

# Cours sur les Machines Synchrones Triphasées

## I. Les alternateurs triphasés

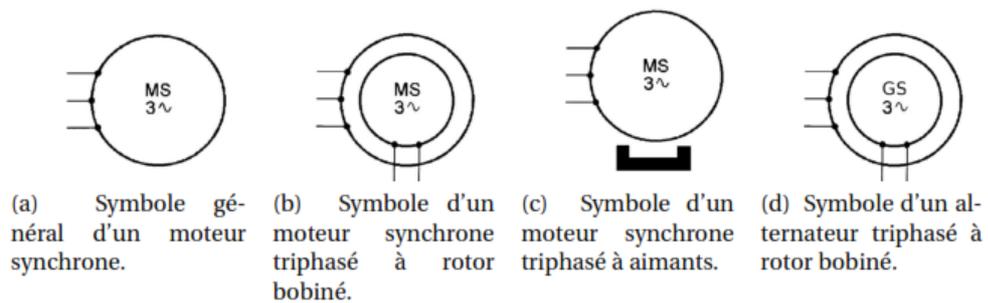
### 1. Constitution et principe de fonctionnement

Un alternateur est un convertisseur d'énergie mécanique vers l'énergie électrique.

Les alternateurs sont des générateurs de courant alternatif. La plupart sont des machines très puissantes en service dans les centrales thermiques ou hydrauliques.

Un alternateur est constitué d'une partie fixe appelée stator (l'induit) et une partie tournante appelée (inducteur).

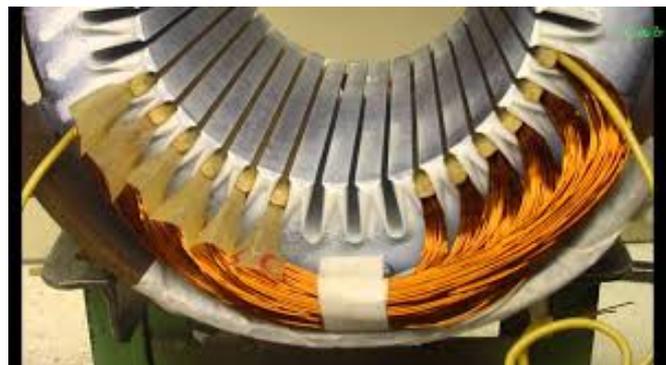
La figure ci-dessous montre les différents symboles utilisés pour représenter une machine synchrone :



#### 1.1. Le stator

Le stator comprend un circuit magnétique constitué par un empilage de tôles en forme de couronne, isolées les unes des autres pour *limiter les courants de Foucault*. L'ensemble des couronnes avec leur isolation est fortement serré, il constitue le circuit magnétique du stator. Dans sa partie intérieure, le circuit magnétique comporte des encoches uniformément réparties dans lesquelles vient se loger le bobinage statorique triphasé de  $2p$  pôles. Ce bobinage comprend trois enroulements décalés géométriquement l'une par rapport à l'autre de  $120^\circ$ .

Figure 1 : Stator d'une machine synchrone triphasée



## 1.2. Le rotor

C'est la partie tournante à l'intérieur du stator. Il représente l'inducteur puisqu'il comporte un enroulement qui doit être excité par un courant continu pour générer un champ magnétique constant de  $2p$  pôles. Avec la rotation du rotor, le champ rotorique constant devient un champ tournant, ce qui engendre des forces électromotrices dans les enroulements statoriques. Il existe deux types de rotors :

- Rotor à pôles lisses ;
- Rotor à pôles saillants.

### a. Rotor à pôles lisses :

Dans ce type des machines, l'entrefer est constant. Le rotor est de faible diamètre par rapport à sa longueur. Il est utilisé pour les fonctionnements à vitesse élevée (3000 tr/min) par exemple, dans les turbo-alternateurs des centrales thermiques. Dans ce type de rotor, le nombre de pôles est 2 ou 4.

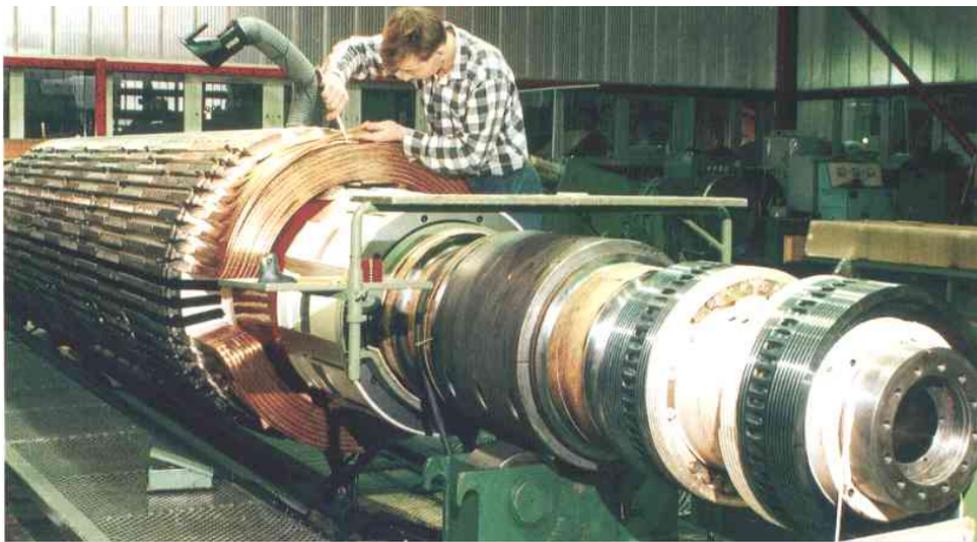


Figure 2 : rotor à pôles lisses

### b. Rotor à pôles saillants :

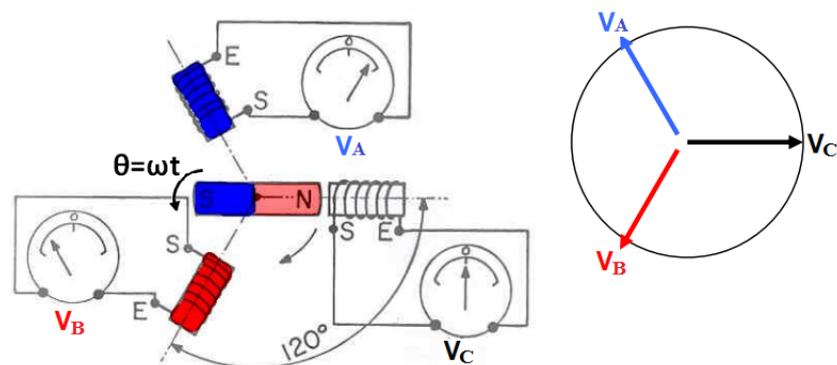
Il est caractérisé par un grand diamètre par rapport à sa longueur. Il est utilisé pour les applications de faibles vitesses comme dans les turbines hydrauliques. Généralement, il comporte un grand nombre de pôles jusqu'à 60 pôles qui correspond à une vitesse de 100 tr/min.

