Chapitre I : Etat de l'art de machine synchrone

I.1. Introduction

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

Cette famille de machine regroupe en fait plusieurs sous familles, qui vont de l'alternateur de plusieurs centaines de mégawatts au moteur de quelques watts, en passant par les moteurs pas à pas. Néanmoins, la structure de toutes ces machines est relativement proche.

Le stator est généralement constitué de trois enroulements triphasés répartis, tel que les forces électromotrices générées par la rotation du champ rotorique soient sinusoïdales où trapézoïdales.

Les stators, notamment en forte puissance, sont identiques à ceux d'une machine asynchrone. Il existe trois grandes familles de rotor, ayant pour rôle de générer le champ d'induction rotorique. Les rotors bobinés à pôles lisses, les rotors bobinés à pôles saillants ainsi que les rotors à aimants [1].

I.2. Présentation de machine synchrone (MS)

La machine synchrone est système électrique permettent de convertir l'énergie mécanique en énergie électrique « génératrice » et inversement « moteur ».cette machine est formée d'un dispositif inducteur créant un flux magnétique à travers l'induit, placé au rotor, ou au stator. Cet inducteur soit un aimant permanent, soit par un bobinage parcourus par un courant continu [2].

I.3. Principe de fonctionnement de la MS

La machine synchrone est une machine réversible alors elle peut fonctionner en deux (génératrice et moteur).

I.3.1. Fonctionnement en mode génératrice

L'inducteur de la génératrice synchrone, entrainé mécaniquement, crée un champ à répartition spatiale variable dans les bobinages statoriques. Les f.é.m. induites dans ces bobinages provoquent la circulation de courants induits qui créent à leur tour un champ statorique dans l'entrefer, qui tourne à la même vitesse que celle du champ inducteur [3].

I.3.2. Fonctionnement en mode moteur

En fonctionnement moteur, les enroulements statoriques sont alimentés par un système de tension triphasé de pulsation $w = p\,\Omega$. Ils créent alors un champ tournant à la pulsationΩ. Le champ crée par l'inducteur. Fixe par rapport au rotor (animé d'une vitesse de rotationΩ) tourne en synchronisme avec le champ crée par l'induit. Ces deux champs interagissent. Le couple ainsi crée entraine la machine à la vitesse w [4].

I.4. Constitution de la MS

Le moteur synchrone est constitué de deux parties, une partie mobile où rotor constituant l'inducteur, et une partie fixe ou stator portant des enroulements constituant l'induit. La mince zone localisée entre ces deux éléments est appelée entrefer.

Le stator d'une machine synchrone triphasé est constitué de trois enroulements identiques décalés de 120° dans l'espace, logés dans les encoches du circuitmagnétique fixe. Ce dernier est feuilleté afin de réduire les courants de Foucault et delimiter les pertes dans le fer.

Il est généralement construit en tôle à base d'alliage fer silicium qui permet l'obtention d'une induction élevée

Au rotor, les enroulements parcourus par un courant continu (dans le cas de la machine à rotor bobiné) sont remplacés par des aimants permanents alternant pôles nord et pôles sud. Le flux inducteur balaye les enroulements statorique et y induit des forces électromotrices (f.é.m.) alternatives. L'interaction des champs statorique et rotorique donne naissance à un couple sur l'arbre du moteur et entraîne le moteur à vitesse de rotation synchrone [5].

I.5.Machines Synchrones à rotors bobinés

Dans les cas des moteurs à rotors bobinés, le rotor supporte un bobinage monophasé alimente par un courant continu tandis que le stator est équipé d'un bobinage polyphasé à courant alternatifs. L'obtention d'une valeur de couple moyen non nulle passe alors par la vérification de la condition de synchronisme qui impose une égalité stricte entre vitesse du champ tourant stator et vitesse du champ tourant rotor.

Afin de s'en parer des contacts glissants (bague balais) comme pour les machines à courant continu, les machines synchrones à rotor bobiné font appel, le plus souvent, à une excitatrice (ou alternateur d'excitation) associée à un redresseur tourant, pour éliminer tout contact glissant. Cet alternateur auxiliaire dont l'induit est accouplé à l'arbre de la machine débite dans l'inducteur, par l'intermédiaire du pont redresseur à diodes tournant aussi avec l'arbre de la machine [6].

I.5.1. Machine à pôle lisse

Plutôt adaptées pour des applications à forte puissance et grande vitesse, le bobinage est dans ce cas logé dans des encoches pratiquées dans la masse du rotor et fermées par des clavettes en acier amagnétique (Figure I.1).les têtes de bobines inductrices sont maintenues en place par des frettes en acier amagnétique. L'entrefer étant d'épaisseur constante, seule la répartition des encoches et/ou leur remplissage constitue un paramètre structurel jouant sur la forme d'onde de f.é.m. attendues, une disposition appropriée permet d'obtenir des f.é.m. sinusoïdales à très faible taux d'harmoniques [6].

