

Cours sur les Machines Synchrones Triphasées

I. Les alternateurs triphasés

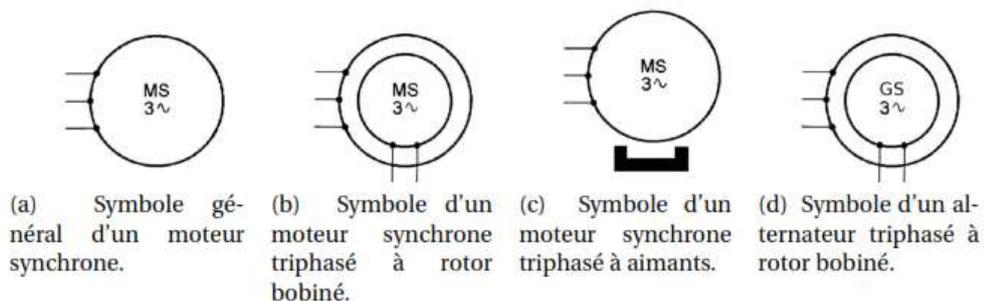
1. Constitution et principe de fonctionnement

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° .

Figure 1 : Stator d'une machine synchrone triphasée



1.2. Le rotor

C'est la partie tournante. Il représente l'inducteur puisque 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.

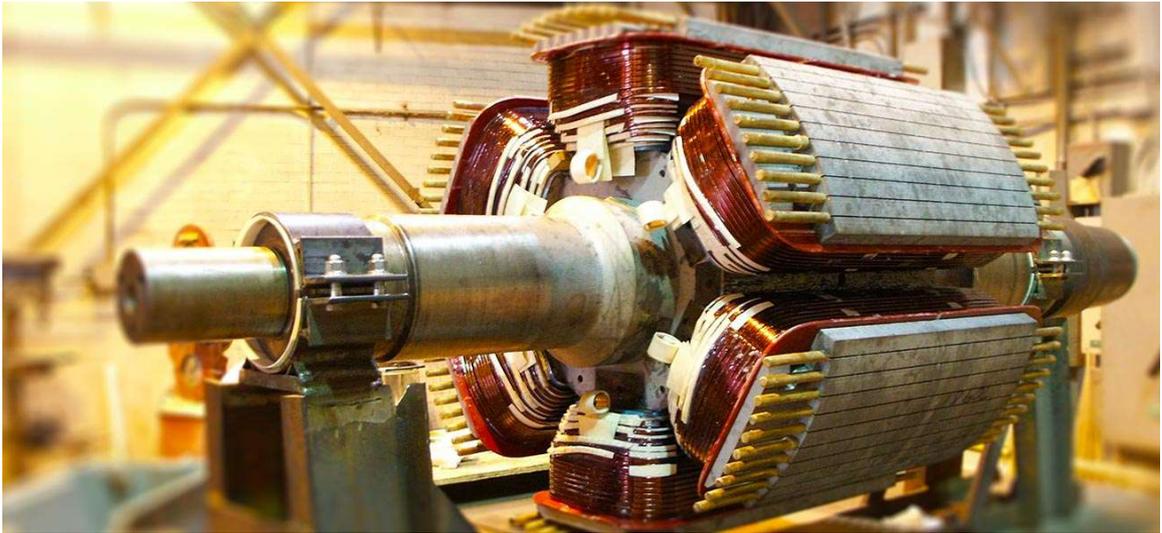


Figure 3 : rotor à pôles saillants

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.

