



UNIVERSITÉ FRANCOIS - RABELAIS de TOURS

---

Institut Universitaire de Technologie

Département GENIE ELECTRIQUE ET INFORMATIQUE INDUSTRIELLE

## Travaux Pratiques MC-ET2

Convertisseurs et association aux machines à  
courant continu

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





## Travaux Pratiques MC-ET2

### I.U.T. de Tours – Département GEII – 2<sup>ème</sup> année

#### Table des matières :

<b>TP 1 - Hacheur DC/DC élévateur de type BOOST .....</b>	<b>5</b>
1.1 Présentation .....	5
1.2 Schéma du convertisseur .....	6
1.3 Note sur l'influence des résistances du montage .....	6
1.4 Préparations .....	7
1.5 Manipulations .....	7
<b>TP 2 - Alimentation à découpage de type FLYBACK.....</b>	<b>9</b>
2.1 Présentation .....	9
2.2 Etude de l'alimentation FLYBACK.....	11
2.3 Etude pratique de l'alimentation FLYBACK.....	12
2.4 Caractéristiques de la maquette AD60 FLYBACK.....	12
<b>TP 3 - Alimentation à découpage de type FORWARD .....</b>	<b>14</b>
3.1 Présentation .....	14
3.2 Etude de l'alimentation FORWARD.....	16
3.3 Etude pratique.....	17
3.4 Caractéristiques de la maquette AD60 FORWARD .....	17
<b>TP 4 - Simulation avec Simcad PSIM demo version 5.0 .....</b>	<b>19</b>
4.1 Etude du hacheur inverseur de type Buck-Boost.....	19
4.2 Etude de l'alimentation FLYBACK.....	20
4.3 Caractéristiques de la maquette AD60 FLYBACK.....	20
4.4 Le logiciel Simcad PSIM demo version 5.0.....	22

## Liste des figures :

Figure 1.1. Hacheur parallèle (dessins\famille3.drw).....	5
Figure 1.2. Structure générale du hacheur parallèle (dessins\boost2.drw).....	6
Figure 1.3. Commande M.L.I. du transistor MOSFET (images\hacheur2-11.jpg).....	6
Figure 2.4. Vue d'ensemble de la maquette AD60 en configuration FLYBACK.....	9
Figure 2.5. Schéma de principe de l'alimentation FLYBACK (dessins\flyback7.drw).....	11
Figure 3.6. Vue d'ensemble de la maquette AD60 en configuration FORWARD.....	14
Figure 3.7. Schéma de principe d'une alimentation FORWARD à 3 enroulements.....	16
Figure 4.1. Hacheur inverseur DC–DC de type Buck-Boost (dessins\buckboo1.drw).....	19
Figure 4.2. Schéma de principe de l'alimentation FLYBACK (dessins\flyback7.drw).....	20
Figure 4.3. Fenêtre « Simulation Control » de Simcad PSIM demo version 5.0.....	22
Figure 4.4. Le transformateur TF_IF_1 de Simcad PSIM demo version 5.0.....	22
Figure 4.5. Schéma équivalent complet (dessins\transf04.drw).....	22

# TP 1 - Hacheur DC/DC élévateur de type BOOST

## 1.1 Présentation

### 1.1.1 Introduction

Le hacheur étudié ici fait partie de la famille des convertisseurs continu/continu (figure 1.1). Il permet de produire une tension de sortie  $U_2$  supérieure à la tension d'entrée  $U_1$ .

Ce convertisseur est utilisé dans les alimentations à découpage quand la tension de sortie est toujours supérieure à la tension d'entrée.

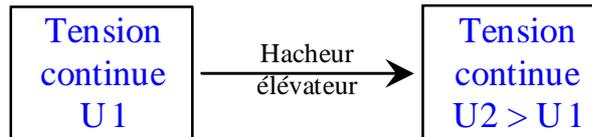


Figure 1.1. Hacheur parallèle (dessins\famille3.drw).

Il est utilisé dans les équipements portables alimentés par batterie (ordinateur, téléphone,...) pour produire des tensions continue +5V, +12V, +15V à partir des batteries 3V ou 6V. C'est aussi le convertisseur utilisé dans les P.F.C. (Power Factor Corrector), pour prélever un courant sinusoïdal sur le réseau.

C'est un convertisseur "simple", n'utilisant qu'un transistor, une diode et un inductance. La fréquence de découpage est en général comprise entre quelques dizaines de kHz (supérieure à 20 kHz, pour être inaudible par l'oreille humaine), avec des transistors bipolaires ou MOSFET, et quelques centaines de kHz, avec des transistors MOSFET. Plus la fréquence est élevée, plus la taille de l'inductance est réduite, ainsi que le condensateur de filtrage de la tension de sortie.

