Machine synchrone(MS): Calcul & dimensionnement

1 généralité

La machine synchrone (ou MS) est une machine réversible (moteur ou génératrice) fonctionnant sur un réseau triphasé.

Sa construction est robuste du fait de sa structure simple. Cependant, cette machine reste plus complexe à construire qu'une machine asynchrone.

Elle ne peut en général être utilisée en moteur sans un variateur. L'ensemble MS + Variateur est appelé MSAP (Machine Synchrone Auto-Pilotée) ou plus souvent moteur brushless (moteur sans balais).

Application en génératrice :

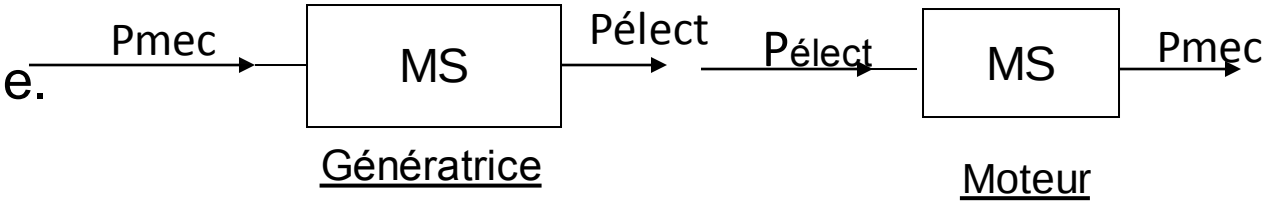
- *Génération de courant électrique.*

Applications en moteur :

- *Positionnement et autres applications nécessitant une grande précision (machine-outil, robotique, etc.).*
- *Motorisation de forte puissance (maritime, ferroviaire, etc.).*

2. Constitution

Une machine synchrone est une machine réversible.



Une machine synchrone est constituée de :

- Rotor (Roue polaire): c'est l'**inducteur.** Les enroulements du rotor étant parcourus par un courant continu, le rotor se comporte comme un aimant. Sa rotation donne un champ magnétique tournant.

Il existe des rotors à pôles lisses (vitesse importante) et des rotors à pôles saillants (vitesse lente) à grand nombre de pôles (ex : 40 pôles). si le nombre de pôles = 40 ; le nombre de paires : p = 20.

- Stator : c'est l'induit. Il possède 3 enroulements (système triphasé).

Il doit être feuilleté parce qu'il est placé dans un champ tournant.

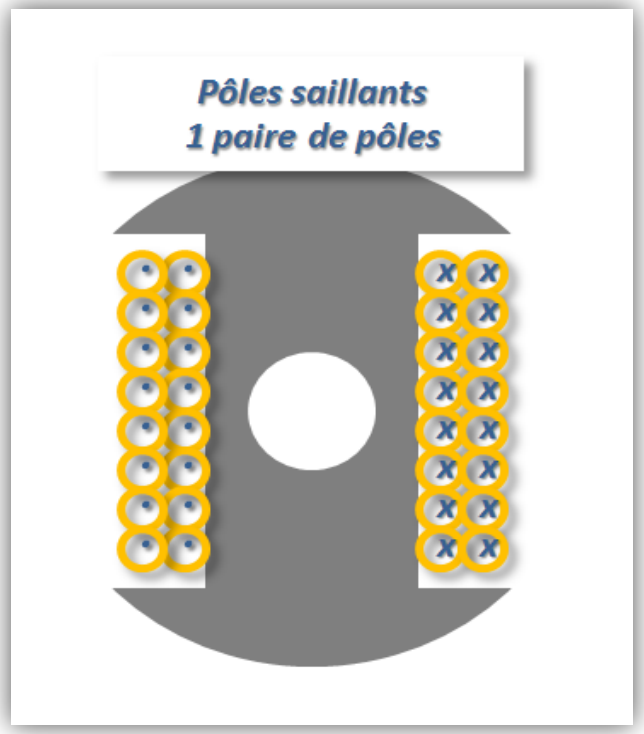
Il existe deux grandes familles de rotors (ou roue polaire) chez les machines synchrones:

- Soit d'un ou plusieurs bobinages alimentés en courant continu. Le courant d'excitation peut alors être produit soit par une source externe soit par auto-excitation. Machines coûteuses très rencontrées dans les applications exigeant un fort couple et donc une très forte excitation (marine, production, soufflerie …).

