

Exercice 1 (10 points)

Un **transformateur triphasé** a été soumis à 2 essais :

- Essai à vide: $U_{1v} = 15\text{kV} = U_{1n}$; $U_{2v} = 216\text{V}$; $P_{1v} = 2250\text{W}$
- Essai en court-circuit : $U_{1cc} = 430\text{V}$; $I_{2cc} = 1390\text{A}$; $P_{1cc} = 5410\text{W}$

- 1) Calculer le rapport de transformation m et le courant I_{1cc} .
- 2) Déterminer les éléments R_f , R_s et X_s du schéma équivalent ramené au secondaire.
- 3) Calculer la tension secondaire V_2 quand le transformateur débite un courant de $I_2 = 1620\text{A}$ dans trois résistances identiques R montées en étoile. En déduire R .
- 4) Pour quelle valeur de courant $I_{2\text{max}}$ le rendement est-il maximum ?
- 5) Quels sont alors, dans ce dernier cas, la nouvelle tension V_2 secondaire et le rendement η_{max} pour un récepteur avec un facteur de puissance $\cos\varphi = 0,75$.

Exercice 2 (10 points)

Un **alternateur triphasé** dont les enroulements du stator sont couplés en étoile, fournit en charge normale un courant d'intensité efficace $I = 200\text{A}$ sous une tension efficace entre phases $U = 5\text{kV}$ ($f = 50\text{Hz}$) lorsque la charge est inductive ($\cos\varphi = 0,87$). La résistance d'un enroulement du stator est égale à $R_s = 0,2\Omega$. La résistance des enroulements du rotor est $r = 50\Omega$. La vitesse de rotation du rotor est $n = 750\text{tr/mn}$. Les pertes dites "collectives ou constantes" sont évaluées $P_c = 70\text{kW}$

Un **essai à vide** a permis d'établir que $E = 60,6i$ avec :

i est l'intensité du courant d'excitation en Ampères et E la valeur efficace par **phases** en Volts.

Un **essai en court-circuit** a donné, pour un courant d'excitation rotor d'intensité $i = 40\text{A}$, un courant dans les enroulements du stator d'intensité $I_{cc} = 250\text{A}$.

- 1) Quel est le nombre de pôles du rotor ?
- 2) Calculer la réactance synchrone X_S de l'alternateur.
- 3) Trouver la f.é.m. synchrone E en charge nominale. En déduire l'impédance de la charge Z_c .
- 4) Quelles sont les pertes joules stators P_{js} et les pertes joules rotor P_{jr} . Calculer la puissance P_u nominale.
- 5) Calculer la puissance absorbée P_a de l'alternateur. En déduire le rendement au fonctionnement nominal.
Dans ces conditions en déduire la puissance P_{mec} reçu.

Exercice 3 (10 points)

On lit sur la plaque signalétique d'un **moteur asynchrone triphasé** $380\text{V}/660\text{V}$ $\cos\varphi = 0,8$. (On rappelle que la **première tension** indiqué sur cette plaque correspond à la tension nominale aux **bornes d'un enroulement**).

La résistance mesurée entre phases au stator vaut $R_s = 1\Omega$. On branche le moteur sur le réseau $220\text{V}/380\text{V}$ 50Hz .

- 1) Quel doit être le couplage du moteur sur le réseau (dessiner le schéma des 2 montages)
- 2) Lors d'un essai à vide sous tension nominale, on mesure $P_v = 490\text{W}$, $I_v = 6\text{A}$ et $n_v = 1000\text{tr/min}$.
Quel est le nombre de pôles du stator ?
Calculer les pertes joules statorique P_{js} , les pertes fer P_{fer} et les pertes mécaniques p_m (On suppose que $P_{\text{fer}} = p_m$).
- 3) Lors d'un essai en charge nominale on relève $I = 14\text{A}$, $C_u = 65\text{Nm}$ et $n = 960\text{tr/min}$.
Calculer le glissement g , la puissance utile P_u , la puissance absorbée P_a et le rendement η .
- 4) En supposant la caractéristique $C_u(n)$ linéaire dans la partie utile, déterminer l'équation $C_u(n)$,
 C_u en Nm et n en tr/min.
- 5) Le moteur entraîne une charge dont le couple résistant vaut $C_r(n) = 20 + 0,04n$ avec C_r en Nm et n en tr/min.
En régime établi : $C_u(n) = C_r(n)$, déterminer la vitesse de rotation de l'ensemble ainsi que le couple utile du moteur.

