

République Algérienne Démocratique et Populaire Ministère de l'Enseignement  
Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Université Mohamed BOUDIAF-M'sila



جامعة محمد بوضياف - المسيلة  
Université Mohamed Boudiaf - M'sila

Faculté de Technologie  
Département de Génie Electrique

## Cours

Spécialité : Master

Commandes Electriques, Commande des machines tournantes, Réseaux  
électrique, Energie renouvelable

# Machines Synchrones

Préparé par :

Dr. Brahim LADGHEM CHIKOUCHE

M'sila 2020

# SOMMAIRE

1. Introduction	1
2. Généralité et mise en équations de la machine synchrone	1
2.1. Constitution des machines synchrones	2
2.2. Méthodes d'étude des machines électriques	6
3. Création de la force électromotrice	7
3.1. FEM dans le cas d'une répartition sinusoïdale du flux inducteur	7
3.2. Cas d'un enroulement à plusieurs encoches par pôle et par phase	8
3.3. Source d'harmoniques	8
4. Mise en équations de la machine synchrone à pôle lisse	8
4.1. Réaction magnétique d'induit	8
4.2. Détermination des éléments du diagramme	9
4.3. Rapport de court-circuit	9
4.4. Diagramme de Potier	10
4.5. Détermination de $\alpha$ et $\lambda$	11
5. Machines à pôles saillants	12
6. Puissance et couple à partir du schéma monophasé équivalent	13
6.1. Machine à pôles lisses	13
6.2. Machine à pôles saillants	13
7. Synchronisation des alternateurs	13
7.1. Procédure de synchronisation	14
7.2. Alternateur branché sur un réseau infini	14
7.3. Marche à puissance active constante : Courbes de MORDEY	15
8. Moteurs synchrones	16
8.1. Démarrage du moteur synchrone	16
Bibliographie	18

# Machines Synchrones

## 1. Introduction

Jusque dans les années 1950-1960, les machines synchrones étaient essentiellement utilisées pour la production d'énergie électrique à partir de l'énergie mécanique en provenance de sources diverses, sous la forme d'alternateur travaillant dans une gamme de puissance allant de quelques watts jusqu'à quelques centaines de mégawatts.

La machine synchrone est surtout utilisée en générateur où elle est presque sans concurrent, mais elle sert également en moteur dans un certain nombre de domaines. Depuis longtemps, les moteurs synchrones sont utilisés dans des applications de forte puissance à vitesse fixe, mais les progrès dans le domaine de l'alimentation et de la commande leur permettent aujourd'hui d'être présents en vitesse variable. L'arrivée d'aimants performants à un coût raisonnable a également permis de développer les moteurs synchrones de petite et moyenne puissance, qui, associés à l'électronique, ont des qualités analogues à celle des moteurs à courant continu, sans en avoir les inconvénients.

## 2. Généralité et mise en équations de la machine synchrone

Une machine synchrone est une machine à courant alternatif pour laquelle la vitesse de rotation de l'arbre est égale à la vitesse de rotation du champ tournant.

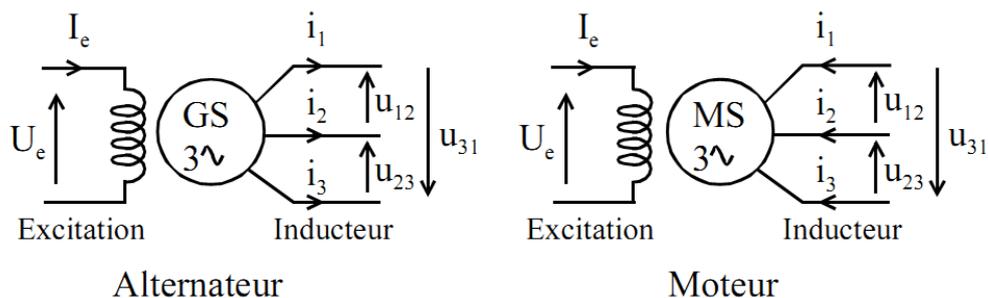


Figure 1. Symboles d'une Machine Synchrone

## 2.1. Constitution des machines synchrones

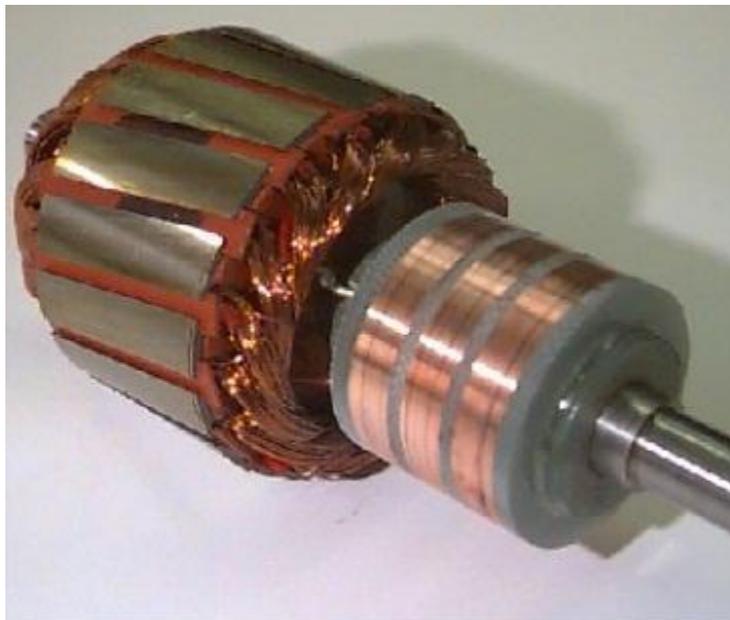
Les machines synchrones se composent d'un rotor, qui est la partie tournante, et d'un stator, la partie fixe. L'appellation machine synchrone est due au fait que le rotor et le champ magnétique tournant au stator tournent à la même vitesse. Le stator est généralement constitué par trois phases décalées de 120 degrés. Le rotor produit un champ magnétique dans l'entrefer avec des aimants permanents ou des bobines alimentées par un courant continu. Ces machines sont appelées respectivement machines synchrones à aimants permanents (MSAP) et machines synchrones à rotor bobiné (MSRB). Il y a différents types de structures de machines synchrones selon la forme de leur rotor. On peut les classer en deux groupes : celles qui se comportent comme des machines à pôles lisses et celles qui présentent des saillances. Il existe une grande variété de structures de machines synchrones à aimants permanents. Elles varient principalement selon les dispositions des aimants et des pièces polaires au rotor.

Généralement, on distingue deux types de rotor :

### a) Rotor bobiné

Les machines à rotor bobiné peuvent être à entrefer constant ou à pôles saillants. Le rotor à pôles saillants : sont bien adaptés aux machines à nombre de paires de pôles élevé et à vitesse de rotation basse ou moyenne (les centrales hydrauliques) contrairement aux machines à pôles lisses qui sont bien adaptés pour un entraînement à vitesse de rotation élevée. Aujourd'hui, la plupart des systèmes de sont équipés de moteurs synchrones à rotor bobiné à double étoile, associés à deux onduleurs de structure courant. Cette association offre d'une part, une redondance naturelle grâce à l'alimentation par deux onduleurs identiques (modularité). Du côté moteur, cette association permet de réduire le couple pulsatoire, puisque on annule l'harmonique du couple pulsant à  $6\omega$ , compte tenu du décalage des étoiles de  $30^\circ$ . Cependant, d'autres harmoniques notamment celui pulsant à  $12\omega$  persistent et peuvent poser certains problèmes d'ordre mécanique à basse vitesse.

