

Fiche descriptive de la leçon

| | |
|---|--|
| L'intitulé de la leçon | <i>Machines synchrones</i> |
| Le résumé de la leçon | <p>Cette leçon vise l'étude des machines synchrones et leurs applications industrielles en tant qu'alternateurs et moteurs.</p> <p>La constitution industrielle de ces machines est détaillée avec une classification selon le modèle du rotor.</p> <p>Le fonctionnement en alternateur isolé ou couplé sur le réseau est ensuite détaillé.</p> <p>Les schémas équivalents établis permettent, selon leur complexité, de tenir compte de la saturation (modèle de Potier), de la saillance du rotor (modèle de Blondel) ou de négliger ces deux effets (modèle de la réactance synchrone appelé modèle de Bhen Eschunburg).</p> <p>Ce dernier modèle, le plus utilisé en pratique, a été exploité pour établir les caractéristiques essentielles de l'alternateur : couple électromagnétique, puissances mises en jeu et stabilité....</p> <p>La réversibilité de cette machine est montrée par l'analyse de son fonctionnement moteur.</p> <p>Les performances et les contraintes du moteur synchrone sont discutées à travers sa caractéristique mécanique, le réglage de son facteur de puissance, son démarrage et sa stabilité.</p> <p>Le fonctionnement à fréquence variable est aussi discuté avec ou sans défluxage.</p> <p>Les techniques liées à l'excitation des machines synchrones et leur refroidissement sont détaillées à la fin de ce chapitre.</p> |
| La durée estimée du travail | 6 séances |
| La date de la dernière mise à jour | Novembre 2010 |
| Les pré-requis nécessaires | Circuits électriques triphasés- Introduction à la conversion électromécaniques- les champs tournants. |
| Les objectifs | <p>Suite à ce chapitre, l'étudiant doit :</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ Pouvoir décrire la constitution et la classification des machines synchrones ➤ Donner les applications industrielles de ces machines ➤ Pouvoir établir les différents modèles (schémas équivalents) ➤ Retrouver les caractéristiques de fonctionnement en alternateur en utilisant surtout le modèle de la réactance synchrone. ➤ Etablir les caractéristiques de fonctionnement du moteur synchrone (couple, puissance, stabilité.. .) ➤ Proposer des méthodes pour le démarrage de ce moteur ➤ Donner des montages pour le fonctionnement à |

| | |
|---|--|
| | vitesse variable ➤ Rendre compte des différents modes d'excitation des machines synchrones ➤ Présenter leur mode de refroidissement. |
| Les conseils généraux des méthodes d'apprentissage | |

Activités d'apprentissage :

Q1 :

Donner une classification des machines synchrones selon leurs applications industrielles.

R1 :

Les applications industrielles des machines synchrones sont :

1. Alternateurs équipant des centrales thermiques, hydrauliques, éoliennes ou des alimentations de secours ou des alimentations embarquées (dans les navires et les avions).
2. Moteurs de grandes puissances équipant des locomotives, des navires et des entraînements à vitesse variable ou non.
3. Ces machines peuvent être utilisées comme compensateur synchrone (fournir du réactif au réseau).
4. En faibles puissances, elles sont autopilotées dans des entraînements à vitesses variables.

Q2 :

Donner une classification des machines synchrones selon leurs types de rotor.

R2 :

Principalement on rencontre des rotors :

- En grandes puissances :
 1. A pôles lisses utilisés surtout dans les turbo alternateurs avec un nombre de pôles réduit ($p = 1$ ou 2).
 2. A pôles saillants dans les alternateurs relativement lents ($p \geq 2$) et équipant les centrales hydrauliques, les éoliennes....
- En petites puissances, ils peuvent être à pôles lisses ou saillants.

Dans les différents cas, la roue polaire (rotor) est constituée d'électro-aimants (turbo-alternateurs) ou des aimants permanents (éoliennes, moteurs de faibles puissances).

Q3 :

Expliquer l'origine des différents champs tournants dans un alternateur triphasé en charge et donner le décalage entre leur axe.

R3 :

Les trois champs tournants rencontrés dans la machine synchrone sont :

1. Champ créé par la roue polaire
2. Champ provenant de la réaction magnétique de l'induit (champ créé par les courants triphasés statoriques selon le théorème de Ferraris),
3. Le champ résultant composé des deux champs précédents.

Le décalage angulaire peut être déduit à partir d'un diagramme vectoriel (par phase) (Fig.1) où :

1. Le flux statorique Φ_s d'axe OX_f est en phase avec le courant statorique I_1 ;
2. le flux résultant Φ_r d'axe OX_r est en quadrature avancée sur la fém résultante E_1 qui est peu différente de la tension V aux bornes de l'enroulement;
3. Le flux de la roue polaire Φ_o d'axe OX est en quadrature avancée sur la fém à vide E_o .
4. En utilisant le modèle de la réactance synchrone, le flux résultant Φ_r est déduit par une somme vectorielle de Φ_s et Φ_o

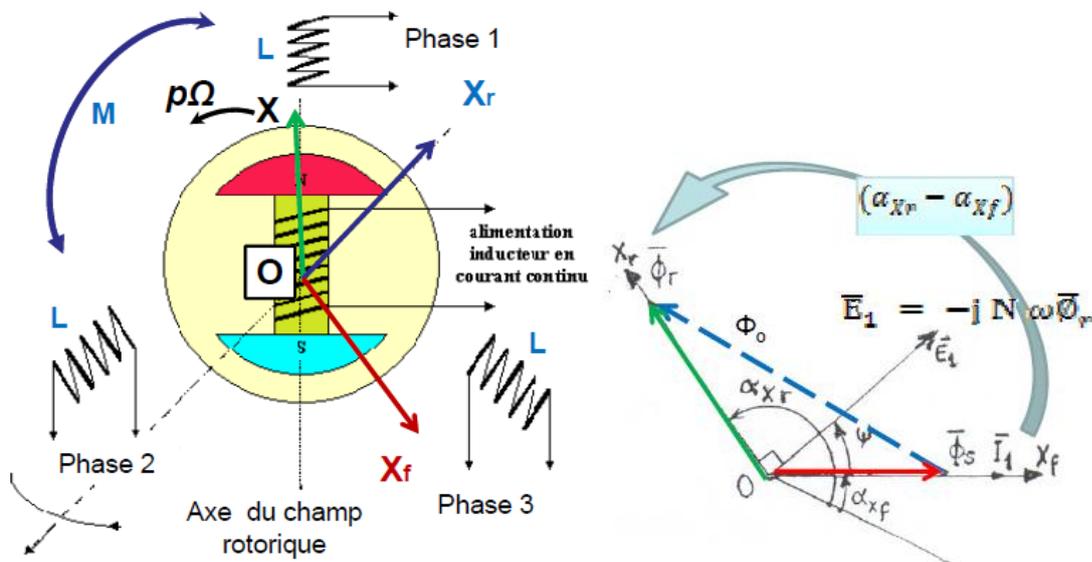


Fig.1. (a) Organisation des différents champs tournants dans un alternateur en charge
(b) Diagramme vectoriel correspondant

Q4 :

Rappeler les hypothèses relatives aux différents modèles représentant la machine synchrone : modèle de Blondel appelé aussi de la double réactance, modèle de Potier, modèle de Bhen Eschunburg appelé aussi de la réactance synchrone.

R4:

- a) Le modèle de Blondel est utilisé pour une machine synchrone à pôles saillants avec prise en compte de la saturation
- b) Le modèle de Potier est utilisé pour étudier une machine synchrone à pôles lisses avec prise en compte de la saturation
- c) Le modèle de Bhen Echunburg est utilisé pour étudier une machine synchrone à pôles lisses non saturée

Q5 :

- a) Rappeler les vitesses de rotation des alternateurs suivant :
 - i) Alternateurs débitant sur un réseau 50 Hz
 - ii) Alternateurs embarqués (dans les avions) alimentant un réseau à 400 Hz ($p = 8$)
- b) Donner la force centrifuge qui s'exerce sur 1 kg de cuivre (placé à la périphérie) du rotor d'un turbo alternateur bipolaire de diamètre $D = 1$ m.

