

### 5 exercices corrigés d'Electronique de puissance sur le hacheur

#### Exercice Hach01 : hacheur série

On alimente un moteur à courant continu dont le schéma équivalent est donné ci-dessous, à l'aide d'un hacheur.

L'interrupteur électronique K et la diode sont supposés parfaits.

La période de hachage est T, le rapport cyclique  $\alpha$ .

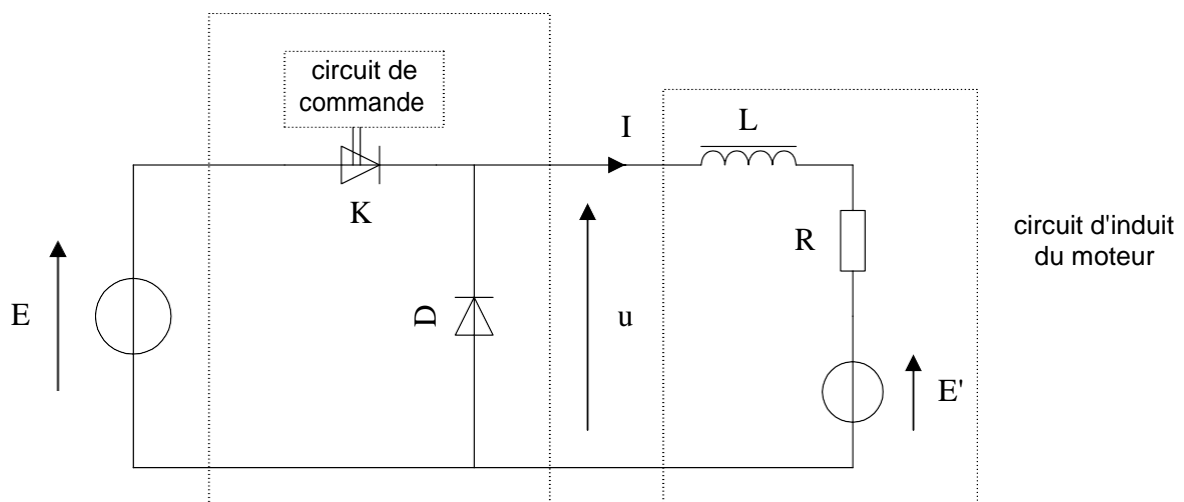
L'inductance L du bobinage de l'induit du moteur a une valeur suffisante pour que la forme du courant dans l'induit soit pratiquement continue.

Le hacheur est alimenté par une tension continue  $E = 220 \text{ V}$ .

La f.e.m.  $E'$  du moteur est liée à sa vitesse de rotation n par la relation :

$$E' = 0,20 n \quad \text{avec } E' \text{ en V et } n \text{ en tr/min}$$

L'induit a pour résistance  $R = 2,0 \Omega$ .



1- Etude de la tension u pour  $\alpha = 0,80$ .

1-1- Représenter, en la justifiant, l'allure de la tension u.

On prendra comme instant origine celui où l'interrupteur K se ferme.

1-2- Déterminer l'expression littérale de la valeur moyenne  $\langle u \rangle$  de la tension u, en fonction de E et du rapport cyclique  $\alpha$ .

Calculer sa valeur numérique.

2- Fonctionnement du moteur pour  $\alpha = 0,80$ .

Le moteur fonctionne en charge, la valeur moyenne du courant d'induit est  $\langle I \rangle = 10 \text{ A}$ .

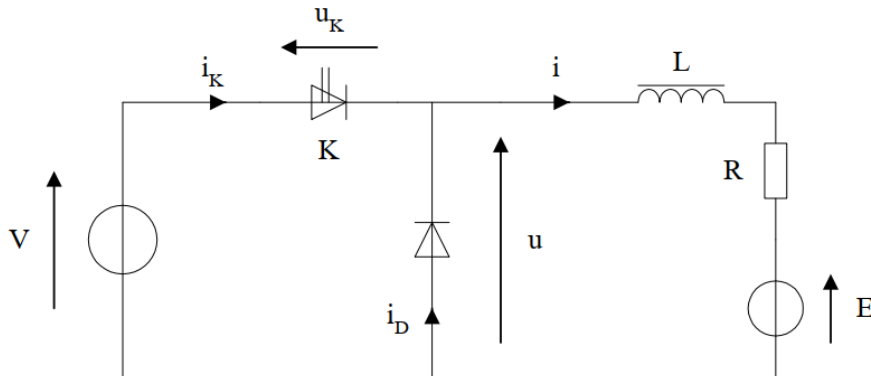
Déterminer  $E'$  et en déduire n.

