

Chapitre I : Généralités sur les machines synchrones à aimants permanents

I.1. Introduction

Aujourd'hui, grâce de la découverte des aimants permanents performants à haut rendement les machines à aimants occupent une place importante dans les applications industrielles de petite, moyenne et grande puissance, et dans la production de l'énergie électrique.

Le présent chapitre présente les différents types de matériaux à aimants permanents, ainsi que leurs applications dans la construction de divers genre de machines synchrones à aimants.

I.2. Aimants permanents

On appelle aimant permanent les corps qui ont la propriété de conserver une très grande aimantation rémanente. Ils permettent de fournir un flux d'induction dans un circuit magnétique, qui est influé par divers facteurs tels que, la température, les champs démagnétisant, et l'influence de l'action chimique de l'environnement comme la corrosion [5].

I.2.1. Grandes classes de matériaux pour aimants permanents

Les matériaux que l'on utilise pour leurs **propriétés magnétiques** peuvent se classer en deux grandes familles :

- les matériaux magnétiques **durs** qui sont des aimants permanents.
- les matériaux magnétiques **doux** qui ne présentent des propriétés magnétiques qu'en présence d'une excitation extérieure.

Le tableau suivant regroupe les principales propriétés des matériaux durs et celle des matériaux doux.

Les principales propriétés des matériaux	
Durs	Doux
-Forte induction rémanente -Fort champs coercitif -Forte énergie de désaimantation -Forte température de Curie	-Facilité d'aimantation -Forte induction de saturation -Forte perméabilité -Faibles pertes énergétiques (magnétiques, courant de Foucault) -L'excitation coercitif ne dépasse pas 100 A.m^{-1}

Tableau I.1 : Propriétés magnétiques des matériaux durs et doux

En effet, quand un matériau est placé dans un champ électromagnétique extérieur \vec{H} il se crée une induction magnétique \vec{B} propre au matériau qui est due à la polarisation des domaines, petites régions dans lesquelles les dipôles magnétiques s'orientent localement. Lorsque l'on supprime le champ extérieur, il reste une polarisation permanente dans le cas des matériaux magnétiques durs, appelée rémanence, alors qu'il n'y en a pratiquement pas dans les matériaux magnétiques doux.

La courbe $B = f(H)$ relative à chaque type de matériau est appelée **cycle d'hystérésis**. La Figure I.1 montre la forme de ces courbes dans les deux cas évoqués.

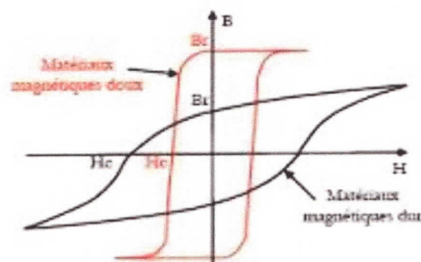


Figure I.1 Cycles d'hystérésis des matériaux doux et durs

I.2.2. Propriétés magnétiques

Les aimants sont principalement caractérisés par leurs cycles d'hystérésis et plus particulièrement par le deuxième quadrant de ce cycle appelé **courbe de désaimantation** d'où on peut tirer les propriétés suivantes (figurI.2):

– **l'induction rémanente B_r** : qui indique les performances potentielles des aimants (plus B_r est important, plus l'aimant est performant).

- le **champ coercitif de l'induction H_{cB}** : qui est le champ démagnétisant annulant l'induction ; plus sa valeur est élevée et plus l'aimant est stable
- le **produit d'énergie volumique BH** : qui définit la valeur énergétique de l'aimant par unité de volume [6]