R5 :

- a)
 - i) La vitesse de rotation N de la roue polaire d'un alternateur est liée à la fréquence des fém induites f et au nombre de paires de pôles p par la relation:

$$N \text{ (tr/mn)} = 60 f/p$$

Si le réseau présente une fréquence $f = 50$ Hz, on obtient alors :

$$N = 3000 \text{ (tr/mn) pour } p = 1 \quad (\text{machine bipolaire})$$

$$N = 1500 \text{ (tr/mn) pour } p = 2 \quad (\text{machine tétrapolaire})$$

$$N = 1000 \text{ (tr/mn) pour } p = 3 \quad (\text{machine hexapolaire})$$

$$N = 750 \text{ (tr/mn) pour } p = 4 \quad (\text{machine hectapolaire})$$

Sachant que les turbo-alternateurs sont à $p = 1$ ou 2 au maximum et équipent les centrales thermiques (fuel, gaz, nucléaire....).

Les alternateurs lents ($p > 2$) équipent généralement les centrales hydrauliques et les éoliennes à entraînement direct (Direct Drive).

- ii) Les alternateurs embarqués alimentent des réseaux à 400Hz.

Rappelons que pour une même puissance, l'augmentation de la fréquence permet de réduire les dimensions des composants en question, c'est à dire le poids et le volume, chose très recherchée pour le matériel embarqué !.

Donc la vitesse devient: $N = 60 f/p = 24000/p = 3000 \text{ (tr/mn)}$

b) La force centrifuge est exprimée par : $(F = m\Omega^2 R)$,

Avec :

$$m = 1 \text{ kg} ; R = 0.5\text{m} ; \Omega = 2\pi f/p = 100\pi \text{ (f = 50 Hz ; p=1)}.$$

Le poids du cuivre : $P \approx 10 \text{ Newtons}$

$$F \approx 5 \cdot 10^4 \text{ N} \approx 5000 P !$$

La force exercée sur la masse du cuivre est environ égale à 5000 fois son poids !

Q6 :

L'induit de l'alternateur (les 3 enroulements statoriques) comporte 372 conducteurs. Couplés en étoile, on mesure une fém à vide entre phases de 660 V à 50 Hz.

- Rappeler l'allure de la courbe de la fém à vide E_o en fonction du courant de l'excitation I_e (à vitesse constante). Justifier l'allure obtenue en détaillant les différents coefficients intervenant dans la formule de la fém induite.
- Si le flux par pôle est de 27 mWb, déduire alors le coefficient de Kapp de cet alternateur. Calculer ensuite le coefficient de bobinage k_b si le facteur de forme $K_F = 1,05$.

R6 :

- La fém induite aux bornes d'un enroulement est exprimée par :

$$E = K_p N f \Phi_M \quad (1)$$

Où :

K_p est le facteur de Kapp ; N désigne le nombre de conducteurs par enroulement ; f est la fréquence ; Φ_M est le flux maximum par pôle.

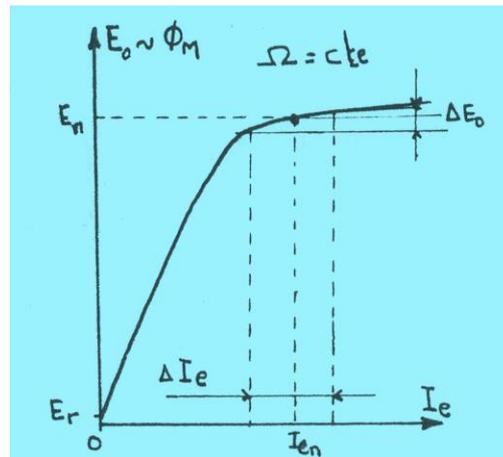
Avec : $K_p = 2,22 K_F k_b \quad (2)$

k_b est le coefficient de bobinage défini par : $k_b = k_d \cdot k_r \cdot k_i$.

$k_d \leq 1$: coefficient résultant de la distribution du bobinage ;

$k_r \leq 1$: coefficient résultant du raccourcissement du bobinage ;

$k_i \leq 1$: coefficient résultant du raccourcissement du bobinage.



D'après la relation (1); la courbe $E_o(I_e)$ présente l'allure de la courbe $\Phi_M(I_e)$, qui est la courbe de magnétisation du circuit magnétique canalisant le flux. Ce circuit magnétique est saturable.

b) Selon la formule (1),
$$K_p = E / (N f \Phi_M) = \frac{660}{\sqrt{3}} \frac{1}{\frac{372}{27} e^{-3}} = 2.28$$

Selon la formule (2) on a :

$$k_b = K_p / (2,22 K_f) = 2.28 / (2.22 * 1.05) = 0.978$$

Q7 :

Une centrale hydraulique comporte un alternateur de 18 MVA fonctionnant avec un facteur de puissance égal à 0,8. Elle est alimentée par une chute dont la hauteur $h = 178$ m et le débit égal à $10 \text{ m}^3/\text{s}$. Calculer :

- La puissance de la chute
- Le rendement du groupe turbine-alternateur
- Le nombre d'heures de fonctionnement si la production annuelle est de 30 GWh.

R7 :

- La masse de l'eau écoulée pendant une seconde est :

$$M = 10 * 1000 = 10\ 000 \text{ kg}$$

Le poids de l'eau en chute pendant 1 seconde est :

$$F = M * g = 10 * 1000 * 9,8 = 98\ 000 \text{ N}$$

L'énergie fournie est : $W = F * h = 98\ 000 * 178 = 17,4 \text{ MJ}$

La puissance est alors : $P = W/t = 17,4/1 = 17,4 \text{ MW}$.

- La puissance utile de l'alternateur est :

$$P_u = S \cdot \cos\varphi = 18 \cdot 0,8 = 14,4 \text{ MW}$$

Le rendement du groupe est : $\eta = P_u/P = 14,4/17,4 = 0,83$.

c- La durée de fonctionnement en heures est :

$$t = W/P_u = 30 \cdot 10^9 / 14,4 \cdot 10^6 = 2080 \text{ h.}$$

Q8 :

Un alternateur triphasé, couplé en étoile, débite sur une charge un courant de 400 A sous la tension 420 V avec un facteur de puissance égal à 0,9. La résistance mesurée entre phases du stator est $R = 30 \text{ m}\Omega$. Le rotor consomme 10 A sous 200 V, les pertes constantes sont $p_c = 4 \text{ kW}$.

- a- Expliciter les différentes pertes de l'alternateur. Calculer la puissance utile et en déduire le rendement.
- b- Pour la même excitation (correspondant au fonctionnement précédent), on a relevé une fém à vide par enroulement $E_o = 300 \text{ V}$ et un courant de court-circuit $I_{cc} = 300 \text{ A}$; (on suppose pour cette question $R \ll X_s$).
 - i) Calculer la réactance synchrone X_s de l'alternateur
 - ii) Déduire graphiquement la fém à vide correspondant au fonctionnement précédent.

R8 :

- a- les pertes dans l'alternateur sont :
 - Les pertes Joule dans le stator (p_{js}) et dans le rotor (p_{jr})
 - Les pertes fer dans le stator
 - Les pertes mécaniques et les pertes supplémentaires (ventilation, systèmes de refroidissement....)

Les pertes fer statorique p_{fs} , et les pertes mécaniques p_m , constituent les pertes constantes p_c (indépendantes de la charge). Les pertes Joule statorique p_{js} dépendent directement du courant débité par l'alternateur.