- Rotor à aimants. Machines restant encore coûteuses (vs MAS à cages), ceci étant principalement du au coût des aimants mais offrant néanmoins le rapport poids-encombrement-puissance le plus intéressant de toutes les machines tournantes en forte puissance

MS a rotor bobiné:

Découvrons les MS à rotors bobinés à pôles lisses et pôles saillants. Comme pour les MAS à bagues ces machines sont relativement coûteuses et possèdent deux bagues assurant l'alimentation de l'inducteur (usure). Elles offrent néanmoins la possibilité de générer une très forte induction dans la machine :

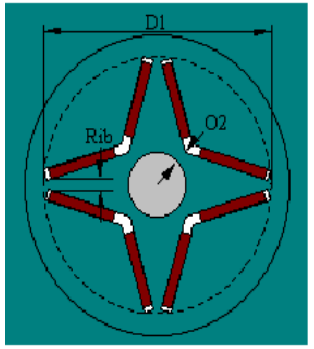


machine multipolaire. Induction constante au rotor donc pas de pertes par courants de Foucault. Les rotors peuvent être massifs !

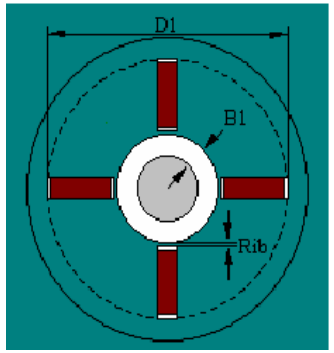
Machine synchrone a aimant permanant -MSAP-

Découvrons les MS à aimants permanents (MSAP). Leurs rotors offrent plusieurs avantages, notamment le fait d'offrir un très bon ratio poids-encombrement-puissance et aucunes pertes Joule côté rotor. Selon la technologie de conception (aimants enfouis, superficiels …), ces machines peuvent tenir de très grandes vitesses de rotation. Prenons quelques

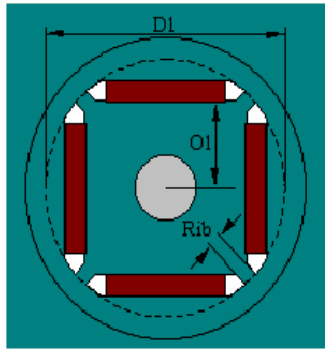
Vue transversale des quelques types rotors des MSAPs



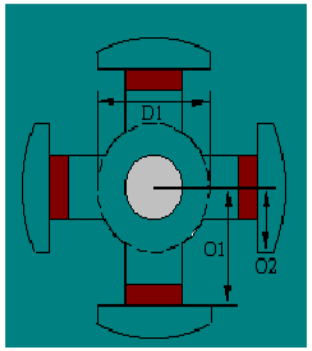
Aimants enterrés de radial



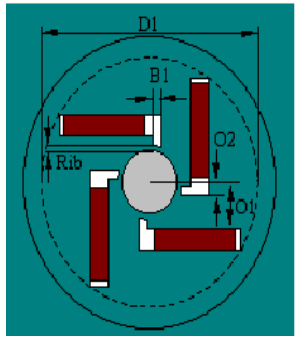
Aimants enterrés



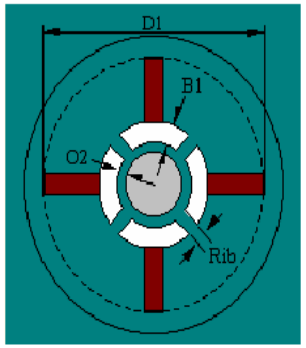
Aimantation radiale



Aimants permanents et pièce polaire saillante



Concentration de flux



Aimant internes au rotor magnétises tangentiellement

Principe de fonctionnement

- Champ tournant statorique $w_s \neq 0$
- Champ continu rotorique $w_r = 0$
- Le rotor tourne à vitesse synchrone (= vitesse du champ tournant)
- Le couple est dû à l'interaction de ces deux champs

A puissance, tensions, courants, nombre de paires de pôles, dimensions, géométries … équivalents, les MS et MAS possèdent le même stator. Les différences entre ces deux familles de machines se font donc au niveau des rotors.

