

**BREVET DE TECHNICIEN SUPÉRIEUR
ÉLECTROTECHNIQUE**

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

Durée : 4 heures

Coefficient : 3

Calculatrice autorisée

Motorisation d'une rame de métro

On se propose d'étudier la motorisation d'un véhicule de transport en commun à traction électrique du type "métro". Le problème comporte trois parties :

- Etude du moteur à courant continu
- Analyse du fonctionnement du hacheur d'alimentation
- Protection de l'interrupteur de puissance contre les surtensions

Ces trois parties pourront être traitées de manière indépendante les unes des autres.

1° partie : Étude du moteur de traction

Le moteur de traction est une machine à courant continu à excitation séparée dont les caractéristiques nominales sont données ci-dessous :

Puissance absorbée : $P_n=165$ kW

Tension d'alimentation : $U_n=375$ V

Fréquence de rotation : $N_n=3000$ tr/mn.

L'induit a une résistance $R=50$ m Ω et une inductance $L=3,0$ mH.

L'inducteur a pour résistance $R_e=16$ Ω

La réaction magnétique d'induit est négligée ainsi que la chute de tension aux balais.

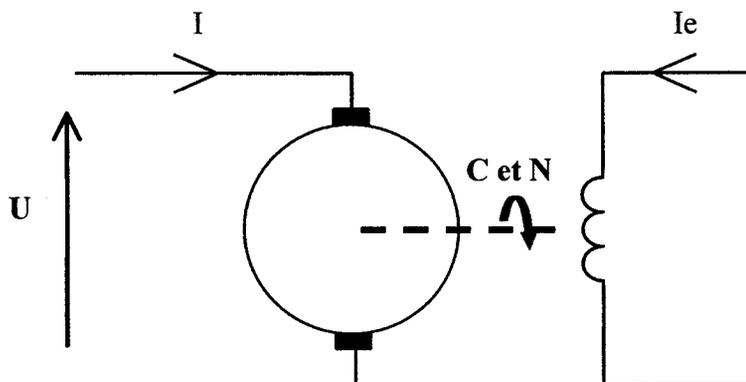


Figure 1

Les sens conventionnels des différentes grandeurs, tensions, courants, couple et fréquence de rotation sont donnés sur la figure 1. Toutes ces grandeurs sont algébriques et sont susceptibles de changer de signe suivant le mode de fonctionnement.

1.1 Un essai en moteur, alimenté sous sa tension nominale avec un courant inducteur $I_e= +25$ A, a permis de mesurer un courant dans l'induit $I= +440$ A pour une fréquence de rotation $N= +2000$ tr/mn.

1.1.1 Calculer pour ce fonctionnement, la force électromotrice E et le couple électromagnétique C_{em} développés par le moteur.

1.1.2 Le couple utile, mesuré sur l'arbre du moteur a pour valeur $C_u = +710$ N.m. En déduire la valeur du couple C_p regroupant les pertes fer et mécaniques de la machine.

1.1.3 Calculer les pertes dans l'enroulement inducteur et évaluer le rendement du moteur.

1.2 La machine fonctionne maintenant en génératrice. Ce fonctionnement est obtenu par inversion du courant inducteur $I_e = -25$ A. Le courant dans l'induit est $I = +300$ A et la tension $U = -375$ V. Calculer la fréquence de rotation N et le couple électromagnétique C_{em} pour ce fonctionnement, on précisera en particulier leurs signes.

1.3 Entre deux stations, le mouvement du véhicule comporte :

- une phase d'accélération $[0, t_1]$
- une phase à vitesse constante Ω_0 : $[t_1, t_2]$
- une phase de décélération $[t_2, t_3]$.

Le graphe des variations de la vitesse de rotation de la machine à courant continu est représenté sur le **document réponse n°1**.

On désigne par J le moment d'inertie de l'ensemble des pièces en mouvement ramené sur l'axe de rotation du moteur.

