

ÉLECTROTECHNIQUE – ELE 3400

Contrôle périodique – Automne 2012 – Le 1 novembre 2012

Notes: 1) Durée: 2h30 (8h45 – 11h15)
2) Toute documentation permise:
3) Calculatrice programmable permise
4) Aucun accès au web. Les ordinateurs ne sont pas permis.
5) Ce questionnaire contient trois (3) pages
6) VOUS DEVEZ REMETTRE LE QUESTIONNAIRE EN MÊME TEMPS QUE VOTRE CAHIER DE RÉPONSE À LA FIN DE L'EXAMEN

Question 1 (3,5 points)

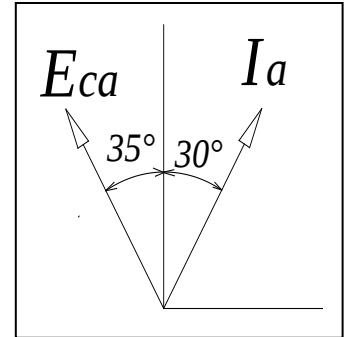
- a) (0,5) Quelle classe de matériaux forme la base de la discipline de l'électrotechnique et a permis la réalisation des infrastructures électriques de grande envergure que l'on connaît aujourd'hui?
- b) (0,5) Pourquoi utilise-t-on un empilement de tôles minces pour former le noyau magnétique des transformateurs de puissance et des machines électriques?
- c) (0,5) Quelles sont les deux topologies d'interconnexion de base de la source et/ou de la charge dans un système triphasé équilibré?
- d) (0,5) Donnez deux avantages d'utiliser des circuits triphasés plutôt que monophasés?
- e) (0,5) Un transformateur monophasé de 100 kVA, 50 Hz, 25 kV / 240 V, sera-t-il plus gros ou plus petit qu'un transformateur équivalent opérant à 60 Hz?
- f) (0,5) Hydro-Québec utilise une tension de distribution triphasée de 26,4 kV à la sortie de ses postes. D'après vous, s'agit-il d'une tension de ligne ou d'une tension de phase?
- g) (0,5) En une ou deux lignes de texte (pas plus!), définissez la notion de puissance réactive.

Solution 1

- a) (0.5) Ferromagnétiques
- b) (0.5) Minimiser les pertes dues aux courants de Foucault
- c) (0.5) Étoile et triangle
- d) (0.5) utilisation optimale des circuits magnétiques, moins de cuivre en transport d'énergie, puissance constante (indépendante du temps)
- e) (0.5) 50 Hz plus gros
- f) (0.5) Tensions LL.
- g) (0.5) Composition libre!

Question 2 (2 points)

Une source triphasée équilibrée 347-600 V alimente une charge équilibrée. Le diagramme ci-contre vous donne un des phaseurs de tension et un des phaseurs de courant. La tension a une valeur efficace de 600 V et le courant de 12 A. La séquence de phase est directe.



- a) (1,0) Cette charge est-elle de nature inductive, résistive ou capacitive?
 b) (1,0) Quelle puissance réelle consomme-t-elle?

Solution 2

2 a) (1.0) Si E_{ca} est à $+125$ degrés, E_{ab} est à 5 degrés. E_{an} est à -25 degrés. I_a est à 60 degrés. Donc, charge capacitive!

2 b) (1.0)

$$P := \sqrt{3} \cdot 600V \cdot 12A \cdot \cos[(60 + 25)\text{deg}] = 1.087 \times 10^3 \text{ W}$$

$$P = 1.087 \times 10^3 \text{ W}$$

Question 3 (5,5 points)

Une source triphasée équilibrée 120-208V alimente un moteur et une charge d'éclairage fluorescent. Le moteur appelle de la source des courants de 100 A. Le facteur de puissance du moteur est de 0,92. La charge d'éclairage consiste en 900 fluorescents consommant chacun 30 W et 12 var. Les fluorescents sont répartis uniformément entre les trois phases et sont alimentés à 120 V. Prenez $E_{an} = 120 \angle 0^\circ$ V.

- (1,0) Déterminez la phase des trois courants du moteur, de même que l'amplitude et la phase des courants dans les fluorescents.
- (1,0) Quelle est la puissance apparente, la puissance réelle et réactive vue de la source?
- (1,0) Quels sont les courants de source (valeur efficace et phase)?
- (1,0) Vous ajoutez des condensateurs pour améliorer le facteur de puissance de la source à 0,97. Quelle est la capacité nominale des condensateurs, s'ils sont raccordés en étoile?
- (1,0) Quelle est la valeur efficace des courants de ligne avant et après compensation?
- (0,5) Quelles sont les conséquences d'un mauvais facteur de puissance i) pour le client, et ii) pour la compagnie d'électricité? Qui entre les deux y gagne le plus à corriger le facteur de puissance?

