

SCIENCES ET TECHNIQUES INDUSTRIELLES : ÉLÉMENTS DE CORRIGÉ

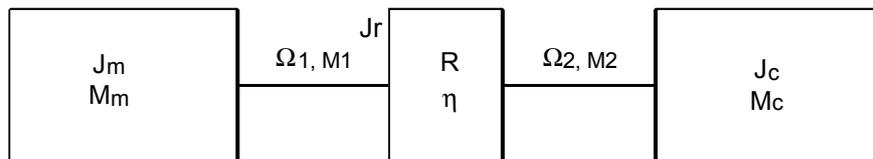
Partie 1 : Étude des trappes de désenfumage

Problématique :

Pour des raisons de sécurité, le temps maximal de fermeture de la trappe (obturation + verrouillage) ne doit pas dépasser 10 s. Dans ce but, on vous demande de vérifier que le moteur choisi permet de respecter les contraintes imposées.

1.1 - Vérification du temps de fermeture des trappes

On adopte le modèle suivant :



- J_m : inertie du moteur considérée sur l'arbre d'entrée du réducteur (arbre 1) ;
- M_m : couple moteur considéré sur l'arbre 1 ;
- M_1 : couple résistant sur l'arbre d'entrée du réducteur ;
- M_2 : couple moteur sur l'arbre de sortie du réducteur ;
- R : rapport de réduction ($R = \Omega_1 / \Omega_2$) ;
- J_r : moment d'inertie du réducteur ;
- η : rendement du réducteur ;
- J_c : inertie de la charge considérée sur l'arbre de sortie du réducteur (arbre 2) ;
- M_c : couple résistant dû à la charge, considéré sur l'arbre de sortie ;
- m : masse du tiroir de la trappe.

Pour la détermination des moments d'inertie on considérera que la vitesse de rotation du moteur est égale à sa vitesse nominale.

1.1.1 - Donner la relation permettant de ramener, sur l'arbre de sortie du réducteur, l'inertie (J_c) due à la masse (m) du tiroir de la trappe.

On pose $\therefore v = (D_p / 2) \times \Omega_2$
 - $J_c = m \times (v / \Omega_2)^2 = m \times D_p^2 / 4$
 Application numérique :
 - $J_c = 150 \times 0,09^2 / 4 = 0,3 \text{ kg.m}^2$

1.1.2 - Donner l'expression du moment d'inertie (J_{ext}) de la charge, ramené sur l'arbre du moteur en fonction de J_c , R , η et calculer sa valeur.

Équation mécanique sur l'arbre d'entrée $\therefore J_m \cdot d\Omega_1 / dt = M_m - M_1$
 Équation mécanique sur l'arbre de sortie $M_2 = J_c \cdot d\Omega_2 / dt + M_c = (J_c / R) \cdot d\Omega_1 / dt + M_c$
 Relation entre les couples M_1 et M_2 : $M_1 = M_2 / (\eta \times R)$
 D'où $\therefore J_m \cdot d\Omega_1 / dt = M_m - ((J_c / R) \times d\Omega_1 / dt + M_c) / (\eta \times R) = M_m - M_c / (\eta \times R) - J_c / (\eta \times R^2) \times d\Omega_1 / dt$
 On pose alors $\therefore J_{ext} = J_c / (\eta \times R^2) = 0,3 / (0,53 \times 80^2) = 8,8 \times 10^{-5} \text{ kg.m}^2$

1.1.3 - Calcul du moment d'inertie total ramené à l'arbre moteur.

$J_{tot} = J_m + J_r + J_{ext} = 3,5 \times 10^{-4} + 3 \times 10^{-3} + 8,8 \times 10^{-5} \approx 3,44 \times 10^{-3} \text{ kg.m}^2$

1.1.4 - Calculer le temps de démarrage du système. Sachant que, pendant tout le démarrage, on considère que le couple moteur est égal au couple de démarrage (M_s).

$$t_d = J_{tot} \times \Omega_n / M_s =$$

$$\Omega_n = \pi \cdot n_n / 30 = \pi \times 2840 / 30 = 297 \text{ rd/s}$$

$$M_s = 2,7 \times 1,25 = 3,375 \text{ Nm}$$

$$t_d = 3,44 \times 10^{-3} \times 297 / 3,375 = 0,3 \text{ s}$$

1.1.5 - Calculer la distance parcourue durant cette phase de démarrage :