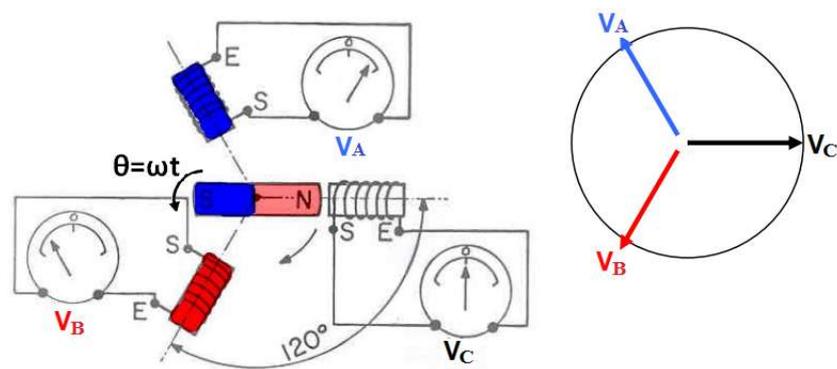


Figure 4 : champ tournant généré mécaniquement

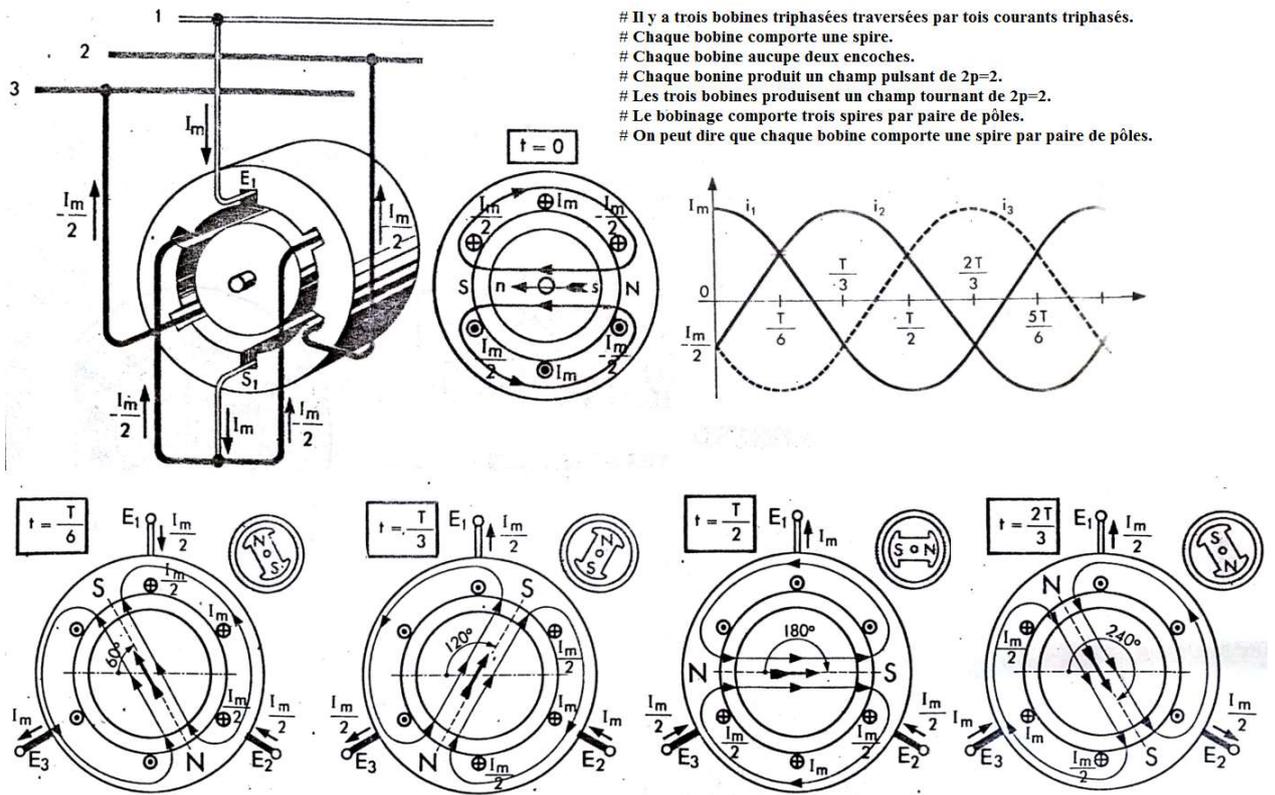


Figure 5 : Champ tournant généré électriquement

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.

$$f = \frac{p \cdot N}{60} \tag{1}$$

$$\omega_s = p \cdot \Omega = p \cdot \frac{2\pi N}{60} \tag{2}$$

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; Ω en (rad/s) est la vitesse angulaire mécanique de rotation du champ tournant.

Nombre de paires de pôles (P)	Vitesse de synchronisme nécessaire pour avoir une fréquence de 50 Hz en tr/min	Vitesse de synchronisme nécessaire pour avoir une fréquence de 60 Hz en tr/min
1	3000	3600
2	1500	1800
3	1000	1200
4	750	900
5	600	720
6	500	600
7	428.6	514
8	375	450

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 : $\theta = \omega_s \cdot t$

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

Avec :

- n est nombre de spires d'une phase statorique
- $Z = 2 \cdot n$ est le nombre des conducteurs actifs par phase.
- Φ_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:

