

SESSION 1992

BTS Électrotechnique

PHYSIQUE APPLIQUÉE

DURÉE : 4 heures. — COEFFICIENT : 3

LISTE DES FIGURES

- Figure 1.* — Schéma de puissance (SNCF).
- Figure 2.* — Courbe « effort total aux jantes ».
- Figure 3.* — La figure qui représente \bar{E}_s et \bar{T}_1 .
- Figure 4.* — Modèle d'une phase du moteur.
- Figure 5.* — Schéma de l'onduleur associé à un moteur.
- Figure 6.* — Pont mixte.
- Figure 7.* — Ponts mixtes en série.
- Figures 8 et 9.* — Amélioration du facteur de puissance.

DOCUMENTS-RÉPONSES

- Document-réponse 1.* — Séquences de conduction des thyristors de l'onduleur pour représenter $i_u(t)$.
- Document-réponse 2.* — Étude des ponts mixtes (trois schémas).

Tournez la page S.V.P.

On se propose d'étudier le dispositif de traction d'une rame du TGV Atlantique. Elle est composée de deux motrices et dix remorques.

On étudiera d'abord les performances mécaniques du train puis les sous-systèmes électrotechniques associés à un bogie moteur. Ceux-ci sont représentés sur la figure 1.

Chaque moteur de traction, de type synchrone autopiloté, est alimenté par son propre onduleur de courant, lui-même alimenté par un courant continu d'intensité I_0 . Ce courant peut être obtenu directement par l'intermédiaire d'un hacheur (thyristor PL) si le train circule sur le réseau 1 500 V continu ou par l'intermédiaire d'un ensemble transformateur/redresseur si les caténaies sont alimentées sous 25 kV alternatif. Dans ce dernier cas, les deux secondaires du transformateur alimentent deux ponts mixtes associés en série (RM1 et RM2). On peut remarquer que le thyristor PL est commun au hacheur et au redresseur RM1.

Toutes les parties du problème sont indépendantes

A. PERFORMANCES MÉCANIQUES

Le document de la figure 2 fournit :

- la limite d'utilisation du groupe propulseur (courbe en trait plein) sous la forme de la force maximale totale de traction $F_{M_{\max}}$ (appelée « effort total aux jantes »), exprimée en daN (1 daN = 10 N), en fonction de la vitesse de la rame exprimée en km/h (1 m/s = 3,6 km/h);
- la force résistante totale F_R en palier, c'est-à-dire lors d'une progression sur une voie horizontale (courbe en trait interrompu).

A.1. La rame de masse totale 483 t progresse en palier à la vitesse constante de 300 km/h.

A.1.1. Quelle doit être la force totale F_M de traction ?

A.1.2. Quelle est la vitesse de la rame en m/s ?

A.1.3. Quelle est dans ces conditions la puissance mécanique totale développée par le groupe propulseur ?

A.2. On étudie les conditions d'accélération de la rame, en palier, à 200 km/h. Le groupe propulseur doit communiquer une accélération initiale de $0,13 \text{ ms}^{-2}$. On rappelle la loi fondamentale de la dynamique applicable dans ces conditions :

$$F_M - F_R = M \, dV/dt.$$

A.2.1. Quelle doit être la force F_M développée par le groupe propulseur pour obtenir cette accélération ?

A.2.2. Quelle est la puissance développée alors par le groupe propulseur ?

B. ÉTUDE D'UN MOTEUR DE TRACTION

La rame est équipée de huit moteurs synchrones triphasés autopilotés. Les caractéristiques nominales de chaque moteur sont données ci-dessous :

$P = 1\,100 \text{ kW}$

$n = 4\,000 \text{ tr/min}$

6 pôles

couplage en étoile

$U = 1\,250 \text{ V}$ entre phases.

B.1. Quelle doit être la fréquence des courants d'alimentation d'un moteur pour qu'il tourne à 2 000 tr/min ? à 4 000 tr/min ?