Accélération angulaire (constante) de l'arbre moteur : $\alpha_m'' = d\Omega_1 / dt = M_s / J_{tot} = 3,375 / 3,44 \times 10^{-3} = 981 \text{ rd.s}^{-2}$
 Accélération angulaire de l'arbre de sortie : $\alpha_r'' = \alpha_m'' / R = 12,3 \text{ rd.s}^{-2}$
 Accélération linéaire du tiroir : $\gamma = (D_p / 2) \cdot \alpha_r'' = (90 / 2) \times 12,3 = 553 \text{ mm.s}^{-2}$
 Distance parcouru pendant le démarrage : $x_d = \frac{1}{2} \times \gamma \times t_d^2 = \frac{1}{2} \times 553 \times 0,3 = 24,9 \text{ mm}$

1.1.6 - Calculer le temps de translation et de blocage du tiroir en régime établi. On considérera que la vitesse est constante jusqu'à la fin du blocage.

Distance restant à parcourir en régime établi (vitesse constante) :
 $x_p = x_{tot} - x_d = (1078 + 108) - 24,9 = 1161 \text{ mm}$
 Vitesse linéaire du tiroir en régime permanent : $v_p = (D_p / 2) \times (\Omega_n / R) = 45 \times 297 / 80 = 167 \text{ mm.s}^{-1}$
 Temps mis pour terminer la fermeture de la trappe : $t_p = x_p / v_p = 1161 / 167 = 6,9 \text{ s}$

1.1.7 - Calculer le temps total de fermeture et commenter ce résultat.

Temps total de fermeture : $t_{tot} = t_d + t_p = 0,3 + 6,9 = 7,2 \text{ s}$
 Le temps total de fermeture est inférieur aux 10 s maximum imposées par le cahier des charges.

1.2 - Vérification de la puissance nominale du moteur choisi.

On admettra que le couple résistant maximum est obtenu en fin de verrouillage lorsque le fin de course "fermeture" est actionné. Cela correspond également à un allongement des deux ressorts de traction de 108mm (course de verrouillage). On admettra également que pendant la phase de verrouillage, le moteur tourne à sa vitesse nominale.

1.2.1 - Calculer l'effort exercé par les deux ressorts de traction en fin de verrouillage.

On note, Δl , l'allongement des ressorts
 $F = 2 \times k \times \Delta l = 2 \times 1,8 \times 108 = 389 \text{ N}$

1.2.2 - Calculer le couple résistant (M_c) correspondant sur le pignon de sortie.

$$M_c = F \times (D_p / 2) = 389 \times 45 \times 10^{-3} = 17,5 \text{ Nm}$$

1.2.3 - Calculer le couple équivalent (M_r) ramené sur l'arbre moteur.

$$M_r = M_c / (\eta \times R) = 17,5 / (0,53 \times 80) = 0,41 \text{ Nm}$$

1.2.4 - Calculer la puissance fournie par le moteur en fin de verrouillage. Commenter le résultat obtenu.

$$P_m = M_r \times \Omega_n = 0,41 \times 297 = 122 \text{ W}$$

P_m est très inférieure à la puissance nominale du moteur (370 W)

Partie 2 : Étude du circuit d'alimentation de l'éclairage du local haute tension

2.1 - Problématique :

On vous demande de justifier le choix du disjoncteur Qf_{12} de protection du circuit d'éclairage du local haute tension.

2.1.1 - Calculer la valeur de la résistance (R_R) et la valeur de la réactance (X_R) équivalentes à une phase du réseau d'alimentation HT ramenée côté BT.

$$\begin{aligned}Z_R &= U_{20}^2 / S_{cc} = 0,336 \text{ m}\Omega \\R_R &= Z_R \times \cos\varphi_{cc} = 0,05 \text{ m}\Omega \\X_R &= Z_R \times \sin\varphi_{cc} = 0,332 \text{ m}\Omega\end{aligned}$$

2.1.2 - Calculer la valeur de la résistance (R_T) et la valeur de la réactance (X_T) équivalentes à une phase du transformateur ramenée côté BT.

