

Systèmes électromécaniques (ELE4455 – IGEE405)

Examen de mi-session - automne 2004

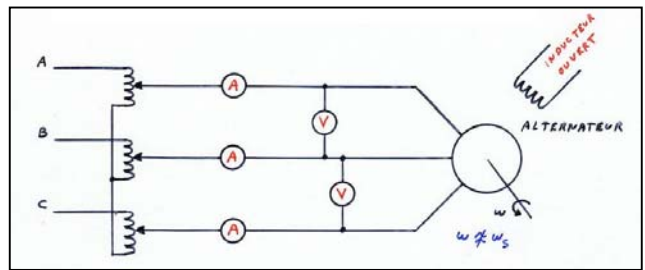
(Corrigé)

Question 1 (4 pts) Un alternateur, à pôles saillants, de 5 kVA, 220 V, 60 Hz, trois phases raccordées en Y, est soumis à un essai en glissement; on obtient les mesures suivantes: un courant d'induit de 2,12 A à une tension de 44,0 V et un courant de 3,46 A à une tension de 42,0 V. La résistance d'induit est négligeable. On opère cet alternateur, à tension et puissance nominales, dans un charge à facteur de puissance de 0,8 en retard.

a) (1,5) Décrivez sommairement en quoi consiste l'essai en glissement. Quelles sont les valeurs en ohms et en p.u. des réactances synchrones de cette machine?

L'essai en glissement est une procédure de mesure expérimentale des réactances directe et en quadrature. La procédure s'établit comme suit:

- faire circuler un courant d'induit de valeur réduite;
- régler la vitesse très près de la vitesse synchrone, sans toutefois tomber en synchronisme;
- même sens de rotation pour ω et ω_s d'excitation;
- enregistrer les extréma de courant et tension;
- les réactances sont



$$X_d = \frac{E_{\max}}{\sqrt{3}I_{\min}} \quad X_q = \frac{E_{\min}}{\sqrt{3}I_{\max}}$$

app. num.:

$$X_d = \frac{44,0}{\sqrt{3}(2,12)} = 12,0 \Omega \quad X_q = \frac{42,0}{\sqrt{3}(3,46)} = 7,0 \Omega$$

$$Z_{base} = \frac{E_{nom}}{I_{nom}} = \frac{3E_{ll,nom}^2}{S_{nom}} = \frac{E_{ll,nom}^2}{S_{nom}} = \frac{(220)^2}{5 \cdot 10^3} = 9,68 \Omega \quad X_{d,pu} = \frac{12,0}{9,68} = 1,24 \quad X_{q,pu} = \frac{7,0}{9,68} = 0,72$$

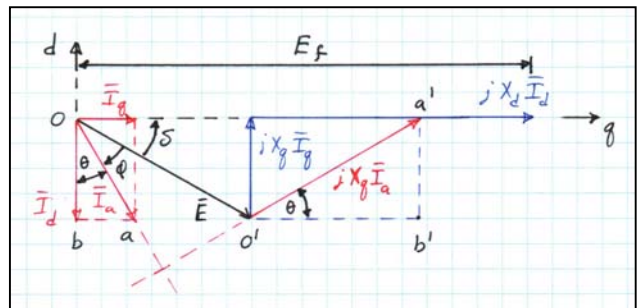
en valeurs réduites

b) (2,5) Quelle est la valeur de la tension d'excitation de cet alternateur et son angle de puissance, aux conditions d'opération mentionnées. Tracez un diagramme vectoriel approprié et donnez les explications pertinentes.

tension de phase $E_{nom} = \frac{E_{ll,nom}}{\sqrt{3}} = \frac{220}{\sqrt{3}} = 127V$

courant d'induit $I_a = I_{nom} = \frac{S_{nom}}{3E_{nom}} = \frac{S_{nom}}{\sqrt{3}E_{ll,nom}} = \frac{5 \cdot 10^3}{\sqrt{3}(220)} = 13,12 A$

l'orientation du vecteur $\overline{Oa'}$ permet de déterminer l'angle δ



$$\overline{Oa'} = \overline{E} + j X_q \overline{I_a} = 127 + j(7,0)(13,12)(0,8 - j0,6) = 182,1 + j73,47 = 196,4 \angle 22^\circ \Rightarrow \delta = 22^\circ$$

calcul du module de E_f

$$\theta = 90^\circ - (\varphi + \delta) = 90^\circ - (36,9^\circ + 22^\circ) = 31,1^\circ$$

$$I_d = I_a \cos(\theta) = 13,12 \cos(31,1^\circ) = 11,23 \text{ A}$$

$$E_f = E \cos(\delta) + X_d I_d = (127) \cos(22^\circ) + (12,0)(11,23) \approx 253 \text{ V}$$

Question 2 (6 points)

La plaque signalétique d'un moteur synchrone, à pôles lisses, donne les valeurs suivantes: 1000 hp, 2300 V (ligne-ligne), 60 Hz, trois phases raccordées en Y; de plus, la réactance synchrone fait 1,9 Ω /phase et la résistance d'induit peut être négligée. Lors d'un essai à tension et charge nominales, on mesure des pertes en rotation de 18 kW.