La configuration à deux étoiles décalées associée à une alimentation par deux onduleurs de tension permet d'imposer des courants sinusoïdaux grâce à une fréquence de découpage plus élevée. Toutefois, pour éviter des pics de courant harmoniques circulant entre les étoiles (lié au couplage magnétique des deux étoiles), il faudrait que les étoiles soient non décalées [LAT06].



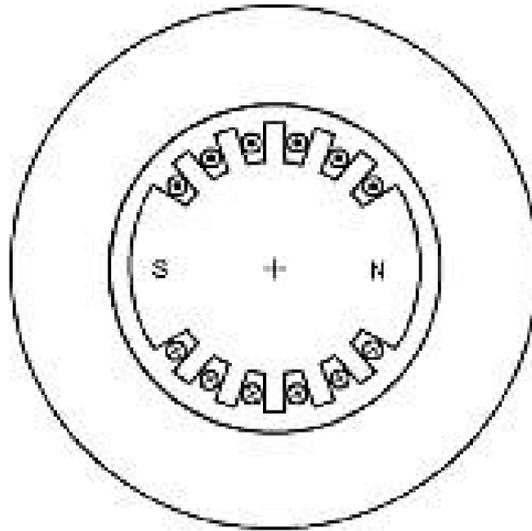


Figure 2. Machine synchrone à inducteur bobiné et à entrefer constant

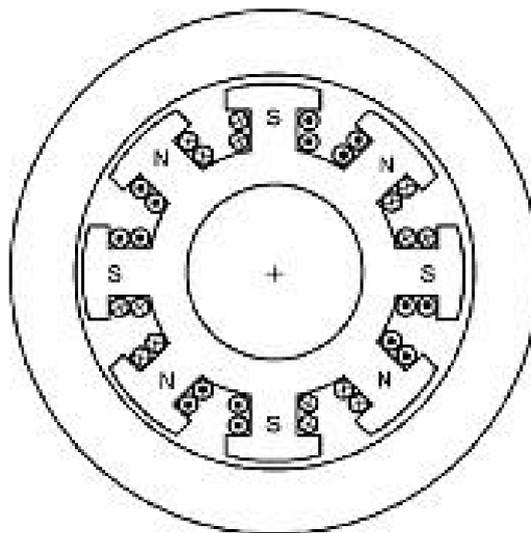


Figure 3. Machine synchrone à inducteur bobiné et à pôles saillants

### b) Rotor à aimants permanents

Un exercice difficile consiste à répertorier tous les types et topologies des machines synchrones à aimants permanents, ainsi que de comparer leurs performances.

- **Machines synchrones à aimants permanents montés en surface (MSAPS)**

Cette structure est la plus simple à construire parce que des aimants permanents à aimantation radiale sont disposés directement sur la périphérie du rotor. Les aimants ont généralement une forme de tuile et sont collés sur une culasse cylindrique. La construction de ce type de machine est simple et plus économique [Zhu93]. Pour améliorer la tenue mécanique et la fixation des aimants, ils peuvent être insérés sous une frette amagnétique, généralement en fibre de verre [Mah92]. Comme les aimants permanents ont une perméabilité proche de celle du vide, l'entrefer magnétique

équivalent vu par le stator est important et constant [Zhu93], [Har93]. Cette structure de machine rentre dans la catégorie des machines à pôles lisses. Les inductances propres et mutuelles de l'induit ne dépendent pas de la position du rotor. Une configuration à rotor extérieur est possible. La tenue mécanique des aimants est facilitée par la force centrifuge. Cette configuration a aussi l'avantage de diminuer le poids total. Si on compare deux machines de même nombre d'encoches et de pôles, la configuration à rotor extérieur est toujours plus intéressante que celle à rotor intérieur, et elle offre un meilleur rendement. Ce gain peut s'expliquer par la réduction des pertes magnétiques qui est liée directement à la diminution significative du volume de fer du stator.

- **Machines synchrones à aimants permanents insérés (MSAPI)**

A partir de la structure précédente, on entaille des logements pour insérer les aimants permanents dans le rotor afin de faciliter l'assemblage mécanique. Les parties de fer entre les aimants permanents sont des espaces interpolaires qui rajoutent de la saillance. La valeur de cette saillance dépend de la hauteur des aimants par rapport au fer et à l'ouverture des aimants. Toutefois, les caractéristiques de cette structure restent fondamentalement proches de la MSAPS. Les références [Seb87] et [Seb86] démontrent, dans une modélisation confrontée à des résultats expérimentaux, que le couple maximal par unité de courant statorique peut être supérieur à celui des aimants montés en surface. Les morceaux de fer dans l'axe interpolaire diminuent l'entrefer dans l'axe  $x$ , et augmentent les fuites de flux des aimants [Mah92].

- **Machines synchrones à aimants permanents chapeautés (MSAPC)**

Cette structure est déduite de celles avec des aimants permanents montés en surface. On place sur les aimants des pièces polaires généralement en acier doux. La combinaison des aimants et des pièces polaires crée une anisotropie du rotor et rajoute une saillance. Les pièces polaires permettent de contrôler la forme de la FEM au stator en agissant sur le profil de la pièce. On peut rajouter un léger effet de concentration de flux avec les pièces polaires. Comme ces pièces polaires sont massives et conductrices, elles peuvent jouer le rôle d'amortisseurs et influencer ainsi le choix du convertisseur statique, en particulier lorsque les formes d'ondes sont riches en harmoniques.

- **Machines synchrones à aimants permanents enterrés (MSAPE)**

Le principe de cette structure est d'augmenter l'induction magnétique dans l'entrefer par rapport à l'induction rémanente des aimants permanents. Il y a donc un effet de concentration de flux vers l'entrefer. En fait, les pièces polaires canalisent le flux généré par les aimants permanents à aimantation tangentielle dont la surface latérale  $S_B$  est supérieure à la demi-surface de la pièce polaire prise au niveau de l'entrefer. Le rapport de concentration est défini par le ratio de ces deux surfaces. La surface  $S_a$  est propre aux dimensions des aimants, alors que celle de la pièce polaire est inversement proportionnelle au nombre de pôles. Cette structure est intéressante pour des aimants à faible induction rémanente, (par exemple des aimants ferrites). 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 machine qui comporte beaucoup de pièces. On remarque qu'une configuration à rotor extérieur n'est pas intéressante en raison des problèmes d'assemblage.