B.2. Le courant absorbé par chaque phase d'un moteur n'est pas sinusoïdal. On désigne par I_1 la valeur efficace de l'intensité du fondamental. La f.e.m. synchrone E_s est supposée parfaitement sinusoïdale. La figure 3 représente les vecteurs de Fresnel associés à $i_1(t)$ et $e_s(t)$. L'angle ψ , directement lié à la commande des thyristors du pont triphasé, est imposé par le système électronique de contrôle des moteurs.

Pour toute cette partie, on donne :

$$n = 4000 \text{ tr/min} \quad I_1 = 590 \text{ A} \quad \psi = -\frac{\pi}{4} \text{ rad} \quad E_s = 885 \text{ V.}$$

B.2.1. Exprimer la puissance électromagnétique totale, P_{em} , développée par chaque moteur.

B.2.2. Calculer numériquement P_{em} et le moment T_{em} du couple électromagnétique.

B.2.3. Pour étudier la relation entre le fondamental v_1 de la tension aux bornes d'un enroulement du moteur et l'intensité i_1 du fondamental du courant absorbé, on adopte le modèle de la figure 4 (modèle par phase).

On donne à 4000 tr/min, $X_s = 0,45 \Omega$. Le moteur est surexcité et dans ces conditions i_1 est en avance sur v_1 de $\frac{\pi}{6}$ rad. Calculer la valeur efficace V_1 dans ces conditions de fonctionnement.

C. ÉTUDE DE L'ONDULEUR

Chaque moteur est alimenté par un onduleur de courant (fig. 5); le courant d'intensité I_0 , supposé parfaitement lissé, est commuté vers les enroulements du moteur par les thyristors (le blocage de ces derniers ne sera pas étudié).

C.1. Le diagramme de conduction des thyristors est donné sur le document-réponse 1. Dessiner sur ce document la forme de l'intensité i_U du courant absorbé par la phase U du moteur (fig. 5).

C.2. Exprimer la valeur efficace de i_U en fonction de I_0 .

C.3. Exprimer la valeur efficace I_1 de l'intensité i_U du fondamental de ce courant en utilisant le résultat donné en annexe.

Application numérique : calculer la valeur à donner à I_0 pour avoir $I_1 = 590 \text{ A}$.

D. ÉTUDE DU REDRESSEUR COMMANDÉ

D.1. Étude d'un pont mixte fournissant l'intensité constante I_0 .

Le pont étudié, représenté à la figure 6, est alimenté par une tension sinusoïdale $v_s(\theta)$, délivrée par un secondaire du transformateur, dont l'expression en volts est :

$$v_s(\theta) = 1670 \sqrt{2} \sin \theta \quad \text{avec} \quad \theta = \omega t \quad \text{et} \quad \omega = 100 \pi \text{ rad/s.}$$

On désigne par α l'angle de retard à l'amorçage des thyristors par rapport à la commutation naturelle.

D.1.1. Pour $\alpha = 0$, puis $\alpha = \frac{\pi}{2}$, représenter sur le document-réponse 2, la tension redressée ainsi que les intervalles de conduction des semi-conducteurs et calculer sa valeur moyenne dans les deux cas. Sachant que le courant débité est parfaitement lissé et d'intensité moyenne $I_0 = 755 \text{ A}$, calculer dans les deux cas la puissance fournie par le redresseur à la charge.

D.1.2. Pour $\alpha = 0$, puis $\alpha = \frac{\pi}{2}$, représenter de même l'intensité i_s du courant au secondaire du transformateur dans le cas où $I_0 = 755 \text{ A}$. Dessiner l'allure du fondamental de ce courant et calculer sa valeur efficace dans les deux cas (on pourra utiliser le résultat donné en annexe).

Préciser la valeur du déphasage \emptyset du fondamental du courant par rapport à la tension dans les deux cas ; en déduire les puissances active P_s et réactive Q_s absorbées par le pont, toujours pour les deux valeurs de α .

D.2. Étude des ponts en série à commande décalée.