$$\begin{aligned}P_J &= P_{charge} - P_{vide} = 3\,800 - 880 = 2\,920 \text{ W} \\R_T &= P_J \times U_2^2 / S_n^2 = 2\,920 \times (400^2 / 250\,000^2) = 7,48 \text{ m}\Omega \\X_T &= [(U_{cc\%} \times U_{20}^2 / (100 \times S_n))^2 - R^2]^{1/2} \\X_T &= 39,5 \text{ m}\Omega\end{aligned}$$

2.1.3 - Calculer la valeur de la résistance (R_C) et la valeur de la réactance (X_C) équivalentes à une phase du câble reliant le transformateur au disjoncteur.

$$\begin{aligned}R_C &= \rho \times L / S = 0,385 \text{ m}\Omega \\X_C &= \lambda \times L = 0,4 \text{ m}\Omega\end{aligned}$$

2.1.4 - Calculer la valeur de la résistance (R_B) et la valeur de la réactance (X_B) équivalentes à une phase du jeu de barres.

$$\begin{aligned}R_B &= \rho \times L / S = 0,37 \text{ m}\Omega \\X_B &= \lambda \times L = 0,75 \text{ m}\Omega\end{aligned}$$

2.1.5 - Donner la valeur de la résistance (R_{Totale}) et la valeur de la réactance (X_{Totale}) totale d'une phase du circuit précédent.

$$\begin{aligned}R_{Totale} &= \Sigma R = 8,285 \text{ m}\Omega \\X_{Totale} &= \Sigma L = 40,7 \text{ m}\Omega\end{aligned}$$

2.1.6 - Calculer l'amplitude (I_{cc}) du courant de court-circuit en régime permanent en amont de Qf_{12} .

$$I_{cc} = \frac{\sqrt{2} \cdot V_{20}}{2 \cdot \sqrt{R_{Totale}^2 + X_{Totale}^2}} = 3,966 \text{ kA}$$

À partir de cette question on considérera que la valeur de la résistance (R_T) et la valeur de la réactance (X_T) totale d'une phase sont respectivement $R_T = 9 \text{ m}\Omega$ et $X_T = 40 \text{ m}\Omega$ en amont de Qf_{12} .

2.1.7 - Calculer en fonctionnement nominal la valeur de l'intensité véhiculée par cette ligne.

$$\begin{aligned}P &= 18 \times 2 \times 36 = 1\,296 \text{ W} \\I_b &= 1\,296 / (230 \times 0,83) = 6,7 \text{ A}\end{aligned}$$

2.1.8 - Calculer la valeur du courant présumé de court-circuit dans le cas où ce dernier apparaîtrait en bout de ligne.

$$\begin{aligned} \text{Câble : } S &= 1,5 \text{ mm}^2 \\ L &= 100 \text{ m} \\ R_4 &= 18,5 \times 100 / 1,5 = 1,233 \Omega \\ X_4 &= 0,08 \times 100 = 8 \text{ m}\Omega \\ I_{cc} &= 230 / (2 \times 1,23) = 93 \text{ A} \end{aligned}$$

2.1.9 - Le disjoncteur C60N utilisé a pour référence 24 201. Commenter ce choix vis-à-vis de la protection contre les court-circuits.

Le pouvoir de coupure du disjoncteur est supérieur au courant présumé de court circuit.
Le disjoncteur est un C60N calibre 10, courbe C, son magnétique déclenche entre 5 et 10 In soit 50 et 100 A. Le déclenchement du magnétique est donc incertain.

2.1.10 - Dans le cas d'un court-circuit entre deux phases situé à l'extrémité du jeu de barres, établir l'expression du courant de court-circuit ($i_{cc}(t)$). On posera qu'à $t = 0$, $i_{cc}(0) = 0$. On notera la tension d'alimentation de la maille en court-circuit $U(t) = \sqrt{2} \times U_{20} \times \sin(\omega t + \alpha)$. On appellera φ le déphasage entre le courant et la tension.