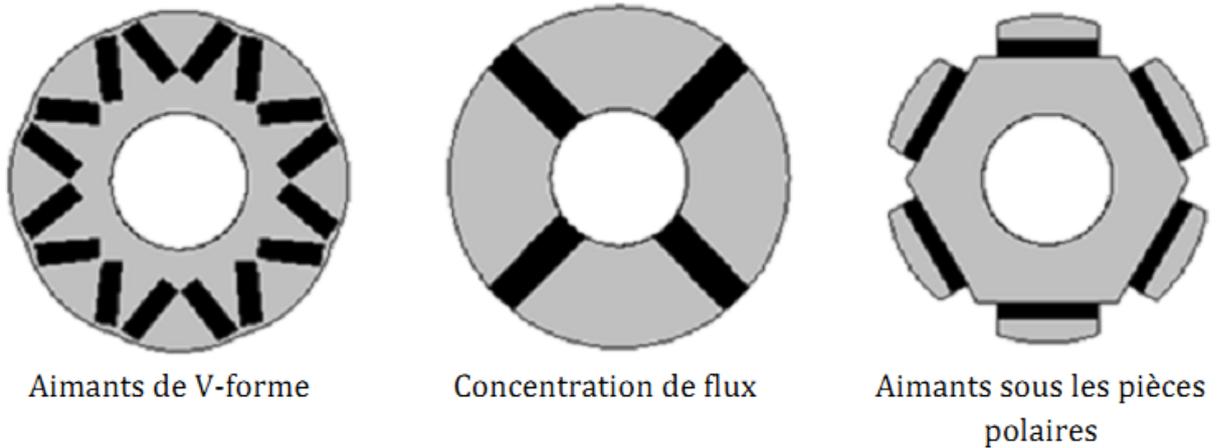


Figure 4. Structure du rotor avec des pièces polaires

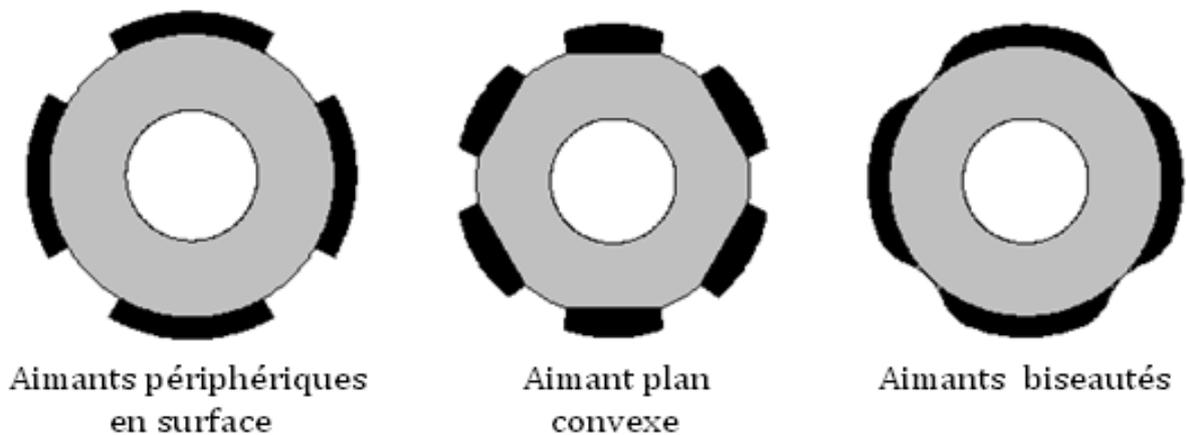


Figure 5. Structures du rotor sans pièces polaires

- **Machines à aimants discoïdes à champ axial**

Les moteurs discoïdes sont pourvus de disques fixes bobinés et de disques mobiles supportant les aimants permanents. L'avantage déterminant de la structure discoïde par rapport aux structures cylindriques provient de l'optimisation de la surface utile de génération du couple, qui se traduit par une puissance volumique importante. L'accroissement de la polarité dans ce type de machine a le même effet que sur les structures à champ radial et se traduit ici par une diminution de la longueur, le volume étant parfaitement occupé.

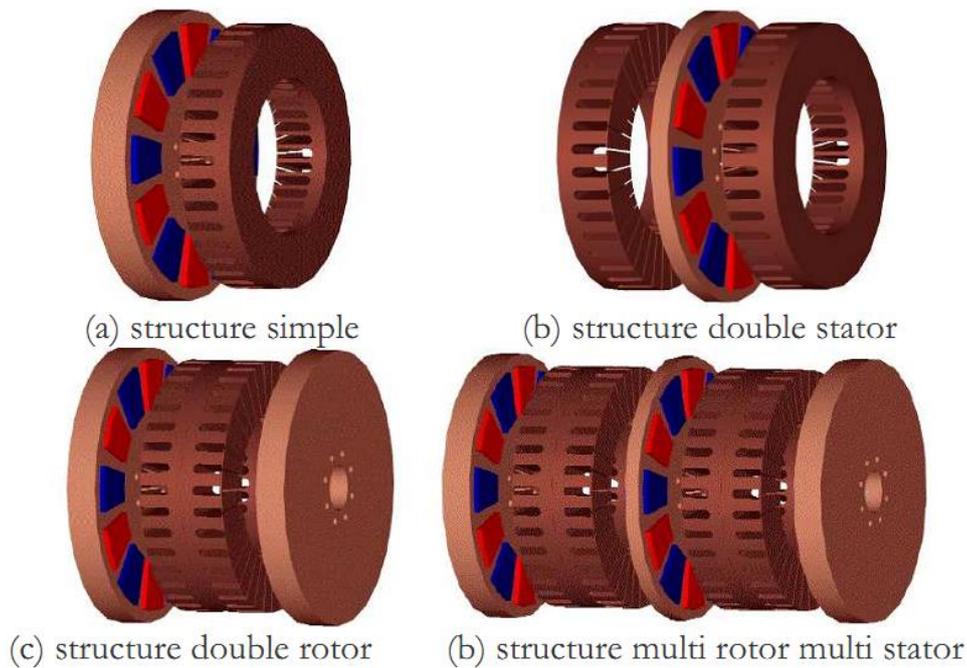


Figure 6. Machines à aimants discoïdes à champ axial

Les structures discoïdes offrent également une grande modularité naturelle par juxtaposition de modules, la puissance étant déterminée par le nombre de disques pour un diamètre donné [Mic97], [Let95]. Cette structure fait l'objet d'une attention particulière [Ols05]. Malgré sa puissance massique élevée, on souligne toutefois l'existence de contraintes mécaniques liées aux poussées axiales et des contraintes thermiques dues à la difficulté d'évacuation des pertes statoriques [Mic97].

## 2.2. Méthodes d'étude des machines électriques

**a) La méthode dite " des circuits " ou de Kirchhoff :** On écrit les équations des différents circuits électriques et l'équation de conservation de l'énergie dont on déduit l'expression de la force en fonction des paramètres globaux du circuit. C'est une méthode systématique, semblable quelle que soit la machine étudiée, elle ne demande pas la connaissance approfondie du phénomène physique exploité. Le dispositif se présente comme une "boîte noire", un "paquet" d'équations différentielles. On peut aisément en faire un modèle mathématique, qu'il suffira d'insérer dans celui d'un ensemble. C'est particulièrement intéressant lorsque le moteur (ou tout autre dispositif) vient s'inscrire comme élément d'un ensemble, dans une chaîne de régulation. C'est donc l'optique de l'automaticien.

