



UNIVERSITÉ FRANCOIS-RABELAIS - TOURS

Institut Universitaire de Technologie

Département GENIE ELECTRIQUE ET INFORMATIQUE INDUSTRIELLE

Thierry LEQUEU

TD MC-ET2

2^{ème} année – Dept. GEII – IUT de Tours



<h2>Travaux dirigés MC-ET2</h2> <h3>IUT GEII de Tours - 2^{ième} année</h3>

Sommaire :

TD 1 - Utilisations des sources en EDP.....	4
TD 2 - Le hacheur série de type BUCK (abaisseur)	8
TD 3 - Hacheur série en conduction discontinue.....	10
TD 4 - Le hacheur élévateur de type BOOST	12
TD 5 - Le hacheur inverseur de type BUCK–BOOST	14
TD 6 - Harmoniques de tension du hacheur série.....	16
TD 7 - Hacheur réversible en tension.....	18
TD 8 - Hacheur réversible en courant.....	20
TD 9 - Hacheur 4 quadrants	24
TD 10 - Alimentation à découpage de type FLYBACK	26
TD 11 - Alimentation à découpage de type FORWARD	30

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.

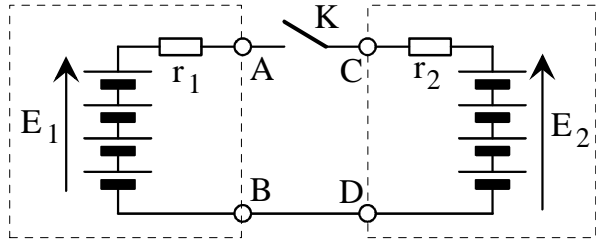


Fig. 1.1. Recharge rapide de la batterie (dessins\batterie.drw).

- 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 nominale.
- 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.

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 λ .

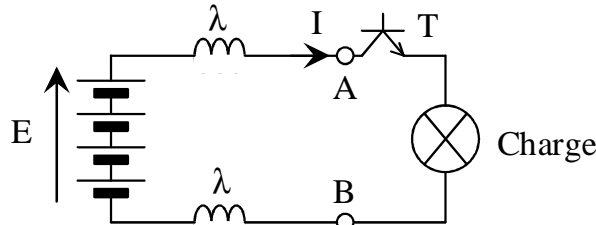


Fig. 1.2. Nature de la source, cas de la batterie (dessins\batterie.drw).

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

- a) Calculer la surtension ΔU_{AB} , à l'ouverture de T. Conclure à la nature de la source vue de AB, dans cette application.

On raccourcit les câbles de liaison à 2×50 cm et on utilise un interrupteur plus lent ($20 \mu s$, cas du transistor bipolaire).

- b) Recalculer alors la surtension ΔU_{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 $I_2 = 10A$.

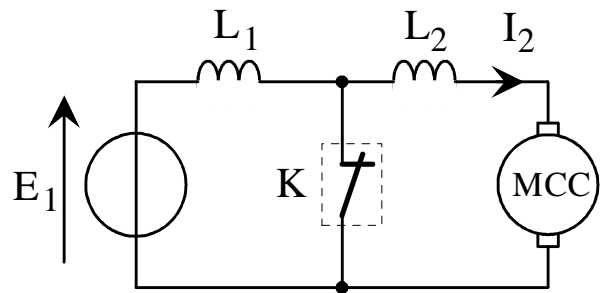


Fig. 1.3. Sources de courant équivalentes (dessins\courant0.drw).

- On suppose que le courant est initialement nul dans l'inductance L_1 . Calculer le courant I_1 au bout de 1 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.

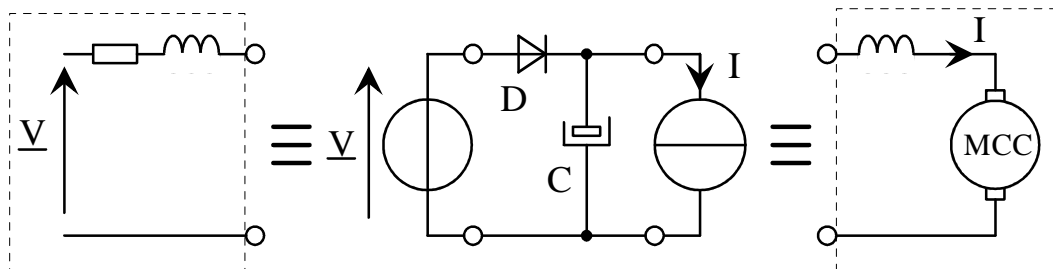


Fig. 1.4. Redresseur mono-alternance pour MCC (dessins\tension0.drw)

- Calculer la valeur du condensateur pour avoir une ondulation ΔV_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 :

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

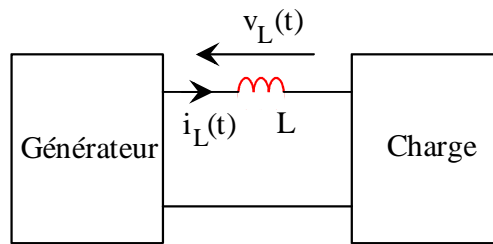


Fig. 1.5. Etude de l'inductance (dessins\so_lc.drw).

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 $I_{L, moy}$ 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.

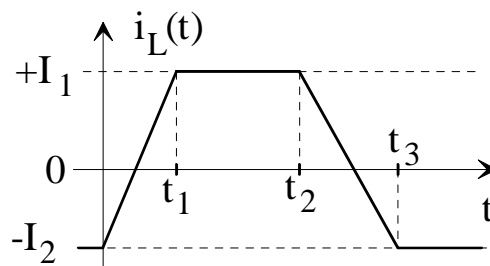


Fig. 1.6. Echelon de courant (dessins\so_lc.drw).

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 :

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

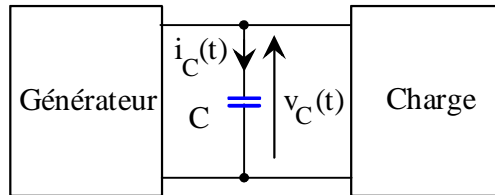


Fig. 1.7. Etude du condensateur (dessins\so_lc.drw).

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.

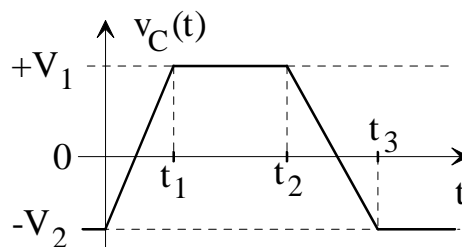


Fig. 1.8. Echelon de tension (dessins\so_lc.drw).

