Machine synchrone

1 Constitution

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

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

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

ou

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

Ω_S : vitesse de rotation du champ tournant en $rad.s^{-1}$;
ω : pulsation des courants alternatifs en $rad.s^{-1}$. $\omega = 2.\pi.f$;
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.

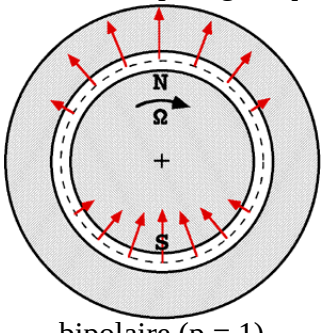
1.4 Synchronisme

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

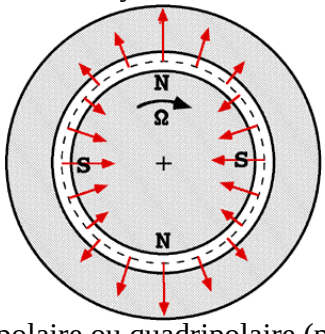
Le rotor ne peut donc tourner qu'à la vitesse de synchronisme Ω_S.

1.5 Schémas

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



bipolaire (p = 1)

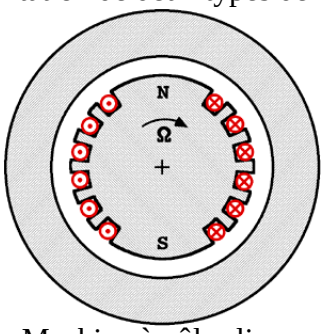


tétrapolaire ou quadripolaire (p = 2)

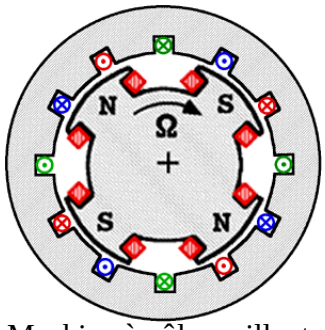
 © Claude Divoux, 1999
WWW.DZPEN.COM | قلم الجزائر

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.

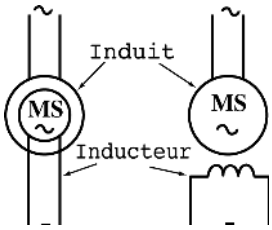


Machine à pôles lisses

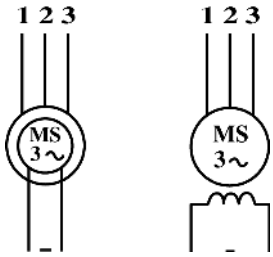


Machine à pôles saillants

2 Symboles



Machine monophasée



Machine triphasée

3 f.é.m. induite

Un 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.

$E = KN\Phi f = KN\Phi p n_S = K'\,\Phi n_S$ finalement : $\boxed{E = K'\,\Phi n_s}$

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)

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 f.é.m. $e_1(t)$ $e_2(t)$ et $e_3(t)$ de même valeur efficace E et déphasées de $2\pi/3$.

 © Claude Divoux, 1999
WWW.DZPEN.COM | قلم الجزائر

4 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 $\omega = p.\Omega_S$.

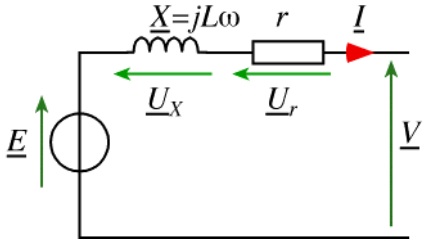
Rappel : toute variation de champs magnétique à travers une bobine créée aux bornes de la bobine une f.é.m. induite.

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 Schéma dans le cas de l'alternateur



E : f.é.m. à vide (V)

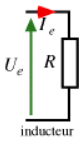
V : tension aux bornes d'un enroulement de la machine (V)

R : résistance de l'enroulement (Ω)

X : réactance synchrone (Ω)

Remarques :

- l'inductance L du schéma tient compte de l'inductance réelle de l'enroulement et de la réaction magnétique d'induit ;
- le courant est orienté en convention générateur.
- l'inducteur est équivalent à une résistance



Toute l'énergie absorbée à l'inducteur est perdue par effet joule : $Pa_{inducteur} = Pje_{inducteur}$

6.2 Loi des mailles

Loi des mailles avec les grandeurs instantanées : $e = v + u_X + u_r$

soit : $e = v + L\frac{di}{dt} + Ri$

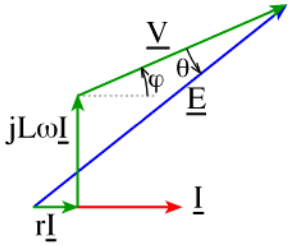
Loi des mailles avec les grandeurs vectorielles : $\underline{E} = \underline{V} + \underline{U}_X + \underline{U}_r$

avec : $\underline{V}\ (V,\ \varphi)$; $\underline{U}_X\ (L\omega I,\ +\pi/2)$; $\underline{U}_r\ (rI,\ 0)$

