

1. Introduction

Selon le Vocabulaire Electrotechnique International « une machine synchrone est une machine à courant alternatif dans laquelle la fréquence de la tension induite engendrée et la vitesse sont dans un rapport constant » (VEI .411-01-06) [1]. 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 tournant. 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 en fonctionnement normal une vitesse de rotation identique entre le rotor et le champ tournant 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 d'une machine synchrone est identique dans sa conception à celui 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 permanent.[2]

L'utilisation des aimants permanents présente l'avantage d'éliminer les balais et les pertes rotoriques et apporte des simplifications remarquables dans la modélisation de la machine.

2. Classification des moteurs synchrones

Le moteur synchrone est utilisé dans une large gamme de puissance, allant du watt au mégawatt, dans des applications aussi diverses que le positionnement, la synchronisation, l'entraînement à vitesse constante, la traction. A ces nombreux domaines d'emplois, correspondent autant de technologies différentes, dont les plus répandues peuvent être scindées en deux grandes familles :

- Les moteurs synchrones à inducteur bobiné, à pôles saillants ou à pôles lisses,
- Les moteurs synchrones à aimant permanent, avec ou sans pièces polaires,

Les machines à aimants se développent de manière importante à l'heure actuelle, grâce à la mise au point d'aimants permanents de grande qualité, permettant l'obtention de couples massiques élevé, les puissances peuvent atteindre quelques centaines de kilowatts. Toutefois, leur domaine d'emploi privilégié reste les puissances inférieures à quelques dizaines de kilowatts, ou l'aimant permanent permet d'obtenir, à taille égale, une induction à l'entrefer plus élevée que les machines à rotor bobiné. Par ailleurs, l'emploi d'aimants permanents à la place de l'enroulement inducteur annule les pertes par effet joule au rotor et augmente le rendement.

On considère par la suite uniquement les moteurs synchrones triphasés ou les trois enroulements de l'induit sont situés au stator, et dont l'inducteur est situé au rotor, cette configuration est la plus répondeue. [4]

3. Présentation de la machine synchrone à aimants permanents

Historiquement, les premiers aimants permanents ont été utilisés au début du 19ème siècle. De performances très modestes à leurs débuts, les progrès réalisés depuis plus d'un siècle ont contribué au développement des machines à aimants.

L'évolution des aimants permanents modernes, qu'ils soient à base d'alliage métalliques ou à terres rares (par exemple du type manico, samarium cobalt, néodyme fer bore ...) leur a permis d'être utilisés comme inducteurs dans les machines synchrones offrant ainsi beaucoup d'avantages: induction de saturation élevé, faible désaimantation, densité de puissance massique élevée, énergie maximale stockée plus grande par rapport aux autres types de machines.

Dans la machine à aimants permanents MSAP, l'inducteur est remplacé par des aimants, le champ d'excitation peut être également créé par des aimants permanents, ceci présente l'avantage d'éliminer les balais et les pertes rotoriques.

La machine synchrone à aimants permanents est utilisée largement dans plusieurs applications comme les machines outils, la robotique, les générateurs aérospatiaux, la traction électrique, ...etc.

Le domaine d'emploi de la MSAP à l'heure actuelle est de quelques dizaines de Kilowatt à cause des caractéristiques magnétiques des aimants qui peuvent se perdre en dépassant les limites de fonctionnement. [3]

4. Structures des machines synchrones à aimants permanents

Le stator des moteurs synchrones triphasés à aimants permanents à une structure identique à celle des moteurs à rotors bobinés. On développera dans ce paragraphe les particularités liées au rotor.

4.1. Considérations générales à propos des aimants permanents

a) Caractéristiques et représentations

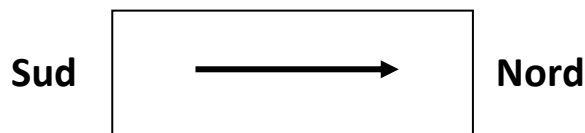


Figure 1.1 : Représentation de l'aimant permanent.