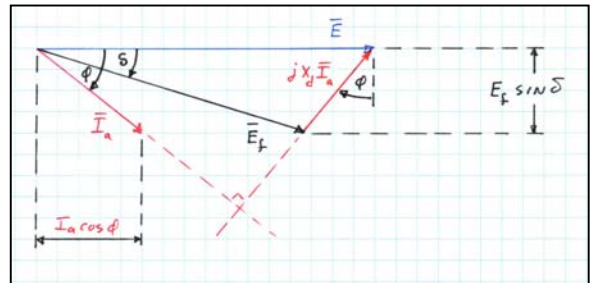
- a) (2,0) Donnez les étapes essentielles du développement analytique (diagramme vectoriel à l'appui) pour trouver la tension d'excitation du moteur et son angle de puissance.

En consultant le diagramme, on a que

$$\underline{E}_f = \underline{E} - j X_d \underline{I}_a$$

alors

$$E_f \angle \delta = E \angle 0^\circ - j X_d I_a \angle \varphi$$



- b) (1,0) À une opération à tension et charge nominales, quelle serait la tension d'excitation pour obtenir un facteur de puissance de 0,8 (inductif)?

Tension nominale
$$E_{nom} = \frac{2300}{\sqrt{3}} = 1328 \text{ V}$$

Puissance électrique d'entrée
$$P_1 = (1000 \times 746) + 18 \cdot 10^3 = 764 \text{ kW}$$

Courant d'induit
$$I_a = \frac{P_1}{3 E_{nom} (FP)} = \frac{764 \cdot 10^3}{3(1328)(0,8)} \approx 240 \text{ A}$$

Tension d'excitation

$$E_{f1} \angle \delta_1 = 1328 - j(1,9)(240)(0,8 - j0,6) = 1055 - j364 = 1116 \angle -19^\circ$$

- c) (1,0) Refaites la question b) pour un facteur de puissance de 0,8 (capacitif).

$$E_{f2} \angle \delta_2 = 1328 - j(1,9)(240)(0,8 + j0,6) = 1601 - j364 = 1642 \angle -12,8^\circ$$

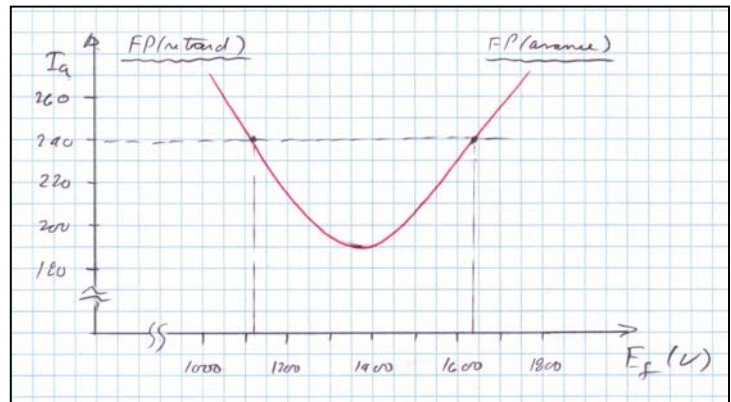
- d) (1,0) Refaites la question b) pour un facteur de puissance unitaire.

$$E_{f3} \angle \delta_3 = 1328 - j(1,9)(192) = 1328 - j364 = 1377 \angle -15,4^\circ$$

- e) (1,0) Tracez la caractéristique de courbe en V associée aux différentes conditions d'opération évaluées en b), c) et d). Commentez sur l'utilité de cette caractéristique...

Commentaire:

La caractéristique de la courbe en V sert de guide dans le réglage du facteur de puissance du moteur; chaque courbe en V correspond à un niveau de puissance de charge; à facteur de puissance unitaire, le moteur opère à courant d'induit minimal, minimisant ainsi les pertes joules; le moteur synchrone peut également servir de compensateur réactif pour d'autres charges branchées sur le réseau.



Question 3 (5 points)

Un alternateur synchrone triphasé, à pôles lisses, possède les caractéristiques suivantes: 15 kVA, 220 V, six pôles, trois phases raccordées en Y; les courbes caractéristiques de magnétisation, de court-circuit et de courant nominal à facteur de puissance nul sont présentées à la Fig.1. La résistance d'induit est négligeable. On opère cet alternateur à puissance nominale et à facteur de puissance unitaire.

