



UNIVERSITÉ FRANÇOIS - RABELAIS de TOURS

---

Institut Universitaire de Technologie

Département GÉNIE ÉLECTRIQUE ET INFORMATIQUE INDUSTRIELLE

Thierry LEQUEU

Travaux Dirigés MC-ET2

IUT de Tours – 2<sup>ème</sup> année  
Département GEII



Page vide

<h2>Travaux dirigés MC-ET2</h2> <h3>IUT GEII de Tours - 2<sup>ème</sup> année</h3>
------------------------------------------------------------------------------------

#### Sommaire :

TD 1 - Utilisations des sources en EDP .....	4
TD 2 - Le hacheur série de type BUCK (abaisseur) .....	8
TD 3 - Le hacheur élévateur de type BOOST .....	10
TD 4 - Le hacheur inverseur de type BUCK–BOOST .....	12
TD 5 - Harmoniques de tension du hacheur série .....	14
TD 6 - Hacheur réversible en courant .....	16
TD 7 - Hacheur 4 quadrants .....	20
TD 8 - Alimentation à découpage de type FLYBACK .....	22
TD 9 - Alimentation à découpage de type FORWARD .....	26

# TD 1 - Utilisations des sources en EDP

## 1.1 Connexion de deux sources de tension

La scène se passe en plein hiver. La voiture N°2 est en panne de batterie. Un aimable conducteur (N°1) s'arrête pour le dépanner. Si l'on regarde en détail les caractéristiques des batteries de chaque voiture, on obtient :

- La batterie N°1 est bien chargée : sa f.e.m. interne est de 15V et la résistance série est faible, la batterie est capable d'alimenter un démarreur à 500A sous 10V.
- La batterie N°2 est très déchargée : sa f.e.m. interne est de 10V et sa résistance série est de 25 mΩ.

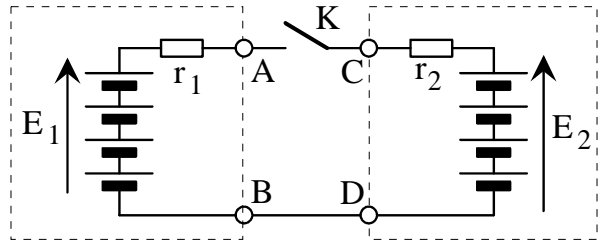


Fig. 1.1. Recharge rapide de la batterie (dessins\batterie.drw).

- a) Calculer le courant de court-circuit des deux générateurs.
- b) Calculer la plage de courant admissible pour que la chute de tension reste inférieure à 5% de la tension à vide.
- c) Quelle est la nature des deux sources, prises séparément ?
- d) Calculer le courant de circulation, lorsque le conducteur N° 1 branche le câble (interrupteur K). Conclure quant à l'utilisation des sources de tension.
- e) Calculer le courant de circulation, lorsque le conducteur N° 1 branche sa batterie en inverse sur la batterie N° 2.

## 1.2 La batterie d'accumulateur de 12V

En supposant la batterie bien chargée ( $E = 14V$ ), on peut se poser la question : source de courant ou source de tension ? Pour cela il faut se placer dans des conditions d'utilisation de cette batterie.

Supposons qu'elle alimente une charge par l'intermédiaire d'un interrupteur T (figure 1.2). Le courant dans la charge est de  $I = 20A$  (antibrouillard de voiture). Les inductances des connexions entre la batterie et la charge sont modélisées par les deux inductances  $\lambda$ .

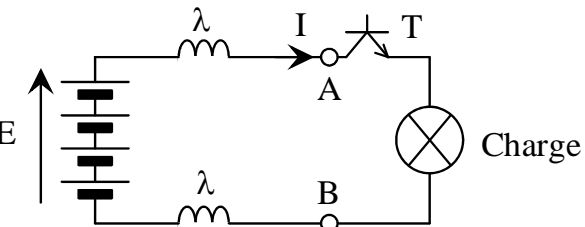


Fig. 1.2. Nature de la source, cas de la batterie (dessins\batterie.drw).

Le temps d'ouverture de l'interrupteur T est de 100 ns (transistor MOSFET). La longueur des câbles est de 2 x 1,5 mètres. L'inductance linéique d'un câble est d'environ 1 μH/m.

- a) Calculer la surtension  $\Delta U_{AB}$ , à l'ouverture de T. Conclure à la nature de la source vue des points A et B, dans cette application.

On raccourcit les câbles de liaison à 2 x 50 cm et on utilise un interrupteur plus lent (20 μs, cas du transistor bipolaire).

- b) Recalculer alors la surtension  $\Delta U_{AB}$ . Dans ces conditions, conclure sur la nature de la batterie.
- c) Donner une solution pour ne pas avoir de surtension entre A et B.

### 1.3 Connexion de deux sources de courant

L'équivalent de l'exercice 1.1 pour des sources de courant se rencontre dans des convertisseurs en électronique de puissance, lors des différentes phases de fonctionnement.

Soit le montage de la figure 1.3. Le générateur d'alimentation est une source de tension  $E = 220V$ , transformée en source de courant grâce à l'inductance  $L_1 = 220 \text{ mH}$ . La charge est un moteur à courant continu associé à une inductance de lissage  $L_2$ . On suppose que le courant dans le moteur est constant  $I_2 = 10A$ .

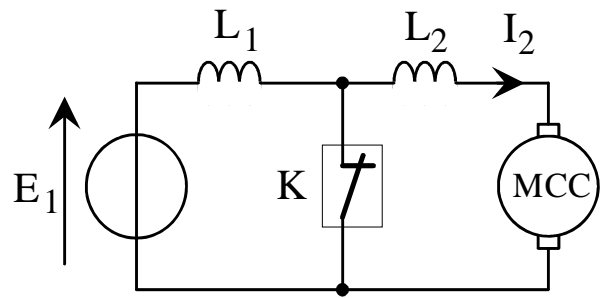


Fig. 1.3. Sources de courant équivalentes (dessins\courant0.drw).

- On suppose que le courant est initialement nul dans l'inductance  $L_1$ . Calculer le courant  $I_1$  au bout de  $1 \text{ ms}$ , sachant que l'interrupteur  $K$  est fermé. Calculer le courant  $I_K$  dans l'interrupteur  $K$ .
- A  $t = 1 \text{ ms}$ , on ouvre l'interrupteur  $K$  : il devient équivalent à une forte résistance  $R_{Koff} = 100 \text{ K}\Omega$ . Calculer alors la tension  $V_K$  aux bornes de l'interrupteur. Conclure quant à cette association de source.
- A quel instant  $t_2$  peut-on ouvrir  $K$  sans risque ?

### 1.4 Cas du redresseur à filtrage capacitif

Il existe un cas particulier d'association de deux sources de tension qui permet de résoudre le problème précédent : le redresseur à filtrage capacitif. En première approximation, on peut considérer que la source alternative est parfaite (source de tension bidirectionnelle)  $V_{eff} = 230V - 50Hz$ . La charge est symbolisée par une source de courant constant  $I = 5 \text{ A}$  (figure 1.4). Le condensateur  $C$  est parfait.

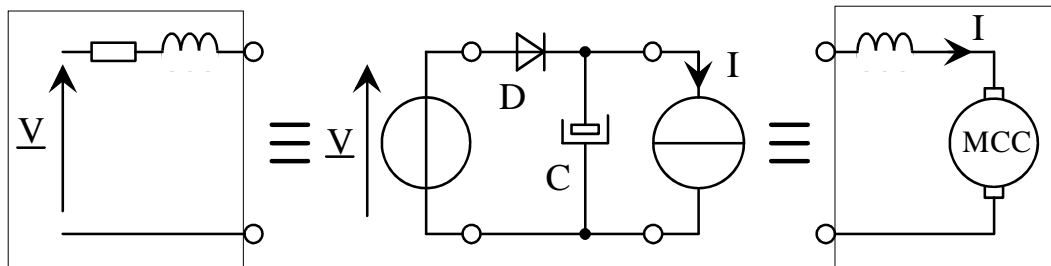


Fig. 1.4. Redresseur mono-alternance pour MCC (dessins\tension0.drw)

- Calculer la valeur du condensateur pour avoir une ondulation  $\Delta V_C$  inférieure à 10% de la valeur crête de  $v(t)$ . On fera l'hypothèse classique que le condensateur n'est pas rechargé pendant la durée  $t_1 \approx \text{période}$ .
- La diode  $D$  joue le rôle d'interrupteur (non commandé). Indiquer la condition pour qu'elle conduise. Calculer l'instant de mise en conduction de la diode.
- Calculer le courant dans la diode, lorsqu'elle conduit.

## 1.5 Nature de la source "inductance"

L'impédance instantanée de l'inductance vaut :

$$Z_{\infty} = \lim_{p \rightarrow \infty} Z(p) = \lim_{\omega \rightarrow \infty} |jL\omega| = +\infty .$$

L'inductance peut être considérée comme une source de courant. On étudie le comportement de cette inductance placée dans un circuit (figure 1.5). L'équation de l'inductance est donnée par :

$$v_L(t) = +L \cdot \frac{di_L(t)}{dt}$$

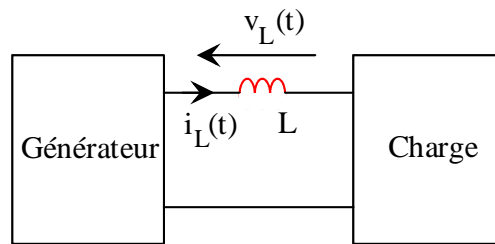


Fig. 1.5. Etude de l'inductance (dessins\so\_lc.drw).

### 1.5.1 Variation de la tension $v_L(t)$

On applique une tension  $v_L(t)$  qui vaut  $+V_1$  de 0 à  $t_1$  et  $-V_2$  de  $t_1$  à  $t_2$ .

- Donner l'allure du courant dans l'inductance.
- Donner une condition sur la valeur de  $L$  et/ou sur les valeurs de  $t_1$  et  $t_2$  pour avoir une bonne source de courant ( $\Delta i_L < 5\%$  de  $I_{L\text{moy}}$  par exemple).

### 1.5.2 Variation du courant $i_L(t)$

L'inductance est le siège du courant  $i_L(t)$  donné par la figure 1.6.

- Donner l'allure de la tension  $v_L(t)$ .
- Calculer les valeurs min et max de la tension.
- Conclure quant à l'utilisation de cette source de courant.

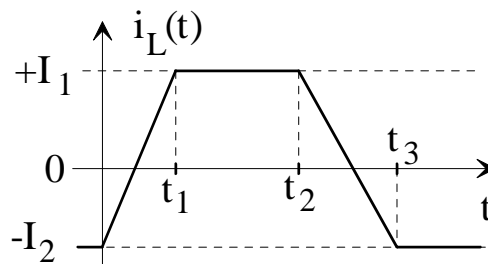


Fig. 1.6. Echelon de courant (dessins\so\_lc.drw).

### 1.5.3 Propriété en régime permanent

- Rappeler la définition du régime permanent liant  $\forall t$  et  $\forall T$  la période  $i_L(t+T)$  et  $i_L(t)$ .
- Démontrer que  $\langle v_L \rangle = 0$ , en régime permanent.