Exercice 4 (10 points)

Un **moteur à courant continu à aimants permanents** a les caractéristiques suivantes :

La f.e.m. est établit expérimentalement : $E = n/500$ (E en V) et n : vitesse de rotation en tr/min) ;

La résistance de l'induit $R = 2\Omega$ et les pertes collectives $P_c = 2\text{W}$.

- 1) A vide, le moteur est alimenté avec une tension $U = 12\text{V}$, et consomme un courant $I_v = 0,5\text{A}$. Calculer sa fem E_v et en déduire sa vitesse de rotation n_v .
- 2) En charge le moteur consomme un courant $I = 1,5\text{A}$.
Calculer : la puissance absorbée P_a , les pertes Joule P_j , la puissance utile P_u et le rendement η .
Calculer la f.e.m E , la vitesse de rotation n , le couple utile C_u , la puissance électromécanique P_{em} , le couple électromécanique C_{em} et le couple des pertes collectives C_c .
- 3) Montrer que le couple électromécanique : $C_{\text{em}}(\text{en Nm}) = 19 \cdot 10^{-3} I$ (I en A).
- 4) Calculer le courant au démarrage I_d . En déduire le couple électromécanique de démarrage.
- 5) Le moteur tourne sous tension nominale. Que se passe-t-il si un problème provoque blocage du rotor ?

Réponse 1

1) $m = U_{2v}/U_1 = I_1/I_2 = 216 / 15000 = \mathbf{0,0144}$ *1/2pt*

$I_{1cc} = m I_{2cc} = 0,0144 \cdot 1390 = \mathbf{20A}$ *1/2pt*

2) $P_{1v} = P_{jfer} = 3V_1^2/R_f = P_{jfer} = 2250W \rightarrow R_f = 3 \cdot 15000^2/2250 = \mathbf{300k\Omega}$ *1pt*

$P_{1cc} = P_{jb} = 5410W = 3R_s I_{2cc}^2 \rightarrow R_s = 5410/3 \cdot 1390^2 = \mathbf{0,933m\Omega}$ *1pt*

$V_{2cc} = mV_{1cc} = mU_{1cc}/\sqrt{3} = 0,0144 \cdot 430/\sqrt{3} = 3,57V$

$V_{2cc} = Z_s I_{2cc} \rightarrow Z_s = 3,5/1390 = 2,5m\Omega$ *1/2pt*

$Z_s = R_s + jX_s \rightarrow X_s = \sqrt{(Z_s^2 - R_s^2)} = \sqrt{(2,5^2 - 0,93^2)} = \mathbf{2,3m\Omega}$ *1/2pt*

3) $\bar{V}_{2v} = \Delta\bar{V} + \bar{V}_2$

$\Delta\bar{V} = \bar{Z}_s \bar{I}_2$ (circuit série, même courant) $\rightarrow \bar{I}_2 = I_2$

$\bar{Z}_s = R_s I_2 + jX_s I_2$ $\bar{V}_2 = \bar{Z}_c I_2 = R I_2 = V_2$

$\bar{V}_{2v} = R_s I_2 + V_2 + jX_s I_2$ *1/2pt*

$U_{2v} = 216V \rightarrow V_{2v} = 216/\sqrt{3} = 124,7V$

$V_{2v}^2 = (R_s I_2 + V_2)^2 + X_s I_2^2 \rightarrow (124,7)^2 = (0,00093 \cdot 1620 + V_2)^2 + (0,0023 \cdot 1620)^2$

$\rightarrow V_2 + 0,00093 \cdot 1620 = \sqrt{[(124,7)^2 - (0,0023 \cdot 1620)^2]} = 124,6V$

$\rightarrow V_2 = 124,6 - 0,00093 \cdot 1620 = \mathbf{123V}$ *1,5pt*

$V_2 = R I_2 \rightarrow R = 123/1620 = \mathbf{76m\Omega}$ *1/2pt*

4) $\eta_{max} \rightarrow P_j = P_f = 3R_s I_{2max}^2 = P_{1v} = 2250W$

$\rightarrow I_{2max} = \sqrt{(P_{1v}/3R_s)} = \sqrt{[2250 \cdot 10^3/3/0,93]} = \mathbf{898A}$ *1pt*

