteur de puissance. En effet, pour ce type de machine, le flux d'excitation est créé par deux sources différentes ; l'une est à aimants permanents, l'autre bobinée [2-3]. Le but recherché étant d'utiliser la deuxième source d'excitation (bobinée) pour contrôler le flux total dans l'entrefer.

Selon la manière dont sont agencés les deux circuits d'excitation il y a plusieurs types de machines à double excitation. Nous allons les classer en deux catégories :

- ✓ Machine synchrone à double excitation série, figure I.6 : le flux de l'excitation bobinée traverse les aimants. Les flux d'excitation bobiné et celui des aimants empruntent le même chemin. La réduction du flux dans l'entrefer est réalisée en injectant dans les bobines d'excitation un courant qui crée une FMM opposée à celle des aimants. L'inconvénient est que les bobines d'excitation sont magnétiquement en série avec les aimants. Ces derniers possèdent une perméabilité proche de celle de l'air, les bobines d'excitation voient donc une réluctance magnétique élevée, ce qui réduit considérablement l'efficacité du défluxage par les bobines.

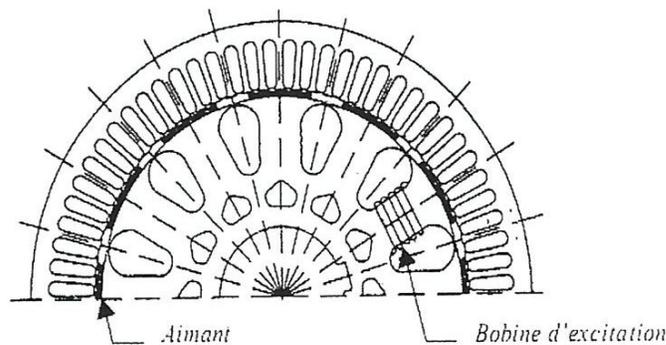


Figure I.6. Machine à double excitation série

- ✓ Machine synchrone à double excitation parallèle, figure I.7: dans cette configuration, les flux des aimants et de l'excitation bobinée n'ont pas le même trajet tout le temps. Le flux de l'excitation bobinée ne traverse pas les aimants, le risque de démagnétisation des aimants par l'excitation bobinée est ainsi écarté. La double excitation parallèle offre beaucoup de possibilités d'agencement des deux circuits d'excitation.

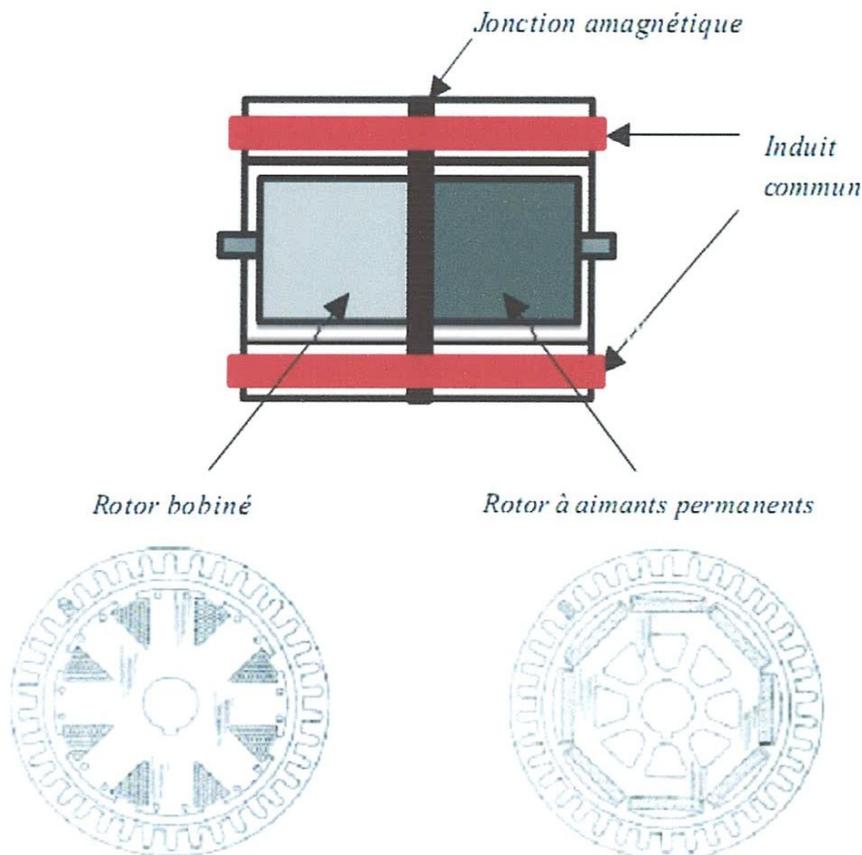


Figure I.7. Machine à double excitation parallèle

A cause de l'utilisation de la deuxième source bobinée, ces machines vont avoir un couple massique et un rendement plus faible qu'une MSAP, sans compter la complexité de ces structures.

3. Bobinages des enroulements statoriques

Dans la littérature scientifique, il existe deux principales façons de bobiner une machine électrique quelque soit la direction du flux: le bobinage reparti (ou distribué), figure I.8 et I.9, et le bobinage concentré (ou sur dents), figure I.10 et I.11.



Figure I.8: stator d'une machine à flux radial [1]

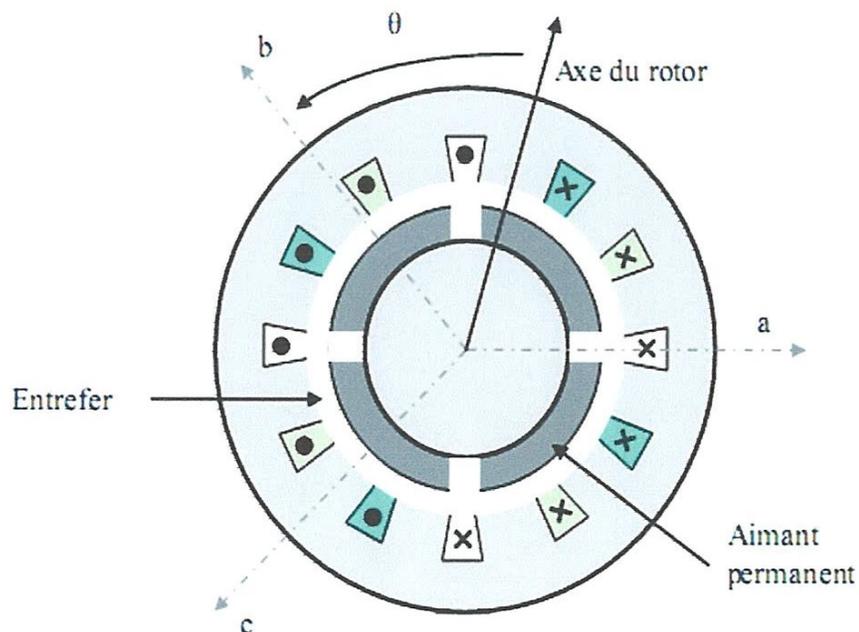


Figure I.9: Bobinage réparti pour machine à flux radial [1]