**b) La méthode dite "des champs" ou de Maxwell :** On part des phénomènes physiques (loi de Coulomb ou loi de Laplace), on calcule les grandeurs intervenant réellement dans le phénomène physique. C'est l'optique du constructeur.

### 3. Création de la force électromotrice

#### 3.1. FEM dans le cas d'une répartition sinusoïdale du flux inducteur

Considérant la bobine unique constituant l'enroulement d'une phase pour une double distance polaire. Considérant  $\alpha$  l'angle qui fait un pôle Nord avec le second coté.

Un conducteur situé en 1 et 1' est soumis à une induction  $B = B_m \cos(p\alpha)$  et est le siège d'une f.é.m.

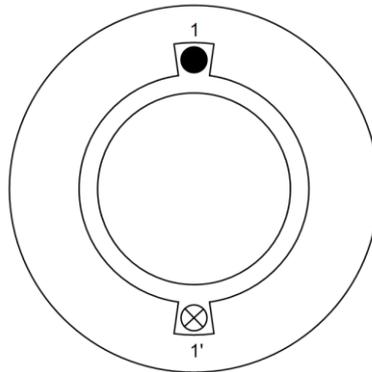


Figure 7. Enroulement diamétral bipolaire

$$f. \acute{e}. m_{sp} = 2B_m LV \cos(p\alpha)$$

$L, V$  sont respectivement, la longueur du conducteur, la vitesse à laquelle le flux inducteur balaie la surface de l'induit.

Si le diamètre intérieur de l'induit est de  $D$ , le flux utile d'un pôle inducteur  $\Phi$  est le produit de la surface de l'induit située face à lui par l'induction moyenne qu'il y crée.

$$\Phi = \frac{\pi DL}{2p} B_{moy} = \frac{\pi DL}{2p} \frac{2}{\pi} B_m = \frac{\pi DL}{p} B_m$$

La relation entre la vitesse linéaire  $V$  et rotative  $n$  est donnée par :

$$V = \pi D n$$

Où la fréquence de rotation est donnée par :

$$f = p n$$

La valeur efficace de la force électromotrice par spire est de :

$$E_{sp} = \frac{1}{\sqrt{2}} 2\pi p n \Phi = \sqrt{2} \pi f \Phi$$

Si la bobine compte  $N$  spires :

$$E = \frac{N}{2} E_{sp}$$

$$E = \frac{\pi}{\sqrt{2}} N f \Phi = 2.22 N f \Phi$$

### 3.2. Cas d'un enroulement à plusieurs encoches par pôle et par phase

Si  $m$  est plus grand de 1, le bobinage d'une phase pour une double distance polaire équivaut à  $m$  sections décalées d'un pas dentaire  $\tau_d$ . Les  $f$ .é. $m$  induites sont égales mais sont décalées de  $p\tau_d$  ce qui permet une réduction de leur somme que traduit le coefficient de Bobinage  $k_b$ .

$$E = \frac{\pi}{\sqrt{2}} k_b N f \Phi$$

Quel que soit la forme de la répartition du flux dans l'entrefer, l'augmentation du nombre d'encoche dans le stator rend la forme de la force électromotrice induite plus proche de la sinusoïde ce qui permet la réduction des harmoniques indésirables.

### 3.3. Source d'harmoniques

Lors de l'analyse harmonique de la tension induite à vide d'un alternateur, la répartition du champ magnétique non sinusoïdal est due au plusieurs facteurs :

- Le nombre d'encoches statorique, c-à-d, l'utilisation adéquate de l'enroulement.
- L'ouverture des encoches généralement on utilise des encoches semi-ouvertes.
- L'épaisseur de l'entrefer qui doit être plus faible.
- La saturation du circuit magnétique de la machine.

## 4. Mise en équations de la machine synchrone à pôle lisse

### 4.1. Réaction magnétique d'induit

Les courants circulant dans les enroulements statoriques créent un champ supplémentaire, tournant à la même vitesse que celui généré par le rotor et se superposant à ce dernier. Ceci a pour effet de modifier le flux utile, donc la valeur de la f.é.m. induite, et constitue la réaction magnétique d'induit. Le phénomène est analogue à celui qui se produit dans les machines à courant continu. Il y a cependant une différence fondamentale par rapport à celles-ci. Dans le cas de la machine à courant continu, le champ statorique présente un décalage constant par rapport au champ rotorique et la réaction magnétique ne dépend donc que de l'intensité du courant d'induit, ce qui permet de la compenser grâce à des enroulements auxiliaires. Dans le cas des machines synchrones, par contre, la position du champ statorique dépend également du déphasage existant entre les courants et les tensions. La compensation par "construction" n'est donc pas possible, et il faut s'attendre a priori à des variations importantes de la tension aux bornes de la charge lorsque celle-ci évolue.

Si on néglige la saturation, le schéma monophasé équivalent peut représenter l'alternateur en convention générateur ou le moteur en convention récepteur. Les expressions peuvent s'écrire sous forme suivante :

$$V = E_v - RI - jXI \text{ (Générateur)}$$

$$V = E_v + RI + jXI \text{ (Récepteur)}$$

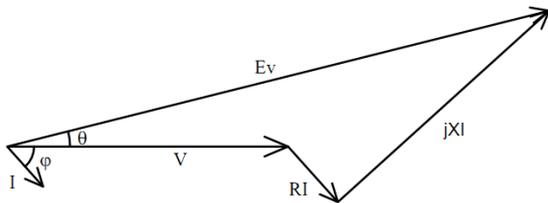


Figure 8. Diagramme de Behn-Eschenburg en convention générateur

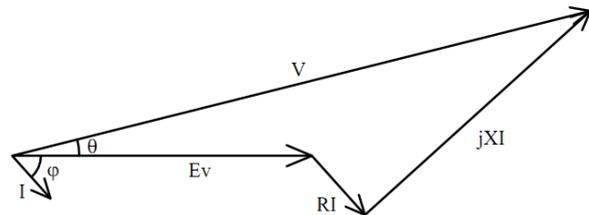


Figure 9. Diagramme de Behn-Eschenburg en convention moteur

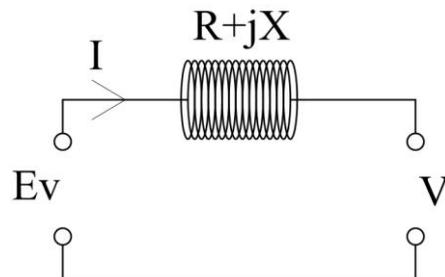


Figure 10. Circuit électrique équivalent

#### 4.2. Détermination des éléments du diagramme

Pour déterminer les éléments du diagramme, il suffit de relever la caractéristique à vide et en court-circuit à vitesse de rotation nominale.

$$E_v = f(J) \text{ et } I_{cc} = f(J_{cc})$$

En court-circuit la tension  $V$  est nulle, donc,

$$X = \frac{E_v}{I_{cc}}$$

#### 4.3. Rapport de court-circuit

Le rapport de court-circuit  $k_{cc}$  est donné par :

$$k_{cc} = \frac{J \text{ pour } E_v \text{ égale } V_{nom}}{J \text{ pour } I_{cc} \text{ égale } I_{nom}} = \frac{J_0}{J_{cc}}$$

Le courant d'excitation d'un alternateur à rotor lisse en régime linéaire est proportionnel à la force électromotrice induite qu'il crée.

$$\begin{cases} J_0 = \frac{1}{k} V_{nom} \\ J_{cc} = \frac{1}{k} \sqrt{R^2 + X^2} I_{nom} = \frac{1}{k} X I_{nom} \\ X I_{nom} = \frac{1}{kcc} V_{nom} \\ \frac{X I_{nom}}{V_{nom}} = \frac{1}{kcc} \end{cases}$$

Ce rapport indique l'importance de la réaction d'induit : plus il est faible, plus la réaction est forte.