### 1.1.2 Objectifs du TP

- 1) Comprendre le fonctionnement en observant les signaux caractéristiques du montage et en les comparant aux résultats du TD sur le hacheur BOOST.
- 2) Etablir la fonction de transfert "statique" du convertisseur  $\langle v_s \rangle = V_s = f(V\alpha)$ .
- 3) Mesurer la résistance interne du générateur équivalent au convertisseur et son rendement.

### 1.1.3 Principe

Nous étudions ici un convertisseur DC-DC 24 V  $\rightarrow$  50 V. Dans le cas d'une alimentation normale (batterie d'accumulateur ou transformateur + redresseur), la tension d'entrée est plus ou moins variable et peut comporter une ondulation (100 Hz si redressement du réseau 50 Hz).

Dans notre application, la tension d'entrée  $V_e$  est fournie par une alimentation stabilisée de laboratoire, réglée sur 24 V et capable de fournir 4 A.

Afin de fixer la nature de la source, un filtre Le-Ce doit être placé entre l'alimentation et l'entrée du convertisseur (nous prendrons ici  $L_e = 1 \text{ mH} - 10 \text{ A}$  et  $C_e = 10000 \mu\text{F} - 40 \text{ V}$ ).

## 1.2 Schéma du convertisseur

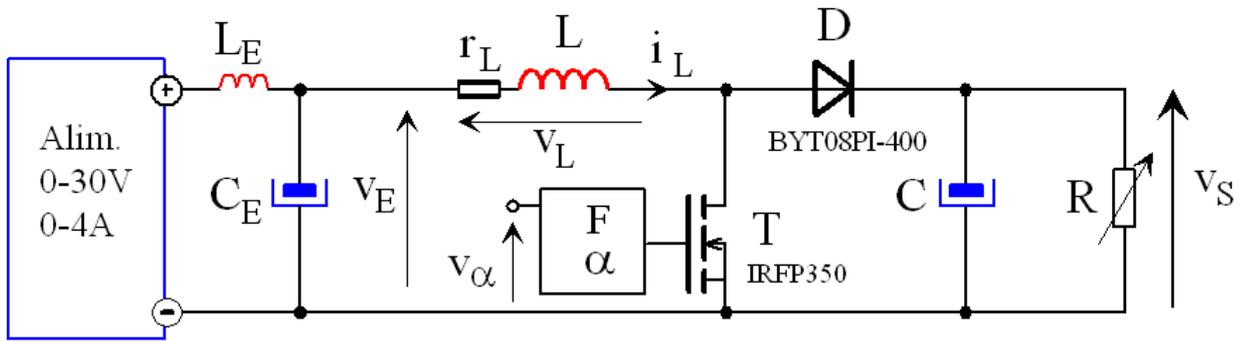


Figure 1.2. Structure générale du hacheur parallèle (dessins\boost2.drw).

Le bloc (F,  $\alpha$ ) génère le signal MLI de commande du transistor MOSFET. Le transistor T est fermé (ON) pour  $t \in [0 ; \alpha T]$  et ouvert (OFF) pour  $t \in [\alpha T ; T]$ .

La fréquence de découpage est réglable par un potentiomètre sur la maquette. Le rapport cyclique  $\alpha$  peut être modifié par un potentiomètre ou par une tension externe  $V_\alpha$ .

