
MACHINE SYNCHRONES

I. PRESENTATION

La machine synchrone s'appelle alternateur (centrale électrique, groupe électrogène, voiture...). Elle transforme l'énergie mécanique en énergie électrique, sous forme de tensions alternatives. En sens inverse la machine porte le nom de moteur synchrone.

II. CONSTITUTION

1. Principe

Tout circuit électrique soumis à une variation de flux est le siège de f.é.m. induite, qui selon la loi de Lenz, s'écrit:

$$e = - \frac{d\phi}{dt}$$

e : f.é.m. en V

$d\phi$: variation de flux en Wb

dt : variation du temps en s

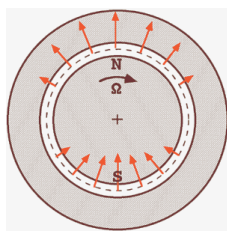
2. Rotor ou inducteur

Il est constitué d'électroaimants alimentés en courant continu (ou d'aimants permanents) créant $2p$ pôles inducteurs, successivement Nord et Sud.

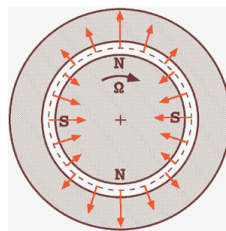
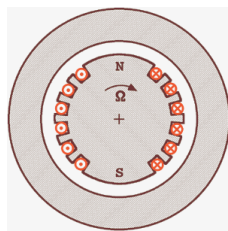
L'inducteur, mobile autour d'un axe, tourne à la fréquence de rotation n_s et crée un champ magnétique tournant à la vitesse de synchronisme.

Dans les alternateurs, il existe deux types de rotor:

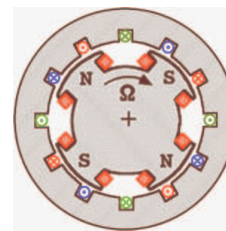
- les rotors à pôles lisses (centrales thermiques, nucléaires, TGV)
- les rotors à pôles saillants (ou roues polaires): centrales hydrauliques moins puissantes et moins vite que précédemment (groupes électrogènes).



bipolaire ($p = 1$) à pôles lisses



tétrapolaire ou quadripolaire ($p = 2$) à pôles saillants



3. Stator ou induit

Les conducteurs de l'induit, placés dans des encoches autour de la carcasse de la machine, sont groupés en bobine.

Les enroulements du stator sont le siège de courants alternatifs monophasés ou triphasés. Il possède donc le même nombre de paires p de pôles.

Dans une machine synchrone triphasée bipolaire ($p=1$), le stator comporte 3 bobines identiques régulièrement décalées de $\frac{360}{3} = 120^\circ$.

Dans une machine synchrone triphasée multipolaire ($p>1$), il y a p jeux de 3 bobines identiques, décalées de

$$\frac{360}{3p} = \frac{120}{p}$$

4. Champ tournant

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

$$\Omega_s = \frac{\omega}{p} \text{ ou } n_s = \frac{f}{p}$$

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 champ tournant en tr.s^{-1}

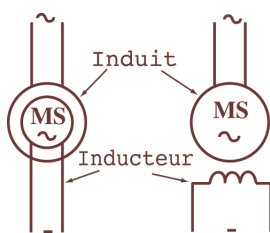
f : fréquence des courants alternatifs en Hz

p : nombre de paires de pôles.

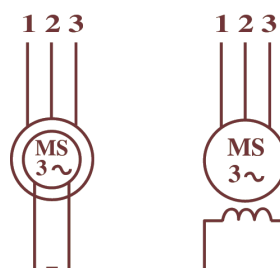
5. Synchronisme

Le champ tournant du stator accroche le champ inducteur solidaire du rotor. *Le rotor ne peut donc tourner qu'à la vitesse de synchronisme.*

6. Symbole



Machine synchrone
monophasée



Machine synchrone
triphasée

III. F.E.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 .

$$E = KN\phi f = KN\phi p n_s = K_1 \phi . n_s$$

E : f.é.m. induite (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 (tr.s^{-1})

$K_1 = KNp$: constante globale (caractéristique du moteur)

A flux constant: $E = K_2 . n_s$ avec $K_2 = K_1 . \phi$

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 $\frac{2\pi}{3}$

Le coefficient de Kapp d'un alternateur triphasé est supérieur à celui d'un alternateur monophasé.

