

La machine synchrone est surtout connue pour ses applications en générateur (l'alternateur) 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 celles des moteurs à courant continu, sans en avoir les inconvénients.

1. Constitution de la Machine Synchrone

1.1. Rotor = inducteur

Il est constitué d'un enroulement parcouru par un courant d'excitation I_e continu créant un champ magnétique $2p$ polaire. Il possède donc p paires de pôles.

Remarques :

il faut apporter le courant à l'inducteur par l'intermédiaire de bagues et de balais.

le rotor peut être constitué par un aimant permanent.

1.2. Stator = induit

Les enroulements du stator sont le siège de courants alternatifs monophasés ou triphasés.

Il possède le même nombre de paires p de pôles.

1.3. Champ tournant

Un moteur synchrone est un moteur à courant alternatif pour lequel la vitesse de rotation de l'arbre est égale à la vitesse de rotation du champ tournant.

Les courants alternatifs dans le stator créent un champ magnétique tournant à la pulsation :

$$\Omega_s = \frac{\omega}{p}$$

Ω_s : vitesse de rotation angulaire du champ tournant en rad.s^{-1} ;

ω : fréquence des courants alternatifs en rad.s^{-1} ; ($\omega = 2\pi.f$)

p : nombre de paires de pôles (de par la fabrication du moteur, c'est une constante).

$$n_s = \frac{f}{p}$$

n_s : vitesse de rotation du champs tournant en trs.s^{-1} ;

f : fréquence des courants alternatifs en Hz ;

p : nombre de paires de pôles.

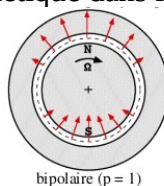
1.4. Synchronisme

Le champ tournant du stator accroche le champ inducteur solidaire du rotor.

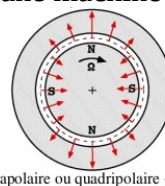
Le rotor ne peut donc tourner qu'à la vitesse de synchronisme Ω_s .

1.5. Schémas

→ Répartition du champ magnétique dans l'entrefer d'une machine synchrone.



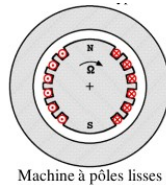
bipolaire ($p = 1$)



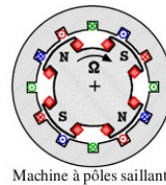
tétrapolaire ou quadripolaire ($p = 2$)

Remarque : un champ magnétique à toujours deux pôles, un nord et un sud. C'est pourquoi on parle en terme de **paire de pôles**.

→ Représentation de deux types de machines synchrones

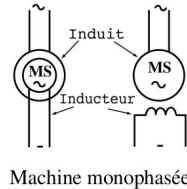


Machine à pôles lisses

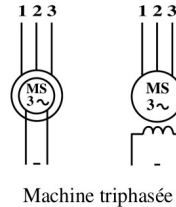


Machine à pôles saillants

2. Symboles



Machine monophasée



Machine triphasée

3. FEM induite

L'enroulement de l'induit (stator) soumis au champ magnétique tournant de l'entrefer est le siège d'une f.é.m. $e(t)$ de valeur efficace E .

$$E = K \cdot N \cdot \Phi \cdot f = K \cdot N \cdot \Phi \cdot p \cdot n \cdot S = K' \cdot \Phi \cdot n \cdot S \text{ finalement : } E = K' \cdot \Phi n_s$$

E : f.é.m. induit (V)

K : coefficient de Kapp (caractéristique de la machine)

N : nombre de conducteurs d'une phase de la machine (1 spire = 2 conducteurs)

Φ : flux maximum à travers un enroulement (Wb)

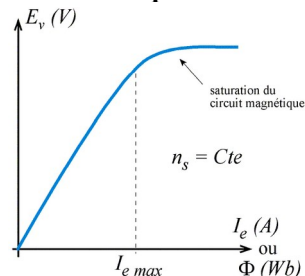
f : fréquence du courant statorique

p : nombre de paires de pôles

n_s : vitesse de rotation (trs.s^{-1})

$K' = KNp$: constante globale (caractéristique du moteur)

Caractéristique en fonction du courant d'excitation I_e (caractéristique à vide)



Tant que le courant d'excitation dans l'inducteur I_e ne dépasse pas une certaine limite ($I_{e \max}$), la valeur efficace E de la f.é.m. est proportionnelle à ce courant.

C'est le courant I_e qui détermine le flux magnétique Φ dans l'entrefer de la machine.

