

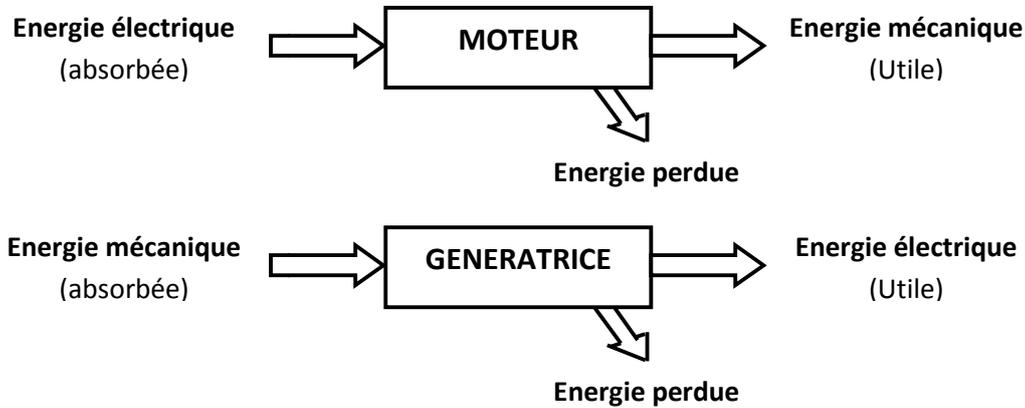


## MACHINE SYNCHRONE



### 1. Présentation:

La machine synchrone est une machine tournante à courant alternatif qui peut fonctionner en générateur ou en moteur : on dit qu'elle est **réversible**. Lorsqu'elle fonctionne en génératrice, elle prend le nom de **génératrice synchrone** ou **alternateur**, lorsqu'elle fonctionne en moteur, elle prend le nom de **moteur synchrone**.



### 2. Constitution :

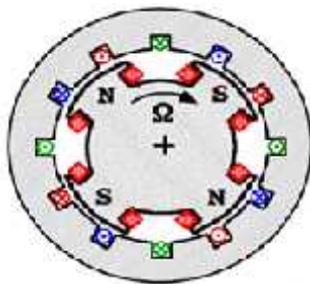
La machine synchrone possède deux parties principales : une partie **fixe** appelée **stator** (ou **induit**) et une partie **mobile** appelée **rotor** (ou **inducteur**).

#### 2.1. Stator (induit) :

C'est une couronne de tôles empilées, serrée dans une carcasse, et portant des encoches destinées à loger les conducteurs. Ces derniers sont constitués d'une bobine (si l'alternateur est monophasé) et de trois bobines (si l'alternateur est triphasé).

#### 2.2. Rotor (inducteur) :

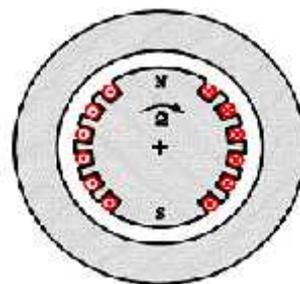
Il est constitué d'un enroulement parcouru par un courant d'excitation continu et possède **p** paires de pôles. Ce courant continu est apporté à l'inducteur par l'intermédiaire de bagues et de balais. Le rotor peut aussi être constitué d'un aimant permanent. On distingue deux types de rotor : le rotor à **pôles lisses** et le rotor à **pôles saillants**.



**Figure 1:**

**Machines bipolaire à pôles lisses**

Les conducteurs des bobines sont logés dans les encoches usinés dans le rotor



**Figure 2:**

**Machine bipolaire à pôles saillants**

Les pôles munis de leurs bobines inductrices sont rapportés sur le rotor et forme une roue dénommée roue polaire

### 3. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

#### 3.1. Fonctionnement en moteur :

L'induit (stator), alimenté par des courants **alternatifs** de fréquence **f** crée dans l'entrefer de la machine, un **champ magnétique tournant** à la vitesse  $n_s$ .

L'inducteur (rotor), siège d'un **champ magnétique constant**, suit le champ tournant statorique à la **même** vitesse  $n_s$ .