On donne : $\Omega_0 = 217 \text{ rad.s}^{-1}$; $t_1 = 13 \text{ s}$; $t_2 = 70 \text{ s}$; $t_3 = 83 \text{ s}$ et $J = 52 \text{ kg.m}^2$.

On néglige dans cette question toutes les pertes du moteur.

1.3.1 Pour chaque phase de fonctionnement, calculer l'accélération angulaire $d\Omega/dt$ de l'arbre de rotation du moteur.

1.3.2 Le couple résistant exercé sur l'arbre de rotation est :

$$C = -k.\Omega \text{ avec } k = 2,3 \text{ N.m.s.rad}^{-1}.$$

Tracer sur le **document réponse n°1** les variations de ce couple en fonction du temps lors du déplacement entre deux stations.

1.3.3 On rappelle la relation fondamentale de la dynamique de rotation :

$$J.d\Omega/dt = C_{em} + C$$

Pour chaque intervalle de fonctionnement donner l'expression du couple électromagnétique C_{em} délivré par la machine à courant continu en fonction de la vitesse angulaire de rotation Ω .

Pour $0 < t < t_3$, tracer sur le **document réponse n°1** les variations de C_{em} en fonction du temps

1.3.4 En déduire le déplacement du point de fonctionnement de la machine à courant continu dans le plan $C_{em}(\Omega)$ et le représenter sur le **document réponse n°1**.

2° partie : Étude du hacheur

L'induit de la machine à courant continu est piloté par un hacheur alimenté à partir du réseau 375 V continu symbolisé par la source de tension V , conformément au schéma électrique représenté figure 2.

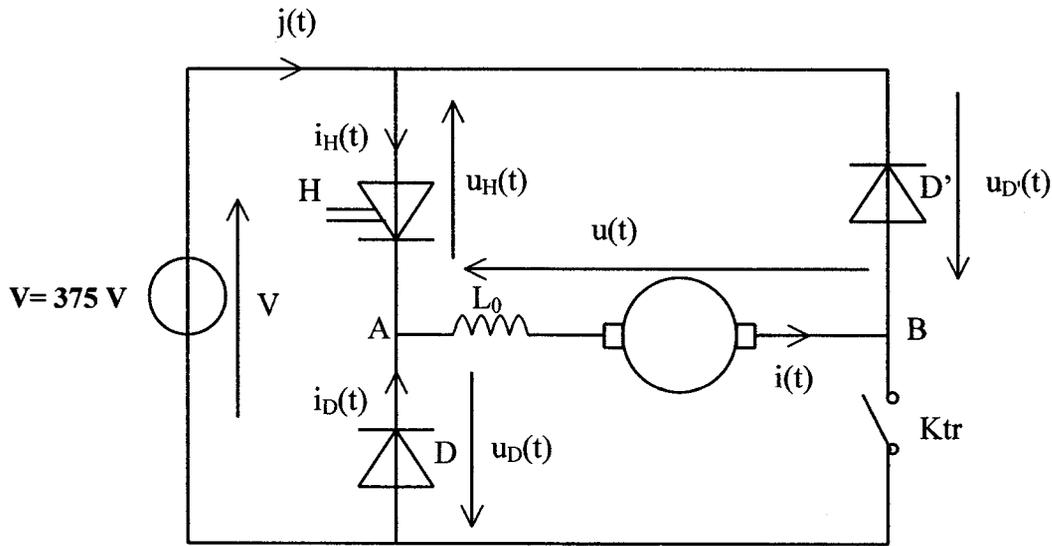


Figure 2

H est un interrupteur unidirectionnel en courant, commandé à l'ouverture et à la fermeture. Cet interrupteur, ainsi que les diodes D et D', sont considérés comme parfaits : aucune chute de tension à l'état passant, aucun courant à l'état bloqué et commutations instantanées.

Ktr est un contacteur dit de traction qui peut être ouvert ou fermé suivant l'utilisation de la machine à courant continu.

L_0 est une inductance de lissage.