### 1.6 Nature de la source "condensateur"

L'impédance instantanée du condensateur vaut :

$$Z_{\infty} = \lim_{p \rightarrow \infty} Z_C(p) = \lim_{\omega \rightarrow \infty} \left| \frac{1}{jC\omega} \right| = 0.$$

Le condensateur peut être considéré comme une source de tension. On étudie son comportement dans le circuit de la figure 1.7. L'équation du condensateur est donnée par :

$$i_C(t) = +C \cdot \frac{dv_C(t)}{dt}$$

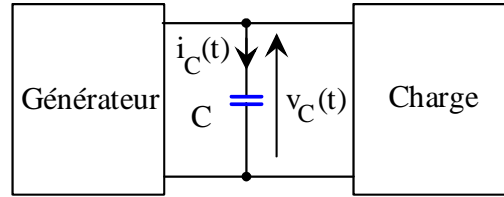


Fig. 1.7. Etude du condensateur (dessins\so\_lc.drw).

#### 1.6.1 Variation du courant $i_C(t)$

La charge demande un courant tel que  $i_C(t)$  vaut  $+I_1$  de 0 à  $t_1$  et  $-I_2$  de  $t_1$  à  $t_2$ .

- a) Donner l'allure de la tension aux bornes du condensateur.
- b) Donner une condition sur la valeur de C et/ou sur les valeurs de  $t_1$  et  $t_2$  pour avoir une bonne source de tension ( $\Delta v_C < 5\%$  de  $V_{Cmoy}$  par exemple).

#### 1.6.2 Variation de la tension $v_C(t)$

Le condensateur est le siège d'une brusque variation de tension  $v_C(t)$  donné par la figure 1.8.

- a) Donner l'allure du courant  $i_C(t)$ .
- b) Calculer les valeurs min et max du courant.
- c) Conclure quant à l'utilisation de cette source de tension.

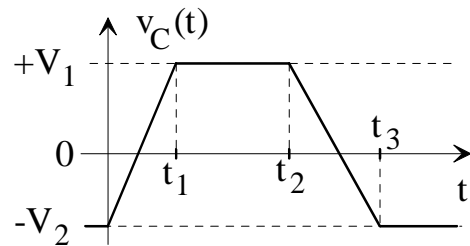


Fig. 1.8. Echelon de tension (dessins\so\_lc.drw).

#### 1.6.3 Propriété en régime permanent

- a) Rappeler la définition du régime permanent liant  $\forall t$  et  $\forall T$  la période  $v_C(t+T)$  et  $v_C(t)$ .
- b) Démontrer que  $\langle i_C \rangle = 0$ , en régime permanent.

## TD 2 - Le hacheur série de type BUCK (abaisseur)

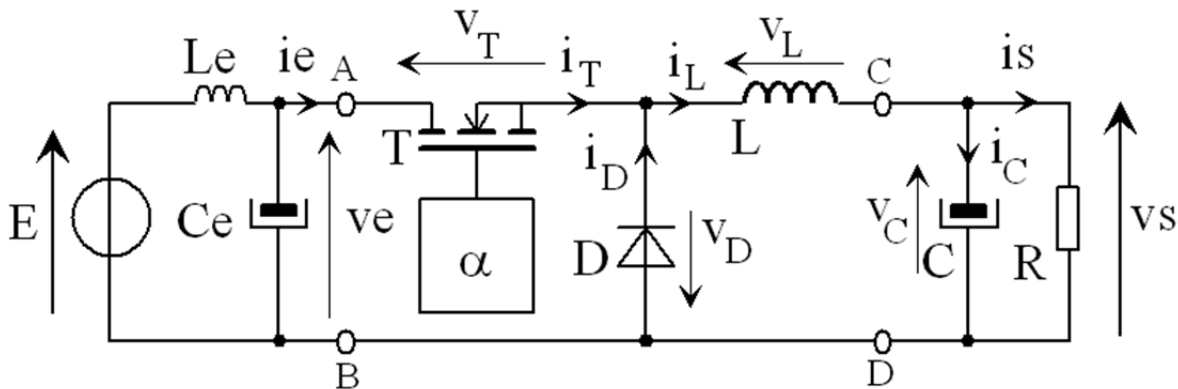


Fig. 2.1. Structure générale du hacheur série (dessins\buck1.drw).

Le transistor T est fermé (ON) pour  $t \in [0; \alpha T]$  et ouvert (OFF) pour  $t \in [\alpha T; T]$ .

### 2.1 Principe de fonctionnement

Hypothèses :

- la tension d'entrée est constante :  $v_e = E = \text{Cste}$  ;
- la tension de sortie est constante :  $v_s = V_s$  ;
- le transistor est parfait : il se comporte comme un interrupteur idéal ;
- la diode est parfaite : elle a un comportement complémentaire au transistor.

- a) Simplifier le schéma de la figure 2.1, en tenant compte des hypothèses ci-dessus.
- b) Expliquer qualitativement le fonctionnement du montage (magnétisation de l'inductance, ...).
- c) Ecrire les 3 lois des mailles du circuit et la loi des nœuds.
- d) Représenter le circuit pour T ON et T OFF. Faire le bilan des grandeurs électriques :  $(v_e; i_e)$ ,  $(v_T; i_T)$ ,  $(v_D; i_D)$ ,  $(v_L; i_L)$  et  $(v_s; i_s)$ .
- e) Etablir les équations et donner les expressions de  $i_L(t)$  pour  $t \in [0; \alpha T]$  et pour  $t \in [\alpha T; T]$ .
- f) En prenant comme référence le signal de commande du transistor T, tracer :  
 $v_L(t)$  &  $i_L(t)$        $v_T(t)$  &  $i_T(t)$        $v_D(t)$  &  $i_D(t)$ .

### 2.2 Expression de la tension de sortie $V_s$

- a) Calculer d'après le graphique  $\langle v_L \rangle = \frac{1}{T} \int_{[T]} v_L(t) \cdot dt$ .
- b) En régime permanent, montrer que  $\langle v_L \rangle = 0$ .
- c) En déduire l'expression de  $V_s$  en fonction de  $\alpha$  et E.

### 2.3 Ondulation du courant pour $V_s = \text{Cste}$

- a) Calculer  $\Delta I_L$ , l'ondulation du courant dans L, en fonction de  $\alpha$ , L,  $F=1/T$ , E et  $V_s$ , en Régime Permanent.
- b) Donner alors l'ondulation du courant en fonction de  $\alpha$ , L, F et E.
- c) Donner le tableau de variation de  $\Delta I_L$  en fonction de  $\alpha$ . Que vaut  $\Delta I_{L\text{max}}$  ? Que vaut  $\langle i_L \rangle$  ?

### 2.4 Etude sur charge R

La source de tension  $V_s$  est remplacée par une résistance de charge R.



- a) Etablir les équations de fonctionnement et donner les expressions de  $i_L(t)$  pour  $t \in [0 ; \alpha T]$  et pour  $t \in [\alpha T ; T]$ .
- b) En prenant comme référence le signal de commande du transistor T, tracer  $u(t) = -v_D(t)$ ,  $v_L(t)$  et  $i_L(t)$ . Pour la première période, on prendra  $i_L(0) = 0$ .

On se place désormais en régime permanent.

- c) Donner l'expression de  $I_{Lmax}$  et de  $I_{Lmin}$ .
- d) Calculer l'ondulation du courant dans l'inductance L en fonction de  $\alpha$ , L, R,  $\tau = \frac{L}{R}$  et E.
- e) Donner l'hypothèse qui permet un développement limité de l'exponentiel.
- f) Retrouver alors l'expression simplifiée de l'ondulation établie auparavant (pour  $V_s = Cste$ ).

## 2.5 Calcul du condensateur de sortie

Hypothèses :

- la tension d'entrée est constante :  $v_e = E = Cste$  ;
- le courant de sortie est constant :  $i_s = I_s$  ;
- le transistor est parfait : il se comporte comme un interrupteur idéal ;
- la diode est parfaite : elle a un comportement complémentaire au transistor ;
- le courant dans l'inductance est celui déterminé précédemment.

- a) En régime permanent, démontrer  $\langle i_C \rangle = \frac{1}{T} \int_{[T]} i_C(t) \cdot dt \equiv 0$ .
- b) En déduire le tracé du courant dans le condensateur en prenant pour le courant dans l'inductance celui trouvé lorsque  $V_s = Cste$ .
- c) A partir de la relation du condensateur C, donner les expressions de  $v_C(t)$  pour  $t \in [0 ; \alpha T]$  et pour  $t \in [\alpha T ; T]$ .
- d) Tracer l'allure de  $v_C$ .
- e) En calculant la variation de charge dans le condensateur, trouver une relation simple entre  $\Delta V_s = V_{smax} - V_{smin}$  et  $\Delta Q$ .

## 2.6 Application numérique

La tension d'entrée vaut  $E = 12V$ . La tension de sortie vaut  $V_s = +5V$ . Le courant de sortie vaut  $I_s = 1A$ . L'inductance vaut  $L = 300 \mu H$  et le condensateur de sortie vaut  $C = 2000 \mu F$ . La fréquence de découpage vaut  $F = 50 kHz$ . Le rendement de l'alimentation vaut  $\eta = 85\%$ . Les résultats des applications numériques seront fournis en unité INGENIEUR avec 3 chiffres significatifs.

- a) Calculer la valeur du rapport cyclique nominal  $\alpha_{nom}$ .
- b) Calculer la valeur de  $\Delta I_{Lmax}$  et de  $\Delta I_{Lnom}$ .
- c) Calculer la valeur de  $\Delta V_{Smax}$  et de  $\Delta V_{Snom}$ .
- d) Calculer le courant moyen d'entrée.
- e) Calculer les contraintes en courant et en tension pour le transistor et la diode.

## TD 3 - Le hacheur élévateur de type BOOST

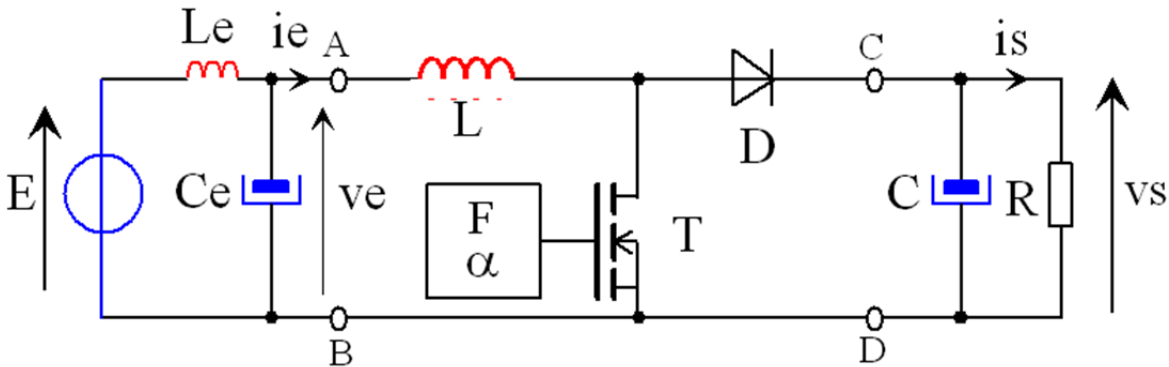


Fig. 3.1. Structure générale du hacheur élévateur (dessins\boost4.drw).

Le transistor T est fermé (ON) pour  $t \in [ 0 ; \alpha T ]$  et ouvert (OFF) pour  $t \in [ \alpha T ; T ]$ .