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)

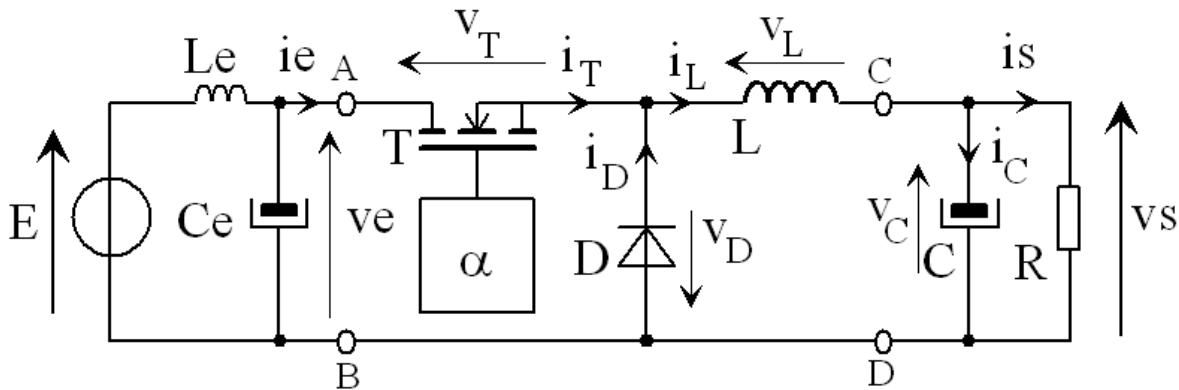


Fig. 2.1. Structure générale du hacheur série (dessins\buck1.drw).

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 (charge 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 α et E.

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

- a) Calculer ΔI_L , l'ondulation du courant dans L, en fonction de α , L, $F=1/T$, E et V_s , en Régime Permanent.
- b) Donner alors l'ondulation du courant en fonction de α , L, F et E.
- c) Donner le tableau de variation de ΔI_L en fonction de α . 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.

- 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 $u(t) = -v_D(t)$, $v_L(t)$ et $i_L(t)$. Pour la première période, on prendra $i_L(0) = 0$.

On se place désormais en régime permanent.

- Donner l'expression de I_{Lmax} et de I_{Lmin} .
- Calculer l'ondulation du courant dans l'inductance L en fonction de α , L, R, $\tau = \frac{L}{R}$ et E.
- Donner l'hypothèse qui permet un développement limité de l'exponentiel.
- 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.

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

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 $\eta = 85\%$.

- Calculer la valeur du rapport cyclique nominal α_{nom} .
- Calculer la valeur de ΔI_{Lmax} et de ΔI_{Lnom} .
- Calculer la valeur de ΔV_{Smax} et de ΔV_{Snom} .
- Calculer le courant moyen d'entrée.
- Calculer les contraintes en courant et en tension pour le transistor et la diode.

TD 3 - Hacheur série en conduction discontinue

Un moteur électrique à courant continu de caractéristiques $V_M = 60V$ et $I_M = 18A$ est alimenté par le hacheur série donné à la figure 3.1. Le schéma équivalent du moteur est du type (R,L,E).

Les caractéristiques de la machine sont les suivantes :

- vitesse nominale : $N = 1500$ tr/min,
- résistance d'induit : $R = 0,2 \Omega$,
- inductance d'induit : $L = 560 \mu H$,

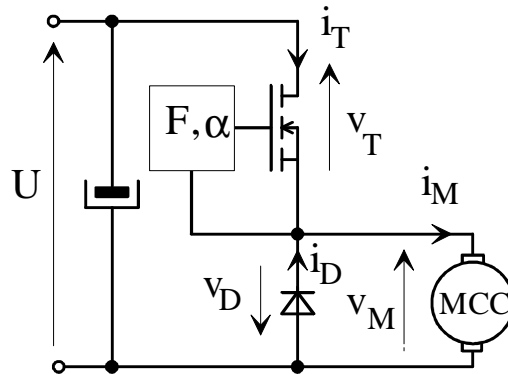


Fig. 3.1. Montage hacheur série (h_serier.drw).

La tension d'alimentation U est délivrée par 6 accumulateurs de 12V en série.

On rappelle la relation du hacheur série : $\langle v_M \rangle = V_M = \alpha \cdot U$ avec α le rapport cyclique. Le transistor est parfait. La diode a un comportement complémentaire au transistor. Le transistor T est fermé (ON) pour $t \in [0 ; \alpha T]$ et ouvert (OFF) pour $t \in [\alpha T ; T]$.

3.1 Etude au point de fonctionnement nominal (2 points)

La fréquence de découpage est fixe et vaut $F = 25$ kHz.

- a) Calculer le rapport cyclique pour le fonctionnement nominal ainsi que la fem du moteur.
- b) Calculer la constante de temps électrique du moteur. La comparer avec la période de découpage du hacheur.
- c) On désire une ondulation du courant moteur inférieur à 2% du courant nominal pour le fonctionnement nominal. Calculer la valeur de l'inductance nécessaire.
- d) Pour quelle valeur du rapport cyclique l'ondulation est elle maximale ? Calculer cette valeur de l'ondulation ΔI_{Lmax} (on prendra $L = 560 \mu H$).

3.2 Etude en régime de conduction discontinue (8 points)

Les pertes mécaniques sont constantes et égales aux pertes en régime nominal.

- a) Calculer la somme des pertes sachant que la puissance utile est de 1 kW. En déduire les pertes mécaniques.

Le moteur fonctionne à vide :

- b) Calculer le courant d'induit à vide I_{M0} sachant que $V_M = 60V$ (on négligera les pertes joules).
- c) Calculer la valeur de la fem E .
- d) Représenter le circuit pour T ON et T OFF. Faire le bilan des grandeurs électriques : $(v_T ; i_T)$, $(v_D ; i_D)$ et $(v_L ; i_L)$. On négligera R .
- e) Etablir les équations de fonctionnement et donner les expressions de $i_L(t)$ pour $t \in [0 ; \alpha T]$ et pour $t \in [\alpha T ; \beta T]$ avec $\beta T < T$ l'instant d'annulation du courant (on remarquera que $v_D = E$ lorsque le courant s'annule dans le moteur). On posera avec $\alpha' = \beta - \alpha$.
- f) En prenant comme référence le signal de commande du transistor T, tracer $i_L(t) = i_M(t)$, $v_M(t)$, $i_D(t)$, $v_D(t)$ et $v_L(t)$. Pour la première période, on prendra $i_L(0) = 0$.

- g)** Calculer d'après le graphique $\langle v_L \rangle = \frac{1}{T} \int_{[T]} v_L(t) \cdot dt$. En déduire l'expression de α' en fonction de α , U, et de E.
- h)** Calculer le courant maximum dans l'inductance I_{\max} en fonction de L, F, U, et E.
- i)** On sait que $\langle i_L \rangle = I_{M0}$. Calculer $\langle i_L \rangle$ en fonction $I_{L,\max}$, α et α' .
- j)** Calculer la valeur de la fem E' vérifiant le point de fonctionnement à vide I_{M0} et $\alpha = 0,83$.

