

PARTIE D : ETUDE DU TRANSFORMATEUR TRIPHASE

(Éléments de correction)

Deux transformateurs triphasés sont situés dans la grue CB2. Le premier, **TR1 CB2**, de faible puissance est dédié à l'éclairage, le chauffage de la cabine et à l'alimentation des prises BTA.

Le second, **TR2 CB2** est destiné à l'alimentation des moteurs des différents mouvements de manutention (levage, relevage, translation, orientation).

Ce transformateur triphasé est de type immergé à remplissage total.

Cette partie portera sur l'étude du transformateur d'alimentation TR2 CB2 qui alimente le moteur de levage de 250 kW par l'intermédiaire d'un variateur de vitesse.

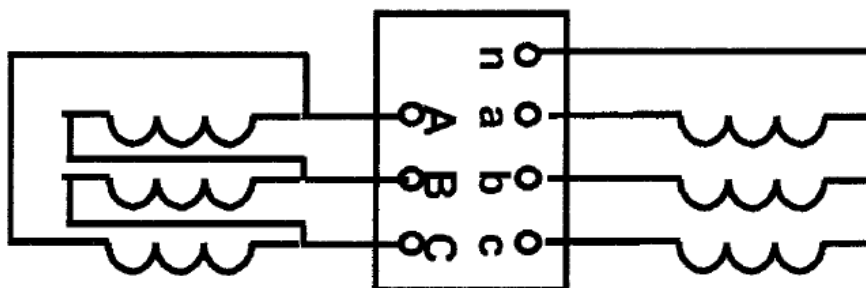
Le circuit magnétique du transformateur d'alimentation TR2 CB2 a une masse de 840 kg et son circuit magnétique est réalisé avec des tôles d'acier à pertes réduites de qualité 1,6 W/kg (pour une induction de 1 T). La section des noyaux est de 600 cm².

Vérifier l'adaptation du transformateur aux différentes applications.

1°) Couplage et indice horaire :

1.1°) Relever le couplage et l'indice horaire du transformateur. Donner le schéma représentatif des enroulements côtés HT et BT.

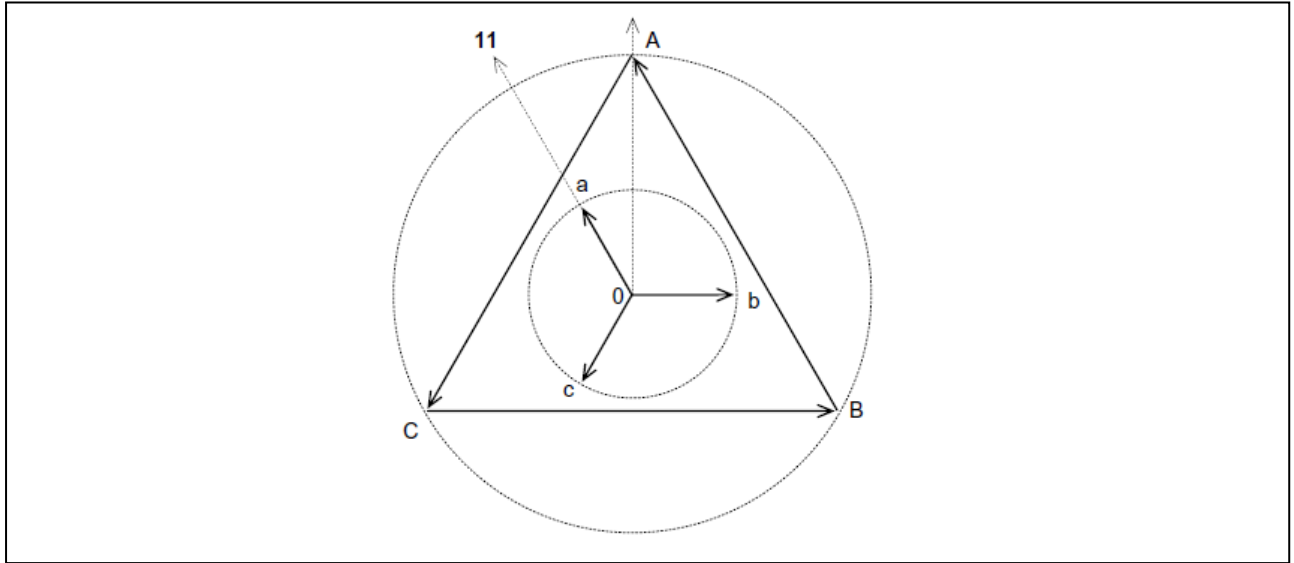
Dyn11 : Côté HT en triangle, Côté BT en étoile avec neutre sorti, indice horaire 11.
Correspond à un déphasage de 330° entre les tensions primaires et secondaires.



1.2°) Que représente l'indice horaire d'un transformateur ?

Il correspond au déphasage entre la tension simple côté BT et la tension simple côté HT.
C'est un multiple de 30° ou $\pi/6$ rad

1.3°) Tracer le diagramme vectoriel des tensions simples primaires et secondaires correspondant.