3- Le dispositif de commande du hacheur est tel que le rapport cyclique  $\alpha$  est proportionnel à une tension de commande  $u_c$  :  $\alpha = 100 \%$  pour  $u_c = 5 \text{ V}$ .

Tracer la caractéristique  $\langle u \rangle$  en fonction de  $u_c$ .

### Exercice Hach02 : hacheur série

Un moteur à courant continu travaillant à couple constant est inclus dans le montage ci-dessous :



Le hacheur fonctionne à une fréquence  $f = 500$  Hz.

L'interrupteur  $K$  est fermé lorsque  $0 < t < \alpha T$  et ouvert entre  $\alpha T$  et  $T$ .

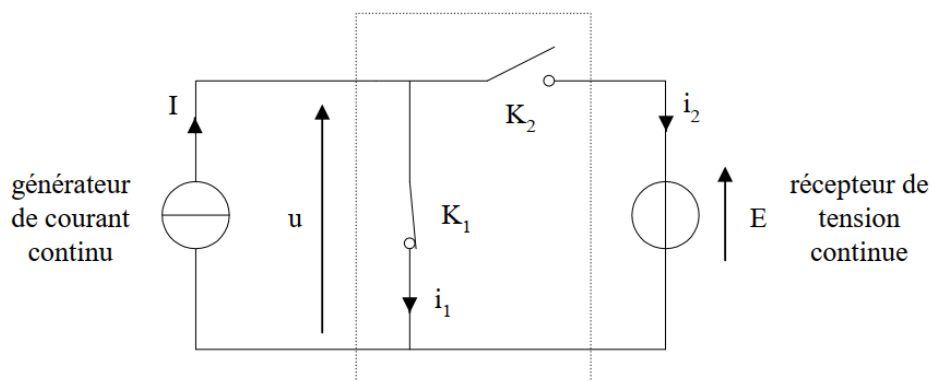
La diode est supposée parfaite.

L'inductance de la bobine de lissage  $L$  est de valeur suffisante pour que le courant dans le moteur soit considéré comme constant :  $i = I = \text{cte}$ .

La résistance de l'induit du moteur est :  $R = 1 \Omega$ .

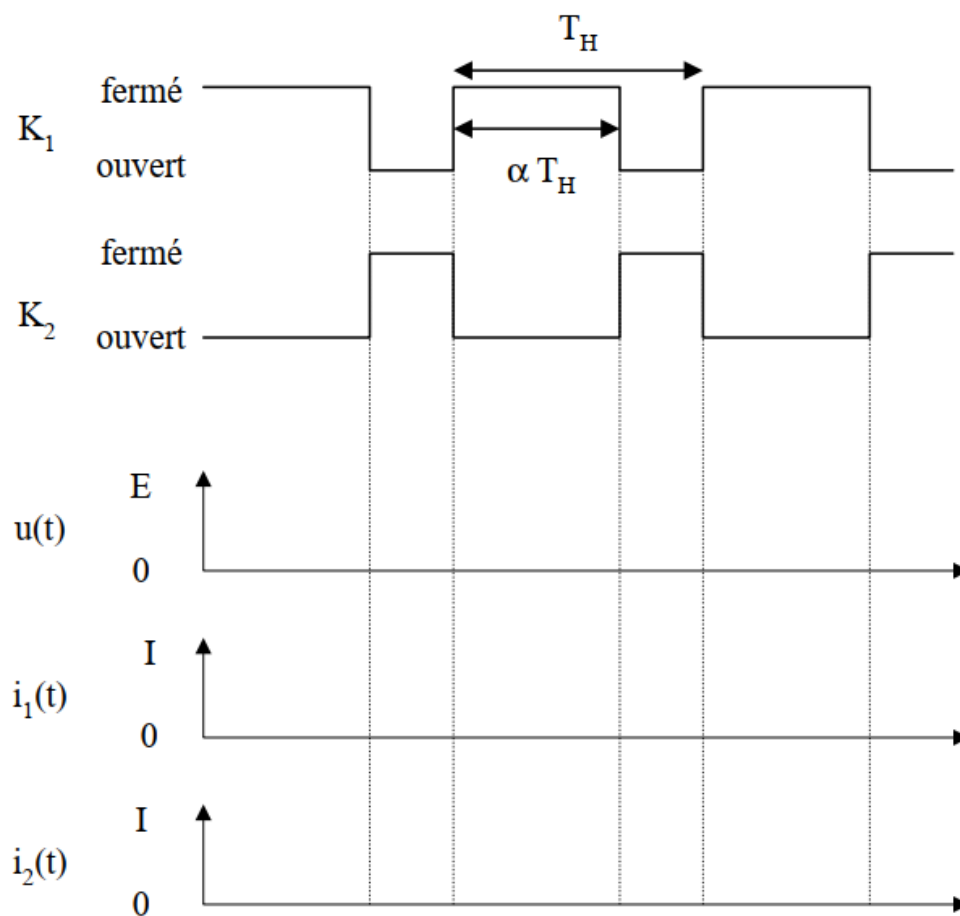
- 1- Représenter les allures de  $u$  et  $u_K$  en fonction du temps.
- 2- Exprimer la valeur moyenne de  $u$  en fonction de  $V$  et  $\alpha$ .
- 3- Représenter les allures de  $i_K$  et  $i_D$  en fonction du temps.
- 4- Exprimer les valeurs moyennes des courants  $i_K$  et  $i_D$  en fonction de  $I$  et  $\alpha$ .
- 5- Déterminer l'intensité  $I$  du courant dans le moteur en fonction de  $V$ ,  $E$ ,  $R$  et  $\alpha$ .
- 6- Application numérique : Calculer  $\langle u \rangle$ ,  $I$  et  $\langle i_D \rangle$  pour  $V = 220$  V,  $E = 145$  V et  $\alpha = 0,7$ .
- 7- Établir la relation liant la vitesse  $n$  du moteur (en tr/min) à  $\alpha$  pour  $E = 0,153 n$ , sachant que  $R = 1 \Omega$ ,  $V = 220$  V et  $I = 9$  A.
- 8- Tracer  $n$  en fonction de  $\alpha$ .

