

الجمهورية الديمقراطية الشعبية الجزائرية

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur
et de la Recherche Scientifique
Ecole Supérieure des Sciences Appliquées
d'Alger



وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
المدرسة العليا في العلوم التطبيقية بالجزائر

Département du second cycle

Mémoire de Fin d'Etudes

En vue de l'obtention du diplôme de MASTER

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Traction électrique

Thème :

**Etat de l'art sur les machines électrique et les
Machines Synchrones à Aimant Permanent MSAP**

Présenté par : Lakehal Amor

Encadré (e) par : Benkraouda Souleyman

Co-encadré(e) par : Djelloul-khedda Zakarya

Soutenu publiquement, le : 20/06/2023,

Devant le Jury composé de :

M Teffahi Abdelkader
M Deboucha Abdelhakim
M Benkraouda Souleyman
M Djelloul-khedda Zakarya

Président
Examineur
Encadreur
Co-Encadreur

Binôme N° : 03/Master /TR/ 2023

ملخص

في هذه الرسالة، تناولنا أولاً تعريف الآلات المتزامنة وتكوينها (جزء: ثابت، دوار)، وكذلك أنواع مختلفة من الآلات الكهربائية لنفس التيار الكهربائي المباشر والمتناوب. آلات التيار المتردد من نوعين: آلات متزامنة وآلات غير متزامنة. ثم ناقشنا أيضاً الآلات الكهربائية المتزامنة ذات المغناطيس الدائم والتعريف بها ومعرفة أنواعها المختلفة، وكذلك الأنواع المختلفة للمغناطيس الدائم ومميزاتها التي تستمتع بها، وكيف تعمل بشكل عام، وكذلك الطرق المختلفة وتقنيات التحكم لهذا النوع من الآلات. في النهاية، تطرقنا إلى المزايا المختلفة والتكرارات لهذه الآلات بالإضافة إلى المناطق المستخدمة فيها.

Abstract

In this thesis, we first approached the definition of synchronous machines and their composition (part: fixed, rotary), as well as the different types of electrical machines of the same direct and alternating electric current. AC machines are of two types: synchronous machines and asynchronous machines. Then we also discussed the synchronous electrical machines with permanent magnet and introduce them and find out their different types, as well as the different types of permanent magnets and their advantages that they enjoy, and how they work in general, as well as the various methods and control techniques for this type of machine. At the end, we touched on the various merits and disguises of these machines as well as the areas used it.

Résumé

Dans ce mémoire, nous avons abordé dans un premier temps la définition des machines synchrones et leur composition (partie : fixe, rotative), ainsi que les différents types de machines électriques du même courant électrique continu et alternatif. Les machines à courant alternatif sont deux types : les machines synchrones et les machines asynchrones. Ensuite, nous avons également abordé les machines électriques synchrones avec aimant permanent et les présenter et découvrir leurs différents types, ainsi que les différents types d'aimants permanents et leurs avantages dont ils jouissent, et comment ils fonctionnent en général, ainsi les diverses méthodes et techniques de commande de ce type de machine. À la fin, nous avons abordé les divers mérites et déguisements de ces machines ainsi que les zones l'utilisaient.

Dédicaces

*Je dédie ce modeste mémoire à ceux qui ont
beaucoup sacrifié de leur temps pour mon bonheur
et ma réussite. Aux être les plus chers et les plus
proches au monde et qui symbolisent le courage et
la tendresse,*

Mes très chers parents.

A mes frères et ma sœur.

*A tous mes collègues et à tous ce qui m'aiment et
qui me connaissent de près ou de lo*

Remerciements

La première personne que je tiens à remercier est **M.BENKRAOUDA Souleyman**, pour l'orientation, la confiance, la patience qui a constitué un apport considérable sans lequel ce travail n'aurait pas pu être menée au bon port. Qu'il trouve dans ce travail un hommage vivant à sa haute personnalité.

Mes remerciements s'étendent également à **Dr. Djelloul-Khedda Zakarya**, pour ses bonnes explications qui m'a éclairé le chemin de la recherche et sa collaboration dans l'accomplissement de ce modeste travail. Mes vifs remerciements aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à cette recherche en acceptant d'examiner ce travail et de l'enrichir par leurs propositions.

Enfin, je tiens également à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Liste des figures

Chapitre I : Machines électriques

Figure 1. 1 Différentes fonctions d'une machine.	2
Figure 1. 2 Coupe de la structure simplifiée d'une machine classique	3

Chapitre II : Machine synchrone à aimants permanents (MSAP)

Figure 2. 1 Machine Synchrone a Aimants Permanents (MSAP)	10
Figure 2. 2 Machine synchrone à aimant permanent montes en surface	10
Figure 2. 3 Machine synchrone à aimant permanent insères.....	11
Figure 2. 4 Machine synchrone à aimant permanent chapeautes.	11
Figure 2. 5 Machine synchrone à aimant permanent enterres	12
Figure 2. 6 les Alnico	13
Figure 2. 7 les ferrites.....	13
Figure 2. 8 les Néodyme-Fer-Bore	14

Liste des tableaux

Chapitre I : Machines électriques

Tableau 1. 1 Avantages et inconvénients des machines utilisés dans les VE 7

Chapitre II : Machine synchrone à aimants permanents (MSAP)