2°) Calcul des éléments du transformateur :

2.1°) Calculer le rapport de transformation **M** entre les tensions composées nominales.

$$M = U_2 / U_1 = 440 / 5500 = 0,08$$

$$M = 0,08$$

2.2°) Donner la relation entre M et m (rapport entre le nombre de spires) et calculer m.

$$m = V_2 / U_1 = M / \sqrt{3} = 0,08 / \sqrt{3} = 0,0461$$

$$m = 0,0461$$

2.3°) Justifier les valeurs du courant primaire **I₁** et secondaire **I₂** données sur la plaque signalétique.

$$S_N = U I \sqrt{3} \implies I = S_N / (U \sqrt{3}) \text{ avec } S_N = 800 \text{ kVA}$$

$$I_1 = S_N / (U_1 \sqrt{3}) = 800 \cdot 10^3 / (5500 \times \sqrt{3}) = 83,97 \text{ A}$$

$$I_1 = 84 \text{ A}$$

$$I_2 = S_N / (U_2 \sqrt{3}) = 800 \cdot 10^3 / (440 \times \sqrt{3}) = 1049,72 \text{ A}$$

$$I_2 = 1050 \text{ A}$$

2.4°) Donner la relation permettant de déterminer les pertes ferromagnétiques.

Où sont-elles situées dans un transformateur et que peut-on faire pour les réduire ?

Elles sont situées dans le circuit magnétique du transformateur.

On utilise des matériaux magnétiques « doux » afin de réduire les pertes par Hystérésis (P_H) et des circuits magnétiques feuilletés, des tôles au silicium pour réduire les pertes par courant de Foucault (P_F). $P_H = K_H \times V \times f \times B_M^2$ et $P_F = K_F \times V \times f^2 \times B_M^2$

$$P_{FER} = P_H + P_F = V \times (K_H \times f \times B_M^2 + K_F \times f^2 \times B_M^2) \text{ avec } K_H \text{ et } K_F \text{ cste qui dépend du matériau.}$$

2.5°) Calculer les pertes ferromagnétiques P_{fer} totales du transformateur pour une induction maximale $B_M = 1.2 \text{ T}$ et comparer le résultat aux caractéristiques du constructeur.

On donne : $P_{\text{fer}} = C_{\text{fer}} \times (f / f_0)^\beta \times (B / B_0)^\eta \times M$ avec $C_{\text{fer}} = 1,6 \text{ W/kg}$ pour $B_0 = 1 \text{ T}$ à $f_0 = 50 \text{ Hz}$
et $\beta = 2$; $\eta = 2$

Les pertes magnétiques (Pertes par courant de Foucault et par Hystérésis) sont proportionnelles au carré de l'induction magnétique. $P_{\text{fer}} \approx K \times B^2$

$$P_{\text{fer}} = C_{\text{fer}} \times (f / f_0)^\beta \times (B / B_0)^\eta \times M \text{ avec } \beta = 2 \text{ et } \eta = 2$$

$$P_{\text{fer}} = C_{\text{fer}} \times (f / f_0)^2 \times (B / B_0)^2 \times M \implies C_{\text{fer}} = 1,6 \text{ W/kg pour } B_0 = 1 \text{ T à } f_0 = 50 \text{ Hz}$$

$$P_{\text{fer}} = 1,6 \times 1,2^2 \times 840 = \mathbf{1900 \text{ W}} < \text{aux données constructeurs } 2 \text{ kW} \quad \mathbf{P_{\text{fer}} = 1900 \text{ W}}$$

2.6°) Calculer le nombre de spires N_1 de chaque enroulement primaire pour une induction maximale dans noyau B_M de $1,2 \text{ T}$.

D'après le relation de Boucherot, la tension aux bornes de l'enroulement secondaire vaut :

$$U_1 = 4,44 \times N_1 \times B_M \times S \times f \implies N_1 = U_1 / (4,44 \times B_M \times S \times f)$$

$$N_1 = 5500 / (4,44 \times 1,2 \times 600 \cdot 10^{-4} \times 50) = \mathbf{344 \text{ spires}} \quad \mathbf{N_1 = 344 \text{ spires}}$$

2.7°) En déduire le nombre de spires N_2 de chaque enroulement secondaire.

$$m = V_2 / U_1 = N_2 / N_1 = M / \sqrt{3} \implies N_2 = N_1 \times m$$

$$N_2 = 344 \times 0,0461 = \mathbf{16 \text{ spires}} \quad \mathbf{N_2 = 16 \text{ spires}}$$

2.8°) Calculer la résistance R_s du schéma équivalent ramené au secondaire par phase.

$$P_{\text{cc}} = 3 \times R_s \times I_{2\text{cc}}^2 \implies I_{2\text{cc}} = I_{2N} = S_N / (\sqrt{3} \times U_2) = 800 \cdot 10^3 / (440 \times \sqrt{3}) = \mathbf{1049,7 \text{ A}}$$

$$R_s = 10000 / (3 \times 1050^2) = \mathbf{3 \cdot 10^{-3} \Omega} \quad \mathbf{R_s = 3 \text{ m}\Omega}$$

2.9°) Donner une définition précise de U_{cc} (en %) et calculer cette valeur.