Solution 3**3 a) (1.0)**

Courants du moteur

$$a := -0.5 + \frac{\sqrt{3}}{2}j$$

$$\text{Phia} := -\text{acos}(0.92) \quad \text{Phia} = -23.074 \text{ deg}$$

$$\text{Phib} := \text{Phia} - 120 \text{ deg} \quad \text{Phib} = -143.074 \text{ deg}$$

$$\text{Phic} := \text{Phia} + 120 \text{ deg} \quad \text{Phic} = 96.926 \text{ deg}$$

$$\text{Iam} := 100 \cdot \cos(\text{Phia}) + 100j \cdot \sin(\text{Phia}) \quad \text{Iam} = 92 - 39.192i \quad |\text{Iam}| = 100 \quad \arg(\text{Iam}) = -23.074 \text{ deg}$$

$$\text{Ibm} := 100 \cdot \cos(\text{Phib}) + 100j \cdot \sin(\text{Phib}) \quad \text{Ibm} = -79.941 - 60.078i \quad |\text{Ibm}| = 100 \quad \arg(\text{Ibm}) = -143.074 \text{ deg}$$

$$\text{Icm} := 100 \cdot \cos(\text{Phic}) + 100j \cdot \sin(\text{Phic}) \quad \text{Icm} = -12.059 + 99.27i \quad |\text{Icm}| = 100 \quad \arg(\text{Icm}) = 96.926 \text{ deg}$$

Courants des fluorescents

$$\text{Iflua} := \left[300 \cdot \frac{(30 + j \cdot 12)}{120} \right]^* \quad \text{Iflua} = 75 - 30i \quad |\text{Iflua}| = 80.777 \quad \arg(\text{Iflua}) = -21.801 \text{ deg}$$

$$\text{Iflub} := \text{Iflua} \cdot a^2 \quad \text{Iflub} = -63.481 - 49.952i \quad |\text{Iflub}| = 80.777 \quad \arg(\text{Iflub}) = -141.801 \text{ deg}$$

$$\text{IfLuc} := \text{Iflua} \cdot a \quad \text{IfLuc} = -11.519 + 79.952i \quad |\text{IfLuc}| = 80.777 \quad \arg(\text{IfLuc}) = 98.199 \text{ deg}$$

3 b) (1.0)

Courants de la source

$$\text{Ia} := \text{Iam} + \text{Iflua}$$

$$\text{Ia} = 167 - 69.192i \quad |\text{Ia}| = 180.766 \quad \arg(\text{Ia}) = -22.505 \text{ deg}$$

$$\text{Ib} := \text{Ibm} + \text{Iflub}$$

$$\text{Ib} = -143.422 - 110.03i \quad |\text{Ib}| = 180.766 \quad \arg(\text{Ib}) = -142.505 \text{ deg}$$

$$\text{Ic} := \text{Icm} + \text{IfLuc}$$

$$\text{Ic} = -23.578 + 179.222i \quad |\text{Ic}| = 180.766 \quad \arg(\text{Ic}) = 97.495 \text{ deg}$$

3 c) (1.0)

Puissance totale; deux solutions: par la puissance des charges ou par les courants

$$S_{\text{mot}} := \sqrt{3} \cdot 100 \cdot 208 \cdot \cos(-\phi_{\text{ia}}) + \sqrt{3} \cdot 100 \cdot 208 \cdot \sin(-\phi_{\text{ia}}) \cdot j$$

$$S_{\text{mot}} = 3.314 \times 10^4 + 1.412i \times 10^4$$

$$S_{\text{fluo}} := 900 \cdot (30 + j \cdot 12)$$

$$S_{\text{fluo}} = 2.7 \times 10^4 + 1.08i \times 10^4$$

$$S_{\text{source}} := S_{\text{mot}} + S_{\text{fluo}}$$

$$S_{\text{source}} = 6.014 \times 10^4 + 2.492i \times 10^4$$

$$|S_{\text{source}}| = 6.51 \times 10^4$$

$$SS_{\text{source}} := \sqrt{3} \cdot |I_{\text{a}}| \cdot 208 \cdot \cos(-\arg(I_{\text{a}})) + \sqrt{3} \cdot |I_{\text{a}}| \cdot 208 \cdot \sin(-\arg(I_{\text{a}})) \cdot j$$

$$SS_{\text{source}} = 6.016 \times 10^4 + 2.493i \times 10^4$$

La différence est due au fait que 208 n'est pas exactement $1.73 \dots \times 120$