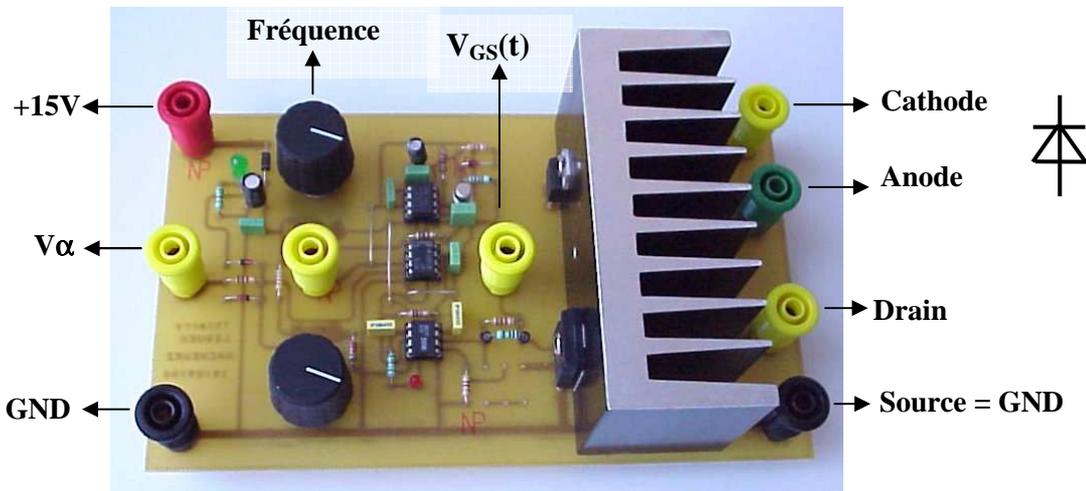


Figure 1.3. Commande M.L.I. du transistor MOSFET (images\hacheur2-11.jpg).

## 1.3 Note sur l'influence des résistances du montage

[LIVRE122], FERRIEUX - FOREST, chapitre II, §1.6, page 45.

De façon théorique, la tension de sortie est donnée par :

$$\langle v_s \rangle = V_s = +V_e \cdot \frac{1}{1-\alpha} = h_1(\alpha) \tag{1.1}$$

On cherche l'influence de la résistance de l'inductance L, notée  $R_L$ , sur la valeur moyenne de la tension de sortie. On notera R la valeur de la résistance de charge  $R = R_{charge} = R_1 // R_0$ .

En valeur moyenne, la tension d'entrée  $V_e$  est diminuée de la quantité  $R_L \cdot I_e$ , avec  $I_e$  le courant moyen d'entrée. Le courant moyen dans l'inductance vaut :

$$\langle i_L \rangle = I_L = I_e \approx \frac{I_s}{1-\alpha} \text{ avec } I_s = \frac{V_s}{R} \tag{1.2}$$

La loi des mailles en entrée,  $v_e(t) = R_L \cdot i_e(t) + v_L(t) + v_T(t)$ , donne en valeur moyenne :

$$V_e = R_L \cdot I_e + V_T, \text{ avec } \langle v_T \rangle = V_T = (1 - \alpha) \cdot V_s \quad (1.3)$$

On obtient alors  $V_e = \frac{R_L}{R \cdot (1 - \alpha)} V_s + (1 - \alpha) \cdot V_s$ , soit :

$$V_s = V_e \cdot \frac{1}{(1 - \alpha) \cdot \left[ 1 + \frac{R_L}{R} \cdot \frac{1}{(1 - \alpha)^2} \right]} = h_2(\alpha) \quad (1.4)$$

Cette fonction n'est pas continûment croissante, mais atteint son maximum pour  $\alpha_{\max} = 1 - \sqrt{\frac{R_L}{R}}$ ,

$$\text{maximum qui vaut } y_{\max} = \left[ \frac{V_s}{V_e} \right]_{\max} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{R}{R_L}}.$$

Le gain en tension retombe alors rapidement à zéro, ce qui montre l'impossibilité d'obtenir des rapports d'élévation quelconques.

## 1.4 Préparations

- Q1)** Tracer, pour  $\alpha = 0,6$  :  $(v_T ; i_T)$ ,  $(v_L ; i_L)$  et  $(v_D ; i_D)$  sur un même graphique, en correspondance, en prenant la commande du transistor comme référence de temps.
- Q2)** Donner l'expression de  $\langle v_s \rangle = V_s$  en fonction de  $\alpha$ . Tracer sur une feuille millimétrée  $V_s = h_1(\alpha)$  théorique. On prendra comme échelle pour  $\alpha$ ,  $1 \rightarrow 20\text{cm}$ , et pour  $V_s$ ,  $90\text{V} \rightarrow 18\text{cm}$ .
- Q3)** Tracer sur ce graphe  $V_s = h_2(\alpha)$  si l'on tient compte de  $R_L = 1,65 \Omega$  et  $R = 50 \Omega$ .
- Q4)** Donner l'expression de l'ondulation du courant dans l'inductance  $\Delta I_L$ .
- Q5)** Exprimer L en fonction des paramètres de la maquette.
- Q6)** Donner l'expression de l'ondulation de la tension de sortie  $\Delta V_s$ .

## 1.5 Manipulations

### 1.5.1 Mise en œuvre de la maquette

Le principal danger de cet TP réside dans le fait que la tension de sortie peut **ETRE TRÈS ELEVÉE** (en théorie infinie !) lorsque  $\alpha$  tends vers 1.

 : Il est rappelé qu'une tension supérieure à 24 V est dangereuse pour l'être humain.

