

## Calculs des convertisseurs en l'Electronique de Puissance

Calculs de convertisseurs en Electronique de Puissance - Version 1.2

Fichier Aide

Fichier de configuration

Paramètre	Min.	Typ.	Max.	Commentaire
Vs en V	5,00 V	5,00 V	5,00 V	tension de sortie
Is en A	2,00 A	2,00 A	2,00 A	courant de sortie
Ve en V	12,00 V	12,00 V	12,00 V	tension d'entrée
Rd en %	100,0 %	100,0 %	100,0 %	rendement
Fd en Hz	50,0 kHz	50,0 kHz	50,0 kHz	fréquence de découpage
dIL en %	50,0 %	50,0 %	50,0 %	ondulation du courant
dVs en %	1,0 %	1,0 %	1,0 %	ondulation de la tension de sortie
dVe en %	1,0 %	1,0 %	1,0 %	ondulation de la tension d'entrée
KV	2,0	2,0	2,0	coefficient de surtension
KI	2,0	2,0	2,0	coefficient de surcourant
Delta en A/mm²	5,0 A/mm²	5,0 A/mm²	5,0 A/mm²	densité de courant
Tamb en °C	25 °C	25 °C	25 °C	température ambiante

FORWARD ONDULEUR PFC REDRESSEUR  
 BUCK BOOST BUCKBOOST FLYBACK

Ps =                      Pe =                      Calculs Max.  
 Ie =                      Alpha =                      Calculs Typ.  
 Ce =                      Cs =                      Calculs Min.  
 L1 =                      Imprime  
 ILmoy =                      Efface  
 dIL =                      ILeff =                      scu =                      Quitter  
 ILmax =                      KIL =                      TholL =

Projet : PROGRAMMATION 2

Date : 14 avril 2002

Auteur : Thierry LEQUEU



# Sommaire

<b>Chapitre 1 - Ressources générales .....</b>	<b>6</b>
1.1 Présentation.....	6
1.2 Méthode de calculs .....	6
1.3 Cahier des charges .....	7
1.4 Caractéristiques des diodes .....	7
1.4.1 Caractéristique statique.....	7
1.4.2 Calcul du courant efficace $I_{\text{Deff}}$ .....	8
1.4.3 Caractéristiques en mode bloquée - Quadrant 3.....	8
1.4.4 Pertes en commutations - Mise en conduction rapide.....	8
1.4.5 Equivalence Français–Anglais.....	10
1.4.6 Bilan des diodes .....	10
1.5 Caractéristiques des transistors .....	11
1.5.1 Le transistor bipolaire .....	11
1.5.2 Le transistor MOSFET.....	11
1.5.3 Le transistor IGBT .....	11
1.5.4 Calcul du courant efficace $I_{\text{Teff}}$ .....	12
1.5.5 Bilan des transistors .....	13
<b>Chapitre 2 - Hacheur abaisseur de type BUCK .....</b>	<b>14</b>
2.1 Présentation du hacheur abaisseur de type BUCK .....	14
2.2 Caractéristiques du hacheur série de type BUCK.....	14
2.3 Caractéristiques des composants.....	14
2.3.1 L'inductance .....	14
2.3.2 Le transistor principal .....	14
2.3.3 La diode principale.....	15
2.3.4 Le condensateur de sortie.....	15
2.3.5 Le condensateur d'entrée.....	15
<b>Chapitre 3 - Hacheur élévateur de type BOOST .....</b>	<b>16</b>
3.1 Présentation du hacheur élévateur de type BOOST.....	16
3.1.1 Schéma simplifié.....	16
3.1.2 Bilan des grandeurs électriques.....	16
3.1.3 Calculs des grandeurs électriques .....	17
3.1.4 Ondulations du courant et de la tension .....	17
3.1.5 Contraintes sur les interrupteurs.....	17
3.1.6 Chronogrammes de fonctionnement - boost(10,2,24,100e-6,50e3,1e6,2). .....	18
3.2 Caractéristiques des composants.....	18
3.2.1 Caractéristiques de l'inductance L.....	18
3.2.2 Caractéristiques du transistor T principal.....	19
3.2.3 Caractéristiques de la diode D principale.....	19
3.2.4 Caractéristiques du condensateur Cs (sortie) .....	19
3.2.5 Caractéristiques du condensateur Ce (entrée) .....	19
<b>Chapitre 4 - Hacheur inverseur de type BUCKBOOST.....</b>	<b>21</b>
4.1 Présentation du hacheur abaisseur de type BUCK .....	21
4.2 Caractéristiques du hacheur série de type BUCK.....	21
4.3 Caractéristiques des composants.....	21
<b>Chapitre 5 - Alimentation isolée de type FLYBACK.....</b>	<b>22</b>
5.1 Présentation du hacheur abaisseur de type BUCK .....	22

5.2	Caractéristiques du hacheur série de type BUCK.....	22
5.3	Caractéristiques des composants.....	22
<b>Chapitre 6 - Alimentation isolée de type FORWARD.....</b>		<b>23</b>
6.1	Présentation du hacheur abaisseur de type BUCK .....	23
6.2	Caractéristiques du hacheur série de type BUCK.....	23
6.3	Caractéristiques des composants.....	23
<b>Chapitre 7 - Alimentation isolée de type PUSH-PULL .....</b>		<b>24</b>
7.1	Présentation du hacheur abaisseur de type BUCK .....	24
7.2	Caractéristiques du hacheur série de type BUCK.....	24
7.3	Caractéristiques des composants.....	24
<b>Chapitre 8 - Correcteur de Facteur de Puissance PFC.....</b>		<b>25</b>
8.1	Présentation du hacheur abaisseur de type BUCK .....	25
8.2	Caractéristiques du hacheur série de type BUCK.....	25
8.3	Caractéristiques des composants.....	25
<b>Chapitre 9 - Transformateur + redresseur + régulateur linéaire .....</b>		<b>26</b>
9.1	Présentation du redresseur capacitif.....	26
9.2	Caractéristiques du redresseur capacitif.....	26
9.3	Caractéristiques des composants.....	26
<b>Chapitre 10 - Bibliographie.....</b>		<b>27</b>
10.1	Sur les convertisseurs en Electronique de Puissance.....	27
10.2	Sur les redresseurs.....	27
10.3	Sur la commutation des transistors et des diodes.....	27
10.4	Sur le calcul des inductances .....	27
10.5	Sur le calcul des transformateurs .....	27
10.6	Sur le choix des condensateurs .....	27