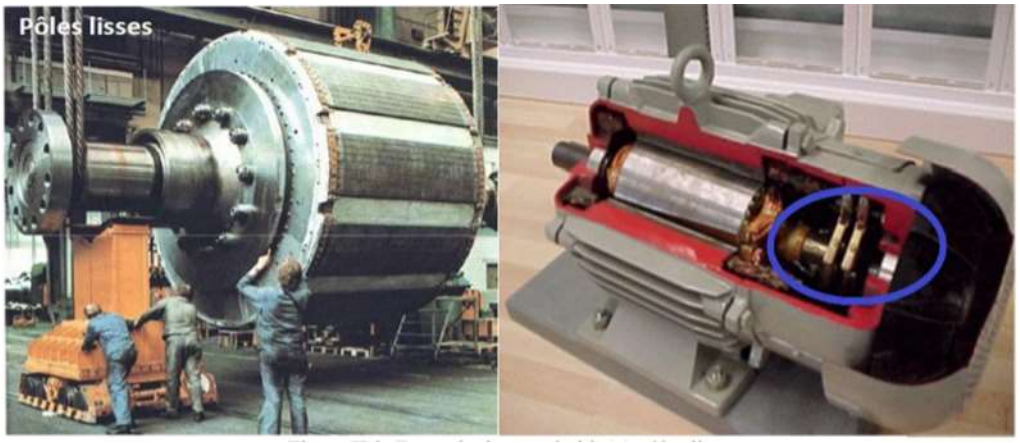


Fig. I.1: Machines Synchrones à rotor bobiné à pôle lisse

I.5.2. Machine à pôle saillant

Pour les machines à rotors à pôles saillants (Fig. I.2), les bobines inductrices sont montées autour de noyaux polaires massifs ou feuilletés. Pour ces machines, le rotor est un électroaimant dont les pôles sont alternativement nord et sud. Les enroulements sont alimentés en courant continu, ils sont placés autour des noyaux polaires. Le nombre de pôle est toujours pair, il varie suivant la machine.

Elles sont utilisées pour des applications qui nécessitent une simplicité de constitution. Ce type de machine possède un facteur de puissance relativement faible qui impose un

surdimensionnement des convertisseurs statiques, ceci est un inconvénient pour l'alimentation à fréquence variable. Pour des applications de faible puissance aux environ de quelques kilowatts on peut s'affranchir de cette faiblesse de ce genre des machines [6].



Fig. I. 2: Machines Synchrones à rotor bobiné à pôle saillant

I.5.3. Machine synchrone à aimant permanent (MSAP)

Dans les machines synchrones à aimant permanent, les aimants sont aussi situés sur la partie tournante. Le stator est constitué d'un enroulement triphasé distribué sinusoïdalement. Concernant son fonctionnent, il est basé sur le principe de rotation du champ magnétique en synchronisme avec le rotor : d'où le nom des machines synchrones à aimants permanents(MSAP).

Dans la plupart des applications, un onduleur est nécessaire pour avoir une alimentation avec une tension et une fréquence variable.
Dans ces systèmes le champ tournant rotorique peut être gardé en synchronisme avec la sortie de l'onduleur pour une vitesse allant de zéro à sa vitesse maximale [7].

I.6. Les aimants permanents

Les aimants permanents sont des solides ferromagnétiques ou ferrimagnétiques à température ambiante. Une fois aimantés, ils sont susceptibles de garder indéfiniment un certain état magnétique caractérisé par une aimantation rémanente notable et une résistance à la désaimantation élevée. Cette aimantation provient des dipôles magnétiques contenus dans ce matériau constitués d'ensembles de moments orbitaux et de spin des électrons [8].

I.6.1. Propriétés générales des aimants permanents

Le choix des aimants permanents est essentiel puisqu'ils interviennent pour beaucoup dans le couple massique d'un actionneur. Les aimants sont principalement caractérisés par leurs cycles d'hystérésis et plus particulièrement par la courbe de désaimantation du deuxième quadrant du plan B-H

(Figure I.3). Cette courbe est caractérise par :

- L'induction rémanenteB_r, c'est-à-dire l'induction résiduelle au circuit fermé ;
- Le champ coercitif H_{cb} , qui est le champ démagnétisant annulant l'induction, plus sa valeur élevée plus l'aimant stable ;
- Le produit d'énergie volumique $(BH)_{max}$.
- Les valeurs H_m et B_m du point de fonctionnement optimal M correspondant à $(BH)_{max}$. On peut classer les différents types d'aimants en fonction de ces paramètres [9].