3 d) (1.0)

Correction du facteur de puissance par l'ajout de condensateurs en étoile

$$P_{\text{permis}} := \text{Re}(S_{\text{source}})$$

$$P_{\text{permis}} = 6.014 \times 10^4$$

$$Q_{\text{permis}} := j \cdot P_{\text{permis}} \cdot \tan(\arccos(0.97))$$

$$Q_{\text{permis}} = 1.507i \times 10^4$$

$$Q_{\text{comp}} := -(j \cdot \text{Im}(S_{\text{source}}) - Q_{\text{permis}})$$

$$Q_{\text{comp}} = -9.846i \times 10^3$$

Donc -3.3 kvar par phase. Le signe - indique un condensateur.

$$C_{\text{comp}} := \frac{Q_{\text{comp}}}{-3 \cdot j \cdot 120^2 \cdot 2\pi \cdot 60}$$

$$C_{\text{comp}} = 6.046 \times 10^{-4}$$

3 condensateurs de 605 uF à 120V

3 e) (1.0)

Courant de ligne après compensation

$$S_{\text{comp}} := P_{\text{permis}} + Q_{\text{permis}}$$

$$S_{\text{comp}} = 6.014 \times 10^4 + 1.507i \times 10^4$$

$$I_{\text{comp}} := \frac{|S_{\text{comp}}|}{\sqrt{3} \cdot 208}$$

$$I_{\text{comp}} = 172.108$$

Les courants passent de 180 à 172 A

3 f) (0.5)

Les conséquences: des courants trop élevés. Donc des pertes pour les deux et une facture plus élevée pour le client.

Le fournisseur est souvent bien content, la pénalité dépasse ses coûts.

Question 4 (3,0 points)

La courbe d'hystérésis d'un acier magnétique est donnée à la figure suivante. Ce matériau est utilisé pour fabriquer un transformateur toroïdal 120/240V, **50 Hz**. Le circuit magnétique a une longueur moyenne de 0,5 m et une section de 10 cm².

- a) (1,0) Combien de tours doit avoir le bobinage primaire pour que l'induction soit limitée à 1,4 T?
 b) (1,0) À l'aide de la Figure 1, dessinez approximativement la forme d'onde du courant à vide.
 c) (1,0) Quelle est la valeur maximale du courant à vide?