### 3.1 Principe de fonctionnement (8 points)

Hypothèses :

- la tension d'entrée est constante :  $v_e = E = \text{Cste}$  ;
- la tension de sortie est constante :  $v_s = V_s$  ;
- le transistor est parfait : il se comporte comme un interrupteur idéal ;
- la diode est parfaite : elle a un comportement complémentaire au transistor.

- a) Simplifier le schéma en tenant compte des hypothèses ci dessus.
- b) Expliquer qualitativement le fonctionnement du montage (magnétisation de l'inductance, ...).
- c) Ecrire les 3 lois des mailles du circuit et la loi des nœuds.
- d) Représenter le circuit pour T ON et T OFF. Préciser l'état de la diode D.  
Faire le bilan des grandeurs électriques :  $(v_e ; i_e)$ ,  $(v_L ; i_L)$ ,  $(v_T ; i_T)$ ,  $(v_D ; i_D)$  et  $(v_s ; i_s)$ .
- e) Etablir les équations et donner les expressions de  $i_L(t)$  pour  $t \in [ 0 ; \alpha T ]$  et pour  $t \in [ \alpha T ; T ]$ .
- f) En prenant comme référence le signal de commande du transistor T, tracer :  
 $v_L(t) \ \& \ i_L(t)$        $v_T(t) \ \& \ i_T(t)$        $v_D(t) \ \& \ i_D(t)$ .

### 3.2 Expression de la tension de sortie Vs (4 points)

- a) Calculer d'après le graphique  $\langle v_L \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T v_L(t) \cdot dt$ .
- b) En régime permanent, montrer que  $\langle v_L \rangle = 0$ .
- c) En déduire l'expression de  $V_s$  en fonction de  $\alpha$  et de  $E$ , en régime permanent.
- d) Tracer la variation de  $V_s$  en fonction de  $\alpha$ .

### 3.3 Ondulation du courant pour Vs = Cste (2 points)

- a) Calculer  $\Delta I_L$ , l'ondulation du courant dans L, en fonction de  $\alpha$ , L,  $F = 1/T$  et E, en Régime Permanent.
- b) Donner le tableau de variation de  $\Delta I_L$  en fonction de  $\alpha$ . Que vaut  $\Delta I_{L\text{max}}$  ?

### 3.4 Etude en régime discontinu (8 points)

Le courant dans l'inductance s'annule avant T, pour  $t' = \beta T$ , avec  $\beta = \alpha + \alpha'$ .

- a) Etablir les équations de fonctionnement et donner les expressions de  $i_L(t)$  pour  $t \in [0 ; \alpha T]$ ,  $t \in [\alpha T ; \beta T]$ , pour  $t \in [\beta T ; T]$ .
- b) En prenant comme référence le signal de commande du transistor T, tracer :  $v_L(t) \& i_L(t)$  ;  $v_T(t) \& i_T(t)$  ;  $v_D(t) \& i_D(t)$ . Pour la première période, on prendra  $i_L(0) = 0$ .
- c) A partir de la tension aux bornes de l'inductance, trouver une relation en  $\alpha$  et  $\alpha'$ .
- d) Calculer la valeur maximale du courant dans l'inductance L en fonction de  $\alpha$ , L, T et E.
- e) En déduire l'expression de la valeur moyenne du courant de sortie  $I_s$ .
- f) Donner l'expression de  $V_s$  en fonction de  $I_s$ , L, F, E et  $\alpha$
- g) Tracer l'ensemble de la caractéristique  $V_s = f(I_s)$  en utilisant les grandeurs réduites.

### 3.5 Influence de la résistance de l'inductance (4 points)

On cherche l'influence de la résistance de l'inductance L, notée  $R_L$ , sur la valeur moyenne de la tension de sortie  $V_s = \langle v_s \rangle$ .

- a) En valeur moyenne et avec  $I_e$  le courant moyen d'entrée, donner l'expression la tension d'entrée  $V_e$  en fonction de E,  $R_L$  et  $I_e$ .
- b) A partir d'un bilan de puissance et sachant que  $\langle i_L \rangle = \langle i_e \rangle$ , donner l'expression du courant moyen dans l'inductance.
- c) Retrouver alors la nouvelle expression de la tension de sortie donnée par :

$$V_s = E \cdot \frac{1}{(1-\alpha) \cdot \left[ 1 + \frac{R_L}{R} \cdot \frac{1}{(1-\alpha)^2} \right]}$$

- d) Calculer la valeur du maximum de la fonction  $y = \frac{V_s}{E}$  noté  $y_{\max}$  et donner la valeur de  $\alpha = \alpha_{\max}$  correspondante.

### 3.6 Facteur de dimensionnement Fd en conduction continue (3 points)

- a) A partir du bilan de puissance, donner l'expression du courant moyen dans l'inductance. En déduire l'expression du courant moyen dans le transistor.
- b) En déduire la valeur du courant maximum  $I_{T_{\max}}$  et donner la valeur de  $V_{T_{\max}}$ .
- c) Donner l'expression du facteur Fd du transistor et tracer  $F_d = f(\alpha)$  pour  $\frac{V_e}{L F} = 0$  et  $\frac{V_e}{L F} = 5\% I_s$ .
- d) Pour quel valeur de  $\alpha$ , le facteur de dimensionnement est-il minimum ?

### 3.7 Ondulation de la tension de sortie (3 points)

- a) Tracer l'évolution du courant dans le condensateur de sortie avec  $i_L(t)$  défini au paragraphe §3.1.
- b) En déduire l'expression de la tension aux bornes du condensateur et la valeur de  $\Delta V_s = \Delta V_C$ .
- c) Calculer la valeur du courant efficace du condensateur  $I_{C_{\text{eff}}}$ .

## TD 4 - Le hacheur inverseur de type BUCK-BOOST

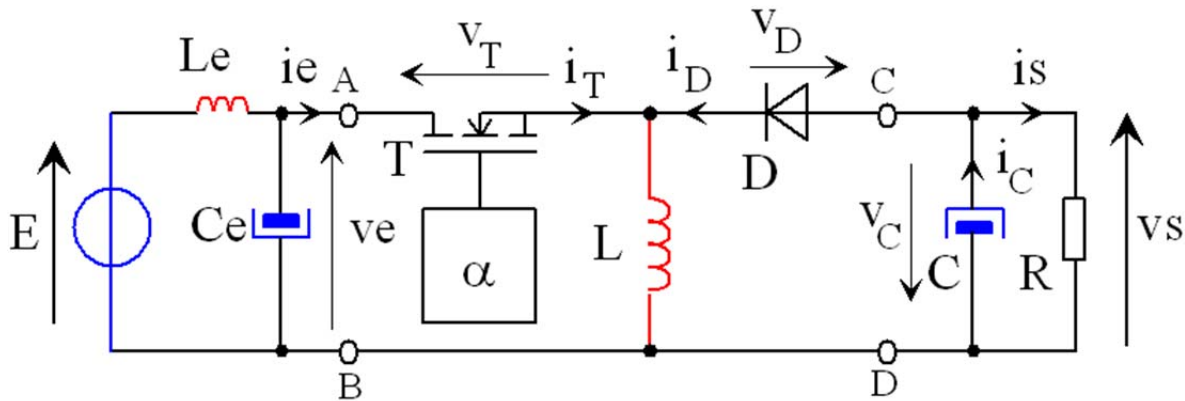


Fig. 4.1. Hacheur inverseur à stockage inductif (dessins\hinv00.drw).

Le transistor T est fermé (ON) pour  $t \in [0 ; \alpha T]$  et ouvert (OFF) pour  $t \in [\alpha T ; T]$ .

### 4.1 Principe de fonctionnement (7 points)

Hypothèses :

- la tension d'entrée est constante :  $v_e = E = \text{Cste}$  ;
- la tension de sortie est constante :  $v_s = V_s$  ;
- le transistor est parfait : il se comporte comme un interrupteur idéal ;
- la diode est parfaite : elle a un comportement complémentaire au transistor.

- a) Simplifier le schéma en tenant compte des hypothèses ci dessus.
- b) Expliquer qualitativement le fonctionnement du montage (magnétisation de l'inductance, ...).
- c) Ecrire les 3 lois des mailles du circuit et la loi des nœuds.
- d) Représenter le circuit pour T ON et T OFF.  
Faire le bilan des grandeurs électriques :  $(v_e ; i_e)$ ,  $(v_T ; i_T)$ ,  $(v_L ; i_L)$ ,  $(v_D ; i_D)$ , et  $(v_s ; i_s)$ .

### 4.2 Calculs des grandeurs électriques (10 points)

- a) Etablir les équations de fonctionnement et donner les expressions de  $i_L(t)$  pour  $t \in [0 ; \alpha T]$  et pour  $t \in [\alpha T ; T]$ .
- b) En prenant comme référence le signal de commande du transistor T, tracer :  
 $v_L(t) \ \& \ i_L(t)$        $v_T(t) \ \& \ i_T(t)$        $v_D(t) \ \& \ i_D(t)$ .
- c) A partir de  $\langle v_L \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T v_L(t) \cdot dt$ , déterminer l'expression de  $V_s$  en fonction de  $\alpha$  et de  $E$ .
- d) Tracer la variation de  $V_s$  en fonction de  $\alpha$ .

### 4.3 Ondulation du courant en régime permanent (3 points)

- a) Calculer  $\Delta i_L$ , l'ondulation du courant dans l'inductance L, en fonction de  $\alpha$ , L,  $F=1/T$  et  $E$ .
- b) Comparer avec l'ondulation du courant du hacheur série de type BUCK.
- c) Donner l'expression du courant moyen et du courant maximum dans la diode D.

#### 4.4 Facteur de dimensionnement Fd

- A partir du bilan de puissance, donner l'expression du courant moyen dans le transistor T.
- En déduire la valeur du courant maximum  $I_{Tmax}$  et donner la valeur de  $V_{Tmax}$ .
- Donner l'expression du facteur Fd du transistor et tracer  $Fd = f(\alpha)$  pour  $\frac{V_e}{L F} = 0$  et  $\frac{V_e}{L F} = 5\% I_s$ .
- Pour quel valeur de  $\alpha$ , le facteur de dimensionnement est-il minimum ?

#### 4.5 Ondulation de la tension de sortie

- Tracer l'évolution du courant dans le condensateur de sortie avec  $i_L(t)$  défini au paragraphe §4.2.
- En déduire l'expression de la tension aux bornes du condensateur et la valeur de  $\Delta V_s = \Delta V_C$ .
- Calculer la valeur du courant efficace du condensateur  $I_{Ceff}$ .

#### 4.6 Application numérique

Le circuit intégré MAX743 de chez MAXIM est un convertisseur DC-DC permettant de fabriquer des tensions +15V (montage BOOST) et -15V (montage BUCK-BOOST) à partir d'une tension de  $V_e = +5V$ . La figure 4.2 donne le câblage du circuit. La fréquence de découpage vaut  $F = 200$  kHz. Le courant maximum vaut 100 mA sur chaque sortie +VO et -VO. Les résultats des applications numériques seront fournis en unité INGENIEUR avec 3 chiffres significatifs.

- Calculer la valeur du rapport cyclique pour avoir  $-VO = -15V$ .
- Calculer l'ondulation du courant dans l'inductance LX-.
- En déduire la valeur maximum du courant dans le transistor interne (courant de la broche LX-).
- Donner la valeur de la tension inverse maximale aux bornes de la diode DX-.
- Calculer la valeur de l'ondulation de la tension de sortie -VO.