On néglige la résistance de l'induit de la machine à courant continu. Le schéma électrique équivalent de la charge du hacheur entre les points A et B se ramène alors à celui représenté figure 3 où L_1 représente la somme des inductances de l'induit et de l'inductance de lissage ; E représente la force électromotrice développée par l'induit de la machine à courant continu.

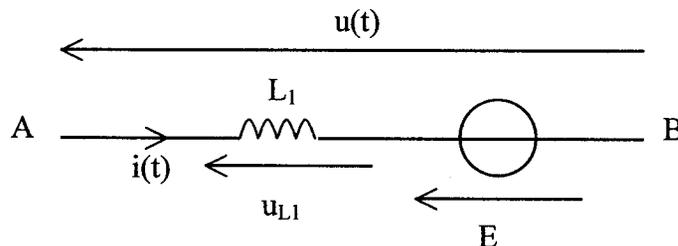


Figure 3

La fréquence de hachage est telle que, compte tenu de l'inertie des pièces en mouvement, la fréquence de rotation de la machine à courant continu peut être considérée comme constante sur une période de fonctionnement du hacheur.

2.1 Étude en traction : K_{tr} est constamment fermé, I_e et Ω sont positifs : la machine à courant continu délivre une f.e.m E positive.

2.1.1 Montrer que tant que K_{tr} est fermé, la diode D' ne peut pas conduire.

2.1.2 L'interrupteur H est commandé à la fréquence $f = 300$ Hz.

Sur une période de fonctionnement, il conduit de $t = 0$ jusqu'à $t = \alpha T$ ($0 < \alpha < 1$). Il est bloqué sur le reste de la période.

On s'intéresse au fonctionnement en régime permanent : le courant $i(t)$ est alors périodique et ses variations sont données sur le chronogramme représenté sur le **document réponse n°2**.

Sur ce document, représenter en les hachurant, les intervalles de conduction des différents interrupteurs. En déduire le graphe des variations de la tension $u(t)$ en sortie du hacheur.

2.1.3 Donner la valeur moyenne U_0 de cette tension en fonction de V et α .

Montrer que la force électromotrice E développée par la machine à courant continu est égale à U_0 .

2.1.4 Représenter sur le **document réponse n°2** les variations des tensions $u_H(t)$ aux bornes de l'interrupteur H et $u_D(t)$ aux bornes de la diode D.

2.1.5 Représenter sur le **document réponse n°2** les variations des courants i_H et i_D qui traversent respectivement H et D et exprimer leurs valeurs moyennes I_{H0} et I_{D0} en fonction de α , I_M et I_m .

2.1.6 Etablir l'expression du courant $i(t)$ pour $0 < t < \alpha T$. En déduire l'expression de l'ondulation $\Delta i = I_M - I_m$ en fonction de α , V , L_1 et f .

2.1.7 Calculer la valeur de l'inductance L_1 pour $\alpha = 0,75$, $f = 300$ Hz, $I_M = 400$ A et $I_m = 350$ A.

2.2 Étude en phase de freinage : K_{tr} est constamment ouvert. I_e est négatif, Ω est positif, la machine à courant continu délivre une f.e.m E négative.

L'interrupteur H est toujours commandé à la fréquence $f = 300$ Hz avec le rapport cyclique α : il conduit de $t = 0$ jusqu'à $t = \alpha T$ ($0 < \alpha < 1$) ; il est bloqué sur le reste de la période.

Le courant dans l'induit de la machine à courant continu évolue suivant le graphe représenté sur le **document réponse n°3** : le régime permanent est atteint, $i(t)$ est périodique.

2.2.1 Pour $0 < t < \alpha T$ faire le schéma électrique équivalent montrant la maille dans laquelle circule le courant $i(t)$.

2.2.2 Même question pour $\alpha T < t < T$.

2.2.3 Sur le **document réponse n°3**, représenter en les hachurant, les intervalles de conduction des différents interrupteurs.

2.2.4 En déduire le graphe des variations de la tension $u(t)$ en sortie du hacheur et le représenter sur le **document réponse n°3**. En déduire l'expression de sa valeur moyenne U_0 en fonction de V et α .