Pour les gros turbo-alternateurs,  $kcc$  est de l'ordre de 0.5, donc,  $X$  de l'ordre de 200%. Ces machines doivent pour  $E = V_{nom}$  être très loin du coude de la saturation  $E(J)$ , puisque à pleine charge, elles devront fournir une FEM supérieure à  $2V_{nom}$

#### 4.4. Diagramme de Potier

L'avantage de ce diagramme est de tenir en compte la saturation du circuit magnétique.

La force électromotrice résultante à travers une phase de l'induit pour une convention générateur est :

$$\vec{E}_r = \vec{E}_v + \vec{E}_i$$

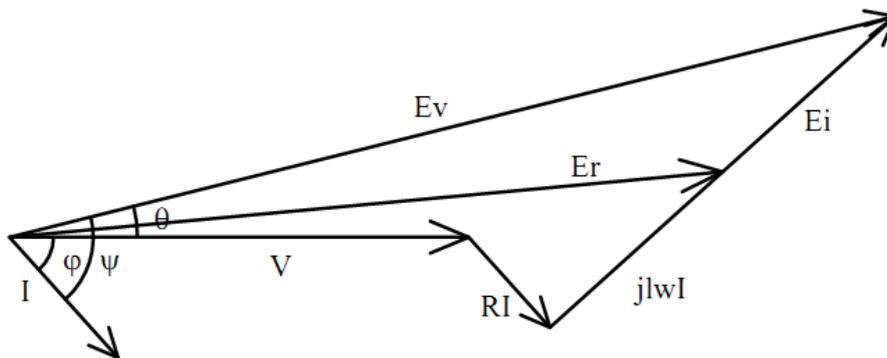


Figure 11. Diagramme de Behn-Eschenburg

Où  $lw$  est l'inductance de fuite cyclique et

$$E_v = kJ$$

$$E_i = k\alpha I$$

$$X = lw + k\alpha$$

$X$  tient compte de la totalité du flux de l'induit, flux de fuite et flux de la réactance ; elle est appelée réactance synchrone.

$$\vec{E}_r = \vec{V} + R\vec{I} + j\lambda\vec{I}$$

$$\vec{J} = \vec{J}_r + j\alpha\vec{I}$$

#### 4.5. Détermination de $\alpha$ et $\lambda$

- Mesurer la résistance  $R$ .
- Prendre la caractéristique à vide à vitesse nominale.
- Prendre la caractéristique en court-circuit à vitesse nominale.
- Le point en déwatté ( $V_1, I_1, J_1$ ).

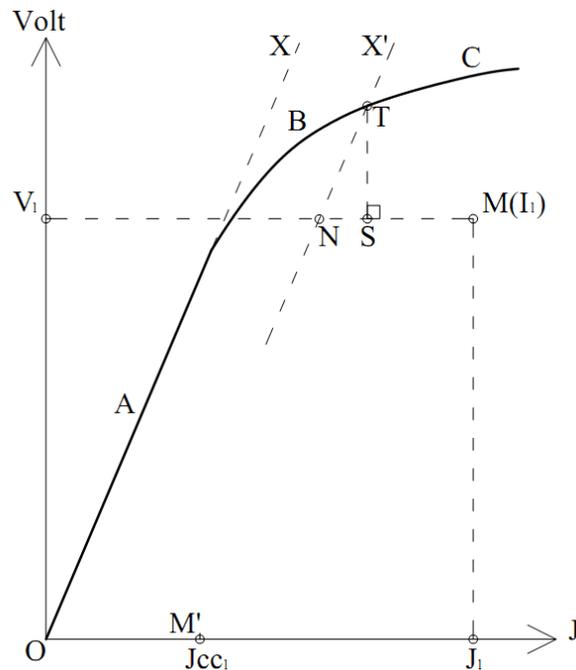


Figure 12. Caractéristique à vide et en court-circuit

Dans le système d'axes  $(E, J)$ , on trace  $E(J)$  et par  $(V_1, J_1)$  on point  $M$  correspondant à l'essai en déwatté pour lequel le courant était  $I_1$ . Une translation horizontale de  $-\alpha I_1$  fait passer de  $M$  à  $S$  de coordonnées  $J_1 - \alpha I_1 = J_{r1}$  et  $V_1$ . Une translation verticale de  $\lambda I_1$  amène  $S$  en  $T$  de coordonnées  $J_{r1}$  et  $V_1 + \lambda I_1 = E_{r1}$ .  $T$  est sur la caractéristique  $E(J)$  dans la zone  $BC$ .

Si on pointe par  $J_{cc1}$ ,  $O$  le point  $M'$  ; lu sur la caractéristique en court-circuit pour une valeur de  $I_{cc}$  égale à  $I_1$  ; les mêmes translations amènent en  $J_{cc1} - \alpha I_1 = J'_{r1}$ ,  $O$  ; puis en  $J'_{r1}$ ,  $O + \lambda I_1 = E'_{r1}$  donc sur la caractéristique à vide dans la zone  $OA$ , on ne sait où mais forcément sur la partie linéaire  $OX$ .

Si on transporte la construction faite à partir de  $M'$  sur celle faite à partir de  $M$ ,

- De  $M$  la double translation  $-\alpha I_1, +\lambda I_1$  doit amener sur  $E(J)$ .
- De  $M$  la double translation  $-\alpha I_1, +\lambda I_1$  doit amener sur  $NX'$ , tel que  $MN=M'O$  et que  $NX'$  soit parallèle à  $OX$ .
- Seul le point  $T$  correspond à ces deux conditions.