Les pertes totales sont : $p_t = p_{jr} + p_{js} + p_c = 200 \cdot 10 + 3 \cdot 0,5 \cdot 400^2 + 4000 = 13,2 \text{ kW}$.

La puissance utile $P_u = 3 V I \cos\varphi = \sqrt{3} U I \cos\varphi = 1,732 \cdot 420 \cdot 400 \cdot 0,9 = 262 \text{ kW}$.

Le rendement est : $\eta = \frac{1}{1 + \frac{p_t}{P_u}} = 0,953$

- b- – l'essai en court-circuit donne : $X_s = E_o / I_{cc} = 300 / 300 = 1 \Omega$.

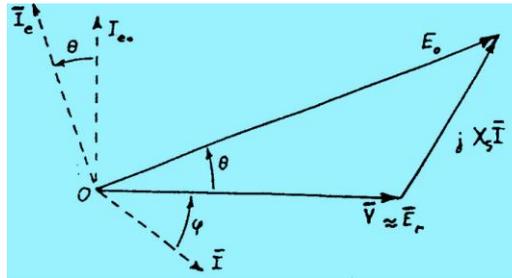


Fig. 2-Diagramme de la réactance synchrone correspondant au fonctionnement alternateur

En traçant le diagramme vectoriel (fig. 2) à l'échelle (avec : $\varphi \approx 26^\circ$; $X_s \cdot I = 300 \text{ V}$, $V = 420 \text{ V}$), on obtient $E_0 \approx 540 \text{ V}$. De même, on peut évaluer aussi l'angle interne θ .

Q9 :

Alternateur couplé sur le réseau :

Un alternateur tétrapolaire de 10 kVA, 127-220V, 50 Hz est couplé sur un réseau 220 V/ 50 Hz (dont la puissance est supposée infinie).

A la fréquence du synchronisme, les essais ont donné :

- A vide : $J = I_e = 15 \text{ A}$; $E_0 \cdot \sqrt{3}$ (entre phases) = 296 V
- En court-circuit : $I_{cc} = 20 \text{ A}$ pour $J = 5.8 \text{ A}$

On suppose le long du problème que l'alternateur n'est pas saturé et le courant maximum admissible par la roue polaire est de 16.75 A. En plus, toutes les pertes seront négligées.

1)

- a) Préciser le couplage de l'alternateur
- b) On demande de :
 - i) Calculer la valeur efficace du courant nominal I_n ;
 - ii) Evaluer la fréquence du synchronisme en tr/mn et en rad/s ;
 - iii) Etablir la relation $E_0(J)$ (E_0 : fém à vide d'un enroulement en V, J : le courant d'excitation correspondant en A).
 - iv) Calculer la réactance synchrone X_s exprimée en Ω et en %.

2) La machine fonctionne à vide :

- a) Déterminer la valeur J_0 du courant inducteur lorsque les courants statoriques sont nuls.
- b) Quelles sont les valeurs des courants statoriques correspondant successivement à un courant d'excitation de 8 A et de 16 A.

3) Désormais, la machine fonctionne en alternateur et débite une puissance de 5 kW.

En adoptant le modèle de Bhen Eschunburg, construire :

- a) La droite d'équipuissance correspondant à 5 kW ;
- b) Le cercle limite donné par le courant statorique (centre A, rayon $X_s I_n$) ;

- c) Le cercle limite donné par le courant d'excitation maximum (centre O et rayon $E_{o\max}$ relative à J_{\max}).
- 4) En déduire la portion utile de la droite d'équipuissance (sachant que J et I ne doivent pas dépasser respectivement J_{\max} et I_n).
- 5) Esquisser l'allure de la caractéristique $J(I)$ (à $P = 5 \text{ kW}$), en utilisant les points limites sur la droite d'équipuissance en plus du point donnant le courant statorique minimum.
- 6) Lorsque $J = J_{\max}$, quelles sont les valeurs :
- Du $\cos\varphi$
 - De l'angle interne θ et du facteur de stabilité défini par $(\sin\theta)^{-1}$.

R9 :

1)

a- Chaque phase du rotor peut supporter au plus 127 V. La tension entre phases (du réseau) est de 220 V. Pour avoir 127 V aux bornes d'un enroulement, il faut coupler les enroulements statoriques en étoile.

i) La puissance apparente nominale S_n est définie par : $S_n = \sqrt{3}U_n I_n$

D'où :
$$I_n = \frac{S_n}{\sqrt{3}U_n} = 26 \text{ A}$$

ii) $N \text{ (tr/mn)} = 60 n \text{ (tr/s)} = 60 f/p = 3000/2 = 1500 \text{ tr/mn}$

$$\Omega \text{ (rad/s)} = 2\pi n = 2\pi f/p = 100\pi/p = 157 \text{ rad/s} \quad (n : \text{vitesse en tr/s})$$

iii) La caractéristique à vide, supposée linéaire (droite affine), passe par (0,0) et $J = I_e = 15 \text{ A}$; $E_o \cdot \sqrt{3} = 296 \text{ V}$.

$$E_o = k_e \cdot I_e = k_e \cdot J = 11.4 I_e$$

iv) La réactance synchrone est calculée par les valeurs de I_{cc} et de E_{occ} pour un même courant d'excitation.

Lorsque $J = 5.8 \text{ A}$, on a : $I_{cc} = 20 \text{ A}$ et $E_{occ} = 11.4 * J = 66.12 \text{ V}$

$$X_s = \frac{E_{occ}}{I_{cc}} = \frac{66.12}{20} = 3.3 \Omega$$

$$X_s \% = 100 \frac{X_s}{Z_b} = 100 \frac{X_s}{\frac{U_n^2}{S_n}} = 68$$

2) Le fonctionnement à vide est traduit par une puissance active fournie nulle (aux pertes près).

- L'équation de fonctionnement aux bornes d'un enroulement est :

$$\bar{E}_o = \bar{V} + R\bar{I} + jX_s\bar{I}$$

Si $I = 0$ alors $E_o = V = 127 \text{ V} \Rightarrow J_o = \frac{E_o}{k_e} = \frac{127}{11.4} = 11.14 \text{ A}$.

- Quand la puissance active est nulle, le courant statorique I est en quadrature avec la tension V . Donc, les vecteurs $\vec{E}_0, \vec{V},$ et $jX_s\vec{I}$ sont en phases et satisfont l'équation électrique :

$$\vec{E}_0 = \vec{V} + jX_s\vec{I}$$

Deux cas sont à distinguer :

- $J < J_0 \Rightarrow$ L'alternateur est sous excité, il absorbe alors de la puissance réactive, car I est en avance de $\pi/2$ sur la tension et le récepteur aux bornes de l'alternateur est donc capacitif et fournit Q à l'alternateur. C'est un cas particulier traduit par la figure 3b où $\varphi = \pi/2$!