## Liste des figures :

Fig. 1.1. Environnement du programme principal. ....	6
Fig. 1.2. Schéma équivalent en statique (dessins\diodepin.drw). ....	7
Fig. 1.3. Courant et tension de la diode (dessins\h_serie1.drw).....	8
Fig. 1.4. Surtension à la mise en conduction (dessins\diodevfp.drw).....	9
Fig. 1.5. Schéma équivalent (dessins\igbt0.drw). ....	11
Fig. 1.6. Courant et tension du transistor (dessins\h_serie1.drw). ....	12
Fig. 2.1. Schéma complet du hacheur abaisseur de type BUCK.....	14
Fig. 3.1. Schéma complet du hacheur élévateur de type BOOST.....	16
Fig. 3.2. Hacheur élévateur (dessins\boost5.drw). ....	16
Fig. 3.3. $V_s$ en fonction de $\alpha$ . (hacheurs.m).....	17
Fig. 3.4. Comparaison avec l'ondulation du courant du hacheur série (hacheurs.m).....	17
Fig. 3.5. Comparaison avec l'ondulation de tension du hacheur série (hacheurs.m). ....	17
Fig. 4.1. Schéma complet du hacheur abaisseur de type BUCK.....	21
Fig. 5.1. Schéma complet du hacheur abaisseur de type BUCK.....	22
Fig. 6.1. Schéma complet du hacheur abaisseur de type BUCK.....	23
Fig. 7.1. Schéma complet du hacheur abaisseur de type BUCK.....	24
Fig. 8.1. Schéma complet du hacheur abaisseur de type BUCK.....	25
Fig. 9.1. Schéma complet du redresseur capacitif (dessins\red_cr.drw). ....	26

## Liste des tableaux :

Tableau 1.1. Equivalence Français–Anglais. ....	10
Tableau 1.2. Bilan des diodes.....	10
Tableau 1.3. Bilan pour les transistors. ....	13

# Chapitre 1 - Ressources générales

## 1.1 Présentation

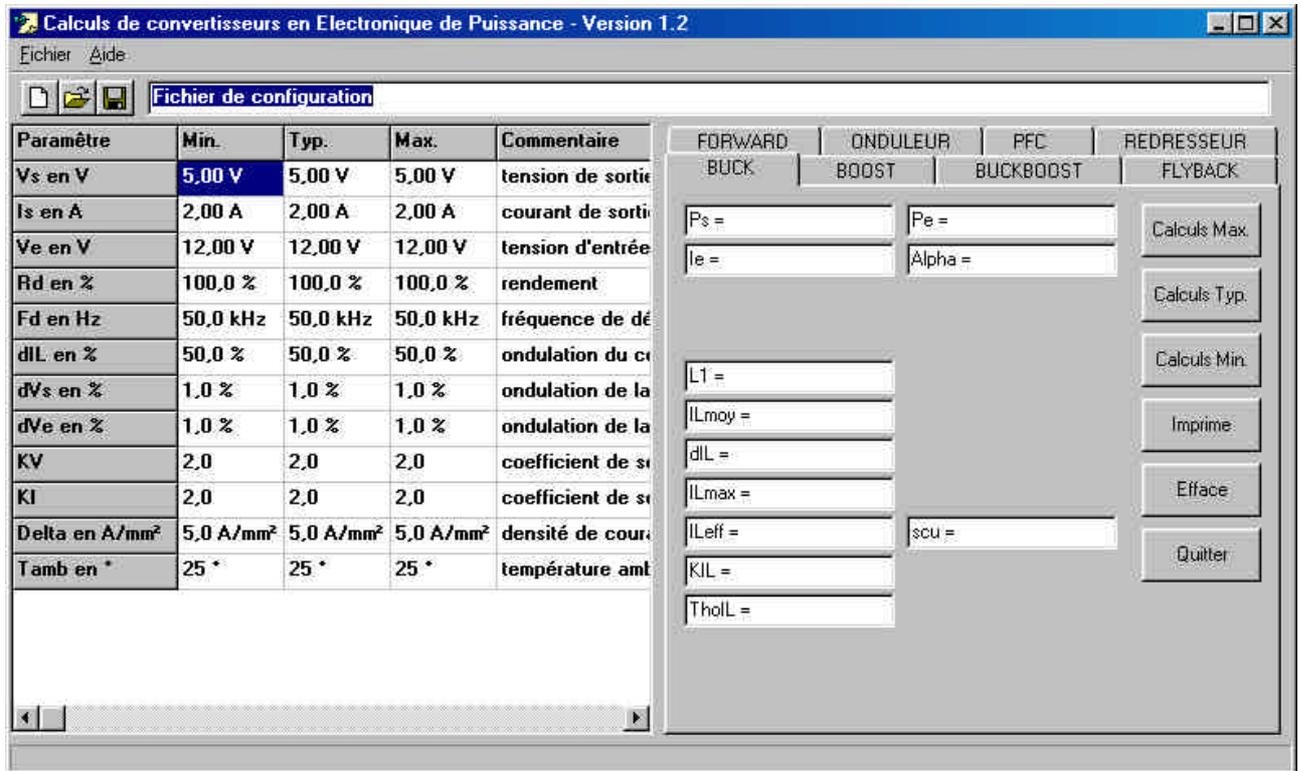


Fig. 1.1. Environnement du programme principal.

## 1.2 Méthode de calculs

L'analyse se fait par type de montage, avec dans l'ordre :

- 1) étude théorique (modèles des composants parfaits) ;
- 2) détermination des contraintes sur les composants (Diode Transistor, Condensateur, Circuit Magnétique) ;
- 3) choix des composants parmi une liste intégrés ;
- 4) Calculs des pertes, des radiateurs et du rendement ;
- 5) Re-bouclage du calcul : impact des schémas équivalents des composants sur les caractéristiques du convertisseur.

### 1.3 Cahier des charges

$V_s = 5,00$  V (tension de sortie).

$I_s = 2,00$  A (courant de sortie).

$V_e = 12,00$  V (tension d'entrée).

$R_d = 100$  % (rendement).

$F_d = 50,0$  kHz (fréquence de découpage).

$d_{IL} = 50,0$  % (ondulation du courant dans l'inductance).

$dV_s = 1,0$  % (ondulation de la tension de sortie).

$dV_e = 1,0$  % (ondulation de la tension d'entrée).

$KV = 2,0$  (coefficient de sécurité en tension).

$KI = 2,0$  (coefficient de sécurité en courant).

$D_t = 5,0$  (densité de courant Delta).

### 1.4 Caractéristiques des diodes

#### 1.4.1 Caractéristique statique

Un premier schéma équivalent, représentant la caractéristique statique est donnée à la figure 1.2.

- la tension de seuil  $V_{D0} = E_0$  paramètre de construction de la diode;
- la résistance dynamique  $r_D$  paramètre de construction de la diode;

La puissance dissipée dans la diode est donnée par :

$$P_{Dcond} = \langle v_D \cdot i_D \rangle = E_0 \cdot \langle i_D \rangle + r_D \cdot \langle i_D \rangle^2 = E_0 \cdot I_{Dmoy} + r_D \cdot I_{Deff}^2 \quad (1.1)$$

Le courant efficace  $I_{Deff}$  et le courant moyen  $I_{Dmoy}$  sont des limites de fonctionnement à calculer par l'utilisateur.

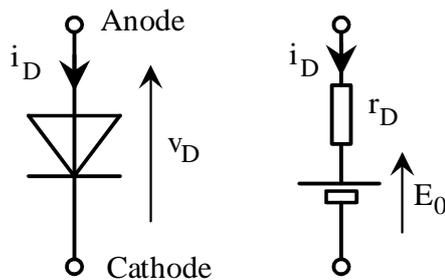


Fig. 1.2. Schéma équivalent en statique (dessins\diodepin.drw).