Les aimants permanents sont des matériaux magnétiques durs créant un champ magnétique à l'extérieur du volume qu'ils occupent. L'aimant possède des régions où la polarisation présente une composante normale à la surface. Les pôles sont représentés par une flèche indiquant le sens de l'aimantation (*figure 1.1*) [4].

Les aimants permanents utilisés dans les machines synchrones ont pour fonction principale la création du flux inducteur. Ils doivent permettre l'obtention d'une puissance massique élevée, ce qui réduit le volume de la machine. D'autre part une faible sensibilité à la température est

également indispensable, ce qui limite la désaimantation en fonctionnement normal. Dans ces conditions on peut obtenir le couple normal pour tous les régimes de fonctionnement.

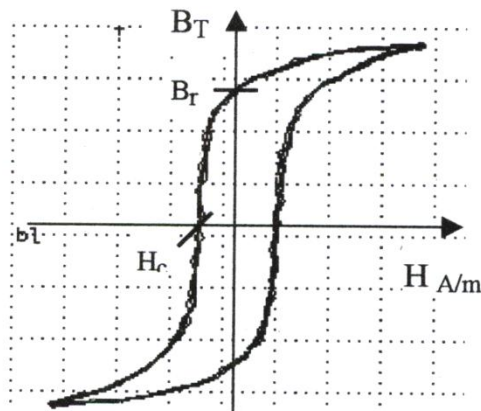


Figure 1.2 : Relève expérimental de l'allure du cycle d'hystérésis d'un matériau ferromagnétique doux.

Les aimants permanents sont caractérisés par la courbe d'aimantation, appelée également courbe d'hystérésis. L'allure d'une telle courbe, pour un matériau ferromagnétique doux, est présenté dans la figure 1.2, les figures 1.3 et 1.4 représentent les courbes relatives aux aimants permanents utilisés pour l'excitation des moteurs électriques.

La bonne résistance à la désaimantation, sous l'action d'un champ magnétique extérieur, est caractérisée par une valeur importante du champ coercitif H_c . Le champ magnétique extérieur H_e , est celui créé par la réaction magnétique d'induit. Celui-ci ne doit pas altérer l'aimant permanent, pour cela il est important de respecter la relation $H_e < H_c$, y compris en surcharge et en régime impulsionnel. La puissance massique de la machine est directement proportionnelle à l'induction dans l'entrefer, d'où l'intérêt d'une induction rémanente B_r élevée.

En conclusion, l'aimant permanent idéal pour la réalisation des inducteurs de machines synchrones doit présenter une caractéristique $B(H)$ rectangulaire avec des valeurs de B_r et H_c aussi élevées que possible. Une comparaison sommaire des performances peut alors être réalisée en comparant la valeur du produit $(B_r \times H_c)$ des différents types d'aimants permanents.

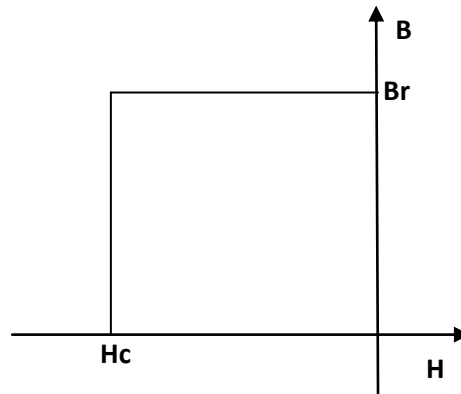


Figure 1.3 : Caractéristique $B(H)$ de l'aimant permanent idéal.

4.2. Les différents types d'aimant permanents

Les trois grands types d'aimants permanents utilisés dans les machines tournantes sont les alnico, les ferrites et les alliages étaux-terres. Le choix est effectué en fonction des caractéristiques recherchées et du prix de l'aimant, qui est très variable.