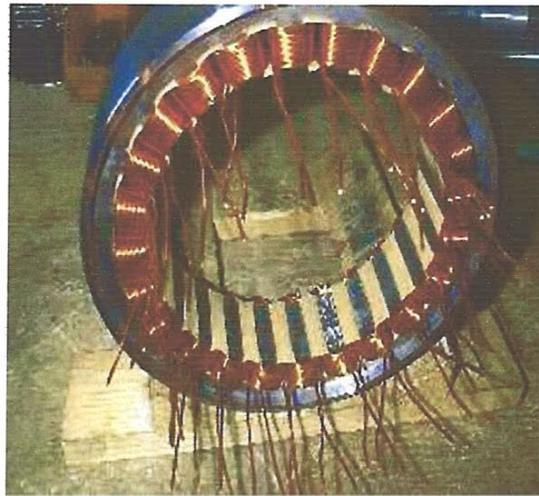


Figure I.10 : Bobinage concentré pour machine à flux radial [1]

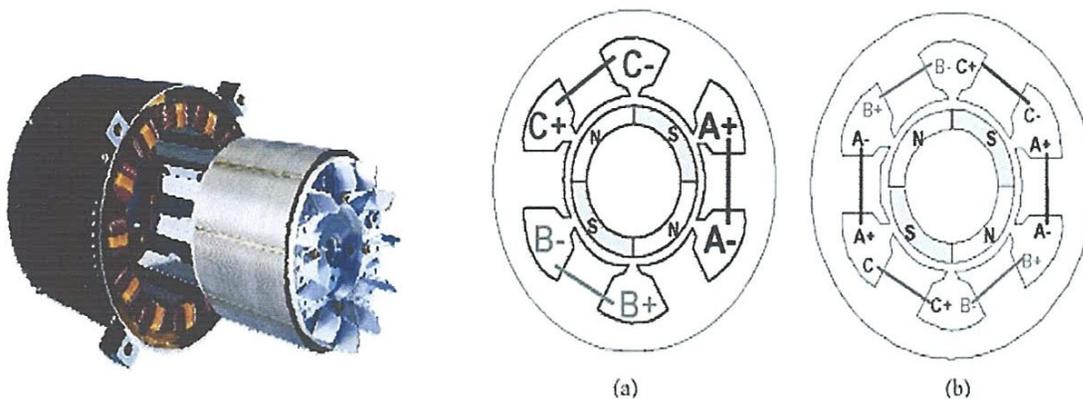


Figure I.11 : Bobinage concentré sur dents [1]

Le bobinage reparti est le bobinage le plus utilisé dans l'industrie. Historiquement, ce bobinage fut le premier à équiper les machines électriques. Des trois bobinages, c'est le bobinage le plus simple à modéliser analytiquement. Toutefois les têtes de bobines sont le principal inconvénient car elles sont source de pertes par effet joule.

C'est pourquoi, les concepteurs de machines électriques ont développé le bobinage Concentré (ou bobinage sur dents), Figure I.10. Comme son nom l'indique, la bobine n'englobe qu'une dent au lieu de plusieurs dents pour le bobinage reparté. Par cette méthode, les têtes de bobines sont réduites et par conséquent les pertes Joule diminuées. Bien qu'il soit de plus en plus fréquemment utilisé dans les machines électriques, très peu d'études ont été menées sur ce bobinage pour les machines à aimants permanents.

4. Aimants permanents

4.1 Généralités

Pour l'excitation rotorique, les aimants permanents ont remplacé le bobinage rotorique depuis une vingtaine d'années maintenant.

Pourtant connus à l'époque des grecs, les aimants permanents n'ont connu leurs réels développements que depuis les années 1930. A l'heure actuelle, il existe quatre familles d'aimants permanents. Ce sont les Alnico (ou Ticonal), les ferrites dures, les aimants permanents Samarium- Cobalt et les aimants permanents Néodyme-Fer-Bore.

Au cours des années 1930, les Alnico furent les premiers aimants permanents industrialisés. Composés d'aluminium, de nickel et de cobalt, ils sont très peu utilisés de nos jours du fait de la présence de cobalt (très coûteux) et de leurs modestes propriétés magnétiques notamment leur faible champ coercitif. Néanmoins, des applications de niches telles que les appareils de mesure et le domaine de la haute température utilisent ces aimants dotés d'une très bonne stabilité thermique [1-2].

Apparus dans les années 50, les ferrites dures (hexa ferrites de baryum ou de strontium) sont parmi les aimants les plus utilisés à l'heure actuelle.

Malgré des performances magnétiques limitées, ils restent compétitifs grâce à leur très faible cout de production.

Les aimants permanents samarium cobalt (SmCo), apparus dans les années 60, sont dotes de performances magnétiques très élevées supplantant dans ce domaine les deux familles précédentes. Résistants à la corrosion et stables en température, ils sont en revanche chers (présence de cobalt). Leurs applications sont limitées à des domaines ou le cout n'est pas un critère majeur (en particulier les hautes températures).

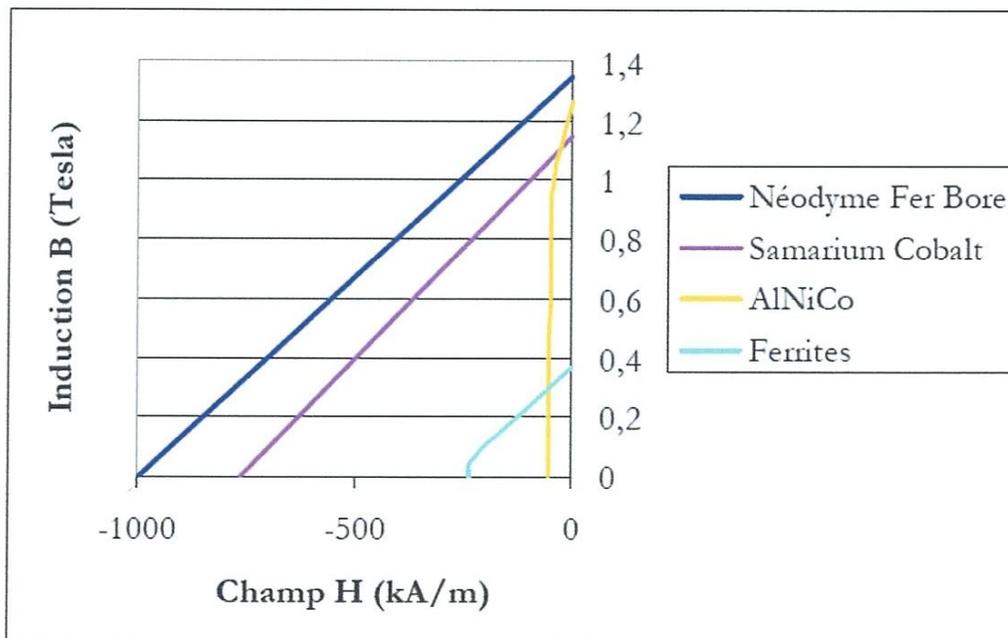


Figure I.12: Courbes de caractérisation des aimants

Enfin les plus récents, les aimants permanents néodyme fer bore (NdFeB), découverts dans les années 80, sont les aimants les plus utilisés dans l'industrie. En effet, ils combinent d'excellentes propriétés magnétiques et un faible cout d'exploitation (le néodyme est une terre rare plus répandue que le samarium). Très sensibles à la corrosion, ils ne peuvent être utilisés seulement qu'après avoir été recouverts d'une couche protectrice. Leur température de Curie, comprise entre 310 et 330 °C contre 700 à 850 °C pour les SmCo, handicap majeur de ces aimants, limite leurs domaines d'application.

Pour la suite, dans notre démarche de conception d'une MSAP, le choix s'est porté naturellement vers les aimants permanents néodyme fer bore qui offrent des performances magnétiques élevées pour un cout d'exploitation abordable.