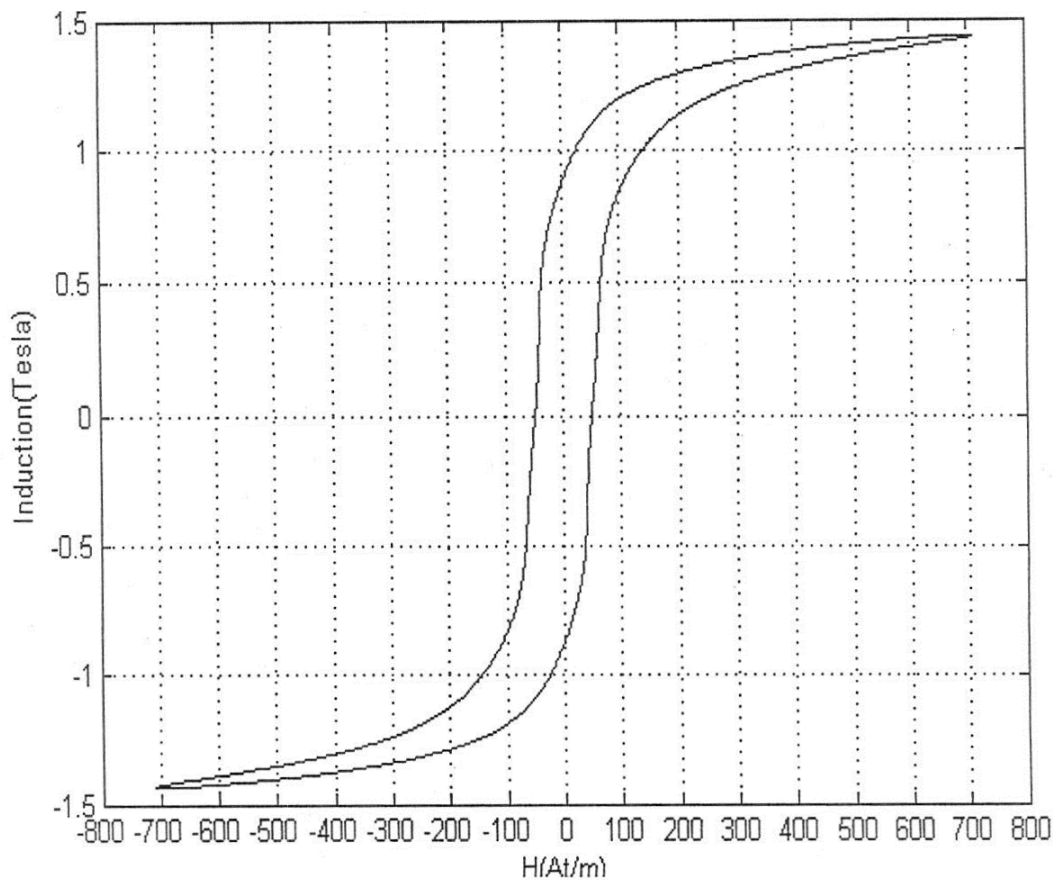


Figure 1 - Courbe d'aimantation réelle mesurée en laboratoire

Solution 4**4 a) (1,0 point)**

$$B_{\max} = 1,4T$$

$$f = 50Hz$$

$$E_p = 120V$$

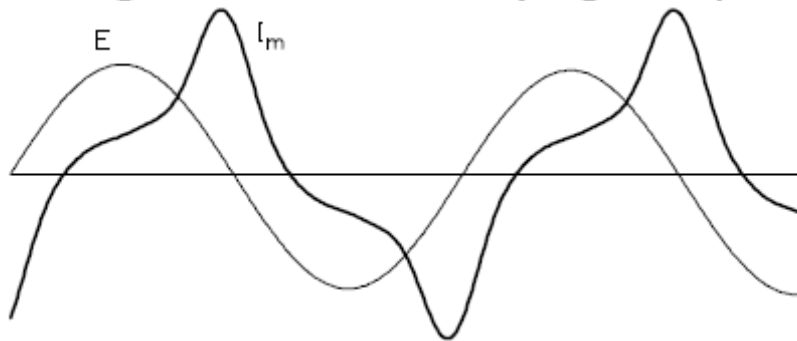
$$\phi_{\max} = B_{\max} A = 1,4 * 10cm^2 = 1,4 * 10^{-4} Wb$$

$$N_1 = \frac{E_p}{\sqrt{2}\pi f \phi_{\max}} = 385,85 \quad \text{tours}$$

donc 386 tours du côté 120V et le double (772) du côté 240V

4 b) (1,0 point)

Courant de magnétisation réel (non-linéaire) : _



N.B. : L'hystérésis fait en sorte qu'au maximum de tension (zéro flux), le courant n'est pas nul (courant coercitif). Il alterne d'une valeur positive durant la partie croissante, vers une valeur négative dans la partie décroissante de la courbe.

4 c) (1,0 point)

D'après la courbe d'hystérésis donnée :

$$H_{\max} = 700 \text{ A/m}$$

$$I_{\max} = \frac{H_{\max} l}{N_1} = \frac{700 * 0,5}{386} = 0,907 \text{ A}$$

du côté 120V

Question 5 (6,0 points)

Vous disposez des données d'essais suivantes pour un transformateur monophasé 600 V / 240 V et 60 kVA:

Essai en circuit ouvert ($Z_C = \infty$):

$$E_S = 597 \text{ V} ; I_1 = 2,017 \text{ A} ; P_1 = 198,0 \text{ W} ; E_C = 243,6 \text{ V}$$

Essai en court-circuit ($Z_C = 0$):

$$E_S = 63 \text{ V} ; I_1 = 150,2 \text{ A} ; P_1 = 2294 \text{ W} ; E_C = 0 \text{ V}$$

Tous les essais ont été réalisés du côté haute tension, en régime sinusoïdal à 60 Hz.

On considère négligeables les pertes dans les instruments de mesure. On utilisera le modèle simplifié de la Figure 2 pour procéder à l'identification des paramètres du transformateur.

À partir de ces données, veuillez calculer:

- (1,0) la valeur des paramètres R_{eq} , X_{eq}
- (1,0) la valeur des paramètres R_{fe} , X_ϕ
- (1,0) la valeur de l'impédance (série) du transformateur, exprimée en valeur réduite (% ou p.u.)
- (0,5) la valeur du rapport de transformation du transformateur idéal $m = E_1/E_2$
- (0,5) la valeur du courant nominal du côté charge
- (1,0) la valeur du courant de court-circuit du côté charge, lorsque $E_S = 600 \text{ V}$. Quel est le principal danger d'un tel courant de court-circuit pour le transformateur?
- (1,0) Quelle est la signification physique de chaque paramètre (R_{eq} , X_{eq} , R_{fe} et X_ϕ)?