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

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

$$\Rightarrow \begin{cases} E_{eff} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} \cdot n \cdot f \cdot \Phi_M = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} \cdot n \cdot \frac{p \cdot N}{60} \cdot \Phi_M = \frac{\pi}{\sqrt{2}} \cdot Z \cdot \frac{p \cdot N}{60} \cdot \Phi_M \\ E_{eff} = 4.44 \cdot n \cdot f \cdot \Phi_M \\ E_{eff} = 2.22 \cdot Z \cdot f \cdot \Phi_M \end{cases} \quad (6)$$

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 (K), on obtient la valeur efficace réelle de la fem comme suit :

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

Selon la répartition du bobinage sur les encoches, les valeurs du coefficient de Kapp appartiennent à l'intervalle suivante : $K \in [1.41, 2.60]$. Souvent, sa valeur exacte est donnée par le constructeur.

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.

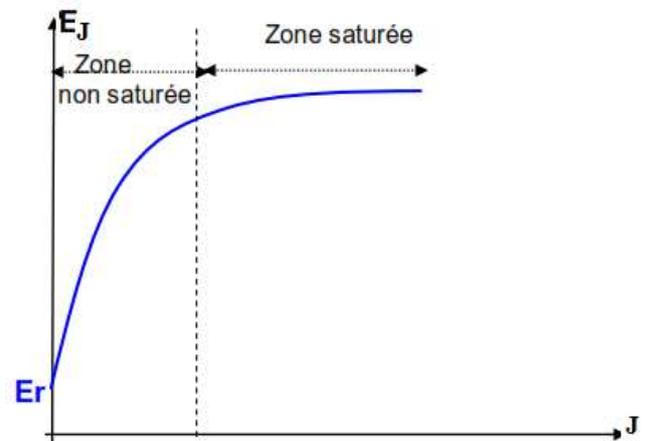


Figure 6

$$E_J = k \cdot \Phi = k' \cdot J \quad (8)$$

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

$$\frac{E_{J1}}{E_{J2}} = \frac{N_1}{N_2} \quad (9)$$

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 ΔV .

$$\Delta V = |E_J| - |V| \quad (10)$$

Avec : E_J : la tension à vide d'une phase statorique et V : la tension en charge d'une phase statorique.

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.

La chute de tension peut être déterminée directement par la relation (10) ou à partir des méthodes théoriques. Il existe trois:

- 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. MODELE DE BEHN-ESCHENBURG (B.E.)

Il est appelé aussi le modèle à une seule réactance ou le diagramme à réactance constante. 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 7.

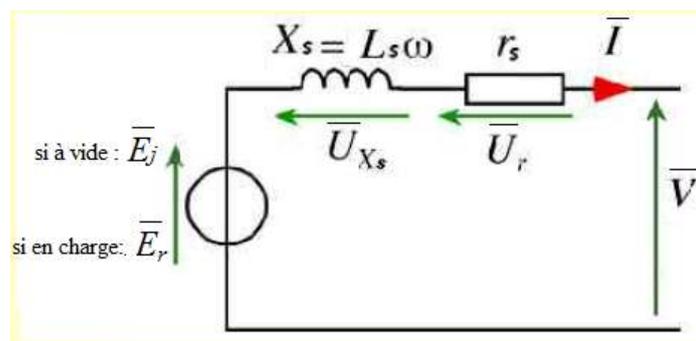


Figure 7

Lorsque l'alternateur est en charge, les courants triphasés circulant dans les enroulements statoriques engendrent un autre champ tournant qui modifie l'état magnétique de l'entrefer. Cette modification influe sur la valeur efficace des f.é.m. apparaissant aux bornes des enroulements du stator (c'est la réaction magnétique de l'induit). Par conséquent, la f.é.m. résultante à travers une phase statorique est égale à :

$$\boxed{\bar{E}_r = \bar{E}_J + \bar{E}_I} \quad (11)$$

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.

La fem \bar{E}_I prend naissance seulement 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 (RMI). On peut écrire : $\bar{E}_r = \bar{E}_J - jL.\omega.\bar{I}$

Selon la figure 7, la loi des mailles donne l'expression de la fem résultante en charge :

$$\bar{E}_r = \bar{V} + r_s.\bar{I} + j l_s.\omega.\bar{I} \quad (12)$$

A partir des équations (11) et (12), on peut trouver la fem à vide :

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

$$\Leftrightarrow \boxed{\bar{E}_J = \bar{V} + r_s.\bar{I} + jX_s.\bar{I}} \quad (13)$$

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 8.