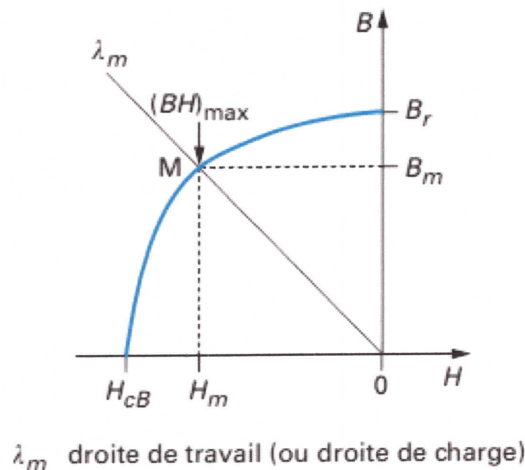


Figure I.2 Courbe de désaimantation d'un matériau pour aimant permanent

I.2.3. Différents types d'aimants permanents utilisés dans les machines

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

I. 2. 3.1. Les Alnico

Ces matériaux réalisés à partir d'un alliage Aluminium-Nickel-Cobalt. Caractérisés par une induction rémanente élevée et un champ coercitif faible et maximum de puissance B_H faible $(B.H)_{max}$. ce qui rend difficile leur utilisation dans les machines électriques (guitares-électriques, les microphones, les capteurs, les haut-parleurs).

I.2.3.2. Les ferrites

Ces matériaux présentent une induction rémanente faible, avec un champ coercitif élevé (bonne résistance à la désaimantation), leur prix revient relativement faible (noyau magnétique à la place des tôles feuilletées).

I.2.3.3. Les alliages à base d'éléments terres rares

Ils sont, actuellement, les plus performants des aimants permanents utilisés dans la construction des machines synchrones. Cette famille d'alliages comprend :

- Les aimants samarium-cobalt
- Les aimants néodyme-fer-bore

A. Les samarium-cobalt

Ces matériaux présente la caractéristique aimantation meilleur et un champ coercitif H_c beaucoup plus important que les ferrites, leur propriété magnétique sont peu sensible à la variation de la température, mais leur prix de revient est assez élevé, ils sont utilisés dans des applications de haute précision.

B. Les néodyme-fer-bore

Sont apparus dans les années 1980, Les aimants à base de Néodyme (NdFeB) sont moins chers que les aimants à base de Samarium-Cobalt, ils sont caractérisés par, une induction rémanente très importante, un champ coercitif très élevé, un maximum d'énergie (B.H) max important, leur température d'utilisation est limité à 150°C , sensibles à l'oxydation [7].

Le tableau suivant illustre les différentes propriétés des grandes familles d'aimants [8] :

Matériaux	Br en tesla	Hc en kA/m	T ⁰ de curie en C	Remarques diverses
Aciers	0.001à0.02	6à9	750	Anciens aimant
Ferrites	0.2à0.4	200	300	Les moins chers
Alnico	1.2	50	750à850	Se démagnétisent trop facilement
Samarium cobalt	0.5	800	700à800	Prix élevé à cause du cobalt
Néodyme fer bore	1.3	1500	310	Prix hausse (terres rares), sujet à l'oxydation