#### 3.2. Fonctionnement en générateur (alternateur) :

L'inducteur (**rotor**), alimenté par un **courant continu** et entraîné par une **turbine** tournant à la vitesse  $n_s$ , crée dans l'entrefer de la machine un **champ tournant** à la vitesse  $n_s$ . Ce champ tournant induit aux bornes de chacun des enroulements statoriques une f.é.m. **e (t)** d'expression  $e = -N \frac{d}{dt}$

#### 3.3. Synchronisme :

A la différence du moteur asynchrone, le rotor et le champ statorique tournent à la **même vitesse**  $n_s$ , d'où le nom **synchrone**

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

$n_s$  : vitesse de rotation du champ tournant en trs/s

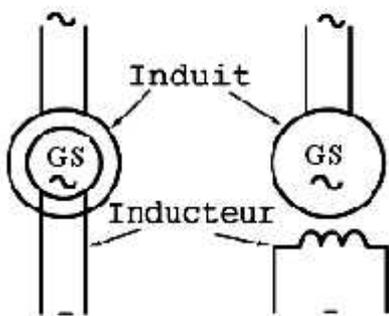
$f$  : Fréquence des courants alternatifs en Hz ;

$p$  : nombre de paires de pôles de la machine

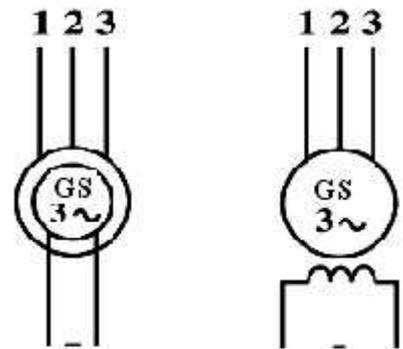
### 4. ALTERNATEUR

L'alternateur ou génératrice synchrone est la seule machine capable de fournir des tensions alternatives de grande puissance. Il transforme l'énergie mécanique reçue en énergie électrique.

#### 4.1. Symbole :



ALTERNATEUR MONOPHASE



ALTERNATEUR TRIPHASE

#### 4.2. Expression de la force électromotrice :

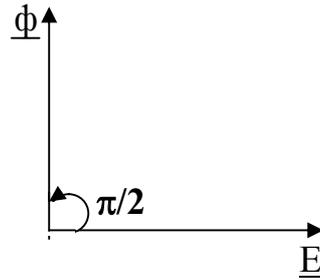
La **roue polaire** (inducteur), alimentée en **courant continu** et tournant à la vitesse **n** crée dans l'entrefer un flux  $\phi$  d'expression :  $\phi = \phi_m \cos \omega t$

Chaque spire d'un enroulement du stator, soumise à l'action de ce champ tournant, est le siège d'une force électromotrice induite d'expression :  $e = -N_0 \frac{d\phi}{dt}$

Si on remplace  $\phi$  par son expression on aura :

$$e = -N_0 \frac{d(\phi_m \cos \omega t)}{dt} = N_0 \omega \phi_m \sin \omega t = N_0 \omega \phi_m \cos \left( \omega t - \frac{\pi}{2} \right)$$

On voit que la f.é.m. est déphasée de  $\frac{\pi}{2}$  par rapport au flux d'où le diagramme de Fresnel suivant :



L'expression efficace de la f.é.m. est :  $E = \frac{E_{max}}{2} = \frac{N_0 \omega}{2} m = \frac{2\pi f}{2} N_0 m = 4,44 f N_0 m$

$N_0$  représente le nombre de spires, or une (1) spire est égale à deux (2) conducteurs, donc nombre de spire est égale à nombre de conducteurs divisé par 2 :  $N_0 = \frac{N}{2}$

L'expression de la f.é.m. devient donc :  $E = 4,44 f \frac{N}{2} m = 2,22 f N m$

Cette expression représente la force électromotrice théorique. Pour obtenir la f.é.m. efficace réelle on doit tenir compte de deux choses :

- Les conducteurs statoriques ne sont pas coupés au même instant par le flux, on apporte donc une correction en multipliant la force électromotrice théorique par un **facteur de distribution** noté  $K_D$ .
- Le flux crée par l'inducteur n'est pas parfaitement sinusoïdal, on apporte une correction en multipliant la force électromotrice théorique par un **facteur de forme** noté  $K_F$ .