5. Méthode de modélisation des machines électriques

Des nos jours, nous disposons d'une longue expérience sur la modélisation analytique des machines tournantes. En effet, il existe une littérature très riche concernant la modélisation, englobant une expérience de plus d'un siècle de recherche, d'expérimentation et de savoir-faire.

Dans la littérature, nous discernons plusieurs approches concernant la modélisation des machines électriques. En choisissant de les présenter par leur degré de complexité croissante, nous avons :

- La modélisation par une approche externe (équations électriques).
- La modélisation par une approche interne (formalisme de Maxwell).
- La modélisation par réseaux de perméance.
- La modélisation par éléments finis.

L'approche externe utilise les relations entre tensions, courants, flux, avec comme paramètres les inductances et les résistances. C'est une vision en termes de circuits. Les modèles obtenus pour un fonctionnement quelconque sont lourds. L'application des transformations de Concordia et de Park permet de les rendre plus commodes. Ces modèles sont également ceux qui ont été utilisés pour la réalisation de la commande des machines.

L'approche interne repose sur l'application des équations de Maxwell. Cette méthode est indispensable pour l'explication des phénomènes tels que l'effet de peau dans les conducteurs, les courants de Foucault, ... cette méthode est utilisée plutôt par les concepteurs. Une méthode simplifiée, basée sur cette approche, sera détaillée dans le deuxième chapitre de ce mémoire.

La modélisation par réseaux de perméance, quant à elle, permet de prendre en compte la non linéarité tout en ayant un coût de calcul inférieur aux modèles basés sur la méthode d'éléments finis. Cela consiste à modéliser le circuit magnétique de la machine par un schéma électrique équivalent. La principale difficulté se situe au niveau de la représentation de l'entrefer de la machine. L'erreur de modélisation est très sensible au modèle utilisé pour la perméance de l'entrefer. Cette méthode constitue un intermédiaire entre la modélisation à partir du formalisme de Maxwell et la modélisation par éléments finis. Elle est inadéquate pour une optique de contrôle-commande mais elle est très intéressante pour tester la robustesse des algorithmes de commande. Aussi elle s'adapte parfaitement avec les problèmes de conception (rapide ou optimisé).

Finalement, la modélisation par éléments finis est la méthode la plus précise. Hélas, le temps de calcul offert par cette approche est rédhibitoire. Néanmoins, lors d'un dimensionnement ou lors d'une estimation des paramètres de la machine, sa précision justifie son utilisation. Des logiciels tels que Flux-3D et Maxwell-3D permettent la modélisation par éléments finis des dispositifs électromagnétiques. Ce type d'approche est également utilisé lors d'un dimensionnement d'une machine électrique, ou bien pour l'ajustement des paramètres d'un modèle par réseaux de perméance.

6. Conclusion

Après avoir passé en revue les différentes structures des machines électriques synchrones, nous ne sommes intéressé beaucoup plus à la machine à aimants permanents et en particulier celle à flux radial.

En effet, parmi les machines synchrones à aimants permanents, la machine à flux radial est de loin la plus utilisée dans de nombreuses applications et elle ne cesse de conquérir d'autres domaines réservés jusqu'à présent à d'autres types de machines (MCC, machines asynchrones, machine à reluctances variables, etc...).

Ce chapitre a été terminé par une présentation des différents types d'aimants permanents utilisés dans la fabrication des MSAP. A l'issue de cette recherche bibliographique sur les aimants, nous constatons, que les néodymes-fer-bore à base de terres rares sont les plus performants et les plus favorisés par les industriels.

CHAPITRE II :

Développement d'une démarche de conception préliminaire des MSAP

1. Introduction :

Dans ce chapitre, nous cherchons à établir des modèles de dimensionnement rapide des machines synchrones à aimants permanents à flux radial. Ces modèles sont basés sur des expressions analytiques simples des performances de la machine telle que le couple électromagnétique et l'induction magnétique dans l'entrefer.

En effet, nous commençons d'abord par la présentation de la démarche de conception des machines électriques puis nous expliquons la méthode retenue pour notre cas étude.

2. Etapes de dimensionnement

Afin d'obtenir un dimensionnement optimal d'une machine électrique, on passe généralement par les étapes suivantes [4] :

2.1 Pré-dimensionnement (dimensionnement rapide)

Dans cette étape nous cherchons à trouver une solution initiale qui servira de point de départ pour le dimensionnement optimal de la structure [4], [6]. Pour cela, des méthodes basées sur des modèles analytiques simplifiés et les données du cahier des charges sont généralement utilisées pour faire un premier dimensionnement rapide dont les résultats peuvent être relativement réalistes.

2.2 Dimensionnement optimal (final)

Dans cette étape, nous utilisons les dimensions initiales, déterminées précédemment, dans une démarche de conception optimale utilisant des

modèles (analytiques ou numériques) souvent plus précis que ceux utilisés dans le pré-dimensionnement. Ces modèles doivent prendre en compte l'ensemble des caractéristiques du moteur telles que : les expressions des performances du moteur (couple moyen, force électromotrice, rendement etc.), les critères à optimiser et l'ensemble des contraintes posées par le cahier des charges. Donc, cette étape nécessite des modèles suffisamment précis et des méthodes d'optimisation adaptées à ce genre de problème (multi-objectif, non linéaire, contraint et à variable discrètes).

2.3 Validation par éléments finis (vérification)

Cette étape a pour but de vérifier les performances de la structure optimale issue de l'étape précédente (dimensionnement final). Ces performances sont généralement : le couple, la FEM et les niveaux des inductions dans les différentes régions du moteur. Cette phase, permet aussi de vérifier la démarche de conception et les modèles analytiques utilisés.

Dans notre étude, nous nous limitons uniquement au premier cas de dimensionnement rapide pour concevoir une machine synchrone à aimants permanents qui répondra à un cahier de charge destiné pour la traction dans un véhicule électrique urbain.

3. Méthode de pré-dimensionnement rapide de la machine synchrone à aimants permanent

3.1 Configuration de la machine

Soit une machine synchrone à aimants permanents, constituée de trois phases au stator et des aimants permanents au rotor de type (NdFeB) avec p pair de pôles. La configuration de la machine ainsi que les paramètres

géométriques de la machine utilisée lors de la Modélisation sont représentés sur la figure (II.1).

3.2 Définition des paramètres

Nous allons ici définir les paramètres géométriques de la machine que nous utiliserons lors de la modélisation.

l_m : Epaisseur radiale de l'aimant au rotor.

g : Epaisseur d'entrefer.

w_m : Largeur d'aimant pour un pôle.

w_s : Largeur d'une encoche statorique.

w_t : Largeur d'une dent statorique.

d_s : Profondeur d'encoche.

d_y : Profondeur de la culasse de la machine.

l_r : Longueur active de la machine.

r_s : Rayon d'alésage de la machine.