Tableau I.2 : propriétés des aimants permanents

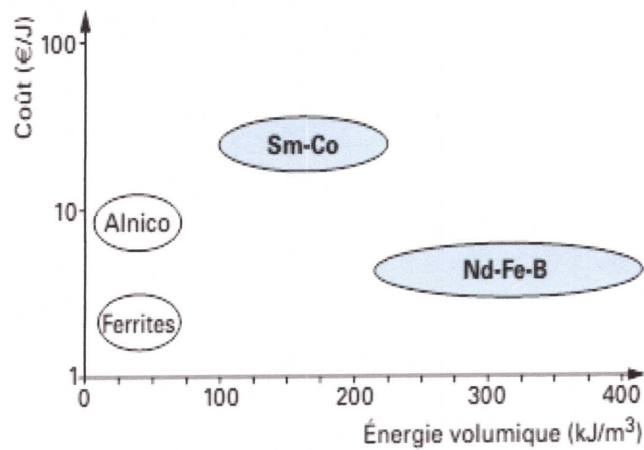


Figure I.3. Coûts des d'aimants en fonction de leurs performances magnétique

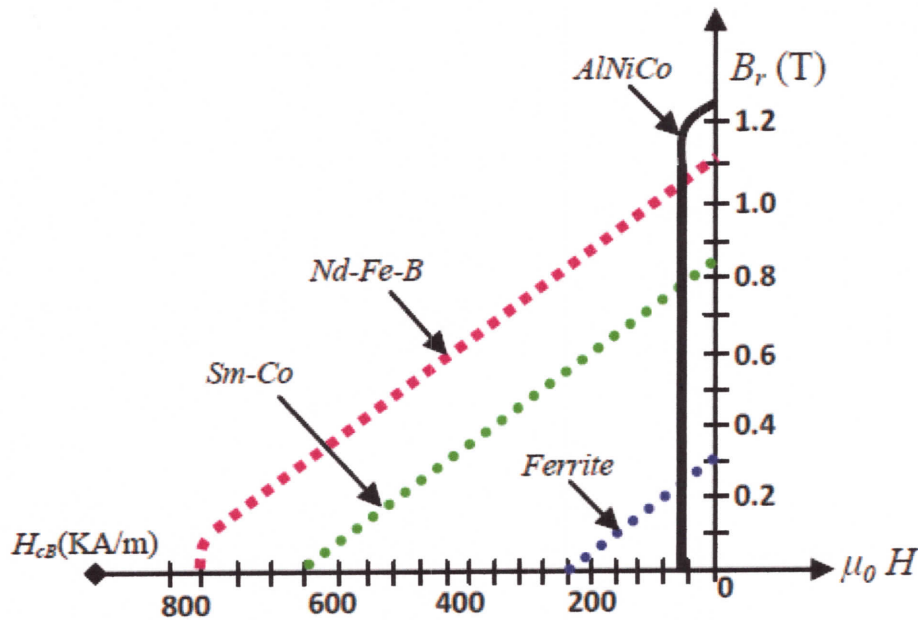


Figure I.4 Courbes de désaimantation des principaux types d'aimant

I. 2. 4. Problème de désaimantation des aimants

Dans une machine à aimants permanents. Que problème important est le risque de désaimantation des aimants soumis à des contraintes extérieures. Ce risque n'est pas négligeable car les aimants permanents sont sensibles à plusieurs phénomènes de natures très diverses tels que les champs magnétiques extérieurs, la variation de température, les chocs et vibrations mécaniques, le vieillissement.

I. 2. 4. 1. Désaimantation thermique

C'est-à-dire un échauffement de l'aimant au-delà de sa température de Curie, suivie d'un refroidissement en champ nul jusqu'à la température ambiante, reste formellement déconseillé.

En général, bien avant la température de Curie, on observe des pertes d'aimantation partielles mais non réversibles : on définit ainsi une température limite d'utilisation (variable entre 80 et 350°C selon les aimants).

I. 2. 4. 2. Champ désaimantant excessif

La charge magnétique produit un effet désaimantant, de même un champ opposé produit par une f.m.m tend à désaimanter l'aimant (réaction d'induit dans une machine électrique). La combinaison des deux ne doit pas conduire, dans les pires conditions, à une désaimantation irréversible.

I. 2. 4. 3. Vieillessement

C'est la variation d'aimantation observée au cours du fonctionnement d'un aimant soumis à une température bien déterminée.