TD 4 - Le hacheur élévateur de type BOOST

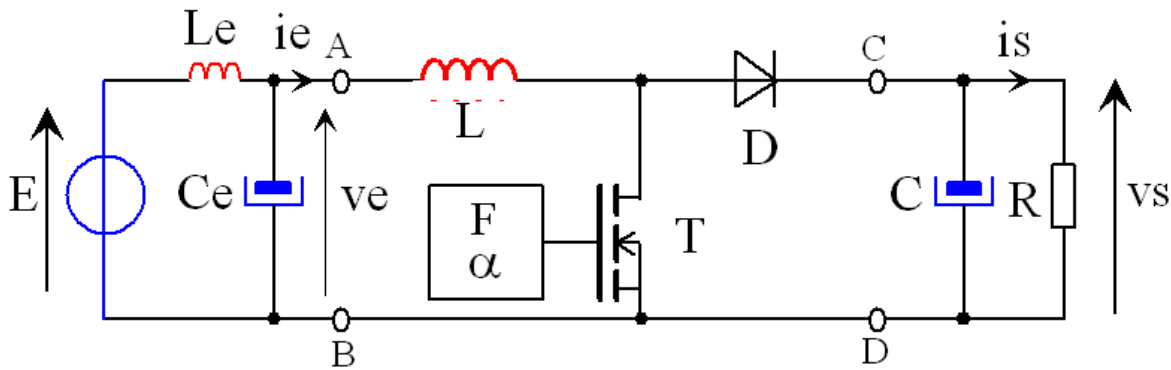


Fig. 4.1. Structure générale du hacheur élévateur (dessins\boost4.drw).

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

4.1 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 (charge 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 :
 $v_L(t)$ & $i_L(t)$ $v_T(t)$ & $i_T(t)$ $v_D(t)$ & $i_D(t)$.

4.2 Expression de la tension de sortie Vs (4 points)

- 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 α et de E , en régime permanent.
- d) Tracer la variation de V_s en fonction de α .

4.3 Ondulation du courant pour $V_s = \text{Cste}$ (2 points)

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

4.4 Etude en régime discontinu (8 points)

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

- 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 $t \in [\beta T ; T]$.
- 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 $i_L(0) = 0$.
- A partir de la tension aux bornes de l'inductance, trouver une relation en α et α' .
- Calculer la valeur maximale du courant dans l'inductance L en fonction de α , L, T et E.
- En déduire l'expression de la valeur moyenne du courant de sortie I_s .
- Donner l'expression de V_s en fonction de I_s , L, F, E et α
- Tracer l'ensemble de la caractéristique $V_s = f(I_s)$ en utilisant les grandeurs réduites.

4.5 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 $V_s = \langle v_s \rangle$.

- 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 .
- 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.
- Retrouver alors la nouvelle expression de la tension de sortie donnée par :

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

- 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.

4.6 Facteur de dimensionnement Fd en conduction continue (3 points)

- 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.
- En déduire la valeur du courant maximum $I_{T\max}$ et donner la valeur de $V_{T\max}$.
- 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 α , le facteur de dimensionnement est-il minimum ?

4.7 Ondulation de la tension de sortie (3 points)

- Tracer l'évolution du courant dans le condensateur de sortie avec $i_L(t)$ définit au paragraphe §4.1.
- 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 $I_{C\text{eff}}$.

TD 5 - Le hacheur inverseur de type BUCK-BOOST

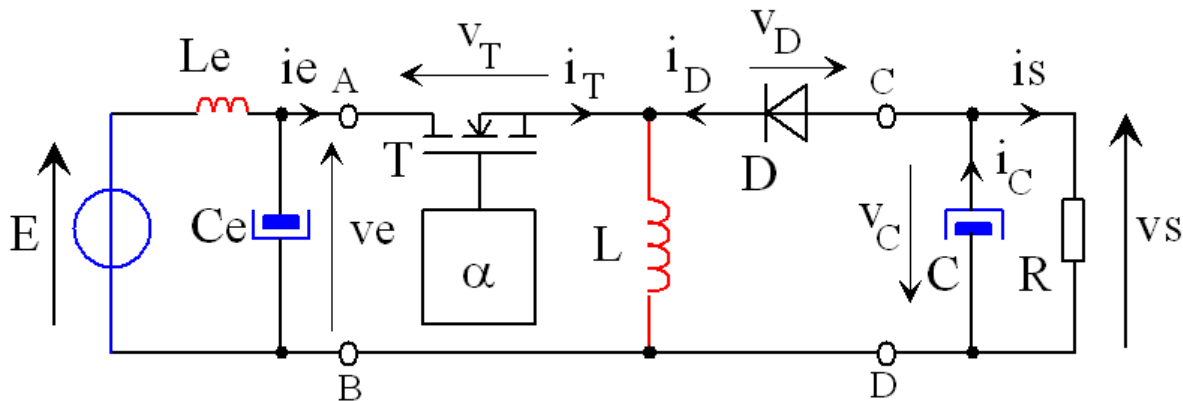


Fig. 5.1. Hacheur inverseur à stockage inductif (dessins\hinver0.drw).

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

5.1 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 (charge 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 $(v_s ; i_s)$.

5.2 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 α et de E .
- d) Tracer la variation de V_s en fonction de α .

5.3 Ondulation du courant en régime permanent (3 points)

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

5.4 Facteur de dimensionnement Fd

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

5.5 Ondulation de la tension de sortie

- a) Tracer l'évolution du courant dans le condensateur de sortie avec $i_L(t)$ défini au paragraphe §5.2.
- 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_{Ceff} .

5.6 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 5.2 donne le câblage du circuit. La fréquence de découpage vaut $F = 200\text{ kHz}$. Le courant maximum vaut 100 mA sur chaque sortie +VO et -VO.

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

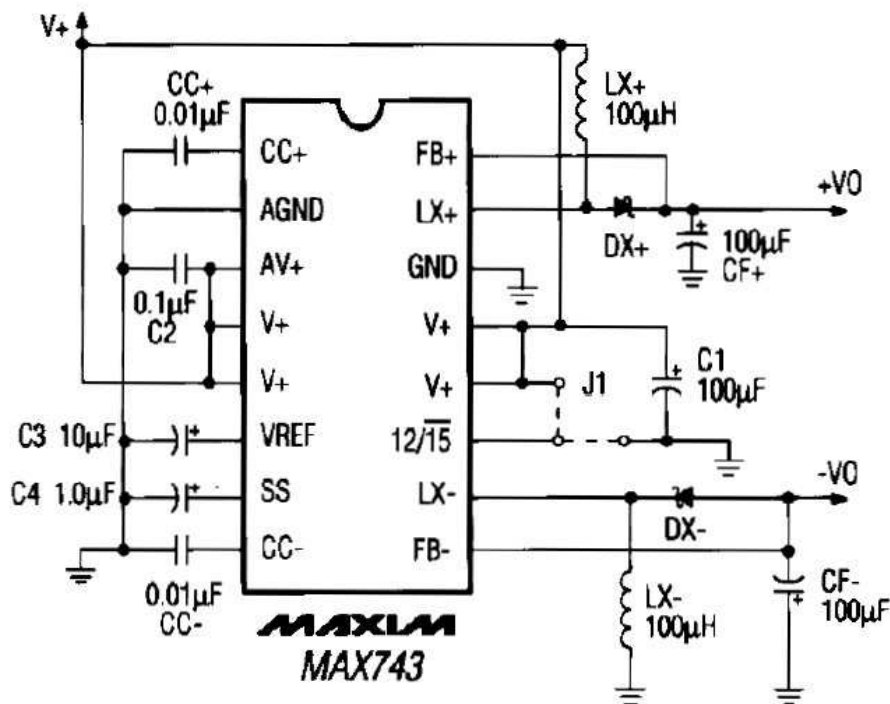


Fig. 5.2. Convertisseur DC-DC MAX743 (images\max743.jpg).