Tableau 2. 1 Exemples de propriétés magnétiques des aimants..... 14

Sommaire

Introduction générale.....	1
1 Chapitre 1 : Machines Electrique.....	2
1.1 1.1 Introduction	2
1.2 Machines électriques	2
1.3 Constitution de machine électrique.....	3
1.3.1 Stator et Rotor.....	3
1.3.2 Circuit magnétique	3
1.3.3 Enroulement	3
1.4 Différentes types des machines électriques	3
1.4.1 Machines Electriques à Courant Continue :.....	4
1.4.2 Machines Electriques à Courant Alternatif.....	4
1.5 Comparaison entre les différents types de moteurs électriques.....	7
1.6 Conclusion	8
2 CHAPITRE 02 : Machine synchrone à aimants permanents (MSAP).....	9
2.1 Introduction	9
2.2 Définition de MSAP	9
2.3 Types de MSAP	10
2.3.1 Différents types des machines électriques à aimants permanents	10
2.3.2 Les types des aimants utilisent:.....	12
2.4 Fonctionnement de machine synchrone à aimants permanents MSAP	14
2.5 Différentes techniques de commande de la MSAP	15
2.5.1 La commande vectorielle de la MSAP.....	15
2.5.2 La commande directe du couple (TDC).....	15
2.5.3 Commande par mode glissant.....	16
2.6 Les Avantages et les Inconvénients du MSAP :	16
2.6.1 Les Avantages	16
2.6.2 Les inconvénients	17

2.7 Domaines d'application du MSAP	17
2.8 Conclusion	17
Conclusion générale	19
Références bibliographiques.....	20

Introduction générale

Introduction générale

Les machines synchrones convertissent l'énergie mécanique en énergie électrique (alternateurs) ou vice versa (moteurs synchrones), elles nécessitent pour produire le champ magnétique inducteur une alimentation en courant continu (inducteur bobiné) ou des aimants permanents. L'existence d'un inducteur bobiné permet, suivant le cas, de régler la tension ou la puissance réactive de la machine synchrone [1].

La machine synchrone est très fiable et efficace pour la conversion d'énergie, son fonctionnement est, comme tous les dispositifs électromécaniques de conversion d'énergie est basés sur la loi de Faraday de l'induction électromagnétique [2]. Les performances obtenues doivent être en accord avec les conditions d'exploitation, en particulier les protections de la machine synchrone elle-même et, éventuellement, celles du réseau électrique auquel elle est reliée. La machine synchrone est surtout utilisée en générateur dans les centrales de production de l'énergie électrique de type thermique et hydraulique, où elle est presque sans concurrent, mais elle est également utilisée en moteur dans un certain nombre de domaines.

Le terme de machine synchrone regroupe toutes les machines dont la vitesse de rotation du rotor est égale à la vitesse de rotation du champ tournant du stator. Pour obtenir un tel fonctionnement, le champ magnétique rotorique est généré soit par des aimants, soit par un circuit d'excitation. La position du champ magnétique rotorique est alors fixe par rapport au rotor, ce qui impose le synchronisme entre le champ tournant statorique et le rotor, d'où le nom de machine synchrone. L'alternateur est l'élément clés de la production de l'électricité. Il s'agit d'une machine synchrone qui permet de transformer l'énergie mécanique en énergie électrique. Dans ce qui suit (chapitre 01) on verra une description détaillée sur les machines électriques, ensuite (chapitre 02) on verra une description détaillée de la machine synchrone à aimant permanent.

CHAPITRE 01

Machines Electrique

1 Chapitre 1 : Machines Electrique

1.1 1.1 Introduction

L'électricité a toujours eu un rôle très important dans la conversion de l'énergie électrique en énergie mécanique, grâce aux convertisseurs électromagnétiques, aujourd'hui appelés machines électriques.

Les machines électromagnétiques ont un rôle important à l'heure actuelle, car ils occupent un pourcentage très important dans le domaine des transports, ainsi que dans le domaine de l'industrie et de nombreux domaines tels que la médecine et l'informatique (disque dur). La consommation de l'énergie électrique dans la conversion de l'énergie électrique en énergie mécanique est devenue très importante ces dernières années, ce qui a fait que ce domaine se développe très rapidement et de nombreux investissements dans ce domaine

Dans ce chapitre, nous discutons des dernières découvertes de la science dans le développement de ces machines électriques (les dernières en matière de machines électriques).

1.2 Machines électriques

Les machines électriques sont un dispositif électromagnétique qui convertit l'énergie électrique en énergie magnétique grâce aux rouleaux de cuivre et grâce à cette énergie magnétique, l'énergie mécanique est produite grâce à plusieurs méthodes, le dispositif responsable de cette transformation ressent **le moteur**. Cette méthode peut réfléchir afin que nous puissions produire l'énergie électrique en convertissant l'énergie mécanique et l'appareil est appelé **le générateur** ici.

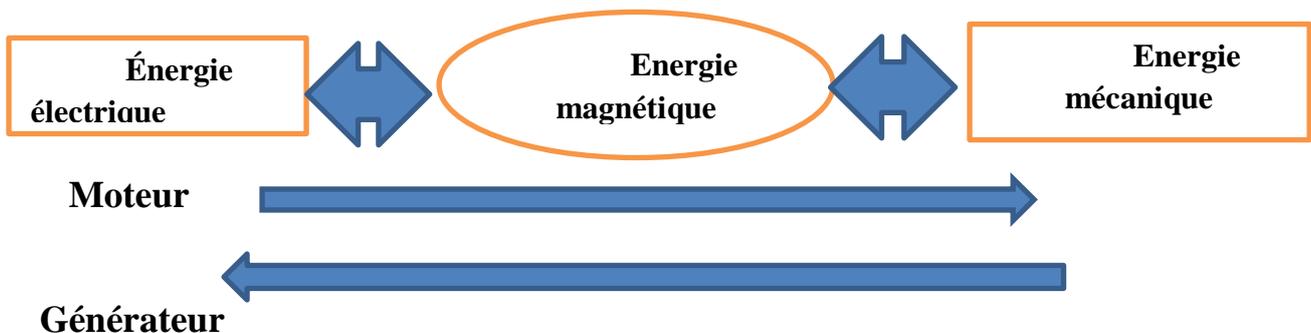


Figure 1. 1 Différentes fonctions d'une machine.

1.3 Constitution de machine électrique

1.3.1 Stator et Rotor

La machine électrique se compose principalement de deux parties, la première, qui est la partie fixe de la machine, appelée stator, et la seconde, qui est la partie mobile, appelée rotor. Il y a un entrefer entre eux, la partie tournante est toujours à l'intérieur de la partie fixe, et dans quelques utilisations c'est l'inverse [3].