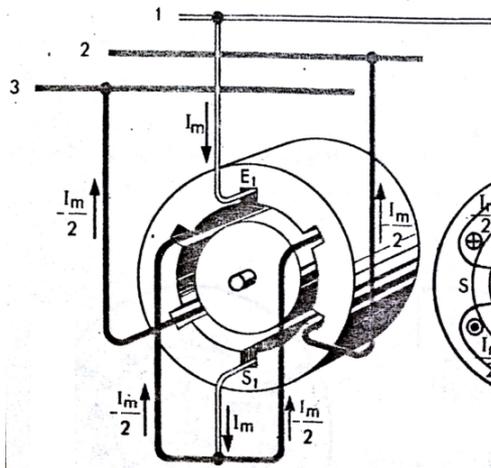


Figure 3 : rotor à pôles saillants

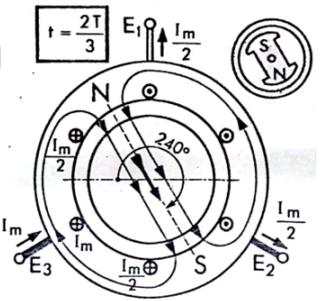
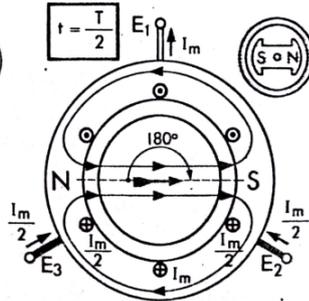
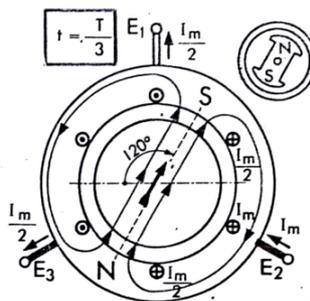
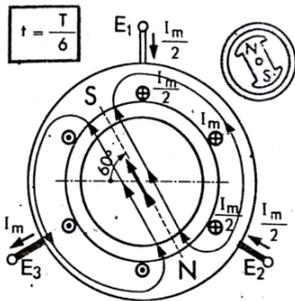
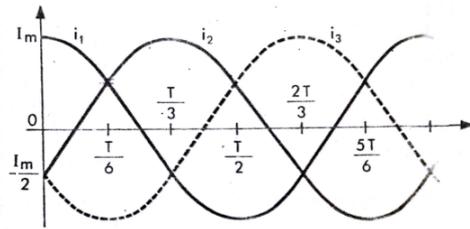
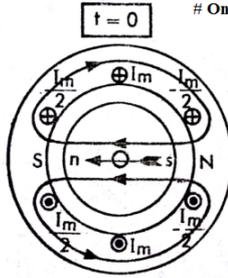
## 2. La force électromotrice induite (fem)

Considérons un alternateur triphasé, lorsqu'on passe un courant continu dans le rotor et faisons-le tourner à une vitesse constante  $N$ , un champ tournant s'établit dans l'entrefer qui fait passer dans le circuit magnétique statorique un flux magnétique variable dans l'espace ( $\Phi(\theta)$ ). Ce flux induit des Fem dans les trois enroulements statoriques ( $E_A, E_B, E_C$ ) selon la loi de Lenz.





- # Il y a trois bobines triphasées traversées par trois courants triphasés.
- # Chaque bobine comporte une spire.
- # Chaque bobine a deux encoches.
- # Chaque bobine produit un champ pulsant de  $2p=2$ .
- # Les trois bobines produisent un champ tournant de  $2p=2$ .
- # Le bobinage comporte trois spires par paire de pôles.
- # On peut dire que chaque bobine comporte une spire par paire de pôles.



**Champ tournant généré électriquement**

### 2.1. Fréquence de la Fem induite

La fréquence des fem induite dépend du nombre de paires de pôles et de la vitesse de rotation.

$$f = \frac{p \cdot N}{60} \quad (1)$$

$$\omega_s = p \cdot \Omega = p \cdot \frac{2\pi N}{60} \quad (2)$$

avec :  $f$  en (Hz) est la fréquence des fem induites ;  $\omega_s = 2\pi f$  est la pulsation électrique des fem induites;  $N$  en (tr/min) est la vitesse de rotation du champ tournant;  $\Omega$  en (rad/s) est la vitesse angulaire mécanique de rotation du champ tournant.

<i>valeurs</i>	<i>normalisées</i>
nb paires pôles p	n (tr/min)
1	3000.0
2	1500.0
3	1000.0
4	750.0
5	600.0
6	500.0
7	428.6
8	375.0
10	300.0
12	250.0
16	187.5
20	150.0
24	125.0
32	93.8
40	75.0

## 2.2. Expression de la Fem induite

Dans le cas d'une répartition sinusoïdale du flux inducteur, on peut écrire

$$\Phi_A = \Phi_M \cos \theta \quad (3)$$

Avec :  $\theta = \omega_S \cdot t$

$$\begin{cases} E_A = -n \frac{d\Phi_A}{dt} = -n \frac{d}{dt} (\Phi_M \cos \omega_S \cdot t) = n \cdot \omega \cdot \Phi_M \sin \omega_S \cdot t = E_M \sin \omega_S \cdot t \\ E_B = E_M \sin \left( \omega_S \cdot t - \frac{2\pi}{3} \right) \\ E_C = E_M \sin \left( \omega_S \cdot t - \frac{4\pi}{3} \right) \end{cases} \quad (4)$$

Avec :

- n est nombre de spires d'une phase statorique
- $Z = 2 \cdot n$  est le nombre des conducteurs actifs par phase.
- $\Phi_M$  est le flux max traversant l'enroulement

D'une manière générale, la fem induite d'une phase statorique peut être écrite sous la forme suivante:

$$e(t) = n \cdot \omega_S \cdot \Phi_M \sin \omega_S \cdot t \quad (5)$$

La valeur efficace par phase est :  $E_{eff} = \frac{n \cdot \omega_S \cdot \Phi_M}{\sqrt{2}}$  avec :  $\omega_S = p \cdot \frac{2\pi N}{60}$

$$\Rightarrow E_{eff} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} \cdot n \cdot f \cdot \Phi_M = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} \cdot n \cdot \frac{p \cdot N}{60} \cdot \Phi_M = \frac{\pi}{\sqrt{2}} \cdot Z \cdot \frac{p \cdot N}{60} \cdot \Phi_M \quad (6)$$

En réalité, la répartition du flux inducteur n'est pas sinusoïdale, pour cela l'expression de la fem doit être corrigée en multipliant par le coefficient de Kapp :

$$E_{eff} = K \cdot Z \cdot f \cdot \Phi_M \quad (7)$$

Selon la répartition du bobinage sur les encoches, les valeurs du coefficient de Kapp appartiennent à l'intervalle suivante :  $K \in [1.41, 2.22]$ . Souvent, on peut prendre  $K = 2.12$ , ce qui signifie que le bobinage de chaque phase occupe le tiers des encoches statoriques.

### 3. Caractéristiques des alternateurs

#### 3.1. Caractéristique à vide $E_J(J)$

L'alternateur est entraîné à vide à vitesse constante. Si on fait varier le courant d'excitation ( $J$ ), la fem à vide prend l'allure suivante :

La courbe peut être divisée en deux zones : saturée et non saturée. L'alternateur fonctionne normalement dans la courbe de saturation.

La courbe dans la zone non saturée peut être considérée comme une droite. Du fait de l'hystérésis, cette droite ne passe pas par l'origine. Donc, il existe une fem rémanente.

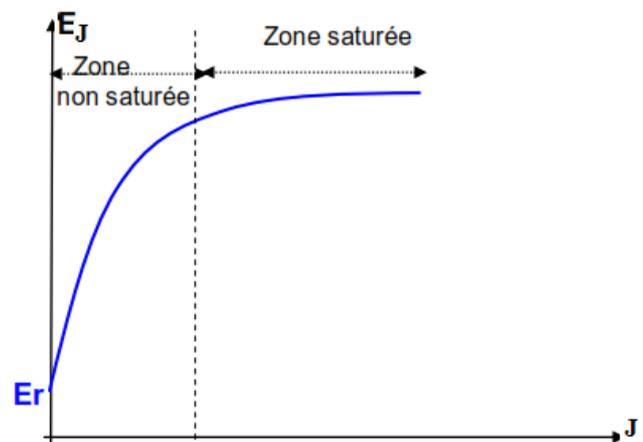


Figure 4

$$E_J = k \cdot \Phi = k' \cdot J$$

**Remarque** : chaque fois qu'on change la vitesse d'entraînement, on obtient une autre caractéristique à vide pour la même excitation. On peut écrire :

$$\frac{E_{J1}}{E_{J2}} = \frac{N_1}{N_2} \quad (7)$$

#### 3.2. Caractéristique en charge $V(I)$

L'alternateur est dit autonome, s'il alimente une charge comme, par exemple, le cas d'un groupe électrogène. Par contre, s'il est couplé au réseau, l'alternateur n'est plus autonome.

Lorsque l'alternateur alimente une charge, les courants statoriques (courants d'induit) créent un champ tournant qui tend à minimiser le flux utile et par conséquent la fem. **C'est la réaction magnétique d'induit (R.M.I.).**

La tension en charge est inférieure de celle à vide. La présence d'une charge aux bornes de l'alternateur provoque une chute de tension  $\Delta V$ .

$$\Delta V = E_J - V \quad (8)$$

Les causes des chutes de tension sont :

- La résistance des enroulements statoriques ( $r_s$ ).
- Les fuites magnétiques à cause de l'inductance statorique ce qui provoque une chute de tension inductive.
- La réaction magnétique d'induit qui dépend du courant débité et son déphasage.