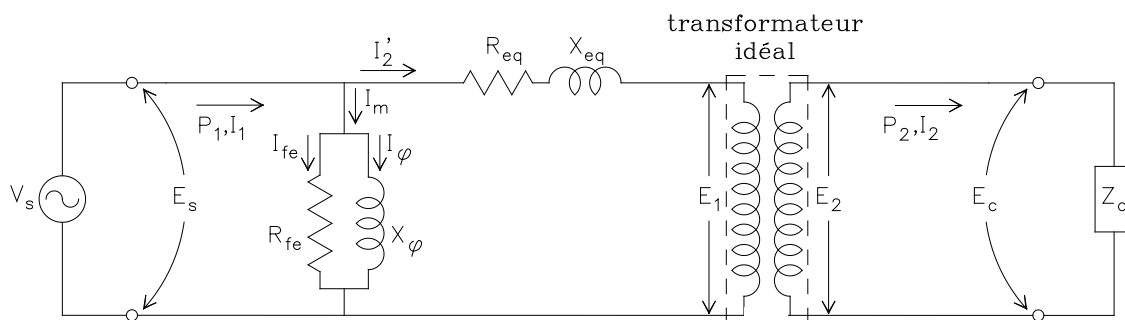


Figure 2 – Circuit équivalent du transformateur à l'étude

Solution 5)**5 a) (1,0 point)**

$$R_{eq} = \frac{P_1}{I_1^2} \bigg|_{cc} = \frac{2294}{150,2^2} = 0,102 \Omega$$

$$X_{eq} = \frac{Q_1}{I_1^2} \Big|_{cc} = \frac{\sqrt{S_1^2 - P_1^2}}{I_1^2} \Big|_{cc} = \frac{\sqrt{(E_S I_S)^2 - P_1^2}}{I_1^2} \Big|_{cc} = 0,407 \Omega$$

5 b) (1,0 point)

$$R_{fe} = \frac{E_S^2}{P_1} \Big|_{co} = 1800 \Omega$$

$$X_\phi = \frac{E_S^2}{Q_1} \Big|_{co} = \frac{E_S^2}{\sqrt{S_1^2 - P_1^2}} \Big|_{co} = \frac{E_S^2}{\sqrt{(E_S I_S)^2 - P_1^2}} \Big|_{co} = 300 \Omega$$

5 c) (1,0 point)

$$|Z_{eq}| = \sqrt{R_{eq}^2 + X_{eq}^2} = 0,42 \Omega$$

$$Z_{base} = \frac{E_{nom}^2}{S_{nom}} = \frac{600^2}{60000} = 6 \Omega$$

$$Z_{\%} = \frac{|Z_{eq}|}{Z_{base}} * 100\% = 7\% \text{ ou } Z_{pu} = \frac{|Z_{eq}|}{Z_{base}} = 0,07 pu$$

5 d) (0,5 point)

$$m = \frac{E_S}{E_C} \Big|_{co} = \frac{597}{243,6} = 2,45$$

5 e) (0,5 point)

$$I_{nom} = \frac{S_{nom}}{E_{nom}} = \frac{60000}{240} = 250 A$$

5 f) (1,0 point)

$$I_2' \Big|_{cc} = \frac{E_S}{|Z_{eq}|} = \frac{600}{0,42} = 1428,6 A$$

du côté charge :

$$I_2 = m I_2' = 2,45 * 1428,6 = 3500 A$$

Comparé au courant nominal du côté charge de 250A, c'est un courant 14 fois plus élevé. Un tel courant doit être coupé rapidement, car il y a beaucoup d'énergie dissipée en jeu ($R * I^2 * \Delta t$, pertes Joule) et cela risque de détruire le transformateur.

5 g) (1,0 point)

- R_{eq} : Représente les pertes Joule (ou pertes en charge) au niveau des enroulements (et les pertes par effet de Foucault) dues à la charge à fréquence nominale. Dans cet exemple, la résistance est totalisée au primaire.

- X_{eq} : Représente l'inductance de fuite associée au couplage non-idéal entre les deux enroulements.

L'inductance de fuite, dans cet exemple, est totalisée au primaire.

- R_{fe} : Représente les pertes dans le noyau ferromagnétique. Elles se divisent en deux contributions : la première est les pertes par hystérésis et la deuxième est les pertes par courant de Foucault.

- X_ϕ : Représente le courant d'excitation associé à la perméabilité finie du noyau ferromagnétique. Dans le cas idéal, la perméabilité est infinie et le courant d'excitation est nul pour n'importe quel flux magnétique.

.