- a) (2,0) Déterminez les valeurs en ohms et en pu de la réactance de fuite, de la réactance de magnétisation et de la réactance synchrone saturée. Expliquez votre démarche.

Tension nominale
$$E_{nom} = \frac{220}{\sqrt{3}} = 127 \text{ V}$$

Courant nominal
$$I_{nom} = \frac{S_{nom}}{\sqrt{3}E_{ll,nom}} = \frac{15 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 220} = 39,36 \text{ A}$$

Par construction du triangle de Potier

$$X_p = \frac{162 - 127}{39,36} = 0,89 \Omega$$

De la droite de court-circuit, à un courant de 39 A, on obtient sur la ligne d'entrefer une tension de 131 V, d'où

$$X_{d,NS} = \frac{131}{39} = 3,36 \Omega$$

On trace la droite de magnétisation qui rencontre la courbe de magnétisation à la tension E_r

$$\bar{E}_r = \bar{E}_{nom} + j X_p \bar{I}_{nom} = 127 + j(0,89)(39,36) = 127 + j35 = 132 \angle 15,4^\circ$$

Coefficient de saturation, calculé à la tension de 131 V
$$k = \frac{4,5}{4,0} = 1,125$$

Réactance saturée de magnétisation
$$X_{\phi,S} = \frac{X_{d,NS} - X_p}{k} = \frac{3,36 - 0,89}{1,125} \approx 2,20 \Omega$$

Réactance synchrone saturée

$$X_{d,S} = X_p + X_{\phi,S} = 0,89 + 2,20 \approx 3,1 \Omega$$

Valeurs réduites

$$Z_{base} = \frac{E_{ll,nom}^2}{S_{nom}} = \frac{(220)^2}{15 \cdot 10^3} = 3,23 \Omega \quad X_{P,pu} = \frac{0,89}{3,23} = 0,28 \quad X_{\phi,pu} = \frac{2,20}{3,23} = 0,68 \quad X_{d,pu} = \frac{3,1}{3,23} = 0,96$$

b) (2,0) Calculez, à l'aide de la méthode de la réactance synchrone saturée, le courant d'excitation nécessaire pour rencontrer les conditions d'opération.

$$\bar{E}'_f = \bar{E}_{nom} + j X_{d,s} \bar{I}_{nom} = 127 + j(3,1)(39,36) = 127 + j122 = 176 \angle 43,8^\circ$$

Avec $E'_f = 176V$ et la droite de magnétisation, on trouve un courant d'excitation $I_f \approx 6,0 A$.

À $I_f = 6,0 A$ correspond sur la courbe de magnétisation une tension réelle d'excitation $E_{f,réel} \approx 155V$.

c) (1,0) Tracez le diagramme vectoriel des tensions et du courant de la machine correspondant aux conditions d'opération de b).

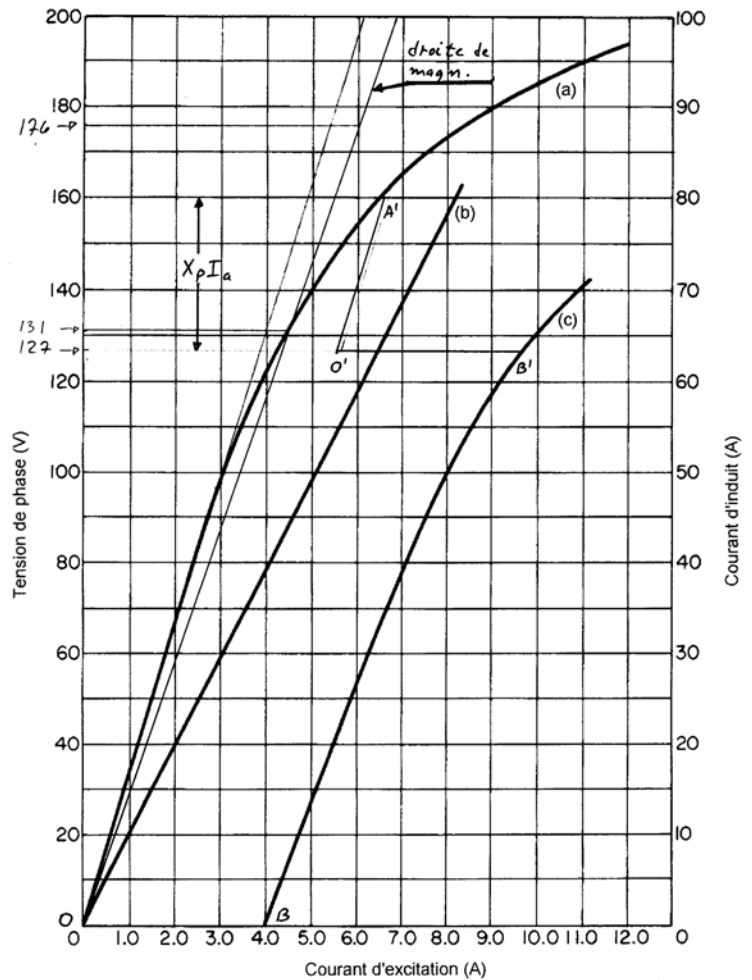
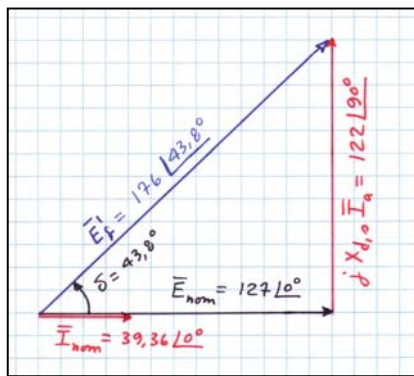