Remarques :

- les enroulements sont disposés dans le stator de telle façon que la f.é.m. $e(t)$ soit le plus possible de forme sinusoïdale ;
- en triphasé le stator comporte trois enroulements ou phases. On obtient trois fém : $e_1(t)$, $e_2(t)$ et $e_3(t)$ de même valeur efficace E et déphasées de $2\pi/3$.

4. Les modes de fonctionnement

La machine synchrone est réversible.

4.1. Fonctionnement en moteur

Le champ tournant du stator « accroche » le champ lié au rotor à la vitesse $\Omega_s = \omega/p$.

4.2. Fonctionnement en alternateur (génératrice)

Le rotor et son champ sont entraînés par une turbine. Les bobines de l'induit sont alors le siège de f.é.m. alternative de pulsation $\omega = p \cdot \Omega_s$.

Rappel : toute variation de champs magnétique à travers une bobine crée aux bornes de la bobine une f.é.m. induite.

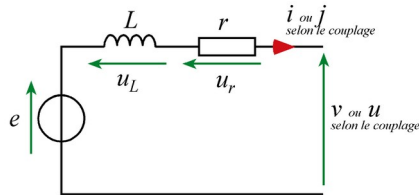
5. Réaction magnétique d'induit

En charge, le courant dans l'induit crée un champ magnétique qui modifie les caractéristiques de la machine. C'est ce que l'on nomme la réaction magnétique d'induit.

6. Modèle équivalent d'un enroulement

6.1. Modèle d'un enroulement de l'induit (stator)

Alternateur



e : f.é.m. à vide (V)

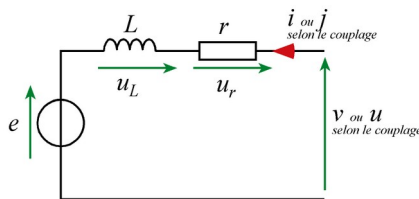
v : tension aux bornes d'un enroulement de la machine (V)

r : résistance de l'enroulement (Ω)

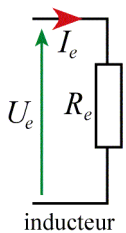
$X = L\omega$: réactance synchrone (Ω)

Le courant est orienté en convention générateur.

Moteur



6.2. Modèle de l'enroulement de l'inducteur (rotor) dans le cas d'un rotor bobiné



I_e : courant d'excitation (A)

U_e : tension d'excitation (V)

R_e : résistance de l'enroulement (Ω)

L'inducteur est équivalent à une résistance

Toute l'énergie absorbée à l'inducteur est perdue par effet joule :

$$P_e = U_e I_e = R_e I_e^2 = p_{je}$$

Loi des mailles (exemple pour l'alternateur)

Loi des mailles avec les grandeurs instantanées :

Loi des mailles avec les grandeurs vectorielles :

avec :

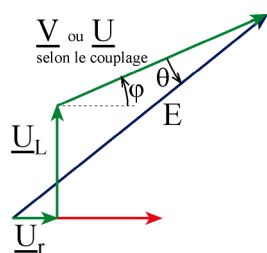
φ et I (ou J) dépendent de la charge.

Mono. ou étoile

triangle

$e = v + u_L + u_r$	$e = u + u_L + u_r$
$\vec{E} = \vec{V} + \vec{U}_L + \vec{U}_r$	$\vec{E} = \vec{U} + \vec{U}_L + \vec{U}_r$
$\vec{V}(V, j)$	$\vec{U}(U, \phi)$
$\vec{U}_L(L\omega I, +\pi/2)$	$\vec{U}_L(L\omega J, +\pi/2)$
$\vec{U}_r(rI, 0)$	$\vec{U}_r(rJ, 0)$

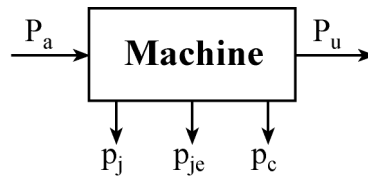
6.3. Diagrammes de Fresnel



Remarques :

- très souvent $r.I$ est négligé ;
- en traçant le diagramme à l'échelle, il est possible d'en déduire certaines grandeurs ;
- si la charge est résistive $\varphi = 0$.