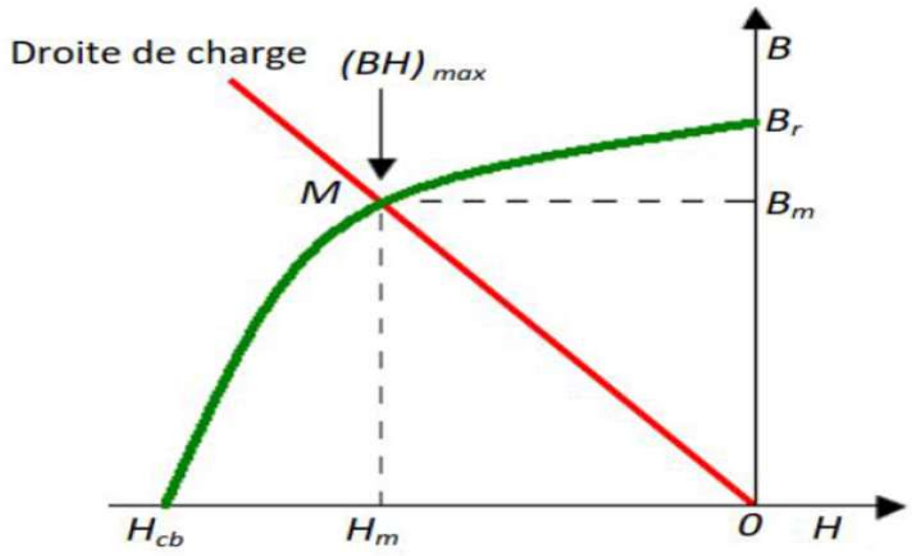


Fig. I. 3: courbe de désaimantation

I.6.2. Les différents types des aimants permanents

On peut classer les différents types d'aimants en fonction de ces paramètres comme suit [9]:

I.6.2.1. Les AlNico

Les AlNiCo sont des alliages à base de fer, d'aluminium et de Nickel, avec des additions Cobalt, Cuivre ou de Titane. Ils peuvent être isotropes ou anisotropes. Pour les isotropes $B_r \approx 0.7\ T$, H_{cj} de 50 à 80 A/m et
$(BH)_{max}$de 12 à 18 KJ/m^3. Le Titane augmente la trempabilité, le Niobium, la coercivité.

I.6.2.2. les ferrites

Les ferrites sont des composés d'oxyde de fer, de baryum et de strontium. Ils sont obtenus par frittage et peuvent être isotropes ou anisotropes. Suivant la composition et le mode de fabrication, on obtient les propriétés suivantes : B_r de 0.2 à 0.4 T, H_{cj} de 140 à 300 A/m et $(BH)_{max}$ de 10 à 40 KJ/m^3.
Ces aimants possèdent des performances modestes mais se sont imposés dans de très nombreuses applications en raison de leur faible prix de revient et d'une rigidité magnétique élevée permettant de les utiliser dans les machines. En raison de la faible valeur d'aimantation rémanente, il faut cependant recourir à des structures complexes de machines, à concentration de flux, pour atteindre des couples massiques et volumiques élevée.

I.6.2.3. Les terres rares Samarium – Cobalt

Les Samarium – Cobalt sont beaucoup plus performants et autorisent une température de fonctionnement élevée (jusqu'à 300°C), mais ils sont très coûteux en raison notamment de la présence du cobalt dans leur composition. De plus, le cobalt est interdit dans le domaine automobile pour des raisons de normes environnementales.

I.6.2.4. Les terres rares Néodyme – Fer – Bore

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).

Il faut souligner que les aimants permanents utilisés dans les machines électriques présentent une très grande rigidité magnétique (associée à une perméabilité magnétique dynamique proche de la perméabilité de l'air :μ_0) qui garantit une grande résistance à la désaimantation nécessaire pour les fonctionnements démagnétisant dans les machines.