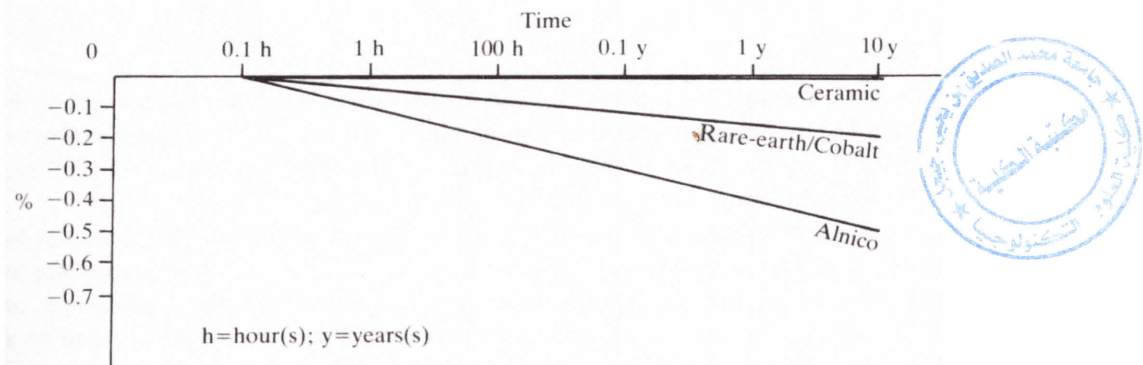


Figure I.5 : vieillissement de quelques aimants à une température de 24°C

La figure I. 5. montre les pertes d'aimantation observées au cours du temps pour différents aimants.

I. 3. Machines électriques à aimants permanents

Selon les principes de fonctionnement, les machines à aimants permanents peuvent être classées en trois types :

- Les machines à courant continu et aimants permanents (MCCAP).
- Les machines à aimants permanents sans balais (MAPSB).
- Les machines synchrones à aimants permanents (MSAP).

La figure (I.6) montre la configuration de ces trois types.

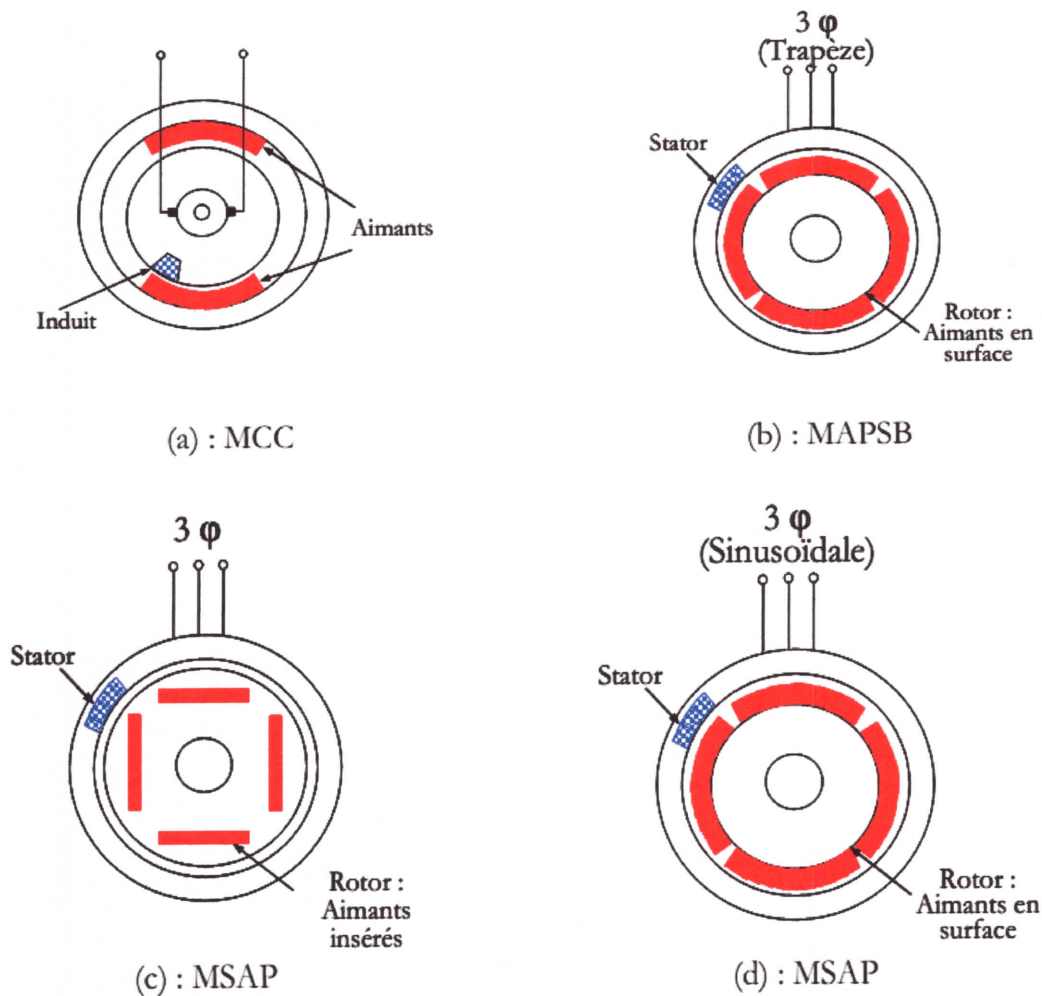


Figure I.6. Structures des machines à aimants permanents

I.3.1. Machines à courant continu et aimants permanents (MCCAP)