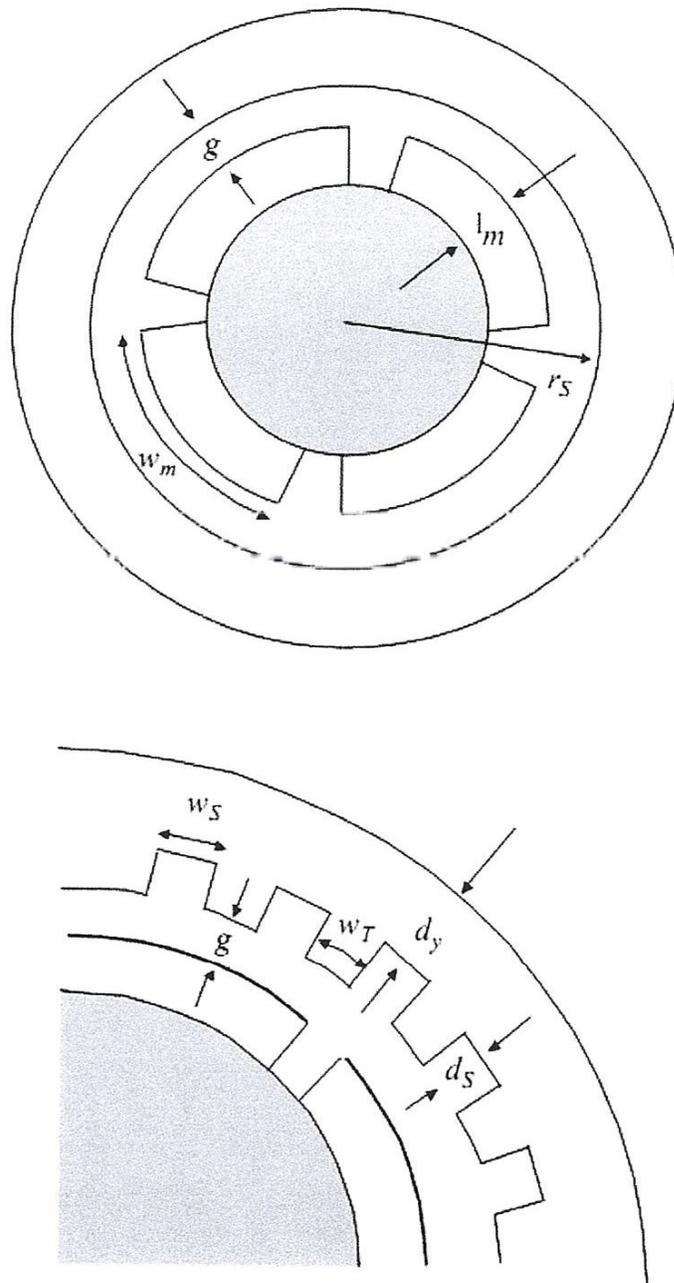


Figure II.1 : MSAP étudiée.

3.3 Démarche de dimensionnement

La démarche de dimensionnement que nous allons utiliser dans ce travail a été développée en 1992 par G. Slemon. Cette démarche a été utilisée dans plusieurs travaux de recherches par d'autres personnes [6].

Cette démarche consiste à déterminer, dans un premier temps, le rayon d'alésage de l'actionneur r_s . Partons de l'expression analytique du couple électromagnétique de la machine, qui peut s'exprimer de la manière suivante, [6]:

$$C_{em} = 2 \pi r_s^2 l_r B_{1a} K_{1s} \quad (\text{II.1})$$

Dans l'expression (II.1), K_{1s} représente la densité linéique de courant (A/m) et B_{1a} la valeur efficace du fondamental de l'induction dans l'entrefer (T).

Pour calculer le rayon d'alésage r_s il faut déterminer toutes les inconnues de l'équation précédentes.

a) Calcul de la valeur efficace du fondamental de l'induction dans l'entrefer B_{1a}

Considérons une machine à aimants permanents triphasée à p paires de pôles. Les aimants rotoriques présentent une aimantation de type radiale B_R , et l'on peut représenter l'induction $B_a(\theta)$ créée par un aimant dans l'entrefer par la courbe de la figure II.2.

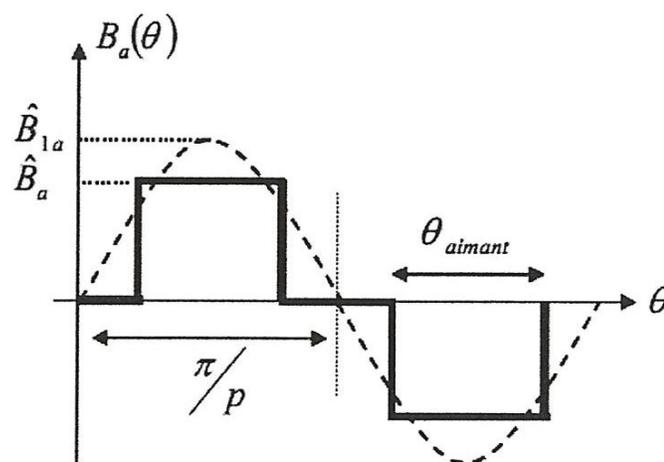


Figure II.2 : Allure de l'induction créée par un aimant dans l'entrefer

La valeur crête de l'induction \hat{B}_a est déduite de la valeur de l'induction rémanente radiale de l'aimant B_R par la relation :

$$\hat{B}_a = B_R \frac{\frac{l_m}{\mu_r}}{K_c g + \frac{l_m}{\mu_r}} \quad (II.2)$$

où μ_r est la perméabilité relative de l'aimant (pour les aimants terres notamment elle est de l'ordre de 1.05). L'équation (II.2) peut être modifiée pour faire apparaître un terme structurel sans dimension définissant par le rapport entre l'épaisseur d'aimant l_m et l'entrefer corrigé par le coefficient de Carter K_c . Ce dernier prend en compte de manière moyenne les effets de la denture statorique sur la valeur de l'entrefer, de telle sorte que $g' = K_c g$. Traditionnellement, le coefficient de Carter est très proche de 1. Pour notre cas, nous pouvons, en première approximation pour les calculs, poser $K_c=1$. Ainsi, l'expression (II.2) devient :

$$\hat{B}_a = B_R \frac{\frac{l_m}{g'}}{\mu_r + \frac{l_m}{g'}} \quad (II.3)$$

Typiquement : $3 < \frac{l_m}{g'} < 5$

En définissant le coefficient de remplissage d'un pôle par $K_p = \frac{p\theta_{aimant}}{\pi}$, nous définissons l'angle α_{aimant} par :

$$\alpha_{aimant} = \frac{\pi}{2} K_p = \frac{p\theta_{aimant}}{2} \quad (II.4)$$

Une décomposition en série de Fourier de la forme de l'induction d'entrefer donnée par la figure II.2, permet d'extraire la valeur crête du fondamental de l'induction, cette valeur est donnée par l'équation:

$$\hat{B}_{1a} = \frac{4}{\pi} \hat{B}_a \sin \alpha_{aimant} \quad (II.5)$$

De l'équation (II.5), on peut déduire la valeur efficace du fondamentale (équation II.6). En effet cette valeur est utilisée dans l'équation (II.1) pour calculer le rayon d'alésage.

$$\hat{B}_a = \frac{\hat{B}_{1a}}{\sqrt{2}} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \hat{B}_a \sin \alpha_{aimant} \quad (II.6)$$

b) Densité linéique de courant K_{1s}

La densité de courant linéique K_{1s} est liée à la densité surfacique de courant dans les encoches J_s (A/m^2), à la dimension des encoches et au facteur de remplissage des encoches K_R . Le coefficient de remplissage K_R caractérise le rapport entre la surface d'encoche effectivement remplie par du cuivre et la surface d'encoche totale. Ainsi, nous pouvons écrire :

$$K_R = S_{cuiivre} / d_s w_s \quad (II.7)$$

Typiquement, $0.4 < K_R < 0.6$.

La surface d'encoche vaut $d_s w_s$. La densité de courant dans l'encoche vaut donc : $J_{enc} = J_s d_s w_s K_R$.