#### 4. Détermination de la chute de tension

- La chute de tension peut être déterminée directement par la relation (8).

$\Delta V = E_J - V$  avec :  $E_J$  : la tension à vide d'une phase statorique et  $V$  : la tension en charge d'une phase statorique.

- La chute de tension peut être déterminée aussi à partir de trois méthodes :
  - Méthode de Behn-Eschenburg.
  - Méthode de Potier.
  - Méthode de Blondel.

Ces méthodes diffèrent les unes des autres selon les hypothèses simplificatrices considérées et la façon dont elles tiennent compte de la RMI et des fuites magnétiques (dus à l'inductance de fuite statorique).

##### 4.1. Diagramme de Behn-Eschenburg (BE)

L'application de ce diagramme est basée sur les hypothèses suivantes :

- L'alternateur est à pôles lisses ;
- Le circuit magnétique n'est pas saturé, autrement dit, la fem est proportionnelle au courant d'excitation.

Dans ces conditions, le schéma équivalent d'une phase statorique d'un alternateur est représenté sur la figure 5.

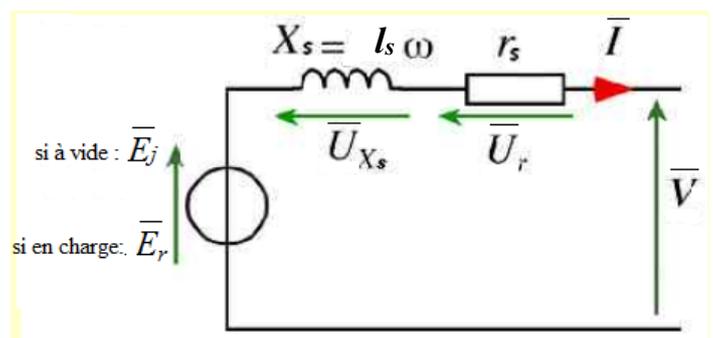


Figure 5

Par conséquent, la fem résultante à travers une phase statorique est égale à :

$$\boxed{\bar{E}_r = \bar{E}_J + \bar{E}_I} \quad (9)$$

Avec :  $\bar{E}_J = k.J \rightarrow$  la fem à vide due au courant inducteur (courant d'excitation).

$\bar{E}_I = -\frac{d}{dt}[\bar{\phi}_I] = -jL.\omega.\bar{I} \rightarrow$  la fem due au courant induit statorique, avec :  $\bar{\phi}_I = L.\bar{I}$ , où l'inductance  $L$  traduit l'influence des trois enroulements statoriques sur le flux à travers une de ces enroulements, donc c'est une inductance cyclique. La fem  $\bar{E}_I$  prend naissance lorsque l'alternateur est en charge. Elle tend à réduire la fem à vide  $\bar{E}_J$ . Donc,  $\bar{E}_I$  représente la fem due à la réaction magnétique d'induit. Donc, on peut écrire :  $\bar{E}_r = \bar{E}_J - jL.\omega.\bar{I}$

Selon la figure 5, la loi des mailles donne l'expression de la fem résultante en charge :

$$\bar{E}_r = \bar{V} + r_s.\bar{I} + j l_s.\omega.\bar{I} \quad (10)$$

A partir des équations (9) et (10), on peut trouver la fem à vide :

$$\bar{E}_J = \bar{E}_r - \bar{E}_I = \bar{V} + r_s.\bar{I} + j l_s.\omega.\bar{I} + jL.\omega.\bar{I}$$

$$\Leftrightarrow \boxed{\bar{E}_J = \bar{V} + r_s.\bar{I} + jX_s.\bar{I}} \quad (11)$$

Cette équation montre que le passage d'un courant  $I$  dans l'induit produit deux chutes de tension internes : chute résistive ( $r_s.\bar{I}$ ) et chute réactive ( $jX_s.\bar{I}$ ).

Avec :  $X_s = (L_s + l_s).\omega$  est appelée la **réactance synchrone**. Elle tient compte la totalité du flux d'induit, flux de fuite et le flux de la RMI.

Le diagramme vectoriel qui traduit l'équation de Behn-Eschenburg est représenté sur la figure 6.

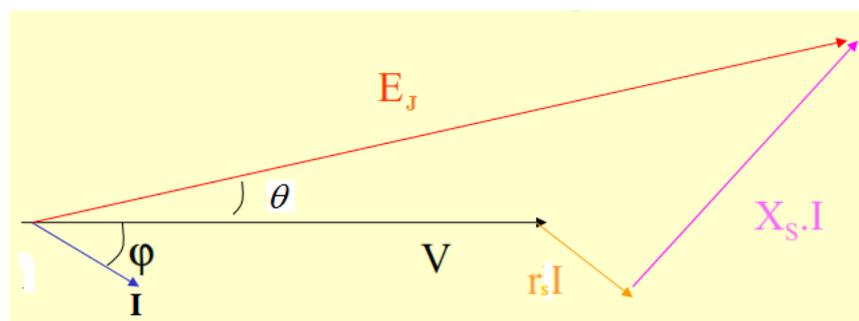


Figure 6

$\theta$  est appelée angle de décalage interne ou angle de charge.

### 4.1.1. Détermination des paramètres du diagramme de BE

Les paramètres du diagramme de BE sont la résistance d'une phase statorique ( $r_s$ ) et la réactance synchrone ( $X_s$ ). la résistance peut être mesurée directement, par contre, la détermination de  $X_s$  nécessite deux essais à la vitesse nominale : à vide et en court-circuit.

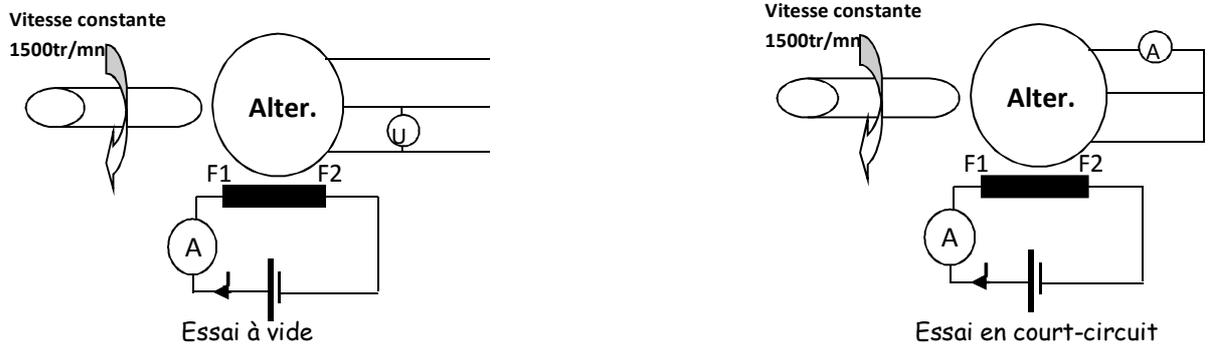


Figure 7

On trace les courbes des deux essais dans le même graphe (Figure 8).

Lors de l'essai en court-circuit, on a :  $V = 0$ , par conséquent, l'équation (11) de Behn-Eschenburg peut être écrite sous la forme suivante :

$$\vec{E}_j = r_s \vec{I}_{cc} + jX_s \vec{I}_{cc} = \vec{Z}_s \vec{I}_{cc} \quad (12)$$

$$\Rightarrow \boxed{Z_s = \frac{E_j}{I_{cc}} = \frac{MP}{MN}} \quad (13)$$

$$\Rightarrow X_s = \sqrt{Z_s^2 - r_s^2} \approx Z_s \quad (14)$$

**Remarque :** pour faciliter l'étude des machines synchrones, on néglige généralement la résistance statorique

**Remarque 1:** Il est important de choisir le point M de telle sorte qu'on obtient le point P dans la zone linéaire de la caractéristique à vide.