Ce sont les machines à courant continu dans lesquelles le champ magnétique, créé par les électroaimants, est remplacé par celui des aimants permanents. En conséquence, les pertes Joules liées aux bobinages de l'excitation sont éliminées, mais le champ de l'excitation n'est plus contrôlable. Ceci limite leur utilisation aux applications de faible puissance.

Le moteur à courant continu à aimant permanent se compose de trois éléments essentiels :

- Une partie fixe, l'inducteur (stator) constitué des aimants permanents qui engendrent un champ magnétique dont le flux traverse le rotor.
- Une partie mobile, l'induit (rotor) comportant une ou plusieurs bobines tournantes dans le champ magnétique créée par l'inducteur.
- Le collecteur associé aux balais, permet de relier les enroulements du rotor à l'extérieur du moteur [9].

I.3.2. Machines à aimants permanents sans balais (MAPSB)

Les progrès dans la technologie des semi-conducteurs ont conduit au développement d'autres types des machines à courant continu où la commutation avec le système balais collecteur est remplacé par la commutation électronique de commande doit assurer la commutation du courant dans les enroulements statorique Ce dispositif peut être, soit intégré au moteur pour les petites puissances, soit extérieur sous la forme d'un convertisseur de puissance (onduleur). Le rôle de l'ensemble capteur plus électronique de commande est d'assurer l'autopilotage du moteur, c'est-à-dire l'orthogonalité du flux magnétique rotorique par rapport au flux statorique.

Dans ces machines, les aimants permanents sont situés sur la partie tournante, vu de l'extérieur, il fonctionne en courant continu le stator est constitué de trois enroulements alimentés par les formes d'onde carrées fournies un convertisseur [10].

I.3.3. Machines synchrones à aimants permanents (MSAP)

Le terme de la 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 tournant.

Une MSAP triphasée est composée de deux parties principales : une partie fixe qui s'appelle stator il est constitué d'un empilage de tôle magnétique qui contient des encoches dans lesquelles sont logés trois enroulements identiques décalés entre eux de $2\pi/3$, et une partie tournante qui s'appelle rotor et qui est composée d'un aimant permanent.

Les bobines (phases) du stator sont reliées à une source triphasée de tensions sinusoïdales. La superposition des trois flux magnétiques crée par les trois bobines du stator produit un flux magnétique sinusoïdal tournant à la fréquence de la source de tension. Ce flux magnétique tournant interagit avec le flux de rotor dans l'entrefer qui sépare le stator du rotor et crée ainsi une force électromagnétique. Cette force se traduit par la rotation du rotor [9].

I.3.4. Différentes structures des machines synchrones à aimant permanents

Les structures des machines synchrones à aimants permanents sont classées suivant la disposition des aimants sur le rotor. Leurs différentes configurations incluent les machines à flux radial et à flux axial.