*Les machines synchrones sont très répandues dans les domaines de la **production** (centrales électriques, aéronautique, marine …) ainsi que dans les grands domaines d'applications exigeant un **encombrement et un poids réduit** (aéronautique, automobile …). Les gros alternateurs possèdent de plus un excellent rendement (~99% pour une MS de 1GW). Prenons quelques exemples d'applications :*

AGV de Alstom (MS à aimants)

EX1 de Peugeot (MS à aimants)

Queen Mary 2 (MS à rotors bobinés - propulsion)

A380 de chez Airbus (MS – générateurs à fréquences variables VFG)

PRIUS de Toyota (MS à aimants)

Principe de fonctionnement

Fonctionnement en moteur :

Les bobines créent un champ magnétique tournant à la pulsation de synchronisme ΩS(rad/s) qui se répartit sinusoïdalement dans l'entrefer (espace entre le rotor et le stator) de la machine $\Omega_S = \frac{\omega}{p}$

Le rotor, assimilable à un aimant permanent, tournera à la même vitesse que le champ statorique, c'est pourquoi on parle de machine synchrone. La fréquence de rotation n'est donc fonction que de la fréquence f des courants alimentant la machine.

$$A = \pi r^2$$

- Fonctionnement en génératrice :

Le rotor, assimilable à un aimant permanent, est entrainé en rotation par une source extérieure. Il crée un flux ϕ.

Le rotor tournant, chaque bobine est soumise à un champ magnétique variable. Par conséquent il se crée une tension alternative sinusoïdale e(t) aux bornes de chaque enroulement du stator de valeur efficace : $E_{eff} = K.N.f.\Phi$

Avec : K coefficient de Kapp, N nombre de conducteurs actifs d'une phase, f fréquence des signaux et ϕ le flux maximal pour une spire. De plus : $f = p.n$

Avec : p nombre de paires de pôles et n fréquence de rotation en tr/s.

E est proportionnelle au courant d'excitation i_E circulant dans l'inducteur de la machine si celui–ci est continu.

BILAN DES PUISSANCES & RENDEMENT: GENERATRICE

$$P_A = P_{EX} + P_M$$

$$P_A = u_E.i_E + T_M.\Omega$$

$$P_U = \sqrt{3}UI\cos\varphi$$

$$P_{JS} = \frac{3}{2}RI^2$$

$$P_C = P_{Fer} + P_M$$

$$P_{JR} = u_E.i_E$$

$$\eta = \frac{P_U}{P_A} = \frac{\sqrt{3}.U.I.\cos(\varphi)}{\sqrt{3}.U.I.\cos(\varphi) + u_E.i_E + \frac{3}{2}.r.I^2 + P_C}$$

BILAN DES PUISSANCES & RENDEMENT: Moteur

$$P_A = P_{EX} + \sqrt{3}.U.I.\cos(\varphi)$$

$$P_A = u_E.i_E + \sqrt{3}.U.I.\cos(\varphi)$$

$$P_U = T_U.\Omega$$

$$P_{JS} = \frac{3}{2}RI^2$$

$$P_C = P_{Fer} + P_M$$

$$P_{JR} = u_E.i_E$$

$$\eta = \frac{P_U}{P_A} = \frac{T_U.\Omega}{\sqrt{3}.U.I.\cos(\varphi)}$$

Calcule de la machine synchrone

- L'équation de sortie : équation sortie est l'expression mathématique qui donne la relation entre les différents paramètres physiques et électriques de la machine électrique.
- Dans un moteur à induction l'équation de sortie peut être obtenu comme suit :
- Considérons «m» nombre de phase de la machine, avec les notations habituelles suivantes :

- p =nombre de pole, q= la charge électrique spécifique
- Φ= flux dans l'entrefer /pole ; Bav = densité moyenne de flux
- kw = facteur de bobinage
- η= rendement.
- cos φ = facteur de puissance
- D = Diamètre du stator,
- L = Longueur brut du noyau
- Co= coefficient de sortie.