2.2.5 Pour chacune des phases de fonctionnement, tracer sur le **document réponse n°3** les variations du courant dans la source $j(t)$ (voir figure 2).

En déduire l'expression de sa valeur moyenne J_0 en fonction de I_M , I_m et α .

2.2.6 En fonction de J_0 et V , exprimer la puissance moyenne P_0 fournie par la source V . Quel est son signe ?

Donner en le justifiant le type de fonctionnement, moteur ou génératrice, de la machine à courant continu.

2.2.7 Pour $\alpha=0,10$ le courant i évolue entre $I_m=300$ A et $I_M=325$ A. Calculer P_0 .

3° partie : Protection du GTO

L'interrupteur H (figure 4) est un thyristor blocable par la gâchette (GTO) pour lequel il est nécessaire de limiter les surtensions dues aux inductances parasites lors de son ouverture.

Pour cela on utilise le dispositif d'aide à la commutation représenté sur la figure 4 constitué de la diode D'' , supposée parfaite, de la résistance R' et du condensateur C.

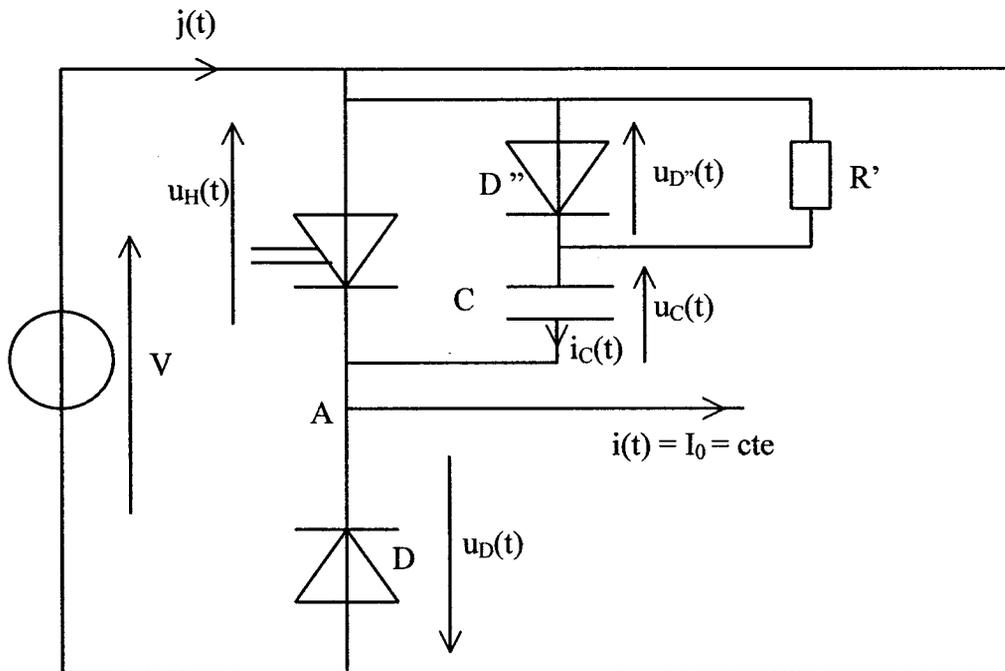


Figure 4

On suppose dans cette étude que :

- le courant I_0 appelé par l'induit de la machine à courant continu est constant ;
- l'ouverture et la fermeture du GTO sont toujours instantanées.

On se limite à l'étude de la commutation à l'ouverture

Juste avant l'ordre d'ouverture du GTO, le condensateur C est déchargé. On considère maintenant comme instant origine $t=0$, l'instant où le GTO cesse de conduire.

3.1. Montrer qu'à l'instant $t=0^+$ (instant suivant immédiatement l'ouverture du GTO), la diode D ne peut pas entrer en conduction.

3.2. En déduire que la conduction est alors assurée par la diode D". Montrer que le courant i_c traversant le condensateur vaut I_0 . Donner l'expression de la tension $u_c(t)$ aux bornes du condensateur pour $t > 0$.