L'expression du courant dircuit est la somme de deux termes :

- Le terme correspondant au régime forcé ou solution particulière de l'équation avec 2nd membre,

$$i_{ccF}(t) = \frac{\sqrt{2} \cdot U_{20}}{2 \cdot \sqrt{R_{Totale}^2 + X_{Totale}^2}} \sin(\omega t + \alpha - \varphi)$$

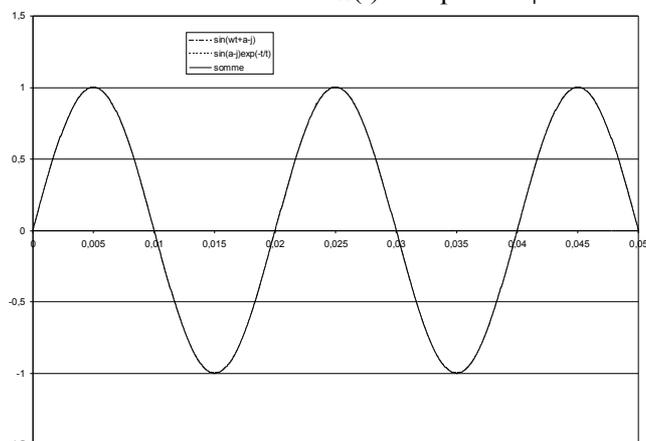
- Le terme correspondant au régime libre ou solution générale de l'équation sans 2nd membre,

$$i_{ccL}(t) = K \times e^{-t/\tau} \text{ avec } \tau = L / R$$

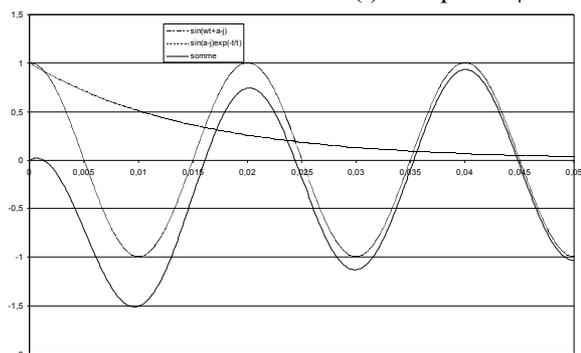
K est telle que la condition initiale, $i_{cc}(0) = 0$, soit respectée. D'où :

$$i_{cc}(t) = \frac{\sqrt{2} \cdot U_{20}}{2 \cdot \sqrt{R_{Totale}^2 + X_{Totale}^2}} [\sin(\omega t + \alpha - \varphi) - \sin(\alpha - \varphi) \cdot e^{-t/\tau}]$$

2.1.11 - Tracer l'allure de $i_{cc}(t)$ lorsque $\alpha - \varphi = 0$



2.1.12 - Tracer l'allure de $i_{cc}(t)$ lorsque $\alpha - \varphi = \pi/2$



2.1.13 - Dans le cas le plus défavorable, le courant de court-circuit peut atteindre au cours du régime transitoire une valeur K fois supérieure à la valeur du régime permanent. La courbe représentant $K = f(R/X)$ est donnée Annexe B5. Calculer cette valeur (I_{ccP}).

$$R / X = 9 / 40 = 0,225$$

$$K \approx 1,5$$

$$I_{ccP} = I_{cc} \times K = \frac{\sqrt{2} \cdot U_2}{2 \cdot \sqrt{R_{Totale}^2 + X_{Totale}^2}} \times K = 6,91 \times 1,5 = 10,4 \text{ kA}$$