La presque totalité des alternateurs sont triphasés, car ceci permet d'obtenir davantage de puissance.

IV. FONCTIONNEMENT DE L'ALTERNATEUR

1. Excitation de l'alternateur

Lorsque l'inducteur n'est pas constitué d'aimants permanents, on doit l'alimenter en courant continu.

1^{ère} solution: alternateur à bagues et balais

Une source continue extérieure à la machine fournit l'énergie au rotor (par l'intermédiaire de balais frottant sur des bagues isolées).

2^{ème} solution: alternateur auto-excité

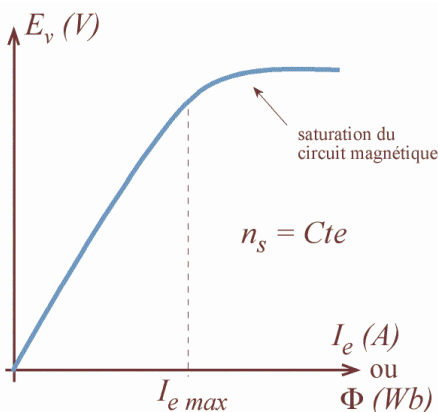
Un petit alternateur à induit tournant, solidaire du rotor, fournit des courants alternatifs qui, après redressement par un pont de diodes, alimente le rotor de l'alternateur principal.

Dans les 2 cas, il faut prévoir un rhéostat pour le réglage de l'intensité du courant d'excitation.

2. Etude à vide

Essai à vide : on relève la caractéristique à vide E_v (I_{ex})

A vide $I = 0$, le rotor est entraîné à la fréquence de rotation n constante. On relève, en fonction du courant d'excitation i , les variations de la tension aux bornes d'un enroulement; à vide $V_0 = E$.



L'alternateur fonctionnant à vide (sans charge), on fait varier le courant d'excitation et on relève la f.é.m. correspondante.

Courbe identique à la courbe d'aimantation du circuit magnétique:

- la zone utile de fonctionnement se situe au voisinage du coude de saturation A;
- un phénomène d'hystérésis dédouble la caractéristique. Pour une valeur donnée du courant d'excitation i_e , si la fréquence de rotation n_s varie, la valeur efficace $E = \dots$

Parfois le neutre de l'induit n'est pas sorti; on mesure alors la tension entre deux phases U_0 et on en déduit la valeur E

E_r : F.é.m. rémanente ;elle sert à l'amorçage de l'alternateur

La caractéristique est considérée comme une droite dans la partie non saturée ;autrement dit la f.é.m. y est proportionnelle au courant d'excitation : $E_v = E_r + k I_{ex}$

L'alternateur fonctionne normalement dans la zone saturée.

- avec un couplage étoile $E = \frac{U_0}{\sqrt{3}}$

- avec un couplage triangle, chaque résistance du stator est soumise à une tension composée $E = U_0$