5) Formule approchée: $V_{2v} = V_2 + \Delta V$ et $\Delta V = (R_s \cos\phi + X_s \sin\phi) I_{2max}$

$\cos\phi = 0,75 \rightarrow \sin\phi = 0,66$

$\rightarrow V_2 = V_{2v} - (R_s \cos\phi + X_s \sin\phi) I_{2max} = 123 - (0,93 \cdot 0,75 + 2,3 \cdot 0,66) \cdot 10^{-3} \cdot 898 = \mathbf{121V}$ *1,5pt*

$P_2 = 3V_2 I_{2max} \cos\phi = 3 \cdot 121 \cdot 898 \cdot 0,75 = \mathbf{244,5kW}$ *1/2pt*

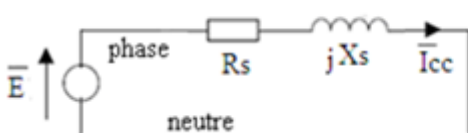
$\eta = P_2/P_1$, $P_1 = P_2 + \text{pertes}$, $\text{pertes} = P_j + P_f$

lorsque $P_j = P_f \rightarrow \eta_{max} = P_2/(P_2 + 2P_f) = 244,5/(244,5 + 2 \cdot 2,25) = \mathbf{98\%}$ *1/2pt*

Réponse 2

1) $f = p \cdot n \Rightarrow p = 50 \cdot 60 / 750 = 4 \text{ dipôles} \Rightarrow 8 \text{ pôles}$ *1pt*

2) en court-circuit



$\bar{E} = \bar{Z}_s \bar{I}_{cc}$

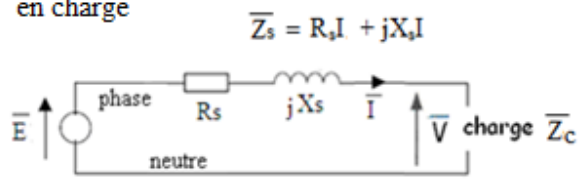
$Z_s = \sqrt{R_s^2 + X_s^2}$

$\rightarrow X_s = \sqrt{\left(\frac{E}{I_{cc}}\right)^2 - (R_s)^2}$ *1pt*

$$E = 60,6 i \quad , \quad i = 40 \text{ A} \Rightarrow E = 2424 \text{ V} \quad \frac{1}{2} \text{ pt}$$

$$X_s = L\omega = [(2424 / 250)^2 - 0,2^2]^{1/2} = 9,65 \Omega \quad 1 \text{ pt}$$

3) en charge



$$\begin{aligned} \bar{E} &= \bar{Z}_s \bar{I} + \bar{V} \\ (\text{circuit s\u00e9rie, m\u00eame courant}) &\rightarrow \bar{I}_2 = I_2 \\ \bar{V} &= \bar{Z}_c \bar{I} \rightarrow \bar{V} = V e^{j\varphi} = V \cos\varphi + j V \sin\varphi \end{aligned}$$

$$\bar{E} = R_s I + j X_s I + V \cos\varphi + j V \sin\varphi \rightarrow E^2 = (R_s I + V \cos\varphi)^2 + (X_s I + V \sin\varphi)^2 \quad 1 \text{ pt}$$

$$V = U/\sqrt{3} = 5000 / \sqrt{3} = 2886,8 \text{ V}$$

$$\cos\varphi = 0,87 \Rightarrow \sin\varphi = 0,49$$

$$E = [(0,2 \cdot 200 + 2886,8 \cdot 0,87)^2 + (9,65 \cdot 200 + 2886,8 \cdot 0,49)^2]^{1/2} = 4206,6 \text{ V} \quad 1 \text{ pt}$$

$$V = Z_c I \rightarrow Z_c = 2886,8 / 200 = 14,4 \Omega \quad \frac{1}{2} \text{ pt}$$

$$4) P_{jr} = r i^2 = 50 \cdot 40^2 = 80 \text{ kW} \quad \frac{1}{2} \text{ pt}$$