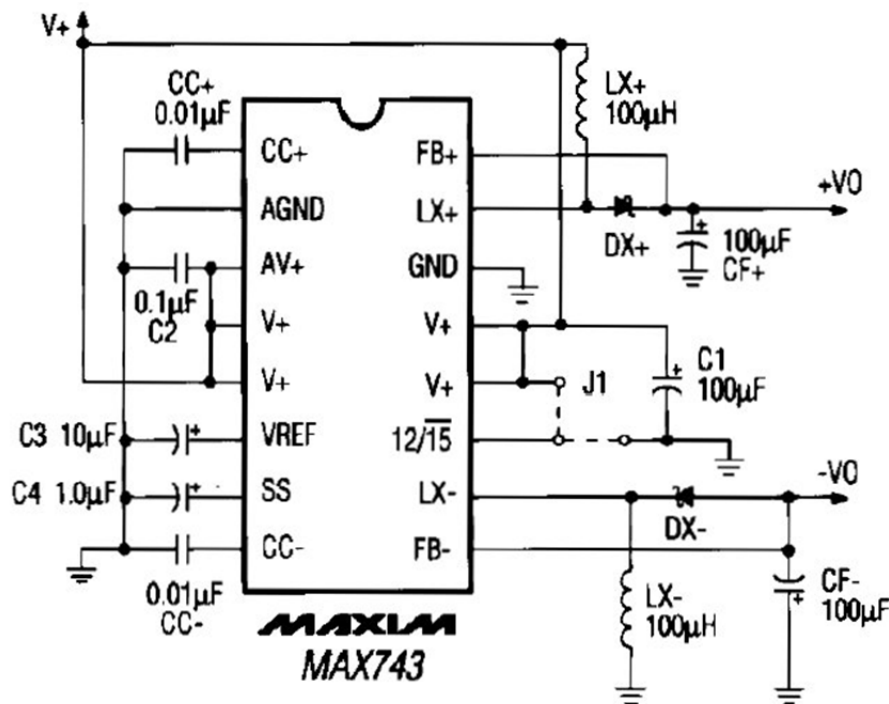


Fig. 4.2. Convertisseur DC-DC MAX743 (images\max743.jpg).

## TD 5 - Harmoniques de tension du hacheur série

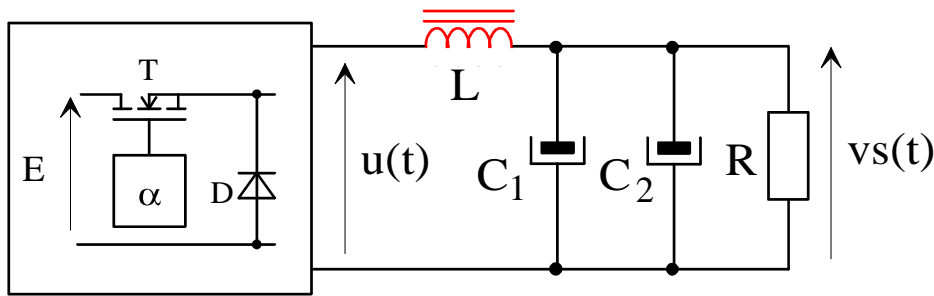


Fig. 5.1. Montage d'étude des harmoniques de  $u(t)$  (dessins\hacheur0.drw).

La tension  $u(t)$  vaut  $+E$  pour  $t \in [0 ; \alpha T]$  et  $u(t)$  vaut  $0$  pour  $t \in [\alpha T ; T]$ . Les résultats des applications numériques seront fournis en unité INGÉNIEUR avec 3 chiffres significatifs.

### 5.1 Expression des harmoniques de $u(t)$ (6 points)

- Tracer l'évolution de  $u(t)$  sur deux périodes.
- Retrouver l'expression  $u(t) = \alpha \cdot E + \sum_{n=1}^{n=\infty} \frac{2E \cdot \sin(n\pi\alpha)}{n\pi} \cdot \cos(n\omega t - n\phi_0)$ .
- Préciser le changement d'origine des temps pour le calcul et donner l'expression de  $\phi_0$ .

### 5.2 Etude du filtre – Tableau 5.1 §5.4 (7 points)

Le filtre de sortie du hacheur peut être considéré comme un filtre passe bas du deuxième ordre de type (R-L-C) avec  $L = 300 \mu\text{H}$ ,  $C_1 = 1000 \mu\text{F}$  et  $C_2 = 1000 \mu\text{F}$ .

- Donner la fonction de transfert  $H(p) = \frac{V_s(p)}{U(p)}$ . On posera  $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$  et  $z = \frac{1}{2R} \sqrt{\frac{L}{C}}$ .  
Le courant dans la résistance de charge varie de  $0,1\text{A}$  à  $5\text{A}$  pour une tension de sortie  $V_s = +5\text{V}$ .
- Calculer la plage de variation de la résistance ainsi que la plage de variation du coefficient d'amortissement  $z$ .
- Pour  $z$  mini et maxi, calculer l'atténuation du filtre pour  $F_1 = 20 \text{ Hz}$ ,  $F = F_0$ ,  $F = 100 F_1$  et  $F = 1000 F_1$ .
- Tracer les diagrammes de Bode en amplitude,  $G(\omega) = 20 \cdot \text{LOG}_{10} (|H(j\omega)|)$ .

### 5.3 Ondulation de la tension de sortie – Tableau 5.2 §5.4 (7 points)

- Calculer le rapport cyclique pour une tension d'entrée  $E = +12\text{V}$ .
- La fréquence de découpage vaut  $F = 20 \text{ kHz}$ . Calculer l'amplitude relative des cinq premiers harmoniques de  $u(t)$ .
- Calculer l'atténuation correspondante aux fréquences de ces harmoniques.
- Calculer l'amplitude de l'ondulation résiduelle de la tension de sortie  $v_s(t)$ .
- En considérant que l'ondulation crête à crête de  $v_s(t)$  est due uniquement au premier harmonique, calculer l'ondulation  $\Delta V_{s1}$ .
- La formule approchée de l'ondulation vaut  $\Delta V_s = \frac{E}{8LCF^2} \alpha(1-\alpha)$ . Comparer avec le résultat précédent.

## 5.4 Tableaux réponses

NOM	Prénom :
-----	----------

Tableau 5.1. Etude du filtre.

$I_{\text{charge}}$ , en A	0,1	2,5	5
R (en $\Omega$ )			
$z$			
$ H(j\omega_1) $			
$ H(j\omega_0) $			
$ H(100j\omega_1) $			
$ H(1000j\omega_1) $			
$G(j\omega_1)$ en dB			
$G(j\omega_0)$ en dB			
$G(100j\omega_1)$ en dB			
$G(1000j\omega_1)$ en dB			

Tableau 5.2. Ondulation de la tension de sortie.

Rang n	1	2	3	4	5
$F_n$ en Hz					
$U_n$ en V					
$ H(j\omega_n) $					
$G(j\omega_n)$ en dB					
$V_{S_n}$ en V					

## TD 6 - Hacheur réversible en courant

**Samedi 10 décembre 2003 – Sans documents de cours – Avec calculatrice – Sans formulaire.**

Le convertisseur de la figure 6.1 est utilisé pour alimenter en vitesse variable le moteur à courant continu du karting électrique. On étudie ici le fonctionnement du hacheur pendant les phases d'accélération et de freinage. On note  $E(t) = k \cdot \Phi \cdot N(t)$  la f.e.m. du moteur. Proportionnelle à la vitesse mécanique, la f.e.m. vaut  $E_{nom} = 48 \text{ V}$  pour  $N_{nom} = 5000 \text{ tr/min}$  (correspondant à une vitesse linéaire de 60 km/h).

La tension nominale du moteur vaut  $V_{nom} = 50 \text{ V}$ . La puissance absorbée nominale du moteur est limitée à  $P_{nom} = 2500 \text{ W}$  par la régulation du courant moteur. La source de tension d'entrée délivre une tension de  $U = 60 \text{ V}$  constante. La fréquence de découpage vaut  $F = 20 \text{ kHz}$ . Les interrupteurs K1 et K2 sont réalisés à partir de 2 transistors MOSFET HUF75639P3 en parallèle avec 2 diodes SCHOTTKY 43CTQ100 (soit au total 4 transistors et 4 diodes pour le hacheur).

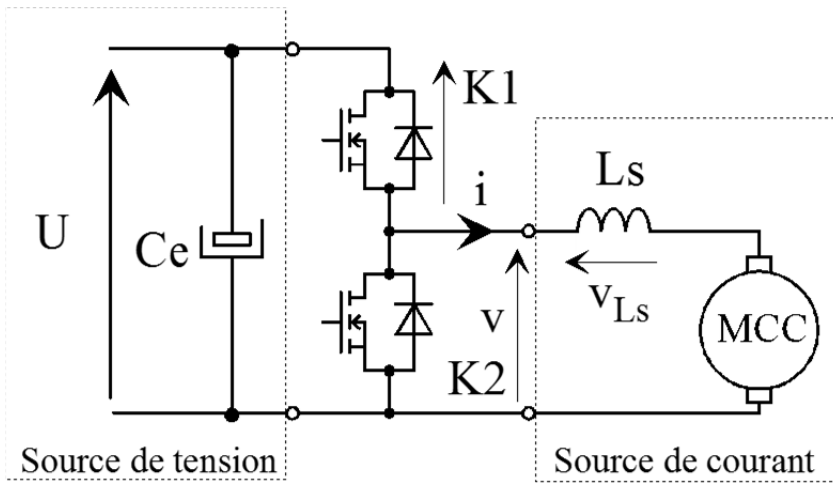


Fig. 6.1. Hacheur réversible en courant « 2 QUADRANTS » (dessins\hacheur6.drw).

<p>Les caractéristiques du transistor HUF75639P3 sont les suivantes :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- le courant maximum <math>I_{Tmax} = 56 \text{ A}</math> ;</li> <li>- la tension maximum <math>V_{Tmax} = 100 \text{ V}</math> ;</li> <li>- la résistance Drain Source <math>R_{DS(ON)} = 0,025 \Omega</math>.</li> </ul>	<p>Les caractéristiques de la diode 43CTQ100 sont les suivantes :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- le courant moyen <math>I_{F(AV)} = 40 \text{ A}</math> ;</li> <li>- la tension inverse maximum <math>V_{RRM} = 100 \text{ V}</math> ;</li> <li>- la tension à l'état passant <math>V_{F(I=40A)} = 0,67 \text{ V}</math>.</li> <li>- la tension de seuil équivalente <math>E_0 = 0,3 \text{ V}</math>.</li> </ul>
<p>Avec <math>V_e = +U</math>, <math>V_s = V = \langle v \rangle</math> et <math>i_{Ls}(t) = i_{moteur} = i(t)</math>, les principales relations du hacheur BUCK sont :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- <math>V = \alpha \cdot U</math> et <math>\Delta I = \frac{U}{L_s \cdot F} \cdot \alpha(1 - \alpha)</math> ;</li> </ul>	<p>Avec <math>V_e = +V</math>, <math>V_s = +U</math> et <math>i_{Ls}(t) = i_{moteur} = i(t)</math>, les principales relations du hacheur BOOST sont :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- <math>V_s = \frac{V_e}{1 - \alpha'} \Rightarrow U = \frac{V}{\alpha}</math> et <math>\Delta I = \frac{U}{L_s \cdot F} \cdot (1 - \alpha)</math></li> </ul>

Les lois des mailles du circuit sont

$$\begin{cases} U = v_{K1}(t) + v_{K2}(t) \\ U = v_{K1}(t) + v_{Ls}(t) + R \cdot i(t) + E \\ v_{K2}(t) = v(t) = v_{Ls}(t) + R \cdot i(t) + E \end{cases}$$

La loi des nœuds est  $i_{moteur} = i_{inductance} = i(t) = i_{K1}(t) - i_{K2}(t)$  et par convention  $v_{Ls}(t) = +L_s \frac{di}{dt}$ .