TD 6 - Harmoniques de tension du hacheur série

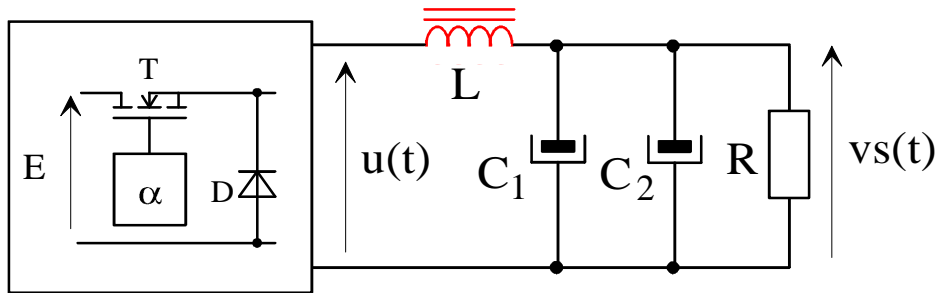


Fig. 6.1. Montage d'étude des harmoniques de $u(t)$ (dessins\hacheur0.drw).

La tension $u(t)$ vaut $+E$ pour $t \in [0 ; \alpha T]$ et $u(t)$ vaut 0 pour $t \in [\alpha T ; T]$.

6.1 Calcul 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 ϕ_0 .

6.2 Etude du filtre – Tableau 6.1 §6.4 (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 5A 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, $G(\omega) = 20 \cdot \text{LOG}_{10}(|H(j\omega)|)$.

6.3 Ondulation de la tension de sortie – Tableau 6.2 §6.4 (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 ΔV_{s1} .
- La formule approchée de l'ondulation vaut $\Delta V_s = \frac{E}{8LCF^2} \alpha(1-\alpha)$. Comparer avec le résultat précédent.

6.4 Tableaux réponses

NOM	Prénom :
-----	----------

Tableau 6.1. Etude du filtre.

I_{charge} , en A	0,1	2,5	5
R (en Ω)			
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 6.2. 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 7 - Hacheur réversible en tension

On considère le circuit de la figure 7.1, dans lequel E désigne la fém d'une source assimilable à un générateur de Thévenin parfait et où la charge est modélisée par une résistance R en série avec une fém E' et une inductance L.

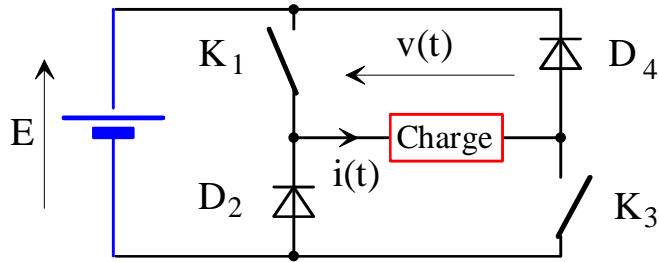


Fig. 7.1. Hacheur réversible en tension (dessins\cv_inter4.drw).

Les composants notés K₁ et K₃ sont des interrupteurs supposés commandés à l'ouverture et à la fermeture (interrupteur parfait) avec une période T et un rapport cyclique α₁ et α₃.

Les diodes D₂ et D₄ sont supposées parfaites.

7.1 Mode de fonctionnement A

Dans un premier mode de fonctionnement, on suppose que α₁ = α est variable et α₂ = 1, fixé de façon permanente. Le courant dans la charge est noté i(t) et la conduction est continue.

En régime permanent, le courant évolue entre deux limites I et I'. Ainsi, de 0 à αT, K₁ est fermé, et de αT à T, K₁ est ouvert. Dans ces conditions i(0) = I et i(αT) = I'.

- a) Quel est le type de structure ainsi réalisé ? Donner l'expression simplifiée de l'ondulation du courant.
- b) Déterminer, dans le cas général, les expressions de I et de I'. On posera $I_1 = I + \frac{E'}{R}$ et

$$I_2 = I' + \frac{E'}{R}.$$

- c) Retrouver la relation $\Delta I = I' - I = \frac{E}{R} \cdot \frac{\left(1 - e^{-\frac{\alpha T}{\tau}}\right)}{\left(1 - e^{-\frac{T}{\tau}}\right)} \cdot \left(1 - e^{-\frac{(1-\alpha)T}{\tau}}\right)$ avec $\tau = \frac{L}{R}$

On se place dans le cas suivant : E = 200V ; R = 2Ω ; L = 48 mH ; E' = 140V. Le rapport cyclique α est pris égal à 0,75.

- d) Calculer I et I' et ΔI, pour les différents cas de fréquences suivants : F₁ = 100Hz ; F₂ = 2kHz ; F₃ = 20 kHz.
- e) Comparer chaque valeur de ΔI avec la relation classique du a).
- f) Quelle est la valeur moyenne du courant ? Comment évolue-t-elle avec la fréquence ? Comparer, pour les valeurs de fréquences précédentes, la valeur moyenne avec la quantité $\frac{I+I'}{2}$.

7.2 Mode de fonctionnement B

On se place à présent dans le cas où l'on fait fonctionner simultanément les interrupteurs K₁ et K₃. Le courant est toujours supposé continu, en régime permanent. Le rapport cyclique est le même pour les

deux interrupteurs $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha$. Ainsi, de 0 à αT , K_1 et K_3 sont fermés, et de αT à T , K_1 et K_3 sont ouverts. Dans ces conditions $i(0) = I$ et $i(\alpha T) = I'$.