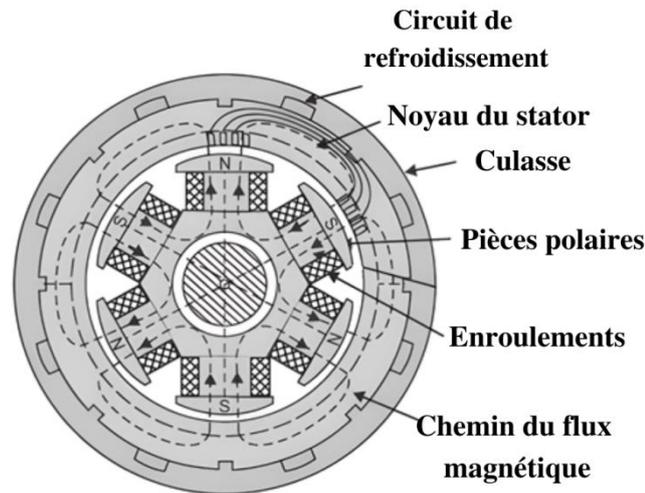


Figure 1. 2 Coupe de la structure simplifiée d'une machine classique

1.3.2 Circuit magnétique

Un circuit magnétique est un circuit généralement réalisé en matériau ferromagnétique au travers duquel circule un flux de champ magnétique. Le champ magnétique est généralement créé soit par des enroulements enserrant le circuit magnétique et traversés par des courants, soit par des aimants contenus dans le circuit magnétique. Lorsque plusieurs circuits électriques sont bobinés autour d'un même circuit magnétique, ils constituent des circuits magnétiquement couplés [4].

1.3.3 Enroulement

Suivant le type de la machine, des enroulements peuvent être placés sur le stator, sur le rotor ou sur les deux parties à la fois [3].

1.4 Différentes types des machines électriques

Les machines électriques sont divisées en deux types selon le type de courant électrique traversant les bobines utilisées, à savoir : machines électrique à courant continue et machines électrique à courant alternatif.

1.4.1 Machines Electriques à Courant Continu :

La machine à courant continu (MCC) à collecteur et à excitation indépendante confère, encore actuellement, la solution la plus économique grâce à son convertisseur d'induit de type hacheur à deux interrupteurs (l'inducteur est aussi alimenté par un hacheur de petite puissance). C'est la technologie retenue par de nombreux constructeurs automobiles pour la commercialisation des véhicules électriques de première génération. Mais le MCC possède un certain nombre d'inconvénients bien connus, c'est pourquoi qu'ils sont maintenant supplantés par les machines synchrones auto-pilotés qui possèdent globalement les mêmes caractéristiques mécaniques. Citons quelques-uns de ces inconvénients [5,6] :

- L'endommagement des brosses qui s'use avec la durée d'utilisation obligeant l'utilisateur à les changer périodiquement fait de cet entretien un obstacle.

- Un problème de refroidissement qui rend une machine à courant continu moins efficace et inefficace à des plages thermiques plus élevées.

- La vitesse circonférentielle de l'onduleur et du moteur est limitée à 50 voire 75 m/s ce qui ne permet pas d'atteindre les grandes vitesses requises pour une puissance donnée adaptée.

1.4.2 Machines Electriques à Courant Alternatif

Les machines à courant alternatif alimentées par des onduleurs à stator pour fabriquer des **machines** à vitesse variable deviennent de plus en plus populaires. Il existe deux types de machines électriques à courant alternatif largement utilisées dans cette industrie.

1.4.2.1 Machines Asynchrones

On appelle machine asynchrone une machine à courant alternatif dont la vitesse de rotation du rotor est inférieure à celle du champ magnétique tournant du stator et dépend de la charge.

La machine asynchrone est la machine la plus utilisée dans l'industrie, et c'est une solution demandée par de nombreux fabricants, en raison de son faible coût, de son bon rendement et de son excellente fiabilité, et il est produit en série. Il est très solide et facile d'entretien. Confirmé : son fonctionnement ne génère pas d'étincelles, contrairement à une machine à courant continu. Ce type de différentiel entraîne la quasi-totalité des machines-outils conventionnelles (tourelles, fraiseuses, scies à limer, meuleuses, pompes, compresseurs, perceuses, etc.).

Il fonctionne directement sur le secteur alternatif, sans transfert préalable L'énergie électrique qu'il nourrit est la machine industrielle avec distinction que vous n'avez pas Des membres sensibles tels que la mosquée actuelle de la machine en cours. Courants actuels Dans la partie fixe, la seule source externe du champ magnétique est: ne doit pas le faire Il est connecté à une source d'alimentation électrique. Il existe de

nombreux courants rotatifs qui Il participe également à la création du champ magnétique, mais ces courants induits. C'est l'endroit où le nom est parfois donné au moteur simultané: «Motor Irbia». L'aspect négatif du moteur simultané est le retour, qui est moins de qualité Moteurs simultanés en raison des pertes de Julis parce que vous avez besoin d'un jolMari. Ils ont également une résistance et une diminution du couple à partir de Machines simultanées.

L'inconvénient de la machine asynchrone est le rendement qui est inférieur à celui des machines synchrones à cause des pertes Joule car il faut des pertes Joule au rotor pour obtenir le couple. Ils ont également un facteur de puissance et un couple de bloc inférieurs à ceux des machines synchrones.

1.4.2.2 Machines synchrones

On entend par machine synchrone toutes les machines dont la vitesse de rotation dans l'arbre de sortie est égale à la vitesse de rotation du champ tournant. Pour que cela fonctionne, le champ magnétique tournant est généré soit par l'aimant, soit par le circuit d'excitation. Ensuite, la position du champ magnétique tournant est fixe par rapport au rotor, ce qui force la synchronisation entre le champ tournant fixe nom du dispositif synchrone [6,7].