La densité linéique de courant peut alors s'exprimer par la moyenne de la densité du courant d'encoche sur un pas d'encoche (encoche + dent) :

$$K_{1s} = \frac{J_s w_s d_s}{w_s + w_T} K_{B1} K_R \quad (II.8)$$

K_{B1} est le facteur de bobinage. Il permet de prendre en compte les particularités du bobinage telles que le raccourcissement, l'inclinaison ou la distribution.

Pour notre modèle, nous supposons que le bobinage est à pas diamétral, de sorte que le coefficient de raccourcissement est unitaire. Le facteur d'inclinaison permet de prendre en compte le décalage des tôles statoriques, destiné à diminuer les perturbations dues à l'encoche en créant des encoches inclinées le long du rotor. Nous choisissons de négliger cet effet. Le facteur de bobinage se limite alors au terme fondamental du facteur de distribution.

$$K_{B1} = \left| \frac{\sin \frac{\pi}{6}}{N_{ep} \sin \frac{\pi}{6N_{ep}}} \right| \quad (II.9)$$

où N_{ep} est le nombre d'encoches par pôle et par phase.

En considérant que la largeur d'une encoche et la largeur d'une dent sont égales ($w_s = w_T$), les hypothèses précédentes permettent d'écrire le couple électromagnétique de la façon suivante :

$$C_{em} = \pi r_s^2 l_r B_{1a} d_s J_s K_r K_{B1} \quad (II.10)$$

Afin d'extraire la valeur du rayon d'alésage r_s de l'actionneur, nous introduisons deux rapports permettant de réduire le nombre d'inconnues de l'équation du couple précédente:

- Rapport rayon d'alésage / longueur active $R_{rl} = r_s / l_r$. Typiquement R_{rl} peut être compris entre 0.1 (machines longues) et 10 (machines plates).

- Rapport profondeur d'encoche / rayon d'alésage $R_{dr} = d_s / r_s$.
Typiquement R_{dr} peut être compris entre 0.2 et 0.5.

Le couple électromagnétique devient :

$$C_{em} = \pi r_s^4 R_{rl}^{-1} B_{1a} R_{dr} J_s K_r K_{B1} \quad (\text{II.11})$$

A partir de cette équation, le rayon d'alésage r_s de l'actionneur s'exprime alors par :

$$r_s = \left(C_{em} R_{rl} \frac{1}{\pi B_{1a} R_{dr} J_s K_r K_{B1}} \right)^{1/4} \quad (\text{II.12})$$

L'équation (II.12) pose d'ores et déjà le problème du choix de certaines des variables d'optimisation de l'actionneur. Quels paramètres d'entrée choisir pour caractériser ces dimensions géométriques ?

Ce choix fait partie des décisions importantes à prendre par rapport à la stratégie de modélisation. Le rayon d'alésage dépend de plusieurs grandeurs qui ne seront pas toutes mentionnées dans le cahier des charges. Une fois encore, il faut faire un compromis. D'un côté, le nombre de variables de conception doit être suffisamment élevé pour permettre une bonne description de l'objet. D'un autre coté il faut privilégier la simplicité du modèle.

Par rapport à ces considérations, nous avons choisi d'imposer le facteur de remplissage des pôles à $K_p = 0.833$. Cette valeur correspond à une valeur de $\alpha_{aimant} = 75^\circ$. En effet, le volume des aimants et leur coût sont directement proportionnel à α_{aimant} . Or, une augmentation de α_{aimant} de $\pi/3$ à $\pi/2$ (soit 33% de variation) n'entraîne qu'une augmentation de 15% de la valeur de

l'induction efficace dans l'entrefer. Cette valeur permet d'assurer un bon rapport entre le volume d'aimant et la valeur efficace de l'induction dans l'entrefer. De plus, choisir $\alpha_{aimant} = 75^\circ$ permet d'assurer un bon compromis concernant la minimisation simultanée des harmoniques 5 et 7 du couple de détente de l'actionneur [6].

De plus, l'aimantation rémanente et la perméabilité relative des aimants dépendent des caractéristiques et de la température des aimants. Dans notre application, nous avons choisi des aimants de type Néodyme Fer Bore ($b_r = 1.1T$ et $\mu_r = 1.05$).

Nous imposons également la valeur du rapport profondeur d'encoche / rayon d'alésage de sorte que $R_{dr} = 0.25$. Ainsi que le coefficient de remplissage d'encoche ($K_r = 0.5$) représente le pourcentage de la surface d'encoche occupée par les conducteurs.

Nous avons donc considéré que ces paramètres étaient peu intéressants par rapport aux autres grandeurs caractérisant le couple électromagnétique.

Ainsi, nous dégageons à ce stade quatre variables de conception nous paraissant pertinentes pour le modèle de l'actionneur électrique, ces variables sont : C_{em} , R_{rl} , p et J_s . Donc ces variables seront considérées comme les entrées du modèle de dimensionnement.

Après la détermination du rayon d'alésage, calculé en fonction des quatre variables de conception. Nous pouvons déterminer facilement les autres dimensions de la machine à l'aide des relations suivantes :

- La longueur active de la machine l_r vaut:

$$l_r = \frac{r_s}{R_{rl}}$$

- La profondeur des encoches d_s vaut :

$$d_s = R_{er} r_s$$

- La valeur de l'entrefer est calculée par la relation empirique suivante:

$$g = 0.001 + 0.003 \sqrt{r_s l_r}$$

- Le nombre d'encoches au stator N_{enc} se déduit du nombre d'encoches par pôle et par phase N_{ep} :

$$N_{enc} = 3pN_{ep}$$

- La largeur des dents et encoches s'écrit :

$$w_s + w_T = \frac{\pi r_s}{N_{enc}}$$

- L'épaisseur de l'aimant est donnée par:

$$l_m = k_c g \frac{\mu_r}{\frac{B_R}{\hat{B}_a} - 1}$$

- La valeur de la profondeur d_y de la culasse évaluée en considérant que:

La valeur maximale du flux dans la culasse Φ_y vaut la moitié du flux Φ_a produit par les aimants alors :

$$\Phi_y = \frac{1}{2} \Phi_a$$

La valeur maximale du flux s'obtient par intégration de l'induction sous un pôle :

$$\Phi_a = \int_0^{\theta_{aimant}} \hat{B}_a dS = \int_0^{\theta_{aimant}} \hat{B}_a l_r r_s d\theta = \hat{B}_a l_r r_s \theta_{aimant}$$

De la même manière, l'expression du flux canalisé par la culasse d'épaisseur d_y vaut, figure II.3 :

$$\Phi_y = d_y l_r B_y$$

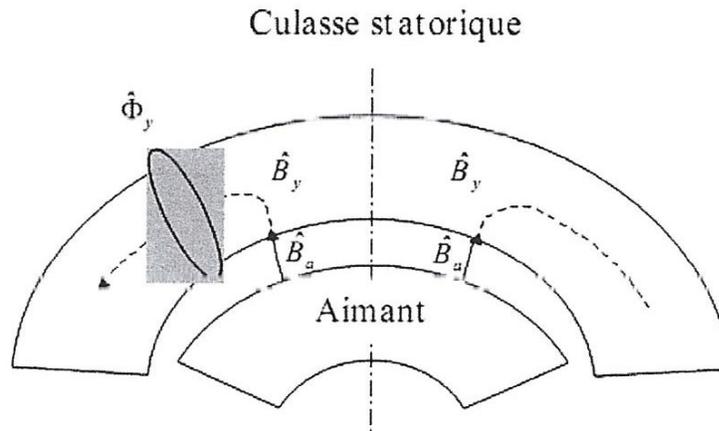


Figure II.3 Répartition de l'induction des aimants dans la culasse

La culasse est dimensionnée en fonction du niveau d'induction que l'on y tolère. En règle générale, la valeur maximale \hat{B}_y de l'induction dans la culasse vaut entre 1.4 et 1.6 T (nous choisissons ici : $\hat{B}_y = 1.5$).