### 1.4.2 Calcul du courant efficace $I_{D\text{eff}}$

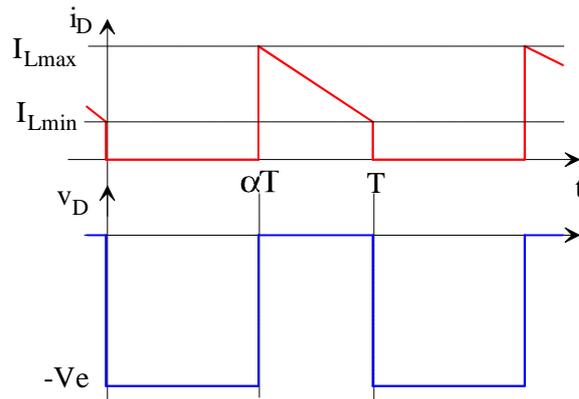


Fig. 1.3. Courant et tension de la diode (dessins\h\_serie1.drw).

L'expression de  $i_D$  pour  $t \in [\alpha T ; T]$  est :  $i_D(t) = \left( I_s + \frac{\Delta I_L}{2} \right) - \Delta I_L \cdot \frac{(t - \alpha T)}{T - \alpha T}$ . Donc  $i_D^2$  vaut :

$$i_D^2(t) = \left( I_s + \frac{\Delta I_L}{2} \right)^2 + \left( \Delta I_L \frac{(t - \alpha T)}{T - \alpha T} \right)^2 - 2 \cdot \Delta I_L \frac{(t - \alpha T)}{T - \alpha T} \cdot \left( I_s + \frac{\Delta I_L}{2} \right) \quad (1.2)$$

La valeur efficace  $I_{D\text{eff}}^2$  est égale à la valeur moyenne de  $i_D^2$ , donc :

$$I_{D\text{eff}}^2 = \frac{1}{T} \left[ \left( I_s + \frac{\Delta I_L}{2} \right)^2 (t - \alpha T) + \left( \frac{\Delta I_L}{T - \alpha T} \right)^2 \frac{(t - \alpha T)^3}{3} - \frac{2 \Delta I_L}{T - \alpha T} \left( I_s + \frac{\Delta I_L}{2} \right) \frac{(t - \alpha T)^2}{2} \right]_{\alpha T}^T$$

D'où l'expression de  $I_{D\text{eff}}$  (cf iteff.m pour [1,0.6] par exemple):

$$I_{D\text{eff}} = \sqrt{\left[ \left( I_s + \frac{\Delta I_L}{2} \right)^2 + \frac{\Delta I_L^3}{3} - \Delta I_L \left( I_s + \frac{\Delta I_L}{2} \right) \right] \cdot (1 - \alpha)} \quad (1.3)$$

Dans la cas où l'ondulation est faible  $\frac{\Delta I_L}{I_s} \ll 1$ , l'expression devient  $I_{D\text{eff}} = I_s \sqrt{1 - \alpha}$ .

Lorsque le hacheur travaille à  $I_{L\text{min}} = 0$ ,  $\Delta I_L = 2 I_s$  et  $I_{D\text{eff}} = \Delta I_L \sqrt{\frac{(1 - \alpha)}{3}} \approx \Delta I_L 0,577 \sqrt{(1 - \alpha)}$ .

### 1.4.3 Caractéristiques en mode bloquée - Quadrant 3

Les principaux paramètres de construction de la diode sont :

- la tension inverse max  $V_{\text{DIM}} = V_{\text{RRM}}$ ;
- le courant de fuite correspondant  $I_{\text{DIM}}$ ;
- la tension zener / avalanche ?

Pour la tension inverse maximale  $V_{\text{DIM}}$ , le courant de fuite  $I_{\text{DIM}}$  permet de calculer une résistance équivalente de l'interrupteur ouvert.

### 1.4.4 Pertes en commutations - Mise en conduction rapide

[LIVRE015] Fig. 4.20 - BALIGA - page 154 et [LIVRE037] Fig. B.II.4 - DALMASSO - 66 et 67.

Dans le cas où la mise en conduction se fait avec un fort  $\left(\frac{di_D}{dt}\right)$ , jusqu'à  $500A/\mu s$ , il apparaît, aux bornes de la diode PIN, une tension directe supérieure à  $V_{D0}$  qui peut atteindre plusieurs dizaines de volts. Elle est essentiellement due au comportement résistif de la zone centrale de la jonction. Sa résistivité initiale à l'état bloqué est élevée puis diminue rapidement avec l'arrivée des porteurs minoritaires injectés par le courant direct.

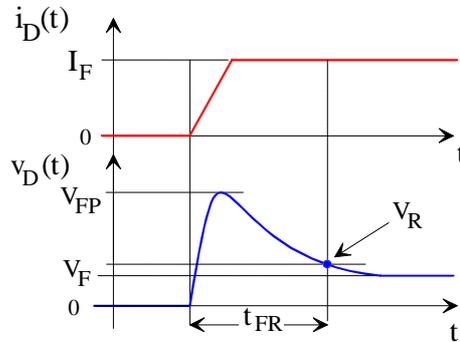


Fig. 1.4. Surtension à la mise en conduction (dessins\diodevfp.drw).

Le courant croît plus vite que la diffusion des porteurs minoritaires dans la zone N- (i) de la diode. La résistivité reste transitoirement élevée et une chute de tension directe supplémentaire apparaît.

Aux très grandes vitesses d'établissement de  $i_D(t)$ , les propriétés inductives du cristal de silicium, des connexions et du boîtier participent aussi à la surtension de fermeture :

$$v_D(t) \approx R_{\text{total}} \cdot i_D(t) + L_{\text{eq}} \cdot \frac{di_D(t)}{dt} \quad (1.4)$$

Le temps de recouvrement direct  $t_{FR}$  est la durée entre l'application du courant d'attaque et le passage de  $v_D(t)$  par une valeur de référence  $V_R = V_F$ . Cette tension de référence est soit définie par rapport à  $V_F$ , par exemple  $V_R = 1,2 \cdot V_F$ , soit fixée arbitrairement, 2 volts par exemple.

Cette surtension entraîne des pertes supplémentaires à la mise en conduction. Moyennant quelques simplifications sur les formes d'ondes, à savoir une surtension triangulaire, avec une fréquence de commutation  $F$ , ces pertes supplémentaires valent :

$$\Delta P_D = \frac{1}{2} \cdot F \cdot t_{FR} \cdot I_F \cdot (V_{FP} - V_F) \quad (1.5)$$

### 1.4.5 Equivalence Français–Anglais

Tableau 1.1. Equivalence Français–Anglais.