La véritable renaissance du moteur simultané est très moderne: elle est due à un mélange de ce moteur avec les transformateurs thyrostor que l'électronique énergétique a pu développer. Il se rapporte au MW (et donc à des moteurs à haute énergie). Les transformateurs qui alimentent les moteurs simultanés fournissent ces trois fréquences de fréquence de la fréquence changeante d'une source continue (elle-même a été obtenue par récupération du réseau). Cependant, afin qu'il soit peu susceptible de "fuir" le moteur simultané

L'onduleur prend en compte la vitesse de la machine. Par conséquent, nous obtenons de mauvaises machines de soi qui fournissent de nombreuses réalisations modernes (T.G.V. Atlantique, mélangeurs de l'industrie chimique). Ce type de machine se développe à un rythme continu des principales autorités, mais il faut noter que son utilisation perturbe une partie électronique au moins aussi importante que la machine lui-même.

Dans cette catégorie, on trouve plusieurs sortes de configurations dont nous citons trois types les plus fréquents :

- Les machines synchrones à rotor bobiné.
- Les machines synchrones à réluctance variable.
- Les machines synchrones à aimants permanents.

1.4.2.2.1 Machines synchrones à rotor bobiné (MSRB)

La machine synchrone à rotor bobinée c'est la machine dont les caractéristiques se rapprochent le plus de celles du MCC à excitation indépendante, il permet d'optimiser facilement le rendement (action sur le flux et le courant d'induit). Enfin, le fonctionnement à puissance maximale constante est aisé à obtenir sur une très large plage de vitesse [5].

Par contre, son rotor bobiné nécessite des bagues pour l'alimenter, et les bobines d'excitation sont difficiles à refroidir ; cependant, la densité de courant peut être choisie faible pour diminuer les pertes. Les contacts glissants (balais - bagues) limitent le fonctionnement à très haute vitesse de ce type de machines à cause de l'usure des balais. Le rendement et le rapport couple/vitesse sont relativement faibles par rapport à ceux des machines à aimants permanents et cela à cause des pertes au rotor [8].

Les machines synchrones à inducteur bobiné ont l'avantage d'avoir un facteur de puissance réglable par le courant d'excitation. Quand ils sont branchés directement sur le réseau, leurs principaux inconvénients sont l'impossibilité de démarrer sans artifice et le risque de décrochage si le couple résistant est trop important. Il leur faut par ailleurs une deuxième source d'énergie pour alimenter l'inducteur en continu [9].

1.4.2.2.2 Machines synchrones à réluctance variable (MSRV)

Le rotor de ce type de moteur ne contient ni aimants, ni bobinage d'excitation. Le couple est créé seulement grâce à l'effet réluctance. Le stator est semblable à celui de la majorité des machines à courant alternatif. Le rotor est construit de manière à ce que le rapport entre l'inductance dans l'axe direct et l'axe en quadrature (L_d/L_q) soit le plus important possible. La plage de fonctionnement en vitesse à puissance constante est directement liée à ce rapport. Il en est de même pour le facteur de puissance (plus ce rapport est élevé plus le facteur de puissance est grand). L'obtention d'un rapport (L_d/L_q) élevé induit des contraintes au niveau de la fabrication, qui se répercutent négativement sur le coût. Les inconvénients pour ce type de machine se résument par la délicatesse de la fabrication à cause de la nécessité d'un rapport de saillance élevé, la faiblesse du facteur de puissance et la complexité de l'électronique de commande nécessitant un capteur de position [8].

La machine synchrone à réluctance variable convient donc aux applications à forte puissance et à haute vitesse, domaine largement occupé actuellement par la machine asynchrone. Mais cette dernière présente des pertes Joule et des pertes fer au rotor en régime permanent. La machine synchro-réductante (Synchronous Reluctance Motor) est donc sur ce point une véritable concurrente de la machine asynchrone [10].

1.4.2.2.3 Machines synchrones à aimants permanents (MSAP)

Les machines synchrones à aimants permanents ont connu ces dernières années un grand essor. C'est grâce à l'amélioration des qualités des aimants permanents plus précisément à l'aide des terres rares, au développement de l'électronique de puissance et à l'évolution des techniques de commande non linéaire. Les atouts de ce type de machine sont

multiples, parmi lesquels nous pouvons citer : robustesse, faible inertie, couple massique élevé, rendement élevé, vitesse maximale supérieure et faible cout d’entretien. Par ailleurs, les aimants permanents présentent des avantages indéniables : d’une part, le flux inducteur est créé sans pertes d’excitation et d’autre part, l’utilisation de ces matériaux va permettre de s’écarter notablement des contraintes usuelles de dimensionnement des machines et donc d’accroître la puissance massique de façon significative [7]. Cependant le coût de production, dépendant essentiellement de la qualité des aimants.

1.5 Comparaison entre les différents types de moteurs électriques

Le tableau suivant montre les différentes machines par rapport aux normes importantes que les voitures ont été demandées :

Critère	MCC	MAS	MSRB	MSAP	MSRV
Rendemenaximale	Bon	Passable	Passable	Très bon	Moyen
Rendement moyen	Moyen	Bon	Moyen	Très bon	Bon
Vitesse maximale	Passable	Bon	Passable	Bon	Bon
Coût électronique de puissance	Très bon	Passable	Moyen	Moyen	Bon
Coût de moteur	Passable	Bon	Moyen	Moyen	Très bon
Espace couple-vitesse	Moyen	Moyen	Passable	Très bon	Bon

Tableau 1. 1 Avantages et inconvénients des machines utilisés dans les VE [11].

Pour ce faire, la machine synchrone à aimants permanents apparaît à plus d'un titre, la solution la plus adaptée à la traction des véhicules automobiles grâce à ses performances techniques et notamment sa compacité et son rendement, mais surtout grâce à sa une puissance massique importante qui permet de réduire le poids et le volume, ce qui est nécessaire dans la construction d'une voiture électrique. Ce type de machine s'est imposé dans l'industrie grâce à sa robustesse et sa simplicité de construction.