 © Claude Divoux, 1999 WWW.DZPEN.COM | قلم الجزائر

Loi des mailles avec les grandeurs complexes : $\underline{E} = \underline{V} + jL\omega\underline{I} + R\underline{I}$

6.3 Diagrammes de Fresnel



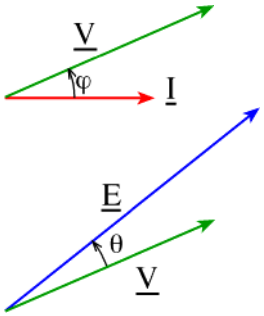
Remarques :

- 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 φ = 0.

Remarque : le diagramme ci-dessus est en fait le plus simple pour une machine à pôles lisses et non saturée.

Il peut être utile de connaître deux angles :

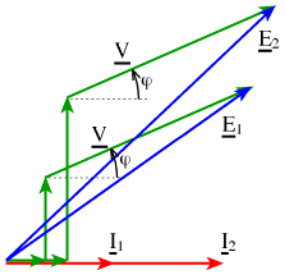
- le déphasage φ entre le courant et la tension. φ et I varient en fonction de la consommation ;
- le décalage interne θ entre V et E.



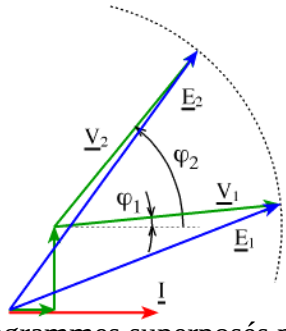
6.4 Commentaires : alternateur couplé au réseau

Pour un alternateur couplé au réseau, V est imposé à 220 V et *f* à 50 Hz.
Les grandeurs variables du réseau sont le courant I et le déphasage φ.

Observons l'allure du diagramme de Fresnel pour la variation de ces deux grandeurs :



Diagrammes superposés pour deux valeurs du courant



Diagrammes superposés pour deux valeurs du déphasage

On constate que pour ces deux situations la f.é.m. E doit varier.

E est donnée par la relation : $E = KN\Phi f$

On constate que le flux Φ est le seul terme pouvant être modifié par l'intermédiaire du courant d'excitation I_e.

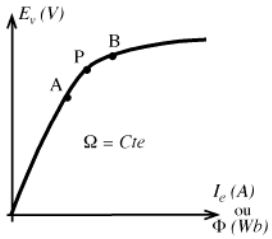
Conséquence :

- en utilisation normale, un groupe électrogène doit fournir une tension dont la valeur efficace est la plus constante possible. La charge pouvant varier dans des proportions importantes, un dispositif électronique de régulation (asservissement), agissant sur l'intensité du courant d'excitation, est donc nécessaire.

 © Claude Divoux, 1999
WWW.DZPEN.COM | قلم الجزائر

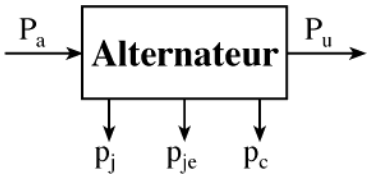
6.5 Caractéristique à vide d'une machine synchrone

Le point de fonctionnement P se trouve généralement entre les points A et B.
Sous le point A, la machine serait sous exploitée.
Au-dessus du point B, une forte augmentation de I_e ne produit qu'une faible augmentation de E_v. L'asservissement devient impossible.



7 Bilan des puissances d'un alternateur

7.1 Puissance absorbée



La turbine, ou le moteur à essence pour un groupe électrogène, entraîne l'arbre de l'alternateur.
La puissance absorbée est mécanique.

$$P_a = \Omega_S . T_M = 2\pi n_S T_M$$

Ω_S : pulsation de rotation en rad.s^{-1}
n_S : vitesse en trs.s^{-1}
T_M : couple utile sur l'arbre en N.m

Si l'alternateur n'est pas auto-excité il faut encore tenir compte de l'énergie électrique absorbée par l'excitation (rotor).

$$P_a = \Omega_S . T_M + U_e I_e = 2\pi n_S T_M + U_e I_e$$

7.2 Puissance utile

En triphasé avec une charge équilibrée de facteur de puissance cos φ

$$P_U = \sqrt{3} U I \cos\varphi$$

7.3 Bilan des pertes

Pertes par effet joule dans l'inducteur : $p_{je} = U_e I_e = r_e I_e^2$

Pertes par effet joule dans l'induit : $p_j = \frac{3}{2} R I^2$ (voir le cours sur le triphasé)

Où R est la résistance vue entre deux bornes de l'alternateur. Ces pertes dépendent de la charge.

Pertes dites « collectives » p_c : pertes mécaniques et pertes fer qui ne dépendent pas de la charge.