Le redresseur est constitué de deux ponts mixtes asymétriques (voir fig. 7), alimentés par les tensions sinusoïdales v_{s1} et v_{s2} de valeur efficace 1,67 kV. Soit α_1 l'angle d'amorçage du pont 1 et α_2 celui du pont 2 ;

on se place dans le cas où $\alpha_1 = 0$ et $\alpha_2 = \frac{\pi}{2}$; $I_0 = 755 \text{ A} = C^{te}$.

D.2.1. Représenter sur le document-réponse 2 la tension redressée. Calculer sa valeur moyenne ainsi que la puissance fournie à la charge.

D.2.2. On considère que le transformateur d'alimentation $25 \text{ kV}/2 \times 1,67 \text{ kV}$ est idéal (fig. 7). Il comporte n_1 spires au primaire et n_2 spires sur chaque enroulement secondaire.

Montrer que $\frac{i_p}{(i_{s1} + i_{s2})} = C^{te}$; exprimer cette constante en fonction de n_1 et n_2 .

Représenter l'intensité i_p sur le document-réponse 2. Calculer sa valeur efficace et la puissance apparente appelée au primaire.

Quelles sont les puissances active P_p et réactive Q_p mises en jeu au primaire ?

Quel est le facteur de puissance f_p au primaire ?

E. AMÉLIORATION DU FACTEUR DE PUISSANCE

Le transformateur d'une motrice est alimenté sous 25,0 kV. Chaque secondaire délivre une tension sinusoïdale de valeur efficace 1,67 kV et fournit au pont qu'il alimente un courant dont le fondamental est en retard par rapport à la tension. On cherche à compenser la puissance réactive consommée pour améliorer le facteur de puissance.

E.1. On place en parallèle sur chaque secondaire un condensateur C_0 comme l'indique la figure 8. Calculer sa capacité sachant qu'il doit compenser une puissance réactive de 570 kVAR.

E.2. Le courant appelé par le redresseur comporte de surcroît de nombreux harmoniques qui participent à la dégradation du facteur de puissance ; on décide d'éliminer l'harmonique le plus gênant de fréquence 150 Hz (harmonique de rang 3) et on remplace C_0 par une cellule L_1, C_1 (fig. 9).

E.2.1. Donner la relation existant entre L_1, C_1 et ω pulsation du fondamental ($f = 50\text{Hz}$), pour que le filtre soit accordé sur 150 Hz.

E.2.2. Calculer la réactance à 50 Hz de ce circuit en fonction L_1, C_1 et ω puis, compte tenu de la relation établie à la question précédente, exprimer cette réactance en fonction de C_1 et de ω .

E.2.3. Calculer la capacité C_1 et l'inductance L_1 de façon à ce que le filtre soit accordé sur 150 Hz et qu'il compense une puissance réactive de 570 kVAR à 50 Hz.