### Exercice Hach03 : hacheur parallèle



Les deux interrupteurs électroniques sont supposés parfaits.

1- On donne les séquences de conduction de  $K_1$  et  $K_2$ .  
Compléter les chronogrammes :



2- Donner la relation entre  $\langle u \rangle$ ,  $\alpha$  et  $E$ .

### Exercice Hach04 : module convertisseur DC/DC

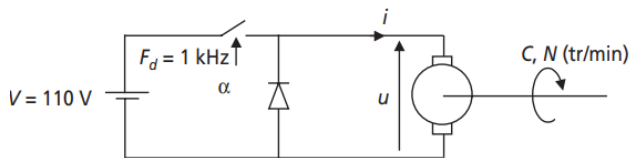
Un convertisseur DC/DC possède les caractéristiques suivantes :

Puissance utile (max.) :	2 watts
Tension d'entrée (continue) :	4,5 à 9 V
Tension de sortie (continue) :	12 V
Rendement :	75 %

- 1- Calculer le courant de sortie maximal.
- 2- A puissance utile maximale, calculer la puissance thermique dissipée par le convertisseur.
- 3- On applique 5 V en entrée.  
Calculer le courant d'entrée maximal.

### Exercice Hach05 MCC alimentée par un hacheur abaisseur

On considère le circuit de la *figure ci-dessous* dans lequel la machine à courant continu est alimentée par l'intermédiaire d'un hacheur abaisseur.



Les caractéristiques de la machine sont : résistance de l'induit  $R = 0,5 \Omega$ , inductance d'induit  $L = 13,7$  mH, courant d'induit nominal :  $I_n = 17$  A, tension nominale :  $U_n = 100$  V

Les caractéristiques du hacheur sont : Interrupteur commandé et diodes considérés comme parfaits, fréquence de découpage  $F_d = 1$  kHz, rapport cyclique  $\alpha$  (interrupteur fermé sur l'intervalle  $[0, \alpha T]$  et ouvert sur  $[\alpha T, T]$ ,  $T$  étant la période de découpage).

- 1) Représenter l'allure de la tension  $u$  en fonction du temps.
- 2) Exprimer la relation reliant la valeur moyenne  $U_{moy}$  de cette tension à la tension  $V$ .
- 3) Exprimer l'équation de maille qui relie les grandeurs de l'induit de la machine.
- 4) Comparer la constante de temps électrique de l'induit à la période de découpage.  
Conclure sur les évolutions du courant  $i(t)$ .
- 5) En supposant la machine en régime permanent sur une charge absorbant le courant nominal, calculer l'expression de la valeur moyenne du courant  $I_{moy}$  en fonction de  $U$ ,  $E$  la force électromotrice interne et  $R$ . représenter sur un même graphe la tension  $u(t)$  et le courant  $i(t)$ .
- 6) Exprimer alors la valeur maximale de l'ondulation de courant  $\Delta i = I_{max} - I_{min}$  pris pour  $\alpha = 0,5$ . Exprimer cette ondulation en valeur relative par rapport au courant moyen  $I$ .
- 7) Quel élément faut-il rajouter afin d'imposer une ondulation maximale de 5%.  
Préciser alors la valeur de cet élément.