Symbol	Parameter	Symbole	Paramètre
$V_R$ or $V_{RSM}$	Continuous reverse voltage	$V_{Dinv}$	Tension inverse permanente
$V_{RRM}$	Repetitive peak reverse voltage	$V_{Dinv\ max}$	Tension inverse maximale
$V_{BRR}$			
$I_R$	Reverse current	$I_{Dinv}$	Courant inverse
$I_F$	Continuous forward current	$I_D$	Courant continu permanent
$I_{F(RMS)}$	RMS forward current	$I_{Deff}$	Courant direct efficace
$I_{F(AV)}$	Average forward current	$I_{Dmoy}$	Courant direct moyen
$I_{FRM}$	Repetitive peak forward current	$I_{Dmax\ rep}$	Courant de pointe répétitif
$I_{FSM}$	Surge peak forward current	$I_{Dmax\ cc}$	Courant maximal occasionnel
$V_F$	Forward voltage	$V_D$	Tension direct
$V_{FR}$	Forward recovery voltage	$V_{FP}$	Surtension à la fermeture
$P_{tot}$	Total power dissipation	$P_D$	Puissance dissipée dans la diode
$T_j$	Junction temperature	$T_j$	Température de jonction
$R_{TH\ J-A}$	Thermal resistance from junction to ambient	$R_{TH\ J-A}$	Résistance thermique jonction-ambient
$C_D$	Diode capacitance	$C_D$	Capacité de diffusion
$t_{rr}$	Reverse recovery time	$t_{rr}$	Temps de recouvrement inverse
$Q_{rr}$	Recovery charge	$Q_{rr}$	Charge de recouvrement
$C$	Turn-off over voltage coefficient	$C$	Coefficient de surtension

### 1.4.6 Bilan des diodes

Tableau 1.2. Bilan des diodes.

Chute de tension à l'état passant	$v_D = E_0 + r_D \cdot i_D$
Pertes statiques	$P_{Dcond} = E_0 \cdot I_{Dmoy} + r_D \cdot I_{Deff}^2$
Pertes dynamiques à la commutation ON	
Pertes dynamiques à la commutation OFF	

## 1.5 Caractéristiques des transistors

### 1.5.1 Le transistor bipolaire

### 1.5.2 Le transistor MOSFET

La résistance  $R_{\text{DS(on)}}$  engendre une chute de tension  $V_{\text{GS(on)}} = R_{\text{DS(on)}} \cdot I_{\text{DS}}$  et des pertes en conduction  $P_{\text{DS(on)}} = R_{\text{DS(on)}} \cdot I_{\text{DS}}^2$ .

### 1.5.3 Le transistor IGBT

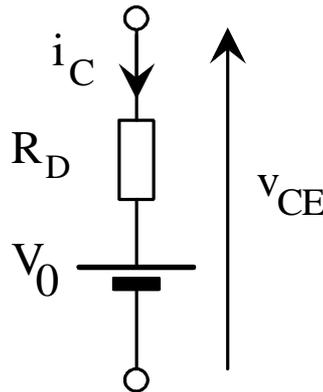


Fig. 1.5. Schéma équivalent (dessins\igbt0.drw).

Dans le fonctionnement en interrupteurs, on n'exploite à l'état passant que la partie des caractéristiques située en dessous de la tension de pincement  $V_p$  (figure **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**b).

En traits interrompus est représenté l'allure des caractéristiques d'un MOSFET de mêmes dimensions pour montrer l'effet de l'addition de la zone P+ du côté collecteur :

- $i_C$  ne s'écarte de zéro qu'au delà d'un seuil  $V_0$  de  $v_{\text{CE}}$  ;
- mais  $i_C$  augmente ensuite beaucoup plus vite : la chute de tension augmente très peu en fonction du courant ;
- à  $v_{\text{GS}}$  donné, le courant maximum est plus grand dans l'IGBT, car au courant d'électrons qui passe par les canaux s'ajoute le courant de trous.

Si l'on détaille la zone à faibles valeurs de  $v_{\text{CE}}$ , qui caractérise l'état passant du composant, on note que la jonction P<sup>+</sup>N<sup>-</sup> entraîne l'existence d'un seuil dans la chute de tension à l'état passant. On peut donc grossièrement utiliser un schéma équivalent similaire à celui d'une diode pour déterminer la chute de tension et les pertes statiques en conduction, avec une tension de seuil constante  $V_0$  et une résistance dynamique  $R_D$ .

$$\begin{cases} v_{\text{CE}} \approx V_0 + R_D \cdot i_C \\ P_{\text{ON}} \approx V_0 \cdot I_{\text{C moy}} + R_D \cdot I_{\text{C eff}}^2 \end{cases} \quad (1.6)$$

### 1.5.4 Calcul du courant efficace $I_{Teff}$

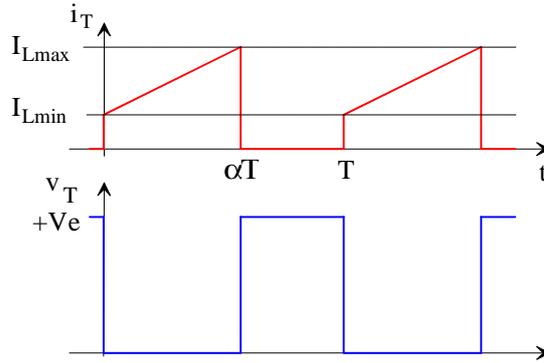


Fig. 1.6. Courant et tension du transistor (dessins\h\_serie1.drw).

L'expression de  $i_T$  pour  $t \in [0 ; \alpha T]$  est :  $i_T(t) = \left( I_s - \frac{\Delta I_L}{2} \right) + \Delta I_L \cdot \frac{t}{\alpha T}$ . Donc  $i_T^2$  vaut :

$$i_T^2(t) = \left( I_s - \frac{\Delta I_L}{2} \right)^2 + \left( \Delta I_L \frac{t}{\alpha T} \right)^2 + 2 \cdot \Delta I_L \frac{t}{\alpha T} \cdot \left( I_s - \frac{\Delta I_L}{2} \right) \quad (1.7)$$

La valeur efficace  $I_{Teff}^2$  est égale à la valeur moyenne de  $i_T^2$ , donc :

$$I_{Teff}^2 = \frac{1}{T} \int_0^{\alpha T} i_T^2(t) dt = \frac{1}{T} \left[ \left( I_s - \frac{\Delta I_L}{2} \right)^2 t + \left( \frac{\Delta I_L}{\alpha T} \right)^2 \frac{t^3}{3} + \frac{2 \Delta I_L}{\alpha T} \left( I_s - \frac{\Delta I_L}{2} \right) \frac{t^2}{2} \right]_0^{\alpha T}$$

D'où l'expression de  $I_{Teff}$  (cf iteff.m pour [1,0.6] par exemple):

$$I_{Teff} = \sqrt{\left[ \left( I_s - \frac{\Delta I_L}{2} \right)^2 + \frac{\Delta I_L^3}{3} + \Delta I_L \left( I_s - \frac{\Delta I_L}{2} \right) \right] \cdot \alpha} \quad (1.8)$$

Dans la cas où l'ondulation est faible  $\frac{\Delta I_L}{I_s} \ll 1$ , l'expression devient  $I_{Teff} = I_s \sqrt{\alpha}$ .