$$P_{js} = 3 R_s I^2 = 3 \cdot 0,2 \cdot (200)^2 = 24 \text{ kW} \quad \frac{1}{2} \text{ pt}$$

$$P_u = \sqrt{3} U I \cos\varphi = \sqrt{3} \cdot 5000 \cdot 200 \cdot 0,87 = 1507 \text{ kW} \quad \frac{1}{2} \text{ pt}$$

$$5) P_a = P_u + \text{pertes}$$

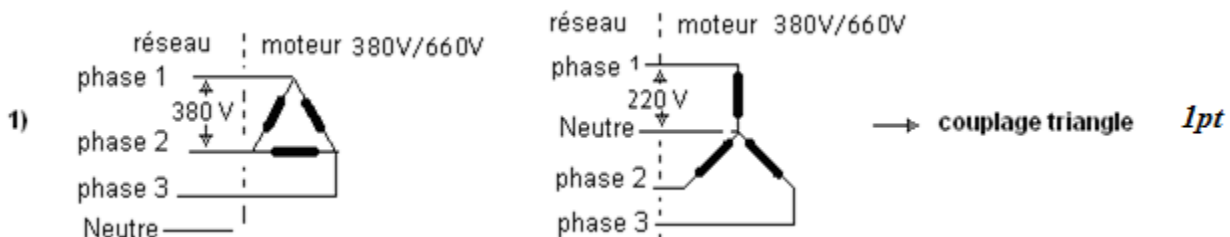
$$P_a = P_u + \text{pertes} \quad , \quad \text{pertes} = P_{js} + P_{jr} + P_c = 24 + 80 + 70 = 174 \text{ kW}$$

$$P_a = 1507 + 174 = 1681 \text{ kW}$$

$$\eta = P_u / P_a = 1507 / 1681 = 89 \% \quad \frac{1}{2} \text{ pt}$$

$$P_a = P_{\text{m\u00e9c}} + P_{jr} \rightarrow P_{\text{m\u00e9c}} = 1681 - 80 = 1601 \text{ kW} \quad 1 \text{ pt}$$

R\u00e9ponse 3



$$2) f = n_s p \quad , \quad n_s = n_v \rightarrow p = f / n_s = 50 / 1000 / 60 = 3 \text{ dip\u00f4les} \rightarrow 6 \text{ p\u00f4les} \quad \frac{1}{2} \text{ pt}$$

$$\text{Couplage triangle} \quad P_{jsv} = 3 R_s J^2 \quad , \quad J = I / \sqrt{3} \rightarrow P_{jsv} = R_s I^2 = 1 \cdot 6^2 = 36 \text{ W} \quad 1 \text{ pt}$$

$$\text{\u00e0 vide} \quad P_{jrv} = 0 \rightarrow P_v = P_{jsv} + P_f + p_m = 490 \text{ W}$$

$$P_f = p_m \rightarrow P_v = P_{jsv} + 2P_f \rightarrow P_f = p_m = (490 - 36) / 2 = 227 \text{ W} \quad 1 \text{ pt}$$

$$3) g = (1000 - 960) / 1000 = 4 \% \quad \frac{1}{2} \text{ pt}$$

$$P_2 = P_u = C_u \cdot \Omega = C_u \cdot 2\pi \cdot n = 65 \cdot 2\pi \cdot 960 / 60 = 6534,5 \text{ W} \quad 1 \text{ pt}$$

$$P_1 = P_a = \sqrt{3} U I \cos\varphi = \sqrt{3} \cdot 380 \cdot 14 \cdot 0,8 = 7371,4 \text{ W} \quad 1 \text{ pt}$$

$$\eta = P_2 / P_1 = 6534,5 / 7371,4 = 88 \% \quad \frac{1}{2} \text{ pt}$$

$$4) C_u(n) = a n + b$$

$$C_u(n = n_v = 1000) = 0 = a1000 + b \quad (1)$$

$$C_u(n = 960) = 65 = a960 + b \quad (2)$$

$$(1) - (2) \rightarrow a(1000 - 960) = 0 - 65 = 40a; \quad a = -65/40 = -1,625$$