Différentes précautions sont à prendre pour travailler en toute sécurité :

- Régler la capacité de sortie à la valeur  $C_s = 330 \mu\text{F} - 63 \text{V}$ .
- Placer un voltmètre MX579 pour mesurer la tension de sortie, qui ne devra pas dépasser la tension maximale de la capacité de sortie.
- Placer un ampèremètre MX579 pour mesurer le courant de sortie.
- Régler le courant de court-circuit de l'alimentation à  $I_{e_{\max}} = 4 \text{A}$ .
- La résistance de charge sera constituée par une résistance fixe  $R_0 = 325 \Omega - 1,9 \text{A}$  en parallèle avec une résistance variable  $R_1 = 325 \Omega$ .

- La puissance maximale délivrée par la source est  $P_{\max} = 24 \text{ V} \times 4 \text{ A} = 96 \text{ W}$ . Si cette puissance est transmise intégralement à  $R_0$  seule, la tension de sortie sera  $V_{S_{\max}} = \sqrt{P_{\max} \times R_0} \approx 176 \text{ V}$  !
- Câbler le montage et régler l'alimentation sur  $V_e = 0 \text{ V}$ . **Faites vérifier votre câblage.**

### 1.5.2 Etude du circuit de commande

Nous faisons ici quelques relevés caractéristiques du fonctionnement de la commande.

- Q7) Alimenter en +15V la carte de commande MLI du transistor. Visualiser la tension de grille du transistor MOSFET. Mesurer la tension correspondant au palier  $V_{GS_{TH}}$ .
- Q8) Mesurer la plage de variation de la fréquence.
- Q9) Relever la variation du rapport cyclique en fonction de la tension de commande  $V\alpha$ .
- Q10) Avec un relevé de la tension de commande  $V_{GS}$  du transistor, déduire une valeur approchée de la capacité de grille. Comparer avec la valeur  $C_{ISS}$  du transistor donnée par le constructeur.

### 1.5.3 Etude du hacheur parallèle avec une charge fixe

La fréquence de découpage sera réglée à  $F = 20 \text{ kHz}$ . Le rapport cyclique est réglé à  $\alpha = 0,60$  pour une tension d'entrée  $V_e = +24 \text{ V}$ . Ajuster  $R_1$  pour avoir  $R = R_1/R_0 = 50 \Omega$ , avec  $R_0 = 325 \Omega$ .

- Q11) Pour  $\alpha = 0,60$ , relever en correspondance, les chronogrammes de fonctionnement :
  - $v_L(t)$  et  $i_L(t)$  ;
  - $v_D(t)$  et  $i_D(t)$  (mesurer les contraintes maximales en tension et en courant) ;
  - $v_T(t)$  et  $i_T(t)$  (mesurer les contraintes maximales en tension et en courant).
- Q12) En déduire une valeur approchée de l'inductance  $L$ .
- Q13) Tracer la caractéristique statique  $V_s = f(\alpha)$  sur même feuille que la courbe théorique. Mesurer précisément le point de fonctionnement avant la saturation en courant de l'alimentation  $I_{e_{\max}} = 4 \text{ A}$ .
- Q14) En déduire la valeur de  $\alpha_0$  pour avoir 50 V en sortie.

### 1.5.4 Etude avec une charge variable

- Q15) Pour cette valeur  $\alpha_0$ , que l'on maintiendra constante, tracer la caractéristique  $V_s = f(I_s)$ , pour  $R_1$  variant de l'infini ( $R = R_0$ ) à  $R_1$  correspondant à la saturation en courant de l'alimentation. **Mesurer  $V_e$ ,  $I_e$**  pour chaque point de la caractéristique.
- Q16) Tracer l'évolution des pertes dans le hacheur et son rendement en fonction de  $I_s$ .
- Q17) D'où proviennent les pertes dans le montage ?

### 1.5.5 Etude du filtre de sortie

La capacité est modifiée. Prendre une capacité  $C = 2 \mu\text{F} - 400 \text{ V}$  de type X2 (faible ESR).

- Q18) Pour le point de fonctionnement nominal  $V_s = 50 \text{ V}$  et  $I_s = 1 \text{ A}$ , relever  $v_C(t) = v_s(t)$  et  $i_C(t)$  (courant dans le condensateur de sortie) sur une période.
- Q19) Comparer la valeur de  $\Delta V_s$  mesurée avec sa valeur théorique.
- Q20) En déduire une valeur mesurée du condensateur de sortie  $C$ .