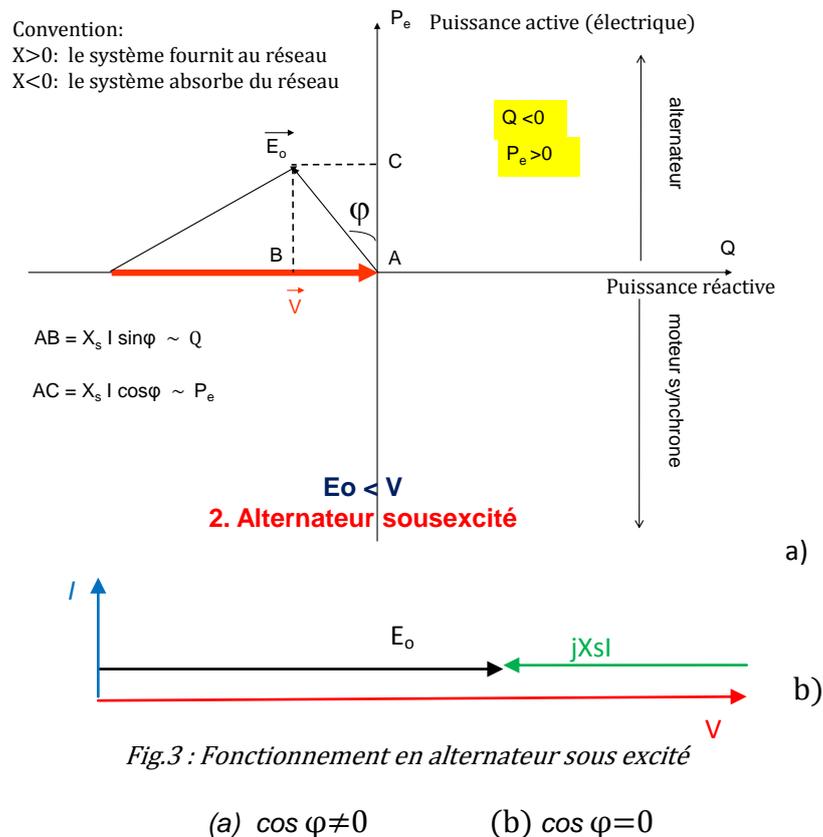
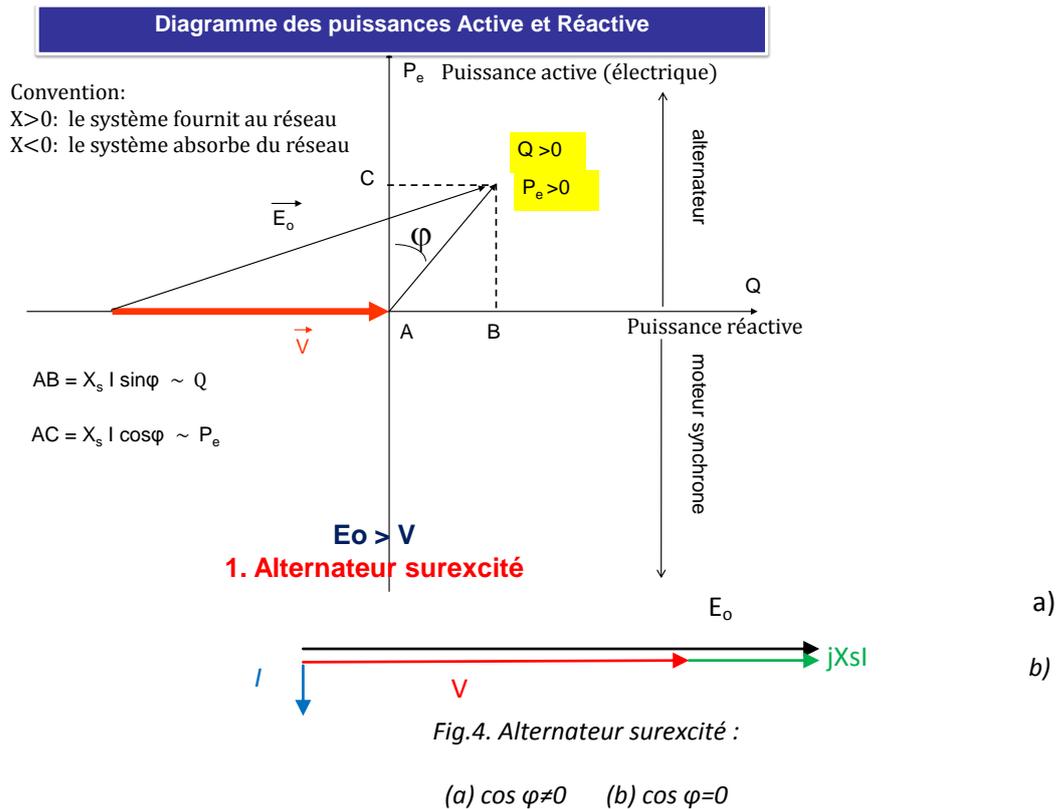


Fig.3 : Fonctionnement en alternateur sous excité

Algébriquement, on a :

$$V = E_0 + X_s I \Rightarrow I = (V - E_0) / X_s = (V - k_e \cdot J) / X_s \quad (1)$$

- $J > J_0 \Rightarrow$ L'alternateur est surexcité, il fournit alors de la puissance réactive car I est en retard de $\pi/2$ sur la tension et le récepteur aux bornes de l'alternateur est donc selfique et absorbe Q provenant de l'alternateur. Ce fonctionnement est traduit par la figure 4b en faisant $\varphi = \pi/2$!



Algébriquement, on a :

$$V = (E_0 - X_s I) \Rightarrow I = (E_0 - V) / X_s = (k_e \cdot J - V) / X_s \quad (2)$$

Application numérique :

- $J = 8 \text{ A} \Rightarrow (1) \text{ donne : } I = (127 - 11.4 \cdot 8) / 3.3 = 10.85 \text{ A ;}$
- $J = 14 \text{ A} \Rightarrow (2) \text{ donne : } I = (16 \cdot 11.4 - 127) / 3.3 = 16.8 \text{ A.}$

3)

a) La droite d'équipuissance se situe au dessus du vecteur V à une distance AC correspondant à la tension :

$$(X_s / 3V) P = 43 \text{ V}$$

On la traduit en cm. A l'échelle 20 V/cm on obtient : $AC = 2.2 \text{ cm}$

b) La limite du courant statorique permet de tracer le cercle de rayon $X_s I_n = 3.3 \cdot 26 = 86 \text{ V}$ et de centre A. En cm, le rayon 86 V $\Rightarrow 4.3 \text{ cm}$.

c) La tension V est représentée par le vecteur OA: $V = 127 \text{ V} \Rightarrow OA = 6.4 \text{ cm}$

Le cercle limite découlant de la limitation de l'excitation à J_{max} correspond à la fém

$$E_{20} = k_e J_{max} = 191 \text{ V} \Rightarrow 9.6 \text{ cm}$$

4) La portion utile de la droite d'équipuissance est le segment C_1C_2 (Fig.5) commun aux deux cercles!

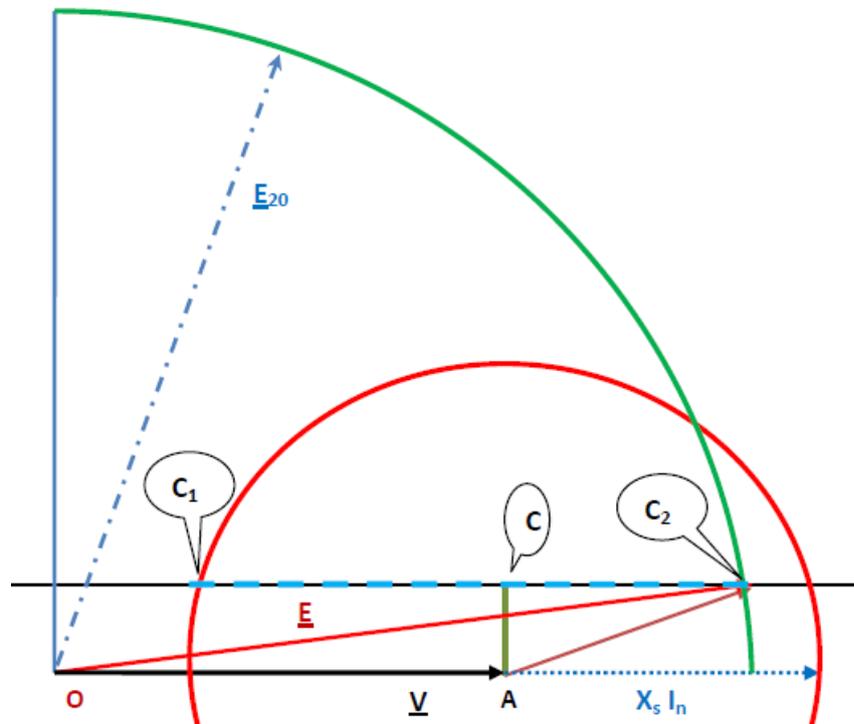


Fig. 5. Diagramme vectoriel avec limites de fonctionnement

5) Les 3 points types sont C_1 , C et C_2 :

* Au point C_1 : $I = I_n = 26$ A. $OC_1 = 3.5$ cm donne la fém $E_o = 70$ V $\Rightarrow J = 6.14$ A

*Au point C_2 : $AC_2 = 3.7$ cm $\Rightarrow X_s I = 74$ V $\Rightarrow I = 22$ A ;

OC_2 fournit $E_o = 190$ V $\Rightarrow J = 16.7$ A

*Au point C : $AC = 2.2$ cm $\Rightarrow X_s I = 43$ V (déjà calculée) $\Rightarrow I = 13$ A.