**Remarque 2:** il est important de noter que la réactance synchrone est casé-constante dans la zone linéaire de la caractéristique à vide. Dès la saturation commence, la réactance synchrone n'est plus constante et elle décroît avec l'augmentation du courant d'excitation.

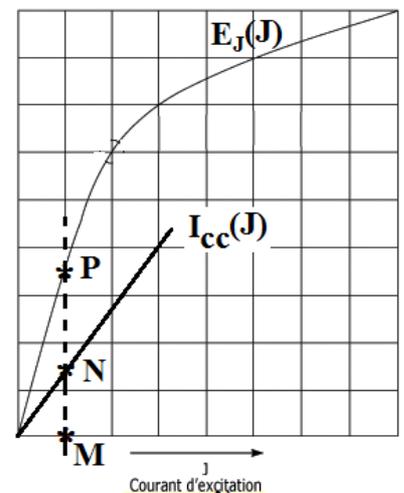


Figure 8

#### 4.1.2. Diagramme de BE en fonctionnement en charge

Les paramètres de fonctionnement d'un alternateur en charge sont :

- La vitesse  $N$
- La tension simple  $V$
- Le courant de charge  $I$
- Le courant d'excitation  $J$
- Le facteur de puissance  $\cos\varphi$

##### a. charge purement résistive

Dans ce cas,  $\varphi=0$ . L'alternateur produit seulement de la puissance active.

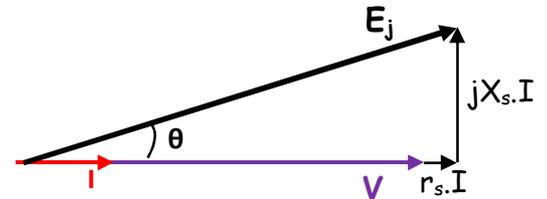


Figure 9

##### b. charge inductive (RL)

Le déphasage est en arrière. L'alternateur produit de la puissance active et réactive. Pour ce fonctionnement, la chute de tension est d'autant plus importante que la charge est plus inductive ( $\cos\varphi$  est plus petit). On doit surexciter l'alternateur pour maintenir la tension  $V$  constante. Ce qui donne  $E_j > V$ .

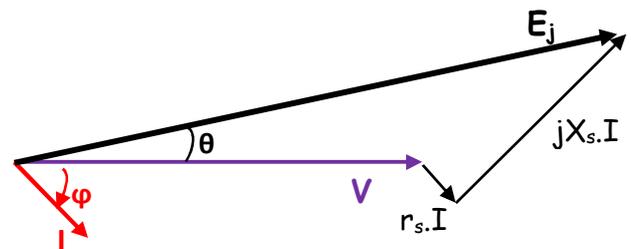


Figure 10

##### c. charge capacitive (RC)

Le déphasage est en avance. L'alternateur produit de la puissance active et absorbe de la puissance réactive. Pour ce fonctionnement, l'alternateur risque d'avoir une surtension aux bornes. Donc, on doit sous-exciter l'alternateur pour maintenir la tension  $V$  constante. Ce qui donne  $E_j < V$ .

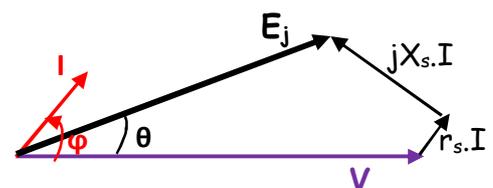


Figure 11

Pour une excitation fixe et une vitesse constante, il existe une caractéristique  $V(I)$  pour chaque valeur de  $\cos\varphi$ . La figure 12 montre que :

- Pour  $\cos\varphi=1$ ,  $V$  décroît quand  $I$  augmente. Cette décroissance est plus forte si la charge est inductive ( $\cos\varphi$  en AR).
- Si le charge est capacitive ( $\cos\varphi$  en AV),  $V$  augmente avec le débit.
- La caractéristique  $V(I)$  dépend des chutes de tension :  $r_s.I$ ,  $X_s.I$  et la RMI

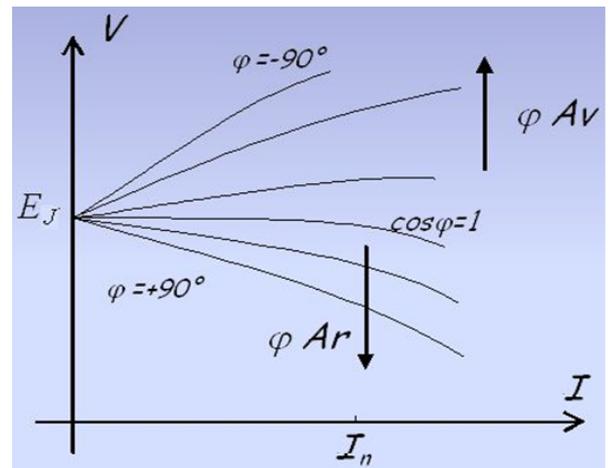


Figure 12

#### 4.2. Caractéristique de réglage $J(I)$

Généralement, les alternateurs fonctionnent à tension constante et pour maintenir cette tension stable, il faut agir sur  $J$ .

- La figure 13 montre que plus la charge est inductive, plus on doit augmenter  $J$  pour compenser la chute de tension.
- Au contraire, plus la charge est capacitive plus on doit diminuer  $J$  pour éviter l'augmentation de  $V$ .

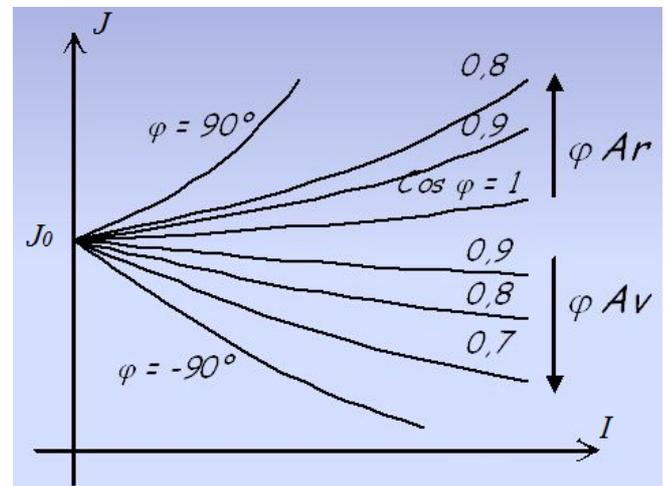


Figure 13

## 5. Bilan de puissance et rendement

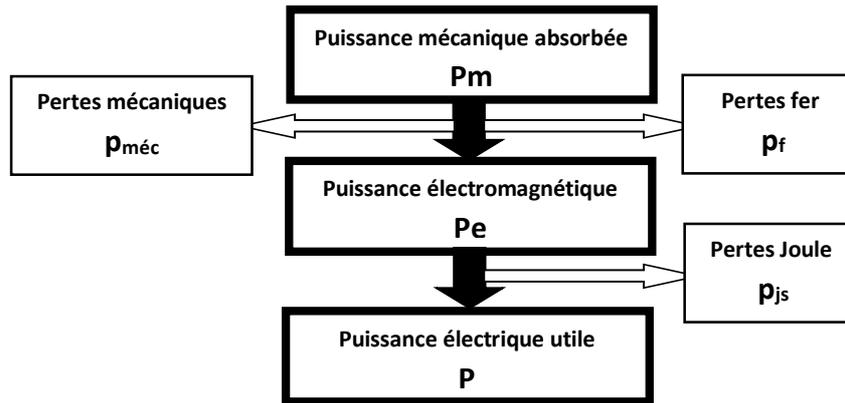


Figure 14

Les pertes dans toute machine électrique se traduisent toujours par un échauffement qui doit être limité pour ne pas détruire les matériaux constituant les différentes parties de la machine.