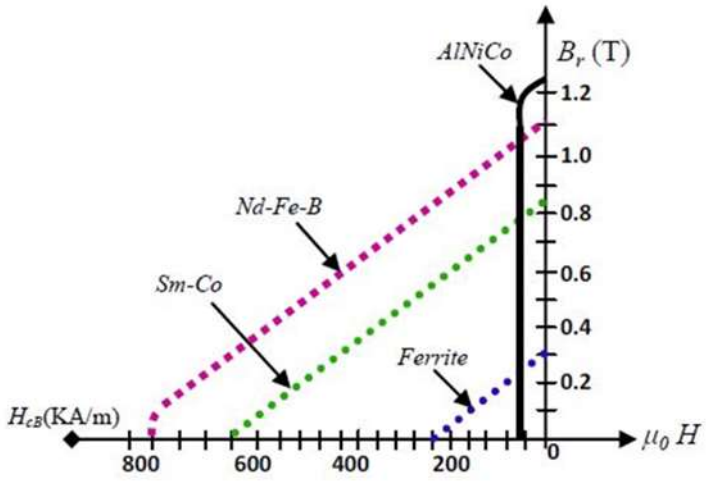


Fig. I. 4: courbe de désaimantation des principaux types d'aimants

I.7. Différentes structures de machines synchrones à aimants permanents

Les structures de machines synchrones à aimants permanents sont classées suivant la disposition des aimants sur le rotor. Leurs différentes configurations incluent les machines à flux radial (RFPM) et à flux axial (AFPM). Celles - ci peuvent être alimentées, soit par des courants sinusoïdaux dans le cas des PMSM ou par des courants en créneaux dans le cas des BDCM. Une vue schématique des deux types de machines à aimants, à flux radial et flux axial, est donné par (Fig.I.5) [10].

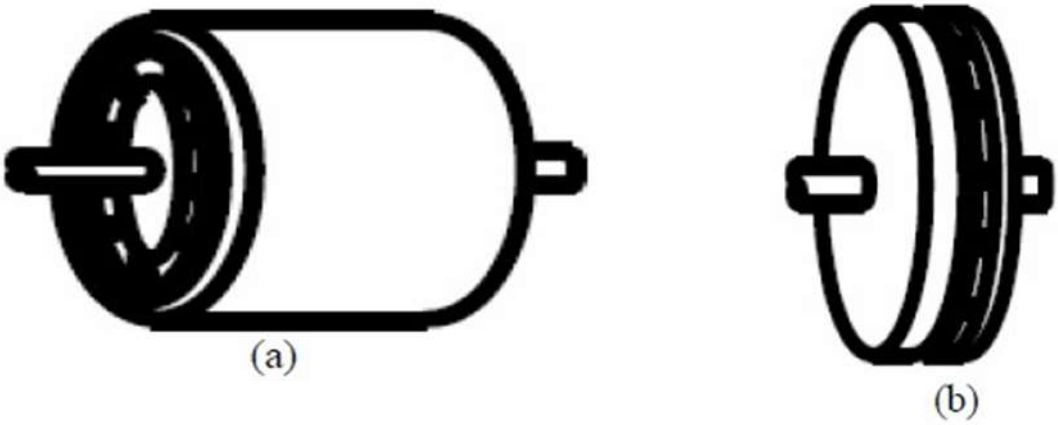


Fig. I. 5:Vue schématique des machines (a)à flux radial (b) à flux axial

I.7.1. Structures à flux radial (RFPM)

La machine synchrone à flux radial (RFPM) est la machine à aimants la plus conventionnelle. Elle est employée couramment pour l'entrainement direct. Son stator est identique à celui d'une machine d'induction classique. Ces structures peuvent se présenter. Soit avec un rotor place à l'intérieur ou à l'extérieur (fig. I.6). Les différentes types de rotor de machines à flux radial sont munis d'aimants montes soit en surface. Soit encastrés ou enterrés [10].

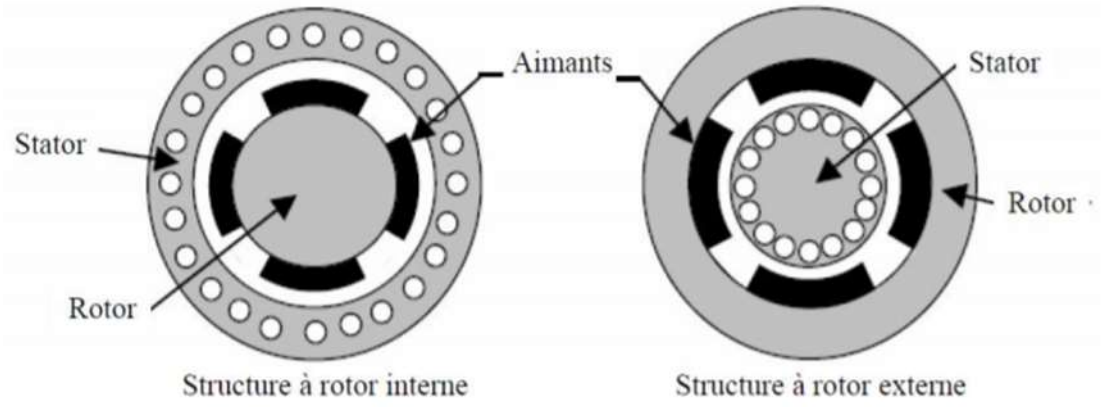


Fig. I. 6:Exemple de structures à rotor interne et à rotor externe

I.7.2. Structures à aimants déposés en surface

Elles sont appelées machines à inducteur lisse ne raison de leurs aimants disposés au niveau de l'entrefer sur un noyau ferromagnétique lisse (fig.1.7). L'induction B dans l'entrefer est celle des aimants B. Leur aimantation peut être radiale, tangentielle ou combinée.