Lorsque le hacheur travail à  $I_{Lmin} = 0$ ,  $\Delta I_L = 2 I_s$  et  $I_{Teff} = \Delta I_L \sqrt{\frac{\alpha}{3}} \approx \Delta I_L 0,577 \sqrt{\alpha}$ .

**1.5.5 Bilan des transistors***Tableau 1.3. Bilan pour les transistors.*

Chute de tension à l'état passant	$v_{CE} = V_0 + R_D \cdot i_C$
Pertes statiques	$P_{Tcond} = V_0 \cdot I_{Tmoy} + R_D \cdot I_{Teff}^2$
Pertes dynamiques à la commutation ON	
Pertes dynamiques à la commutation OFF	

## Chapitre 2 - Hacheur abaisseur de type BUCK

### 2.1 Présentation du hacheur abaisseur de type BUCK

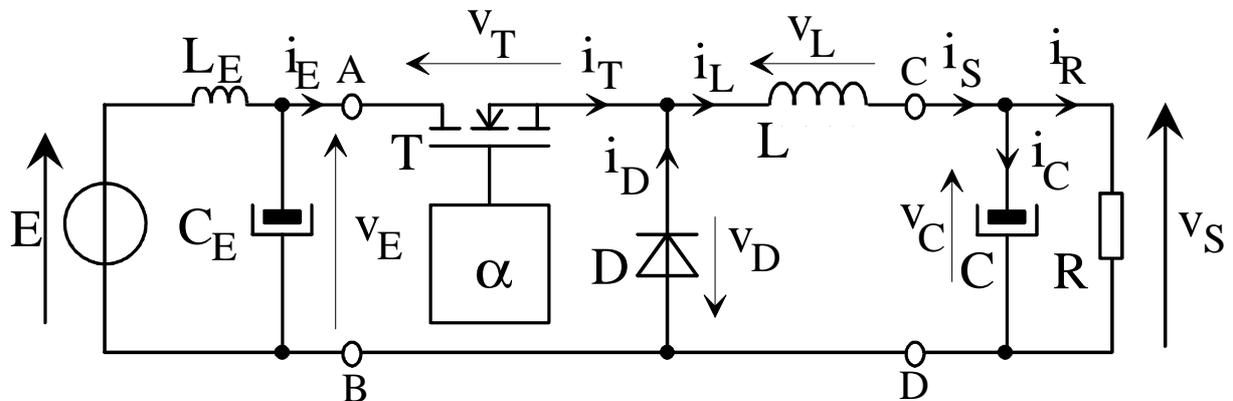


Fig. 2.1. Schéma complet du hacheur abaisseur de type BUCK.

### 2.2 Caractéristiques du hacheur série de type BUCK

$P_s = 10,0$  W (puissance de sortie).

$P_e = 10,0$  W (puissance d'entrée).

$I_e = 833,33$  m A (courant d'entrée).

$a = 42$  % (rapport cyclique).

$C_s = 50,00$   $\mu$ F (condensateur de sortie).

$C_e = 166,67$   $\mu$ F (condensateur de sortie).

### 2.3 Caractéristiques des composants

#### 2.3.1 L'inductance

$L_1 = 58,33$   $\mu$ H (valeur de l'inductance du hacheur BUCK).

$I_{Lmoy} = 2,00$  A (courant moyen dans l'inductance).

$dI_L = 1,00$  A (Ondulation du courant de l'inductance).

$I_{Lmax} = 2,50$  A (courant maximal dans l'inductance).

$I_{Leff} = 2,02$  A (courant efficace de inductance).

$K_{IL} = 1,24$  (facteur de forme du courant :  $I_{Lmax}/I_{Leff}$ ).

$Th_{oIL} = 50,0$  % (taux d'ondulation du courant :  $dI_L/I_{Lmoy}$ ).

$scu = 0,404$  mm<sup>2</sup> (section de cuivre d'un fils).

#### 2.3.2 Le transistor principal

$V_{Tmax} = 24,00$  V. (tension maximale aux bornes du transistor).

$I_{Tmax} = 2,50$  A. (courant maximal dans le transistor).

$I_{Tmoy} = 833,33$  mA. (courant moyen dans le transistor).

$I_{Teff} = 1,30$  A. (courant efficace dans le transistor).

$Fd(\text{réel}) = 6,00$  . (facteur de dimensionnement réel :  $V_{Tmax} * I_{Tmax}$ ).

$Fd(\text{thé.}) = 2,40$  . (facteur de dimensionnement théorique).

### **2.3.3 La diode principale**

$V_{RRM} = 24,00$  V. (tension inverse maximale aux bornes de la diode).

$I_{D(MAX)} = 2,50$  A. (courant maximal dans la diode).

$I_{D(AV)} = 1,17$  A. (courant moyen dans la diode).

$I_{D(RMS)} = 1,54$  A. (courant efficace dans la diode).

$Fd(\text{réel}) = 2,80$  . (facteur de dimensionnement réel :  $V_{RRM} * I_{D(AV)}$ ).

$Fd(\text{thé.}) = 1,40$  . (facteur de dimensionnement théorique).

### **2.3.4 Le condensateur de sortie**

### **2.3.5 Le condensateur d'entrée**

## Chapitre 3 - Hacheur élévateur de type BOOST

### 3.1 Présentation du hacheur élévateur de type BOOST

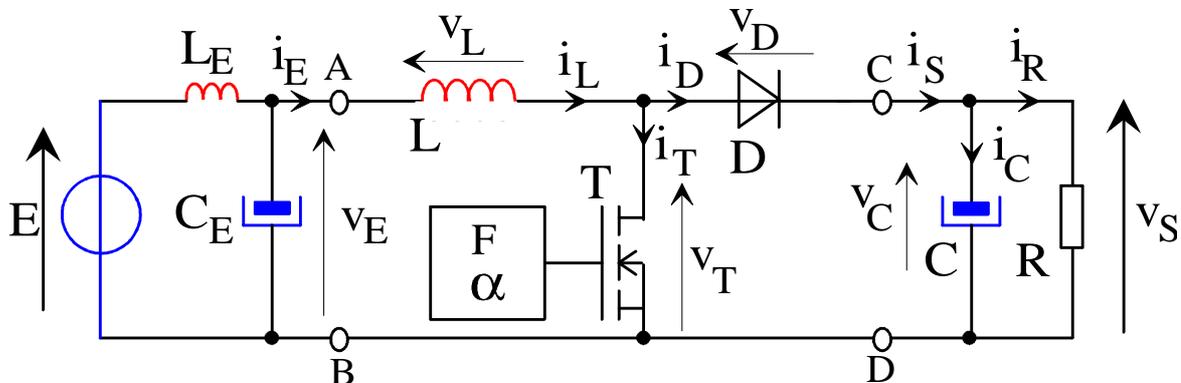


Fig. 3.1. Schéma complet du hacheur élévateur de type BOOST.