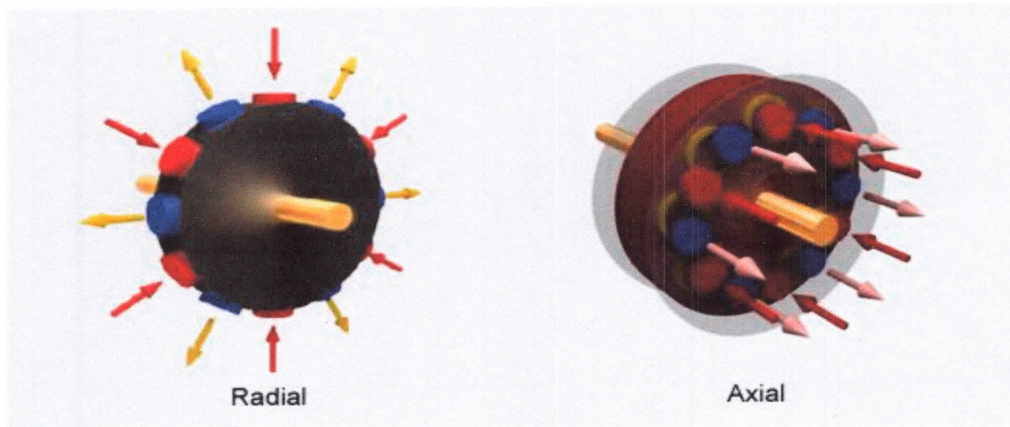


Figure I.7. Schéma de flux radial et flux axial

I.3.4.1. Machines synchrones à aimants permanents à flux axial

Ces machines dites « discoïdales » Elles comportent un ou plusieurs disques fixes bobinés et un ou plusieurs disques mobiles supportant les aimants permanents. Leur principal avantage est l'optimisation de la surface utile de génération du couple, qui se traduit par une puissance volumique importante. Cependant, leur assemblage est très compliqué, à cause des contraintes mécaniques liées aux poussées axiales

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.

Différentes configurations à flux axial existent: celle à structure simple avec un seul rotor associé à un seul stator et celles à double entrefer avec soit, un seul stator inséré entre deux rotors, ou un seul rotor inséré entre deux stators. L'exploitation de ces machines dans le domaine de traction (vélo électrique et voiture hybride) est très prometteuse [11].

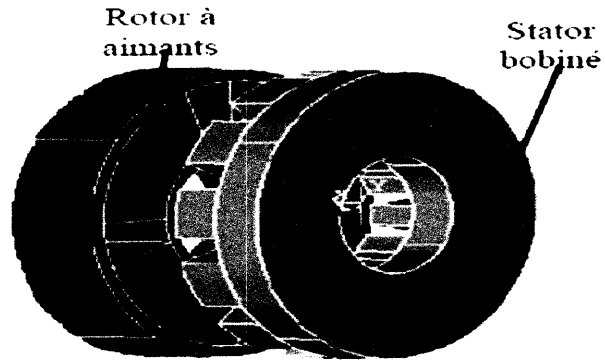


Figure I.8. Structure à flux axial simple avec un rotor et un stator

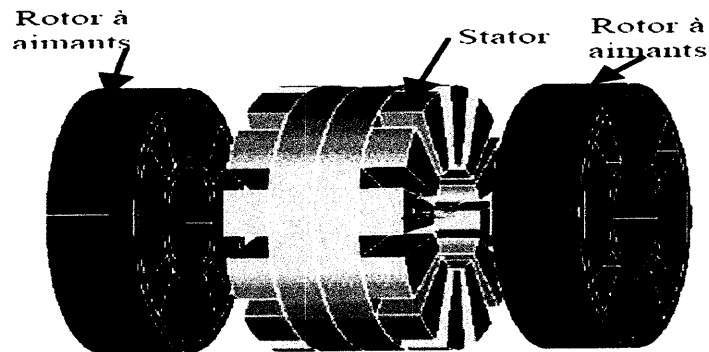


Figure I.9. Structure à flux axial avec double rotor et un stator

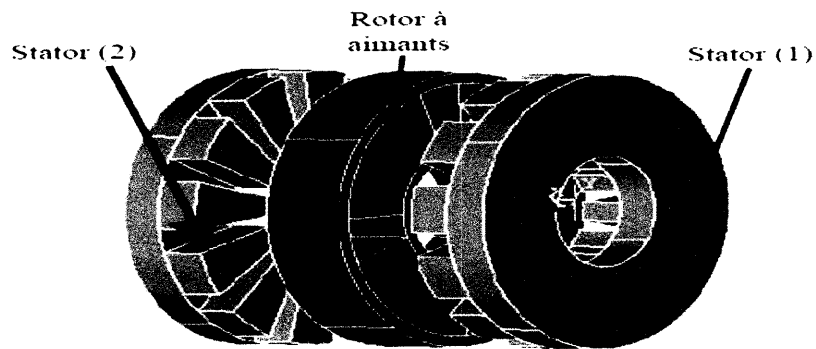


Figure I.10. Structure à aimantation axiale avec double stator et un rotor

I.3.4.2. Machines synchrones à aimants permanent à flux radial :