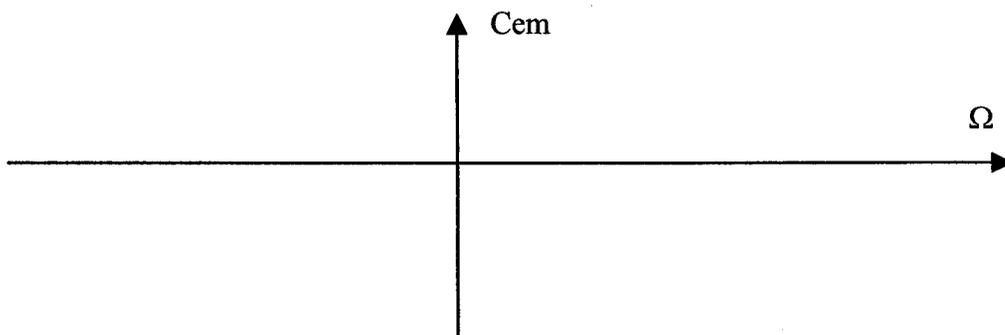
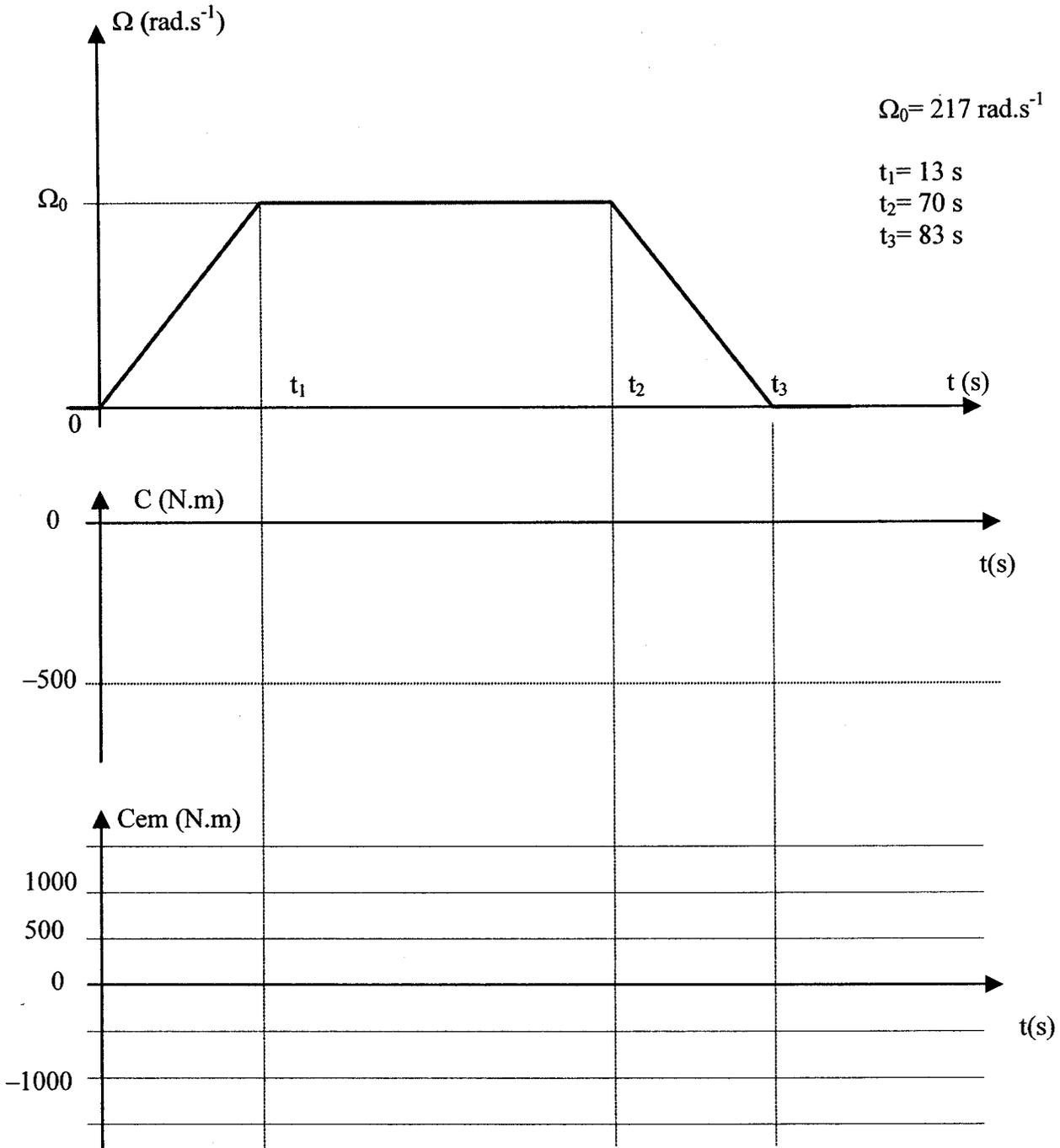
3.3. Donner l'expression de la tension $u_D(t)$ aux bornes de la diode D en fonction de V et $u_c(t)$. Montrer que lorsque $u_c(t)$ atteint la valeur V, la diode D entre en conduction et la diode D" se bloque ; on désignera par t_{01} cet instant.