Nous pouvons alors exprimer l'épaisseur de la culasse par la relation :

$$d_y = \frac{r_s \hat{B}_a}{p \hat{B}_y} \alpha_{aimant}$$

Les dimensions géométriques de la machine synchrone sont à ce stade complètement déterminées.

4. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté une démarche de dimensionnement préliminaire des machines synchrones à aimants permanents à flux radial. Cette méthode directe utilise des équations analytiques simples du couple et de l'induction dans l'entrefer pour déterminer en premier lieu le rayon d'alésage. Puis les autres grandeurs se calculent directement à partir des équations et des hypothèses fixées au début des calculs.

Le modèle de dimensionnement final est basé sur quatre variables importantes qui sont fixées généralement par le cahier des charges, ces grandeurs sont : le couple électromagnétique, le nombre de paire de pôles, le rapport entre le rayon d'alésage et la longueur active et finalement la densité surfacique de courant.

CHAPITRE III:

**Dimensionnement d'une MSAP
destinée par la traction électrique**

pour

1. Introduction :

Dans le troisième chapitre, on utilisera la démarche de dimensionnement développé précédemment pour déterminer les dimensions d'une MSAP destinée pour la traction dans un véhicule électrique urbain.

Nous commençons au début par la précision du cahier des charges de l'application considérée. Puis nous appliquons la démarche proposée pour le dimensionnement de la MSAP suivant les données du cahier des charges.

Ce chapitre sera terminé par validation de la démarche par une vérification des performances de la machine obtenue. Pour cette validation nous utiliserons un modèle analytique développé dans un autre projet de fin d'étude [7].

2. définition du cahier des charges

Pour valider cette démarche de conception, nous allons l'appliquer pour dimensionner une machine synchrone à aimants permanents destinée pour la traction dans un véhicule électrique urbain d'une puissance de 20 kW [1].

Pour les véhicules urbains, les vitesses de fonctionnement sont faibles et le couple demandé doit être assez important pour assurer des démarrages rapides (bonne reprise). Pour ces raisons, nous choisissons un nombre de paires de pôles égale à 4 (8 pôles).

Les autres paramètres utilisés pour le dimensionnement sont les suivant :

$R_{dr}=0.25$; rapport entre profondeur d'encoche/rayon alésage

$R_{rl}=1$; rapport entre rayon d'alésage/longueur active

$B_r=1.1$; l'aimentation rémanent

$\mu_r=1.05$; perméabilité relative de l'aimant

$K_r=0.5$; coefficient de remplissage d'encoche

$B_{y_{max}}=1.5$; induction maximale supportable dans la culasse

$N_{epp}=1$; nombre d'encoche par pôle et par phase

$K_e=0.5$; rapport entre l'ouverture d'encoche/pas d'entaille

$J_s=5 \cdot 10^6$; densité de courant surfacique en $[A/m^2]$

$I_n=25 A$; courant nominal admissible par phase

$m=3$; nombre de phases

$K_a=0.8333$; rapport entre ouverture aimant/pas polaire

$K_c=1.05$; coefficient de carter

$l_{mg}=4$; rapport entre épaisseur aimants /entrefer $3 < l_{mg} < 5$

A partir de la puissance électrique et de la vitesse mécanique, on peut déterminer le couple électromagnétique : $C_{em}= 191 N.m$

3. dimensionnement de la MSAP

L'utilisation des paramètres définis dans le cahier des charges, dans la démarche de dimensionnement proposée donne les dimensions suivant :

variable	valeur	désignation
r_s	0.1064 m	Rayon d'alésage
L_r	0.1064 m	Longueur active
d_s	0.0266 m	Profondeur d'encoche
e	0.0013 m	Entrefer
w_s	0.0139 m	Largeur d'encoche
l_m	0.0055 m	Epaisseur de l'aimant
d_y	0.0121 m	Epaisseur de la culasse
N_{enc}	52	Nombre de conducteur par phase

Tableau III.1 dimensions calculées de la MSAP

4. Validation des résultats

Pour valider les résultats trouvés, nous avons utilisé les dimensions déterminés précédemment dans un modèle analytique qui calcul les performances de la machine synchrone à aimants permanents par la résolution analytique des équations de Maxwell. Ce a été développé et validé par un logiciel de calcul numérique par éléments finis dans un autre projet de fin d'étude.

Les résultats de validation sont donnés par les figures suivantes :