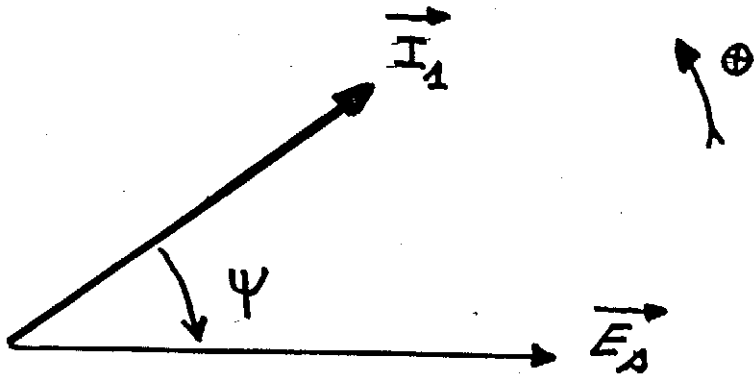


Figure 3

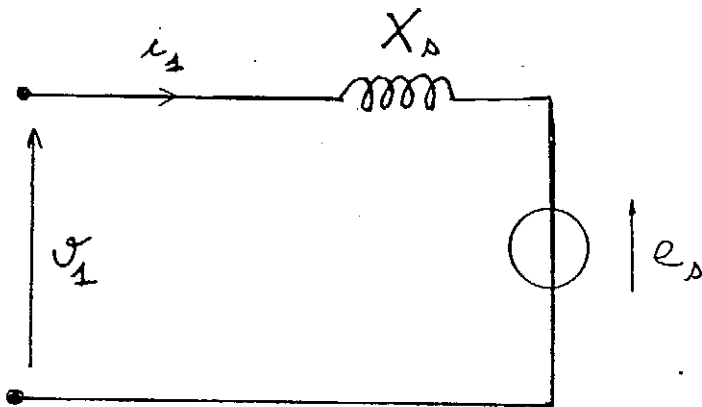


Figure 4

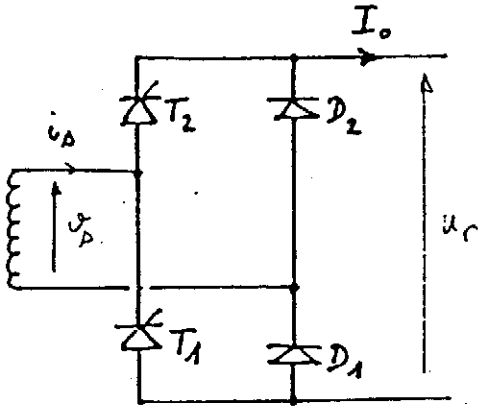


Figure 6

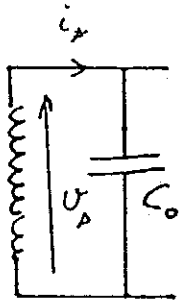


Figure 7

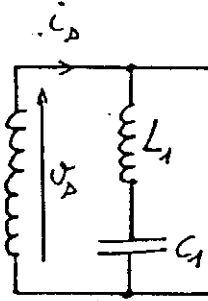


Figure 8

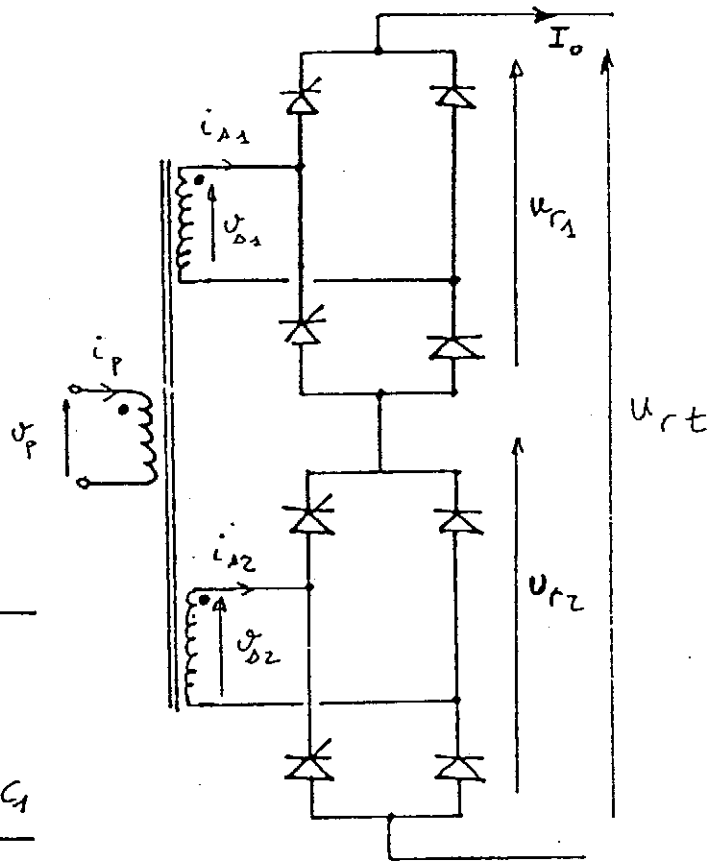
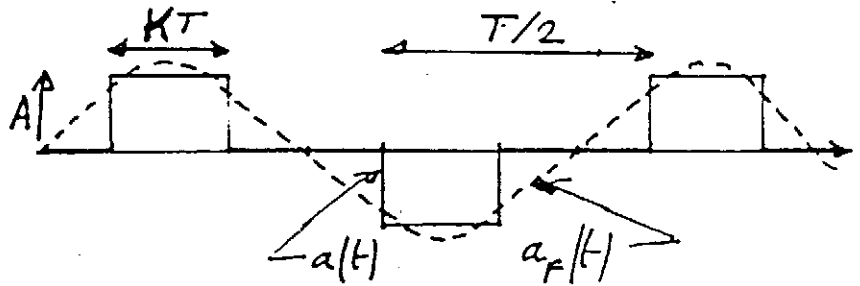