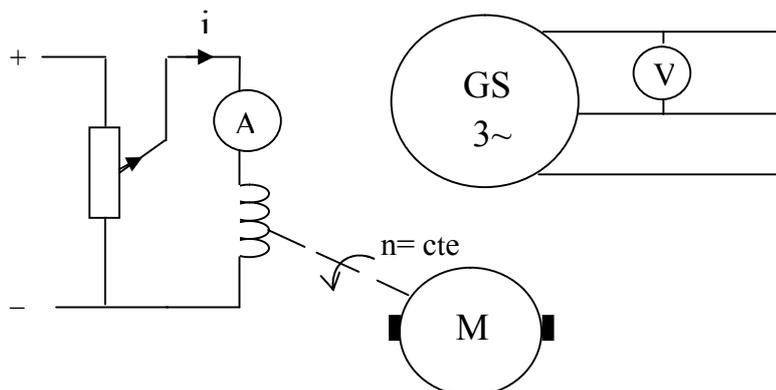
L'expression réelle de la force électromotrice est donc :  $E = 2,22 K_D K_F f N m$

Le produit  $2,22 K_D K_F$  représente le **coefficient de KAPP (K)** :

$$E = K f N m \quad \text{avec} \quad K = 2,22 K_D K_F$$

Le facteur de distribution  $K_D$  est toujours inférieur à 1 ( $K_D < 1$ ) et le facteur de forme  $K_F$  est toujours supérieur à 1 ( $K_F > 1$ ), le produit  $K_D K_F$  est très voisin de 1. Si aucune indication n'est donnée, on prendra  $K = 2,22$ .

#### 4.3. Caractéristique interne ou caractéristique à vide : $E_v = f(i)$ :



La caractéristique  $E_v = f(i)$  représente les variations de la force électromotrice aux bornes d'un enroulement du stator en fonction du courant d'excitation  $i$ . (figure 3)

$$E_v = KfN_m = KPnN_m$$

La courbe se trace à vitesse constante, le flux est proportionnel au courant d'excitation, P et N sont constants on aura donc  $E_v = K'i$

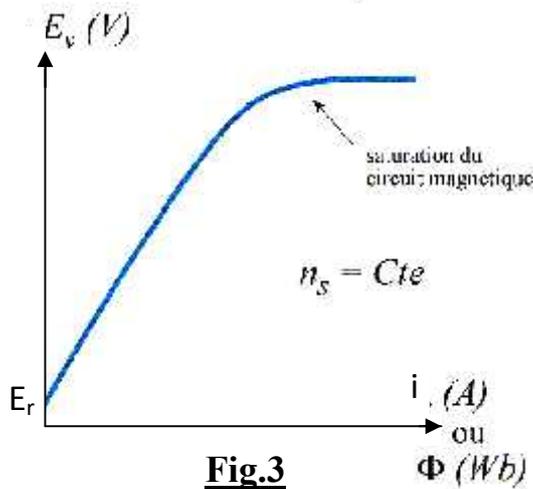


Fig.3

Cette caractéristique est constituée de deux zones : une zone linéaire et une zone de saturation.

- Dans la zone linéaire la f.é.m.  $E_v$  est proportionnelle au courant d'excitation  $i$
- Dans la zone de saturation le courant augmente mais la f.é.m. varie peu. Dans cette partie la f.é.m. n'est plus proportionnelle au courant.

**Remarque:** Pour une excitation nulle ( $i = 0$ ), la force électromotrice au stator n'est pas nulle. La faible tension existante est dite force électromotrice rémanente  $E_r$ .

#### 4.4. Etude en court-circuit :

Les phases du stator sont reliées par un court-circuit. La principale caractéristique  $I_{cc} = f(i)$  est tracé à vitesse constante et est donné à la (figure 4b)