#### 3.1.1 Schéma simplifié

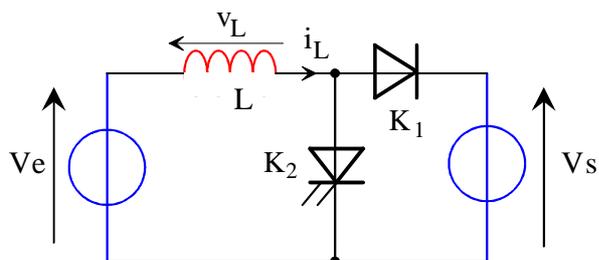
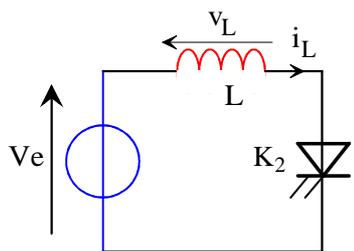


Fig. 3.2. Hacheur élévateur (dessins\boost5.drw).

#### 3.1.2 Bilan des grandeurs électriques

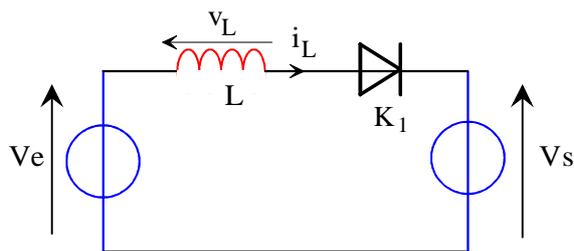
Pour  $t \in [0 ; \alpha T]$ , le transistor T est fermé (T ON).



L'inductance se charge sous  $+Ve$  ( $Ve > 0$ ).

$$\begin{cases} v_E = +Ve & \begin{cases} v_D = v_T - v_S \\ i_D = 0 \end{cases} \\ i_E = +i_L & \\ v_T \approx 0 & \begin{cases} v_S = +Vs \\ i_S = 0 \end{cases} \\ i_T = +i_L & \\ \begin{cases} v_L = v_E - v_T \\ i_L = \text{inconnu} \end{cases} & v_L = +L \frac{di_L}{dt} \end{cases}$$

Pour  $t \in [\alpha T ; T]$ , T est ouvert (T OFF).



L'inductance se décharge sous  $Ve - Vs$  ( $Vs > Ve$ ).

$$\begin{cases} v_E = +Ve & \begin{cases} v_D \approx 0 \\ i_D = +i_L \end{cases} \\ i_E = 0 & \\ v_T = v_S - v_D & \begin{cases} v_S = +Vs \\ i_S = +i_L \end{cases} \\ i_T = 0 & \\ \begin{cases} v_L = v_E - v_S - v_D \\ i_L = \text{inconnu} \end{cases} & v_L = +L \frac{di_L}{dt} \end{cases}$$

### 3.1.3 Calculs des grandeurs électriques

Pour  $t \in [0 ; \alpha T]$ ,  $i_L(t) = I_{Lmin} + \frac{V_e}{L}(t - 0)$  et pour  $t \in [\alpha T ; T]$ ,  $i_L(t) = I_{Lmax} + \frac{V_e - V_s}{L}(t - \alpha T)$ .

$$\begin{aligned} \langle v_L \rangle &= \frac{1}{T} \int_0^T v_L(t) \cdot dt \\ &= \frac{1}{T} [V_e \times \alpha T + (V_e - V_s) \times (T - \alpha T)] \\ &= \alpha V_e + V_e(1 - \alpha) - V_s(1 - \alpha) \end{aligned}$$

En régime permanent  $\langle v_L \rangle = 0$  donc :

$$V_s = V_e \frac{1}{1 - \alpha}$$

Exemple ci-contre pour  $V_e = 10V$  et  $\alpha \in [0 ; 1]$ .

Pour avoir  $V_s = +24 V$  il faut  $\alpha = 0,5833$ .

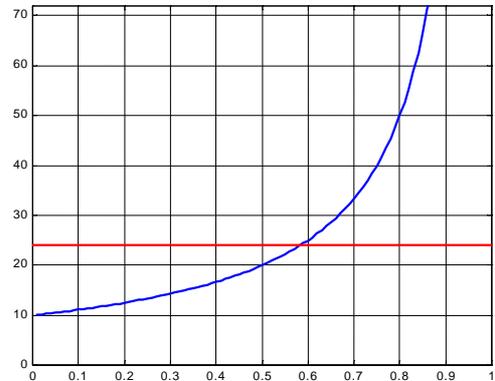


Fig. 3.3.  $V_s$  en fonction de  $\alpha$ . (hacheurs.m)

### 3.1.4 Ondulations du courant et de la tension

$$\Delta I_L = \frac{V_e}{LF} \alpha \text{ pour } L = 100 \mu H \text{ et } F = 50 \text{ kHz.}$$

$$\Delta V_C = \frac{\alpha V_e}{(1 - \alpha)RCF} \text{ pour } C = 100 \mu F \text{ et } R = 12 \Omega.$$



Fig. 3.4. Comparaison avec l'ondulation du courant du hacheur série (hacheurs.m).

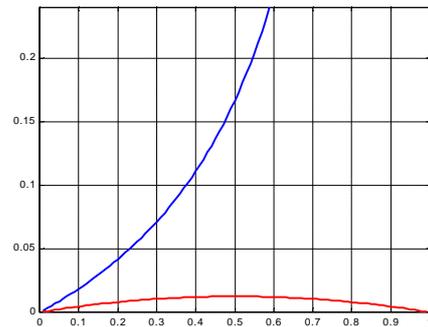


Fig. 3.5. Comparaison avec l'ondulation de tension du hacheur série (hacheurs.m).