Figure 9

ANNEXE

ANALYSE HARMONIQUE

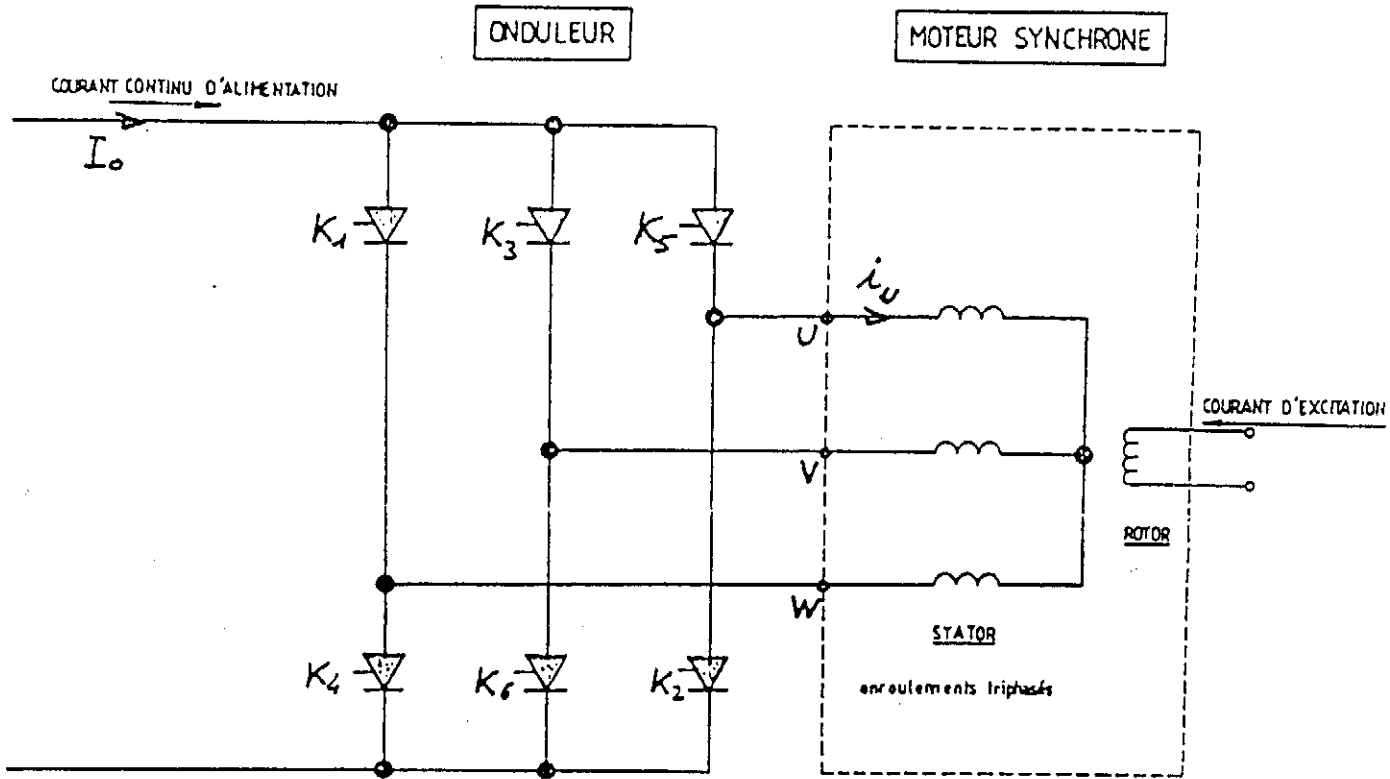
Développement en série de Fourier d'un signal $a(t)$ en créneaux.