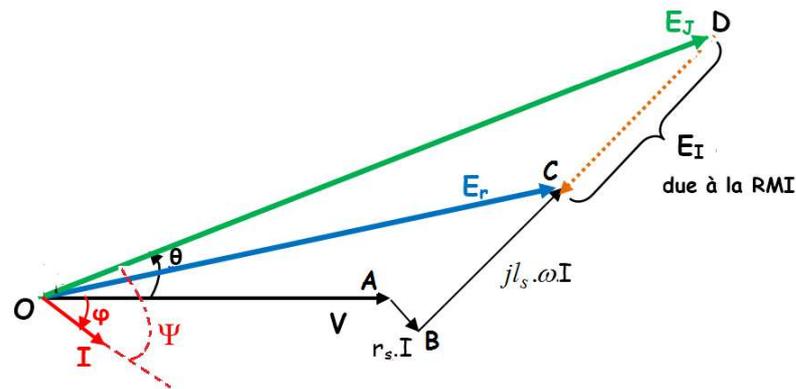


Figure 8

- θ est appelée angle de décalage interne ou angle de charge. C'est un angle électrique, on peut écrire : $\theta = p.\theta_m$ avec θ_m représente l'angle mécanique.
- Ψ c'est le déphasage du courant I dans une phase statorique par rapport à la fem à vide E_j .

4.1. 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.

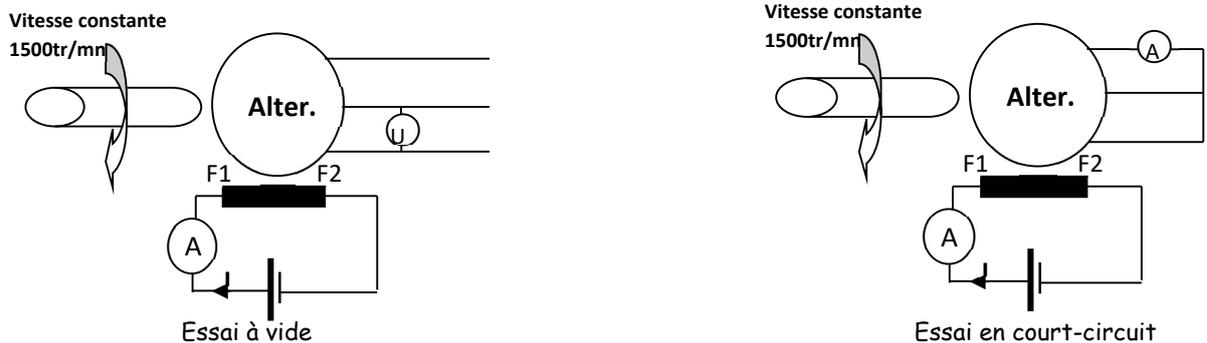


Figure 9

On trace les courbes des deux essais dans le même graphe (Figure 10).

Lors de l'essai en court-circuit, on a : $V = 0$, par conséquent, l'équation (13) de Behn-Eschenburg peut être écrite sous la forme suivante :

$$\bar{E}_j = r_s \cdot \bar{I}_{cc} + jX_s \bar{I}_{cc} = \bar{Z}_s \cdot \bar{I}_{cc} \quad (14)$$

$$\Rightarrow \boxed{Z_s = \frac{E_j}{I_{cc}} = \frac{MP}{MN}} \quad (15)$$

$$\Rightarrow X_s = \sqrt{Z_s^2 - r_s^2} \approx Z_s \quad (16)$$

Remarque 1: pour faciliter l'étude des machines synchrones, on néglige généralement la résistance statorique

Remarque 2: 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 3: 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.

Remarque 4: la réactance synchrone peut être exprimée en % de l'impédance de base Z_B ou en unité relative « p.u. ».