### 3.1.5 Contraintes sur les interrupteurs

Diode :  $I_{Dmoy} = I_s$

$V_{Dinv\ max} = V_s$

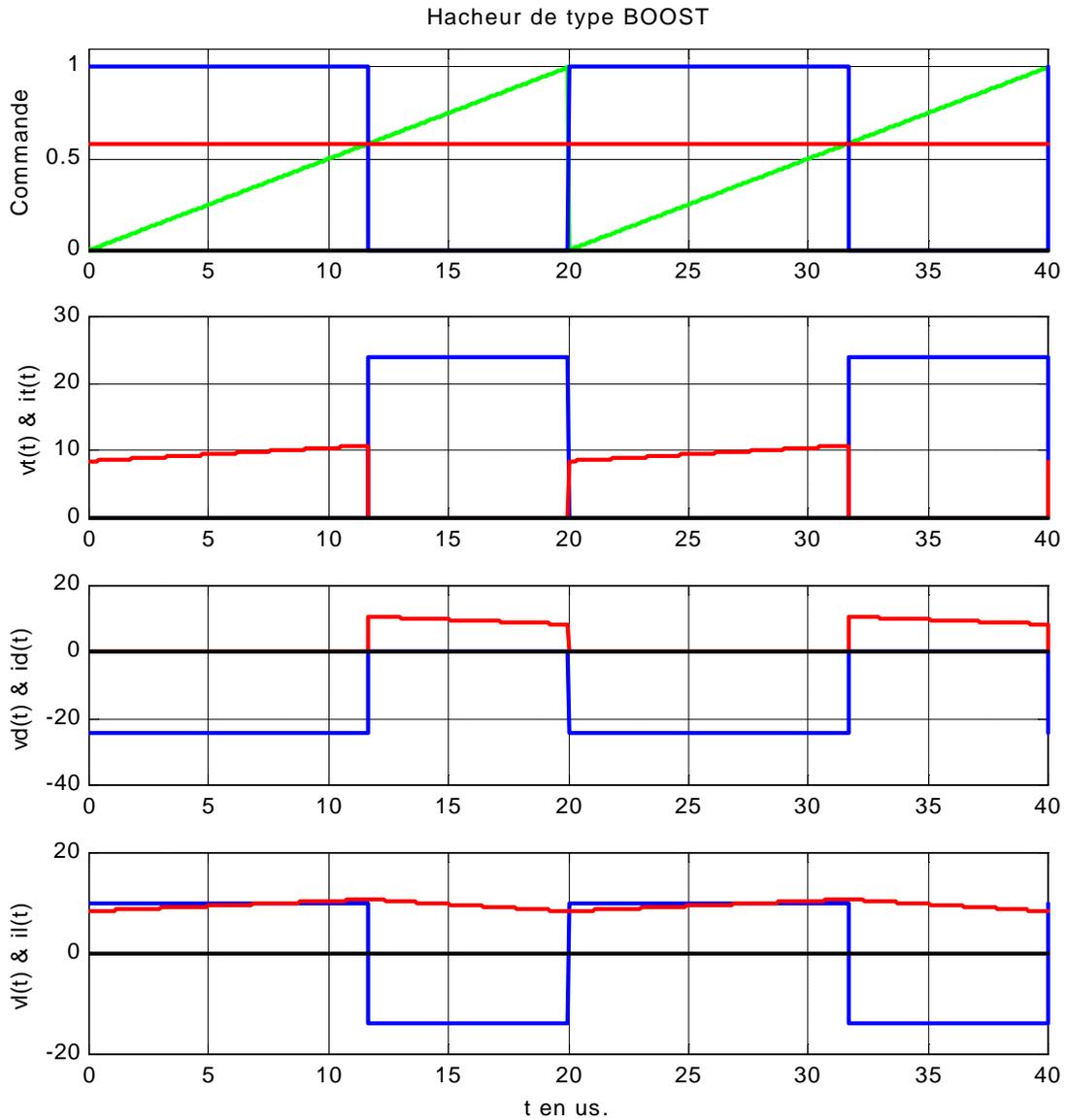
$$Fd = \frac{V_{DImax} \cdot I_{Dmoy}}{P} \approx 1$$

Transistor :  $I_{Tmax} = I_{Lmax} = \frac{I_s}{1 - \alpha} + \frac{\Delta I_L}{2}$

$V_{Tmax} = V_s$

$$Fd = \frac{V_{Tmax} \cdot I_{Tmax}}{P} \approx \frac{1}{1 - \alpha}$$

### 3.1.6 Chronogrammes de fonctionnement - boost(10,2,24,100e-6,50e3,1e6,2).



## 3.2 Caractéristiques des composants

### 3.2.1 Caractéristiques de l'inductance L

A partir de l'ondulation du courant  $\Delta I_L = \frac{V_e}{LF} \alpha = \frac{\Delta I_L}{I_{L \text{ moy}}} \times I_{e \text{ moy}}$ , et de la valeur de  $\alpha$  donnée par la relation

$V_s = V_e \frac{1}{1-\alpha} \Leftrightarrow \alpha = 1 - \frac{V_e}{V_s}$ , on calcule la valeur de l'inductance :

$$L = \frac{V_e}{\Delta I_L \cdot F} \left( 1 - \frac{V_e}{V_s} \right) \quad (3.1)$$

$L_1 = 56,12 \mu\text{H}$ . (valeur de l'inductance).

$I_{L \text{ moy}} = 33,60 \text{ A}$ . (courant moyen dans l'inductance).

$d_{IL} = 3,36$  A. (ondulation du courant dans l'inductance).  
 $I_{Lmax} = 35,28$  A. (courant maximale dans l'inductance). (3.2)  
 $I_{Leff} = 33,61$  A. (courant efficace dans l'inductance).  
 $K_{IL} = 1,05$  . (facteur de forme du courant ).  
 $Th_{oIL} = 10,0$  % . (taux d'ondulation).  
 $scu = 6,723$  mm<sup>2</sup>. (section de cuivre).  
 $W_{em} = 34,9$  mJ. (energie électromagnétique).  
 $T_{amb} = 25,0$  ° . (température ambiante).

### 3.2.2 Caractéristiques du transistor T principal

$V_{Tmax} = 112,00$  V. (tension maximale aux bornes du transistor).  
 $I_{Tmax} = 35,28$  A. (courant maximal dans le transistor).  
 $I_{Tmoy} = 26,40$  A. (courant moyen dans le transistor).  
 $I_{Teff} = 6,44$  A. (courant efficace dans le transistor).  
 $F_d(\text{réel}) = 9,80$  . (facteur de dimensionnement réel :  $V_{Tmax} * I_{Tmax}$ ).  
 $F_d(\text{thé.}) = 4,67$  . (facteur de dimensionnement théorique).

### 3.2.3 Caractéristiques de la diode D principale

$V_{RRM} = 112,00$  V. (tension inverse maximale aux bornes de la diode).  
 $I_{D(MAX)} = 35,28$  A. (courant maximal dans la diode).  
 $I_{D(AV)} = 7,20$  A. (courant moyen dans la diode).  
 $I_{D(RMS)} = 3,36$  A. (courant efficace dans la diode).  
 $F_d(\text{réel}) = 2,00$  . (facteur de dimensionnement réel :  $V_{RRM} * I_{D(AV)}$ ).  
 $F_d(\text{thé.}) = 1,00$  . (facteur de dimensionnement théorique).

### 3.2.4 Caractéristiques du condensateur Cs (sortie)

$C_{min} = 202,04$  µF. (valuer minimale du condensateur).  
 $V_{Cmax} = 24,00$  V. (tension maximale aux bornes du condensateur).  
 $V_{Cmoy} = 56,00$  V. (tension moyenne aux bornes du condensateur).  
 $dV_c = 560,00$  mV. (ondulation de tension du condensateur).  
 $I_{Ceff} = 3,36$  A. (courant efficace dans le condensateur).  
 $ESR = 0,00$  pOhms. (Equivalent Serial Resistor).  
 $F_0 = 500,00$  kHz. (Fréquence de coupure  $> 10 \times F_d$ ).

### 3.2.5 Caractéristiques du condensateur Ce (entrée)

$C_{min} = 560,00$  µF. (valuer minimale du condensateur).  
 $V_{Cmax} = 24,00$  V. (tension maximale aux bornes du condensateur).  
 $V_{Cmoy} = 12,00$  V. (tension moyenne aux bornes du condensateur).  
 $dV_c = 120,00$  mV. (ondulation de tension du condensateur).  
 $I_{Ceff} = 33,60$  A. (courant efficace dans le condensateur).