V_{ph} = tension de phase ; I_{ph} = courant de phase

Z_{ph} = nombre du conducteur / phase

T_{ph} = nombre *de* of spire / phase

N_s = Vitesse de synchronisme on tr/m n_s = Vitesse de synchronisme on tr/s

- Sortie du GS $Q = 3V_{ph}\ I_{ph}\ \ 10^{-3}\ \ kVA$
- Supposant : $V_{ph} = E_{ph}$
- **Sortie du GS** $Q = 3E_{ph}\ I_{ph}\ \ 10^{-3}\ \ kVA$

$$E_{ph} = 4.44\ f\ \Phi\ T_{ph} \times K_w = 2.22\ f\ \Phi \times Z_{ph} \times K_w$$

$$f = \frac{PN_s}{120} = \frac{Pn_s}{2},$$

Le flux d'entrefer par pole $\Phi = \dfrac{B_{av}\pi DL}{p}$, et la charge électrique spécifique $q = 3\dfrac{I_{ph}\ Z_{ph}}{\pi D}$

- Sortie de la machine $Q = 3\ x(2.22\dfrac{Pn_s}{2}\dfrac{B_{av}\pi DL}{p}Z_{ph}K_w)\,I_{ph}\ \ 10^{-3}kW$

$$= (1.11\ B_{av}\pi DL\,K_w n_s)(3I_{ph}Z_{ph})\ 10^{-3}kVA$$

- On a : $3\dfrac{I_{ph}\ Z_{ph}}{\pi D} = q \Rightarrow 3I_{ph}\ Z_{ph} = q\pi D$, donc :

$$Q = (1.11\ B_{av}\pi DL\,K_w n_s)(\pi Dq)\ 10^{-3}\ kVA$$

$$Q = 1.11\ \pi^2 D^2 L B_{av}\, q\ K_w n_s\ \ 10^{-3}\ kVA$$

$$Q = 11(B_{av}\, q\ K_w)\,D^2 L n_s\, 10^{-3}\ kVA$$

- Donc la sortie $Q = C_0 D^2 L\ n_s\ \ kVA$, avec : $C_0 = 11(B_{av}\, q\ K_w)10^{-3}$

Exemple : calcul d'une machine synchrone à pole saillants

- En vue de la conception du bâti d'un stator 500 kVA, 6,6 kV, 50 Hz, 3 phases, 12 pôles, alternateur étoiles pôles saillants, donnant les informations suivantes, la charges magnétiques et électriques spécifiques peuvent être assumées que Bav=0,56T et q=26000 Ac/m respectivement. Vitesse périphérique doit être inférieure à 40 m/s, le logement doit être inférieure à 1200 et Kw = 0.955.
- Calculer :
- 1. Diamètre interne et de la longueur brute de noyau.
- 2. Nombre de conducteurs de stator/phases.
- 3. Nombre total de conducteurs.

Solution:

1. Diamètre interne et de la longueur brute de noyau

$$C_0 = 11(B_{av}\, q\, K_w)10^{-3} = 11 \text{ x } 0.56 \text{ x } 26000 \text{ x } 0.955\text{x}10^{-3} = 153$$

La vitesse en tr / s $n_s = \frac{2f}{p} = \frac{2*50}{12} = 8,33\ tr/s$

La sortie : $Q = C_0 D^2 L\ n_s \Rightarrow D^2 L = \frac{Q}{C_0 n_s} = \frac{500}{153*8,33} = 0,392\ m^3$

On a : $L = \pi D/p = \pi D/12 \Rightarrow L = 0.17D$

Substituant cette relation dans le produit D^2L et résoudre D et L.$\Rightarrow$ D=1.32 m et L = 0.225 m.

La vitesse périphérique = $\pi D\ n_s = \pi \times 1.32 \times 8.33 = 34.6$ m/s (avec des limitations, inférieure à 40 m/s)

2. Nombre de conducteurs de stator/phases

$E_{ph} = 6600/\sqrt{3} = 3810$ V et le flux d'entrefer par pôle= $B_{av} \times \pi \times D \times L/p$

$\Phi = 0.56 \times \pi \times 1.32 \times 0.225/12 = 0.0436$ wb

On a: $E_{ph} = 4.44\ f\ \Phi\ T_{ph} \times K_w \Rightarrow T_{ph} = \frac{E_{ph}}{4.44\ f\ \Phi \times K_w} = \frac{3810}{(4.44 \times 50 \times 0.955 \times 0.0436)} = 412$ spire

Donc, le nombre total de conducteurs du stator / phases = 412 x 2 = 824 conducteurs

3. Nombre total de conducteurs

Nombre total de conducteurs = 412 x 6 = 2,472

fin