Donner l'expression de l'énergie W_C qui est alors emmagasinée dans le condensateur en fonction de C et V.

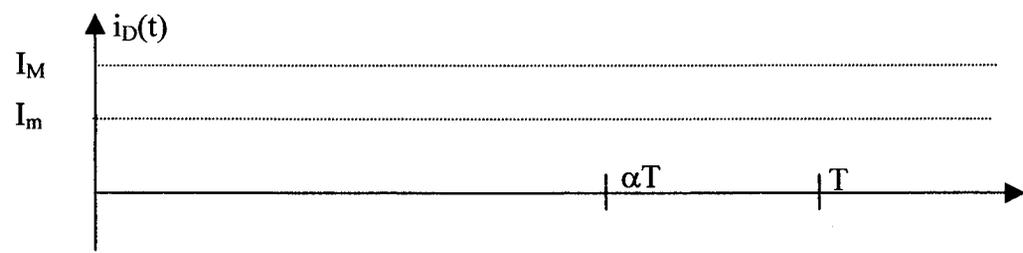
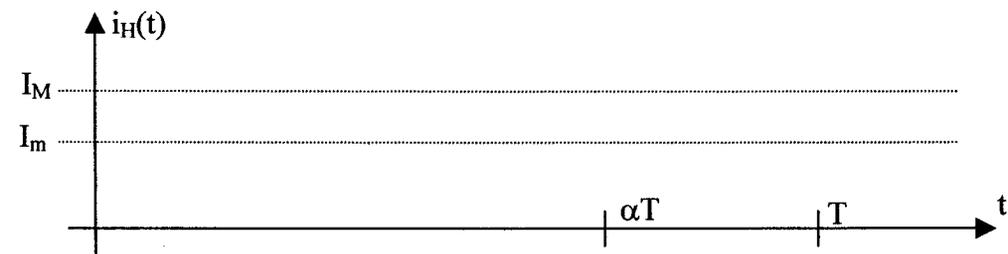
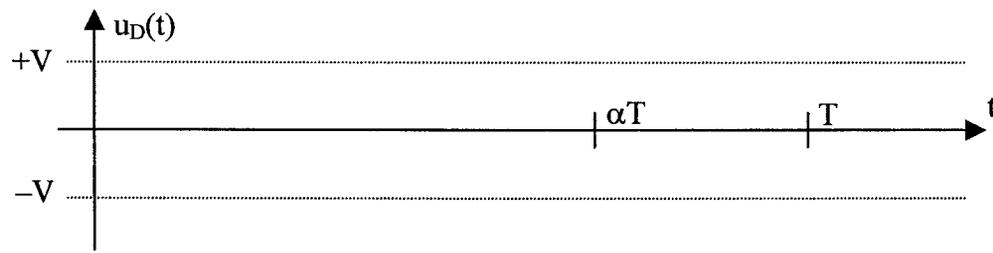