ESR = 0,00 pOhms. (Equivalent Serial Resistor).

F0 = 500,00 kHz. (Fréquence de coupure > 10 x Fd).

## Chapitre 4 - Hacheur inverseur de type BUCKBOOST

### 4.1 Présentation du hacheur abaisseur de type BUCK

*Fig. 4.1. Schéma complet du hacheur abaisseur de type BUCK.*

### 4.2 Caractéristiques du hacheur série de type BUCK

### 4.3 Caractéristiques des composants

## Chapitre 5 - Alimentation isolée de type FLYBACK

### **5.1 Présentation du hacheur abaisseur de type BUCK**

*Fig. 5.1. Schéma complet du hacheur abaisseur de type BUCK.*

### **5.2 Caractéristiques du hacheur série de type BUCK**

### **5.3 Caractéristiques des composants**

## Chapitre 6 - Alimentation isolée de type FORWARD

### **6.1 Présentation du hacheur abaisseur de type BUCK**

*Fig. 6.1. Schéma complet du hacheur abaisseur de type BUCK.*

### **6.2 Caractéristiques du hacheur série de type BUCK**

### **6.3 Caractéristiques des composants**

## Chapitre 7 - Alimentation isolée de type PUSH-PULL

### **7.1 Présentation du hacheur abaisseur de type BUCK**

*Fig. 7.1. Schéma complet du hacheur abaisseur de type BUCK.*

### **7.2 Caractéristiques du hacheur série de type BUCK**

### **7.3 Caractéristiques des composants**

## Chapitre 8 - Correcteur de Facteur de Puissance PFC

### **8.1 Présentation du hacheur abaisseur de type BUCK**

*Fig. 8.1. Schéma complet du hacheur abaisseur de type BUCK.*

### **8.2 Caractéristiques du hacheur série de type BUCK**

### **8.3 Caractéristiques des composants**

## Chapitre 9 - Transformateur + redresseur + régulateur linéaire

### 9.1 Présentation du redresseur capacitif

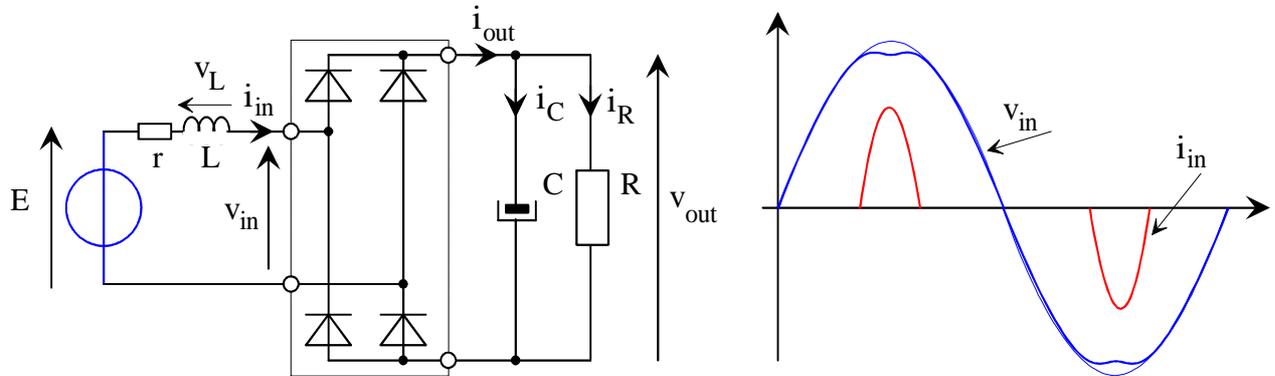


Fig. 9.1. Schéma complet du redresseur capacitif (dessins/red\_cr.drw).

### 9.2 Caractéristiques du redresseur capacitif

### 9.3 Caractéristiques des composants

## Chapitre 10 - Bibliographie

### 10.1 Sur les convertisseurs en Electronique de Puissance

- [LIVRE122] J.-P. FERRIEUX, F. FOREST, *Alimentations à découpage - Convertisseurs à résonance*, 3e édition revue et augmentée, 1999.
- [DATA032] Recherche sur les mots clés REDRESSEUR\* + DECOUPAGE\*
- [DATA193] Recherche sur les PFC, Power Factor Controller.

### 10.2 Sur les redresseurs

- [LIVRE023] C. ROMBAUT, G. SEGUIER, *Volume 2 : La conversion alternatif-alternatif*, Lavoisier TEC & DOC, 2° édition, septembre 1991, 363 pages.
- [LIVRE122] J.-P. FERRIEUX, F. FOREST, *Alimentations à découpage - Convertisseurs à résonance*, 3e édition revue et augmentée, 1999.
- [99DIV060] Recherche sur les REDRESSEURS, août 1999.

### 10.3 Sur la commutation des transistors et des diodes

- [LIVRE015] B.J. BALIGA, *Power Semiconductor devices*, 1996.
- [LIVRE037] J.-L. DALMASSO, *L'électronique de puissance - commutation*, édition DIA Technique Supérieur, 1987.

### 10.4 Sur le calcul des inductances

- [99DIV120] T. LEQUEU, *Annexe 03 - Calculs des inductances et des transformateurs*, cours d'Electronique de Puissance, mars 2002.
- [DIV143] T. LEQUEU, *Informations diverses sur les ferrites et les circuits magnétiques*, septembre 2001.
- [LIVRE122] J.-P. FERRIEUX, F. FOREST, *Alimentations à découpage - Convertisseurs à résonance*, 3e édition revue et augmentée, 1999.
- [DIV035] B. MULTON, *Composants Passifs de la conversion Statique de l'Energie Electrique*, polycopié de cours, ENS de CACHAN, 30 pages.

### 10.5 Sur le calcul des transformateurs

- [99DIV120] T. LEQUEU, *Annexe 03 - Calculs des inductances et des transformateurs*, cours d'Electronique de Puissance, mars 2002.
- [DIV143] T. LEQUEU, *Informations diverses sur les ferrites et les circuits magnétiques*, septembre 2001.
- [LIVRE122] J.-P. FERRIEUX, F. FOREST, *Alimentations à découpage - Convertisseurs à résonance*, 3e édition revue et augmentée, 1999.
- [DIV035] B. MULTON, *Composants Passifs de la conversion Statique de l'Energie Electrique*, polycopié de cours, ENS de CACHAN, 30 pages.

### 10.6 Sur le choix des condensateurs

- [DATA205] Informations diverses sur les CONDENSATEURS en l'Electronique de Puissance, mars 2002.

- [LIVRE122] J.-P. FERRIEUX, F. FOREST, *Alimentations à découpage - Convertisseurs à résonance*, 3e édition revue et augmentée, 1999.
- [DIV035] B. MULTON, *Composants Passifs de la conversion Statique de l'Energie Electrique*, polycopié de cours, ENS de CACHAN, 30 pages.