## TP 2 - Alimentation à découpage de type FLYBACK

### 2.1 Présentation

Les alimentations à découpage à isolation galvanique représentent une part de plus en plus importante des conversions DC/DC de l'électronique de puissance grand public. Souvent utilisées comme sources d'alimentations d'équipements informatiques, elles assurent, grâce à leurs transformateurs, une adaptation de la tension de sortie et une isolation galvanique garantissant la sécurité des utilisateurs. Fonctionnant à des fréquences élevées, elles permettent de minimiser la taille des éléments passifs (transformateurs et filtres) du montage entraînant une réduction des coûts tout en atteignant des rendements élevés ( $\eta > 80\%$ ). Suivant les besoins de l'application, deux familles d'alimentations sont utilisées, la structure FLYBACK ou la structure FORWARD.

#### 2.1.1 Matériel nécessaire

Alimentation à découpage AD 6035 de la société ADELIS.

Alimentation de laboratoire 0 – 30 V, utilisée en alimentation simple.

Rhéostat de charge  $106 \Omega - 3,5 \text{ A}$  pour l'étude de la démagnétisation complète.

Rhéostat de charge  $11,5 \Omega - 10 \text{ A}$  pour l'étude de la démagnétisation incomplète.

Voltmètre, Ampèremètre (Calibre 5 ou 10 A si étude de la démagnétisation incomplète).

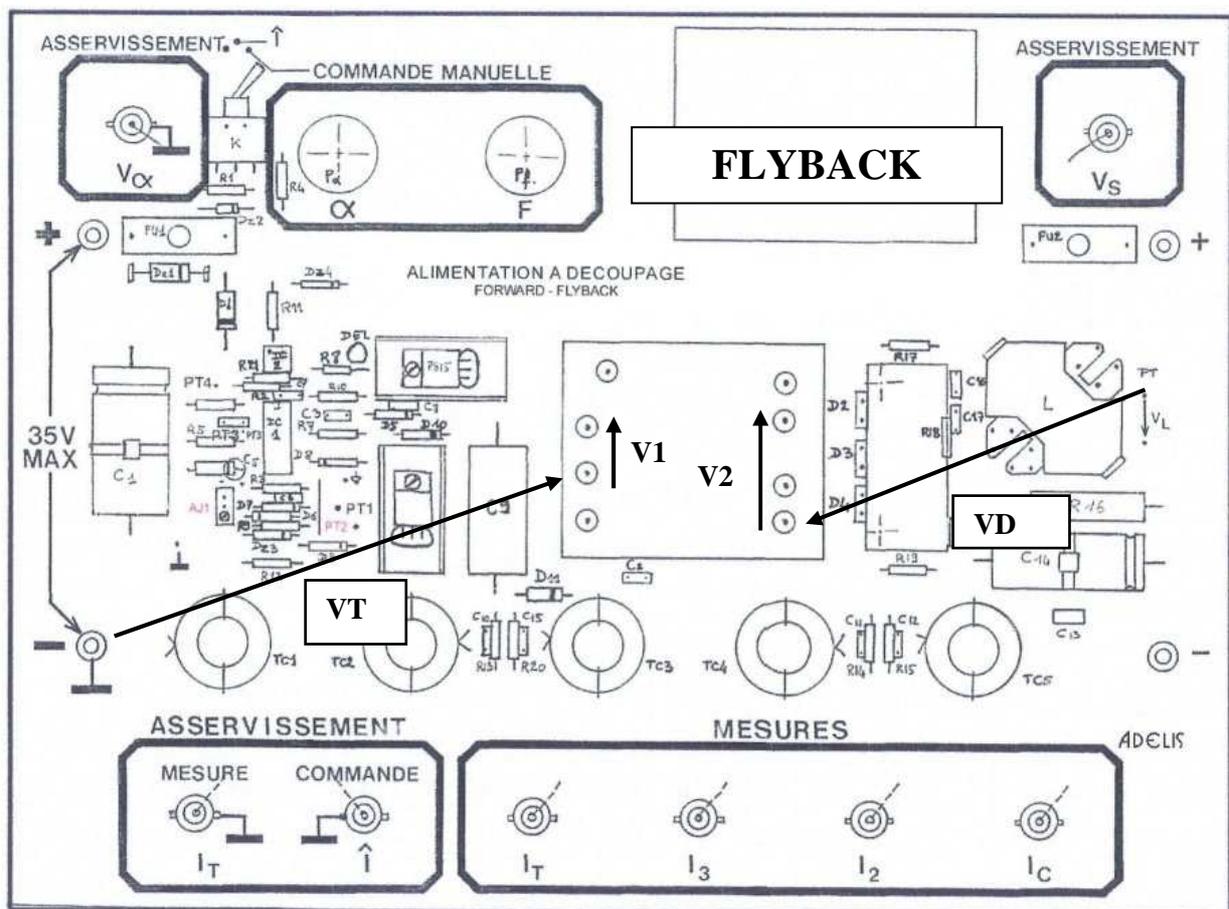


Figure 2.4. Vue d'ensemble de la maquette AD60 en configuration FLYBACK.