Le coté HT doit être alimenté sous tension réduite $U_{1\text{cc}} = \% U_{1N}$ lors de l'essai en court-circuit afin d'obtenir $I_{2\text{cc}} = I_{2N}$

$$U_{1\text{cc}} = 5\% \times U_{1N} = \mathbf{275 \text{ V}} \quad \mathbf{U_{1cc} = 275 \text{ V}}$$

2.10°) Calculer la réactance X_s du schéma équivalent ramené au secondaire par phase.

$$V_{2cc} = m \times U_{1cc} = 0,0461 \times 275 = 12,67 \text{ V} \Rightarrow U_{2cc} = 21,95 \text{ V}$$

$$Z_s = V_{2cc} / I_{2cc} = 12,67 / 1050 = 0,012 \Omega$$

$$Z_s = 12 \text{ m}\Omega$$

$$X_s = \sqrt{Z_s^2 - R_s^2} = \sqrt{0,012^2 - 0,003^2} = 0,01161 \Omega$$

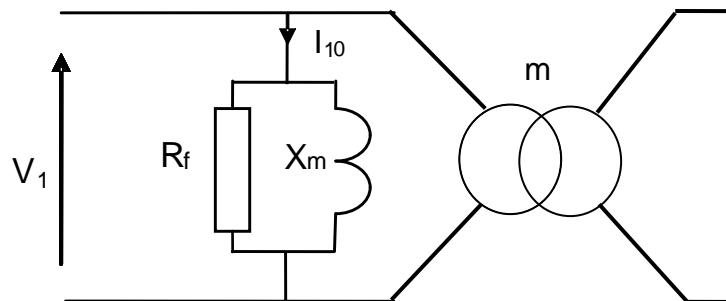
$$X_s = 11,61 \text{ m}\Omega$$

2.11°) Le courant à vide est très faible devant le courant primaire nominal, la réactance et l'inductance de fuite au primaire peuvent donc être négligées.

Dans ces conditions, représenter le schéma équivalent au primaire du transformateur à vide vu entre phase et neutre, en prenant R_f et X_m côté HT. Que représente R_f et X_m ?

R_f = Résistance symbolisant les pertes ferromagnétiques.

X_m = La réactance de magnétisation.



2.12°) Calculer les valeurs des éléments R_f et X_m du schéma décrit précédemment.

$$P_{1V} = 3 \times V_1^2 / R_f = U_{1N}^2 / R_f = P_{fer}$$

$$R_f = U_{1N}^2 / P_{1V} = 5500^2 / 2000 = 15,12 \text{ k}\Omega$$

$$R_f = 15,12 \text{ k}\Omega$$

$$S_{1V} = 2\% \times S_N = 16 \text{ kVA}$$

$$Q_{1V} = \sqrt{S_{1V}^2 - P_{1V}^2} = \sqrt{16^2 - 2^2} = 15,87 \text{ kVAR}$$

$$X_m = 3 \times V_1^2 / Q_{1V} = U_{1N}^2 / Q_{1V} = 5500^2 / 15870 = 1,9 \text{ k}\Omega$$

$$X_m = 1,9 \text{ k}\Omega$$

2.13°) Calculer les chutes de tensions simples Δ_{V2} et composées Δ_{U2} pour un $\cos \varphi_2 = 0,8$.
et comparer le résultat aux caractéristiques du constructeur.

$$\Delta_{V2} = R_s I_2 \cos \varphi_2 + X_s I_2 \sin \varphi_2 = (R_s \cos \varphi_2 + X_s \sin \varphi_2) \times I_2$$

$$\cos \varphi_2 = 0,8 \implies \varphi_2 = 36,86^\circ \implies \sin \varphi_2 = 0,6$$

$$\Delta_{V2} = 1050 \times (3 \cdot 10^{-3} \times 0,8 + 11,61 \cdot 10^{-3} \times 0,6) = \mathbf{9,83 \text{ V}}$$

$$\Delta_{V2} = \mathbf{9,83 \text{ V}}$$

$$\Delta_{U2} = \sqrt{3} \times \Delta_{V2} = \mathbf{17,03 \text{ V}}$$

$$\Delta_{U2} = \mathbf{17,03 \text{ V}}$$

Vérifications : $\delta U_2 = \mathbf{3,7 \%} < \mathbf{4,3 \%}$

2.14°) Vérifier la valeur η du rendement du transformateur.

$$\eta = P_2 / P_1 = P_2 / (P_2 + \Sigma \text{ pertes})$$

$$P_2 = U_2 \times I_2 \times \sqrt{3} \times \cos \varphi_2 = 440 \times 1050 \times \sqrt{3} \times 0,8 = \mathbf{640,16 \text{ kW}}$$

$$P_1 = P_2 + P_f + P_j = 640,16 + 2 + 10 = \mathbf{652,16 \text{ kW}}$$

$$\eta = P_2 / P_1 = 640,16 / 652,16 = \mathbf{0,98}$$

$$\eta = \mathbf{98 \%}$$