##### a. Schéma de montage

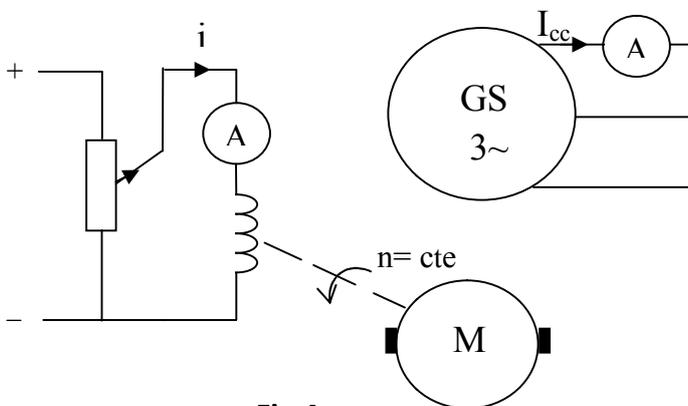


Fig.4a

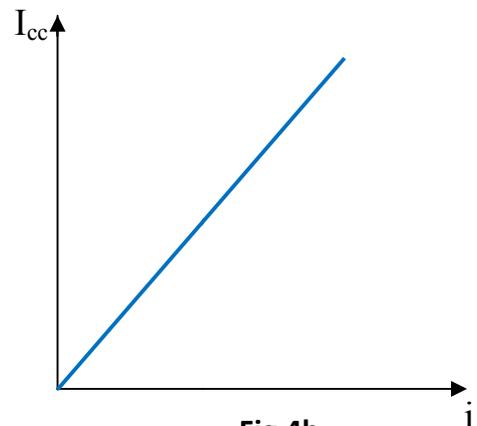
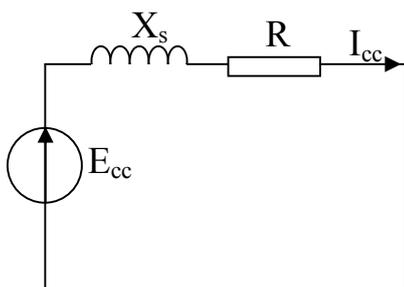


Fig.4b

##### b) Modèle équivalent à une phase de l'induit :



$E_{cc}$  : f.é.m. en court circuit sur une phase de l'induit

$Z_s$  : impédance synchrone d'un enroulement de l'induit

$R$  : résistance d'un enroulement de l'induit;

$X_s$  : réactance synchrone

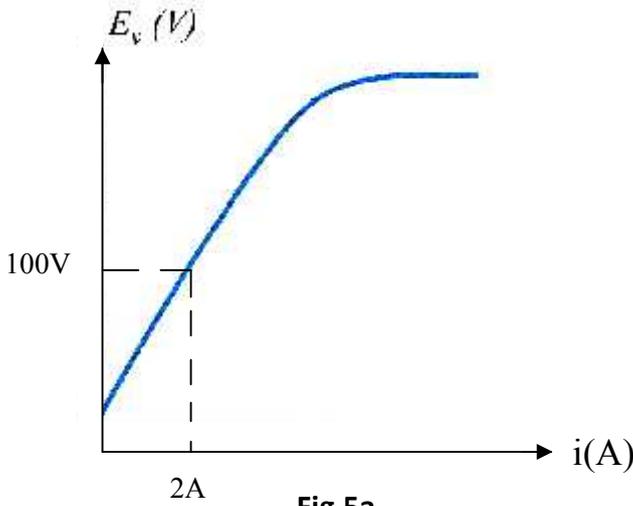
$$Z_s = \frac{E_{cc}}{I_{cc}}; \quad X_s = \sqrt{Z_s^2 - R^2}$$

La force électromotrice simple  $E_{cc}$  obtenue dans l'essai en court-circuit est la même que celle qui serait

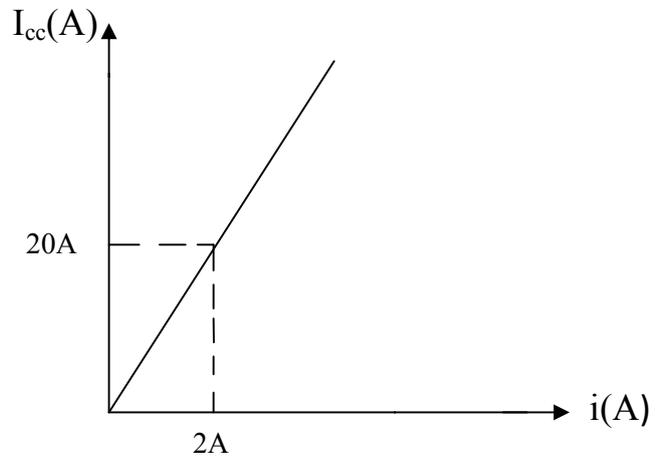
obtenue dans l'essai à vide pour le même courant d'excitation soit  $Z_S = \frac{E_v}{I_{cc}}$

