

**BREVET DE TECHNICIEN SUPÉRIEUR
ÉLECTROTECHNIQUE**

**E4 - PHYSIQUE APPLIQUÉE
À L'ÉLECTROTECHNIQUE**

Durée : 4 heures

Coefficient : 3

Calculatrice autorisée

Alimentation des moteurs électriques de propulsion du paquebot Queen Mary 2

La propulsion du Queen Mary 2 est assurée par quatre hélices entraînées par des moteurs synchrones autopilotés.

Ce problème porte sur l'étude d'une partie de l'alimentation en énergie électrique des moteurs. Le synoptique de cette alimentation est représenté figure 1.

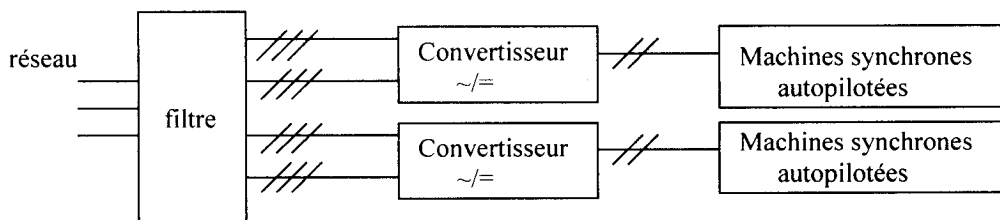


Figure 1

Chaque convertisseur alternatif-continu est réalisé par la mise en série de deux ponts PD3 tout thyristors (figure 2). Il est précédé d'un filtre alimenté par un système de trois tensions sinusoïdales triphasées équilibrées directes de fréquence $f = 60 \text{ Hz}$.

L'ensemble du dispositif est conçu pour réduire les perturbations sur le réseau électrique du navire.

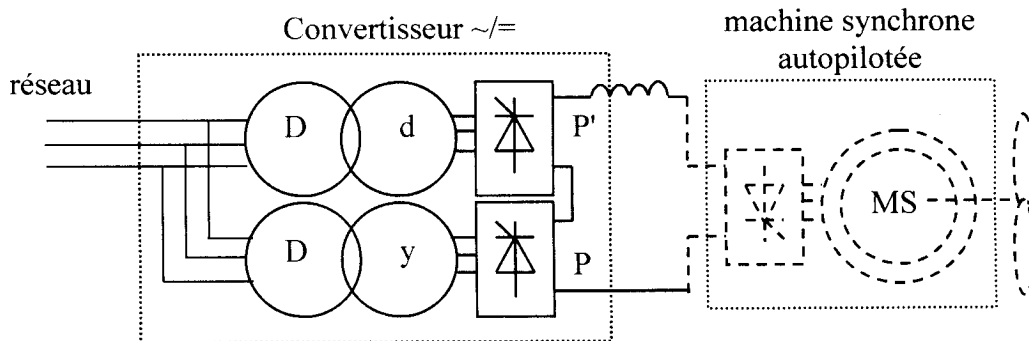


Figure 2

Les trois parties du sujet peuvent être traitées indépendamment.

Les grandeurs électriques notées en lettres minuscules représentent des valeurs instantanées et celles notées en lettres majuscules représentent des valeurs efficaces ou continues.

A) ÉTUDE DES TRANSFORMATEURS

Les deux transformateurs sont considérés parfaits.

La succession des phases A, B, C est directe.

Données sur les transformateurs :

- tension primaire nominale entre phases $U_{AB} = U_{A'B'} = 11 \text{ kV}$
- tension secondaire nominale entre phases $U_{ab} = U_{a'b'} = 3,0 \text{ kV}$

A.1- Transformateur triangle-étoile (Dy) (figure 3)

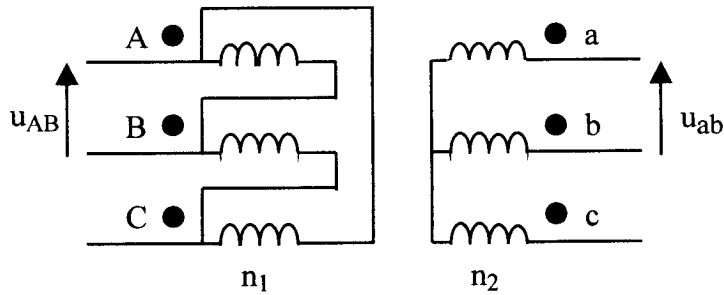


Figure 3

- A.1.1-** Calculer le rapport de transformation $m = \frac{U_{ab}}{U_{AB}}$ du transformateur Dy.
- A.1.2-** Exprimer m en fonction des nombres de spires primaire n_1 et secondaire n_2 .
- A.1.3-** Tracer le diagramme vectoriel des tensions primaire et secondaire. En déduire l'indice horaire I du transformateur.