- a) Exprimer le courant $i(t)$ au cours des deux phases de fonctionnement.
- b) Exprimer les valeurs moyennes de $i(t)$ et de $v(t)$ en fonction des divers paramètres du montage.
- c) Pour $\alpha = 0.75$, tracer $v(t)$, $i(t)$ et le courant $i_e(t)$ dans la source E .
- d) Quel est le type de réversibilité nécessaire pour la source ? Proposer une solution technologique pour cette valeur de rapport cyclique.
- e) Préciser sur une période l'allure de $i(t)$, $v(t)$, $i_{K1}(t)$, $i_{D2}(t)$ et $i_e(t)$ pour deux valeurs du rapport cyclique que l'on peut considérer comme typiques des différents régimes de fonctionnement envisageable. Préciser les mailles de circulation du courant dans les deux cas.
- f) Préciser la nature des interrupteurs K_1 et K_3 . Proposer une solution technologique.
- g) Si l'on fait le choix de $\alpha = 0,25$ et si l'on prend $L = 48 \text{ mH}$, $R = 2\Omega$, déterminer la fréquence à partir de laquelle la conduction risque d'être discontinue ($I = 0$) si $E' = -140V$.
- h) Même question avec $\alpha = 0,75$ et $E' = +70V$.
- i) Avec une période de 10 ms, déterminer $\langle i(t) \rangle$, $\langle v(t) \rangle$, I , I' et $\Delta I = I' - I$ pour $E = 200V$, $E' = +70V$ et un rapport cyclique $\alpha = 0,75$. On donne :

$$I = \frac{E}{R} \cdot \frac{2 \cdot e^{-\frac{(1-\alpha)T}{\tau}} - 1 - e^{-\frac{T}{\tau}}}{1 - e^{-\frac{T}{\tau}}} \quad \text{et} \quad I' = \frac{E}{R} \cdot \frac{1 - 2 \cdot e^{-\frac{\alpha T}{\tau}} + e^{-\frac{T}{\tau}}}{1 - e^{-\frac{T}{\tau}}} \quad \text{avec} \quad \tau = \frac{L}{R}$$

- j) On supposera que $T \ll \tau$ (approximation linéaire pour le courant). Déterminer une relation approchée de l'ondulation du courant ΔI , pour de faible ondulation, en fonction de E , L , F et α . Calculer alors la valeur approchée de l'ondulation pour les valeurs de la question i).

TD 8 - Hacheur réversible en courant

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

Le convertisseur de la figure 8.1 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).

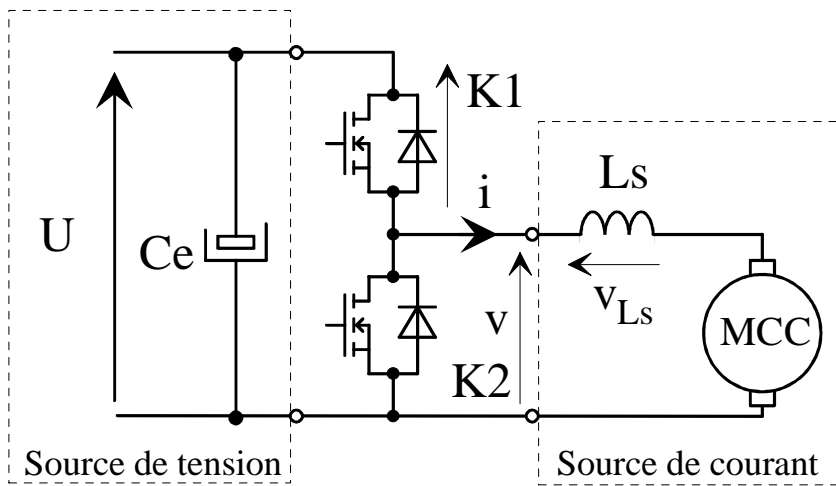


Fig. 8.1. Hacheur réversible en courant « 2 QUADRANTS » (dessins\hacheur6.drw).

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

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 $v_{Ls}(t) = +L_s \frac{di}{dt}$.

8.1 Calcul du point de fonctionnement nominal (4 points)

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

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

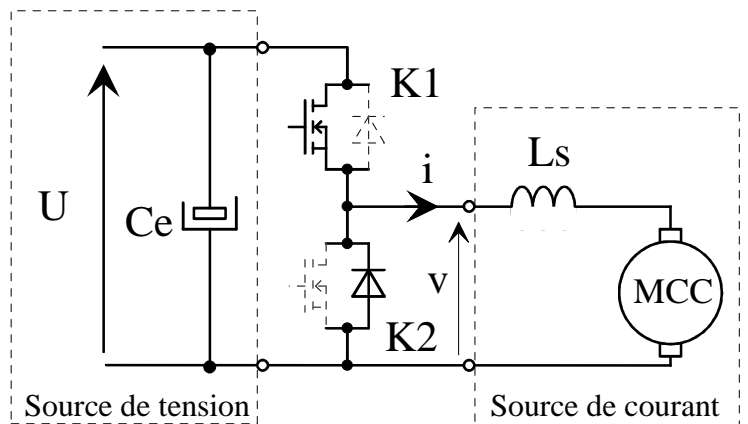


Fig. 8.2 Fonctionnement en hacheur de type BUCK (dessins\hacheur6.drw).

8.2.1 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.

- g) Simplifier le schéma de la figure 8.2, en tenant compte des hypothèses ci-dessus.
- h) Expliquer qualitativement le fonctionnement du montage (charge de l'inductance, ...).
- i) Donner les expressions de $\frac{di}{dt}(t)$ pour $t \in [0 ; \alpha T]$ et pour $t \in [\alpha T ; T]$.
- j) Donner les expressions de $i(t)$ pour $t \in [0 ; \alpha T]$ et pour $t \in [\alpha T ; T]$.

8.2.2 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 $R_{induit} = 40 m\Omega$.

- d) 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.

8.2.3 Evolution de l'ondulation du courant de sortie du hacheur (2 points)

- a) Pour quelle valeur de α l'ondulation ΔI est maximale ?
 b) Que vaut ΔI_{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 ΔI , l'ondulation du courant de sortie.

8.2.4 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 $\alpha_1 = 10\%$, $\alpha_2 = 50\%$, $\alpha_3 = 90\%$, $U = 60V$, $I = +50A$, $\Delta I = 10A$.

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

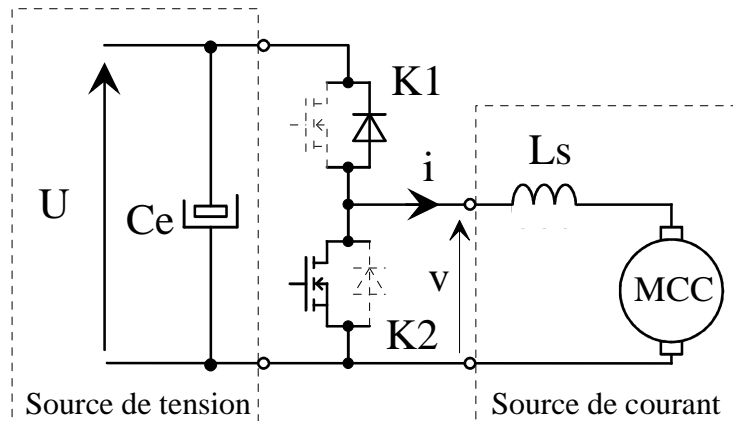


Fig. 8.3 Fonctionnement en hacheur de type BUCK
 (dessins\hacheur6.drw).

8.3.1 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 8.3, en tenant compte des hypothèses ci-dessus.
 b) Expliquer qualitativement le fonctionnement du montage (charge 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 $t \in [\alpha T ; T]$.

8.3.2 Evolution de la tension de sortie du hacheur (1 points)

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

- 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 $N_1 = 5000 \text{ tr/min}$, $N_2 = 2500 \text{ tr/min}$ et $N_3 = 0 \text{ tr/min}$.