$$(2) \rightarrow b = -1000a = 1625 \quad \rightarrow \quad C_u(n) = -1,6n + 1625 \quad 1,5pt$$

$$5) C_r(n) = 20 + 0,04 n$$

$$\text{Régime établi} \rightarrow C_r(n) = 20 + 0,04 n = C_u(n) = -1,6 n + 1625$$

$$\rightarrow n(1,6 + 0,04) = 1625 - 20 = 1605 \quad \rightarrow \quad n = 1605/1,64 = 978,6 \text{tr/min} \quad 1pt$$

$$C_u(n=978,6) = C_r(n=978,6) = 20 + 0,04 \cdot 978,6 = 59 \text{Nm} \quad 1pt$$

Réponse 4

$$1) \text{ moteur } U = E + RI \quad \rightarrow \quad E_v = U - RI_v = 12 - 2 \cdot 0,5 = 11V \quad 1/2pt$$

$$E = n/500 \quad \rightarrow \quad n_v = 500 E_v = 500 \cdot 11 = 5500 \text{tr/min} \quad 1/2pt$$

$$2) P_a = P_e + P_{js}, \quad \text{excitation à aimant permanent} \rightarrow P_{js} = 0$$

$$P_a = P_e = UI = 12 \cdot 1,5 = 18W \quad 1/2pt$$

$$P_j = P_{jr} = RI^2 = 2 \cdot 1,5^2 = 4,5W \quad 1/2pt$$

$$P_u = P_a - \text{pertes}, \quad \text{pertes} = P_j + P_c \quad \rightarrow \quad P_u = 18 - 4,5 - 2 = 11,5W \quad 1/2pt$$

$$\eta = P_u/P_a = 11,5/18 = 63,8 \% \quad 1/2pt$$

$$E = U - RI = 12 - 2 \cdot 1,5 = 9V \quad 1/2pt$$

$$n = 500 E = 500 \cdot 9 = 4500 \text{tr/min} \quad 1/2pt$$

$$P_u = C_u \Omega \quad \rightarrow \quad C_u = 11,5 \cdot 60 / 4500 \cdot 2\pi = 24,4 \cdot 10^{-3} \text{Nm} \quad 1/2pt$$

$$P_{em} = EI = 9 \cdot 1,5 = 13,5W \quad 1/2pt$$

$$P_{em} = C_{em} \Omega \quad \rightarrow \quad C_{em} = 13,5 \cdot 60 / 4500 = 28,6 \cdot 10^{-3} \text{Nm} \quad 1pt$$

$$P_{em} = C_{em} \Omega = P_u + P_c = C_u \Omega + C_c \Omega \quad 1/2pt$$

$$\rightarrow C_c = C_{em} - C_u = (28,6 - 24,4) \cdot 10^{-3} = 4,2 \cdot 10^{-3} \text{Nm} \quad 1/2pt$$

$$\text{Ou bien } P_c = C_c \Omega \quad \rightarrow \quad C_c = P_c / 2\pi n = 2 \cdot 60 / 2\pi \cdot 4500 = 4,2 \cdot 10^{-3} \text{Nm}$$

$$3) C_{em} = k\Phi I, \quad \text{Le flux est constant (car moteur à aimants permanents)}$$

$$k\Phi = C_{em}/I = 28,6 \cdot 10^{-3} / 1,5 = 19 \cdot 10^{-3} \quad 1pt$$

$$\text{Ou bien } E = K \Phi \Omega \quad \rightarrow \quad k\Phi = E/\Omega = 9 / 2\pi \cdot 4500 = 0,019$$

$$\rightarrow \quad C_{em} = 19 \cdot 10^{-3} I \quad 1/2pt$$

$$4) \text{ au démarrage } n = 0 \quad E = 0 \quad \rightarrow \quad U = E + RI = RI_d \quad I_d = U/R = 12/2 = 6A \quad 1/2pt$$

$$C_{emd} = 19 \cdot 10^{-3} \cdot 6 = 114 \cdot 10^{-3} \text{Nm} \quad 1/2pt$$

$$5) \text{ blocage du rotor } \rightarrow n = 0 \quad \text{et } I_d = 6A \gg 1,5A = I_n \quad \text{en permanence : le moteur « grille » } 1/2pt$$