OC fournit $E_o = 133$ V $\Rightarrow J = 11.7$ A

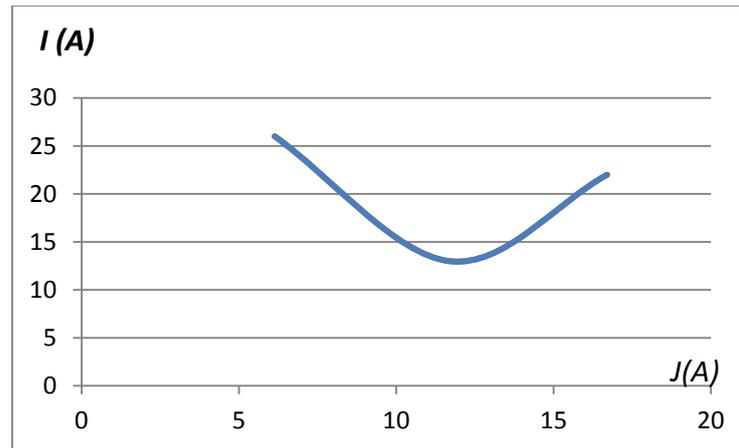


Fig.6 Courbe de Mordey $I(J)$ à $P = 5 \text{ kW}$

La figure 6 donne une esquisse de la courbe de Mordey correspondant à $P = 5 \text{ kW}$.

6) Lorsque $J = J_{max} = 16.75 \text{ A}$, le point de fonctionnement est C_2 . On en déduit :

$$\text{a) } \cos\varphi = \frac{AC}{AC^2} = 0.58 \Rightarrow \varphi = 54.5^\circ$$

$$\text{b) } \sin\theta = \frac{AC}{OC^2} = 0.23 \Rightarrow \theta = 13^\circ;$$

Le décalage mécanique entre les pôles résultants et ceux de la roue polaire :

$$\theta_m = \frac{\theta_e}{p} = \frac{13}{2} = 6.5^\circ$$

Q10 :

Modèle de Potier :

Un alternateur triphasé, couplé en étoile, présente les caractéristiques suivantes :

23 kVA, 50 Hz, 127/220 V, 1500 tr/mn.

La résistance d'un enroulement $R = 0.19\Omega$.

La caractéristique à vide, relevée à 1500 tr/mn et la caractéristique en court-circuit sont données par le tableau suivant :

| | | | | | | | | | |
|----------------------------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| $I_e \text{ (A)}$ | 1 | 2 | 3,5 | 3,8 | 4,5 | 7 | 8 | 10 | 15 |
| $E_o \sqrt{3} \text{ (V)}$ | 86,6 | 160 | 214 | 220 | 234 | 260 | 268 | 278 | 291 |
| $I_{cc} \text{ (A)}$ | | | | | 45 | | | | |

Les paramètres du modèle de Potier sont : $\lambda\omega = 0.5\Omega$; $\alpha = 0.09$.

- 1) Compléter le tableau pour retrouver la relation $X_s(I_e)$, où X_s désigne la réactance synchrone de l'alternateur. Conclure.
- 2) En utilisant le modèle de Potier, déterminer le courant d'excitation permettant un débit de 60 A sur un réseau de 220 V avec un $\cos\phi = 0,8$ (AV et AR).

R10 :

- 1) Le calcul de la réactance synchrone X_s selon le modèle de Behn Eschunburg fait appel à I_{cc} et à E_{occ} pour un même courant d'excitation.

$$X_s = \frac{E_{occ}}{I_{cc}}$$

1)

| | | | | | | | | | |
|-------------------------------------|------|-----|-----|------|-----|------|------|------|------|
| I_e (A) | 1 | 2 | 3,5 | 3,8 | 4,5 | 7 | 8 | 10 | 15 |
| $E_o \sqrt{3}$ (V) | 86,6 | 160 | 214 | 220 | 234 | 260 | 268 | 278 | 291 |
| I_{cc} (A) | 10 | 20 | 35 | 38 | 45 | 70 | 80 | 100 | 150 |
| X_s (Ω)= E_o/I_{cc} | 5 | 4.6 | 3.5 | 3.34 | 3.0 | 2.14 | 1.93 | 1.60 | 1.12 |

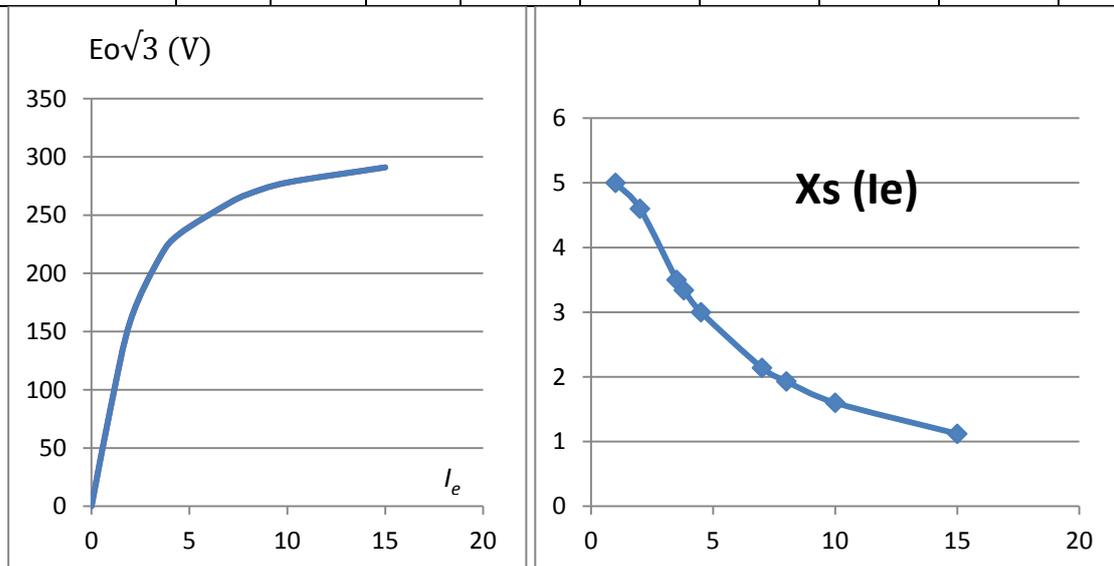


Fig.7 : Tracé de la caractéristique à vide et de la réactance synchrone avec prise en compte de la saturation

- En tenant compte de la saturation, X_s varie de façon importante !. Le modèle de Behn Eschunburg n'est pas rigoureux pour une machine saturée. Cependant, en pratique, on utilise ce modèle en fixant la valeur de X_s qui correspond à un courant d'excitation I_e correspondant à une fém à vide située au niveau du coude de saturation. Pour ce cas, on choisit $X_s (I_e = 10 \text{ A}) = 1,6 \Omega$.
- 2) On trace le diagramme vectoriel de Potier traduisant les 2 relations :

$$\bar{E}_r = \bar{V} + R\bar{I} + j\lambda\omega\bar{I} \quad (1)$$

$$\bar{I}_{e0} = \bar{I}_e + \alpha\bar{I} \quad (2)$$

E_r et I_{e0} sont liés par :

- La caractéristique à vide $E_o(I_e)$
- Une quadrature de phase (I_{e0} en avance sur \bar{E}_r)

La construction graphique (à l'échelle 20V/cm ; 1A/cm par exemple) donne :

$$*\cos\varphi = 0.8 \text{ AR} ; \quad \varphi = +37^\circ ;$$

On construit graphiquement E_r selon l'équation (1). On trouve alors $E_r \approx 7.6 \text{ cm} \Rightarrow E_r \approx 153 \text{ V}$.