- Les puissances active et réactive débitées par l'alternateur sont exprimées par :

$$\begin{cases} P = 3V.I.\cos\varphi \\ Q = 3V.I.\sin\varphi \end{cases} \quad (19)$$

Avec  $\varphi$  est l'angle entre  $\vec{V}$  et  $\vec{I}$

- Les puissances électromagnétiques active et réactive sont exprimées par :

$$\begin{cases} Pe = 3E_J.I.\cos\psi \\ Qe = 3E_J.I.\sin\psi \end{cases} \quad (20)$$

Avec  $\psi$  est l'angle entre  $\vec{E}_J$  et  $\vec{I}$

- L'écart entre  $Pe$  et  $P$  égale aux pertes Joule statoriques :

$$p_{Js} = 3r_s I^2 = Pe - P \quad (21)$$

- L'écart entre  $Qe$  et  $Q$  traduit la consommation interne de la puissance réactive :

$$Qe - Q = 3X_s I^2 \quad (22)$$

- La puissance mécanique absorbée par l'alternateur est :

$$Pm = C_m \cdot \Omega_s \quad (23)$$

Avec :  $C_m$  est le couple mécanique réellement appliqué sur l'arbre de l'alternateur.

$\Omega_s$  est la vitesse de rotation en rd/s (vitesse de synchronisme).

- L'écart entre  $Pm$  et  $Pe$  égale aux pertes collectives (pertes fer + pertes mécaniques) :

$$p_{coll} = p_{mec} + p_f = Pm - Pe \quad (24)$$

- Le couple mécanique appliqué sur l'arbre de l'alternateur est donnée par :

$$C_m = C_e + C_{pertes} = \frac{Pm}{\Omega_s} = \frac{Pe}{\Omega_s} + \frac{(p_{mec} + p_f)}{\Omega_s} \quad (25)$$

Le rendement est exprimé par :

$$\eta = \frac{Pu}{Pa} = \frac{P}{Pm + P_{ex}} = \frac{P}{P + \sum pertes} = \frac{3VI \cos\varphi}{3VI \cos\varphi + p_{js} + p_f + p_m + p_{j.ex}} \quad (26)$$

## 6. Détermination géométrique des puissances active et réactive :

A partir du diagramme vectoriel de BE (Figure 17), il est possible d'extraire les puissances actives et réactives de l'alternateur. En plus, ce diagramme permet aussi de suivre la variation des puissances actives et réactives lorsqu'on modifie le courant d'excitation et le couple moteur de la turbine entraînant l'alternateur.

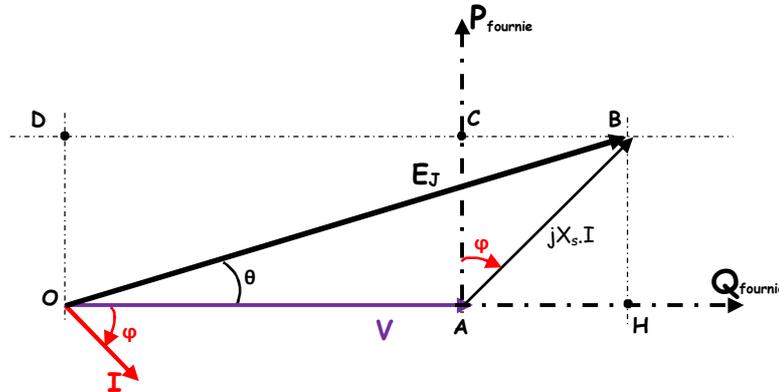


Figure 15

On sait que :

$$\begin{cases} P = 3VI \cos \varphi \\ Q = 3VI \sin \varphi \end{cases} \quad (27)$$

Le diagramme vectoriel de la figure 17 donne :

$$AC = X_s I \cos \varphi \quad \text{et} \quad AH = X_s I \sin \varphi \quad (28)$$

Donc, de (27) et (28) on obtient :

$$\boxed{\begin{cases} P = \frac{3V}{X_s} AC \\ Q = \frac{3V}{X_s} AH \end{cases}} \quad (29)$$

On remarque que :

- L'augmentation du courant d'excitation (J) fait agrandir la puissance réactive fournie par l'alternateur ( $\Rightarrow AH$  augmente) tout en gardant la puissance active constante ( $\Rightarrow AC$  reste constant).
- De même, la diminution du courant d'excitation fait réduire la puissance réactive fournie par l'alternateur, c'est-à-dire, le segment ( $\Rightarrow AH$  diminue) tout en gardant la puissance active constante ( $\Rightarrow AC$  reste toujours constant). On peut arriver à une situation où  $AH$  devient nul, ce qui correspond à  $Q = 0$ . Dans cette situation, l'alternateur fournit seulement de la puissance active.

- Si nous continuons à réduire le courant d'excitation, l'alternateur va absorber de la puissance réactive ( $\Rightarrow$  AH augmente dans le sens inverse)

La figure 17, montre aussi que :

$$AC = X_s I \cos \varphi = OD = E_J \sin \theta$$

$$\Rightarrow I \cos \varphi = \frac{E_J}{X_s} \sin \theta \quad (30)$$

En remplaçant (30) dans l'expression de la puissance active, on obtient l'expression de la puissance active débitée par l'alternateur:

$$\boxed{P = \frac{3VE_J}{X_s} \sin \theta} \quad (31)$$

On remarque que pour  $V$ ,  $E_J$  et  $X_s$  constantes, la puissance devient proportionnelle au  $\sin \theta$ . Avec  $\theta$  est l'angle de décalage interne entre la Fem à vide  $E_J$  et la tension aux bornes  $V$ .

Si on néglige les pertes Joule statoriques, obtient :  $P = P_e$

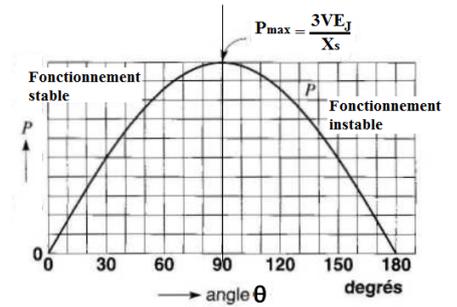


Figure 16

## II. Les Moteurs synchrones triphasés

### II.1. Définition

C'est un convertisseur d'énergie électrique en énergie mécanique en présence d'une excitation magnétique. Puisque l'alternateur est une machine réversible, si on l'alimente par des courants triphasés, il fonctionnera en moteur.

### II.2. Principe de fonctionnement

Le moteur synchrone triphasé est constitué d'un stator contenant un bobinage triphasé de  $2p$  pôles et un rotor portant la bobine d'excitation aussi de  $2p$  pôles.

Lorsqu'on excite le rotor, un champ magnétique fixe s'établit, puis, si on alimente le bobinage statorique par des courants triphasés de pulsation  $\omega_s$ , un champ tournant à la vitesse de synchronisme ( $\Omega_s = \omega_s/p$ ) se produit dans l'entrefer. Les pôles magnétiques du champ tournant **s'accrochent** avec les pôles magnétiques rotoriques et l'ensemble tournent à la même vitesse de synchronisme.

### II.3. Méthodes de démarrage

Lorsqu'on alimente un moteur synchrone, *il ne démarre pas parce que son couple de démarrage est nul*. Ceci représente son inconvénient principal. Le moteur synchrone ne peut développer un couple qu'au synchronisme.

Il existe trois méthodes pour démarrer un moteur synchrone :

- Emploi d'un moteur auxiliaire accouplé au moteur synchrone pour amener le rotor à une vitesse proche de synchronisme.
- On démarre le moteur synchrone en mode asynchrone. Le moteur est alimenté directement du réseau avec l'inducteur en court-circuit. Dans ce cas, le moteur synchrone se comporte comme un moteur asynchrone et il tourne grâce aux courants induits dans l'inducteur. Une fois le rotor atteint une vitesse proche du synchronisme, on ouvre le court-circuit de l'inducteur et on envoie le courant d'excitation, le moteur s'accroche.
- On utilise un variateur de fréquence pour alimenter le moteur avec une fréquence faible ce qui produit un champ tournant de faible vitesse permettant l'accrochage et puis, on augmente la fréquence jusqu'à 50 Hz.