3. ETUDE EN CHARGE

3.1. Caractéristique en charge

voir fichier Machines synchrones

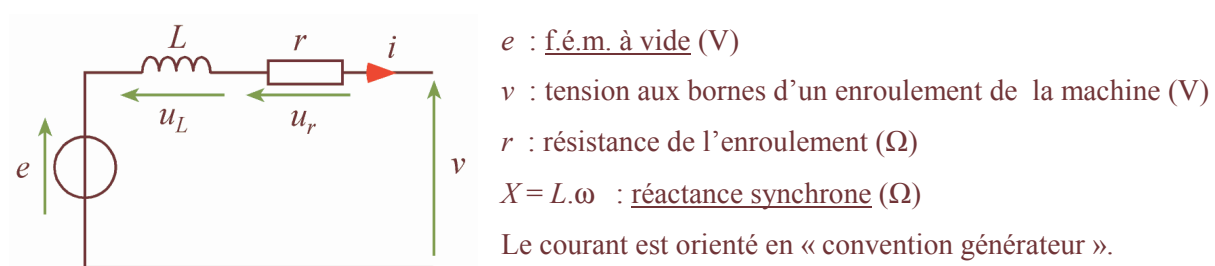
3.2. Réaction magnétique induit

Le stator dont les enroulements sont maintenant traversés par des courants triphasés, crée un champ magnétique tournant à la fréquence de synchronisme n_s .

Si le circuit magnétique n'est pas saturé, ce champ s'ajoute vectoriellement, à chaque instant, à celui du rotor qui tourne à la même vitesse. Il en résulte une modification de la valeur du champ total et donc de celle du flux.

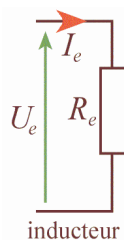
4. Modèle équivalent d'une phase de l'alternateur

4.1. Schéma dans le cas de l'alternateur



Remarque :

l'inducteur est équivalent à une résistance



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

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

L'inductance L du schéma tient compte de l'inductance réelle de l'enroulement et de la réaction magnétique d'induit.

4.2. Loi des mailles

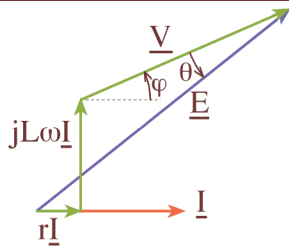
Loi des mailles avec les grandeurs instantanées : $e = v + u_L + u_r$

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

avec: $\vec{V}(V, \varphi)$; $\vec{U}_L \left(L\omega I, +\frac{\pi}{2} \right)$; $\vec{U}_r(rI, 0)$

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

4.3. Diagrammes de Fresnel



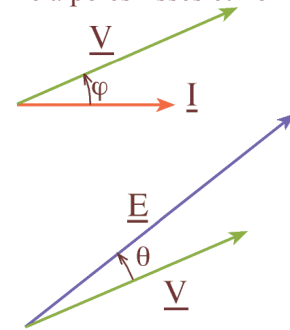
Remarques :

- 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 $\varphi = 0$.

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 $\underline{V}$ et $\underline{E}$.

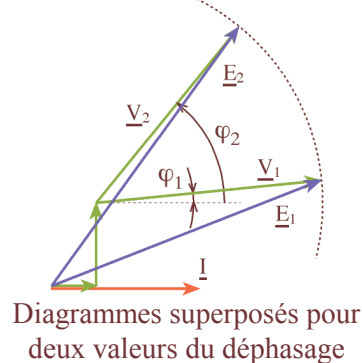
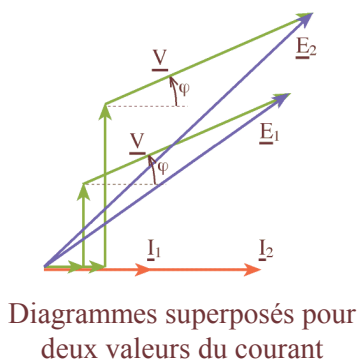


4.4. Diagramme d'un alternateur couplé au réseau

Pour un alternateur couplé au réseau, $\underline{V}$ est imposé à 220 V et f à 50 Hz.

Les grandeurs variables du réseau sont le courant I et le déphasage φ qui vont dépendre de la consommation.

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



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

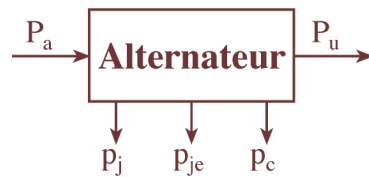
E est donnée par la relation : $E = K\Phi n_s$

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.
- Si I_e devient trop grand, la machine risque de saturer, il n'est alors plus possible de contrôler E avec I_e . L'asservissement devient impossible. Il faut éviter la saturation.