### 6.1 Calcul du point de fonctionnement nominal (4 points)

- Que vaut le courant nominal du moteur  $I_{nom}$  ?
- Que vaut la résistance d'induit du moteur  $R$  ?
- Avec un rendement de 90%, que vaut le courant moyen d'entrée nominal ?
- Calculer le courant moyen et le courant maximum dans l'inductance  $L_s$  en supposant une ondulation du courant  $\Delta I = 20\% I_{moy}$ .
- Que vaut le courant maximum dans les interrupteurs K1 et/ou K2 et dans un transistor MOSFET ?
- Pour  $i_T = I_{Tmax}$ , que vaut la chute de tension aux bornes d'un transistor MOSFET ?
- Pour  $i_D = I_{Tmax}$ , que vaut la chute de tension aux bornes d'une diode SCHOTTKY ?

### 6.2 Etude du démarrage – Hacheur abaisseur de type BUCK (9 points)

Le pilote appuie à fond sur l'accélérateur.

La régulation du courant dans le moteur impose :

$$I_{moteur} = I_{moy} = +50A.$$

L'interrupteur K1 est :

- fermé (ON) pour  $t \in [0 ; \alpha T]$  ;
- et ouvert (OFF) pour  $t \in [\alpha T ; T]$ .

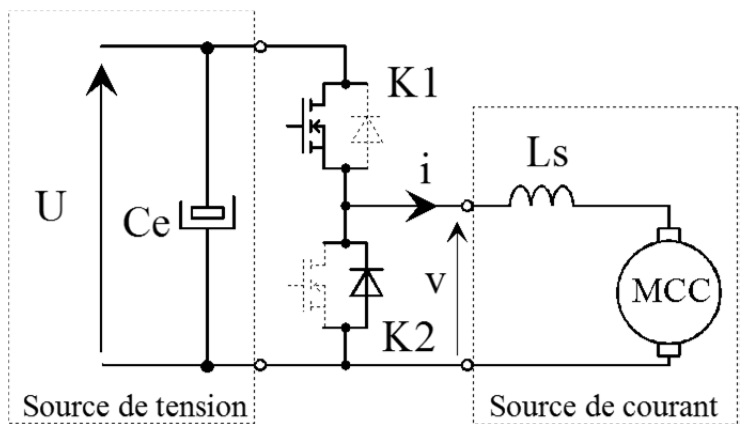


Fig. 6.2 Fonctionnement en hacheur de type BUCK (dessins\hacheur6.drw).

#### 6.2.1 Principe de fonctionnement du BUCK (3 points)

Hypothèses :

- la tension d'entrée est constante :  $U = Cste$  ;
  - on néglige la résistance d'induit du moteur ;
  - la f.e.m.  $E$  du moteur est constante vis-à-vis de la période de découpage ;
  - le transistor est parfait : il se comporte comme un interrupteur idéal ;
  - la diode est parfaite : elle a un comportement complémentaire au transistor.
- Simplifier le schéma de la figure 6.2, en tenant compte des hypothèses ci-dessus.
  - Expliquer qualitativement le fonctionnement du montage (magnétisation de l'inductance, ...).
  - Donner les expressions de  $\frac{di}{dt}(t)$  pour  $t \in [0 ; \alpha T]$  et pour  $t \in [\alpha T ; T]$ .
  - Donner les expressions de  $i(t)$  pour  $t \in [0 ; \alpha T]$  et pour  $t \in [\alpha T ; T]$ .

#### 6.2.2 Evolution de la tension de sortie du hacheur (1,5 points)

Le karting est initialement arrêté et sa vitesse augmente jusqu'à 60 km/h. On prendra  $R_{induit} = 40 \text{ m}\Omega$ .

- Donner la relation entre  $V_{moy}$  et  $I_{moy}$  en fonction de  $E$  et  $R$ .

e) Calculer la valeur des trois rapports cycliques pour  $N_1 = 0$  tr/min,  $N_2 = 2500$  tr/min et  $N_3 = 5000$  tr/min.

**6.2.3 Evolution de l’ondulation du courant de sortie du hacheur (2 points)**

- a) Pour quelle valeur de  $\alpha$  l’ondulation  $\Delta I$  est maximale ?
- b) Que vaut  $\Delta I_{max}$  ?
- c) Calculer la valeur de l’inductance  $L_s$  pour avoir  $\Delta I_{max} = 10$  A.
- d) Pour  $L_s = 80 \mu H$  et  $\alpha_1 = 5\%$ ,  $\alpha_2 = 45\%$ ,  $\alpha_3 = 85\%$ , calculer  $\Delta I$ , l’ondulation du courant de sortie.

**6.2.4 Tracé de la tension et du courant de sortie du hacheur BUCK (3 points)**

a) En prenant comme référence le signal de commande du transistor K1, tracer À L’ÉCHELLE  $v(t)$  et  $i(t)$  pour  $\alpha_1 = 10\%$ ,  $\alpha_2 = 50\%$ ,  $\alpha_3 = 90\%$ ,  $U = 60V$ ,  $I = +50A$ ,  $\Delta I = 10A$ .

**6.3 Etude du freinage – Hacheur élévateur de type BOOST (7 points)**

Le pilote appuie à fond sur le frein.

La régulation du courant dans le moteur impose :

$$I_{moteur} = -I_{moy} = -50A.$$

L’interrupteur K2 est :

- ouvert (OFF) pour  $t \in [0 ; \alpha T]$  ;
- fermé (ON) pour  $t \in [\alpha T ; T]$ .

L’interrupteur K1 est :

- fermé (ON) pour  $t \in [0 ; \alpha T]$  ;
- ouvert (OFF) pour  $t \in [\alpha T ; T]$ .

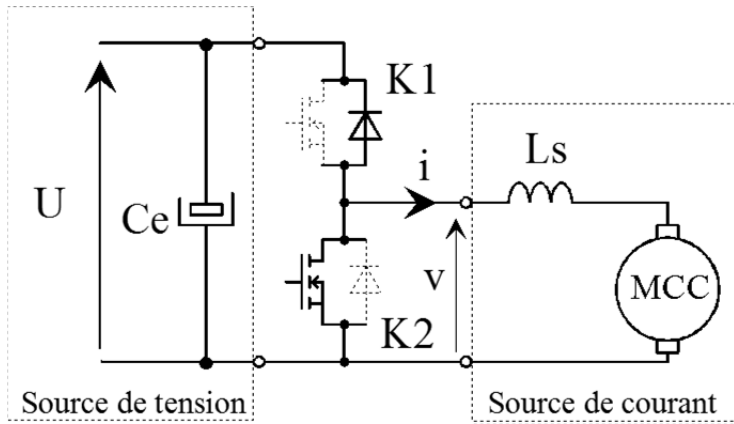


Fig. 6.3 Fonctionnement en hacheur de type BUCK (dessins\hacheur6.drw).

**6.3.1 Principe de fonctionnement du BOOST (3 points)**

Hypothèses :

- la f.e.m. E du moteur est constante vis-à-vis de la période de découpage ;
- la tension U est constante :  $U = Cste$  ;
- on néglige la résistance d’induit du moteur ;
- le transistor est parfait : il se comporte comme un interrupteur idéal ;
- la diode est parfaite : elle a un comportement complémentaire au transistor.

- a) Simplifier le schéma de la figure 6.3, en tenant compte des hypothèses ci-dessus.
- b) Expliquer qualitativement le fonctionnement du montage (magnétisation de l’inductance, ...).
- c) Donner les expressions de  $\frac{di}{dt}(t)$  pour  $t \in [0 ; \alpha T]$  et pour  $t \in [\alpha T ; T]$ .

d) Donner les expressions de  $i(t)$  pour  $t \in [0 ; \alpha T]$  et pour  $t \in [\alpha T ; T]$ .

**6.3.2 Evolution de la tension de sortie du hacheur (1 points)**

Le karting est initialement lancé à 60 km/h. On prendra  $R_{induit} = 40 m\Omega$ .

a) Donner la relation entre  $V_{moy}$  et  $I_{moy}$  en fonction de E et R.

- b) Calculer la valeur des trois rapports cycliques pour  $N_1 = 5000$  tr/min,  $N_2 = 2500$  tr/min et  $N_3 = 0$  tr/min.

**6.3.3 Tracé de la tension et du courant de sortie du hacheur BOOST (3 points)**

- a) En prenant comme référence le signal de commande du transistor K1, tracer **À L'ÉCHELLE**  $v(t)$  et  $i(t)$  pour  $\alpha_1 = 90\%$ ,  $\alpha_2 = 50\%$ ,  $\alpha_3 = 10\%$ ,  $U = 60V$ ,  $I = -50A$ ,  $\Delta I = 10A$ .

## TD 7 - Hacheur 4 quadrants

Afin de faire varier la tension aux bornes d'une machine à courant continu, à partir de la tension fixe issue d'une batterie d'accumulateur, nous utilisons un convertisseur continu-continu (hacheur). La structure de ce convertisseur est représentée sur la figure 7.1.

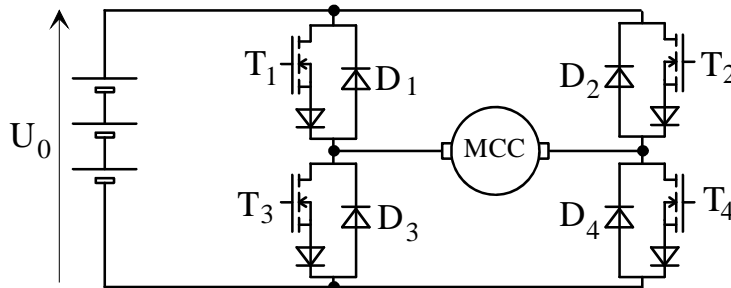


Fig. 7.1. Structure du convertisseur (dessins\h4q2.drw).

Dans ce convertisseur, les interrupteurs sont alternativement commandés à la fermeture et à l'ouverture sur une période de découpage  $T = \frac{1}{F}$ , avec :

pour  $t \in [0 ; \alpha T]$  alors  $\begin{cases} T_1 \text{ et } T_4 \text{ sont fermés} \\ T_2 \text{ et } T_3 \text{ sont ouverts} \end{cases}$  et pour  $t \in [\alpha T ; T]$  alors  $\begin{cases} T_1 \text{ et } T_4 \text{ sont ouverts} \\ T_2 \text{ et } T_3 \text{ sont fermés} \end{cases}$

### 7.1 Tension moyenne

- Tracer la tension  $u_C(t)$ , tension aux bornes de la charge (ici MCC).
- Donner l'expression de la valeur moyenne de la tension  $u_C(t)$ , notée  $U_{C \text{ moy}}$ , en fonction de la source continue  $U_0$  et du rapport cyclique  $\alpha$ .

### 7.2 Ondulation du courant

La charge est une MCC dont le schéma équivalent est un circuit (R,L,E) série, avec R la résistance d'induit, L l'inductance d'induit et E la force contre-électromotrice. On fera l'approximation que la constante de temps électrique est grande devant la période de découpage.