A.2- Transformateur triangle-triangle (Dd) (figure 4)

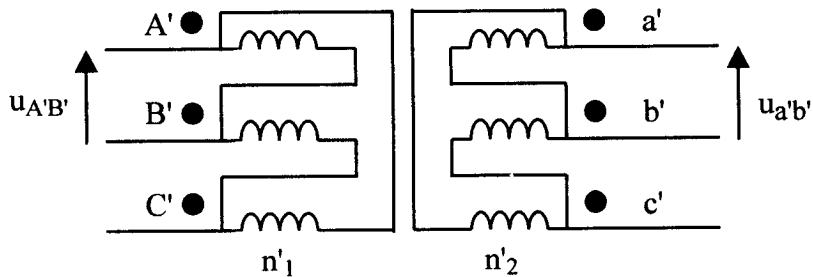


Figure 4

- A.2.1-** Calculer le rapport de transformation m' du transformateur Dd.
- A.2.2-** Exprimer m' en fonction des nombres de spires primaire n'_1 et secondaire n'_2 .
- A.2.3-** Déterminer l'indice horaire I' de ce transformateur.
- A.2.4-** Les primaires des deux transformateurs sont alimentés par le même réseau :
 A est relié à A'
 B est relié à B'
 C est relié à C'

A partir des résultats obtenus en A.1.3, déduire le retard ψ de $u_{a'b'}$ par rapport à u_{ab} .

B) ÉTUDE DES REDRESSEURS

Dans toute cette partie l'intensité du courant I_o , parfaitement lissé, est maintenue à 830 A.

B.1-Pont PD3 (figure 5)

Les thyristors sont considérés comme parfaits.

L'angle de retard à l'amorçage α est défini par rapport à l'instant de commutation naturelle.

- B.1.1-** Pour $\alpha=30^\circ$, représenter sur le document réponse n°1 :
- les intervalles de conduction des thyristors T_a et T'_a
 - l'allure de la tension u_o .
 - l'allure du courant de ligne i_a .
 - l'allure du fondamental i_{af} du courant i_a .

En déduire la valeur du déphasage φ de i_{af} par rapport à v_a .

- B.1.2-** Montrer que la valeur efficace I_a du courant i_a vaut 678 A pour $I_o = 830$ A.

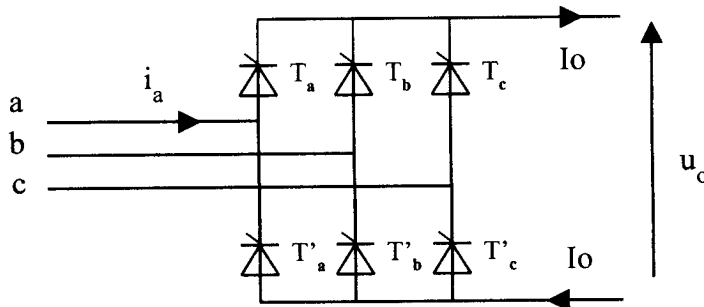


Figure 5

- B.1.3-** La décomposition en série de Fourier de $i_a(\omega t)$ est la suivante

$$i_a(\omega t) = \frac{4 \cdot I_o}{\pi} \left[\frac{\sqrt{3}}{2} \sin(\omega t - \alpha) - \frac{\sqrt{3}}{10} \sin(5\omega t - 5\alpha) + \frac{\sqrt{3}}{14} \sin(7\omega t - 7\alpha) + \dots \right]$$

Donner l'expression de $i_{af}(\omega t)$.

Montrer que la valeur efficace de i_{af} s'écrit $I_{af} = 0,78 I_o$.

- B.1.4-** La puissance active fournie à ce pont par le réseau s'écrit $P_a = \sqrt{3} U_{ab} I_{af} \cos \alpha$.
En déduire l'expression du facteur de puissance k en fonction de $\cos \alpha$.

- B.1.5-** Le taux global de distorsion d'un courant i périodique et alternatif est défini comme suit :

$$D_i = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_f} = \frac{\sqrt{I^2 - I_f^2}}{I_f}$$

Où :

- I_n représente la valeur efficace de l'harmonique de rang n de i .
- I_f représente la valeur efficace du fondamental de i .
- I représente la valeur efficace de i .

Calculer D_{i_a} , taux global de distorsion du courant i_a .

B2- Convertisseur alternatif-continu (figure 6)

Le convertisseur est constitué de deux ponts PD3 montés en série.

Les ponts P et P' sont commandés avec le même angle de retard à l'amorçage α par rapport aux instants respectifs de commutation naturelle. Dans ces conditions, en conduction ininterrompue, chaque pont fonctionne comme s'il était seul.