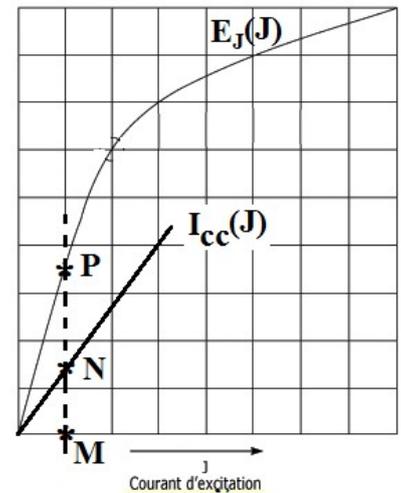


Figure 10

$$X_s (p.u.) = \frac{X_s}{Z_B} = X_s \cdot \frac{I_n}{V_n} \quad (16)$$

4.2. Diagramme de BE pour différents types de 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 $\cos\phi$

a. charge purement résistive

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

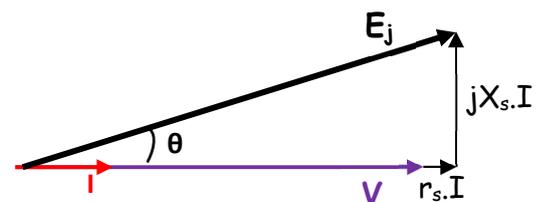


Figure 11

b. charge inductive

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 ($\cos\phi$ est plus petit). On doit surexciter l'alternateur pour maintenir la tension V constante. Ce qui donne $E_j > V$.

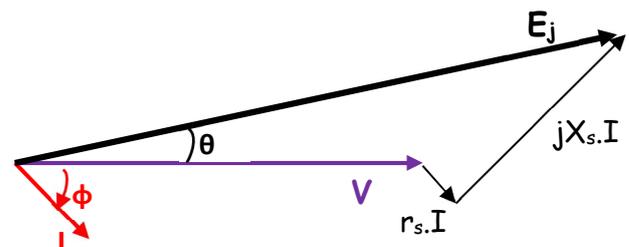


Figure 12

c. charge capacitive

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 $E_J < V$.

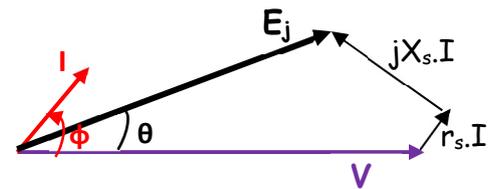


Figure 13

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

- Pour $\cos\phi=1$, V décroît quand I augmente. Cette décroissance est plus forte si la charge est inductive ($\cos\phi$ en AR).
- Si le charge est capacitive ($\cos\phi$ 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

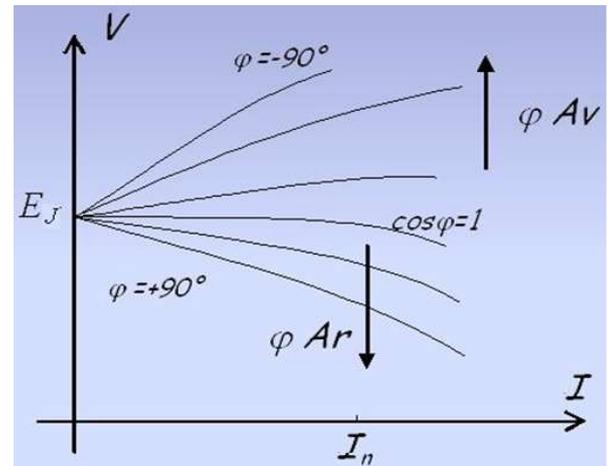


Figure 14

4.3. Caractéristique de réglage $J(I)$

Généralement, un alternateur doit fonctionner à tension constante même si la charge est variable. Pour maintenir cette tension stable, il faut agir sur J afin de compenser ΔV . Cette procédure est appelée « Régulation » ou en Anglais « Voltage Regulation (VR) ». Elle est définie par :

$$VR = \frac{E_J - V_n}{V_n} \times 100 \quad (17)$$

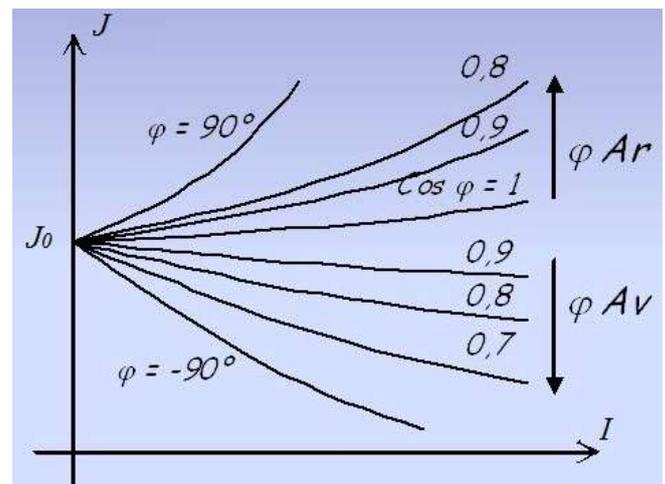


Figure 15

- La figure 15 montre que plus la charge est inductive, plus on doit augmenter J pour compenser la chute de tension. Donc, l'alternateur a une Régulation positive.
- Au contraire, plus la charge est capacitive plus on doit diminuer J pour éviter l'augmentation de V . Dans ce cas, l'alternateur a une Régulation négative.