La machine synchrone à flux radial est la machine à aimant la plus convenable. Son stator est identique à celui d'une machine d'induction classique. Ces structures peuvent se présenter, soit avec un rotor placé à l'intérieur ou à l'extérieur. Les différents types de rotor de MSAP à flux

radial sont munis d'aimants montés soit en surface, soit insérés, enterrés ou à concentration de flux [12].

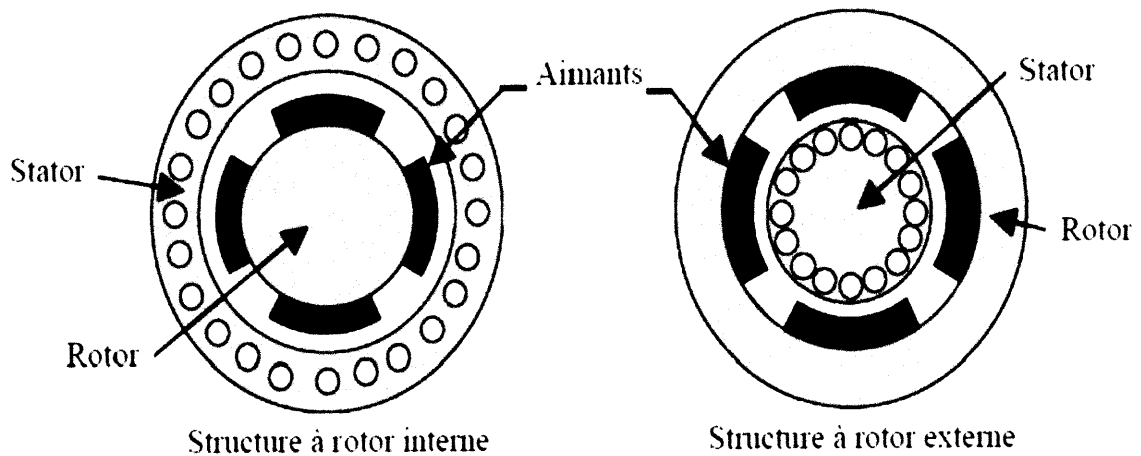


Figure I.11. Rotor interne et externe de MSAP

I.3.5. Positionnement des aimants

Les machines synchrones à aimants permanents peuvent être construites avec plusieurs configurations rotorique. Leurs classifications globales en termes de placement des aimants est les suivantes [7]:

- Aimants en surface (Surface magnet type)
- Aimants insérés (Insetmagnet type)
- Aimants enterrés (Interiormagnet type)
- Aimants à concentration de flux (Burriedmagnet type)

I.3.5.1. Aimants en surface

Pour cette structure les aimants sont placés sur la surface du rotor ils sont aimantés radialement. Elle est la plus simple à construire donc faible coût de fabrication, c'est généralement la plus utilisée. L'inconvénient majeur de ce type est l'exposition des aimants permanents aux champs démagnétisant en plus les aimants sont soumis à des forces centrifuges qui peuvent causer leur détachement du rotor. Pour améliorer la Tenue mécanique et la fixation des aimants et pour protéger les aimants permanents de la désaimantation, ils peuvent être insérés sous une frette amagnétique, généralement en fibre de verre.

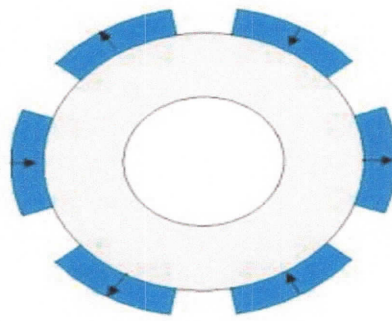


Figure I.12. Aimants permanents montés en surface

I.3.5.2. Aimants insérés

À partir de la structure précédente, on entaille des logements pour insérer les aimants permanents dans le rotor facilité l'assemblage mécanique.