### 2.1.2 Précautions à prendre

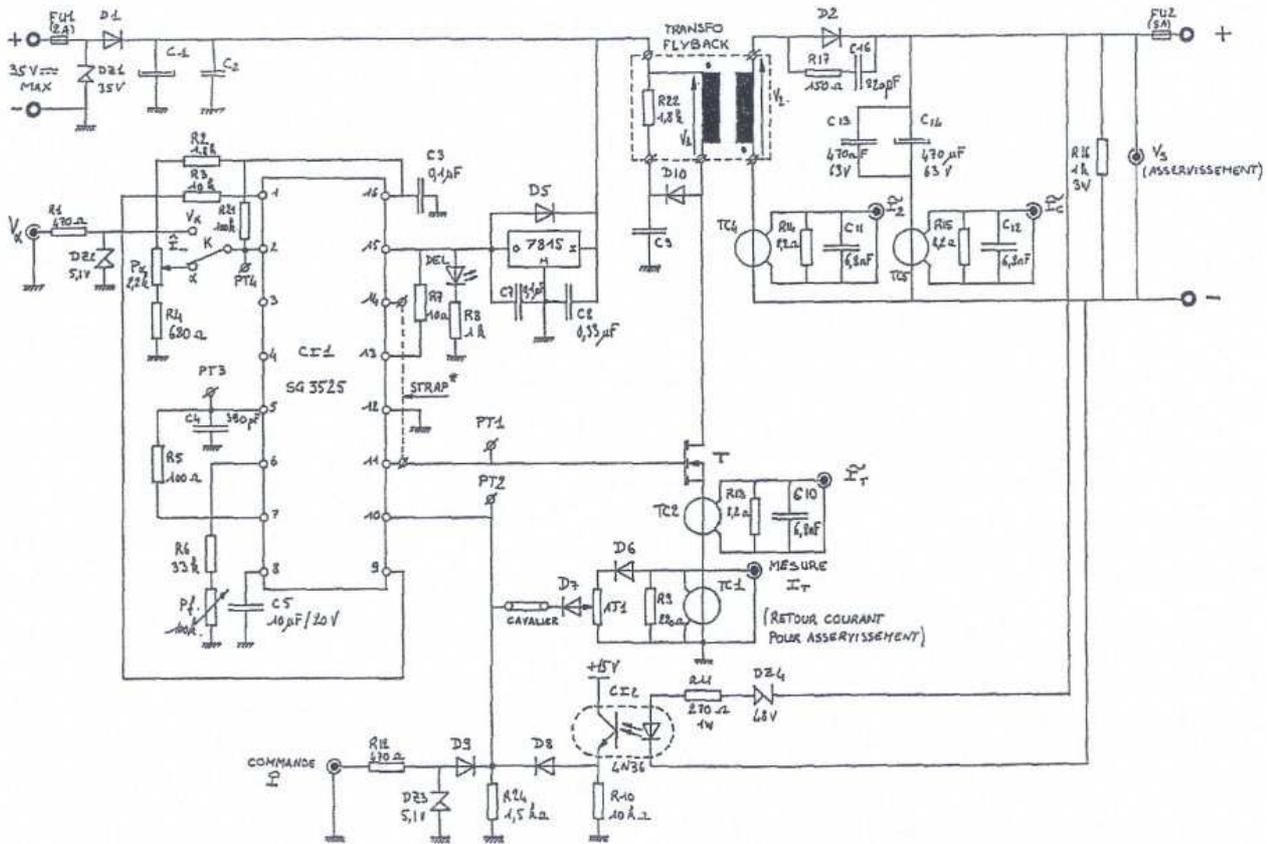
Pour visualiser plusieurs tensions simultanément, il faut impérativement que celles-ci aient un point commun (la masse de l'oscilloscope).

Attention, il ne faut pas dépasser la tension d'entrée maximale admissible,  $V_e = 35\text{ V}$ .

La mesure des courants s'effectue par tore (transformateur) : il n'y a donc pas de composante continue en sortie. On obtient la transformation suivante :  $0,1\text{ V/A}$ .

La fréquence de découpage se règle à l'aide du bouton "F".

### 2.1.3 Schéma complet – Alimentation FLYBACK AD60



## 2.2 Etude de l'alimentation FLYBACK

### 2.2.1 Présentation

Le schéma de principe de cette alimentation est donné figure 2.5.

