

Chapitre 2

Machines synchrones

I- Alternateurs synchrones

1- Introduction

Les générateurs synchrones ou alternateurs sont utilisés pour la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique alternative.

Le terme synchrone signifie que la fréquence de la tension induite est directement reliée à la vitesse de rotation.

La figure (1), montre une coupe verticale d'un alternateur, le rotor porte un bobinage alimenté par une source DC. Cela permet de créer le champ magnétique. Le stator porte un bobinage triphasé. Ce bobinage crée un champ tournant à l'entrefer de la machine.

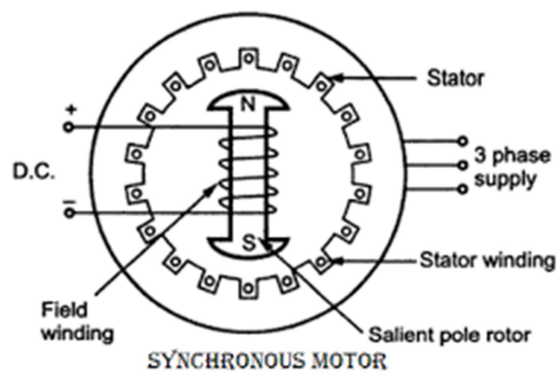


Figure (1) Schéma d'un alternateur synchrone

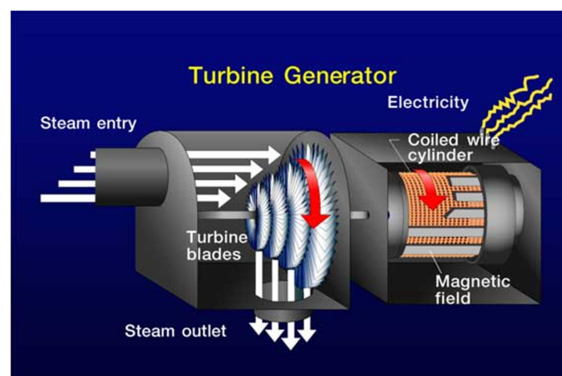


Figure (2) Alternateur synchrone relié à une turbine

La rotation du rotor alimenté en DC est effectuée pratiquement à travers une turbine, comme il est montré sur la figure (2).

- La distribution spatiale du flux crée par le rotor est supposée sinusoïdale. La tension induite dans une spire du stator est aussi sinusoïdale. Si la fréquence de la tension induite est 60cps, donc la vitesse de rotation du rotor doit être 60rps ou 3600 rpm.
- Pour un rotor à 4 pôles

La tension induite réalise un cycle complet pour chaque tour du rotor.

- Pour un rotor à 4 pôles, le cycle électrique est complété à $\frac{1}{2}$ tour du rotor et par conséquent l'alternateur à 4 pôles doit tourner à 1800 rpm pour produire 60 cps de l'énergie électrique.

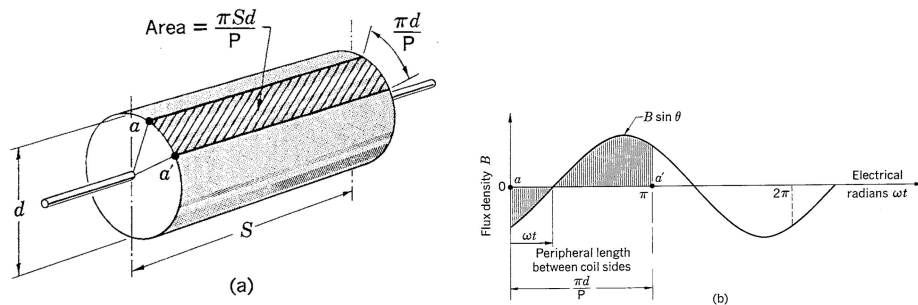
La relation entre la fréquence, le nombre de pôles p et la vitesse (Ω en rpm) est donnée par :

$$f = \frac{p}{2} \frac{\Omega}{60} \quad (1)$$

2- Tension induite aux bornes d'un alternateur

La tension induite dans le bobinage de la machine synchrone est due au mouvement relative entre le champ magnétique du rotor et le bobinage du stator.

On s'intéresse dans cette partie à la détermination de la Fem induite dans une phase du stator.



Figure(3) projection d'une spire sur le rotor (a), et distribution spatiale de l'induction magnétique.

La surface hachurée représente la projection sur le rotor de la surface occupée par les N spires aa' où le pas est $\frac{\pi D}{p}$ rad elec .

La figure (3) montre la distribution l'induction magnétique sur $2\pi \text{ rad elec}$. Il est supposé que à l'instant $t=0$, l'axe des spires aa' coïncide avec l'axe du pôle nord du rotor.

Le flux qui travers les spires doit être évalué.