La topologie à rotor interne est généralement la plus utilisée en raison de sa simplicité et son faible coût de réalisation. Cependant elle présente quelques inconvénients. En effet, les aimants permanents sont exposés aux champs de démagnétisation et sont sujets à des forces centrifuges pouvant causer leur détachement du rotor.

La topologie à rotor externe est moins utilisée car elle est plus difficile à réaliser et nécessite plus de volume d'aimant. Elle présente les avantages suivants :

- Un diamètre du rotor, plus grand que pour les machines conventionnelles, permettant d'avoir un nombre plus élevé de pôles et un couple plus grand.

- Une meilleure qualité de collage des aimants sur le rotor grâce à la force centrifuge qui pousse les aimants vers l'extérieur, rendant leur détachement presque impossible. (10)

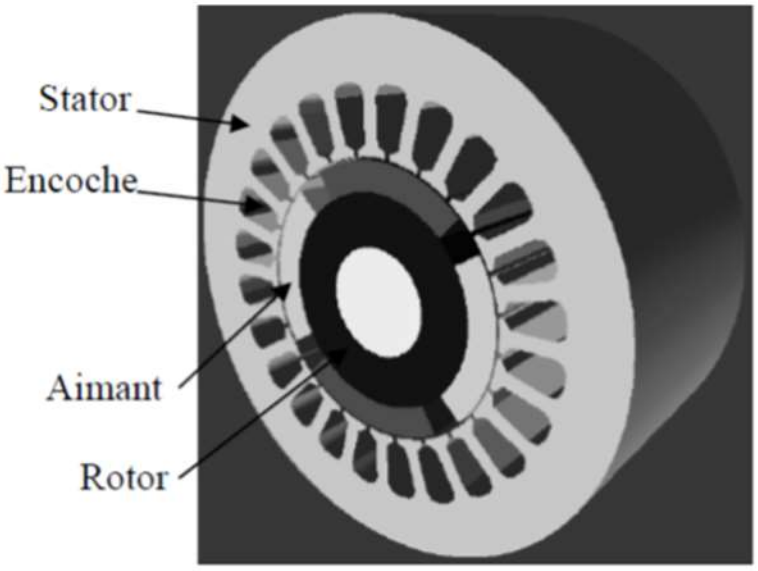


Fig. I. 7:Structure à aimants déposés en surface (rotor interne)

I.7.3. Structures à aimant encastrés (insérés)

Des aimants de forme simple sont insérés à la surface du rotor, ce qui leur permet d'avoir une bonne tenue mécanique (fig.I.8). L'espace entre les aimants est couvert par des dents rotoriques créant une saillance inversée ($X_d < X_q$).Cette saillance produit un couple de réluctance aussi important que le couple d'interaction dû aux aimants permanents [10].

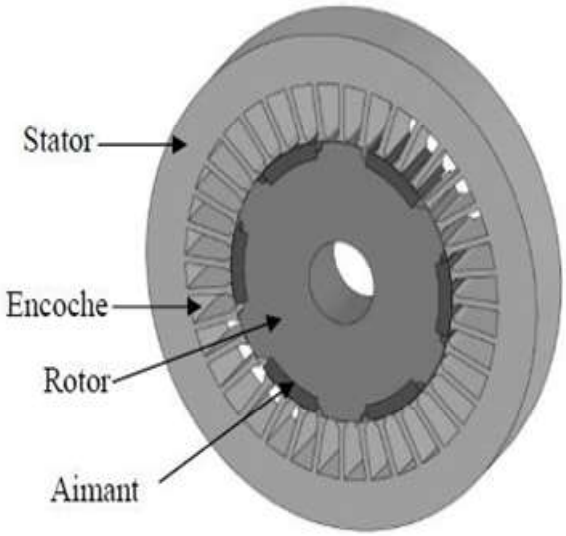


Fig. I. 8:Structure à aimants encastrés

I.7.4.Structures à aimants enterrés

La structure des inducteurs de ce type de machine est à géométrie complexe. Les aimants sont enterrés à l'intérieur du rotor.la robustesse mécanique de ce type de rotor permet d'atteindre de très grandes vitesses pour des puissances importantes. Deux configurations du rotor peuvent être distinguées (Fig.I.9), l'une est à concentration de flux et l'autre à structure classique.