Les transformateurs Dd et Dy sont supposés parfaits. Ils ont le même rapport de transformation $m=0,27$.

La valeur efficace de la tension entre phases du réseau vaut **11 kV**.

- B.2.1-** Les allures des courants i_A et $i_{A'}$ pour $I_o= 830$ A sont représentées sur le document réponse n°2. Représenter le courant de ligne i_1 ainsi que son fondamental i_{1f} sur ce même document.
- B.2.2-** Montrer que la valeur efficace I_1 de i_1 s'exprime en fonction de m et I_o par $I_1=1,57 mI_o$. Calculer sa valeur.

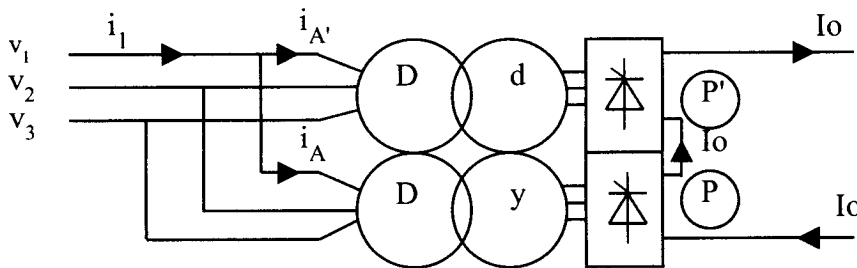


Figure 6

- B.2.3-** La valeur efficace I_{1f} est donnée par : $I_{1f} = 1,56 mI_o$
Calculer I_{1f} pour $I_o=830$ A et $m=0,27$.
Comparer les valeurs de I_1 et de I_{1f} . Commenter.
- B.2.4-** Calculer la puissance active P et la puissance réactive Q fournies par le réseau pour $\alpha=30^\circ$ sachant que le déphasage φ_1 de i_{1f} par rapport à v_1 vaut α .
- B.2.5-** Les spectres et les tableaux théoriques des courants harmoniques générés par un pont PD3 et par le convertisseur étudié sont représentés sur les figures 7a et 7b **page 8**.
En déduire Di_1 , taux global de distorsion du courant i_1 .
- B.2.6-** Comparer avec Di_a calculé en B.1.5 et interpréter.

C) ÉTUDE DU FILTRE

Pour diminuer le taux global de distorsion en courant de l'installation, on place sur le réseau (figure 1) un filtre triphasé constitué de 3 éléments identiques couplés en **étoile**.

On envisage un fonctionnement pour lequel la propulsion du navire met en jeu une puissance réactive **Q=14,8 MVAR**.

On fera l'étude pour une seule phase du réseau.

Le modèle équivalent retenu pour ce filtre est représenté figure 8. La tension sinusoïdale entre phase et neutre du réseau a pour valeur efficace **V= 6,3 kV** et pour fréquence **f= 60 Hz**.

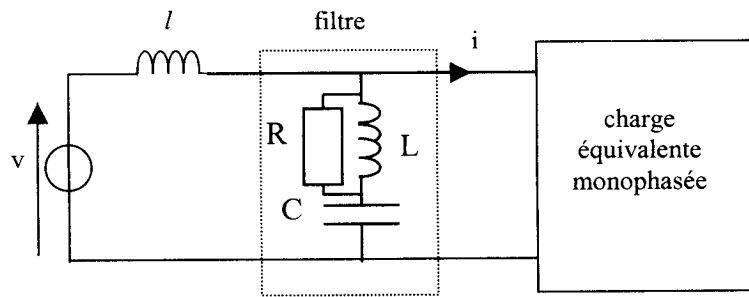


figure 8

C.1- Comportement du filtre à la fréquence du fondamental

A la fréquence du fondamental, on utilise le schéma simplifié de la figure 9.

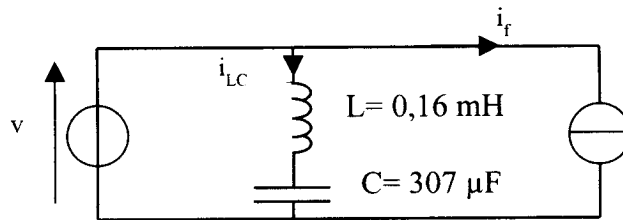


figure 9

- C.1.1- Exprimer puis calculer l'impédance complexe Z_1 du circuit LC pour $f=60$ Hz. En déduire la valeur efficace I_{LC} du courant i_{LC} .
- C.1.2- Calculer la puissance réactive Q_{LC} mise en jeu dans le circuit LC pour $f=60$ Hz.