L'alnico est un aimant permanent réalisé à partir d'un alliage de fer, d'aluminium et de nickel. Il est caractérisé par une induction rémanente élevée et un champ coercitif faible. Suivant l'alliage réalisé on obtient par exemple $Br \approx 1,2$ T et $Hc \approx 150$ KA/m, ou bien $Br \approx 1,25$ T et $Hc \approx 150$ KA/m par conséquent, les caractéristiques énergétiques sont médiocres. De part sa composition métallique il est siège de pertes fer, et procédé de fabrication induit une direction privilégiée de l'aimantation, qui est celle de la plus grande longueur.

Les aimants permanents de type ferrite utilisent des matériaux de famille des céramiques. Ils sont surtout intéressants pour leur bon rapport densité d'énergie-prix.

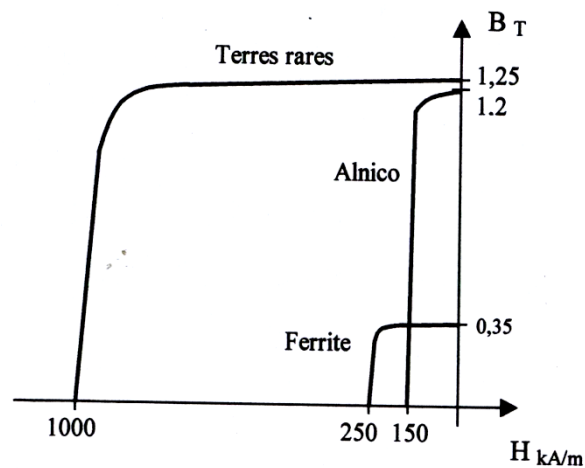


Figure 1.4 : Caractéristique des aimants permanents.

Les alliages métaux de transitions-terres rares sont à l'heure actuelle les aimants permanents les plus performants qui entrent dans la composition des inducteurs des machines synchrones. Le seul inconvénient est lié au prix.

4.3. Critères de choix des aimants permanents

Le choix des aimants permanents dépend des facteurs suivants :

- Performance du moteur ;
- Poids du moteur ;
- Dimension du moteur ;
- Rendement du moteur ;
- Facteur économique .

4.4. Moteurs synchrones à aimants permanents sans pièce polaire

1) Aimantation radiale

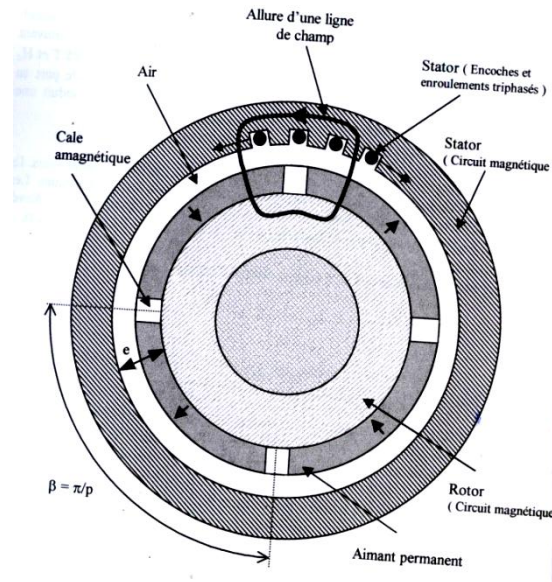


Figure 1.5 : Moteur synchrone à aimants ($P=2$), sans pièce polaire, à aimantation radiale

On utilise des aimants permanents à aimantation radiale, que l'on répartit sur toute la circonférence du rotor, en alternant les pôles. On intercale des cales amagnétiques, plus ou moins grandes, ainsi chaque aimant couvre une surface inférieure à celle de l'arc polaire β . Au niveau des aimants, on obtient une induction dans l'entrefer égale à celle de l'aimant, aux fuites près. Les aimants de types alnico ou ferrite sont bien adaptés à cette structure.