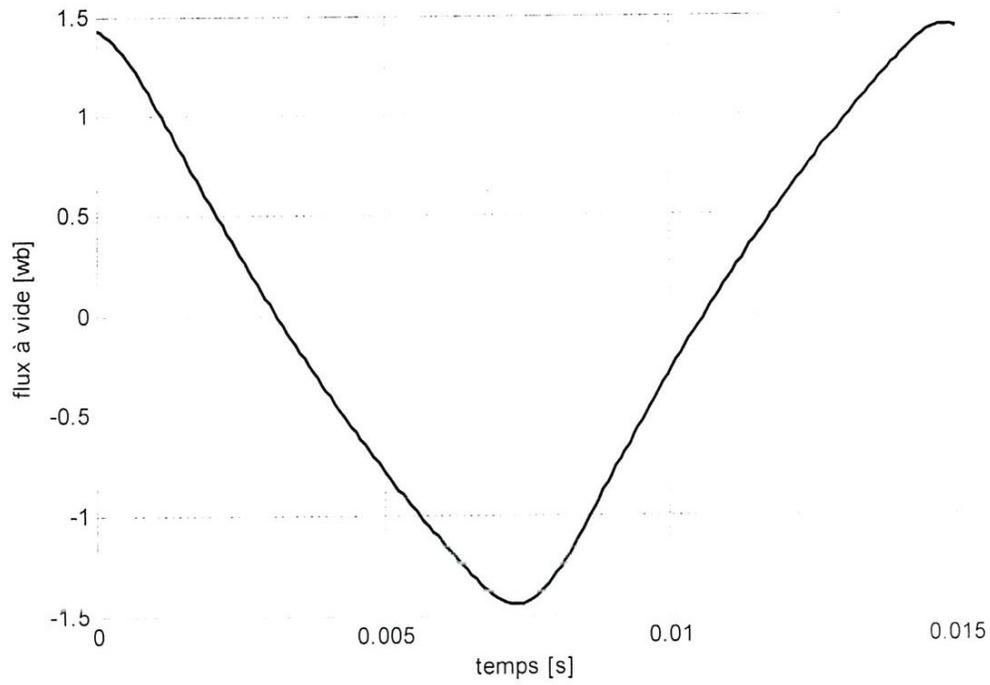


Figure III.1 flux à vide par phase

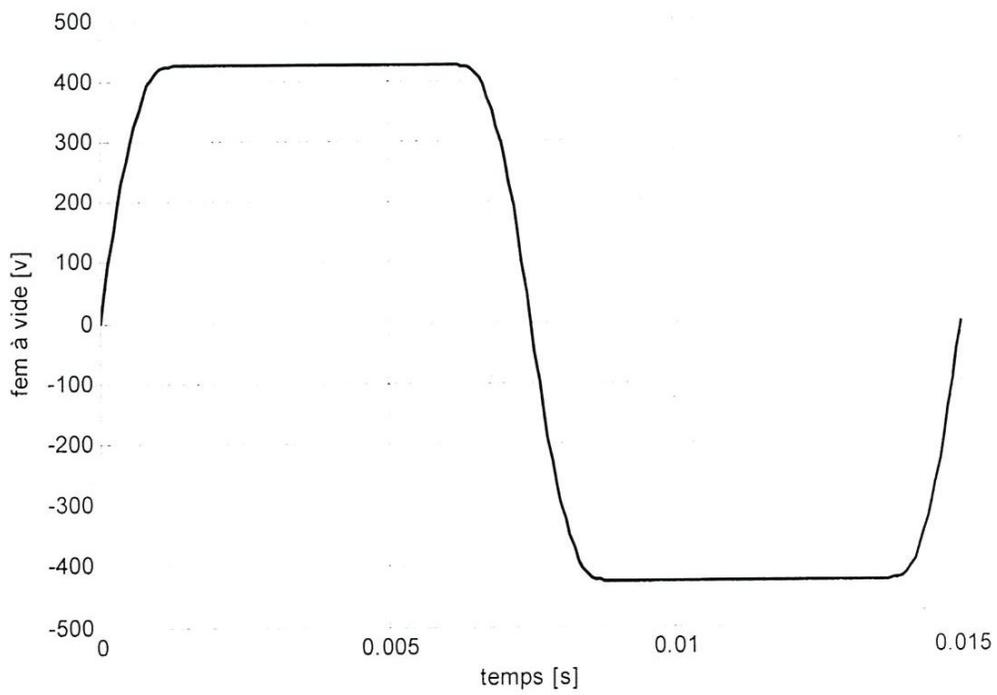


Figure III.2 FEM à vide aux borne d'une phase

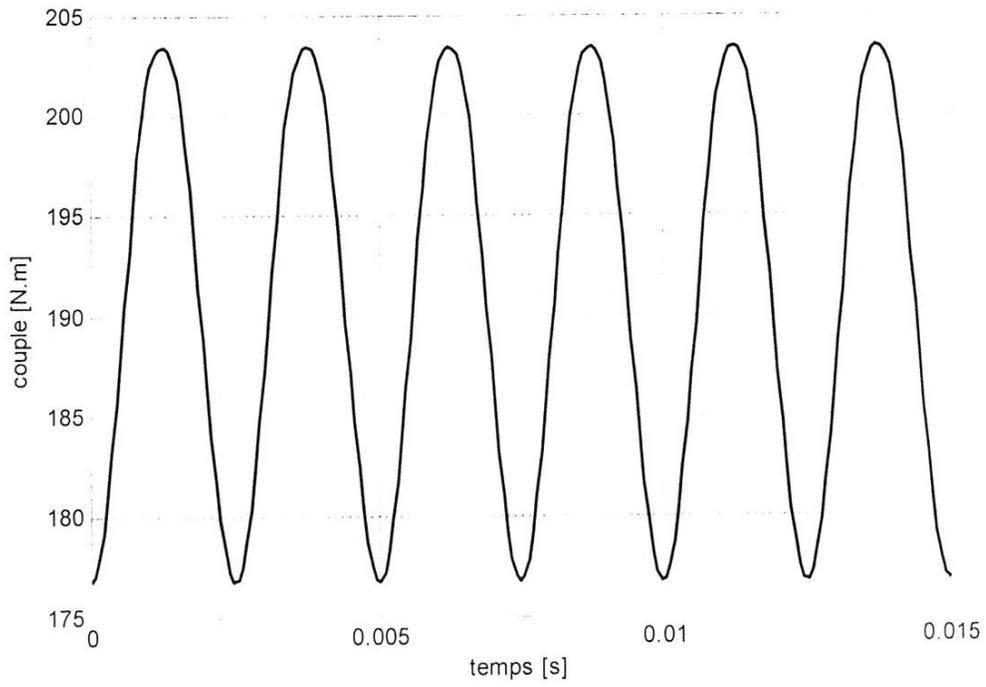


Figure III.3 couple électromagnétique temporel

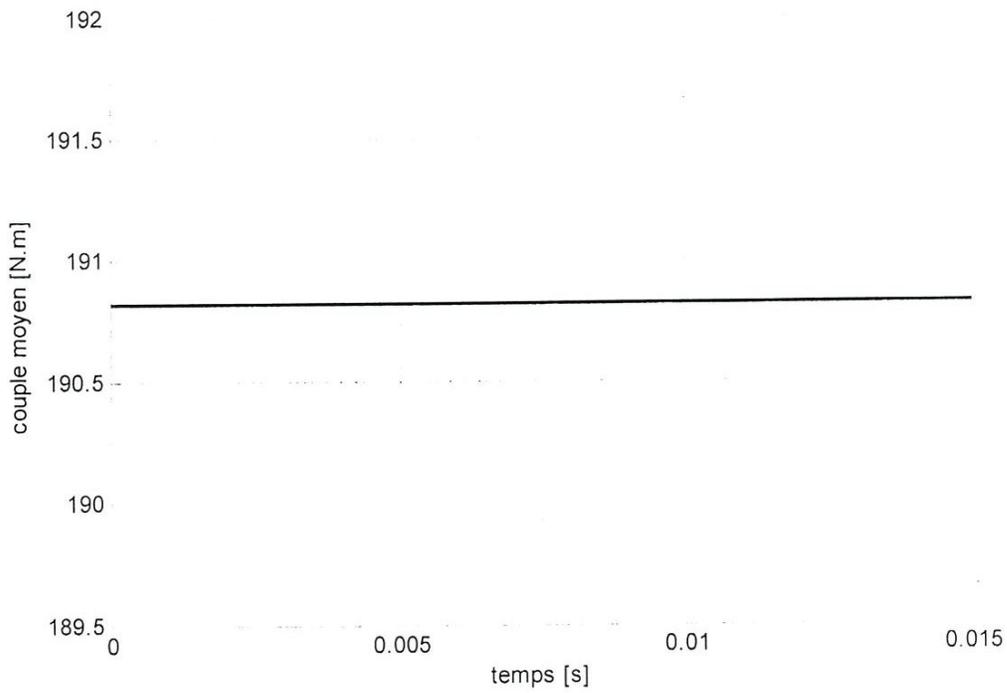


Figure III.4 couple électromagnétique moyen

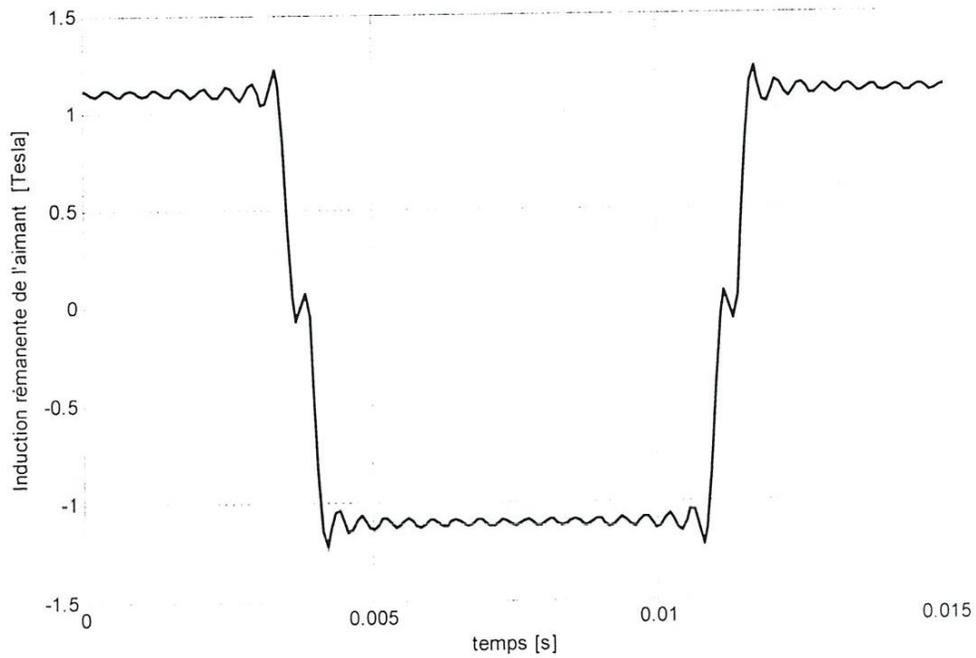


Figure III.5 Induction rémanente de l'aimant

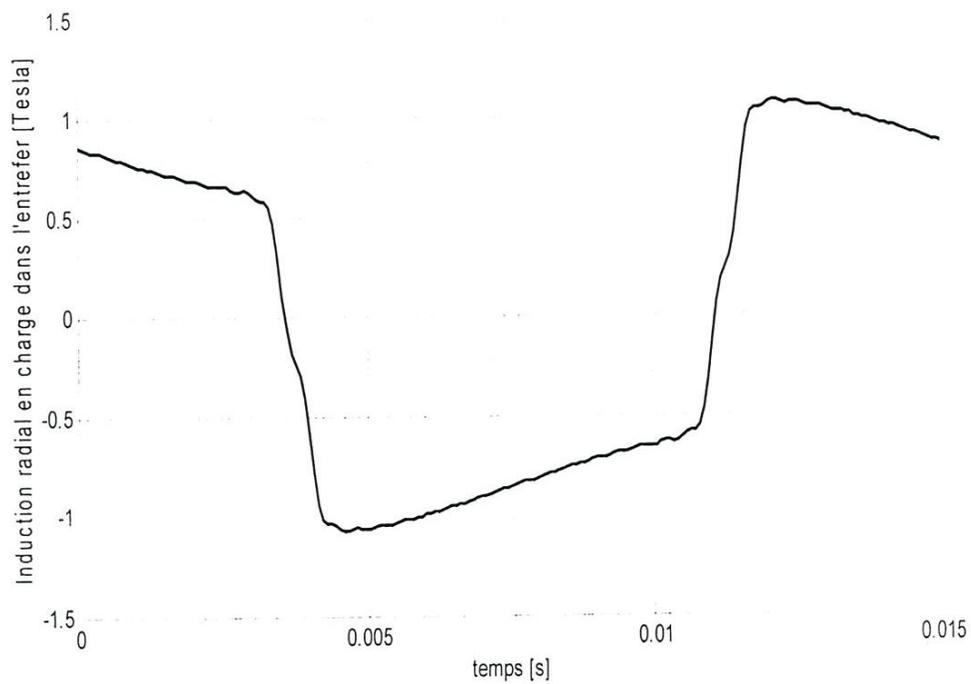


Figure III.6 Induction radiale dans l'entrefer en charge

5. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons utilisé la démarche de dimensionnement préliminaire, développée dans le deuxième chapitre, pour le dimensionnement d'une machines synchrones à aimants permanents à flux radial destinée pour la traction dans un véhicule électrique urbain.

Pour vérifier les performances de la machine dimensionnée, les dimensions trouvées ont été introduites dans un modèle analytique qui utilise le calcul du champ pour déterminer les performances de la machine tel que : le couple et les inductions magnétiques.

Les performances trouvées ont montrées clairement l'efficacité de cette démarche de conception rapide.

Conclusion générale

Dans ce mémoire , une démarche de pré-dimensionnement des machines synchrones à aimants permanents à flux radial a été présentée et appliquée pour le cas de conception d'une machine destinée pour la traction dans une voiture électrique urbaine.

En effet, nous avons commencé dans le premier chapitre par une présentation des différentes structures des machines électriques synchrones, puis nous nous sommes intéressé beaucoup plus à la machine à aimants permanents et en particulier celle à flux radial. Le choix de cette structure est justifié par l'importance de cette machine qui est de loin la plus utilisée dans de nombreuses applications et elle ne cesse de conquérir d'autres domaines réservés jusqu'à présent à d'autres types de machines.

Dans le deuxième chapitre, nous avons détaillé une démarche de dimensionnement rapide des machines synchrones à aimants permanents à flux radial. Cette méthode directe utilise des équations analytiques simples du couple et de l'induction dans l'entrefer pour déterminer les principales dimensions de la MSAP. Le modèle de dimensionnement établi est basé sur quatre variables importantes qui sont fixées généralement par le cahier des charges, ces grandeurs sont : le couple électromagnétique, le nombre de paire de pôles, le rapport entre le rayon d'alésage et la longueur active et finalement la densité surfacique de courant.