Son fonctionnement est similaire à celui d'un hacheur à accumulation inductive dans lequel l'élément de stockage inductif est réalisé par deux inductances couplées magnétiquement.

Le circuit magnétique est sans fuite, non-saturé, de réluctance  $\mathfrak{R}$ .

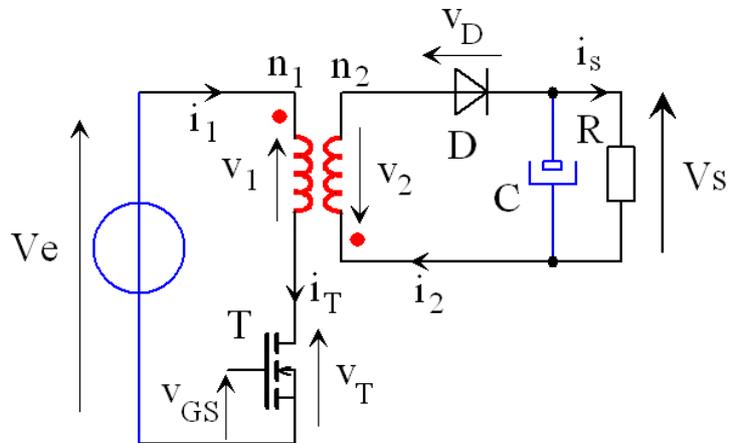


Figure 2.5. Schéma de principe de l'alimentation FLYBACK (dessins/flyback7.drw).

Les bobinages sont constitués de  $n_1$  spires au primaire et  $n_2$  au secondaire. Le rapport de transformation est noté  $m$ . On appelle  $L_1$  l'inductance (magnétisante) du primaire.

L'interrupteur  $K$  est fermé dans l'intervalle de temps  $[0, \alpha T]$  et ouvert dans  $[\alpha T, T]$ .

La constante de temps du circuit RC de sortie étant très grande devant la période  $T$ , on considèrera que la tension de sortie  $V_s$  reste constante dans la période.

Dans cette étude, le rapport cyclique est réglé à une valeur donnée et ne suit pas une stratégie de commande donnée (fonctionnement en boucle ouverte). Suivant le point de fonctionnement retenu, la conduction de cette structure sera continue (CC) ou discontinue (CD).

### 2.2.2 Etude théorique

Le schéma développé complet de l'alimentation FLYBACK est donnée au paragraphe 2.1.3.

**Q1)** Tracer pour les deux modes de conduction (conduction continue et discontinue), les grandeurs suivantes :

- les tensions  $V_1(t)$ ,  $V_2(t)$ ,  $V_T(t)$ ,  $V_D(t)$  ;
- les courants  $i_1(t)$ ,  $i_2(t)$  ;
- le flux  $\phi(t)$  dans le circuit magnétique.

**Q2)** Etablir l'équation définissant la limite de conduction continue-discontinue dans le plan  $V_s = f(I_s)$ . Pour cette étude, on considèrera que le montage est sans pertes et que la tension  $V_s$  est constante.

**Q3)** Donner les contraintes maximales en tension et en courant du transistor  $T$ .

## **2.3 Etude pratique de l'alimentation FLYBACK**

Les tensions  $V_1$  et  $V_2$  sont mesurées directement aux bornes du transformateur en utilisant des sondes différentielles.

La tension de commande du transistor  $v_{GS}(t)$  est mesurée entre le point de test PT1 et la masse du montage.

### **Pour tous les essais, on fixera $V_e = 30V$ et $f = 40kHz$ .**

- Q4)** En fixant le rapport cyclique à 20%, modifier la charge pour obtenir un fonctionnement en conduction continue. Tracer toutes les grandeurs représentatives du montage. Comparer l'allure des courbes par rapport aux courbes théoriques et commenter.
- Q5)** Idem pour un fonctionnement en conduction discontinue : tracer les grandeurs représentatives du montage et comparer l'allure des courbes par rapport aux courbes théoriques.
- Q6)** **Attention dans cet essai, le courant de sortie ne doit pas dépasser 2A.**  
Fixer le rapport cyclique  $\alpha = 0,4$ . Faire varier la charge pour tracer la caractéristique de sortie dans le plan  $V_s = f(I_s)$  en jouant sur la charge.
- Q7)** Renouveler l'essai pour  $\alpha = 10\%$  et  $20\%$ . Conclure sur l'allure de ces deux courbes. Sur ces trois courbes, il est utile de reporter la limite de la conduction continue-discontinue. Pour cela, il faut mesurer précisément le point correspondant à la limite de fonctionnement en conduction continue.
- Q8)** Identifier la valeur de l'inductance magnétisante vue du primaire  $L_1$ .
- Q9)** **Conclusion : Conclure sur les avantages et les inconvénients de cette structure, en incluant le circuit magnétique.**