Si on néglige la résistance d'un enroulement de l'induit on aura  $X_S = Z_S = \frac{E_v}{I_{cc}}$

**Exemple**



**Fig.5a**



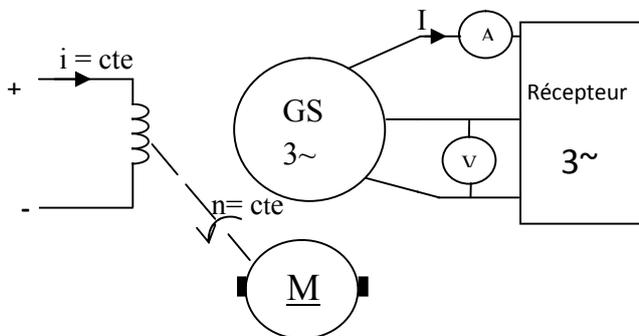
**Fig.5b**

Pour  $i = 2A$  on a  $E_v = 100V$  (Fig.5a) et  $I_{cc} = 20A$  (Fig.5b): donc  $X_s = \frac{E_v}{I_{cc}} = \frac{100}{20} = 5\Omega$

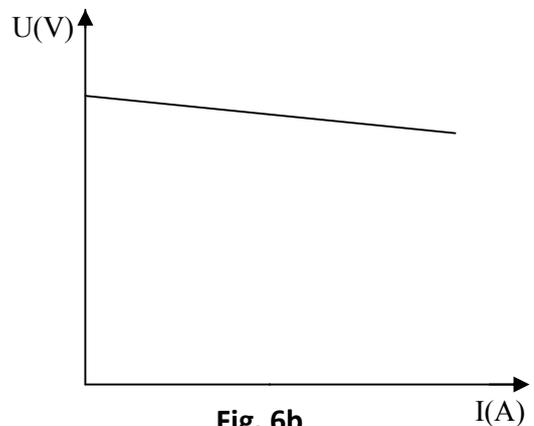
**4.5. Etude en charge :**

Les phases du stator sont reliées à un récepteur triphasé. La principale caractéristique  $U = f(I)$  notée **caractéristique externe** ou en charge se trace à **vitesse et courant d'excitation constante** elle est donnée à la (figure 6b)

**a. Schéma de montage**

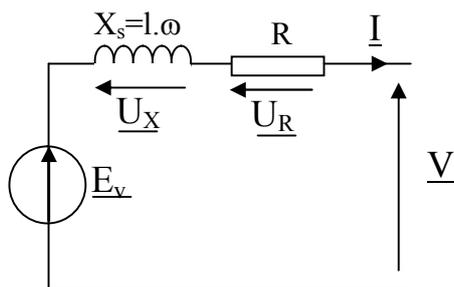


**Fig. 6a**



**Fig. 6b**

**b. Modèle équivalent à une phase de l'induit :**



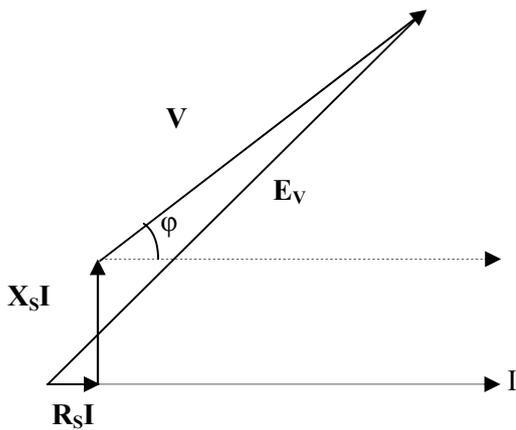
$E_v$  : f.é.m. à vide sur une phase de l'induit (V)

$V$  : tension simple fournie par l'alternateur (V)

$I$  : courant fourni par l'alternateur

**c. Diagramme de Behn Eschenburg :**

La loi des mailles appliquée à une phase quand l'alternateur débite sur un récepteur couplé en étoile donne la force électromotrice à vide d'un enroulement :  $\vec{E}_V = \vec{R_s I} + \vec{X_s I} + \vec{V}$



Pour obtenir la tension entre phases aux bornes de la charge on utilise la relation :  $\mathbf{U} = \mathbf{V} \sqrt{3}$

$\mathbf{RI}$  est la chute ohmique due à la résistance R d'un enroulement statorique (souvent négligée)

$\mathbf{X_s I}$  est la chute de tension due à la réactance synchrone .