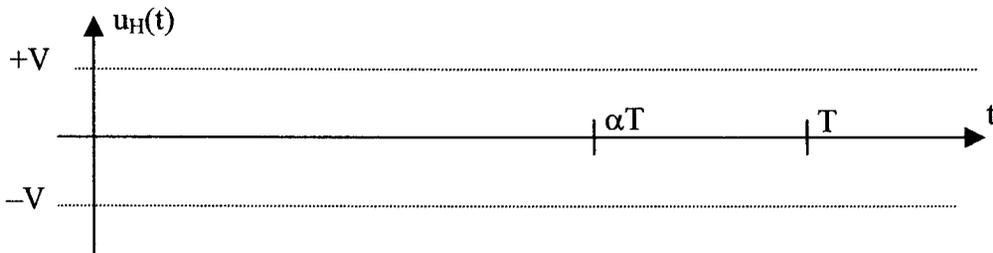
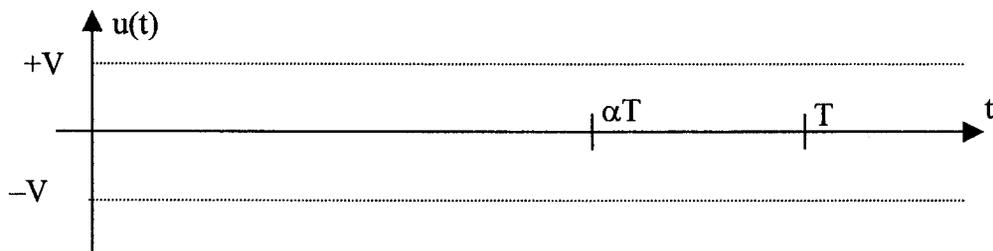
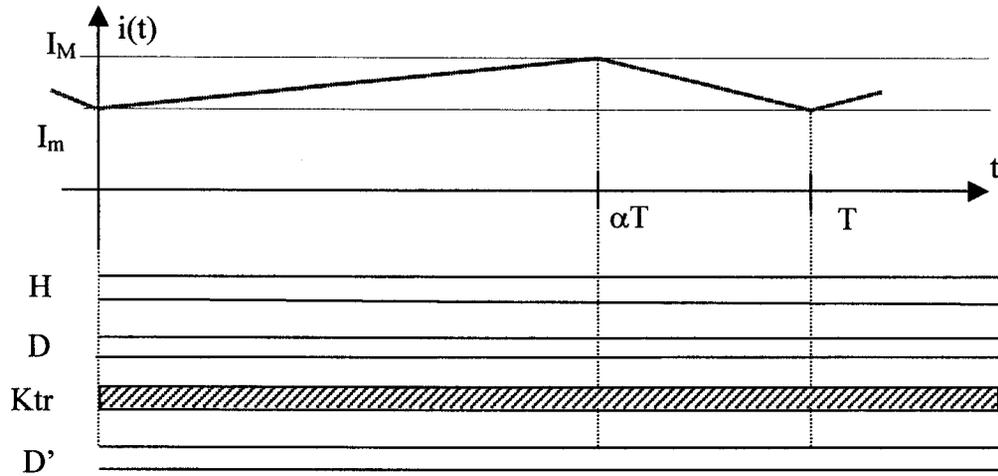
3.4. Montrer que la tension $u_c(t)$ reste constante et égale à V de l'instant t_{01} jusqu'à l'instant t_{02} de fermeture du GTO.