5. BILAN DE PUISSANCE ET RENDEMENT

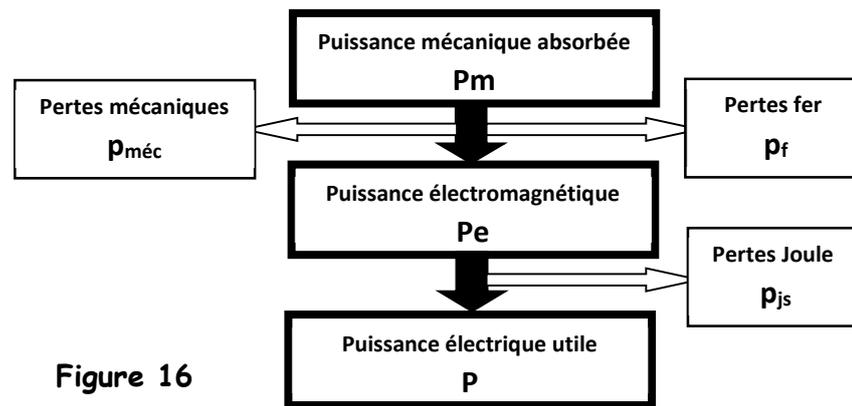


Figure 16

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 :

$$\begin{cases} P = 3V.I.\cos\varphi \\ Q = 3V.I.\sin\varphi \end{cases} \quad (18)$$

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

- Les puissances électromagnétiques active et réactive sont exprimées par :

$$\begin{cases} Pe = 3E_J.I.\cos\psi \\ Qe = 3E_J.I.\sin\psi \end{cases} \quad (19)$$

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

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

$$p_{Js} = 3r_s I^2 = Pe - P \quad (20)$$

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

$$Qe - Q = 3X_s I^2 \quad (21)$$

- La puissance mécanique absorbée par l'alternateur est :

$$Pm = C_m \cdot \Omega_s \quad (22)$$

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

Ω_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) :

$$p_{coll} = p_{mec} + p_f = Pm - Pe \quad (23)$$

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

$$C_m = C_e + C_{pertes} = \frac{Pm}{\Omega_s} = \frac{Pe}{\Omega_s} + \frac{(p_{mec} + p_f)}{\Omega_s} \quad (24)$$

Le rendement est exprimé par :

$$\eta = \frac{Pu}{Pa} = \frac{P}{Pm + P_{a.ex}} = \frac{P}{P + P_{a.ex} + \sum \text{pertes}} = \frac{3VI \cos\varphi}{3VI \cos\varphi + P_{a.ex} + p_{js} + p_f + p_m} \quad (25)$$

Avec $P_{a.ex}$ est la puissance nécessaire pour l'excitation

6. DETERMINATION GEOMETRIQUE DES PUISSANCES ACTIVE ET REACTIVE

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.

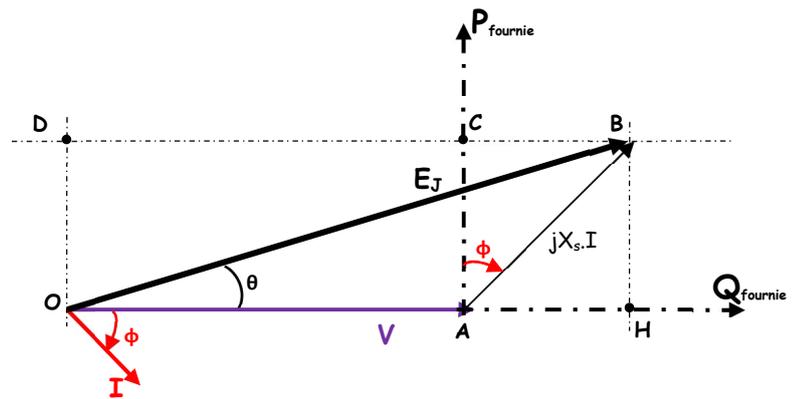


Figure 17

On sait que :

$$\begin{cases} P = 3VI \cos \varphi \\ Q = 3VI \sin \varphi \end{cases} \quad (26)$$

Le diagramme vectoriel de la figure 17 donne :

$$AC = X_s I \cos \varphi \quad \text{et} \quad AH = X_s I \sin \varphi \quad (27)$$