Puisque il y a p pôles, la distance entre les deux extrémités de la spire est $\frac{\pi d}{p}$ et puisque la longueur de la machine est S , donc la surface occupée par les spires est $\frac{\pi d S}{p}$

Il est nécessaire de trouver la valeur moyenne de l'induction magnétique qui traverse les spires.

$$B_{av}(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} B \sin \theta d\theta \quad (2)$$

Donc le flux qui traverse les spires aa' est donné par :

$$\begin{aligned} \phi(t) &= \frac{\pi d S}{p} \frac{1}{\pi} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} B \sin \theta d\theta \\ &= \frac{2 d S B}{p} \cos(wt) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\phi = \frac{2 d S B}{p} \text{ Le flux total par pôle.}$$

Pour les les N spires, la tension induite est :

$$\begin{aligned} e_g &= N \frac{d\phi(t)}{dt} \\ e_g &= -w N \phi \sin(wt) + N \frac{d\phi}{dt} \cos(wt) \end{aligned}$$

En régime permanent le flux total par pôle est constant et la tension induite devient :

$$e_g = -w N \phi \sin(wt) \quad (4)$$

Dans l'équation (4), le bobinage est supposé imbriquer. Cependant dans certaines applications, le bobinage est distribué sur un nombre d'encoches k_w agaçantes. Cela provoque une petite diminution de la valeur maximale de la tension induite. Cela est justifié par le fait que les différentes spires du bobinage ne seront pas atteintes par la valeur maximale du flux rotorique en même temps.

Pour cette raison, le facteur de distribution est introduit.

Dans ce cas la tension induite par phase devient :

$$e_g = -w k_w N \phi \sin(wt) \quad (5)$$

La valeur efficace de la tension induite est :

$$\begin{aligned} E_g &= \frac{w k_w N \phi}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f k_w N \phi \\ E_g &= \frac{w k_w N \phi}{\sqrt{2}} = 4.44 f k_w N \phi \end{aligned} \quad (7)$$

Où f est la fréquence de la tension générée.

3- Circuit équivalent d'une machine synchrone

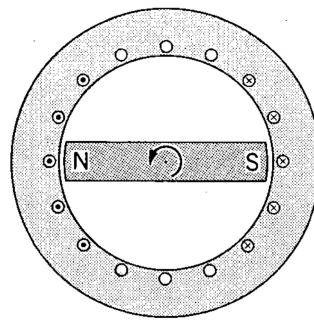
Pour établir le circuit équivalent il faut tenir compte de la chute de tension dans la résistance et la réactance de l'induit.

Considérant l'alternateur à deux pôles de la figure (4-a) qui fonctionne à un facteur de puissance égal à 1. Le courant qui circule dans l'induit est en phase avec la tension induite et produit un flux d'induit ϕ_a qui est en retard du flux principal (inducteur) de 90° .

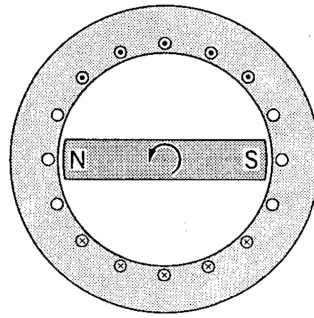
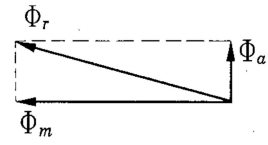
Supposant que l'alternateur alimente une charge purement inductive. Le courant maintenant est en retard par rapport à la tension induite de 90° , et le flux ϕ_a s'oppose au flux principal (flux rotorique). Donc la réaction d'induit provoque une diminution du flux résultant et de la tension générée. Cela devient bien évident avec l'augmentation du courant de charge I_a .

Inversement si le courant l'alternateur alimente une charge capacitive, le flux résultant et la tension induite augmente lorsque le courant de charge augmente.

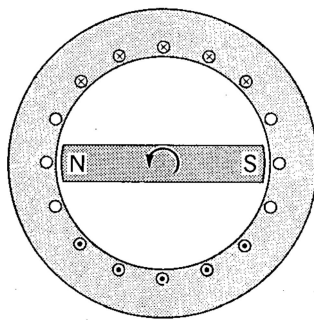
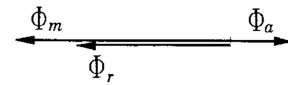
La figure (5) ; montre la variation de la tension aux bornes (terminal voltage V_T) en fonction du courant de charge.



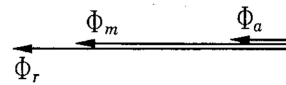
(a)



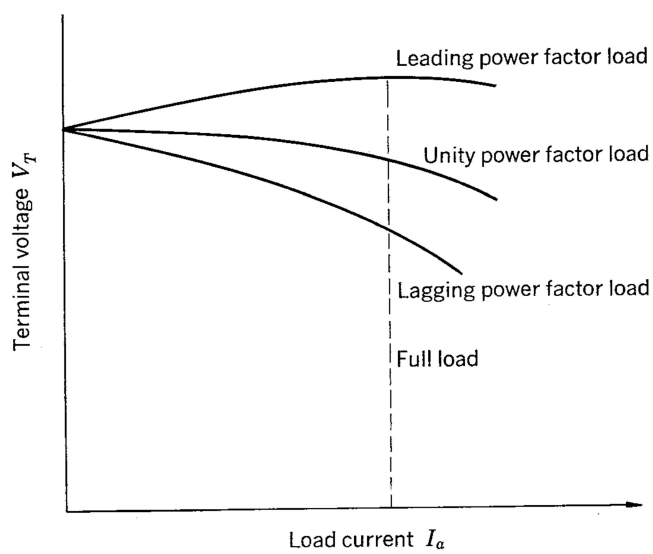
(b)