5. BILAN DES PUISSANCES D'UN ALTERNATEUR



5.1. Puissance mécanique

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

$$P_{méca} = \Omega_S \cdot T_M = 2\pi n_S T_M$$

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

5.2. Puissance absorbée par le rotor

$$P_e = U_e I_e$$

Si l'alternateur est à excitation indépendante, il faut encore tenir compte de l'énergie électrique absorbée par l'excitation (rotor).

Si l'alternateur est auto-excité, la puissance reçue par l'inducteur (excitation) est fournie par le système d'entraînement et se trouve donc incluse dans le terme $P_{méca} = \Omega_S \cdot T_M$

5.3. Puissance absorbée totale

Alternateur à excitation indépendante :

$$P_a = \Omega_S \cdot T_M + U_e I_e$$

Alternateur auto-excité :

$$P_a = \Omega_S \cdot T_M$$

Alternateur à excitation à aimants permanents :

$$P_a = \Omega_S \cdot T_M$$

5.4. Puissance utile

La charge reliée à l'alternateur absorbe un courant de valeur efficace I et présente un facteur de puissance $\cos \varphi$

$$P_U = VI \cos \varphi \quad \text{monophasée}$$
$$P_U = \sqrt{3} UI \cos \varphi \quad \text{triphasee}$$

5.5. 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 :

$$p_{ji} = r I^2 \quad (\text{monophasée}) \quad p_{ji} = \frac{3}{2} R I^2 \quad (\text{triphasee})$$

Où R est la résistance vue entre deux bornes de l'alternateur.

Pertes par effet joule dans l'induit :

$$p_j = r I^2 + R_e I_e^2 \quad (\text{monophasée})$$
$$p_j = \frac{3}{2} R I^2 + R_e I_e^2 \quad (\text{triphasee})$$

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

Remarque :

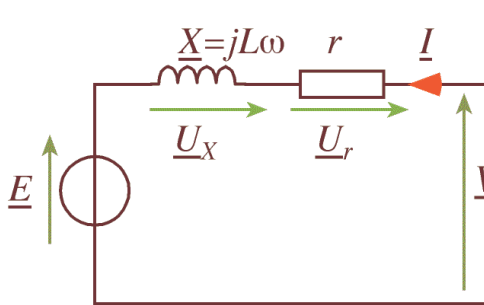
- comme les pertes mécaniques et les pertes fer dépendent de la fréquence et de la tension U , elles sont généralement constantes (50 Hz - 220V).

5.6. Rendement

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} = \frac{UI\sqrt{3}\cos\varphi}{2\pi n_s T_M + U_e I_e} \quad \text{ou} \quad \eta = \frac{P_u}{P_u + U_e I_e + \frac{3}{2} R I^2 + p_c} \quad \text{alternateur triphasé à excitation indépendante}$$

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} = \frac{VI\cos\varphi}{2\pi n_s T_M + U_e I_e} \quad \text{ou} \quad \eta = \frac{P_u}{P_u + U_e I_e + r I^2 + p_c} \quad \text{alternateur monophasé à excitation indépendante}$$

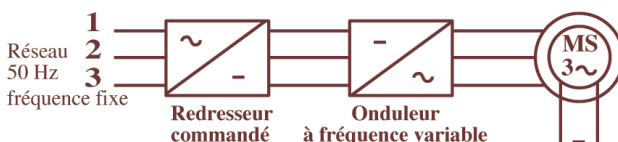
6. MOTEUR SYNCHROME



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

$$P_a = \sqrt{3}UI\cos\varphi + U_e I_e \quad \text{et} \quad P_u = T_u \Omega_s$$

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



6.1. 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 $\cos\varphi$ en modifiant le courant d'excitation I_e .

6.2. 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.