8.3.3 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 $\alpha_1 = 90\%$, $\alpha_2 = 50\%$, $\alpha_3 = 10\%$, $U = 60\text{V}$, $I = -50\text{A}$, $\Delta I = 10\text{A}$.

TD 9 - 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 9.1.

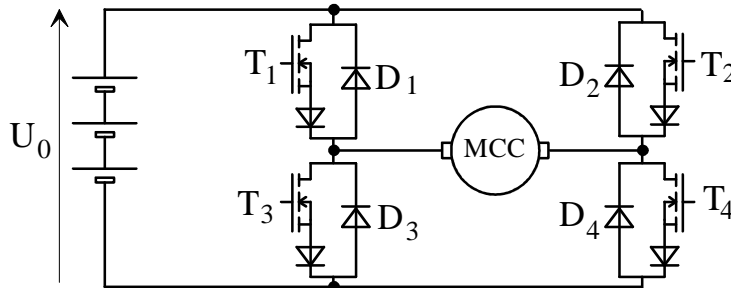


Fig. 9.1. Structure du convertisseur (dessins\h4q2.drw).

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 :

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

9.1 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 α .

9.2 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 ΔI , en fonction de U_0 , α , 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 $x\% = 5\%$.

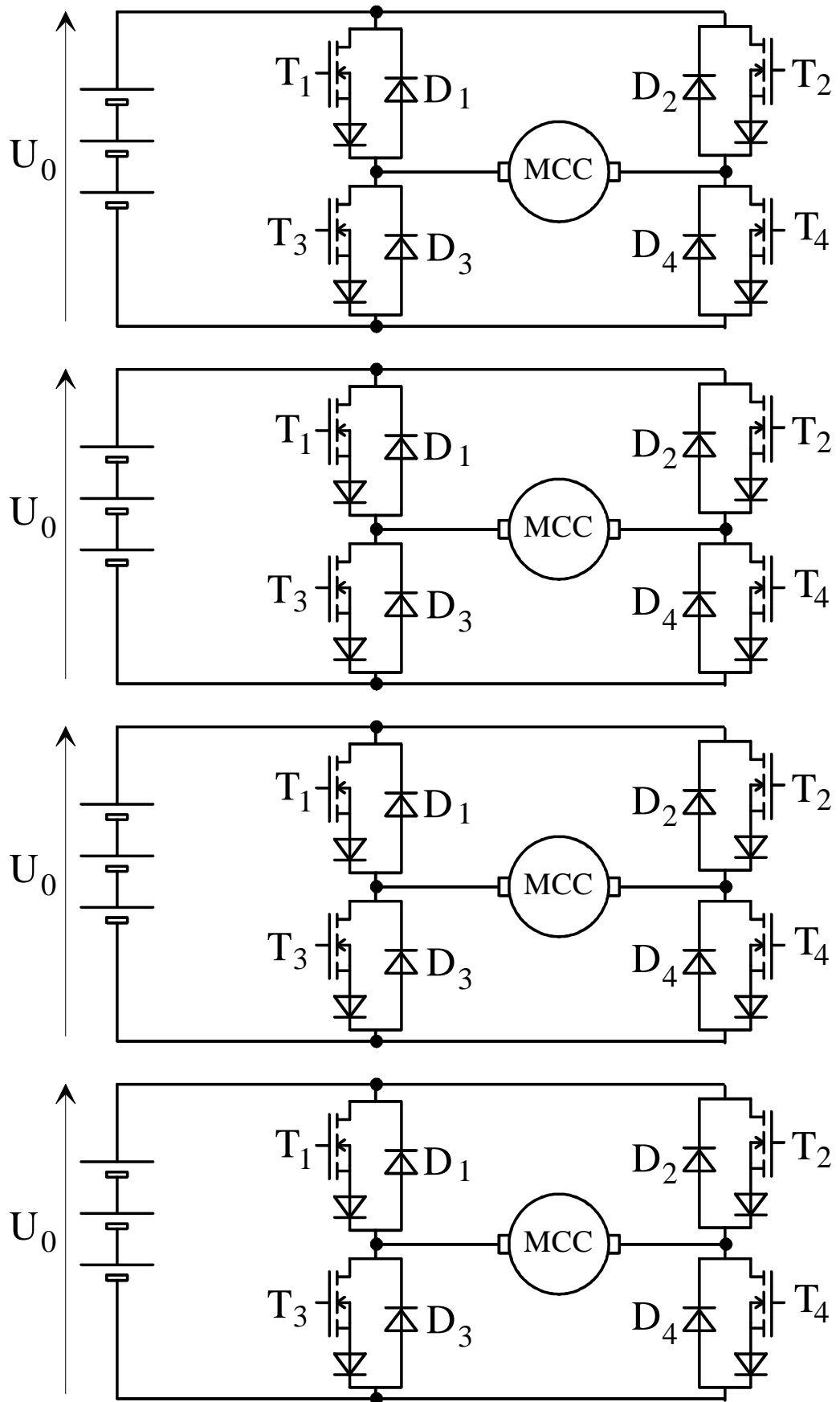
9.3 Diagramme de conduction

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.

9.4 Diagramme de conduction – Document réponse



TD 10 - 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 $m = \frac{n_2}{n_1}$.

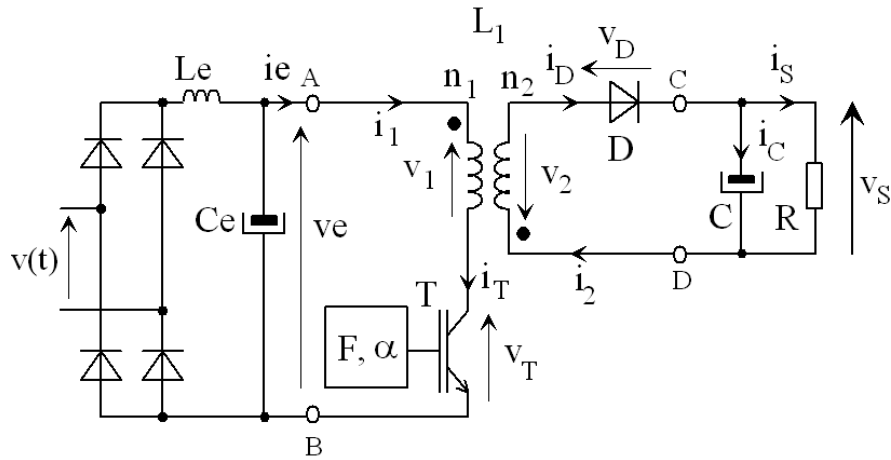


Fig. 10.1. Alimentation à découpage asymétrique de type FLYBACK
(dessins/flyback3.drw).

10.1 Calculs 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 ;
- 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) Montrer que le flux dans le circuit magnétique est proportionnel au courant dans l'inductance L_1 noté $i_{10}(t)$. Rappeler les relations du circuit magnétique.
- c) Représenter le circuit pour T ON et T OFF. Faire le bilan des grandeurs électriques : $(v_E ; i_E)$, $(v_T ; i_T)$, $(v_1 ; i_1)$, $(v_2 ; i_2)$ et $(v_D ; i_D)$.
- d) Etablir les équations de fonctionnement et les expressions de $i_{10}(t)$ pour $t \in [0 ; \alpha T]$ et $t \in [\alpha T ; T]$.
- e) En prenant le signal de commande de T en référence, tracer $v_1(t)$, $i_{10}(t)$, $v_T(t)$, $i_T(t)$, $v_D(t)$ et $i_D(t)$.

f) 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 α ; V_e et

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

g) Tracer la variation de V_s en fonction de α .