L'avantage de ces deux configurations réside dans la possibilité de concentrer le flux produit par ces aimants, permettant ainsi d'assurer des niveaux d'inductions élevées dans l'entrefer. De plus, les aimants enterrés sont bien protégés contre la démagnétisation [10].

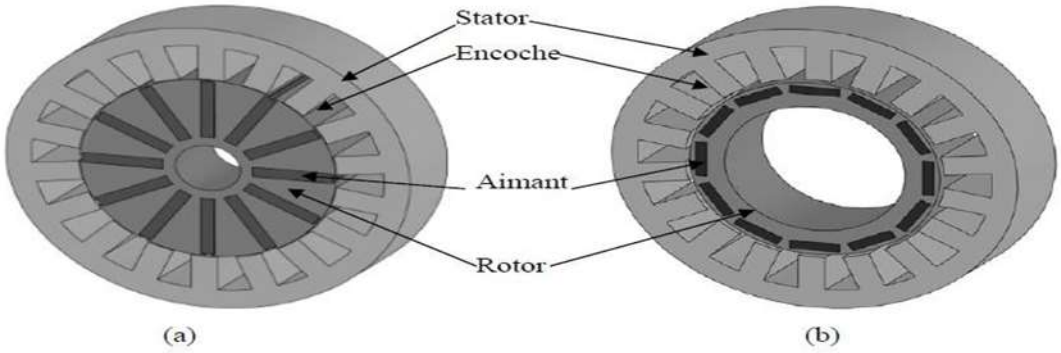


Fig. I. 9: Structure à aimants enterrés : (a) avec concentration de flux, (b) structure classique

I.7.5. Structures à flux axial (AFPM)

Ces machines dites « discoïdales » ou AFPM représentent une autre solution possible pour les entrainements directs à basse vitesse. Elle comportant un ou plusieurs disque fixes bobines et un plusieurs disques mobiles supportant les aimants permanents. Leurs principale avantage et l'optimisions de la surface
utile de génération du couple, qui se traduit par une puissance volumique importante. Cependant leur assemblage est très complique, à cause des contraintes mécanique liées aux poussées axiales.

Comparées à la structure à flux radial, ces machines se caractérisent par un plus grand diamètre et une longueur axiale relativement plus courte. Le flux provenant des aimants est axial tandis que le courant est dans la direction radiale. Différents configurations à flux axial existent : celle à structure simple avec un seul rotor associé à un seul stator (fig.I.10) et celles à doubles entrefer avec soit, un seul stator inséré entre deux rotors (fig.I.11) ou un seul rotor inséré deux stators (fig.I.12).

L'exploitation de ces machines dans le domaine de traction (vélo électrique et voiture hybride) est très prometteuse [10].