1.6 Conclusion

Dans ce chapitre, Nous avons expliqué la structure des machines électriques, ainsi que nous avons vu les différents types de machines électriques du même calibre à celles qui fonctionnent dans le courant hésitant, ainsi que divers types de classificateurs. Nous avons fait une comparaison des différents types de machines électriques en termes de résistance aux performances et de plusieurs autres avantages tels que la vitesse, le coût, la puissance électrique et les rendements.

CHAPITRE 2 :

Machine synchrone à
aimants permanents (MSAP)

2 CHAPITRE 02 : Machine synchrone à aimants permanents (MSAP)

2.1 Introduction

Ces dernières années, la machine synchrone magnétique permanent est devenue la plus populaire et la plus largement utilisée dans de nombreux domaines différents, tels que l'industrie, les transports et les utilisations domestiques.

La popularité de l'utilisation de la machine synchrones à aimants permanents réside dans les avantages dont ils bénéficient, et ces avantages sont : Un excellent rendement, une maintenance réduite, un faible moment d'inertie et une grande capacité de surcharge sur toute la plage de vitesse.

Toutes ces caractéristiques l'ont fait balayer tous les domaines et à juste titre, ce qui lui a valu d'être devant de nombreux magazines tels que, applications industrielles tel que les équipements domestiques (machine à laver le linge), les équipements de technologie de l'information (DVD drives), Les équipements de soins médicaux et de santé, la propulsion des sous-marins et des véhicules électriques ainsi que les machines-outils et les applications de l'énergie de l'éolienne.

Dans ce chapitre on va présenter : Divers types de machines simultanées avec un aimant permanent, ainsi que les différents types d'aimants permanents, leurs avantages et leurs caractéristiques, ainsi que le principe du travail de ces machines en général. Nous expliquons également dans les différents types de contrôle des machines simultanées avec des miettes permanentes. Les divers avantages de ce type de machine et de leurs inconvénients sont présentés, ainsi que les différents domaines d'utilisation.

2.2 Définition de MSAP

La machine synchrone à aimants permanents est un moteur électrique compose de deux parties principales, la partie tournante et le stator, ou le stator est constitué de bobines de fils qui transportent le courant électrique. La partie tournant se compose d'un arbre rotatif et d'un aimant permanent, et dans la plupart des cas, elle livrée avec un ventilateur pour le refroidissement.

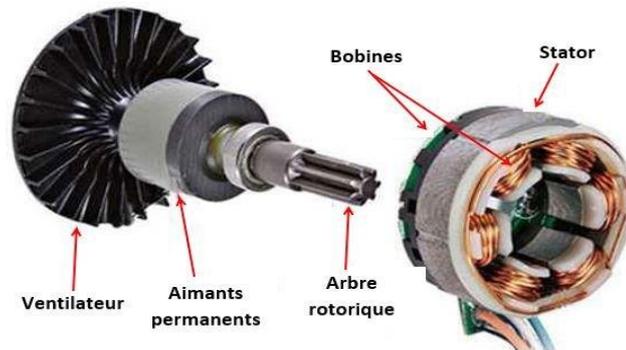


Figure 2. 1 Machine Synchrone a Aimants Permanents (MSAP)

2.3 Types de MSAP

2.3.1 Différents types des machines électriques à aimants permanents

Il existe quatre catégories de machine synchrone à aimants permanents de point de vue mécanique :

2.3.1.1 Machine synchrone à aimant permanent montés en surface :

Cette type est la plus simple, pour que les rayons magnétique soient dispose et repartis sur la circonférence de la pièce tournante, ces aimants se présentent sous la forme de briques qui sont placées au-dessus du cylindre rotatif qui est porte sur l'arbre rotatif. Ce type de machine relevé des machines a pôles lisses.

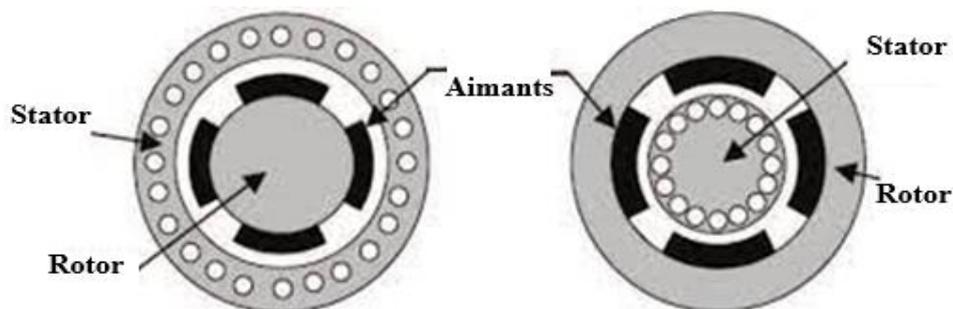


Figure 2. 2 Machine synchrone à aimant permanent montes en surface.

2.3.1.2 Machine synchrone à aimant permanent insérés

Dans ce type, des trous sont percés dans la partie rotative pour faciliter l'assemblage mécanique, les parties de fer entre les aimants permanents sont des espaces inter polaires ce qui augmente sa notoriété. Elle a les mêmes caractéristiques que la dernière forme.

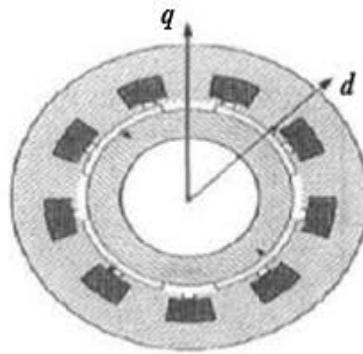


Figure 2. 3 Machine synchrone à aimant permanent insérés.