## II.4. Bilan de puissance

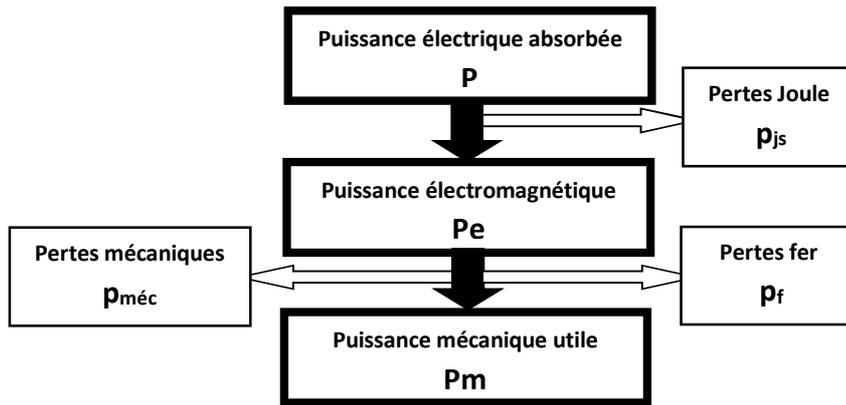


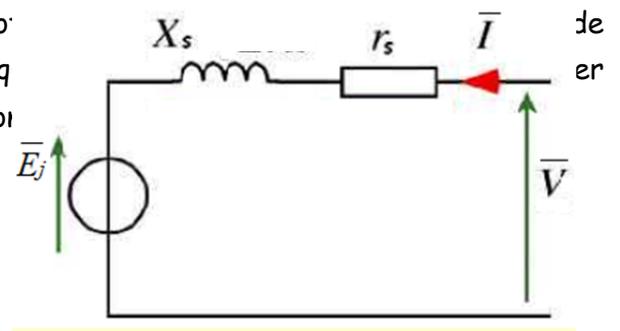
Figure 17

➤ La puissance absorbée est puissance électrique et elle est exprimée par :

$$P = 3V.I.\cos\varphi = Pe + p_{js} \quad (32)$$

## II.5. Modèle du moteur synchrone (Diagramme de Behn-Echenberg)

Comme pour les alternateurs, on peut étudier le mo B.E. La figure 20 représente le schéma électrique éq bien l'inversion du sens de courant : c'est la convention



(33)

$$\bar{E}_j = \bar{V} - r_s \bar{I} - jX_s \bar{I}$$

Pour faciliter l'étude, on néglige  $r_s$  devant  $X_s$ , donc le diagramme vectoriel correspondant est :

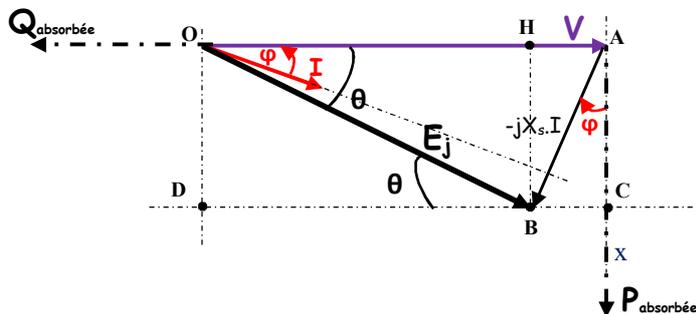


Figure 17

On remarque que :

- la variation du courant absorbé est traduite par la variation de  $\overline{BA} = X_s \bar{I}$  puisque la réactance synchrone est constante.
- La variation de  $\cos\varphi$  est traduite par la variation de l'angle  $B\hat{A}C$

Cela revient à adopter pour origine de phase la demi-droite  $Ax$ , et pour origine de tension la droite  $OA$ . C'est pour cela qu'on le désigne par : **Le Diagramme Bipolaire**

## II.6. Expression du couple électromagnétique

Puisque  $r_s \ll X_s$ , on peut négliger  $r_s$  et par conséquent les pertes Joule statoriques. Dans ce cas, on peut écrire :

$$P = 3V.I.\cos\varphi \approx Pe \quad (34)$$

Selon la figure 21, on a :

$$X_s.I.\cos\varphi = AC = OD = E_J.\sin\theta \quad (35)$$

$$\Rightarrow Pe = \frac{3V.E_J}{X_s}.\sin\theta \quad (36)$$

Par conséquent, le couple électromagnétique est donné par :

$$\boxed{Ce = \frac{Pe}{\Omega_s} = \frac{3V.E_J}{X_s.\Omega_s}.\sin\theta} \quad (37)$$

*On constate que pour une excitation constante, le couple max est obtenu pour  $\theta=90^\circ$ . Au-delà de cette valeur, le fonctionnement devient fortement instable et le moteur se décroche.*

Physiquement, l'angle  $\theta$  correspond à un décalage réel traduit par un angle mécanique  $\alpha$ .

$$\text{avec : } \alpha = \frac{\theta}{p}$$

Comme pour l'alternateur, les expressions des puissances active et réactive sont données par :

$$\begin{cases} P = \frac{3V}{X_s} AC \\ Q = \frac{3V}{X_s} AH \end{cases} \quad (38)$$

## II.7. Effet du courant d'excitation sur un fonctionnement à puissance constante (courbes en « V » de Mordey)

Lorsque le moteur synchrone est alimenté sous une tension  $V$  constante et entraîne une charge mécanique constante (couple résistant constant), il absorbe une puissance électrique active constante ( $P$ ). Dans ces conditions et selon la figure 21, on a :

$AC = E_j \cdot \sin \theta = \frac{X_s \cdot P}{3V}$ , cette longueur (qui définit la puissance active) reste constante quand le courant d'excitation varie.

Lorsqu'on fait varier le courant d'excitation, on remarque une variation dans l'amplitude du courant d'alimentation ( $I$ ). Plus précisément, c'est la composante réactive du courant d'alimentation ( $I \cdot \sin \varphi$ ) qui se change ; ceci est traduit par une variation sur la distance  $AH$  qui définit la puissance réactive. Par contre, la composante active ( $I \cdot \cos \varphi$ ) reste constante puisqu'elle dépend de la puissance mécanique qui est constante pour ce fonctionnement. En effet, la distance  $AC$  qui définit la puissance active reste inchangée.

On peut distinguer trois cas :

- **Moteur sous excité** : dans ce cas, le courant d'alimentation ( $I$ ) est en retard sur la tension d'alimentation ( $V$ ). Sa composante réactive ( $I \cdot \sin \varphi$ ) est positive, donc le moteur consomme de la réactive de réseau (le moteur toujours absorbe une puissance active constante).
  - On peut dire que le réseau voit le moteur comme une charge inductive (RL).
  - La diminution du courant d'excitation provoque une augmentation dans la composante réactive et par conséquent dans le déphasage  $\varphi$  en arrière, ce qui rend le moteur plus inductif et consomme plus de réactive.
  - Si on continue la diminution du courant d'excitation, le fonctionnement devient instable car l'angle  $\theta$  augmente et se rapproche à  $90^\circ$ . (risque de décrochage).

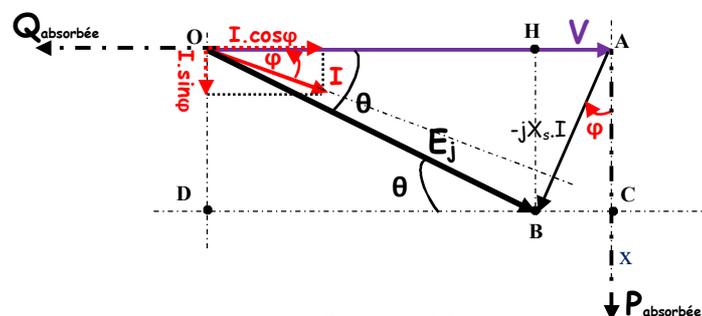


Figure 18

- **Moteur sur-excité** : dans ce cas, le courant d'alimentation est en avance sur la tension. La composante active du courant reste toujours positive et constante donc, le moteur absorbe de la puissance active. Par contre, la composante réactive est maintenant négative. Cela signifie que le moteur fournit de la puissance réactive au réseau.
  - On peut dire que le réseau voit le moteur comme une charge capacitive (RC).
  - L'augmentation du courant d'excitation provoque un accroissement dans la composante réactive du courant et par conséquent dans le déphasage  $\varphi$  en avance, ce qui rend le moteur plus capacitive et fournit plus de réactive. On peut dire qu'il joue le rôle d'un **compensateur synchrone**.