(c)



Figure(4) Schéma d'un alternateur (a)- charge purement résistive (b)- charge purement inductive (c)- charge purement capacitive



Figure(5) Variation du la tension aux bornes en fonction de la charge

Pour considérer l'effet de la réaction d'induit ; prenant le diagramme suivant pour une charge inductive

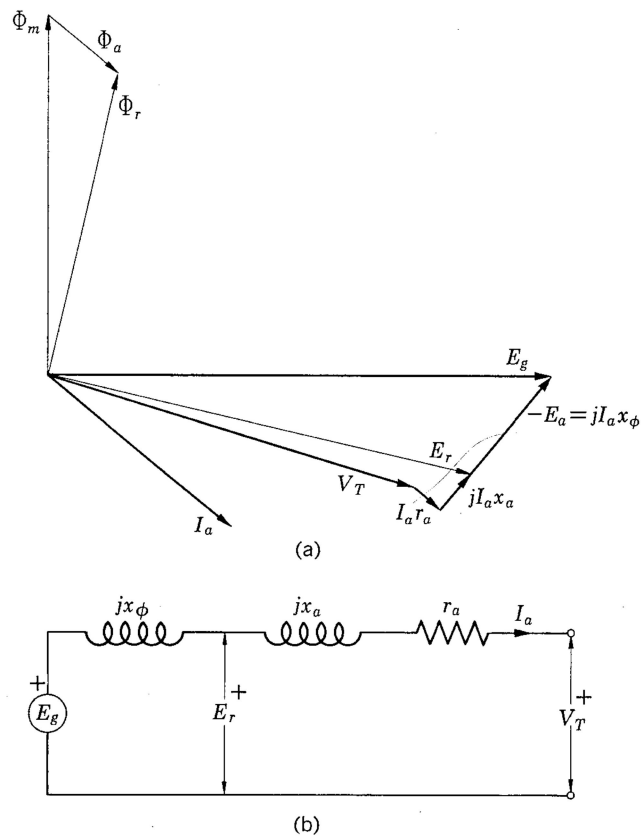


Figure (6) diagramme de phase pour une charge inductive (a), circuit équivalent (b)

A partir des équations (3) et (5) ; on déduit le flux principal Φ_m est en retard de 90° par rapport à la tension induite E_g .

- Lorsque la charge est appliquée ; le courant I_a (qui est en retard) produit le flux Φ_a par conséquent le flux résultant et tension aux bornes sont réduits. Avec E_r est décalée par rapport à Φ_r de 90° .
- La tension aux bornes est déduite en soustrayant $jI_a x_a$ et $r_a I_a$ de E_r .

Avec :

x_a : La réactance de fuite par phase.

r_a : La résistance d'une phase.

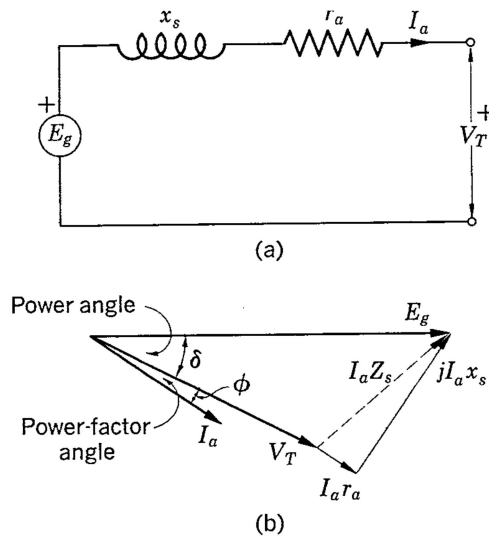
Dans le circuit équivalent de l'alternateur, il faut tenir compte de l'effet de la réaction d'induit. Cet effet est représenté dans le circuit par l'élément jx_ϕ

où : $jI_a x_\phi = -E_a$.

Les deux inductances jx_a et jx_ϕ sont combinée pour définir la réactance synchrone.

$$x_s = x_a + x_\phi$$

Le circuit équivalent d'un alternateur à pôles lisses est donné sur la figure suivante :



Circuit équivalent de l'alternateur avec réactance synchrone (a) , diagramme de phase (b)

L'angle de facteur de puissance (ϕ) de la charge est l'angle entre I_a et V_T , tandis que δ est l'angle entre V_T et E_g appelé l'angle de puissance ou l'angle interne.