Dans le troisième chapitre, nous avons appliqué la démarche de dimensionnement préliminaire proposée pour la conception d'une MSAP

destinée pour la traction dans un véhicule électrique urbain. En suite, Cette démarche a été validée par le moyen d'un modèle analytique qui utilise le calcul du champ pour déterminer les performances de la machine tel que : le couple et les inductions magnétiques. Les performances trouvées ont montrées clairement l'efficacité de cet outil de conception rapide.

Enfin, dans la continuité des travaux que nous avons effectués, plusieurs points peuvent être développés :

- L'introduction de l'effet de la température dans le dimensionnement. En effet, les températures élevées peuvent facilement dégrader les performances de la machine et surtout la désaimantation des aimants permanents.
- L'utilisation des méthodes d'optimisation pour améliorer les performances, en prenant en compte comme objectifs : le rendement, la masse de la machine, l'inertie, le volume, les ondulations du couple, etc.

Bibliographique

- [1] **Edouard BOMMÉ**, 'Modélisation et Optimisation des Machines Electriques Discoïdes à Double Entrefer ', thèse de doctorat, INSTITUT POLYTECHNIQUE DE GRENOBLE, le 11 décembre 2009.
- [2] **YACINE AMARA**, "contribution à la conception et à la commande des machines synchrones à double excitation application au véhicule hybride ", thèse de docteur de l'université PARIS XI le 21 décembre 2001.
- [3] **L. Vido**, "Etude d'actionneurs électriques à double excitation destinés au transport. Dimensionnement de structures synchrones", Thèse de doctorat soutenue en 2004, Ecole Normale Supérieure De Cachan.
- [4] **Z. H. Saber**, "Conception et optimisation des moteurs à aimants destinés à l'entraînement direct", Thèse de doctorat soutenue le 12 décembre 2005, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard.
- [5] **N. Abdel Karim**, " Dimensionnement et optimisation d'un aérogénérateur à aimants permanents à flux axial de petite puissance ", Thèse de doctorat soutenue en 2008, GREAH-Université du Havre.
- [6] **Jérémi REGNIER**, " Conception de systèmes hétérogènes en Génie Électrique par optimisation évolutionnaire multicritère", thèse de doctorat, INSTITUT NATIONALE POLYTECHNIQUE DE TOULOUSE, 18 Décembre 2003.
- [7] **AMRI Khaireddine, BENDAR mohamed**, 'Modélisation analytique d'une machine synchrone à aimant permanant par le calcul du champ ', projet de fin d'étude, université de Guelma, 2010.