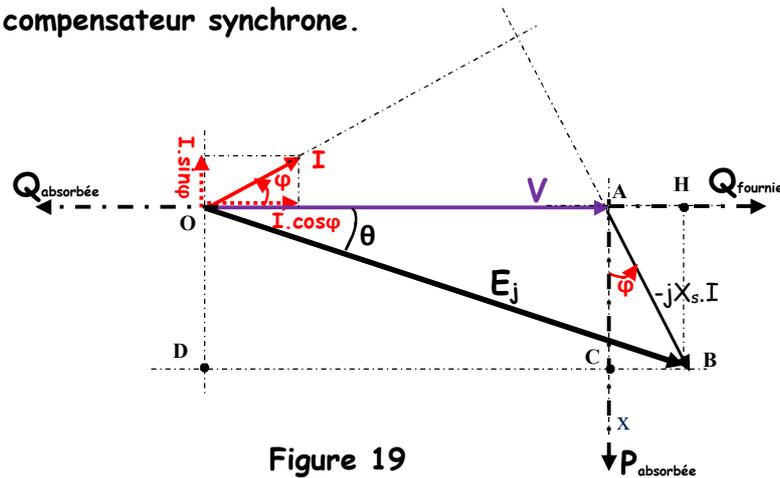


Figure 19

**Remarque** : un compensateur synchrone est un moteur synchrone tournant à vide et destiné à fournir de la puissance réactive. On règle la puissance réactive à la valeur désirée en modifiant le courant d'excitation.

Placés près des grands centres de distribution, ils jouent le rôle de capacités variables. Durant les périodes de forte charge, les compensateurs synchrones créent de la réactive pour diminuer les courants et ainsi les chute de tension dans les lignes et par conséquent améliorer le facteur de puissance.

- **Moteur à  $\cos\varphi$  unitaire** : dans ce cas, le courant d'excitation est en phase avec la tension. La composante active du courant reste toujours positive et constante donc, le moteur absorbe de la puissance active. Par contre, la composante réactive est maintenant nulle, c'est-à-dire, le moteur synchrone ne consomme pas de réactive.
  - On peut dire que le réseau voit le moteur comme une charge résistive (R).

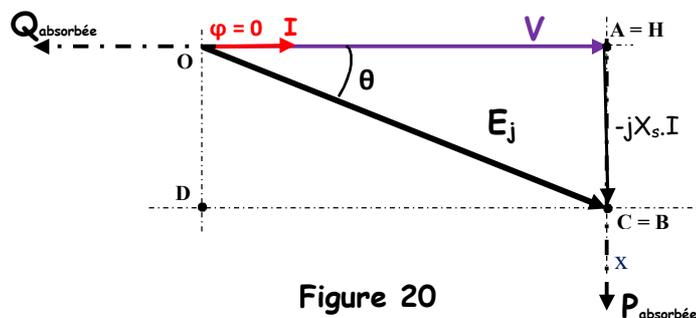


Figure 20

Les courbes représentant la variation du courant d'alimentation (I) en fonction du courant d'excitation (J) ont l'allure de « V » et ont été étudiées par Mordey.

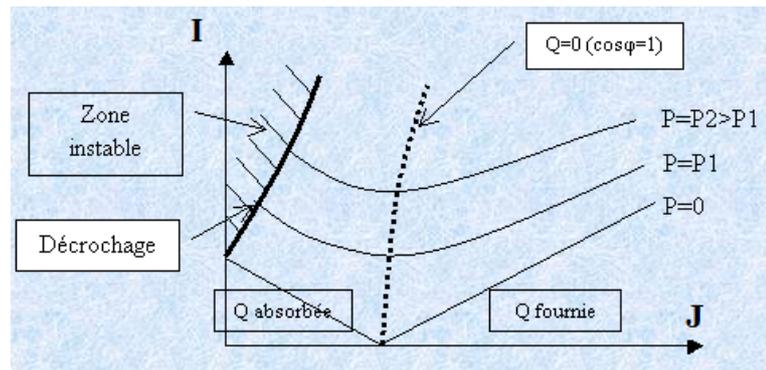


Figure 21

### III. Couplage des alternateurs au réseau

Pour brancher un alternateur sur le réseau ou le coupler avec un autre alternateur, il faut respecter les conditions suivantes:

- les tensions de l'alternateur doivent être égales à celles du réseau ;
- la fréquence de l'alternateur doit être la même que celle du réseau ;
- les tensions de l'alternateur doivent être en phase avec celles du réseau ;
- la séquence des phases de l'alternateur (ordre de phases) doit être la même que celle du réseau.

On peut coupler un alternateur avec un réseau triphasé en utilisant trois lampes à ou un synchronoscope. Le montage est donné sur la Figure 26.

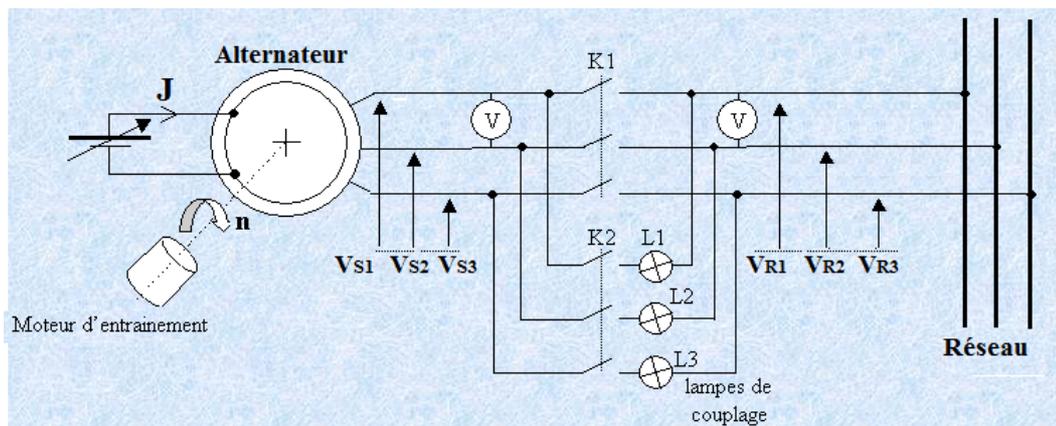


Figure 22

#### III.1. Procédure de couplage

1. On ferme K2 : les lampes s'allument
2. On lance le moteur d'entraînement (ou la turbine) jusqu'à la vitesse de synchronisme ( $n = n_s = f/p$ ). cela signifie que les fréquences côté alternateur et réseau sont très proches.
3. On augmente le courant d'excitation (J) jusqu'à ce que les valeurs efficaces des tensions statoriques et celles du réseau soient égales :  $V_{s1} = V_{r1}$  ,  $V_{s2} = V_{r2}$  ,  $V_{s3} = V_{r3}$   
On remarque que Les lampes clignotent à un rythme correspondant à la différence entre les deux fréquences. Par exemple, si la fréquence de l'alternateur est de 50,1 Hz et celle du réseau est de 50 Hz, la fréquence du battement est de :  $50,1 - 50 = 0,1$  Hz. Alors, les lampes s'éteindront toute les 10 secondes.  
Les extinctions des lampes doivent être complètes si non, il faut ajuster l'excitation de l'alternateur.
4. Lorsque la séquence des phases de l'alternateur n'est pas la même que celle du réseau, le battement existe toujours, mais au lieu de s'éteindre simultanément, les lampes s'éteignent à tour de rôle. Dans ces conditions, il est essentiel d'inverser deux des phases de l'alternateur.
5. Les cycles d'allumage -extinction des lampes doivent être très lents, si non, il faut régler la vitesse de l'alternateur.
6. Fermer K1 au moment où les lampes sont éteintes. C'est en effet à ce moment précis que les tensions du réseau et de l'alternateur sont parfaitement en phase.

### III.2. Alternateur branché sur un réseau infini

Les alternateurs sont souvent branchés à un grand réseau comportant déjà plusieurs centaines d'alternateurs. Ce réseau est tellement puissant qu'il impose une tension et une fréquence constantes à tout appareil branché à ses bornes. C'est pourquoi on l'appelle **réseau infini**.

Une fois l'alternateur est couplé à un grand réseau (réseau infini), il fait partie d'un système qui alimentent des milliers de charges. Il est alors impossible de préciser la nature de la charge (grosse ou petite, résistive, inductive ou capacitive) branchée aux bornes de cet alternateur.