2) Aimantation tangentielle

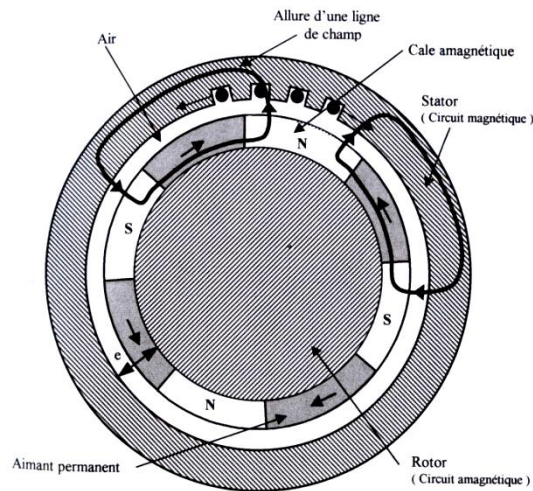


Figure 1.6 : Moteur synchrone à aimants ($P=2$), sans pièce polaire, à aimantation tangentielle

En utilisation des aimants à aimantation tangentielle, on peut réaliser des machines à induction sinusoïdale en répartissant convenablement les aimants et les cales le long de la circonférence du rotor.

4.5. Moteurs synchrones à aimants permanents avec pièces polaires

En utilisant des pièces polaires métalliques et des aimants amagnétiques, la répartition des lignes de champ est modifiée. En étudiant la répartition des lignes de champ, en fonction de la position des aimants et des pièces polaires, on peut obtenir une grande variété de machines.

Les aimants ferrites et terres rares peuvent être utilisées, à l'exécution de tout matériau magnétique, qui serait à l'origine d'un court circuit magnétique entre pôles. Chaque moteur est alors optimisé dans un but précis. On peut par exemple concentrer les lignes de champ, afin d'augmenter l'induction dans l'entrefer, donc le couple massique, ou au contraire le répartir sur une surface supérieure à celle du pas polaire couvert par l'aimant.

1) Aimantation tangentielle

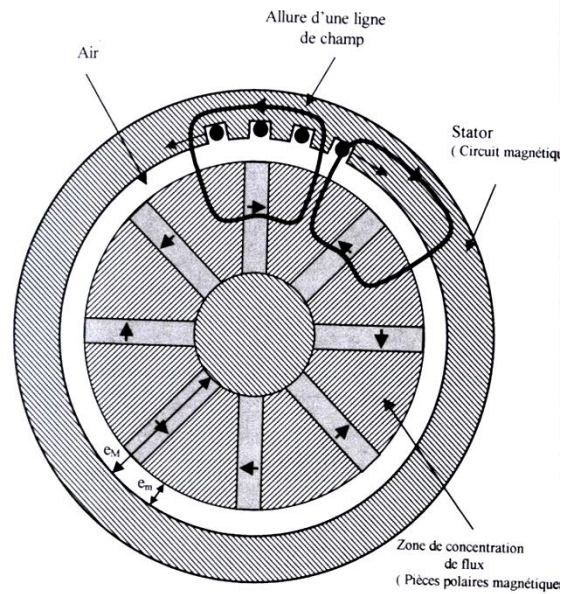


Figure 1.7 : Moteur synchrone à aimants ($P=2$), avec pièces polaires, à concentration de lignes de champ.

Une structure classique, permettant d'obtenir des machines synchrones de qualité. L'aimant est à base terre rare, et les pièces polaires permettent de concentrer le flux. L'aimantation de l'aimant est parallèle à l'entrefer, et les flux s'ajoutent au niveau des pièces polaires. On obtient ainsi une induction dans l'entrefer supérieure à celle de l'aimant, ce qui accroît le couple massique à volume de l'aimant donné.

2) Aimantation radiale

Le moteur présenté par la figure 1.5 donne naissance à une induction constante face à chaque pôle. En plaçant des pièces polaires sur la périphérie des aimants, on peut modifier la répartition de l'induction. Un exemple est présenté par la figure 1.8.