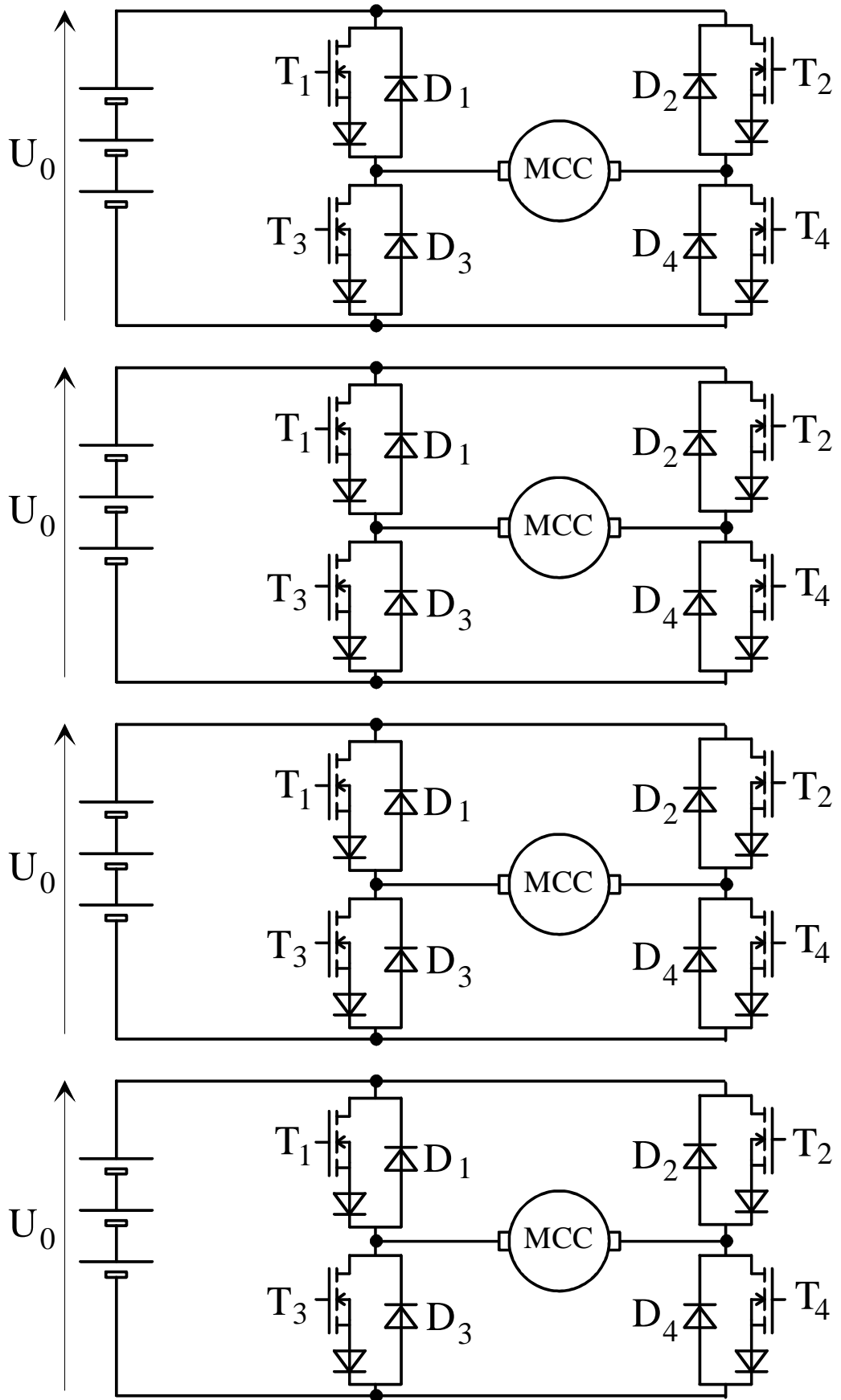
- Donner la relation entre  $U_{C \text{ moy}}$ , E, R et  $I_{C \text{ moy}}$ .
- Donner l'expression de l'ondulation du courant d'induit  $i_C(t)$ , notée  $\Delta I$ , en fonction de  $U_0$ ,  $\alpha$ , L et F la fréquence de découpage.
- Quelle est la valeur de L, permettant d'obtenir une valeur de l'ondulation du courant inférieure à x% du courant moyen maximum ?
- Application numérique :  $U_0 = 48V$  ;  $F = 20 \text{ kHz}$  ;  $I_{C \text{ moy max}} = 25A$  et  $x\% = 5 \%$ .

### 7.3 Diagramme de conduction

Donner le trajet du courant pour les quatre points de fonctionnement suivant :

- $I_{C \text{ moy}} > 0$  et  $U_{C \text{ moy}} > 0$ , pour  $t \in [0 ; \alpha T]$  ;
  - $I_{C \text{ moy}} > 0$  et  $U_{C \text{ moy}} > 0$ , pour  $t \in [\alpha T ; T]$  ;
  - $I_{C \text{ moy}} < 0$  et  $U_{C \text{ moy}} > 0$ , pour  $t \in [0 ; \alpha T]$  ;
  - $I_{C \text{ moy}} < 0$  et  $U_{C \text{ moy}} > 0$ , pour  $t \in [\alpha T ; T]$  ;
- en précisant bien les composants qui conduisent.

7.4 Diagramme de conduction – Document réponse



## TD 8 - Alimentation à découpage de type FLYBACK

T est fermé (ON) pour

$$t \in [0 ; \alpha T].$$

T est ouvert (OFF) pour

$$t \in [\alpha T ; T].$$

On posera  $m = \frac{n_2}{n_1}$ .

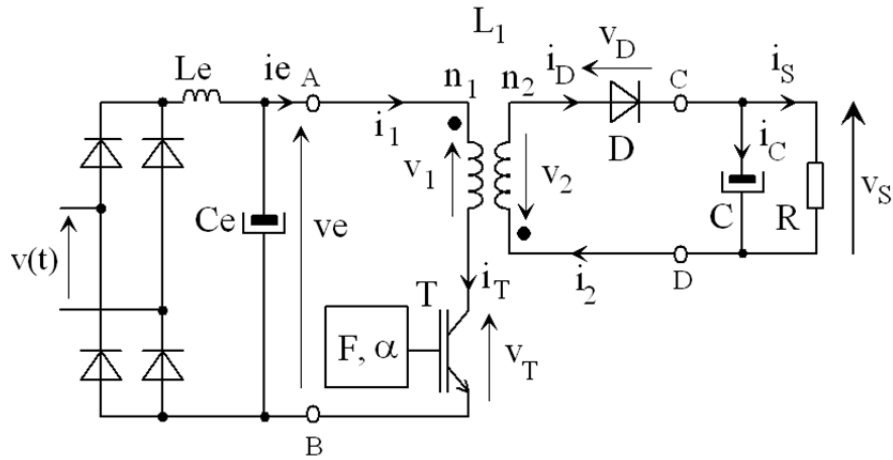


Fig. 8.1. Alimentation à découpage asymétrique de type FLYBACK  
(dessins\flyback3.drw).

### 8.1 Expressions des grandeurs électriques

Hypothèses (régime permanent et conduction continue) :

- la tension d'entrée est constante :  $v_e = V_e = \text{Cste}$  ;
- la tension de sortie est constante :  $v_s = V_s$  ;
- le transistor est parfait : il se comporte comme un interrupteur idéal ;
- la diode est parfaite: elle a un comportement complémentaire au transistor ;
- la valeur moyenne du courant de sortie vaut  $I_s$ .

- a) Simplifier le schéma et établir des lois des mailles et lois des nœuds du circuit.
- b) Rappeler les relations du circuit magnétique.
- c) Représenter le circuit pour T ON et T OFF. Faire le bilan des grandeurs électriques :  $(v_e ; i_e)$ ,  $(v_T ; i_T)$ ,  $(v_1 ; i_1)$ ,  $(v_2 ; i_2)$ ,  $(v_D ; i_D)$  et  $(v_s ; i_s)$ .
- d) Etablir l'équation de fonctionnement et l'expression de  $i_1(t)$  pour  $t \in [0 ; \alpha T]$ .
- e) Etablir l'équation de fonctionnement et l'expression de  $i_2(t)$  pour  $t \in [\alpha T ; T]$ .
- f) Donner les relations entre  $I_{1\min}$ ,  $I_{1\max}$ ,  $I_{2\min}$ ,  $I_{2\max}$  et  $\phi_{\min}$ ,  $\phi_{\max}$ .
- g) En prenant le signal de commande du transistor T en référence, tracer  $v_1(t)$ ,  $n_1 i_1(t)$ ,  $v_2(t)$ ,  $n_2 i_2(t)$ ,  $v_T(t)$ ,  $i_T(t)$ ,  $v_D(t)$  et  $i_D(t)$ .
- h) Calculer  $\langle v_1 \rangle = \frac{1}{T} \int_{[T]} v_1(t) \cdot dt$  et en déduire l'expression de  $V_s$  en fonction de  $\alpha$  ;  $V_e$  et  $m = \frac{n_2}{n_1}$  en régime permanent.
- i) Tracer la variation de  $V_s$  en fonction de  $\alpha$ .

### 8.2 Ondulation du courant

- a) Calculer  $\Delta I_L$ , l'ondulation du courant  $i_1(t)$  de l'inductance  $L_1$  en fonction de  $\alpha$ ,  $L$ ,  $F$  et  $V_e$ .
- b) En notant que  $\langle i_C \rangle = 0$ , donner l'expression du courant moyen dans la diode, noté  $I_2$ .

- c) A partir du bilan de puissance, déduire l'expression du courant moyen dans le transistor, noté  $I_T$ .
- d) Exprimer alors le courant maximum dans le transistor T en fonction de  $I_S$ ,  $\alpha$  et m.
- e) Donner la valeur maximum de la tension aux bornes de l'interrupteur T et calculer son facteur de dimensionnement Fd en fonction de  $\alpha$ ,  $\Delta I_L$ , m et de  $I_S$ .
- f) Tracer l'évolution de Fd pour  $\Delta I_L = 0$ .

### 8.3 Ondulation de la tension de sortie

- a) Le courant de sortie étant constant :  $i_s = I_S$ , tracer l'allure du courant dans le condensateur en prenant pour le courant dans l'inductance celui trouvé précédemment.
- b) A partir de la relation du condensateur C, donner les expressions de  $v_C(t)$  pour  $t \in [0 ; \alpha T]$  et  $[\alpha T ; T]$ .
- c) Tracer l'allure de  $v_C$  et calculer l'ondulation de la tension  $\Delta V_S = V_{Smax} - V_{Smin}$ .

### 8.4 Applications numériques

Les caractéristiques de l'alimentation désirées sont  $V_S = +24\text{ V}$  et  $I_S = 10\text{ A}$ . Les résultats des applications numériques seront fournis en unité INGENIEUR avec 3 chiffres significatifs.

- a) Calculer la valeur moyenne  $V_e$  pour une tension secteur de 230V efficace.
- b) Calculer la puissance de l'alimentation.
- c) Avec un rendement  $\eta = 0,90$ , calculer la valeur moyenne du courant d'entrée  $I_e$ .

### 8.5 Calcul simplifié de l'inductance

On utilise un circuit magnétique (CM) de type ETD44 en matériaux 3C85. Il est formé de deux demi culasses en E. La surface bobinable (en grisée) correspond à la fenêtre de la carcasse (caractéristiques données en annexe §8.6).