D'où la caractéristique : à partir de M on porte MN égal à  $J_{cc1}$  lu sur la caractéristique en court-circuit pour  $I_1$  ; par N on mène la parallèle NX' au début de la caractéristique  $E(J)$  ; NX' coupe  $E(J)$  en T. la verticale abaissée de T coupe NH en S

$$MS = \alpha I_1 \text{ et } ST = \lambda I_1$$

## 5. Machines à pôles saillants

La relation qui caractérise l'induit fait apparaître la tension  $V$ , le courant  $I$  avec sa composante directe  $I_d$ , la force électromotrice à vide  $E_v$ , la résistance  $R_s$ , la réactance synchrone longitudinale et transversale respectivement  $X_d$ ,  $X_q$ . La formule devient en convention générateur :

$$V = E_v - RI - jX_q I - j(X_d - X_q) I_d$$

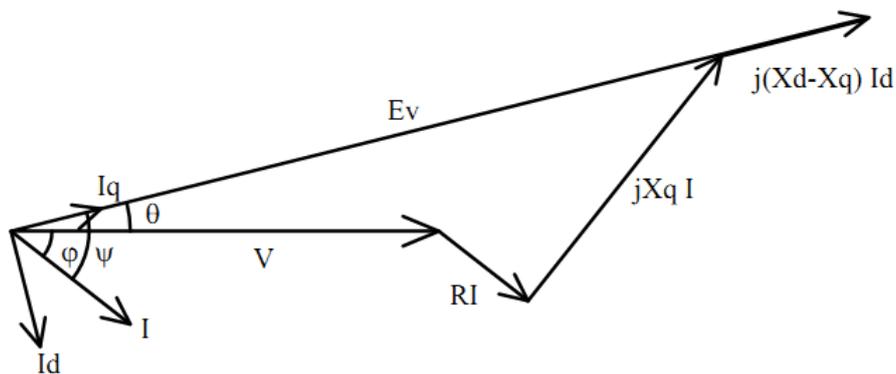


Figure 13. Diagramme de Blondel en convention générateur

Pour la convention moteur :

$$V = E_v + RI + jX_q I + j(X_d - X_q) I_d$$

La représentation graphique de cette relation est le diagramme de Blondel qui peut être tracé pour les deux conventions

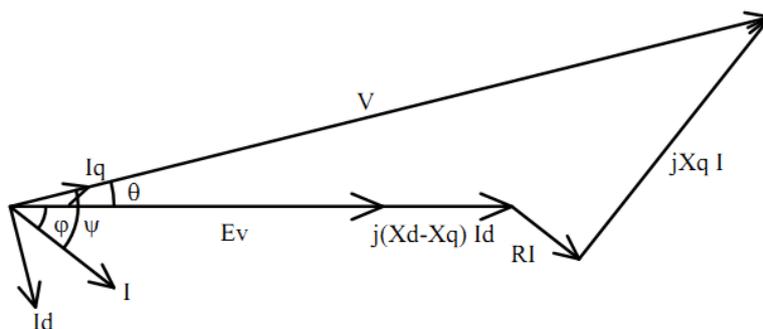


Figure 14. Diagramme de Blondel en convention récepteur

Compte tenu des ordres de grandeurs, il est souvent possible de négliger l'influence de la chute de tension ohmique, ce qui donne un diagramme simplifié pour les deux types de conventions.

## 6. Puissance et couple à partir du schéma monophasé équivalent

La machine est étudiée pour un fonctionnement réversible avec les conventions de signe récepteur. La résistance statorique est négligeable.

### 6.1. Machine à pôles lisses

La puissance active appelée par la machine s'exprime en fonction de la valeur efficace  $V$  de la tension simple, de la valeur efficace  $E_v$  de la force électromotrice à vide, de la réactance synchrone  $X$  et de l'angle interne  $\delta$ .

$$P = 3 \frac{VE_v}{X} \sin(\delta)$$

$$Q = 3 \frac{V^2}{X} - 3 \frac{VE_v}{X} \cos(\delta)$$

Le moment du couple électromagnétique s'obtient en divisant la puissance active par la vitesse de rotation

$$Cem = 3 \frac{VE_v}{X\Omega} \sin(\delta)$$

### 6.2. Machine à pôles saillants

La puissance active appelée par la machine s'exprime en fonction de la valeur efficace  $V$  de la tension simple, de la valeur efficace  $E$  de la force électromotrice à vide, les réactances synchrones  $X_d$  et  $X_q$  et de l'angle interne  $\delta$ .

$$P = 3 \frac{VE_v}{X_d} \sin(\delta) + \frac{3V^2}{2} \left( \frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin(2\delta)$$

$$Q = -3 \frac{VE_v}{X_d} \cos(\delta) + \frac{3V^2}{2} \left( \frac{1}{X_d} - \frac{1}{X_q} \right) \cos(2\delta) + \frac{3V^2}{2} \left( \frac{1}{X_d} + \frac{1}{X_q} \right)$$

Le couple de ce genre de machines est composé en deux couple différents :

- Couple d'interaction :  $3 \frac{VE_v}{X_d\Omega} \sin(\delta)$
- Couple relucant :  $\frac{3V^2}{2\Omega} \left( \frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin(2\delta)$

## 7. Synchronisation des alternateurs

Pour brancher un alternateur sur le réseau ou le coupler avec un autre alternateur, il faut respecter les conditions suivantes :

- 1) La tension de l'alternateur doit être égale à celle du réseau.
- 2) La fréquence de l'alternateur doit être la même que celle du réseau.
- 3) La tension de l'alternateur doit être en phase avec celle du réseau.
- 4) La séquence des phases de l'alternateur doit être la même que celle du réseau.

### 7.1. Procédure de synchronisation

En agissant sur le régulateur de vitesse de la turbine, on amène tout d'abord l'alternateur à une vitesse voisine de la vitesse synchrone, afin que sa fréquence soit proche de celle du réseau. On règle ensuite l'excitation de façon que la tension induite soit égale à celle du réseau. On observe que les tensions ont même fréquence et même phase au moyen d'un synchronoscope. Suivant le sens de rotation de l'aiguille de cet instrument, on ralentit ou on accélère la machine jusqu'à ce que l'aiguille tourne très lentement. Enfin, au moment où l'aiguille passe devant le point neutre du synchronoscope, les tensions sont en phase ; on ferme alors l'interrupteur qui réalise le couplage de l'alternateur avec le réseau. Dans les centrales modernes, la synchronisation se fait automatiquement au moment précis où les conditions énumérées précédemment sont respectées.

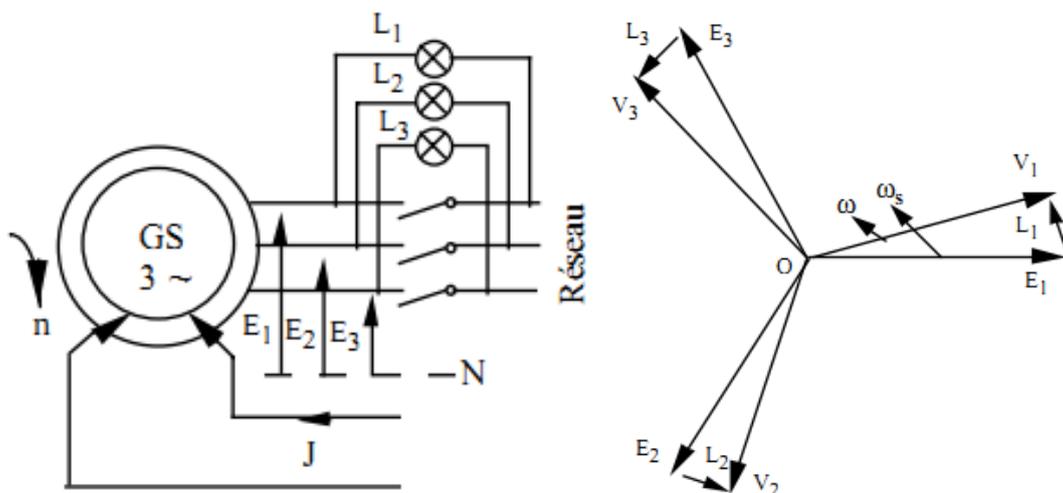


Figure 15. Synchronisation sur le réseau

### 7.2. Alternateur branché sur un réseau infini

L'exception des endroits isolés, il est assez rare que l'on soit obligé de coupler deux alternateurs en parallèle. Il arrive plus souvent que l'on branche un alternateur à un grand réseau comportant déjà plusieurs centaines d'alternateurs. Ce réseau est tellement puissant qu'il impose une tension et une fréquence constantes à tout appareil branché à ses bornes. C'est pourquoi on l'appelle réseau infini. Une fois couplé à un grand réseau (réseau infini), un alternateur fait partie d'un système comprenant des centaines d'autres alternateurs qui alimentent des milliers de charges. Il est alors impossible de préciser la nature de la charge (grosse ou petite, résistive, inductive ou capacitive) branchée aux bornes de cet alternateur en particulier. Quels sont donc les paramètres qui déterminent la puissance qu'il débite dans ces circonstances ? La tension et la fréquence appliquées