Donc, de (26) et (27) on obtient :

$$\boxed{\begin{cases} P = \frac{3V}{X_s} AC \\ Q = \frac{3V}{X_s} AH \end{cases}} \quad (28)$$

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 :

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

$$\Rightarrow I \cos \varphi = \frac{E_J}{X_s} \sin \theta \quad (29)$$

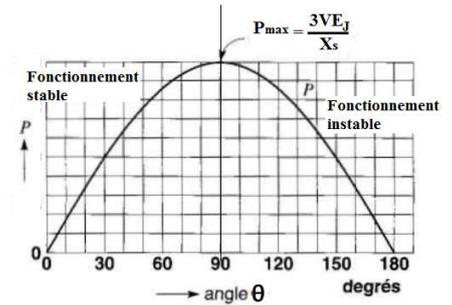


Figure 18

En remplaçant (29) dans l'expression de la puissance active, on obtient l'expression de la puissance active débitée par l'alternateur :

$$P = \frac{3VE_J}{X_s} \sin \theta \quad (30)$$

On remarque que pour V , E_J et X_s constantes, la puissance devient proportionnelle au $\sin \theta$. Avec θ 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 : $P = P_e$

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 ω_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 envoi 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

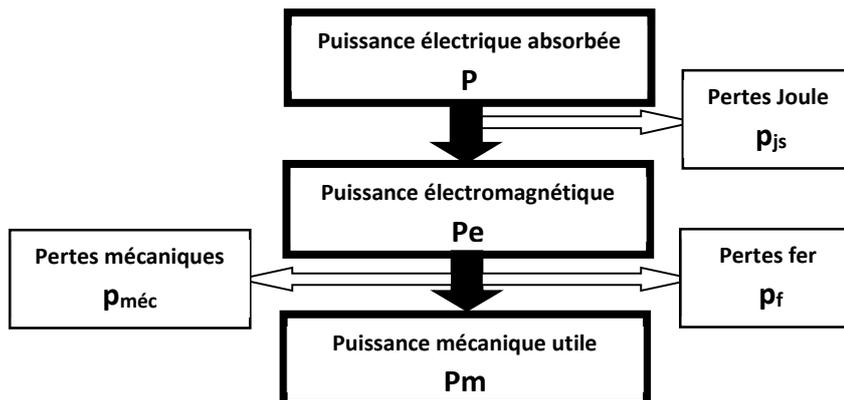


Figure 19

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

$$P = 3V.I.\cos\varphi = Pe + p_{js} \tag{31}$$

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

Comme pour les alternateurs, on peut étudier le moteur synchrone en utilisant le diagramme de B.E. La figure 31 représente le schéma électrique équivalent d'une phase statorique. Notez bien que l'inversion du sens du courant : c'est la convention moteur. On peut écrire alors :

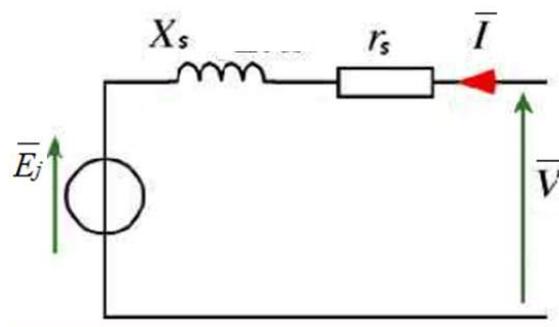


Figure 20

$$\boxed{\vec{E}_j = \vec{V} - r_s \cdot \vec{I} - jX_s \vec{I}} \tag{32}$$

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

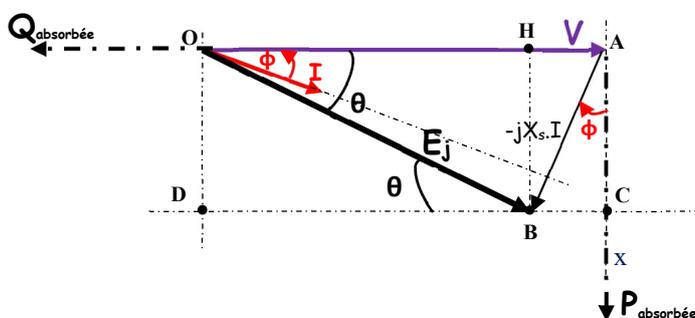


Figure 21

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 $\cos\phi$ 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 :

$$P = 3V.I.\cos\phi \approx Pe \quad (33)$$

Selon la figure 21, on a :

$$X_s.I.\cos\phi = AC = OD = E_J.\sin\theta \quad (34)$$

$$\Rightarrow Pe = \frac{3V.E_J}{X_s}.\sin\theta \quad (35)$$

Par conséquent, le couple électromagnétique est donné par :

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

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 θ correspond à un décalage réel traduit par un angle mécanique α .