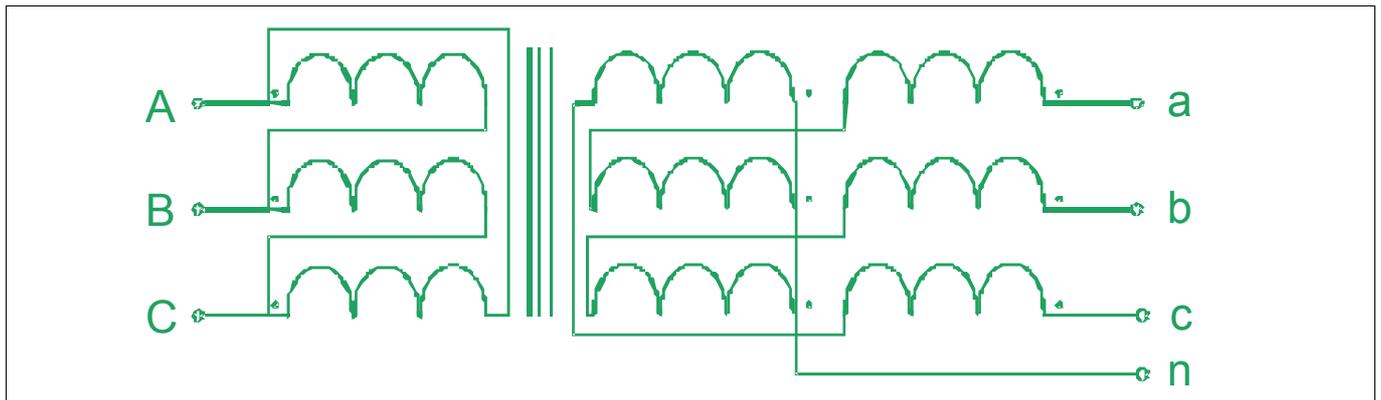
Partie 3 : Qualité du réseau de distribution

Problématique :

On vous demande d'analyser et de justifier les solutions retenues contribuant à améliorer la qualité de la desserte en énergie.

3.1 - Analyse des éléments contribuant à l'amélioration de la qualité de la desserte en énergie

3.1.1 - Représenter sur les schémas ci-dessous les connexions entre les enroulements du transformateur sec de 630 kVA



3.1.2 - Calculer la valeur de l'angle de déphasage entre la tension primaire et la tension secondaire.

$$360^\circ \text{ correspondent à } 12 \text{ h, } 1 \text{ h correspond à } 30^\circ.$$

$$10 \times 30^\circ = 300^\circ$$

3.1.3 - Calculer la valeur nominale des courants primaires et secondaires

$$S = U \times I \times \sqrt{3} \text{ donc } I = S / U \times \sqrt{3} \rightarrow \text{soit } I_p = 18,2 \text{ A et } I_s = 887 \text{ A}$$

3.1.4 - Ce transformateur contribue-t-il à l'amélioration de la qualité de la desserte en énergie? Justifier votre réponse.

OUI,
Le couplage triangle au primaire du transformateur supprime le neutre côté HT.
Le couplage ZigZag au secondaire supprime les courants harmoniques de rang 3 existants par opposition dans les demi enroulements.

3.2 - Étude des perturbations harmoniques

3.2.1 - Quels sont les récepteurs qui sont susceptibles de générer des perturbations harmoniques dans cette installation ? Justifier votre réponse.

Les moteurs de ventilation et les moteurs d'extraction des fumées sont commandés par l'intermédiaire de convertisseur de fréquence. L'éclairage en entrée et sortie du tunnel comporte un nombre important de lampes fluocompactes HF. L'ensemble de ces récepteurs génèrent des courants harmoniques de rang 3, 5, 7.

3.2.2 - Quels sont les effets de la présence des courants harmoniques dans un circuit ?

1. Les effets instantanés : les tensions harmoniques peuvent perturber les dispositifs de régulation et de comptage, provoquer des vibrations et des bruits dans les appareils électromagnétiques, induire des perturbations sur les lignes à courants faibles (téléphone, contrôle-commande).

2. Les effets à terme : on constate,

- des échauffements des diélectriques et leur vieillissement prématuré, des échauffements dus aux pertes supplémentaires des machines (différence entre les vitesses des champs tournants inducteurs harmoniques et le rotor) et des transformateurs (effet de peau, hystérésis et courants de Foucault).

- Des échauffements des câbles et des équipements (élévation de la résistance apparente de l'âme, des pertes diélectriques avec la fréquence ou surcharge dans le conducteur de neutre).

3.2.3 - Citer les dispositifs usuels qui permettent de lutter contre les effets néfastes des courants harmoniques.

1. Solutions générales :

- abaisser les impédances harmoniques,
- choisir un schéma de liaison à la terre adapté,
- utiliser des transformateurs spécifique,
- confiner les charges polluantes,
- augmenter la puissance de court circuit.

2. Solutions de neutralisation :

- installation de self anti-harmoniques,
- utilisation de filtre anti-harmonique passif shunt résonnant,
- utilisation de filtre anti-harmonique actif,
- utilisation de filtre hybride.