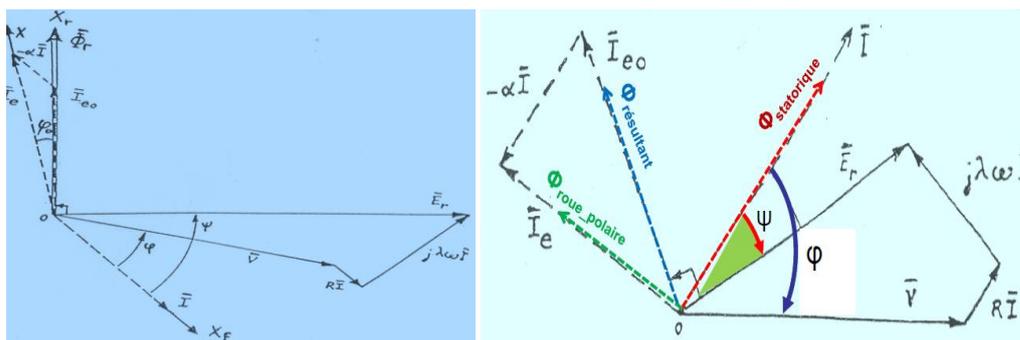
Selon la caractéristique à vide, $I_{e0} = 7.3 \text{ A} \Rightarrow 7.3 \text{ cm} ;$

Ensuite, on construit les vecteurs I_{e0} et αI en respectant l'équation (2).

On obtient ainsi : $\alpha I = 5.4 \text{ A} \Rightarrow 5.4 \text{ cm} ; \quad I_e = 12.4 \text{ cm} \Rightarrow I_e = 12.4 \text{ A}$ (Fig. 8a)

* $\cos\varphi = 0.8 \text{ AV} : \varphi = -37^\circ$. La même méthode que précédemment permet d'obtenir $I_e = 5.2 \text{ A}$ (Fig. 8b).

On reconnaît l'effet de la magnétisation provoquée par une charge à caractère capacitif (I_e pour $\cos\varphi \text{ AV} < I_e \cos\varphi \text{ AR}$).



a) $\cos\varphi \text{ AR}$

b) $\cos\varphi \text{ AV}$

Fig. 8 Diagramme vectoriel (modèle de Potier)

Q11 :

Moteurs Synchrones

- Rappeler la caractéristique mécanique d'un moteur synchrone. Comment peut-on faire varier la vitesse d'un tel moteur ?
- Quels sont les moyens utilisés pour le démarrage d'un moteur synchrone ?
- Calculer la vitesse du moteur synchrone à 12 pôles alimenté à 60 Hz.

R11 :

- La figure 9 donne la caractéristique mécanique du moteur synchrone :

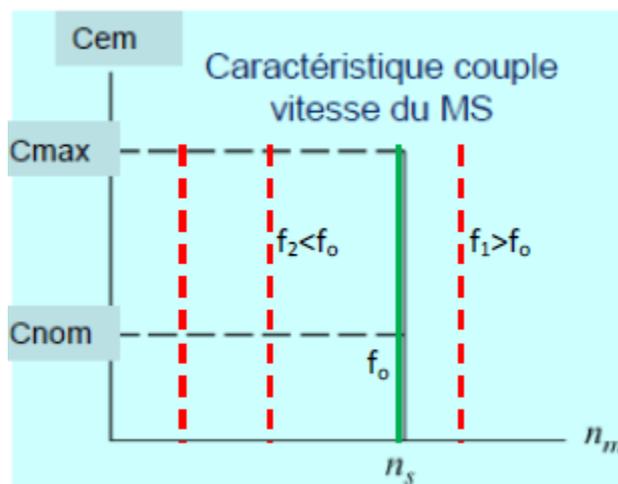


Fig.9 Caractéristique du moteur synchrone

C'est une caractéristique du type « shunt » où la vitesse ne varie pas avec la charge.

Le point de départ de la caractéristique étant n_s proportionnel à la fréquence de l'alimentation, il suffit donc de faire varier cette fréquence pour décaler la caractéristique (segment de droite) parallèlement à elle-même et balayer ainsi tout le quadrant (trait rouge en pointillé).

- Les moteurs synchrones, alimentés directement par source de tension d'amplitude et de fréquence constantes, présentent un couple de démarrage nul.
 - Pour les grandes puissances, les moteurs sont démarrés comme un alternateur en les entraînant au voisinage du synchronisme avec un moteur auxiliaire. Leur couplage au réseau doit respecter donc les mêmes conditions imposées à l'alternateur.
 - Pour les moyennes puissances, les moteurs sont généralement alimentés par des variateurs de vitesse (tension et fréquence variable). Leur autopilotage par une tension à faible fréquence, permettra leur démarrage progressif (en commençant par de faibles vitesses) et en imposant un couple important dès le démarrage.
 - Pour les faibles puissances, un démarrage en asynchrone est possible ; c'est-à-dire une alimentation directe du stator, le rotor étant non alimenté ! Les courants

induits sur le rotor (avec amortisseurs ou non), pourraient suffire au démarrage.

La roue polaire est alimentée quand sa vitesse serait voisine du synchronisme.

c) La vitesse du synchronisme n_s (tr/mn) est :

$$n_s = 60 f / p = 60 \cdot 60 / 6 = 600 \text{ tr/mn}$$

Q12 :

Un moteur synchrone à aimants permanents de réactance synchrone X_s est alimenté par une tension à fréquence constante. On suppose le long de l'exercice que $R \ll X_s$, les pertes sont négligeables et la fém à vide $E_o > V$.