3.5. Tracer sur le **document réponse n°4** l'évolution de la tension $u_c(t)$ de $t=0$ à $t=t_{02}$.

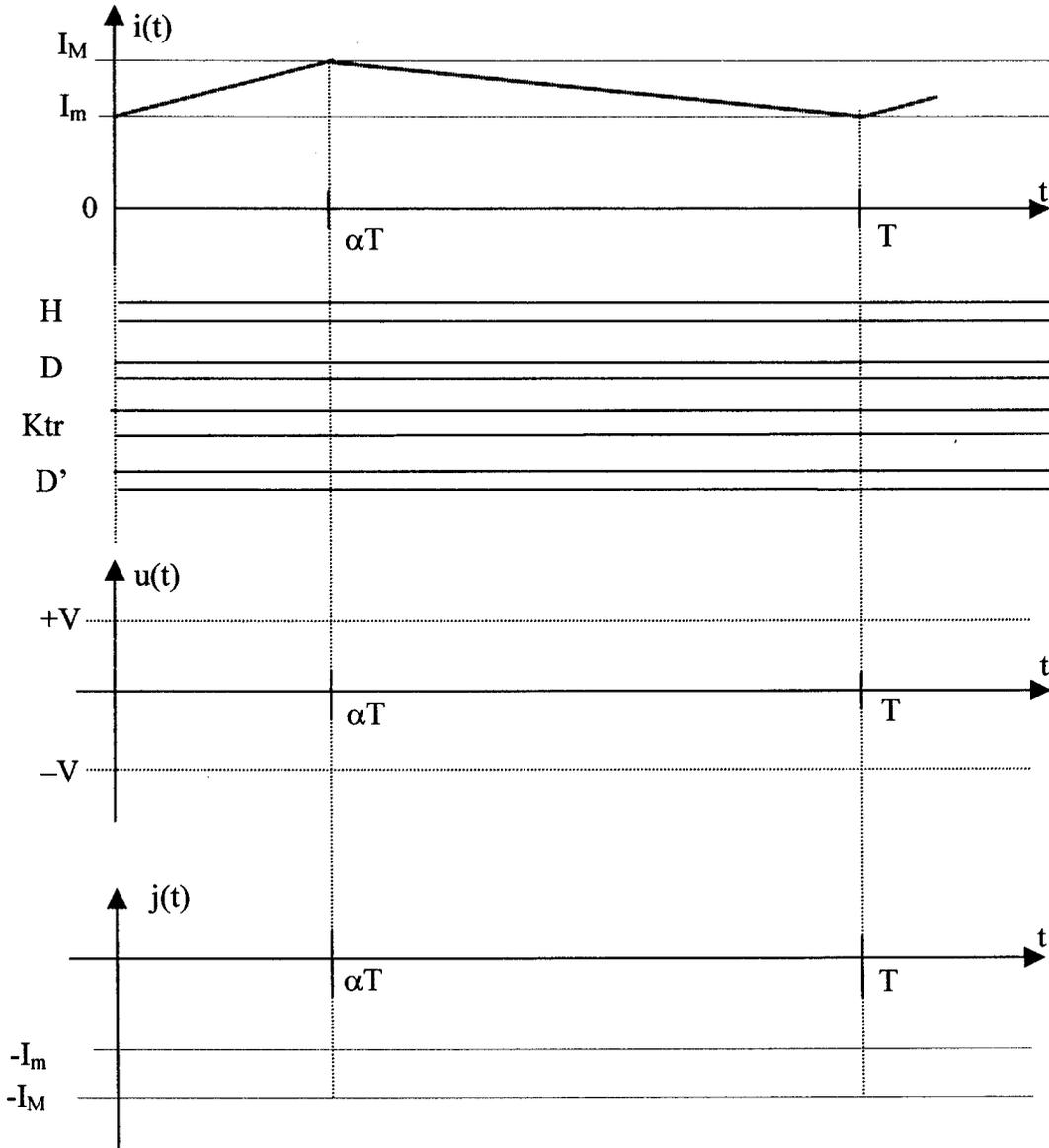
DOCUMENT REPOSE N°1



DOCUMENT REPOSE N°2



DOCUMENT REPOSE N°3



DOCUMENT REPOSE N°4