7. Bilan des puissances



	Monophasé	Triphasé
Moteur		
Puissance absorbée	$P_a = VI \cos \phi + U_e I_e$	$P_a = UI \cos \phi \sqrt{3} + U_e I_e$
Puissance utile	$P_u = \Omega_S T_u$	
Alternateur		
Puissance absorbée	$P_a = \Omega_S \cdot T_M + U_e I_e$ Alternateur à excitation indépendant :	
	$P_a = \Omega_S \cdot T_M$ Alternateur auto-excité :	
Puissance utile	$P_U = VI \cos \phi$	$P_U = \sqrt{3} UI \cos j$
Pertes pour le moteur et l'alternateur		
Pertes joules	$p_j = rI^2 + R_e I_e^2$	$p_j = \frac{3}{2} RI^2 + R_e I_e^2$
Pertes collectives	$p_c = p_{fer} + p_{méca}$ Pas de formule ; elles peuvent s'estimer par un essai à vide	

8. Compléments sur le moteur synchrone

8.1 Avantages

La machine synchrone est plus facile à réaliser et plus robuste que le moteur à courant continu. Son rendement est proche de 99%.

On peut régler son facteur de puissance $\cos \phi$ en modifiant le courant d'excitation I_e .

8.2 Inconvénients

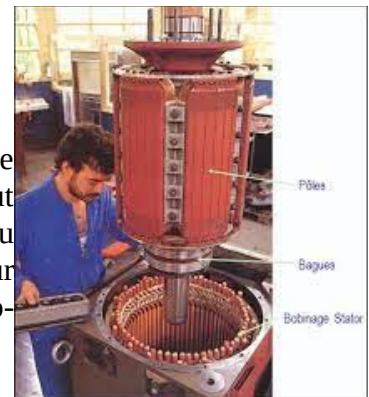
Un moteur auxiliaire de démarrage est souvent nécessaire.

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.

8.3 Utilisations

8.3.1 Moteurs

- Ils sont utilisés en forte puissance (1 à 10 MW - compresseur de pompe, concasseur); toutefois pour faire varier la vitesse, il faut faire varier la fréquence des courants statoriques. Il a donc fallu attendre le développement de l'électronique de puissance pour commander des moteurs autosynchrones ou synchrones auto-pilotés (T.G.V. Atlantique – 1981).
- Dans le domaine des faibles puissances, les rotors sont à aimants permanents. L'intérêt de ces moteurs réside dans la régularité de la vitesse de rotation (tourne-disque, appareil enregistreur, programmeur, servomoteur).

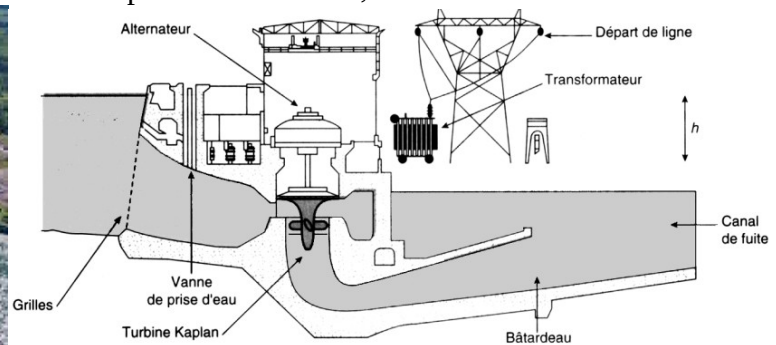


- Le moteur synchrone peut également être utilisé comme source de puissance réactive Q pour relever le facteur de puissance $\cos \phi$ d'une installation électrique. On parle de compensateur synchrone
 → Compensateur synchrone de puissance réactive, à la sous-station de Templestowe, Melbourne Victoria, Australie.
 Générateur synchrone triphasé, refroidi à l'hydrogène, de 125 MVA à 750 tr/min, 22 kV et 3,28 kA maximum.
 Excitation magnétique 300 et 1,2 maximum



8.3.2 Générateurs

Exemple 1 : La centrale de Rhinau sur le Rhin. La centrale comporte quatre alternateurs de 42000 kVA chacun : vitesse, 75 tr.mn⁻¹ avec turbines Kaplan à axe vertical, débit 350 m³.s⁻¹.



Exemple 2 : La centrale de Grand-Maison en Isère

- Vitesse de synchronisme : 428,6 tr.mn⁻¹
- Puissance active nominale : 153 MW
- Tension nominale : 15,5 kV
- Intensité nominale : 6333 A
- Masse du rotor : 235 t
- Masse du stator : 166 t
- Excitation statique par soutirage au stator
- Puissance d'excitation : 323 kW
- Rendement en régime nominal : 98,5%