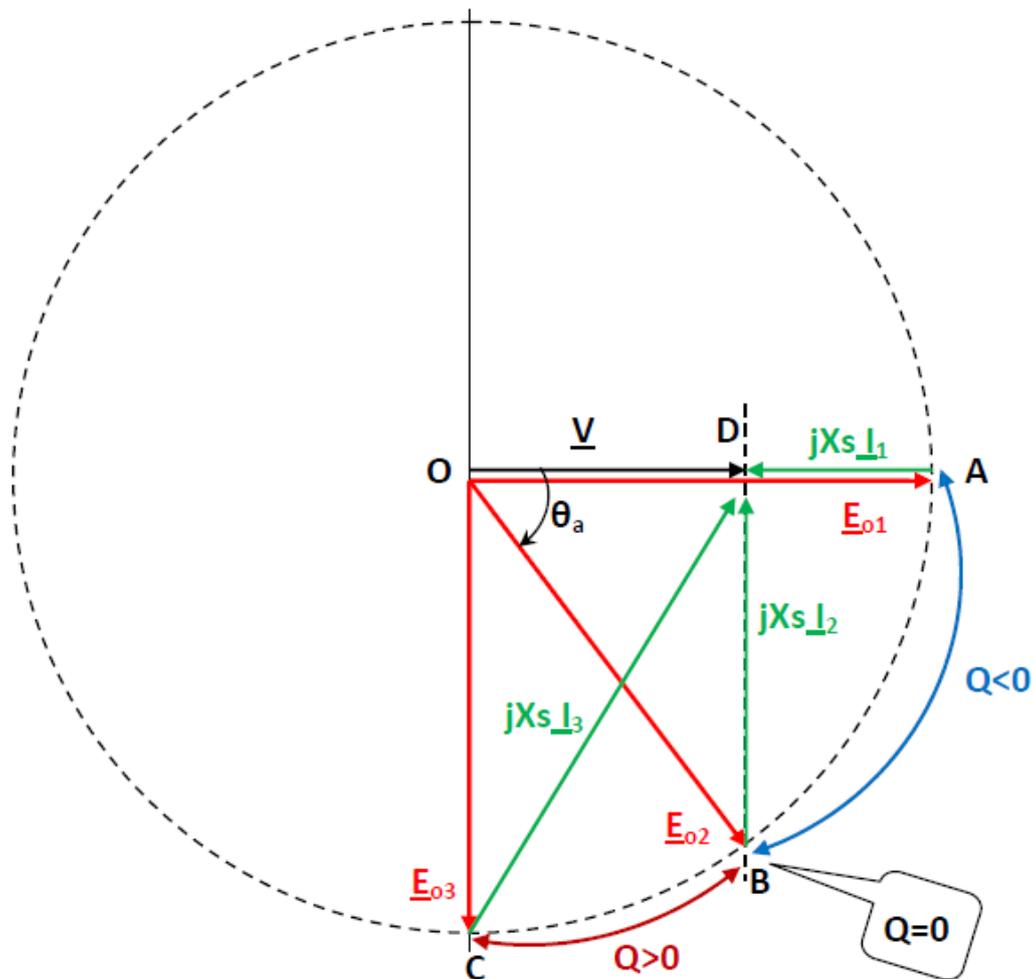
On prendra comme origine pour le diagramme vectoriel le vecteur tension \underline{V} .

Tracer le cercle de centre O et de rayon E_o . Donner sur le même diagramme vectoriel les points de fonctionnement correspondant à :

- a) Un fonctionnement en compensateur synchrone. Exprimer Q fournie par le moteur au réseau en fonction de V , E_o et X_s .
- b) Un fonctionnement à $\cos\varphi = 1$. Exprimer pour ce cas :
 - i) Le courant I_2 absorbé en fonction de V , E_o et X_s ;
 - ii) L'angle interne θ_a en fonction de V et E_o . En déduire le facteur de stabilité correspondant;
 - iii) La relation entre V et E_o si le moteur développe la moitié de son couple maximum.
- c) Un fonctionnement à couple maximum. Déduire pour ce cas le courant I et le $\cos\varphi$ correspondant (en fonction de V , X_s et E_o).

R.12.

a)



b)

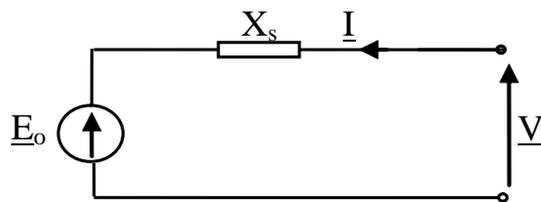


Schéma équivalent d'une phase du moteur synchrone

Fig. 10 Fonctionnement du moteur synchrone à fém E_o constante

Le moteur est à aimants permanents (excitation constante), ce qui donne à vitesse constante, une fém E_o constante.

Avec le modèle de la réactance synchrone, le moteur satisfait l'équation de fonctionnement suivante (Fig. 10 b):

$$\underline{V} = \underline{E}_o + jX_s \underline{I} \quad (1)$$

Le diagramme vectoriel traduit la relation (1) pour différentes charge du moteur : le moteur fonctionnera avec un couple $C_{em} = 0$ ($\theta = 0$) jusqu'à la valeur maximale C_{max} définie par la limite de la stabilité ($\theta = \pi/2$) selon l'expression du couple :

$$C_{em} = P / \Omega = \frac{3VE_0}{X_s\Omega} \sin\theta$$

La fém \underline{E}_0 constante est toujours en retard par rapport à \underline{V} . Elle décrira donc une portion du cercle de centre O est d'extrémité E_0 avec:

$$0 \leq \theta \leq \pi/2$$

a) Fonctionnement en compensateur synchrone : $\theta = 0$.

$E_0 = E_{01}$ est colinéaire avec $jX_s I$. Son extrémité se trouve au point A du cercle (Fig.10a). Ce fonctionnement est caractérisé par :

$$P = 0 \quad \text{et} \quad Q = 3 VI$$

Avec :

$$I = (E_0 - V) / X_s$$

Soit donc :

$$Q = 3V(E_0 - V) / X_s$$

b) Le fonctionnement avec un $\cos\phi = 1$ implique que \underline{V} et \underline{I} sont en phases et par suite, $jX_s I$ est perpendiculaire à \underline{V} . L'extrémité de \underline{E}_0 est alors en B (Fig.10a). Ce cas est caractérisé aussi par le fait que les vecteurs V , E_0 et $jX_s I$ forment un triangle rectangle : ODB.

i) Ce triangle fournit les relations suivantes :

$$(E_{02})^2 = (X_s I_2)^2 + V^2$$

$$I_2 = \frac{\sqrt{E_{02}^2 - V^2}}{X_s}$$

$$\text{ii) } \sin\theta_a = \frac{X_s I_2}{E_{02}} = \frac{\sqrt{E_{02}^2 - V^2}}{E_{02}} = \sqrt{1 - \left(\frac{V}{E_{02}}\right)^2}$$

Le facteur de stabilité est défini par :

$$(\sin\theta_a)^{-1} = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{V}{E_{02}}\right)^2}}$$

iii) Le couple est défini par :

$$C_{em} = \frac{3VE_0}{X_s\Omega} \sin\theta = C_{max} \sin\theta$$

$$\text{Le couple } C_{em} = 0.5 C_{max} \Rightarrow \sin\theta = 0.5 = \sqrt{1 - \left(\frac{V}{E_{02}}\right)^2}$$

$$\Rightarrow \left(\frac{V}{E_{02}}\right)^2 = \frac{3}{4} \quad \Rightarrow \quad V = \frac{\sqrt{3}}{2} E_{02}$$

$$\text{c) } C_{em} = C_{max} \sin\theta = C_{max} \Rightarrow \theta = \frac{\pi}{2}$$

Le point de fonctionnement correspond au point C. On obtient de nouveau un triangle rectangle ODC :

$$(X_s I_3)^2 = V^2 + (E_{o3})^2$$

$$I_3 = \frac{\sqrt{E_{o3}^2 + V^2}}{X_s}$$

Le déphasage φ entre la tension et le courant est donné par l'angle CDB qui est égal à l'angle OCD.

$$\cos \varphi = \frac{E_{o3}}{X_s I_3} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{V}{E_{o3}}\right)^2}}$$

Remarque :

Pour les couples C_{em} correspondant à :

- $0 \leq \theta < \theta_a$; le moteur fournit du réactif au réseau
- $\theta = \theta_a$; le moteur fonctionne avec $\cos \varphi = 1$ ($Q = 0$)
- $\theta_a \leq \theta \leq \pi/2$; le moteur absorbe du réactif du réseau.

Q13.

Un moteur synchrone tétrapolaire, 230/400 V, alimenté par le réseau 220V/50Hz. Sa réactance synchrone $X_s = 30 \Omega$. On suppose le long de l'exercice que la résistance de l'enroulement statorique $R \ll X_s$ et le rendement égal à 0.95.