$\varphi$  est lié au facteur de puissance du receeteur.

Ce diagramme est comparable au diagramme de kapp mais avec une chute de tension  $\mathbf{X_s I}$  beaucoup plus grande que dans un transformateur.

**d. Détermination du rendement :  $\eta$**

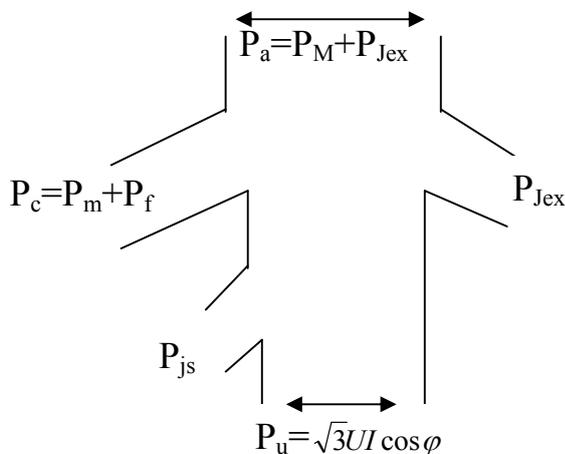
✓ **Expression :**

L'alternateur absorbe une puissance mécanique  $\mathbf{P_M}$  pour entrainer son inducteur (rotor) et une puissance électrique  $\mathbf{P_{jex}}$  pour l'excitation (alimentation du rotor). Il fournit à un récepteur triphasé équilibré une puissance électrique  $\mathbf{P_u} = \sqrt{3}UI \cos \varphi$

$$\text{Soit donc : } \eta = \frac{P_u}{P_a} = \frac{P_u}{P_u + \sum \text{pertes}} = \frac{\sqrt{3}UI \cos \varphi}{\sqrt{3}UI \cos \varphi + \sum \text{pertes}}$$

✓ **Inventaire des pertes :**

- Pertes mécaniques  $\mathbf{p_m}$  : fonction de la vitesse de rotation  $\mathbf{n}$ .
  - Pertes fer  $\mathbf{P_F}$  : fonction du champ magnétique
  - Pertes joule dans l'inducteur (rotor)  $\mathbf{P_{jex} = u_{ex}.i}$
  - Pertes joule dans l'induit (stator) :  $\mathbf{P_{js} = 3.R.I^2}$  (stator en étoile) et  $\mathbf{P_{js} = R.I^2}$  (stator en triangle).
- } Leur somme donne les pertes constantes  $\mathbf{P_c}$

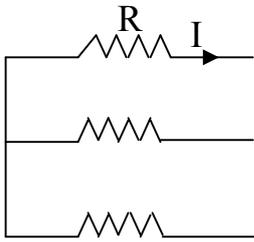


$$\eta = \frac{\sqrt{3}UI \cos \varphi}{\sqrt{3}UI \cos \varphi + P_m + P_f + P_{Jex} + P_{Js}}$$

**e. Expression des pertes joules statorique  $P_{Js}$  par rapport à  $r$  :**

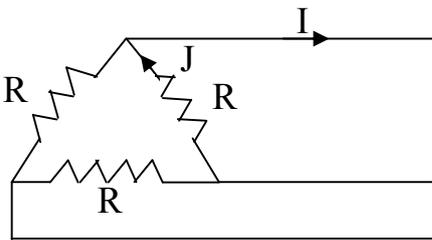
Appelons  $I$  le courant en ligne,  $r$  la résistance entre 2 phases du stator et  $R$  la résistance d'un enroulement du stator :

➤ **Stator en étoile :**



$$P_{Js}=3RI^2 \text{ et } R = \frac{r}{2}, \text{ soit } P_{Js} = \frac{3}{2}rI^2$$

➤ **Stator en triangle**



$$P_{Js}=3RJ^2 = RI^2 \text{ puisque } J = \frac{I}{\sqrt{3}}$$

$$\text{D'autre part, } \frac{1}{r} = \frac{1}{R} + \frac{1}{2R} \text{ soit } R = \frac{3}{2}r \text{ on}$$

$$\text{retrouve alors } P_{Js} = \frac{3}{2}rI^2$$

**Conclusion** Que le stator soit couplé en étoile ou en triangle, les pertes par effet joule statorique ont pour

expression  $P_{Js} = \frac{3}{2}rI^2$

**EXERCICES D'APPLICATION****Exercice 1:**

On considère un alternateur monophasé (circuit magnétique non saturé), ayant les caractéristiques suivantes :

- ✓ Tension d'induit  $U = 380 \text{ V}$  ;
- ✓ Vitesse de rotation  $n = 900 \text{ trs/min}$  ;
- ✓ Fréquence  $f = 60 \text{ Hz}$  ;
- ✓ Résistance d'induit  $r = 0,02 \Omega$ .