# Corrigés

## Exercice Hach01 : hacheur série

On alimente un moteur à courant continu dont le schéma équivalent est donné ci-dessous, à l'aide d'un hacheur.

L'interrupteur électronique K et la diode sont supposés parfaits.

La période de hachage est T, le rapport cyclique  $\alpha$ .

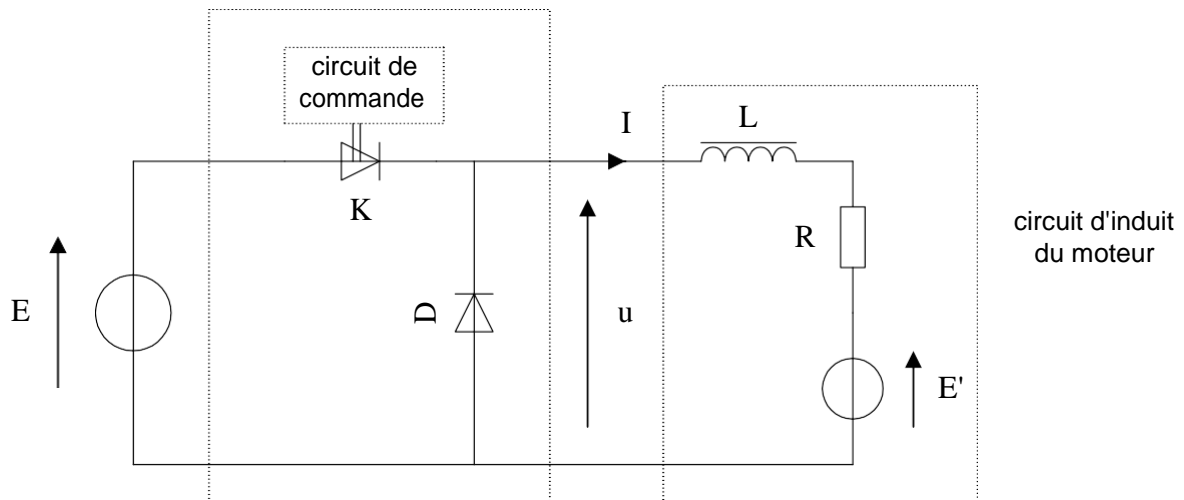
L'inductance L du bobinage de l'induit du moteur a une valeur suffisante pour que la forme du courant dans l'induit soit pratiquement continue.

Le hacheur est alimenté par une tension continue  $E = 220 \text{ V}$ .

La f.e.m.  $E'$  du moteur est liée à sa vitesse de rotation n par la relation

$$E' = 0,20 n \quad \text{avec } E' \text{ en V et } n \text{ en tr/min}$$

L'induit a pour résistance  $R = 2,0 \Omega$ .

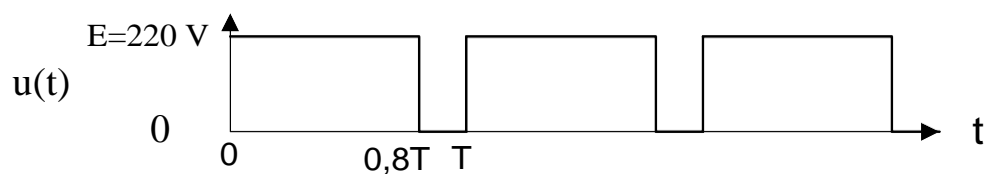


1- Etude de la tension u pour  $\alpha = 0,80$ .

1-1- Représenter, en la justifiant, l'allure de la tension u.

On prendra comme instant origine celui où l'interrupteur K se ferme.

$$\begin{aligned} 0 < t < \alpha T & \quad \text{K fermé : } u = E \\ \alpha T < t < T & \quad \text{K ouvert : phase de roue libre : D conduit et } u = 0 \text{ V} \end{aligned}$$



1-2- Déterminer l'expression littérale de la valeur moyenne  $\langle u \rangle$  de la tension  $u$ , en fonction de  $E$  et du rapport cyclique  $\alpha$ .

Calculer sa valeur numérique.

$$\langle u \rangle = \frac{1}{T} \int_0^{\alpha T} U(t) dt = \frac{1}{T} (\alpha T) E$$

$$\langle u \rangle = \alpha E = 0,8 \times 220 = 176 \text{ V}$$

2- Fonctionnement du moteur pour  $\alpha = 0,80$ .

Le moteur fonctionne en charge, la valeur moyenne du courant d'induit est  $\langle I \rangle = 10 \text{ A}$ .