aux bornes de la machine étant constantes, on ne peut plus faire varier que deux paramètres : Le courant d'excitation  $I$  et le couple mécanique exercé par la turbine.

### 7.3. Marche à puissance active constante : Courbes de MORDEY

Elles traduisent les variations du courant absorbé  $I$  en fonction du courant inducteur  $J$  à puissance utile constante. Expérimentalement, on obtient un réseau de courbes du type de celles représentées sur la (Fig. 16).

A puissance active constante l'extrémité du vecteur image de la tension  $E_v$  décrit une parallèle à  $V$  lorsque  $J$  varie. Aux faibles valeurs de  $J$ , le comportement de la machine est bien de type inductif. Au fur et à mesure que  $J$  augmente, le segment  $L\omega I$  diminue. Le minimum est obtenu pour  $\varphi = 0$ . Ensuite, si  $J$  continue à augmenter, le comportement devient de type capacitif et  $I$  réaugmente.

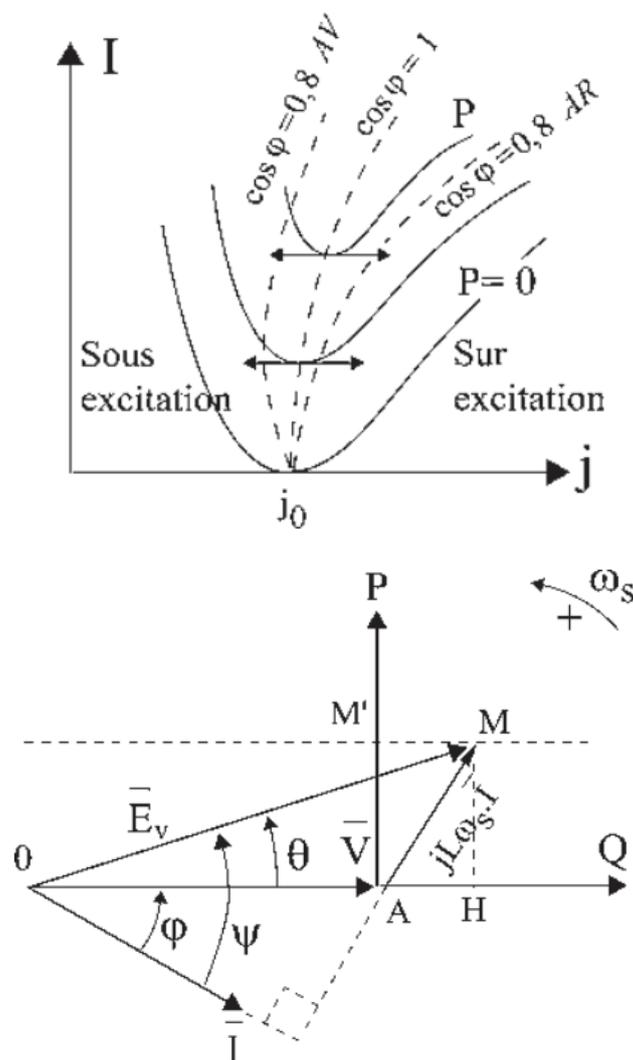


Figure 16. Courbes de MORDEY

Les courbes en V de MORDEY s'obtiennent dans des fonctionnements à  $P = cst$  en faisant varier le courant  $J$  d'excitation.

L'alternateur étant accroché sur le réseau, pour chaque valeur de  $J$ , on règle la turbine pour que  $P = cst$  mesurée par exemple par la méthode des deux wattmètres. Avec un ampèremètre, on note le courant  $I$ . En fonction de  $J$ , le point M se déplace sur la droite  $P = cst$

On peut utiliser le fait que le moteur surexcité fournisse de la puissance réactive pour améliorer le facteur de puissance d'une installation en augmentant le courant inducteur des moteurs synchrones d'entraînement (mais l'amplitude du réglage reste alors limitée. On peut également employer des moteurs synchrones exclusivement destinés à cela. Dans ce cas, la machine, couplée sur le réseau, tourne à vide et son courant inducteur est ajusté en fonction de la puissance réactive à fournir. On dit de ce type de moteur qu'il fonctionne en compensateur synchrone.

Pour  $P = 0$ , M est sur l'axe AQ, on retrouve le fonctionnement en compensateur synchrone fournissant de l'énergie réactive au réseau s'il est surexcité  $J > J_0$ , courant d'excitation à l'accrochage.

## 8. Moteurs synchrones

La construction des moteurs synchrones industriels est semblable à celle des alternateurs triphasés à pôles saillants. Le stator se compose d'un noyau magnétique percé d'encoches dans lesquelles est logé un bobinage triphasé. L'enroulement imbriqué du stator est identique à celui d'un moteur à induction triphasé.

### 8.1. Démarrage du moteur synchrone

Le moteur synchrone ne peut démarrer seul. C'est pourquoi on place une cage d'écureuil sur son rotor afin qu'il puisse démarrer en moteur asynchrone. En appliquant la pleine tension triphasée sur le stator, on crée un champ tournant qui amène rapidement le moteur à une vitesse légèrement inférieure à sa vitesse synchrone. En général, la résistance de la cage d'écureuil est assez élevée afin d'assurer un fort couple de démarrage.

Le moteur synchrone ne peut démarrer seul. C'est pourquoi on place une cage d'écureuil sur son rotor afin qu'il puisse démarrer en moteur asynchrone. En appliquant la pleine tension triphasée sur le stator, on crée un champ tournant qui amène rapidement le moteur à une vitesse légèrement inférieure à sa vitesse synchrone. En général, la résistance de la cage d'écureuil est assez élevée afin d'assurer un fort couple de démarrage, on court-circuite l'enroulement du rotor ou on le relie à une résistance extérieure pendant la période d'accélération. À mesure que le moteur accélère, la tension induite diminue et elle tombe à une valeur négligeable lorsque le rotor tourne presque à la vitesse synchrone. Lorsque la puissance du réseau alimentant le moteur est limitée, on applique une tension réduite sur le stator comme on le fait dans le cas des gros moteurs asynchrone. Ainsi, on utilise des autotransformateurs, des résistances et parfois des

réactances pour limiter le courant pendant le démarrage. Les moteurs synchrones de très grande puissance (20 MW et plus) sont parfois amenés à leur vitesse synchrone au moyen d'un moteur auxiliaire. Dans d'autres cas, on utilise un convertisseur électronique à fréquence variable pour accélérer la machine jusqu'à la vitesse synchrone.