C.2- Comportement du filtre au rang 11

- C.2.1- Donner l'expression de Z_{e11} , impédance complexe équivalente aux éléments R et L en parallèle pour la fréquence $f_{11}=660$ Hz. Mettre cette expression sous la forme $r+jx$. Sachant que $R = 5 \Omega$, donner les valeurs numériques de r et x.

Dans la suite, on prendra $r=0,086 \Omega$ et $x=0,65 \Omega$.

- C.2.2- Calculer le module de l'impédance Z_{11} du filtre pour la fréquence f_{11} .
- C.2.3- On utilise le modèle représenté figure 10, où i_{11} est l'harmonique de courant de rang 11 généré par l'installation.

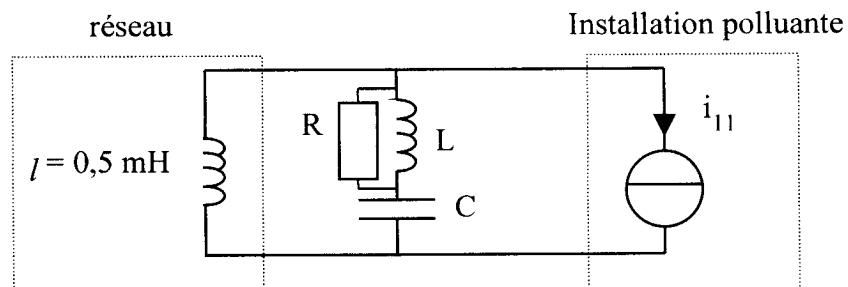
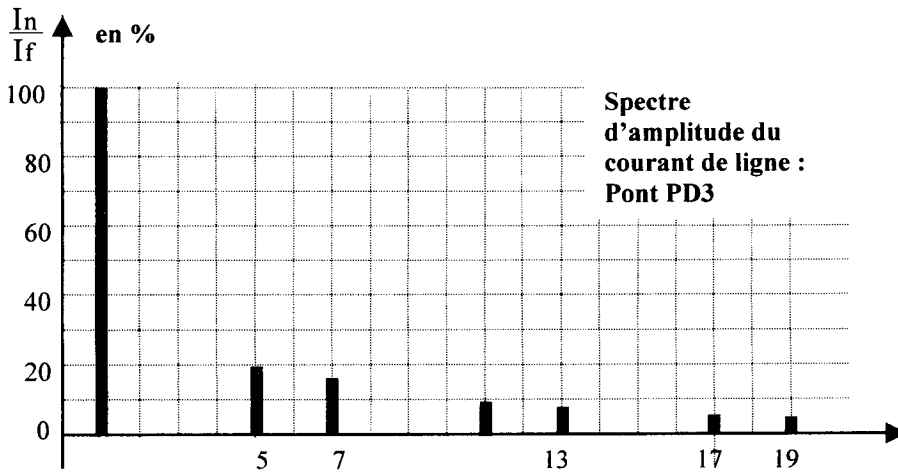


figure 10

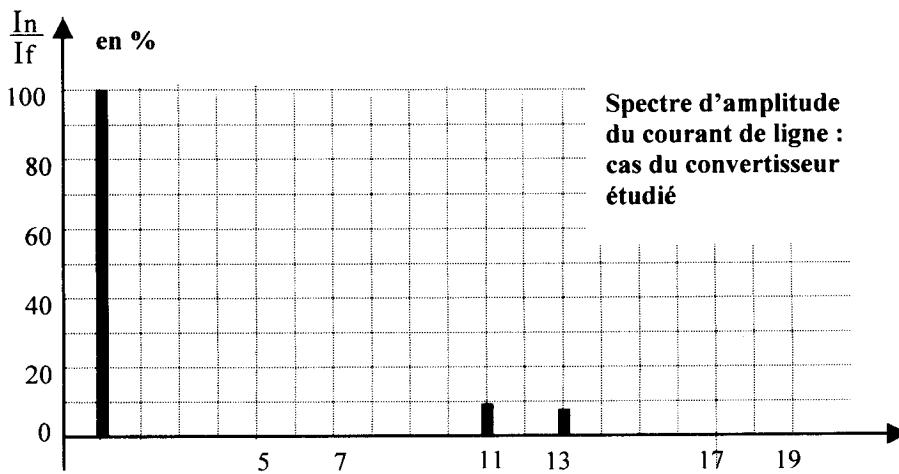
Calculer l'impédance $Z_{\ell_{11}}$ présentée par l'inductance ℓ à la fréquence f_{11} .

Montrer, en comparant les valeurs de Z_{11} et $Z_{\ell_{11}}$, que l'harmonique i_{11} circule principalement dans le filtre.



rang de l'harmonique	% du fondamental
5	20
7	14
11	9
13	8
17	6
19	5

Figure 7a



rang de l'harmonique	% du fondamental
11	9
13	8

Figure 7b

Document réponse n°2

