

# MACHINE SYNCHRONE

## I. PRESENTATION

La machine synchrone s'appelle ..... (centrale électrique, groupe électrogène, voiture...).

Elle transforme l'énergie ..... en énergie ....., sous forme de tensions .....

En sens inverse la machine porte le nom de ..... synchrone.

## II. CONSTITUTION

### 1. PRINCIPE

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

$$e = \dots\dots\dots$$

- $e$ : f.é.m. en V
- $d\phi$ : variation de flux en Wb
- $dt$ : variation du temps en s

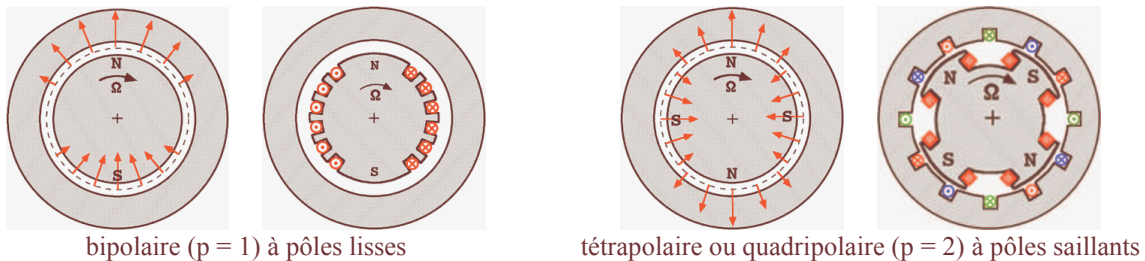
### 2. ROTOR OU INDUCTEUR

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

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

Dans les alternateurs, il existe deux types de rotor:

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



### 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 ..... du ..... sont le siège de ..... monophasés ou triphasés. Il possède donc le même nombre de paires  $p$  de pôles.

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

Dans une machine synchrone triphase 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:

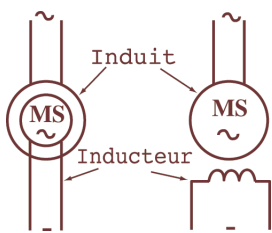
$$\Omega_s = \dots \quad \text{ou} \quad n_s = \dots \quad n'_s = \dots$$

- $\Omega_s$  : vitesse de rotation du champ tournant en  $\text{rad.s}^{-1}$
- $\omega$  : pulsation des courants alternatifs en  $\text{rad.s}^{-1}$      $\omega = 2.\pi.f$
- $n_s$  : vitesse de rotation du champ tournant en  $\text{tr.s}^{-1}$
- $n'_s$  : vitesse de rotation du champ tournant en  $\text{tr.min}^{-1}$
- $f$  : fréquence des courants alternatifs en Hz
- $p$  : nombre de paires de pôles.

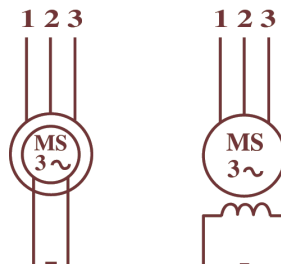
### 5. SYNCHRONISME

Le champ ..... du stator accroche le champ ..... 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  $E$ .

$$E = \dots\dots\dots$$

- $E$ : 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)
- $\phi$ : 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<sup>-1</sup>)
- $K_1 = KNp$ : constante globale (caractéristique du moteur)

A flux constant  $\phi = \text{cst}$ :  $E = \dots\dots\dots$  avec  $K_2 = K_1 \cdot \phi$

Les enroulements sont disposés dans le stator de telle façon que la f.é.m.  $e(t)$  soit le plus possible de forme  
.....

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<sup>ère</sup> 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<sup>ème</sup> solution: alternateur auto-excité

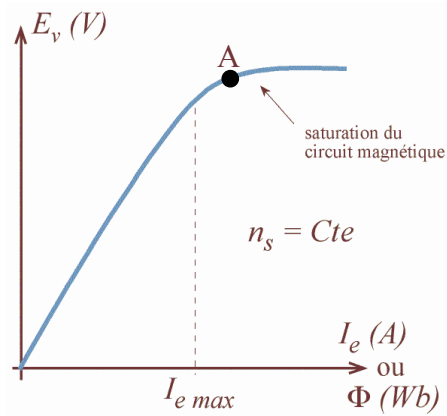
Un petit alternateur à induit tournant, solidaire du rotor, fournit des courants alternatifs qui, après redressement par un pont de diodes, alimente le rotor de l'alternateur principal.

Dans les 2 cas, il faut prévoir ..... pour le réglage de .....

#### 2. ETUDE A VIDE

---

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



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

$$E = \dots\dots\dots$$

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  $E$

- avec un couplage étoile  $E = \dots\dots\dots$

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

### 3. ETUDE EN CHARGE

#### 3.1. Caractéristique en charge

#### 3.2. Réaction magnétique d'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. MODELE EQUIVALENT D'UNE PHASE DE L'ALTERNATEUR

### 4.1. 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 ( $\Omega$ )

$X = L\omega$  : réactance synchronique ( $\Omega$ )

Le courant est orienté en « convention générateur ».