On se place dans un fonctionnement FLYBACK en mode auto-oscillant.

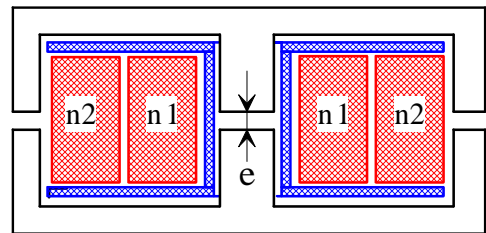


Fig. 8.2. Circuit magnétique (dessins\cm.drw).

Les caractéristiques de l'alimentation désirées sont  $V_S = +24\text{ V}$  et  $I_S = 10\text{ A}$  avec  $E = +207\text{ V}$ . Les résultats des applications numériques seront fournis en unité INGENIEUR avec 3 chiffres significatifs.

- a) Etablir les équations donnant B et H dans le CM. On notera "e" l'épaisseur d'un entrefer.
- b) Etablir l'expression du flux  $\Phi$  et fonction de  $i_1$  et des paramètres du circuit magnétique.
- c) Donner l'expression du coefficient d'inductance propre  $L_1$ . Vérifier la valeur de  $A_L$ .
- d) Calculer le rapport de transformation m pour avoir  $\alpha = 0,5$  au point nominal.

- e) Calculer la valeur de  $L_1$  pour avoir  $F = 25\text{ kHz}$  avec  $F = \frac{R}{2 \cdot m^2 \cdot L_1 \left(1 + \frac{V_S}{mV_E}\right)^2}$ .

- f) Calculer la valeur du courant  $I_{10max}$ .
- g) Calculer le nombre de spire du bobinage primaire  $n_1$  pour ne pas saturer le C.M. ( $\hat{B} = 200\text{ mT}$ ).
- h) Calculer les valeurs de  $I_{1eff}$  et  $I_{2eff}$ . En déduire les sections des fils de cuivre si  $\delta = 5\text{ A/mm}^2$ .

- i) En tenant compte d'un coefficient de bobinage  $K_B = \frac{W_a}{S_{CU}} = 2,25$ , vérifier que les deux bobinages rentrent bien dans la fenêtre de la carcasse.
- j) Calculer la valeur de l'entrefer "e".
- k) Calculer l'énergie électromagnétique maximale que l'on peut stocker dans ce C.M. à partir de la formule  $W_{EM} = \frac{1}{2} k_B \cdot k_i \cdot B_{max} \cdot \delta \cdot A_e \cdot S_B$  avec  $k_i = \frac{I_{I_{max}}}{I_{I_{eff}}}$ . Comparer avec  $\frac{1}{2} L_1 I_{I_{max}}^2$ .

### 8.6 Circuit magnétique ETD44 - Philips

Philips Components

Product specification

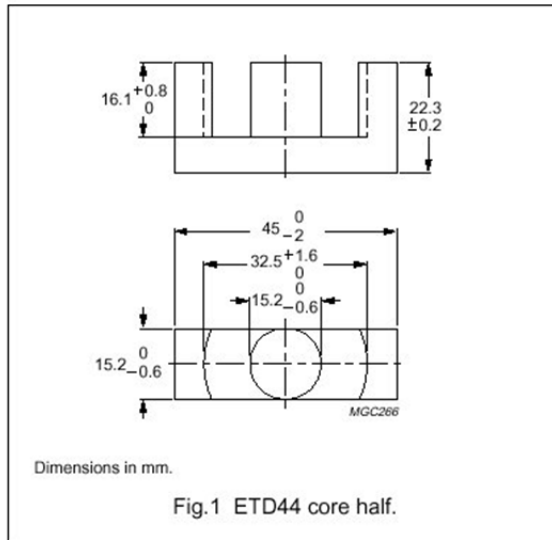
ETD cores and accessories

ETD44

**CORE SETS**

**Effective core parameters**

SYMBOL	PARAMETER	VALUE	UNIT
$\Sigma(l/A)$	core factor (C1)	0.589	mm <sup>-1</sup>
$V_e$	effective volume	17800	mm <sup>3</sup>
$l_e$	effective length	103	mm
$A_e$	effective area	173	mm <sup>2</sup>
$A_{min}$	minimum area	172	mm <sup>2</sup>
m	mass of core half	≈47	g



**Core halves**

Clamping force 40 ±20 N. Gapped cores are available on request.

GRADE	$A_L$ (nH)	$\mu_e$	AIR GAP (µm)	TYPE NUMBER
3C30	3100 ±25%	≈1550	≈0	ETD44-3C30
3C85	3800 ±25%	≈1900	≈0	ETD44-3C85
3C90	3800 ±25%	≈1900	≈0	ETD44-3C90
3F3	3500 ±25%	≈1780	≈0	ETD44-3F3

**Properties of core sets under power conditions**

GRADE	B (mT) at	CORE LOSS (W) at		
	H = 250 A/m; f = 25 kHz; T = 100 °C	f = 25 kHz; B̂ = 200 mT; T = 100 °C	f = 100 kHz; B̂ = 100 mT; T = 100 °C	f = 400 kHz; B̂ = 50 mT; T = 100 °C
3C30	≥360	≤2.0	≤2.2	–
3C85	≥320	≤2.5	≤3.0	–
3C90	≥330	≤2.0	≤2.2	≤
3F3	≥320	–	≤2.2	≤ 3.9

Fig. 8.3. Circuit magnétique Philips (images\etd44a & etd44b.jpg).



## 8.7 Bobine pour circuit magnétique ETD44 - Philips

Philips Components

Product specification

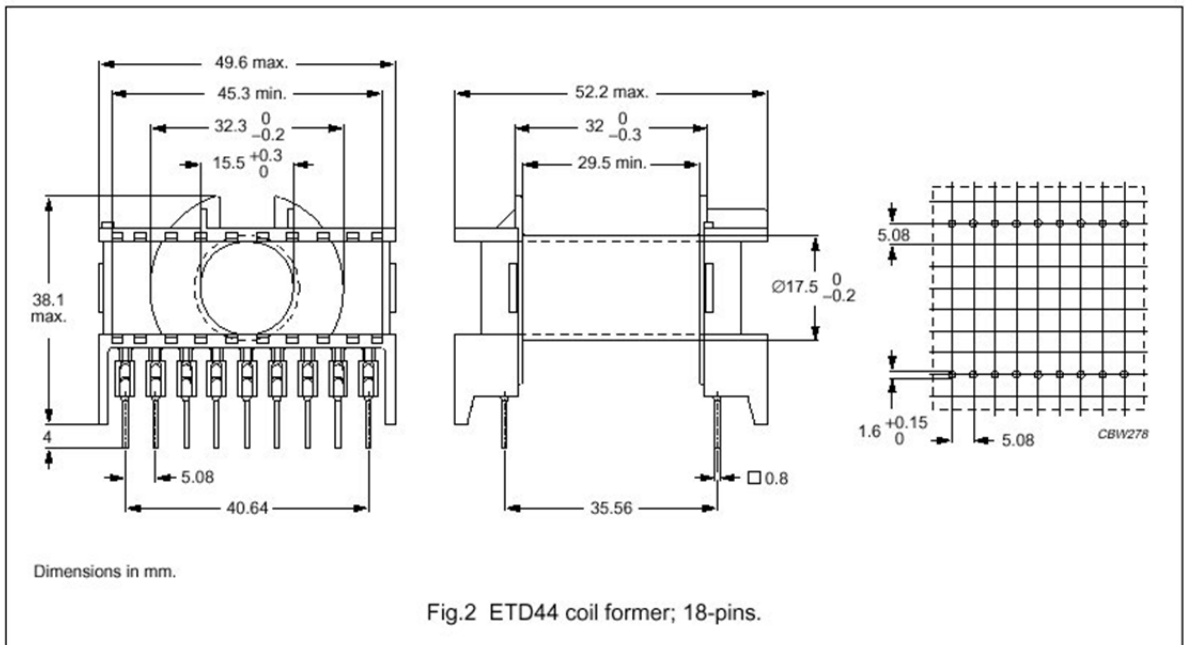
ETD cores and accessories

ETD44

### COIL FORMERS

#### General data 18-pins ETD44 coil former

PARAMETER	SPECIFICATION
Coil former material	polybutyleneterephtalate (PBT), glass-reinforced, flame retardant in accordance with "UL 94V-0"; UL file number E45329(R)
Pin material	copper-tin alloy (CuSn), tin-lead alloy (SnPb) plated
Maximum operating temperature	155 °C, "IEC 85" class F
Resistance to soldering heat	"IEC 68-2-20", Part 2, Test Tb, method 1B, 350 °C, 3.5 s
Solderability	"IEC 68-2-20", Part 2, Test Ta, method 1



#### Winding data for 18-pins ETD44 coil former

NUMBER OF SECTIONS	WINDING AREA (mm <sup>2</sup> )	MINIMUM WINDING WIDTH (mm)	AVERAGE LENGTH OF TURN (mm)	TYPE NUMBER
1	214	29.5	77	CPH-ETD44-1S-18P

Fig. 8.4. Bobine Philips (images\etd44c & etd44d.jpg).

## TD 9 - Alimentation à découpage de type FORWARD

**Sans documents de cours – Calculatrices autorisées – Les résultats des applications numériques seront fournis en unité INGENIEUR avec 3 chiffres significatifs.**

Le schéma d'une alimentation à découpage de type "FORWARD" est donnée à la figure 9.1. Ce convertisseur est prévu pour fonctionner sur le réseau américain 130V/60Hz. Il est destiné à l'alimentation d'une carte électronique d'ordinateur fonctionnant sous 5V et consommant un courant maximum de 10A. La fréquence de travail est fixée à 50 kHz. Le rapport cyclique est constant et vaut  $\alpha = 0,5$ .

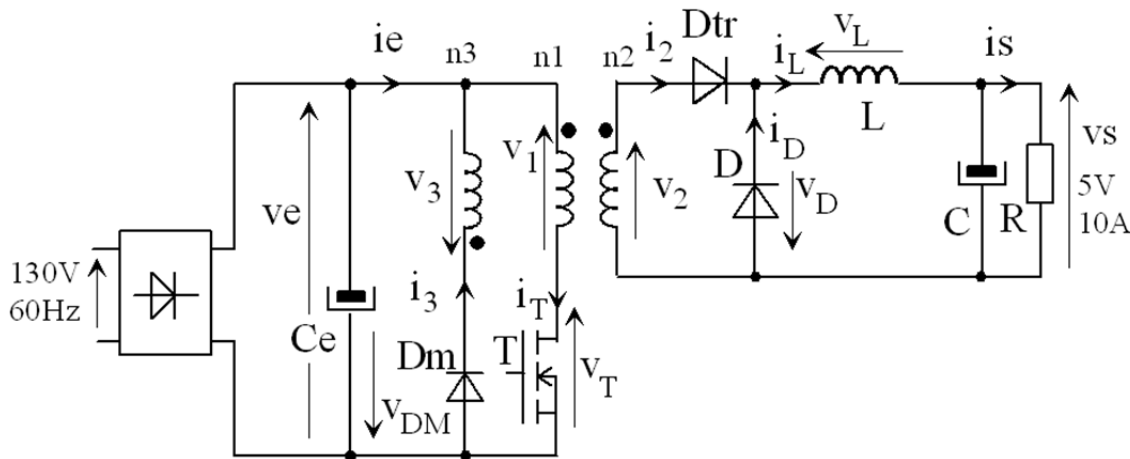


Fig. 9.1. Convertisseur AC - DC à découpage (dessins/forward1.drw).