Lorsque le courant d'excitation vaut  $9 \text{ A}$ , la tension à vide est égale à  $420 \text{ V}$ . De plus, pour un courant d'excitation de  $5 \text{ A}$ , l'alternateur débite un courant de court-circuit de  $307 \text{ A}$ .

- 1) Déterminer le nombre de pôles de l'alternateur.
- 2) Déterminer l'impédance puis la réactance synchrone.
- 3) Le facteur de puissance de l'installation étant de  $0,9$  trouver la f.é.m. pour  $U = 380 \text{ V}$  et  $I = 120 \text{ A}$  en utilisant le diagramme de Behn Eschenburg.
- 4) En déduire le courant d'excitation correspondant (on considère que la courbe  $E(i)$  est linéaire entre  $380$  et  $450 \text{ V}$ ).

Le rotor consomme un courant  $i = 5 \text{ A}$  sous une tension de  $17 \text{ V}$ , et les pertes constantes sont égales à  $700 \text{ W}$ .

- 5) Calculer pour les conditions des questions 3) et 4), la puissance utile ainsi que le rendement

**Exercice 2 :**

Un alternateur triphasé étoile a une tension (entre phases)  $U = 660 \text{ V}$  et débite un courant de  $50 \text{ A}$  sous un  $\cos\phi = 0,8$  (inductif) à la fréquence  $f = 50 \text{ Hz}$ .

- 1) Calculer les puissances, active, réactive et apparente.
- 2) Sachant que l'induit comporte  $372$  conducteurs et que le flux sous un pôle est de  $0,027 \text{ Wb}$ , calculer le coefficient de Kapp en admettant que  $E$  est égal à la tension sur une phase à la sortie de l'alternateur.

**Exercice 3 :**

Un alternateur monophasé fournit un courant de  $50 \text{ A}$  sous une tension de  $240 \text{ V}$  et avec un facteur de puissance de  $0,8$  (charge inductive). Le rotor consomme  $8 \text{ A}$  sous une tension de  $35 \text{ V}$ . Les pertes constantes sont égales à  $450 \text{ W}$  et la résistance de l'enroulement du stator est  $R = 0,2 \Omega$ .

- 1) Calculer la puissance utile de l'alternateur et son rendement.
- 2) Pour le même courant d'excitation, on a relevé :  $E_v = 280 \text{ V}$  et  $I_{cc} = 40 \text{ A}$ . Calculer l'impédance et la réactance interne de l'alternateur et déterminer la f.e.m ( $E_v$ ) par le graphique de Behn Eschenburg.

**Exercice 4:**

Les caractéristiques d'un alternateur sont les suivantes :

- couplage des enroulements du stator en étoile; fréquence  $f=50 \text{ Hz}$  ;
- expression de la caractéristique à vide  $E_v = 180 i_e$  ( $E_v$  en volt et intensité en ampère)
- résistance d'une phase de l'induit  $r = 0,12 \Omega$  ; réactance synchrone  $X = 1,2 \Omega$ ;

1. Déterminer l'impédance synchrone de la machine.
2. L'alternateur alimente une charge triphasée, inductive, équilibrée, de facteur de puissance  $\cos\phi=0,8$ . La tension efficace entre deux bornes de l'induit est  $U = 2,5 \text{ kV}$  ; l'intensité efficace du courant en ligne est  $I = 400 \text{ A}$ .
  - Quelle est l'intensité  $i_e$  du courant d'excitation sachant que la roue polaire tourne à  $1500 \text{ tr/min}$  ?
  - Calculer les pertes par effet joule dans l'induit.
  - Un essai à vide a donné  $P_v = 90 \text{ kW}$  (y compris l'excitation); quel est le rendement de l'alternateur ?