**Remarque :**

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

l'inducteur est équivalent à une résistance

$$P_e = \dots\dots\dots$$

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

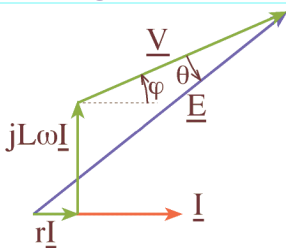
Loi des mailles avec les grandeurs instantanées : .....

Loi des mailles avec les grandeurs vectorielles : .....

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 : .....

### 4.3. Diagrammes de Fresnel



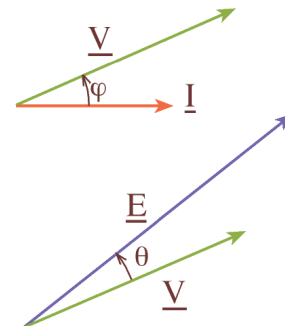
**Remarques :**

- 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  $\varphi$  entre le courant et la tension.  $\varphi$  et  $I$  varient en fonction de la consommation ;
- le décalage interne  $\theta$  entre  $\underline{V}$  et  $\underline{E}$ .

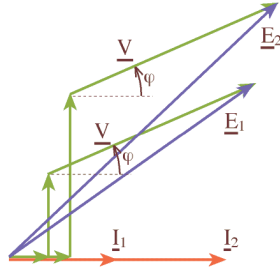


#### 4.4. Diagramme d'un alternateur couplé au réseau

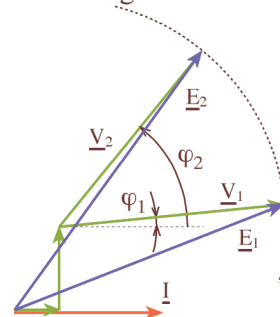
Pour un alternateur couplé au réseau,  $\underline{V}$  est imposé à 220 V et  $f$  à 50 Hz.

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

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.

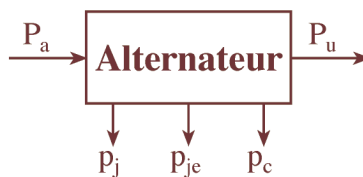
$E$  est donnée par la relation :  $E = K\Phi n_s$

On constate que le flux  $\Phi$  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.

$P_{méca} = \dots\dots\dots$

$\Omega_s$  : pulsation de rotation en  $\text{rad.s}^{-1}$   
 $n_s$  : vitesse en  $\text{tr.s}^{-1}$  et  $n_s'$  : vitesse en  $\text{tr.min}^{-1}$   
 $T_M$  : couple utile sur l'arbre en  $\text{N.m}$

### 5.2. Puissance absorbée par le rotor

---

$P_e = \dots\dots\dots$  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  $P_{méca} = \dots\dots\dots$

### 5.3. Puissance absorbée totale

---

Alternateur à excitation indépendante :  $P_a = \dots\dots\dots$

Alternateur auto-excité :  $P_a = \dots\dots\dots$

Alternateur à excitation à aimants permanents :  $P_a = \dots\dots\dots$

### 5.4. Puissance utile

---

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

$P_U = \dots\dots\dots$  monophasée  
 $P_U = \dots\dots\dots$  triphasée

### 5.5. Pertes

---

Pertes par effet joule dans l'inducteur :  $p_{je} = \dots\dots\dots$

**(uniquement avec un alternateur à excitation indépendante)**

Pertes par effet joule dans l'induit :  $p_{ji} = \dots\dots\dots$  (monophasée)

$p_{ji} = \dots\dots\dots$  (triphasée)

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

Pertes totales par effet joule dans l'induit :  $p_j = \dots\dots\dots$  (monophasée)

$p_j = \dots\dots\dots$  (triphasée)

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

---

#### alternateur triphasé à excitation indépendante

$\eta = \frac{P_u}{P_a} = \dots\dots\dots$  ou  $\eta = \dots\dots\dots$

(méthode directe)

(méthode indirecte)

**alternateur monophasé à excitation indépendante**

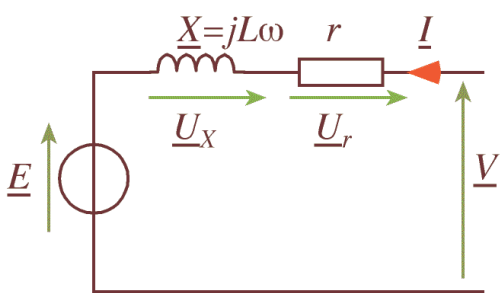
$\eta = \frac{P_u}{P_a} = \dots\dots\dots$

(méthode directe)

ou  $\eta = \dots\dots\dots$

(méthode indirecte)

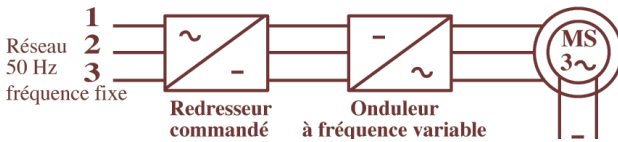
**V. MOTEUR SYNCHRONE**



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

$P_a = \dots\dots\dots + \dots\dots\dots$  et  $P_u = \dots\dots\dots$

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



**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  $I_e$ .

**2. INCONVENIENTS**

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.