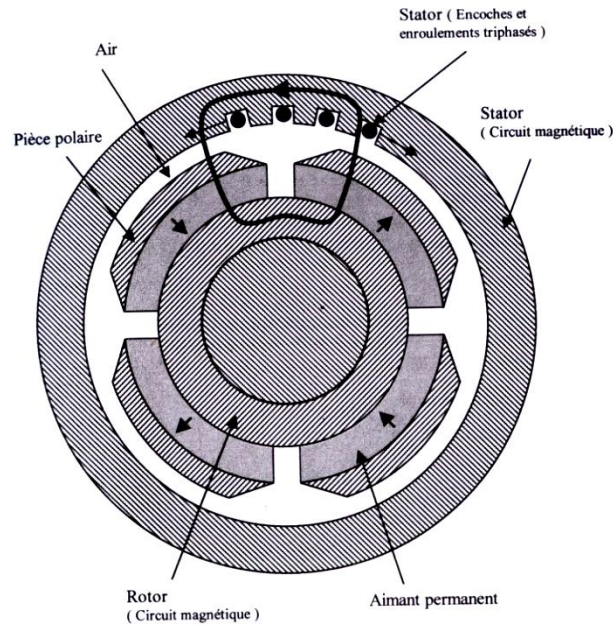


Figure 1.8 : Moteur synchrone à aimants ($P=2$), avec pièces polaires, à aimant radiale.

5. Principe de fonctionnement de la machine synchrone

Son principe est celui de l'alternateur : un électroaimant N-S ou un aimant permanent, appelé rotor, constitué de pôles excités par des bobines permettant de faire varier le champ inducteur tourne à l'intérieur d'un circuit magnétique dans les encoches duquel sont logés des conducteurs, constituant le stator. Au passage de chaque pôle du rotor, le flux croît progressivement de 0 à sa valeur maximale, puis décroît lorsque le pôle s'éloigne.

Aux bornes de chaque enroulement prend naissance une force électromotrice alternative. On recueille donc un système de trois tensions déphasées de 120° l'une par rapport à l'autre.

Inversement si les enroulements du stator sont alimentés par un système de trois tensions déphasées de 120° , un champ tournant est créé présentant lui aussi un système de pôles fictifs N-S, tournant à vitesse imposée par la fréquence d'alimentation. Supposons que le rotor soit entraîné à cette même vitesse : les deux aimants « s'accrochent » ; si l'entraînement du rotor est supprimé il continue à tourner.

L'arrivée du courant d'excitation au rotor se fait par deux bagues tournantes sur lesquelles viennent en contact deux balais dans le cas d'un rotor bobiné.

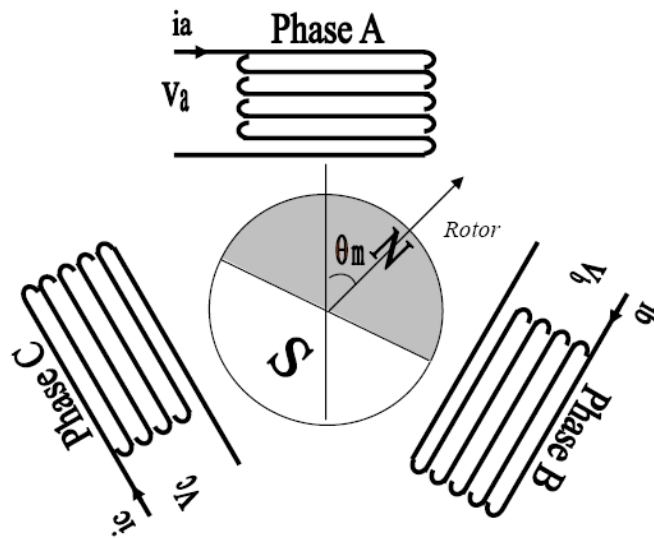


Figure 1.9 : principe du moteur synchrone.

Sous l'effet du couple résistant, les pôles réels du rotor ont tendance à ralentir et à se décaler par rapport aux pôles fictifs du stator.

Les attractions et répulsions entre pôles réels et fictifs ont des composantes tangentielles dans le sens de la rotation. Leur ensemble crée un couple moteur donc une puissance mécanique.

Pour les petites puissances (usuellement < 10 kW), le rotor est à aimants permanents, n'ayant ni collecteur ni balais, le moteur est appelé "brushless".