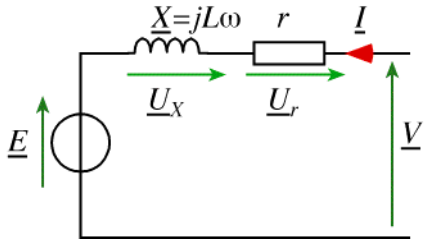
Remarque :
- comme les pertes mécaniques et les pertes fer dépendent de la fréquence et de la tension U, elles sont généralement constantes (50 Hz - 220V).

 © Claude Divoux, 1999 WWW.DZPEN.COM | قلم الجزائر

7.4 Rendement

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} = \frac{UI\sqrt{3}\cos\varphi}{2\pi n_S T_M + U_e I_e} \quad \text{ou} \quad \eta = \frac{P_u}{P_a} = \frac{P_u}{P_u + U_e I_e + \frac{3}{2}RI + p_c}$$

8 Moteur synchrone

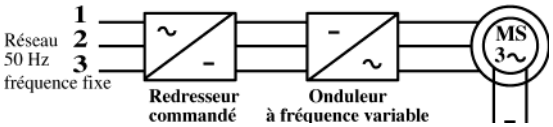


Remarques :

- loi des mailles : $\underline{V} = \underline{E} + \underline{U}_X + \underline{U}_r$;
- le courant est en convention récepteur ;
- il faut inverser le bilan des puissances de l'alternateur.

$\boxed{P_a = \sqrt{3}UI\cos\varphi + U_e I_e}$ et $\boxed{P_u = \Omega_S T_u}$

Pour varier la vitesse d'un moteur synchrone, il faut varier la fréquence des courants statoriques :



9 Compléments sur le moteur synchrone

9.1 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 φ en modifiant le courant d'excitation I_e.

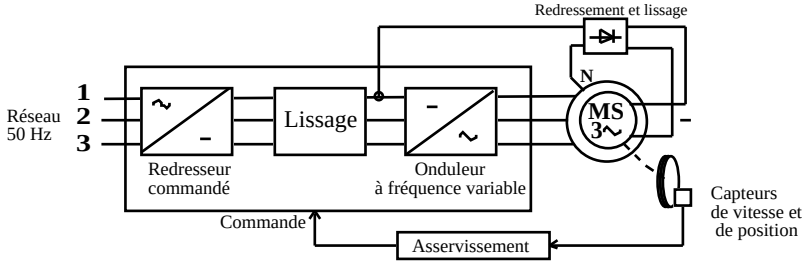
9.2 Inconvénients

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.

9.3 Utilisations

9.3.1 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).



 © Claude Divoux, 1999
WWW.DZPEN.COM | قلم الجزائر

- 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, programmateur, servomoteur).
- Le moteur synchrone peut également être utilisé comme source de puissance réactive Q pour relever le facteur de puissance cos φ d'une installation électrique.

9.3.2 Alternateurs

Ils fournissent une partie de l'énergie du réseau EDF. On les trouve dans les barrages sur les fleuves ou les lacs.

Exemple : 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 $m^3.s^{-1}$.

Les groupes turbine-alternateurs sont implantés dans le barrage qui barre complètement le cours du fleuve.

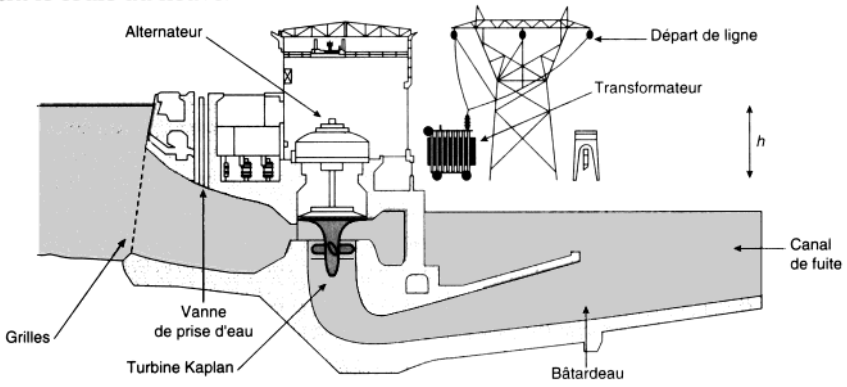


fig. 6. Disposition d'une centrale de basse chute (au fil de l'eau).

Exemple : 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%

Extraits de Electrosystème - H. Ney - 1res STI - éd Nathan Technique 1996,

10 Vocabulaire

synchrone
nombre de paires de pôles
champ tournant
vitesse de synchronisme
entrefer
pôles lisses
pôles saillants
f.é.m. induite
coefficient de Kapp
réversible
alternateur
alternateur auto-excité
réaction magnétique d'induit
phase de la machine

 © Claude Divoux, 1999 WWW.DZPEN.COM | قلم الجزائر