3.2.4 - Donner l'expression de la valeur instantanée du courant harmonique de rang 3 pour chaque phase. On notera $I_{3\max}$ la valeur maximum de ce courant.

$$i_{31}(t) = I_{3\max} \times \sin(3\theta)$$

$$i_{32}(t) = I_{3\max} \times \sin(3(\theta - 2\pi/3)) = I_{3\max} \times \sin(3\theta - 2\pi) = I_{3\max} \times \sin(3\theta)$$

$$i_{33}(t) = I_{3\max} \times \sin(3(\theta - 4\pi/3)) = I_{3\max} \times \sin(3\theta - 4\pi) = I_{3\max} \times \sin(3\theta)$$

3.2.5 - Dédurre l'expression du courant dans le neutre. Conclure.

$$I_{3n}(t) = 3 \times I_{3\max} \times \sin(3\theta)$$

Partie 4 : Étude du système de ventilation et de désenfumage

4.1 - Batterie de condensateurs BC1 (Annexe C-1)

Problématique :

On vous demande de justifier le choix de la batterie de condensateurs en ne considérant que le fondamental du courant.

4.1.1 - Calculer l'intensité en ligne dans la batterie de condensateurs :

$$Q = 1,732 \times U \times I$$

$$I = 45\,000 / (1,732 \times 400)$$

$$I = 65 \text{ A}$$

4.1.2 - Justifier que la batterie de condensateurs est correctement choisie pour avoir une $\text{tg}\varphi$ inférieure à 0,4 imposée par le fournisseur d'énergie.

Données sur le schéma : $Q_c = 45\ 000\ \text{var}$; $U = 400\ \text{V}$,
 Plaque signalétique moteur : $\cos\varphi = 0,88$; $I = 302\ \text{A}$.
 $Q_m = 400 \times 302 \times 0,475 \times 1,732 = 100\ 000\ \text{var}$
 $P_{am} = 400 \times 302 \times 0,88 \times 1,732 = 184\ 000\ \text{W}$
 $Q_t = 100\ 000 - 45\ 000 = 55\ 000\ \text{var}$
 $\text{tg}\varphi = Q/P = 55\ 000 / 184\ 000 = 0,3 \times \cos\varphi = 0,96$
 $I_{\text{ligne}} = 184\ 000 / 400 \times 1,732 \times 0,96 = 277\ \text{A}$

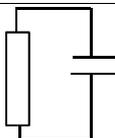
4.2 - Maintenance et Sécurité

Problématique :

Dans le cadre d'interventions de maintenance les problèmes relatifs à la sécurité revêtent une importance primordiale. On vous demande de dimensionner les résistances de décharge des condensateurs.

4.2.1 - Exprimer la valeur de la résistance de décharge à placer en dérivation sur un condensateur, pour obtenir la tension de fin de décharge U_d , au bout d'un temps de décharge t_d .

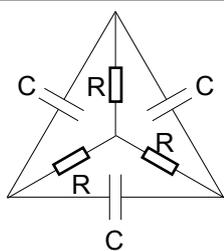
$uc + Ric = 0$
 $uc + RC \times duc / dt = 0$
 $u(t) = K e^{-t/RC}$
 Pour $t = 0$ $K = U_{ini}$
 $U(t) = U_{ini} \times e^{-t/RC}$



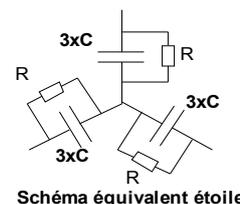
4.2.2 - Les condensateurs étant câblés en triangle et les résistances de décharge étant connectées aux bornes de chaque condensateur. Calculer dans le cas le plus défavorable et pour une durée d'une minute après la séparation de la batterie du réseau, les caractéristiques de la résistance qui permet la décharge d'un condensateur de la batterie pour que la tension à ses bornes n'excède pas 50 V.