La question qui se pose donc est : *Quels sont les paramètres qui déterminent la puissance qu'il débite dans ces conditions?*

Il a noté que la tension et la fréquence appliquées aux bornes de la machine étant constantes, on ne peut plus faire varier que deux paramètres :

- Le courant d'excitation
- Le couple mécanique exercé par la turbine

#### a) Effet du courant d'excitation

Lorsqu'on synchronise un alternateur, la tension induite  $E_J$  est égale et en phase avec la tension  $V$  du réseau (Fig.27). Il n'existe donc aucune différence de potentiel aux bornes de la réactance synchrone. Par conséquent, le courant  $I$  est nul et, bien que l'alternateur soit raccordé au réseau, il n'y débite aucune puissance. On dit alors qu'il «*flotte*» sur le réseau.

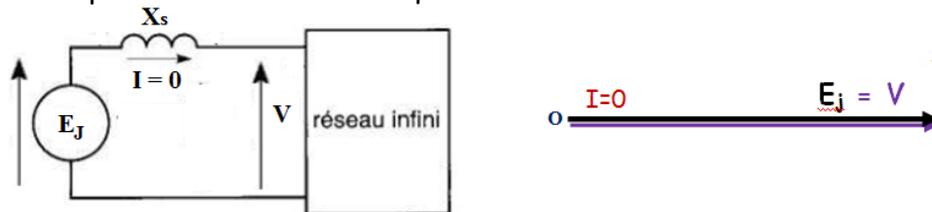


Figure 23

Si l'on augmente le courant d'excitation, la tension  $E_J$  augmente et la réactance  $X_s$  est soumise à une tension  $E_{X_s} = (E_J - V)$ . Par conséquent, un courant  $I = (E_J - V)/X_s$  s'établit dans le circuit et, puisque la réactance synchrone est inductive, ce courant est déphasé de  $90^\circ$  en arrière de  $E_{X_s}$  (Fig. 28). *L'alternateur voit donc le réseau comme une inductance pure.*



Figure 24

On peut comprendre que lorsqu'on surexcite de l'alternateur, la puissance réactive augmente. Une partie de cette puissance sera utilisée pour la magnétisation de circuit magnétique de l'alternateur et le reste sera fournie au réseau.

La puissance réactive fournie est d'autant plus grande que le courant d'excitation est plus élevé ; au même temps, la tension aux bornes et la fréquence restent constantes puisqu'elles sont imposées par le réseau (Fig. 28).

Contrairement à ce qu'on pourrait penser, il est impossible de changer la puissance active débitée par un alternateur en agissant sur son excitation.

Maintenant, si l'on diminue le courant d'excitation, la fem  $E_J$  devient plus petite que  $V$ , le courant  $I$  devient de  $90^\circ$  en avance sur  $V$  de sorte que l'alternateur voit le réseau comme une **capacitance** (Fig. 29).

Donc, lorsque l'on sous-excite l'alternateur, il absorbe de la puissance réactive. Cette puissance réactive produit une partie du champ magnétique nécessaire à la magnétisation machine.

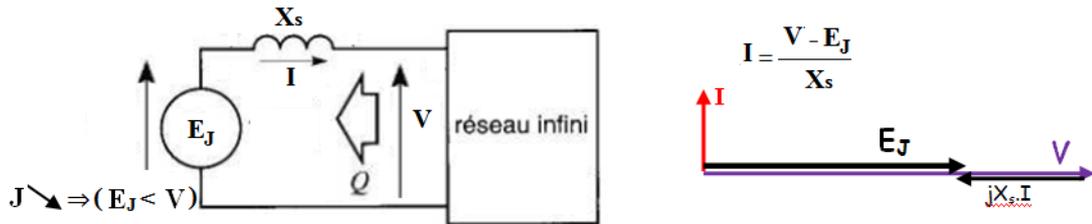


Figure 25

### b) Effet du couple mécanique

Imaginons de nouveau que l'alternateur flotte sur le réseau,  $E_J$  et  $V$  étant égales et en phase. Si l'on ouvre les vannes de la turbine afin d'augmenter le couple mécanique, le rotor tend à accélérer mais il ne peut pas car, il est accroché par le champ statorique. Par conséquent, l'alternateur continue à tourner à la vitesse de synchronisme, mais il apparait un angle de décalage interne  $\theta$  entre les axes des champs statorique et rotorique.

Sur le diagramme vectoriel (Fig. 30), ce phénomène se traduit par un **décalage en avance** du vecteur  $E_J$  par rapport au vecteur  $V$ , d'un angle de décalage interne  $\theta$ .

Bien que les deux tensions aient la même valeur, l'angle de décalage produit une différence de tension aux bornes de la réactance synchrone (Fig. 30). Il en résulte un courant  $I$  décalé en avance par rapport à  $V$ . Cela signifie que l'alternateur débite une puissance active et absorbe du réactive du réseau (ce réactive absorbé est nécessaire pour convertir la puissance mécanique à celle électrique).

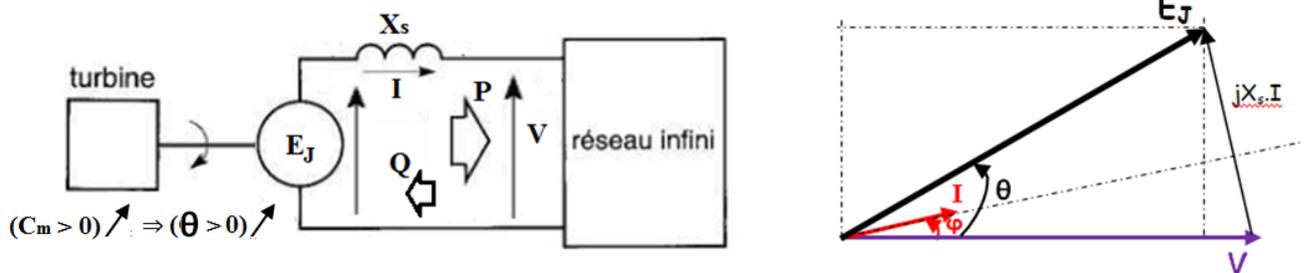


Figure 26

Maintenant, revenons de nouveau à l'état où l'alternateur flotte sur le réseau,  $E_J$  et  $V$  étant égales et en phase et le courant  $I$  est nul. Si on diminue le couple mécanique exercé sur l'arbre, l'alternateur entre dans le mode de fonctionnement moteur.

Sur le diagramme vectoriel (Fig. 31), ce phénomène se traduit par un **décalage en retard** du vecteur  $E_J$  par rapport au vecteur  $V$ , d'un angle de décalage interne  $\theta$ .

Bien que les deux tensions aient la même valeur, l'angle de décalage produit une différence de tension aux bornes de la réactance synchrone (Fig. 31). Il en résulte un courant  $I$  inverse (convention moteur) décalé en arrière par rapport à  $V$ . Cela signifie que le moteur synchrone absorbe de la puissance active et réactive du réseau.

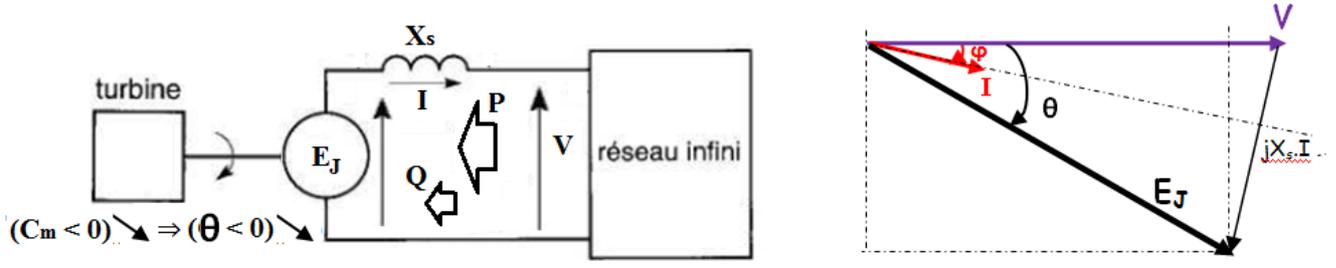


Figure 27