Pour des puissances plus importantes, le rotor est bobiné, son alimentation en courant continu (Connexions du + et du -) peut être assurée par un collecteur à deux bagues (beaucoup plus simple que celui d'une MCC). Il est aussi possible d'associer sur le même arbre une deuxième MS fonctionnant en alternateur, à aimants permanents, de puissance inférieure, débitant dans un pont redresseur tournant qui alimente le rotor de la machine principale. Il n'y a alors ni bagues, ni balais [5].

6. Avantages et inconvénients des machines synchrones à aimants permanents

1) Avantage

Lors de construction des machines synchrones à aimants permanents (MSAP), l'utilisation des aimants permanents à la place des bobinages d'excitation offrent beaucoup d'avantages : [6],

- Moins des pertes de cuivre, les pertes viennent surtout du stator d'où le rendement du moteur est amélioré ;
- Une faible inertie et un couple massique élevé ;
- Une meilleure performance dynamique ;
- Construction et maintenance plus simple ;
- Augmentation de la constante thermique et de la fiabilité, à cause de l'absence de contacte bague – balais dans ces machines ;
- Facteur de puissance et rendement élevée par rapport à ceux des moteurs asynchrones ;
- Puissance massique élevée et précision de sa commande.

2) Inconvénients

- Un moteur auxiliaire de démarrage est souvent nécessaire ;
- Il faut une excitation, c'est-à-dire une deuxième source d'énergie ;
- Si le couple résistant dépasse une certaine limite, le moteur décroche et s'arrête.

7. Domaines d'utilisation des machines synchrones à aimants permanents

Le moteur synchrone à aimants permanents est utilisé dans une large gamme de puissance, allant de certaines Watts (servomoteurs) à plusieurs méga Watts (systèmes de propulsion des navires), dans des applications aussi diverses que le positionnement, la synchronisation, l'entraînement à vitesse variable, et la traction [10], la robotique, les générateurs aérospatiaux. Il fonctionne comme compensateur synchrone.

Il est utilisé pour les entraînements qui nécessitent une vitesse de rotation constante, tels que les grands ventilateurs, les compresseurs et les pompes centrifuges.

8. La définition des variables et de la position zéro

Dans cette section quelques définitions qui sont liées à la position et la vitesse de rotor seront présentées. La position zéro également sera définie, mais d'abord la définition de quelques variables qui sont fréquemment employées dans tout ce travail. [8]

Avec :

θ_e : Position électrique de rotor

θ_m : Position mécanique de rotor

ω : Vitesse électrique de rotor

Ω : Vitesse mécanique de rotor

Le nombre de paires de pôles P , détermine le rapport entre la position électrique de rotor la position mécanique de rotor selon

$$\theta_e = P \cdot \theta_m \quad (\text{I.01})$$

Et les mêmes pour la vitesse électrique et mécanique de rotor

$$\omega = P \cdot \Omega \quad (\text{I.02})$$

Un point de départ pour le modèle électrique est le contour des enroulements de phase comme vu dans la (Figure 1.9). Cette figure définit également les tensions de phase (v_a, v_b, v_c), et les courants de phase (i_a, i_b, i_c).

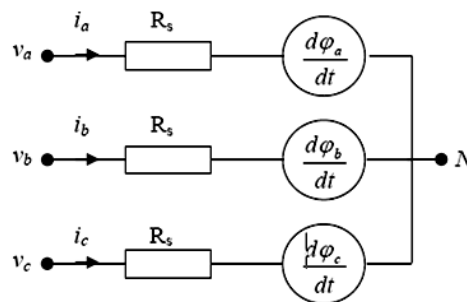


Figure 1.10 : une disposition électrique triphasé connectée en Y pour un MSAP.

17 Conclusion

On a présenté dans ce chapitre la structure de la machine synchrone à aimants permanents, ses domaines d'application, le principe fonctionnement, ainsi que sa modélisation et surtout ces différents caractéristiques électriques et mécaniques.

Dans le chapitre suivant on voit la modélisation de cette machine, leur modèle mathématique et la modélisation de leur alimentation.