Déterminer  $E'$  et en déduire  $n$ .

$$E' = \langle u \rangle - R \langle I \rangle = 176 - 2,0 \times 10 = 156 \text{ V}$$

$$n = E' / 0,20 = 156 / 0,20 = 780 \text{ tr/min}$$

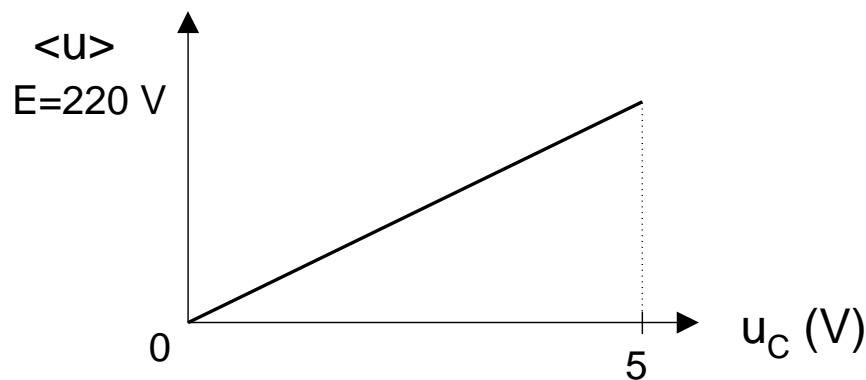
3- Le dispositif de commande du hacheur est tel que le rapport cyclique  $\alpha$  est proportionnel à une tension de commande  $u_C$  :  $\alpha = 100 \%$  pour  $u_C = 5 \text{ V}$ .

Tracer la caractéristique  $\langle u \rangle$  en fonction de  $u_C$ .

$$\alpha = 0,2 u_C$$

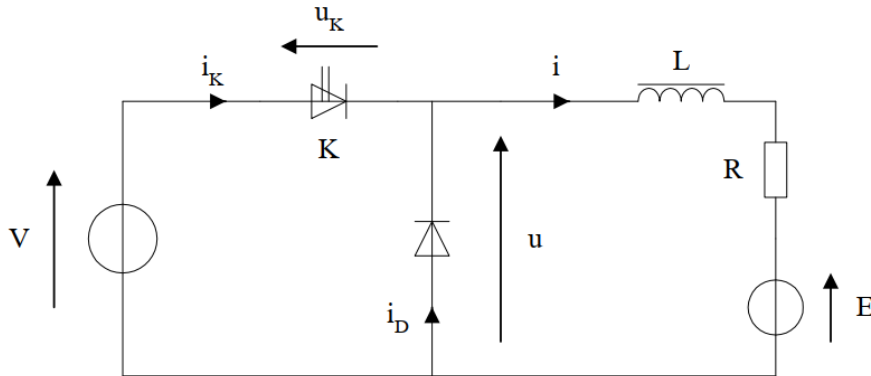
$$\langle u \rangle = \alpha E = (0,2 \times 220) u_C$$

$$\langle u \rangle = 44 u_C$$



## Exercice Hach02 : hacheur série

Un moteur à courant continu travaillant à couple constant est inclus dans le montage



Le hacheur fonctionne à une fréquence  $f = 500 \text{ Hz}$ .

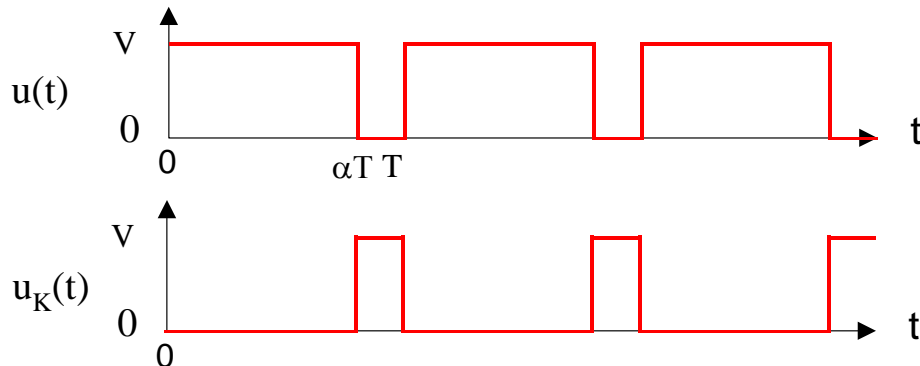
L'interrupteur K est fermé lorsque  $0 < t < \alpha T$  et ouvert entre  $\alpha T$  et  $T$ .

La diode est supposée parfaite.

L'inductance de la bobine de lissage L est de valeur suffisante pour que le courant dans le moteur soit considéré comme constant :  $i = I = \text{cte}$ .