10.2 Ondulation du courant

- a) Calculer ΔI_L , l'ondulation du courant $i_{10}(t)$ de l'inductance L_1 en fonction de α , 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 la valeur du courant moyen dans le transistor, noté I_1 .
- d) Calculer alors le courant maximum dans le transistor T en fonction de I_s , α et m .
- e) Donner la valeur maximum de la tension aux bornes de l'interrupteur T et calculer son facteur de dimensionnement F_d en fonction de α , ΔI_L , m et de I_s .
- f) Tracer l'évolution de F_d pour $\Delta I_L = 0$.

10.3 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 $\Delta V_S = V_{Smax} - V_{Smin}$.

10.4 Fonctionnement en limite de conduction continu

- a) Calculer t_1 le temps de montée du courant dans le transistor en fonction de (E, L_1, I_{1M}) et t_2 le temps de descente du courant dans la diode en fonction de (m, I_{1M}, L_1, V_S) .
- b) En déduire l'expression de la fréquence de fonctionnement F en fonction de E, L_1, I_{1M} et V_S .
- c) Calculer l'énergie emmagasinée pendant t_1 . Etablir une relation en la puissance transmise à la charge R et cette énergie. Trouver une nouvelle relation liant F à (R, L_1, I_{1M}, V_S) .

d) Mettre la fréquence sous la forme :
$$F = \frac{R}{2 \cdot m^2 \cdot L_1 \left(1 + \frac{V_S}{m V_E} \right)^2}$$

10.5 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 §10.6).

On se place dans un fonctionnement FLYBACK en mode auto-oscillant (§10.4).

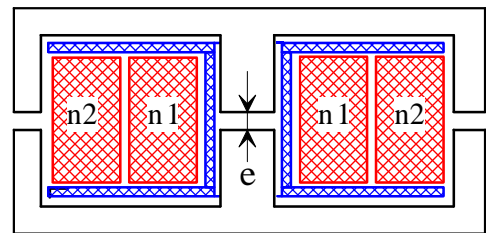


Fig. 10.2. Circuit magnétique (dessins\cm.drw).

Les caractéristiques de l'alimentation désirées sont $V_S = +24$ V et $I_S = 10$ A avec $E = +325$ V.

- 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 Φ et fonction de i_{10} 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 $F = 25$ kHz (§10.4). Calculer la valeur du courant I_{10max} .
- f) Calculer le nombre de spire du bobinage primaire n_1 pour ne pas saturer le C.M. ($\hat{B} = 200$ mT).
- g) Calculer les valeurs de I_{1eff} et I_{2eff} . En déduire les sections des fils de cuivre si $\delta = 5$ A/mm².

- h) 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.
- i) Calculer la valeur de l'entrefer "e".
- j) 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 $\frac{1}{2} L_1 I_{I_{max}}^2$.

10.6 Circuit magnétique ETD44 - Philips

Philips Components

Product specification

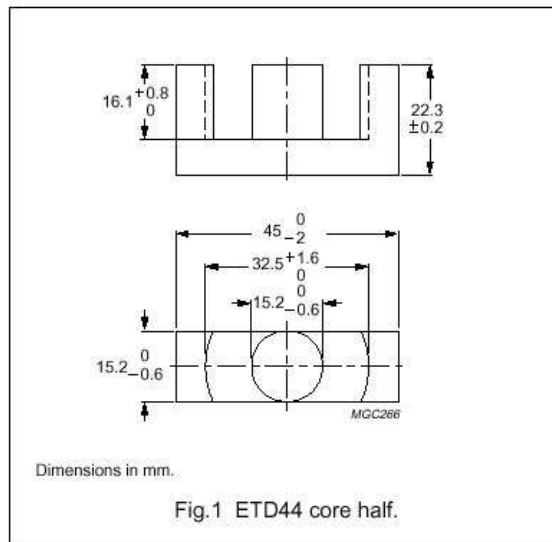
ETD cores and accessories

ETD44

CORE SETS

Effective core parameters

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



Core halves

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

GRADE	A_L (nH)	μ_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; Ḃ = 200 mT; T = 100 °C	f = 100 kHz; Ḃ = 100 mT; T = 100 °C	f = 400 kHz; Ḃ = 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. 10.3. Circuit magnétique Philips (images\etd44a & etd44b.jpg).

10.7 Bobine pour circuit magnétique ETD44 - Philips

Philips Components

Product specification

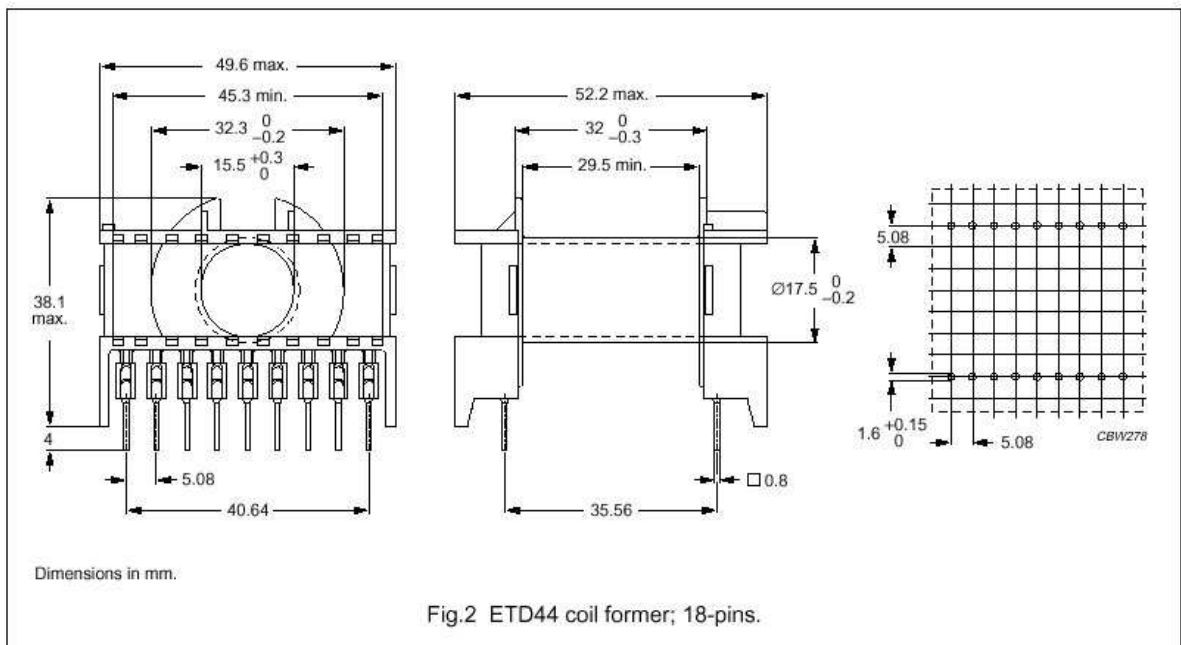
ETD cores and accessories

ETD44

COIL FORMERS

General data 18-pins ETD44 coil former

PARAMETER	SPECIFICATION
Coil former material	polybutyleneterephthalate (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 ²)	MINIMUM WINDING WIDTH (mm)	AVERAGE LENGTH OF TURN (mm)	TYPE NUMBER
1	214	29.5	77	CPH-ETD44-1S-18P

Fig. 10.4. Bobine Philips (images\etd44c & etd44d.jpg).