Amplitude du fondamental $a_F(t)$:

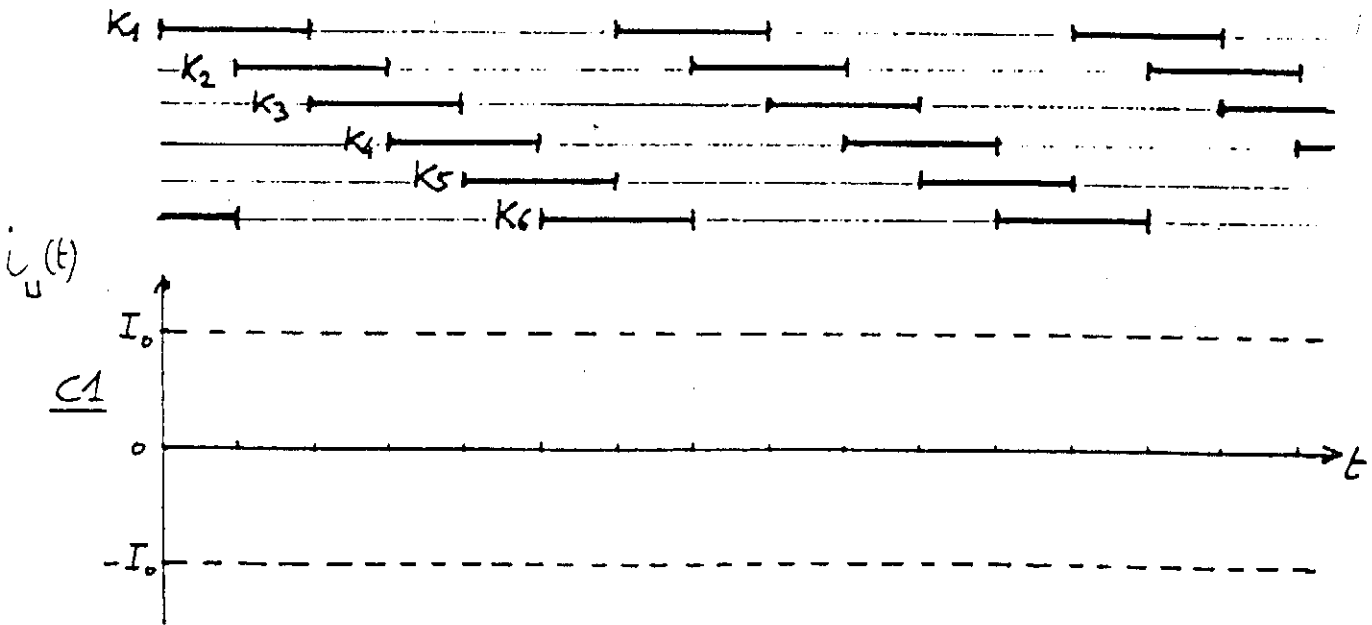
$$\hat{A}_F = \frac{4}{\pi} \cdot A \cdot \sin K\pi.$$

DOCUMENT-RÉPONSE 1



SNCF DIRECTION DU MATERIEL
DEPARTEMENT DE LA CONSTRUCTION

Fig 5



DOCUMENT-RÉPONSE 2