On appellera  $L_{10}$  l'inductance magnétisante qui sera placée sur le bobinage N° 1. On rappelle la relation sur les courants, compte tenu de l'orientation des bobinages :

$$+ n_1 \cdot i_T - n_2 \cdot i_2 + n_3 \cdot i_{Dm} = n_1 \cdot i_{10} \text{ avec } i_{10} \text{ le courant dans } L_{10} = 12 \text{ mH.}$$

Le nombre de spire du bobinage 1 vaut  $n_1 = 55$  spires. On posera  $m = \frac{n_2}{n_1}$  et  $m' = \frac{n_3}{n_1}$ .

### Hypothèses :

- Le transistor T est fermé (ON) pour  $t \in [0 ; \alpha T]$  et ouvert (OFF) pour  $t \in [\alpha T ; T]$  ;
- la tension d'entrée est constante :  $v_e = E = \text{Cste}$  ;
- la tension de sortie est constante :  $v_s = V_s = +5V$  ;
- la valeur moyenne du courant de sortie vaut  $\langle i_s(t) \rangle = I_s = +10A$  ;
- le courant moyen dans l'inductance de sortie L est constant  $\langle i_L \rangle = I_{L\text{moy}} = 10A$  ;
- le transistor T est parfait : il se comporte comme un interrupteur idéal.

### 9.1 Calculs préliminaires (2 points)

- a) Calculer la tension d'entrée E, sachant que le filtrage est parfait (pas d'ondulation).
- b) Calculer la puissance du convertisseur
- c) Calculer la valeur moyenne du courant d'entrée  $I_e$ , si le rendement du convertisseur vaut 1.
- d) Donner les relations entre le flux magnétique  $\Phi$  et  $(v_1, v_2, v_3)$  et entre  $v_1$  et  $i_{10}$ .
- e) Montrer que le flux dans le circuit magnétique  $\Phi(t)$  est proportionnel au courant  $i_{10}(t)$ .

f) Donner les 4 lois des mailles du montage.

### 9.2 Phase de transfert de l'énergie $t \in [0 ; \alpha T]$ (3,5 points)

- Simplifier le schéma de la figure 9.1 pour T ON.
- Faire le bilan des grandeurs électriques :  $(v_e ; i_e)$ ,  $(v_{Dm} ; i_{Dm})$ ,  $(v_T ; i_T)$ ,  $(v_1 ; i_1)$ ,  $(v_2 ; i_2)$ ,  $(v_L ; i_L)$ ,  $(v_{Dtr} ; i_{Dtr})$ ,  $(v_D ; i_D)$  et  $(v_3 ; i_3)$ .
- Vérifier que les diodes  $D_m$  et  $D$  sont bloquées et que  $D_{tr}$  est passante.
- Etablir les équations de fonctionnement et donner l'expression de  $i_{10}(t)$  et de  $i_L(t)$  pour  $t \in [0 ; \alpha T]$ , sachant que  $i_{10}(0)=0$  et  $i_L(0)=I_{Lmin}$ . Calculer  $I_{10max}$ .
- Calculer  $m$  pour avoir  $V_{2max} = 10V$ . En déduire  $n_2$ .

### 9.3 Phase de démagnétisation $t \in [\alpha T ; \beta T]$ (4 points)

- Simplifier le schéma de la figure 9.1 pour T OFF
- Faire le bilan des grandeurs électriques :  $(v_e ; i_e)$ ,  $(v_{Dm} ; i_{Dm})$ ,  $(v_T ; i_T)$ ,  $(v_1 ; i_1)$ ,  $(v_2 ; i_2)$ ,  $(v_L ; i_L)$ ,  $(v_{Dtr} ; i_{Dtr})$ ,  $(v_D ; i_D)$  et  $(v_3 ; i_3)$ .
- Pourquoi la diode  $D_m$  conduit ? Vérifier que  $D_{tr}$  est bloquée et que  $D$  est passante.
- Etablir les équations de fonctionnement avec  $n_1 \neq n_3$  et donner l'expression de  $i_{10}(t)$  pour  $t \in [\alpha T ; \beta T]$ .
- Sachant que  $i_{10}(\beta T) = 0$ , calculer  $m'$  pour avoir  $\beta = 0,9$ . En déduire  $n_3$ .
- Donner la valeur  $V_{Tmax}$  de la tension maximale aux bornes du transistor T. Calculer  $V_{Tmax}$ .

### 9.4 Tracer des courants et des tensions (4 points)

- Pendant la phase morte  $t \in [\beta T ; T]$ , faire le bilan les grandeurs électriques :  $(v_e ; i_e)$ ,  $(v_{Dm} ; i_{Dm})$ ,  $(v_T ; i_T)$ ,  $(v_1 ; i_1)$ ,  $(v_2 ; i_2)$ ,  $(v_L ; i_L)$ ,  $(v_{Dtr} ; i_{Dtr})$ ,  $(v_D ; i_D)$  et  $(v_3 ; i_3)$ .
- En prenant comme référence le signal de commande  $v_{GS}(t)$  du transistor T, tracer :  $v_1(t)$ ,  $i_{10}(t)$ ,  $v_L(t)$ ,  $i_L(t)$ ,  $v_{Dtr}(t)$ ,  $i_{Dtr}(t)$ ,  $i_T(t)$ ,  $v_T(t)$  et  $i_{Dm}(t)$  pour  $t \in [0 ; T]$ . Préciser les amplitudes maximales.

### 9.5 Calculs des grandeurs de sortie (5,5 points)

Le montage "FORWARD" se comporte comme un hacheur série (figure 9.2). On désire avoir une ondulation du courant dans L de  $\Delta I_L = \Delta I_S = 0,3A$ . La tension  $v_s(t)$  est constante  $V_S = +5V$ .

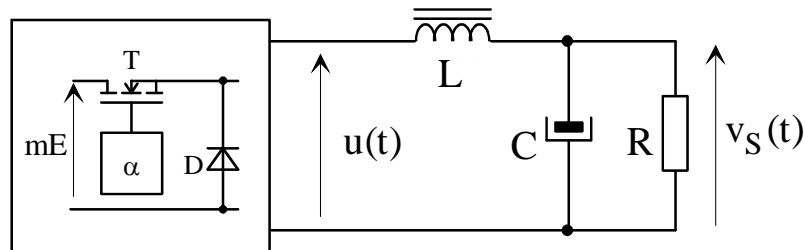


Fig. 9.2. Simplification du montage "FORWARD" (dessins\hacheur0.drw).

- Que vaut la tension  $u(t)$  pour  $t \in [0 ; \alpha T]$  et pour  $t \in [\alpha T ; T]$  ?
- Etablir les équations de fonctionnement et donner les expressions de  $i_L(t)$  pour  $t \in [0 ; \alpha T]$  et pour  $t \in [\alpha T ; T]$ .
- En prenant comme référence le signal de commande du transistor T, tracer  $u(t)$ ,  $v_L(t)$ ,  $i_L(t)$  et  $i_D(t)$ .

- d) Calculer  $\langle v_L(t) \rangle = \frac{1}{T} \int v_L(t) \cdot dt$ . En déduire l'expression de  $V_S$  en fonction de  $\alpha$ ,  $m$  et  $E$ .
- e) Exprimer  $\Delta I_L$ , l'ondulation du courant dans l'inductance  $L$ , en fonction de  $\alpha$ ,  $L$ ,  $F=1/T$  et  $mE$ .
- f) Calculer l'inductance  $L$  pour avoir  $\Delta I_L \leq 0,3$  A.
- g) Calculer le courant moyen  $I_{F(AV)}$  et le courant maximum  $I_{FM}$  dans la diode  $D$ .

**9.6 Calcul simplifié de l'inductance L (6 points)**

On utilise un circuit magnétique de type ETD44 en matériaux 3C85. Il est formé de deux demi culasses en E. La surface bobinable correspond à la fenêtre de la carcasse. Ces principales caractéristiques sont :

$Le = 103$  mm,  $Ae = 173$  mm<sup>2</sup>,  
 $A_L = 3800 \pm 25\%$  nH,  $\mu e = 1900$ ,  
 $B_{max} = 200$  mT,  $W_A = 214$  mm<sup>2</sup>.

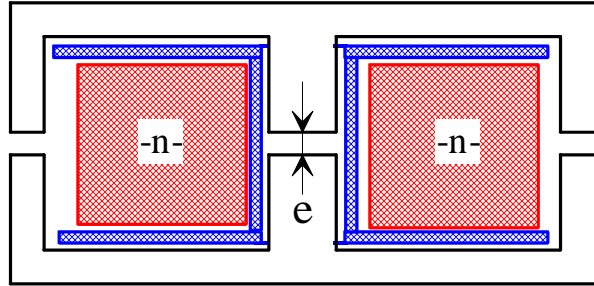


Fig. 9.3. Circuit magnétique (dessins\cm.drw).

- On cherche à calculer l'inductance de lissage du hacheur série étudié au paragraphe §9.5.
  - Les caractéristiques de l'alimentation sont  $V_S = +5V$  et  $I_S = +10A$ , avec  $m \cdot E = +10V$ .
  - La fréquence de découpage vaut  $F = 50$  kHz. Le rapport cyclique est constant et vaut  $\alpha = 0,5$ .
- a) Etablir les équations donnant  $B$ ,  $H$  et  $\Phi$  dans le circuit magnétique.
  - b) Etablir l'expression du flux  $\Phi$  en fonction de  $i_L$  et des paramètres du circuit magnétique.
  - c) Donner l'expression du coefficient d'inductance propre  $L = n^2 \cdot A_L \cdot f(e, Ae, Le, \mu e)$ . Vérifier la valeur de  $A_L = \frac{\mu_0 \cdot \mu e \cdot Ae}{Le}$ .
  - d) Exprimer le flux  $\Phi_{MAX}$  en fonction de  $I_{Lmax} = I_{Lmoy} + \Delta I_L/2$  et des paramètres du circuit magnétique.
  - e) Donner le nombre de spire maximum du bobinage  $n$  pour ne pas saturer le C.M.
  - f) Le choix de l'entrefer  $e$  permet d'ajuster la valeur de  $L > 166$   $\mu H$ . A partir de l'expression de l'inductance, donner la valeur minimale du nombre de spires en fonction de  $e$  et des paramètres du circuit magnétique.
  - g) On prend  $I_{Leff} = 10A$ . Calculer la section du fil de cuivre si  $\delta = 4A/mm^2$ .
  - h) En tenant compte d'un coefficient de bobinage  $K_B = \frac{W_a}{S_{CU}} = 1,43$ , calculer  $n_{max}$  le nombre maximal de fils que l'on peut mettre dans la fenêtre de la carcasse.
  - i) Choisir  $n$  et  $e$ .
  - j) Calculer l'énergie électromagnétique maximale que l'on peut stocker dans ce circuit magnétique à partir de la formule  $W_{EM} = \frac{1}{2} \cdot k_B \cdot k_i \cdot B_{max} \cdot \delta \cdot S_{fer} \cdot S_B$  avec  $k_i = \frac{I_{Lmax}}{I_{Leff}}$ .
  - k) Comparer avec  $\frac{1}{2} \cdot L \cdot I_{Lmax}^2$ .