La résistance de l'induit du moteur est :  $R = 1 \ \Omega$ .

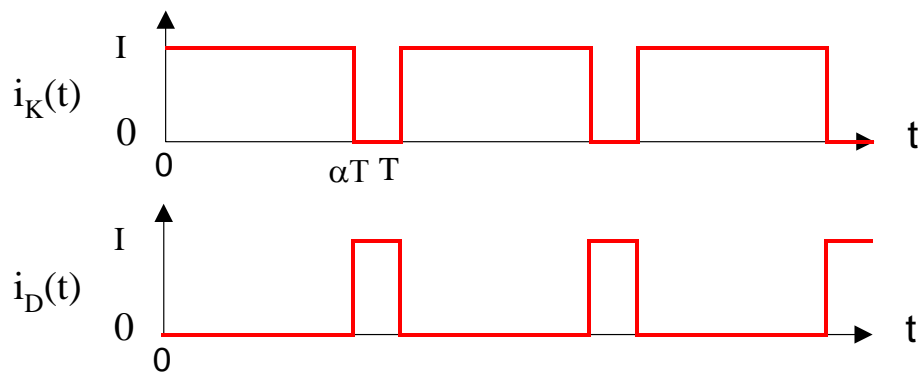
1- Représenter les allures de  $u$  et  $u_K$  en fonction du temps.



2- Exprimer la valeur moyenne de  $u$  en fonction de  $V$  et  $\alpha$ .

$$\langle u \rangle = \alpha V$$

3- Représenter les allures de  $i_K$  et  $i_D$  en fonction du temps.



4- Exprimer les valeurs moyennes des courants  $i_K$  et  $i_D$  en fonction de  $I$  et  $\alpha$ .

$$\begin{aligned} \langle i_K \rangle &= \alpha I \\ \langle i_D \rangle &= (1 - \alpha) I \end{aligned}$$

5- Déterminer l'intensité  $I$  du courant dans le moteur en fonction de  $V$ ,  $E$ ,  $R$  et  $\alpha$ .

$$\begin{aligned} \langle u \rangle &= E + RI = \alpha V \\ I &= \frac{\alpha V - E}{R} \end{aligned}$$

6- Application numérique :

Calculer  $\langle u \rangle$ ,  $I$  et  $\langle i_D \rangle$  pour  $V = 220$  V,  $E = 145$  V et  $\alpha = 0,7$ .

$$\begin{aligned} \langle u \rangle &= 154 \text{ V} \\ I &= 9 \text{ A} \\ \langle i_D \rangle &= 2,7 \text{ A} \end{aligned}$$

7- Établir la relation liant la vitesse  $n$  du moteur (en tr/min) à  $\alpha$  pour  $E = 0,153 n$ , sachant que  $R = 1 \Omega$ ,  $V = 220$  V et  $I = 9$  A.

$$\begin{aligned} I &= \frac{\alpha V - 0,153n}{R} \\ n &= \frac{\alpha V - RI}{0,153} \end{aligned}$$

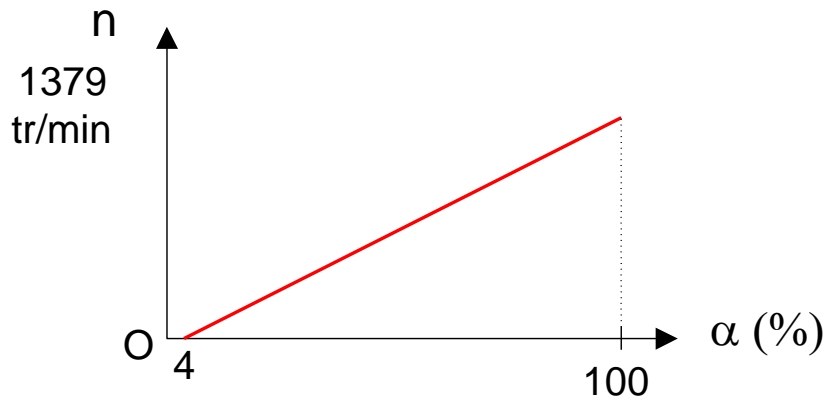
$I = 9$  A = constante car le moteur travaille à couple constant.