TD 11 - Alimentation à découpage de type FORWARD

Samedi 29 janvier 2000 – 8h/10h – Sans documents de cours – Calculatrice autorisée.

Le schéma d'une alimentation à découpage de type "FORWARD" est donnée à la figure 11.1. 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 $\alpha = 0,5$.

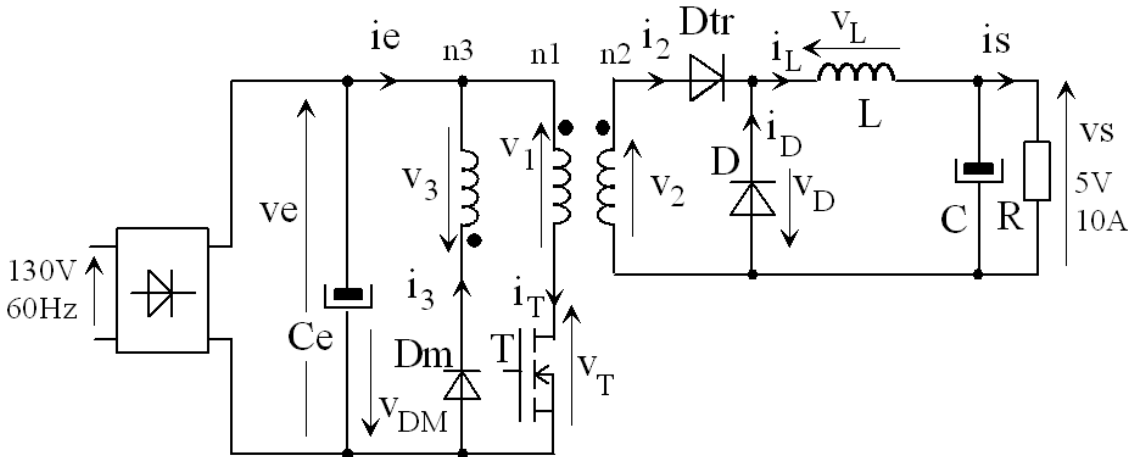


Fig. 11.1. Convertisseur AC - DC à découpage (dessins\forward1.drw).

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 :

$$+ n_1 \cdot i_T - n_2 \cdot i_2 + n_3 \cdot i_{Dm} = n_1 \cdot i_{10} \text{ avec } i_{10} \text{ le courant dans } L_1 = 12 \text{ mH.}$$

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 : $v_E = E = Cste$;
- 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 $\langle i_L \rangle = I_{Lmoy} = 10A$;
- le transistor T est parfait : il se comporte comme un interrupteur idéal.

11.1 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 Φ 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 $i_{10}(t)$.

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

- Simplifier le schéma de la figure 11.1 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.
- Établir 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 .

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

- Simplifier le schéma de la figure 11.1 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.
- Établir 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} .

11.4 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 : $v_1(t)$, $i_{10}(t)$, $i_L(t)$, $i_2(t)$, $i_T(t)$, $v_T(t)$ et $i_{Dm}(t)$ pour $t \in [0 ; T]$. Préciser les amplitudes maximales.

11.5 Calculs des grandeurs de sortie (5,5 points)

Le montage "FORWARD" se comporte comme un hacheur série (figure 11.2). 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 $V_S = +5V$.

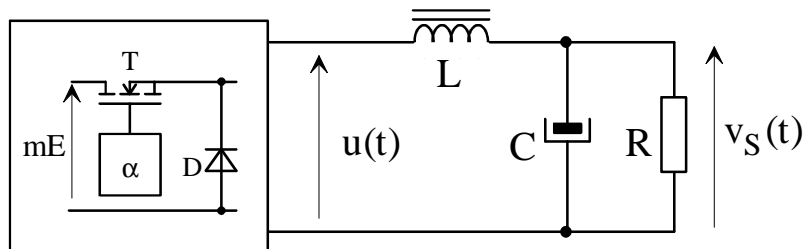


Fig. 11.2. Simplification du montage "FORWARD" (dessins\hacheur0.drw).

- Que vaut la tension $u(t)$ pour $t \in [0 ; \alpha T]$ et pour $t \in [\alpha T ; T]$?
- Établir 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 α , m et E .
- e) Exprimer ΔI_L , l'ondulation du courant dans l'inductance L , en fonction de α , 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 .

11.6 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 :

$$L_e = 103 \text{ mm}, A_e = 173 \text{ mm}^2,$$

$$A_L = 3800 \pm 25\% \text{ nH}, \mu_e = 1900,$$

$$B_{\max} = 200 \text{ mT}, W_A = 214 \text{ mm}^2.$$

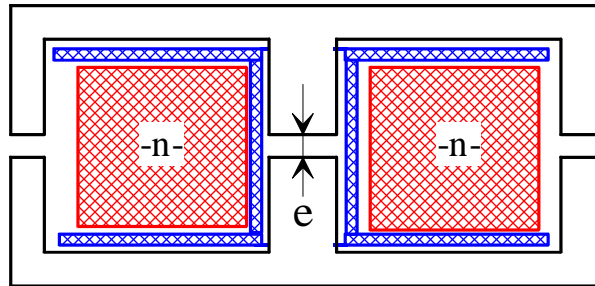


Fig. 11.3. Circuit magnétique (dessins\cm.drw).

- On cherche à calculer l'inductance de lissage du hacheur série étudié au paragraphe §11.5.
 - Les caractéristiques de l'alimentation sont $V_S = +5V$ et $I_S = +10A$, avec $m \cdot E = +10V$.
 - La fréquence de découpage vaut $F = 50 \text{ kHz}$. Le rapport cyclique est constant et vaut $\alpha = 0,5$.
- a) Etablir les équations donnant B , H et Φ dans le circuit magnétique.
- b) Etablir l'expression du flux Φ en fonction de i_L et des paramètres du circuit magnétique.
- c) Donner l'expression du coefficient d'inductance propre $L = n^2 \cdot A_L \cdot f(e, A_e, L_e, \mu_e)$. Vérifier la valeur de $A_L = \frac{\mu_0 \cdot \mu_e \cdot A_e}{L_e}$.
- d) Exprimer le flux Φ_{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 $\frac{1}{2} \cdot L \cdot I_{L\max}^2$.