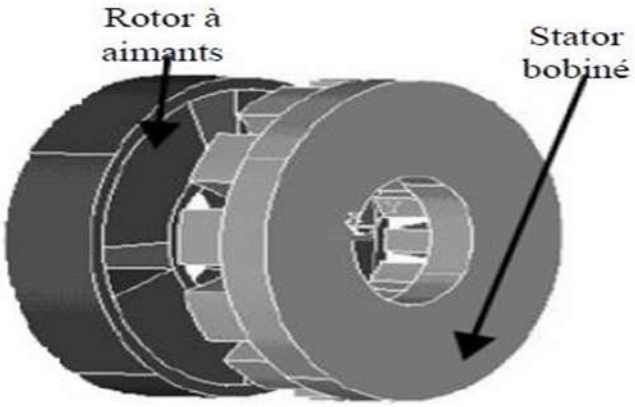


Fig. I. 10:structure axiale simple avec un rotor et un stator

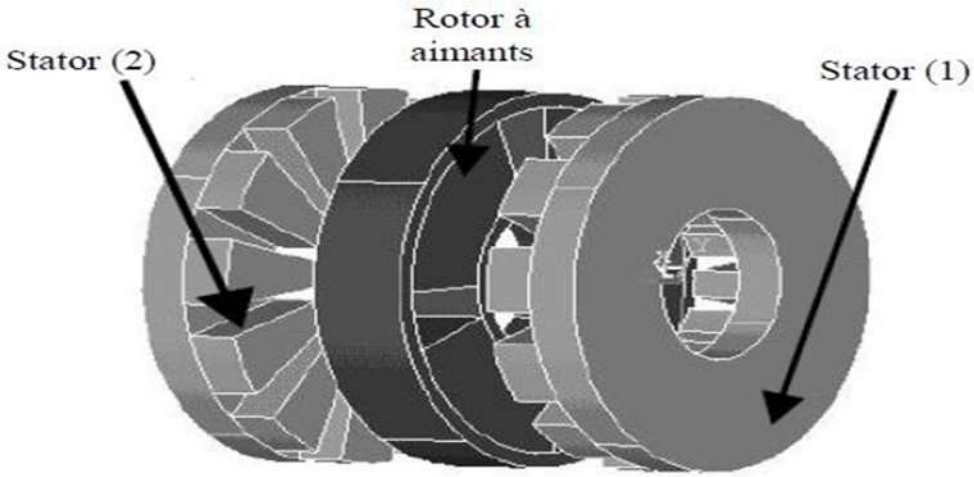


Fig. I. 11:Structure à flux axial avec double rotor et un stator

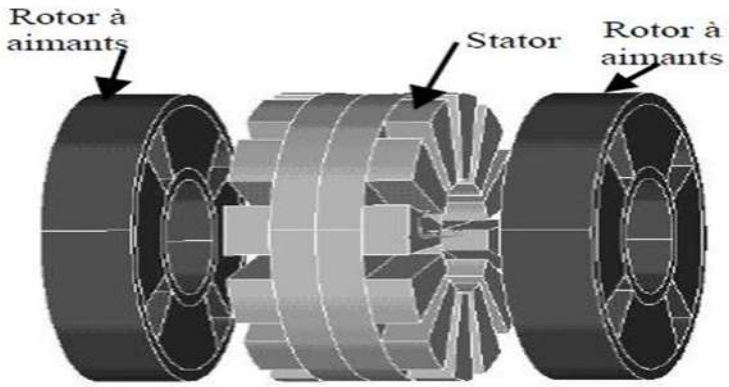


Fig. I. 12: structure à aimantation axiale avec double stator et un rotor

I.8. Domaines d'application

Ces machines ont trouvé un vaste champ d'application dans plusieurs domaines (équipement domestique, lecteurs CD/DVD et disques durs d'ordinateur, voiture et vélo électriques, transport, aérospatial, machines-outils, servomoteurs, équipement médical et propulsion des navires).Celles-ci sont utilisées pour des puissances allant de la gamme des microwatts à celle des mégawatts.

(La figure I.13) illustre quelques applications de ces machines. Il est utilisé pour les entrainements qui nécessitent une vitesse de rotation constante, tels que les grands ventilateurs, les compresseurs et les pompes centrifuges, et grâce au développement de l'électronique de puissance, l'association machine à aimants convertisseur de puissance a trouvé de nombreuses applications dans les domaines très divers tels que la robotique, la technologie de l'espace et dans d'autres plus particulières (domestique….).[10].



Disque dur



vélo électrique



Voiture électrique



Machine-outil

Fig. I. 13:exemples d'applications de machines synchrones à aimants permanents

I.9. Avantages des MSAP par rapport aux autres types de machines

Un avantage évident de l'utilisation des aimants au niveau de la production du flux est la suppression des pertes par effet de joule du système inducteur, on peut monter dans le cas des machines classiques que l'importance relative de ces pertes par effet joule par rapport à la puissance utile est d'autant plus élevée que la machine est de taille plus réduite.

Un autre avantage de l'excitation par aimants, concerne l'amélioration de la sécurité de fonctionnement certes, les moteurs synchrones à aimants sont intéressant du point de vue puissance, rendement, facteur de puissance et moment d'inertie pour des gammes accessibles à leurs utilisation (coût et fiabilité).

I.9.1. Moteurs synchrones à aimants – Moteurs à courant continu

Les moteurs synchrones à aimants concurrencent les moteurs à courant continu. En effet les moteurs synchrones à aimants produisent un couple élevé, l'absence du système balais lames du collecteur pour les moteurs à aimants permet de réduire la maintenance et d'éviter les problèmes de limitation pour la vitesse maximale.

I.9.2. Moteurs synchrones à aimants – Moteurs synchrone classique

Les aimants modernes et en particulier les plus performants, tel que les terres rares ont une perméabilité voisine de celle de l'air.

Ceci conduit à un entrefer équivalent plus important que celui obtenu les machines synchrones classiques. Cet avantage offre aux moteurs synchrones à aimants une meilleure stabilité.

D'autre part le moteur synchrone classique est limité par le volume de son rotor pour les grandes vitesses de rotation, ce qui n'est pas le cas pour un inducteur à aimants. L'autopilotage élimine tout problème de décrochage ou de ralentissement.