D'où :

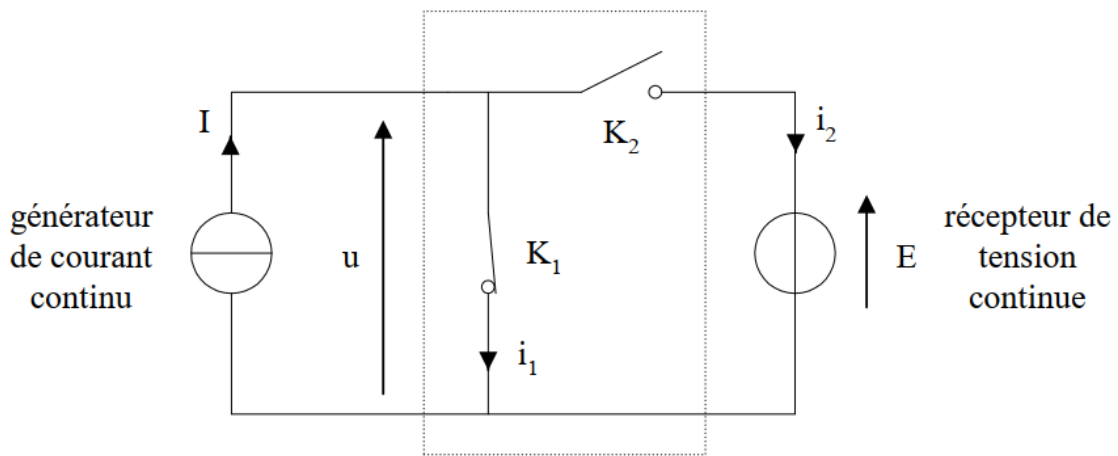
$$n = 1438\alpha - 59$$



8- Tracer  $n$  en fonction de  $\alpha$ .



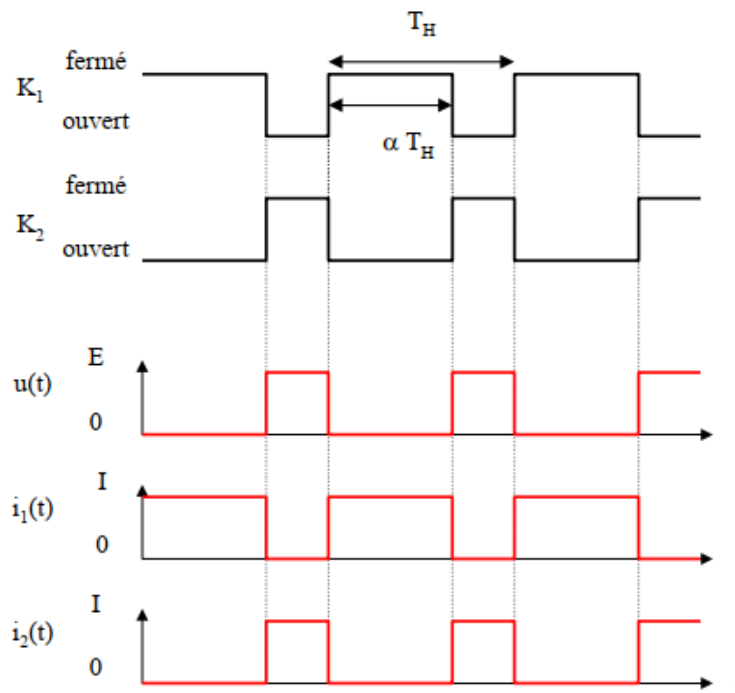
**Exercice Hach03 : hacheur parallèle**



Les deux interrupteurs électroniques sont supposés parfaits.

1- On donne les séquences de conduction de  $K_1$  et  $K_2$ .

Compléter les chronogrammes :



2- Donner la relation entre  $\langle u \rangle$ ,  $\alpha$  et  $E$ .

$$\langle u \rangle = (1 - \alpha)E$$

Remarque :

$$E = \langle u \rangle / (1 - \alpha)$$

Le hacheur parallèle est un élévateur de tension.

### Exercice Hach04 : module convertisseur DC/DC

Un convertisseur DC/DC possède les caractéristiques suivantes :

Puissance utile (max.) :	2 watts
Tension d'entrée (continue) :	4,5 à 9 V
Tension de sortie (continue) :	12 V
Rendement :	75 %

1- Calculer le courant de sortie maximal.

$$2 / 12 = \mathbf{167 \text{ mA}}$$

2- A puissance utile maximale, calculer la puissance thermique dissipée par le convertisseur.

$$\begin{aligned} P_u / P_a &= 75 \% \\ \text{d'où : } P_a &= 2,67 \text{ W} \end{aligned}$$

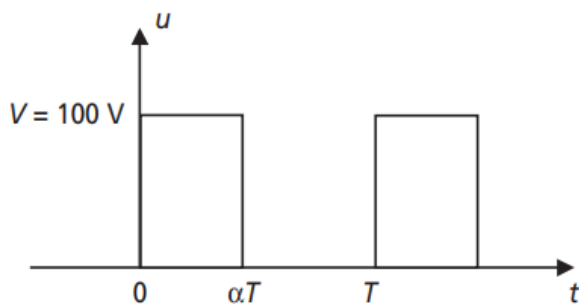
$$\text{Pertes} = P_a - P_u = \mathbf{0,67 \text{ W}}$$