$R = -t / (C \times \log(U / U_{ini}))$
 $R = -60 / (300 \times 10^{-6} \times \log(50 / 566))$
 $R = 82,4\ \text{k}\Omega$

4.2.3 - Les condensateurs étant câblés en triangle et les résistances de décharge étant connectées en étoile. Calculer dans le cas le plus défavorable et pour une durée d'une minute après la séparation de la batterie du réseau, les caractéristiques de la résistance qui permet la décharge d'un condensateur de la batterie pour que la tension à ses bornes n'excède pas 50 V.



C équivalent en étoile = $3 \times C$ en triangle.
 $R = -t / (C \times \log(U / U_{ini}))$
 $R = -60 / (900 \times 10^{-6} \times \log(50 / 325))$
 $R = 35,6\ \text{k}\Omega$



4.2.4 - Quelle solution choisir ?

La solution retenue est celle du couplage des résistances en étoile. Dans ce cas, la tension de décharge est plus faible.

4.3 - Contraintes d'utilisation de la batterie de condensateurs

Problématique :

On vous demande de vérifier que les composants utilisés supportent les conditions d'utilisation.

4.3.1 - Calculer la valeur de la capacité d'un condensateur de la batterie de compensation.

$$Q = 3 U^2 C \omega$$

$$C = Q / 3 \times U^2 \times \omega = 45\,000 / 3,400^2 \times 2 \times \pi \times 50 = 298 \mu\text{F}$$

4.3.2 - Vérifier à l'aide des relevés (Annexe C-2) la valeur de l'intensité en ligne dans la batterie de condensateurs, en régime permanent.

Sur l'annexe C-2 : $I_{\text{Maxi}} < 100 \text{ A}$
 $I_{\text{eff}} = 100 / \sqrt{2} = 65 \text{ A}$

4.3.3 - Indiquer à l'aide de ces relevés l'intensité maximum en ligne dans la batterie de condensateurs ?

Sur l'annexe C-2 : Intensité maximum pour la phase 1 = 160 A
 Intensité maximum pour la phase 2 = 2 000 A
 Intensité maximum pour la phase 3 = 2 300 A

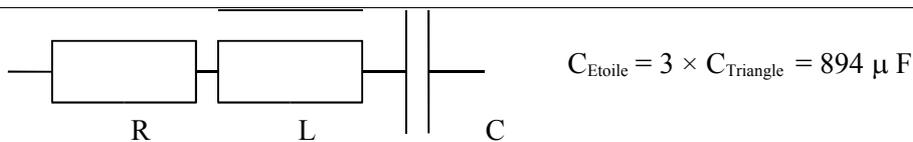
4.3.4 - Préciser pourquoi les valeurs maximales des intensités dans les régimes transitoires ne sont pas identiques dans les trois conducteurs d'alimentation de la batterie de condensateurs.

Lors du branchement de la batterie de condensateurs, chaque phase se comporte comme un circuit oscillant LC dont les conditions initiales ne sont pas identiques. Il en résulte des régimes transitoires différents.

4.3.5 - Relever la valeur de la fréquence d'oscillation des phénomènes transitoires.

Sur l'annexe C-2 : $T_{\text{osc}} = (3 / 25) \times 5 \text{ ms} = 0,6 \text{ ms} \rightarrow f_{\text{osc}} = 1 / T_{\text{osc}} = 1\,667 \text{ Hz}$

4.3.6 - Sachant que l'inductance de court-circuit du circuit alimentation est de $10 \mu\text{H}$ et que la résistance des conducteurs d'une ligne est de $0,015 \text{ ohm}$, dessiner le schéma équivalent monophasé et calculer la fréquence d'oscillation du phénomène transitoire.



$$F_{\text{Maxi}} = 1 / (2 \times \pi \times \sqrt{LC}) = 1 / (2 \times \pi \times \sqrt{10 \times 10^{-6} \times 894 \times 10^{-6}}) = 1\,684 \text{ Hz}$$

4.3.7 - À cette fréquence, vérifier que les éléments du circuit ne sont pas soumis à des contraintes électriques qui pourraient entraîner leur détérioration.

Pour cette fréquence de résonance, l'intensité dans le circuit est maximale ainsi que la tension aux bornes des condensateurs.

$$I = U / R = (400 \times \sqrt{2}) / (2 \times 15 \times 10^{-3}) = 18 \text{ kA}$$

Dans ce cas, les fusibles de protection de la batterie de condensateurs assurent la coupure du circuit