1. Le moteur entraîne un compresseur présentant un couple résistant de 36 Nm.

En supposant que le moteur fonctionne avec un $\cos \varphi = 1$, déterminer graphiquement (puis avec calcul) le courant d'excitation sachant que la relation entre la fém E_o (en volts) (d'un enroulement) et le courant de la roue polaire I_e (en Ampères) est régi par l'équation :

$$E_o = 200 I_e$$

2. Entraînant toujours le même compresseur, on ajuste l'excitation pour que le moteur absorbe $Q = 3560 \text{ VAR}$
 - i. Représenter sur le même graphe précédent, les vecteurs, \underline{V} , \underline{E}_o et $jX_s \underline{I}$ traduisant ce fonctionnement.
 - ii. En déduire la valeur I_e . La retrouver avec le calcul.
3. Le moteur fonctionne à vide (compensateur synchrone) et fournit une puissance réactive de 6.6 kVAR.
 - a. Tracer le diagramme vectoriel décrivant ce régime et en déduire le courant d'excitation I_e correspondant.
 - b. Donner la capacité d'une batterie de condensateur (couplée en triangle) fournissant la même puissance réactive.

R.13-

1. Le moteur est couplé en étoile. Chaque enroulement supporte 230 V.

Il tourne à $3000/2 = 1500$ tr/mn soit $\Omega = 157$ rad/s.

La puissance fournie au compresseur : $P_u = C_r \Omega = 36 \cdot 157 = 5652$ W

La puissance absorbée : $P_a = P_u / \eta = 5950$ W

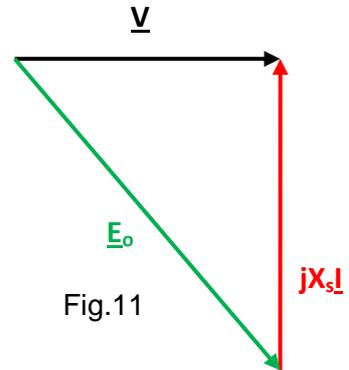
$$P_a = \sqrt{3} UI \cos \varphi = \sqrt{3} UI$$

puisque $\cos \varphi = 1 \Rightarrow$

$$I = 5950 / (\sqrt{3} \cdot 400) = 8.6 \text{ A}$$

Le diagramme vectoriel est un triangle rectangle de cotés

$V = 230$ V; $X_s I = 258$ V et E_o (recherchée).



A l'échelle 40 V/cm on obtient (Fig.11):

$V \Rightarrow 5.75$ cm ; $X_s I \Rightarrow 6.45$ cm ce qui donne $E_o \Rightarrow 8.6$ cm.

$$\Rightarrow E_o = 344 \text{ V}$$

Analytiquement, on obtient :

$$E_o = \sqrt{V^2 + (X_s I)^2} = 346 \text{ V}$$

Le courant d'excitation est :

$$I_e = 346 / 200 = 1.8 \text{ A}$$

2. Entraînant le même compresseur, donc la puissance active fournie ne change pas. Le rendement étant constant, la puissance absorbée est alors constante et par suite l'extrémité de la fém E_o reste sur la droite d'équipuissance Δ (distante de V) $X_s P_a / 3V = 258$ V = [AB] (Fig. 12).

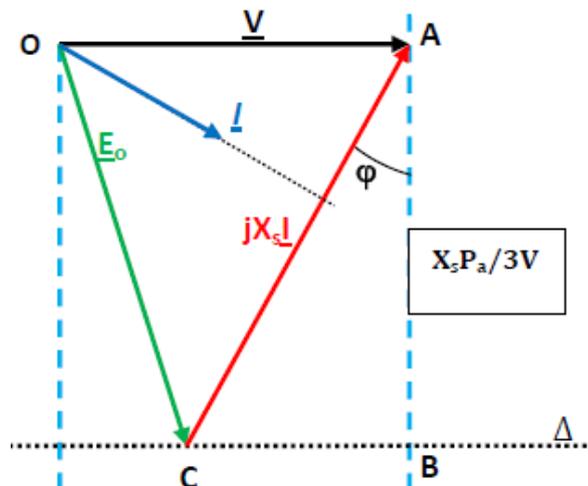


Fig. 12- Fonctionnement du moteur synchrone à puissance constante

Le moteur absorbe donc P et Q , d'où:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{Q}{P} = \frac{3560}{5950} = 0.6 \Rightarrow \varphi = 31^\circ$$

Le moteur est un récepteur absorbant du réactif donc le courant I est en retard par rapport à V et le point de fonctionnement C serait à gauche de B (Fig. 12).

Donc le segment AC , faisant un angle de 31° avec AB , permet de déduire les autres paramètres :

iii) On mesure $AC \Rightarrow X_s I$ en cm et on le traduit en volts et on en déduit la valeur du courant : $I = AC(V)/X_s$

iv) De même, on mesure OC ce qui donne directement la valeur de $E_o \approx 275$ V.

v) Analytiquement, on utilise la formule relative au triangle OAC :

$$E_o^2 = V^2 + (X_s I)^2 - 2[V X_s I \cos(\frac{\pi}{2} - \varphi)] \quad (1)$$

$$X_s I = \frac{AB}{\cos \varphi} = \frac{258}{0.86} = 300 \text{ V} \quad (2)$$

(1) et (2) donnent : $E_o = 268$ V

3.

a- Le fonctionnement en compensateur synchrone avec pertes négligeables est traduit par le diagramme vectoriel (Fig. 13); où :

ii) $Q = U I \sqrt{3} = 6600 \text{ VAR} \Rightarrow I = 6600/(400\sqrt{3}) = 9.53 \text{ A}$

iii) $X_s I = 30 \cdot 9.53 = 286 \text{ V}$

iv) $V = 230 \text{ V}$.

On tire alors la valeur de E_o (algébriquement), on a :

$$E_o = V + X_s I = 516 \text{ V} \Rightarrow I_e = 516/200 = 2.58 \text{ A}$$

b- Les condensateurs sont branchés en triangle sur le réseau. Chaque condensateur est soumis alors à 400 V (tension entre phases). La puissance fournie par chaque condensateur est :

$$Q_c = 6600/3 = U^2 C \omega \Rightarrow C = \frac{6600}{3 \cdot 400^2 \cdot 314} = 43.8 \mu\text{F}$$

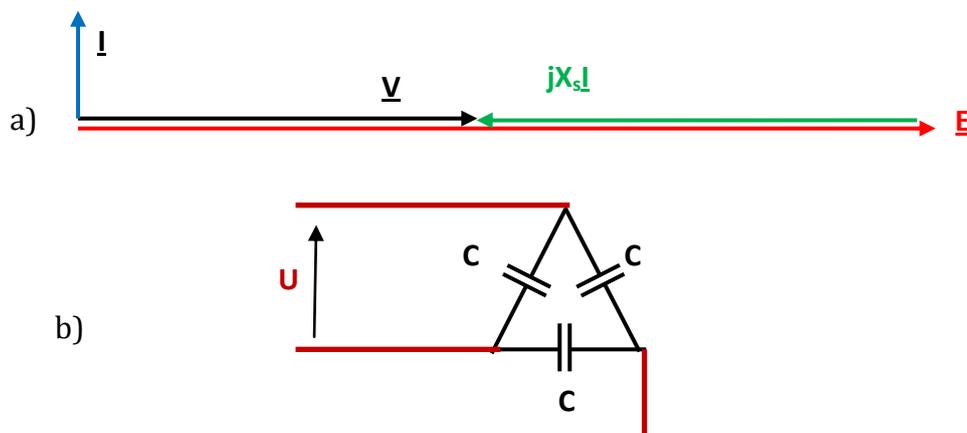


Fig. 13- Fonctionnement du moteur synchrone en compensateur synchrone

(a) Diagramme vectoriel

(b) Batterie de condensateurs équivalente