3- On applique 5 V en entrée.  
Calculer le courant d'entrée maximal.

$$2,67 / 5 = \mathbf{533 \text{ mA}}$$

### Exercice Hach05 MCC alimentée par un hacheur abaisseur

1) Lorsque l'interrupteur commandé est fermé, la tension  $U$  est égale à la tension d'alimentation  $V$ , la diode étant naturellement bloquée. Lorsque l'interrupteur s'ouvre, la diode se ferme pour assurer la continuité du courant du circuit inductif que représente l'induit. La tension à ses bornes est alors considérée comme nulle (hypothèse des interrupteurs parfaits). L'allure de la tension  $u$  est donc représentée sur la *figure ci-dessous*, sur plus d'une période.



$$2) U_{\text{moy}} = \frac{1}{T} \int_0^{\alpha T} V \cdot dt = \frac{V \cdot \alpha T}{T} = \alpha \cdot V$$

3) La loi de maille portant sur l'induit s'écrit :

$$u(t) = E(t) + R \cdot i(t) + L \cdot \frac{di}{dt}(t)$$

$E$  étant la force électromotrice interne de la machine.

4) L'équation s'écrit également :

$$\frac{u(t)}{R} = \frac{E(t)}{R} + i(t) + \frac{L}{R} \cdot \frac{di}{dt}(t)$$

où la grandeur est la  $\tau = \frac{L}{R}$  constante de temps de l'induit.

Application numérique :  $\tau = \frac{L}{R} = 0.0274s \gg T = \frac{1}{F_d} = 0.001s$

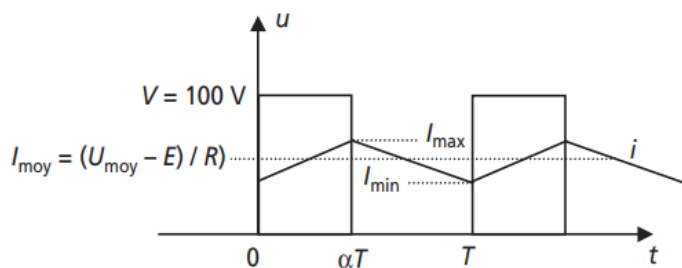
La constante de temps électrique du circuit étant très supérieure à la période de découpage, on en conclut que les évolutions de courant seront quasi-linéaires sur chaque partie de la période.

On représentera donc le courant  $i$  par des tronçons de droites.

5) À vitesse constante, la force électromotrice  $E$  est constante. La valeur moyenne du courant, ou composante continue, vérifie, elle, l'équation de maille aux valeurs moyennes :

$$\frac{U_{\text{moy}}}{R} = \frac{E}{R} + I_{\text{moy}}, \text{ c'est-à-dire : } I_{\text{moy}} = \frac{U_{\text{moy}}}{R} - \frac{E}{R}$$

Le courant  $i(t)$  étant composé de morceaux de droites autour de sa valeur moyenne, on représente son évolution sur la *figure*



6) L'ondulation de courant s'écrit :  $\Delta i = I_{\max} - I_{\min}$

Sur l'intervalle  $[0, \alpha T]$ , on écrit :  $\Delta i = I_{\max} - I_{\min} = \frac{R}{L} \cdot (V - E) \cdot \alpha T$

Si la charge absorbe le courant nominal  $I_n = 17$  A, la force électromotrice vaut :

$$E = U_{\text{moy}} - R \cdot I_n = \alpha V - 8,5$$

$$\text{Donc : } \Delta i = \frac{R}{L} \cdot [V(1 - \alpha) + 8,5] \cdot \alpha T$$

*Application numérique* : pour  $\alpha = 0,5$ ;  $\Delta i = 1,15$  A = 6,8 % de  $I$ .

7) Pour limiter à 5 % cette valeur d'ondulation de courant, il est nécessaire d'ajouter en série avec l'induit une inductance dite « de lissage ». Cette inductance supplémentaire,  $L_1$ , doit être

telle que :  $\Delta i = \frac{R}{L + L_1} \cdot [V(1 - \alpha) + 8,5] \cdot \alpha T = 5 \% \cdot I = 0,85$  A

$$\text{soit donc : } L_1 = \frac{0,5}{0,85} \times (0,5 \times 110 + 8,5) \times 0,5 \cdot 10^{-3} - 13,7 \cdot 10^{-3} = 4,9 \text{ mH}$$