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

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

$$\begin{cases} P = \frac{3V}{X_s} AC \\ Q = \frac{3V}{X_s} AH \end{cases} \quad (37)$$

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 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 inchangé.

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 du 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 φ 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 θ augmente et se rapproche à 90° . (risque de décrochage).

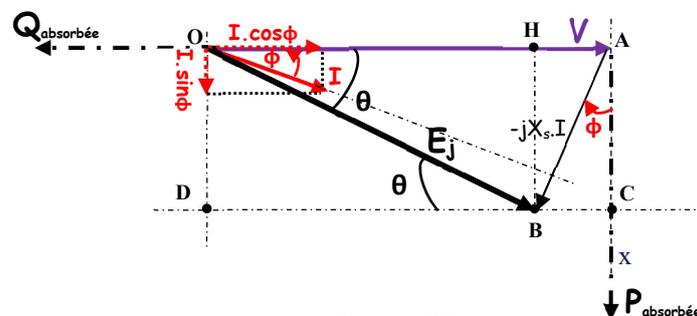


Figure 22

- **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 ϕ 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**.

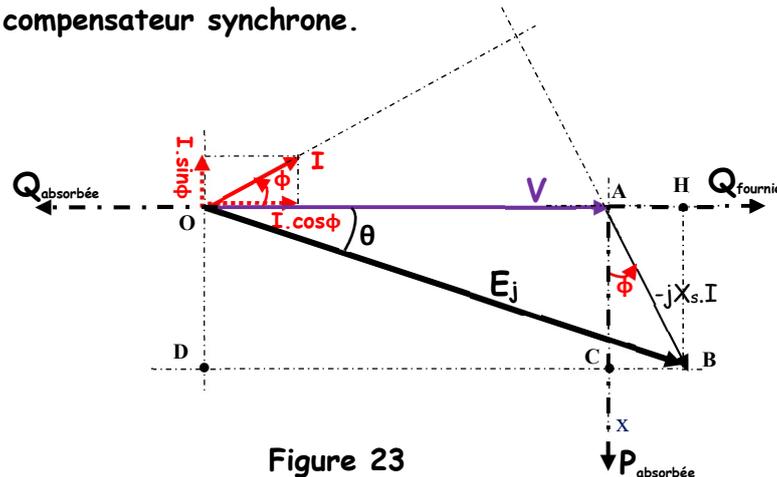


Figure 23

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'alimentation 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).

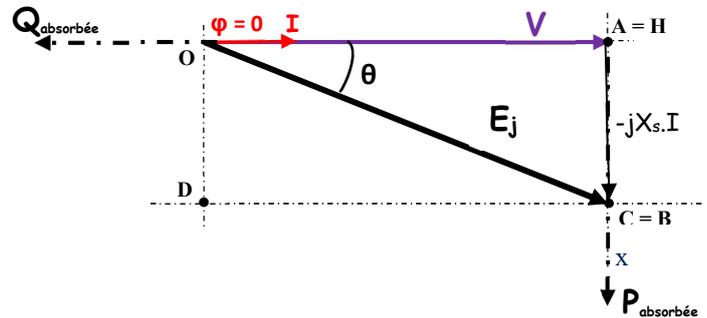


Figure 24

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.

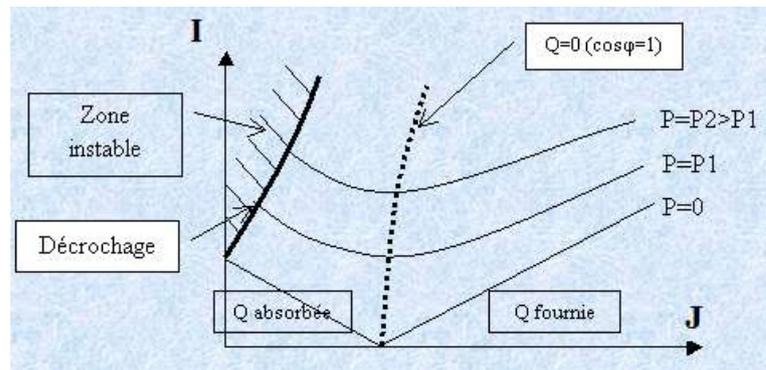


Figure 25