Fig. 1. Caractéristiques de la machine synchrone triphasée de la question no.3.

Question 4 (5 points)

a)(1,5) Expliquez comment il est possible de générer un couple électromagnétique dans une machine asynchrone à cage.

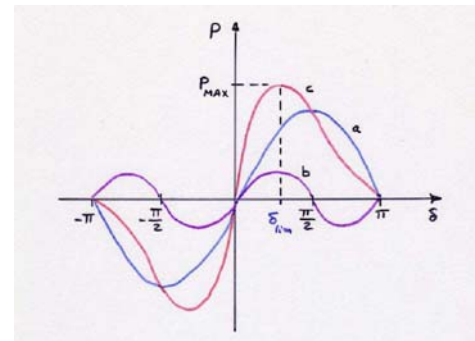
Une machine asynchrone à cage est une machine cylindrique à pôles lisses. Dans une machine élémentaire à pôles lisses, on peut démontrer que le couple électromagnétique produit est donné par l'expression ci-contre. Pour qu'il y ait production du couple, il faut que les deux FMM, qui tournent à des vitesses respectives par rapport à leurs enroulements, occupent une position stationnaire l'une par rapport à l'autre. Dans la machine asynchrone, la FMM du stator (F_s) tourne à la vitesse synchrone ω_s ; le courant induit dans le rotor qui tourne à $(1-g)\omega_s$ circule à une fréquence de $g\omega_s$ par rapport aux enroulements du rotor; toutefois, en tenant compte de la vitesse de rotation du rotor, la FMM du rotor tourne à une vitesse de ω_s par rapport au stator; ainsi, le critère de statisme entre les deux FMM est rencontré.

$$T_e = -\frac{4L_{sr,\max}}{N_{se}N_{re}} F_s F_r \sin \delta$$

b)(1,5) Dans une machine synchrone à pôles saillants, la caractéristique du couple en fonction de l'angle de puissance ne possède pas une allure sinusoïdale; expliquez-en la raison.

Dû à la forme en saillie des pôles, il existe une variation de l'inductance propre du stator en fonction de l'angle mécanique tourné par le rotor; cette variation d'inductance propre du stator engendre un couple de réluctance (a) qui s'additionne au couple d'inductance mutuelle (b).

$$T_e = \frac{i_s^2}{2} \frac{dL_{ss}}{d\theta} + i_s i_r \frac{dL_{sr}}{d\theta}$$



c)(2,0) Dans l'étude de la machine généralisée, la tension de f.é.m. d'une bobine quelconque (e_i) du circuit est causée par deux phénomènes distincts se produisant dans la machine même; expliquez sommairement (1 page max.) la nature de ces deux phénomènes.

En référence à l'étude de la machine généralisée, la tension de f.é.m. d'une bobine quelconque (e_i) du circuit s'exprime de façon plus détaillée comme suit:

$$e_i = -\frac{d\phi_i}{dt} = -\left(L_i \frac{di_i}{dt} + \sum M_{ik} \frac{di_k}{dt} \right) - \left(\frac{dL_i}{dt} i_i + \sum \frac{dM_{ik}}{dt} i_k \right)$$

La première partie du membre de droite de cette équation traduit la f.é.m. due aux variations temporelles de courant traversant les différentes bobines (f.é.m. de transformation); la seconde partie du membre de droite est causée par le déplacement relatif de la bobine par rapport aux autres qui lui sont associées dans le circuit (f.é.m. de rotation).