Dès que le moteur a atteint une vitesse proche de la vitesse synchrone, on alimente les pôles du rotor en courant continu. Le passage de ce courant produit des pôles N et S dans le rotor. Ces pôles tournent dans le même sens et à peu près à la même vitesse que les pôles N et S du champ tournant.

Si, au moment de l'excitation, les pôles S du rotor sont en regard des pôles N du stator (Fig. 17a et 17b), une force d'attraction considérable s'établit entre eux et les maintient vis-à-vis ; on dit alors que le moteur est accroché. Une force d'attraction identique s'exerce évidemment entre les pôles N du rotor et les pôles S du stator. Les pôles du rotor se trouvent alors entraînés par les pôles du stator et ils se déplacent nécessairement à la même vitesse. Le moteur tourne donc à la vitesse synchrone. Le couple développé par le moteur à ce moment s'appelle couple d'accrochage.

Ce couple est puissant, mais on doit exciter le rotor au bon moment, afin de réussir l'accrochage du rotor. Par exemple, si on applique l'excitation à un instant où les pôles N du rotor sont en regard des pôles N du stator, il se produira une grande force de répulsion au lieu d'une attraction. Le moteur subira un choc violent, il ralentira et on ne pourra plus le faire accrocher à moins d'ouvrir le circuit d'excitation et de recommencer la procédure de démarrage. En pratique, les démarreurs de moteurs synchrones sont conçus pour détecter le moment précis où l'excitation doit être appliquée et ils accomplissent cette fonction automatiquement.

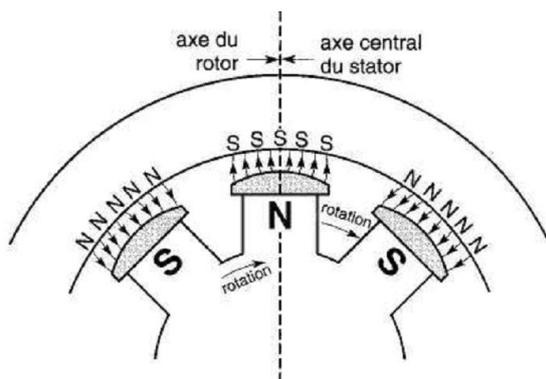


Figure 17a. Les pôles du rotor sont attirés par les pôles contraires du stator. Lorsque le moteur fonctionne à vide, l'axe des pôles du rotor coïncident avec l'axe central du stator

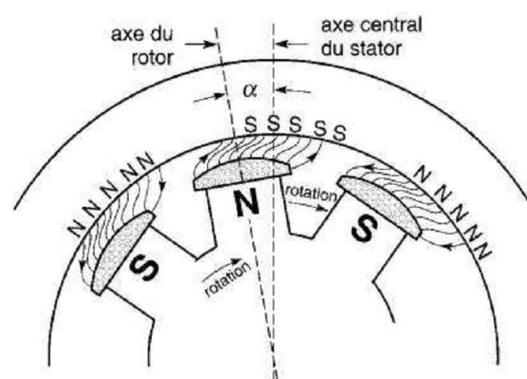


Figure 17b. Lorsque le moteur développe un couple, les pôles du rotor se déplacent en arrière des pôles du stator. L'angle  $\alpha$  entre l'axe du rotor et l'axe central du stator est une mesure du couple exercé.

Quand le rotor tourne en synchronisme avec le champ tournant, la tension induite dans les barres de la cage d'écurieil est nulle ; en régime normal, le principe de fonctionnement du moteur synchrone est donc bien différent de celui du moteur asynchrone. Le moteur

synchrone est entraîné par la force d'attraction qui s'établit entre les pôles du rotor et les pôles contraires du champ tournant. Pour renverser le sens de rotation d'un moteur synchrone, on change le sens de rotation de son champ tournant en intervertissant deux des trois câbles alimentant le stator.

## *Bibliographie*

---

1. G. Séguier, F. Notelet, "Electrotechnique industrielle", Téché et Doc, 1987.
2. M. Kostenko et L. Piotrovski, "Machines Electriques : Machines à Courant Alternatif " Tome II, 3ème édition, Édition MIR, 1979.
3. A. Ivanov-Smolensky, "Electrical Machines", Édition MIR, 1982.
4. J.L. Dalmasso, "Cours d'électrotechnique 1 : Machines tournantes à courants alternatifs", Éditions Belin, 1985.
5. A. Fouillé, "Electrotechnique à l'usage des ingénieurs : Machines électriques", Tome II, Édition Dunod, 1957.
6. L. Lagron, "les Moteurs à Courants Alternatifs", Éditions Dunod, 1949.
7. J. Châtelain, "Machines Electriques", Traité d'Electricité, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Éditions Georgi, 1983.
8. R. ABDESSEMED. V. ABDESSEMED, "Les enroulements des machines électriques",
9. M. LIWSCHITZ " Calcul des machines électriques", Edition SPES Lausanne 1967.
10. [Zhu93] Zhu Z.Q., Howe D., Instantaneous magnetic field distribution in brushless permanent magnet DC motors, IEEE Trans. On magnetics, Vol.29, No 1, Jan 1993, ppl36-158
11. [Mah92] Mahfoudhi R., Étude et conception d'un moteur synchrone à aimants permanents et commutation électronique pour un équipement de traction électrique, Université Laval, Québec, thèse de Doctorat (PhD), 1992
12. [Har93] Harmim S., Étude analytique de machines synchrones à aimants permanents. Institut Nationale Polytechnique de Grenoble, Grenoble, thèse de Doctorat (PhD), 1993
13. [Fig06] Figueroa J., Radaorozandry L., Cros J., Viarouge P., Comparative analysis of surface mount PM motors structures for a traction application, ICEM'2006, Chania, Crète Island, Greece, 2-5 sept. 2006.
14. [Seb87] Sébastien T. Slemon G., Transient torque and short circuit capabilities of variable speed permanent magnet motors, IEEE Transactions On Magnetics, Vol. MAG-23, No. 5, September 1987, pp. 3619-3621.

15. [Seb86] Sébastien T. Slemon G, Rahman M.A., Modelling of permanent magnet synchronous motors, IEEE Transactions On Magnetics, Vol. MAG-22, No. 5, September 1986, pp. 1069-1072.
16. [Mic97] R. Michaux, P. Letellier, « Les Machines Discoïdes à Champ Axial dans les Systèmes de Propulsion Électriques », REE N°3/1997, pp 37-42.
17. [Let95] P. Lettelier, "Electrical Propulsion Motors", Electric Propulsion; The Effective Solution, IMarest Conference Proceedings, 5-6 October 1995. pp. 7.1-7.8.
18. [Ols05] M. Olszewski, « Fractional-Slot Surface Mounted PM Motors with Concentrated Windings for HEV Traction Drives », Oak Ridge National Laboratory, report ONRL/TM-2005, pp 1-30.