Le fer entre les aimants permanents crée une saillance et donne un couple réluctante en plus du couple des aimants. La valeur de cette saillance dépend de la hauteur des aimants par rapport au fer et à l'ouverture des aimants. Les morceaux de fer entre les aimants diminuent l'entrefer, et augmentent les fuites de flux des aimants [13].

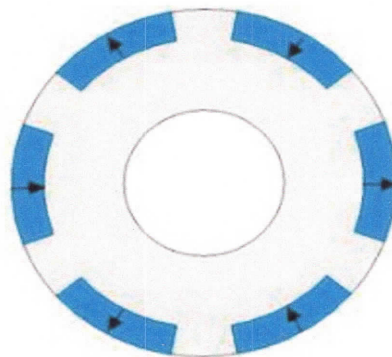


Figure I.13. Aimants permanents insérés

I.3.5.3. Aimants enterrés

Les machines à aimants enterrés sont des machines avec des aimants intégrés dans le rotor et aimantés radialement. Du fait que la surface du pôle magnétique est plus petite que celle du rotor, l'induction dans l'entrefer est plus faible que l'induction dans l'aimant. Les aimants dans cette configuration sont très bien protégés contre les forces centrifuges. Cette configuration du rotor est recommandée pour les applications à grandes vitesses.

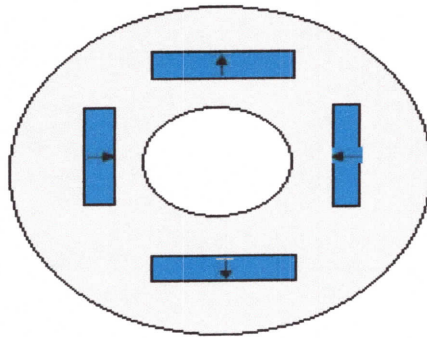


Figure I.14. Aimants permanents enterrés

I.3.5.4. Aimants à concentration de flux

Dans cette configuration, les aimants permanents sont implantés radialement dans le rotor qui est composé de tôles feuilletées. La disposition des aimants conduit à une concentration du flux magnétique créé par les aimants, ce qui permet d'obtenir une induction d'entrefer plus élevée par rapport à l'induction rémanente des aimants permanents [14].

Pour éviter un court-circuit magnétique, il faut utiliser un matériau amagnétique à la base des aimants. Ceci va compliquer la construction de cette structure de la machine qui comporte beaucoup de pièces. Cette structure est intéressante pour des aimants à faible induction rémanente.

Les deux derniers types sont bien protégés contre les contraintes mécaniques, cette robustesse permet d'atteindre de très grandes vitesses pour des puissances importantes, mais leurs géométrie est complexe avec un coût de fabrication élevé [10].

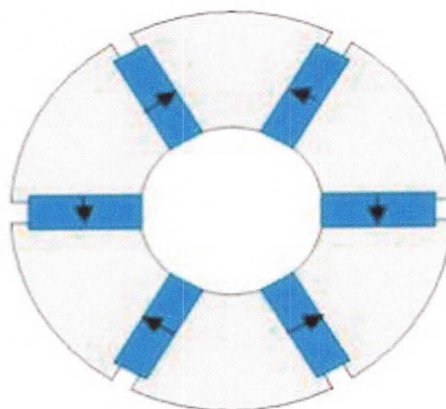


Figure I.15. Aimants permanents à concentration de flux

I. 4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différents types des aimants permanents utilisés pour la construction des machines électriques, avec quelques caractéristiques magnétiques et mécaniques, ainsi que leurs applications dans les machines.

Puisque le but principal de notre travail est la modélisation d'une machine synchrone à aimants à base de calcul du champ électromagnétique, nous allons donner des notions générales le sur calcul du champ dans le chapitre suivant.

MCours.com