2.3.1.3 Machine synchrone à aimant permanent chapeautés

Cette structure est déduite de celles qui ont des aimants permanents montés en surface. Des pièces d'arbre généralement en acier doux sont placées sur l'aimant. La combinaison des aimants et des arbres crée une anisotropie de rotation et ajoute de la proéminence. La découpe de l'arbre permet de contrôler la forme f.e.m. du stator en agissant sur le profil de la pièce.

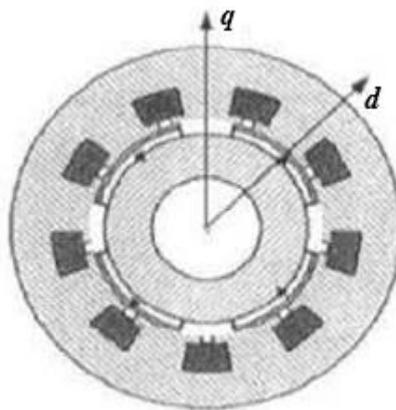


Figure 2. 4 Machine synchrone à aimant permanent chapeautés.

2.3.1.4 Machine synchrone à aimant permanent enterrés

Le principe de cette structure est d'augmenter l'induction magnétique dans l'entrefer par rapport à l'induction résiduelle des aimants permanents. En effet, la pièce polaire dirige le flux créé par l'aimant permanent avec une aimantation transversale dont la surface latérale est supérieure à la moitié de celle de la pièce polaire prise au niveau d'un plan d'entrefer.

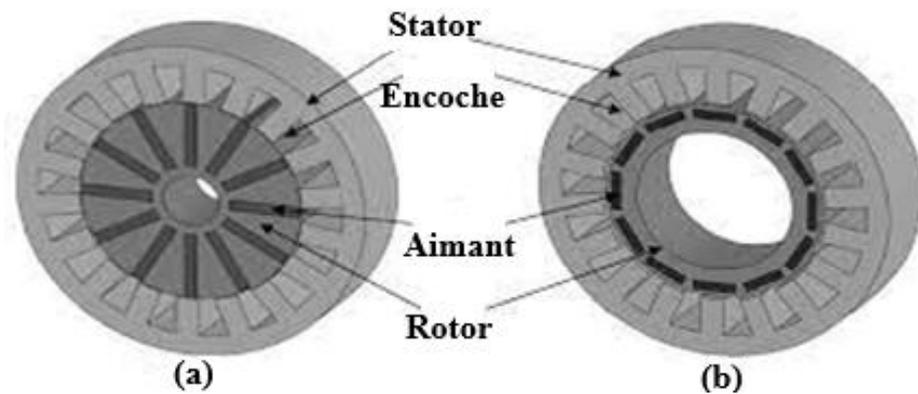


Figure 2. 5 Machine synchrone à aimant permanent enterrés.

2.3.2 Les types des aimants utilisés

2.3.2.1 Caractéristiques générales des aimants permanents

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

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

2.3.2.2 Les différents types d'aimants permanents

Il existe une grande variété de matériaux, pour aimants permanents, dont les propriétés et les applications sont diverses. Dans le cas des machines tournantes, on distingue trois types [12,13]:

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



Figure 2. 6 les Alnico.

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



Figure 2. 7 les ferrites.

Les Néodyme-Fer-Bore (Nd-Fe-B) : ont des performances supérieures aux Samarium Cobalt et sont beaucoup moins coûteux mais leur tenue à la température est moins bonne (jusqu'à 160 °C).

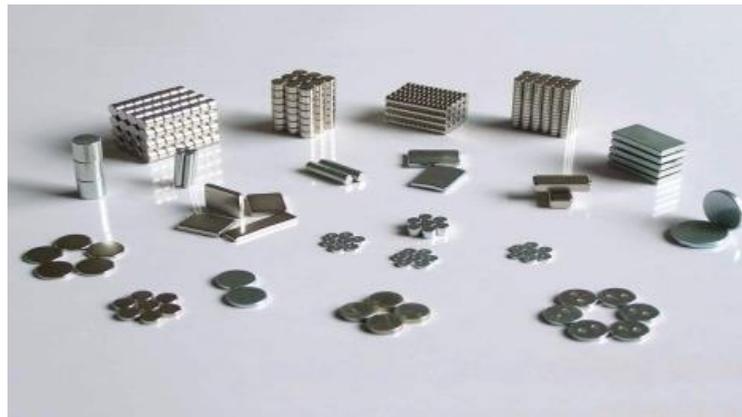


Figure 2. 8 les Néodyme-Fer-Bore.

Les alliages métaux – terres rares : ils sont, actuellement, les plus performants des aimants permanents utilisés dans la construction des machines synchrones. La version la plus courante est l’alliage samarium–cobalt, caractérisé par une induction rémanente et un champ coercitif élevés. A taille égale, la densité d’énergie emmagasinée dans l’aimant est trois fois plus grande que celle des Alnico et six fois plus que celle des ferrites, réduisant ainsi de façon considérable le volume du rotor, ce qui permet donc d’augmenter le couple massique de la machine et de réduire son inertie. Leur prix est cependant élevé. Le choix de l’aimant est effectué en fonction de caractéristiques recherchées et du prix de l’aimant qui est très variable. Quelques propriétés magnétiques des différents types d’aimants sont données dans le tableau ci-dessous.

Type D’aimants	Densité d’énergie (BH) max (kJ/ m3)	Induction rémanente Br (T) à 25°C	Champ coercitif -Hc (kA/m)	Température Tmax (°C)	Prix (€/kg)
NdFeB	200-380	1.2-1.5	900-2000	140-220	80-150
Sm Co5	140-200	1	2000	280	220
Sm2 Co17	180-240	1.05	2000	350-550	300
Alnico	50-85	1.1-1.3	130	550	45
Ferrites strontium	27-35	0.3-4	250	250	6
Ferrites baryum	8-30	0.2-4	170	100-240	4.5

Tableau 2. 1 Exemples de propriétés magnétiques des aimants [12,14].