I.9.3. Moteurs synchrones à aimants – Moteurs asynchrones

Les moteurs à aimants présentent les avantages suivants par rapport aux moteurs asynchrones :

- Un faible moment d'inertie, ce qui a pour effet de donner une réponse plus rapide pour un couple donné ;

- Un rendement plus élevé que celui des moteurs asynchrones classiques, en effet les pertes joules rotoriques sont négligeables pour les machines à aimants, tandis que les pertes fer rotoriques d'un moteur asynchrone dépendent de glissement ;

- Le moteur à aimants est avantagé par sa rusticité, et il n'a pas besoin de requérir à une source de courant d'excitation ce qui n'est pas le cas pour le moteur asynchrone ;

- Pour les mêmes performances, le moteur est de taille plus rédiste, cet avantage permet d'utiliser les machine à aimants là où l'encombrement est limité.
  Toute fois le moteur asynchrone ne produit pas de couple de détente ce qui est le cas des machine synchrones à aimants [11].

I.10. Les Inconvénients

- Dans le moteur synchrone à aimants permanents le commutateur mécanique du moteur à courant continu est remplacé par un commutateur électronique, ce qui a pour effet de rendre le contrôle de ce moteur plus complexe et couteux que celui d'un moteur à courant continu.

- Un désavantage du moteur synchrone est la présence de pulsation de couple. Selonla méthode de commutation utilisée, le moteur synchrone est plus ou moins sujet à ce phénomène.

  La commutation sinusoïdale d'un contrôleur complexe et de capteur de courant sophistiqué (coûteux), la commutation trapézoïdale, permet d'utiliser un contrôleur et des capteurs de courant plus simples et moins couteux (exemple : capteur à effet hall), mais implique la présence de fortes pulsations de couple.

- La présence d'aimants permanents majore le prix des moteurs synchrones, notamment dans le cas de l'utilisation d'aimants de type terre rare, ces aimants présentent de très grandes qualités (champs coercitif, tenue en chaleur, etc.) par rapport aux aimants « ferrites » mais ont un prix aussi beaucoup plus élevé.

- Le contrôle basé sur une commutation électronique augmente la complexité et donc le prix du contrôleur et du variateur. Cela s'ajoute le coût des capteurs supplémentaires nécessaires à la boucle du courant.

- Risque de désaimantation (irréversible) : limite de température maximale, courant maximum défluxage impossible dans les machines à courant continu, possible dans les machines synchrones par contrôle de l'angle d'autopilotage.

- Pertes par courants de Foucault dans les aimants [12].

I.11. Alimentation de la machine à aimant permanent

- Ces machines sont regroupées en deux grandes familles ; les machines dont la f.é.m. est sinusoïdale et des machines dont la f.é.m. est trapézoïdale [12].

I.11.1. Moteur à f.é.m trapézoïdale

Pour les machines dites à f.é.m trapézoidale, la forme du courant la plus appropriée (celle qui minimise les ondulations sur son couple) est de type à 120 ° . les actionneurs correspondant sont communément appelés actionneurs à courant continu sans balais (BDCM : Brushless Direct current Motors).

La commande des (BDCM) est simple,car leur autopilotage consiste à alimenter à tout insant deux phase et cette commande nécessite uniquement une seule boucle de courant et un capteur de position de faible résolution.Mais à causse de l'effet de la commutation,le couple produit n'est pas constant.Des techniques de minimisation des ondulations de couple sont généralement nécessaires.

I.11.2.Moteur à f.é.m sinusoïdale

Pour obtenir un couple constant, les courants d'alimentation doivent être également sinusoïdaux, les actionneurs correspondant c'est-à-dire les ensembles moteur alimentation autopilotage sont communément appelés actionneurs synchrones (PMSM : permanent Magnet Synchronous Motors).

Le pilotage du moteur en courants sinusoidaux permet de supprimer les commutations brutales(source de bruit) et d'obtenit un meilleure régularité du couple moteur.

Le capteur de position du rotor doit avoir une grande résolution. On utilise un résolveur ou un codeur incrémental.

Les PMSM sont utilisés pour les applications à grandes performances qui demandent une grande qualité de couple. Mais rien n'empéche, en pratique, d'alimenter une machine à f.é.m. trapézoidales en courant sinusoidaux et vice-versa. L'intérét des associations précédentes est généralement d' offrir les qualites attendues pour l'application (faible coùt avec les permiéres, grande qualité de couple avec les secondes).

I.12. Conclusion

Dans ce premier chapitre nous avons présenté d'une manière globale la machine synchrone et son fonctionnement . Ensuite nous avons exposé les différentes catégories des aimants les plus utilisés par les machines tournantes, à la fin de ce chapitre nous avons cité les principales structures des machines synchrones à aimant permanent selon la direction de flux (radiale et axial), les domaines d'applications de la MSAP ainsi que les avantages et les inconvénients par rapport autre machines enfin nous avons présenté l'alimentation de la MSAP.

Le chapitre suivant sera consacré au modèle analytique de la machine synchrone à aimants sinusoidaux .