2.4 Fonctionnement de machine synchrone à aimants permanents MSAP

La machine synchrone à aimants permanents est une machine lequell la vitesse de rotation du rotor est égale à la vitesse de rotation de champs magnétique tournant. Pour

obtient tel fonctionnement, il faut la génération de champs magnétique du rotor soit par des aimants, ou de circuit d'excitation. Cela dit, qu'en mode permanent la position des champs magnétique rotorique est fixe par rapport à rotor. Ceci impose une vitesse de rotor même vitesse de champs tournant de stator [12].

Le stator : ou l'induit est la partie fixe de la machine, il se compose de trois enroulements parcourus par des courants alternatifs décalés de 120° dans l'espace et dans le temps, logés dans les encoches du circuit magnétique fixe [13].

Le rotor : ou inducteur est la partie mobile de la machine se compose d'aimants permanents. Ce dernier présente l'avantage d'éliminer les balais et les pertes rotorique, ainsi que la nécessité d'une source pour fournir le courant d'excitation. Cependant, on ne peut pas contrôler l'amplitude du flux rotorique [14].

2.5 Différentes techniques de commande de la MSAP

2.5.1 La commande vectorielle de la MSAP

La technique de la commande vectorielle permet de transformer la MSAP en une structure semblable à celle de la machine à courant continu à excitation séparée dans laquelle le flux n'est pas affecté par les variations du couple électromagnétique. En effet, en absence de la saturation et de la réaction de l'induit, le flux principal de l'inducteur est proportionnel au courant d'excitation. On aura ainsi un couple électromagnétique proportionnel au courant de l'induit pour une valeur constante de flux. Ce contrôle permet une amélioration du temps de réponse et un réglage rapide du couple. Mais, cette amélioration est accompagnée par une complexité plus grande de la commande et la mise en œuvre de structures d'observation ou de mesure des grandeurs de la machine, exigée par la commande. De plus, la sensibilité aux variations des paramètres internes de la machine présente l'inconvénient majeur de la commande vectorielle [15].

Cette commande est précise et rapide, le contrôle des grandeurs se fait en amplitude et en phase ce qui est un avantage spécifique, et elle est basée sur le modèle transitoire, traitant les régimes transitoires ce que ne permettait pas de faire les variateurs classiques.

La commande présente des inconvénients, par son coût élevé, la faible robustesse aux variations paramétriques et en particulier à celles de la constante du temps rotorique et par la nécessité d'un modulateur pour la commande rapprochée de l'onduleur qui provoque des retards, surtout à basse fréquence de modulation (grande puissance). Ces retards sont responsables d'une augmentation du temps de réponse en couple, ce qui pénalise les variateurs utilisés en traction [16].

2.5.2 La commande directe du couple (TDC)

L'objectif dans la commande directe du couple (DTC) est la régulation directe du couple de la machine, par l'application des différents vecteurs de tension de l'onduleur, qui déterminent son état. Les deux variables contrôlées sont : le flux statorique et le couple électromagnétique qui sont habituellement commandés par des régulateurs à hystérésis. Il

s'agit de maintenir les grandeurs de flux statorique et le couple électromagnétique à l'intérieur de ces bandes d'hystérésis. Les sorties de ces régulateurs déterminent le vecteur de tension de l'onduleur optimal à appliquer à chaque instant de commutation. L'utilisation de ce type de régulateur suppose l'existence d'une fréquence de commutation variable dans le convertisseur nécessitant un pas de calcul très faible. Dans une commande DTC, il est préférable de travailler avec une fréquence de calcul élevée afin de réduire les oscillations de couple provoquées par les régulateurs hystérésis [17].

Cette commande présente des avantages dont une réponse dynamique très rapide, elle ne nécessite pas des calculs dans le repère rotorique (d, q), et le découplage des courants par rapport aux tensions de commande, comme dans le cas de la commande vectorielle n'est pas nécessaire.

2.5.3 Commande par mode glissant

La commande par mode glissant est une commande non linéaire, qui est basée sur la commutation de fonctions de variables d'état, utilisées pour créer une variété ou hypersurface de glissement, dont le but est de forcer la dynamique du système à correspondre avec celle définie par l'équation de l'hypersurface. Quand l'état est maintenu sur cette hypersurface, le système se trouve en régime glissant. Sa dynamique est alors insensible aux perturbations extérieures et paramétriques tant que les conditions du régime glissant sont assurées [16].

Il y'a plusieurs avantages pour la commande par mode glissant : la précision, stabilité, simplicité, faible temps de réponse et la robustesse face aux variations paramétriques. Ceci lui permet d'être particulièrement adaptée pour traiter les systèmes qui ont des modèles mal connus, soit à cause de problèmes d'identifications des paramètres, soit à cause de la simplification sur modèle des systèmes.

Néanmoins, elle présente aussi des inconvénients car cette technique fait appel à un grand effort de commande, chose qui peut détériorer les organes de commande. De plus, en réalité, on n'a pas le glissement idéal sur la surface mais des zigzags autour de celle-ci. Ce phénomène est appelé 'broutement' ou encore 'chattering', il engendre plusieurs effets indésirables sur la qualité et la réalisation de la commande et sur le système. Le phénomène de broutement est considéré comme un obstacle réel pour l'application de la commande par mode glissant [18].

2.6 Les Avantages et les Inconvénients du MSAP :

2.6.1 Les Avantages

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

- Très bon rendement et un facteur de puissance élevé (proche de l'unité).
- Robustesse incontestée par rapport à la machine à courant continu.
- Puissance massique élevée et précision de sa commande.

CHAPITRE 2 : Machine synchrone à aimants permanents (MSAP)

- Suppression de l'alimentation du rotor (absence du contact bagues balais).
- 12 Pas des pertes résistives au rotor ; ce qui facilite l'évacuation de la chaleur due aux pertes dans la machine. Ainsi, il y a suppression d'équipement de refroidissement au rotor.
- Suppression des bagues et des balais, ce qui réduit les problèmes de maintenance.
- Fonctionnement en survitesse.
- Une faible inertie et un couple massique élevé.

2.6.2 Les inconvénients

- Technologie coûteuse liée au coût des aimants.
- Interaction magnétique due au changement de structure.
- Influence des vibrations et des chocs sur la structure de la machine.
- Diminution de l'aimantation selon loi logarithmique en fonction du temps.
- Des ondulations de couple dues aux harmoniques en régime des basses vitesses.
- Une structure complexe d'alimentation et de régulation.
- Une électronique de commande assez compliquée (nécessite d'un capteur de position).

2.7 Domaines d'application du MSAP

Le machine synchrone à aimants permanents peut être très utile dans de nombreuses applications, comme :

- Equipements domestiques (machine à laver le linge).
- Les automobiles.
- La propulsion des véhicules électriques et la propulsion des sous-marins.
- Les équipements de technologie de l'information (DVD drives).
- Les outils électriques, jouets, système de vision et ses équipements.
- Les équipements de soins médicaux et de santé (fraise de dentiste).
- Les servomoteurs.
- Les applications robotiques.
- La production d'électricité.
- Les machines-outils.
- Les applications des aérogénérateurs.

2.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la machine synchrone à aimants permanents (MSAP), son principe de fonctionnement, sa structure et classification, ainsi certaines techniques utilisées pour sa commande.

CHAPITRE 2 : Machine synchrone à aimants permanents (MSAP)

Nous avons aussi exposé, les avantages et les inconvénients du MSAP et les domaines de son utilisation, d'où nous avons constaté son importance et prépondérance dans les technologies modernes, par rapport aux autres machines électriques, tel que la propulsion des véhicules électriques.

Conclusion générale

Conclusion générale

Les machines synchrones sont devenues l'épine dorsale de nombreux domaines, l'électricité et le transport de toutes sortes de mer pour atterrir, et il existe de nombreuses recherches qui enseignent la possibilité de fabriquer des plans électriques dans un avenir proche. De même, les coïncidences avec les aimants permanents sont devenues la machine la plus demandée dans le domaine des transports avec des trains électriques et même le plus demandé.

Parmi ces avantages figurent l'aimant permanent et la facilité de contrôle des caractéristiques de la machine telle que la vitesse et le couple, ce qui la rend très populaire dans plusieurs domaines.

L'avenir des machines synchrones à aimants permanents a un avenir prometteur et prospère dans le domaine de production de l'électricité, ce qui le rend toujours en développement rapide et continu, et pour cette raison, il est à l'honneur de nombreux savants dans ce domaine.

Références bibliographiques

- [1] T. Abderrahmane : Etude expérimentale et simulation des essais d'une machine synchrone. Mémoire présenté pour l'obtention du diplôme de Master, Université Djilali Bounaama de Khemis Milliana, Faculté de Génie Electrique, 2017
- [2] R. Glises : Machines électriques tournantes. Edition Techniques de l'ingénieur, 1998.
- [21] Payne RL. Goodwin, G-C. and : Dynamic system identification. Experiment design and data analysis. 1977.
- [3] Pierre MAYE, « moteurs électriques industriels », 3e édition
- [4] Techno-science.net, « circuit magnétique ».
- [5] Bernard M, Hirsinger L, « Problème de la motorisation d'un véhicule électrique », Journées Electrotechniques, Club EEA, Cachan, Mars 1994.
- [6] MESLOUB. H, « Commande DTC Prédictive D'une Machine Synchrone à Aimants Permanents », Thèse de Doctorat, Université Mohamed Khider – Biskra, 2016.
- [7] M.Ezzat, « Commande non linéaire sans capteur de la machine synchrone à aimant permanent », Thèse de doctorat de L'Ecole Centrale de Nantes, N 503-126, pp 2011
- [8] G. Henni, « Modélisation et Commande d'un véhicule électrique hybride », Mémoire de Magister, Université Hassiba Ben Bouali de Chlef, 2015
- [9] OTMANE-CHERIF.A, « Observation de la Machine Synchrone à Rotor Bobiné Sans Capteurs (Sensorless) », master académique, université mouloud mammeri TIZI-OUZOU, 2016
- [10] T. Raminosa « optimisation des performances des machines synchro-reluctantes par réseaux de permanes », Thèse de Doctorat de INPL, octobre 2006.
- [11] I. MARIF & H. ABDAT, « La commande en vitesse d'un véhicule électrique », mémoire master, Université Tlemcen, 2019.
- [12] BOUKAIS Boussad, «contribution à la modélisation des systèmes couples machines convertisseurs : application aux machines à aimant permanents (BDCM-PMSM)», Thèse de doctorat à université MOULOUD MAMMERI TIZI-OUZOU, Février 2012
- [13] G.Lacroux, " Les aimants permanents ", Edition technique et documentation, 1989.
- [14] Bernard MULTON, "Application des aimants aux machines électriques ", notes de cours version 2009. Ecole normale supérieure de Cachan. <http://emecatronique.bretagne.ens.cachan.fr>. 25/05/2023 (date de dernière visite du site)
- [15] A.AMEUR, « commande sans capteur de vitesse par dtc d'une machine synchrone à aimants permanents dotée d'un observateur d'ordre complet à modes glissants », Mémoire de Magister, soutenu le 25/10/2005 université de Batna.
- [16] A.DEBAL, «commande vectorielle de la msap en utilisant la technique mli vectorielle», Mémoire Master, Université d'Oum El-Bouaghi 14 juillet 2021.
- [17] I. KHELIF « La Commande Direct du Couple D'une Machine Synchrone A Aimants Permanents (MSAP)», Mémoire MASTER ACADEMIQUE, 2018.
- [18] N. BOUNASLA, « Commande par Mode de Glissement d'Ordre Supérieur de la Machine Synchrone à Aimants Permanents », mémoire Magister en Electrotechnique, Université Ferhat ABBAS Sétif 2014.