## **2.4 Caractéristiques de la maquette AD60 FLYBACK**

### ***2.4.1 Caractéristiques du circuit magnétique FLYBACK***

Pot RM14 en ferrite N41	Section effective du noyau : $A_e = 200 \text{ mm}^2$ .
Longueur moyenne de la ligne de champ : 70mm	Perméabilité effective : $\mu_e = 70$ .
Entrefer $e \approx 1 \text{ mm}$	Perméance (1/Reluctance) $A_L = 250\text{nH} \pm 3\%$

### ***2.4.2 Caractéristiques de l'inductance couplée***

Nombre de spires primaires $N_1 : 20$	Nombre de spires secondaires $N_2 : 20$
Inductance propre primaire $L_p (N_1^2 A_L) : 100\mu\text{H}$ (théorique)	100,5 $\mu\text{H}$ mesurée à 1kHz
Inductance propre secondaire $L_s (N_2^2 A_L) : 100\mu\text{H}$ (théorique)	105,6 $\mu\text{H}$ mesurée à 1kHz
Résistance de l'enroulement primaire $R_p : 0,105\Omega$	Résistance secondaire $R_s : 0,95\Omega$

### ***2.4.3 Caractéristiques des transformateurs d'intensité***

Les transformateurs d'intensité sont réalisés à partir d'un tore en ferrite sur lequel sont bobinés les enroulements primaire et secondaire et chargé par une résistance. Ces transformateurs permettent de visualiser les différents courants à l'oscilloscope.

**Les composantes continues des courants sont supprimées.**

Nombre de spires primaires  $N_1 = 1$

Nombre de spires secondaires  $N_2 = 82$

Rapport de transformation  $m = 82$

Résistance de charge :  $8,2\Omega$  **Calibre lecture : 0,1V/A**

### ***2.4.4 Points de mesure des courants délivrant 0,1V/A sur prises BNC***

$I_T$  : Mesure du courant primaire (courant du transistor)

$I_2$  : Mesure du courant secondaire

$I_3$  : Mesure du courant dans l'enroulement de démagnétisation en Forward

$I_c$  : Mesure du courant dans le condensateur de sortie.

### ***2.4.5 Points-tests sur la carte pour la mesure des tensions***

$V_s$  : Mesure de la tension de sortie, sur prise BNC

$V_L$  : Mesure de la tension aux bornes de l'inductance de sortie en Forward,

$Pt_1$  : Mesure de la tension de grille du transistor  $V_{gs}$

$Pt_2$  : Mesure de la tension de contrôle du courant (broche 10 du 3525)

$Pt_3$  : Mesure de la dent de scie (broche 5 du 3525)

$Pt_4$  : Mesure de la tension de commande (broche 2 du 3525).

### ***2.4.6 Prises de mesure sur les enroulements des transformateurs***

$V_1$  : Mesure de la tension au primaire.

$V_2$  : Mesure de la tension au secondaire.

### ***2.4.7 Prises BNC pour l'asservissement***

Une deuxième sortie sur BNC de  $I_T$  (image du courant dans le transistor) et une entrée sur BNC de contrôle du courant  $I_T$ , permettent d'envisager l'asservissement des deux types d'alimentation.

# TP 3 - Alimentation à découpage de type FORWARD

## 3.1 Présentation

Les alimentations à découpage à isolation galvanique représentent une part de plus en plus importante des conversions DC/DC de l'électronique de puissance grand public. Souvent utilisées comme sources d'alimentations d'équipements informatiques, elles assurent, grâce à leurs transformateurs, une adaptation de la tension de sortie et une isolation galvanique garantissant la sécurité des utilisateurs. Fonctionnant à des fréquences élevées, elles permettent de minimiser la taille des éléments passifs (transformateurs et filtres) du montage entraînant une réduction des coûts tout en atteignant des rendements élevés. Suivant les besoins de l'application, deux familles d'alimentations sont utilisées, la structure FLYBACK ou la structure FORWARD.

### 3.1.1 Matériel nécessaire

Alimentation à découpage AD 6035 de la société ADELIS.

Alimentation de laboratoire 0 – 30 V, utilisée en alimentation simple.

Rhéostat de charge 106 Ω – 3,5 A pour l'étude de la démagnétisation complète.

Rhéostat de charge 11,5 Ω – 10 A pour l'étude de la démagnétisation incomplète.

Voltmètre, Ampèremètre (Calibre 5 ou 10 A si étude de la démagnétisation incomplète).

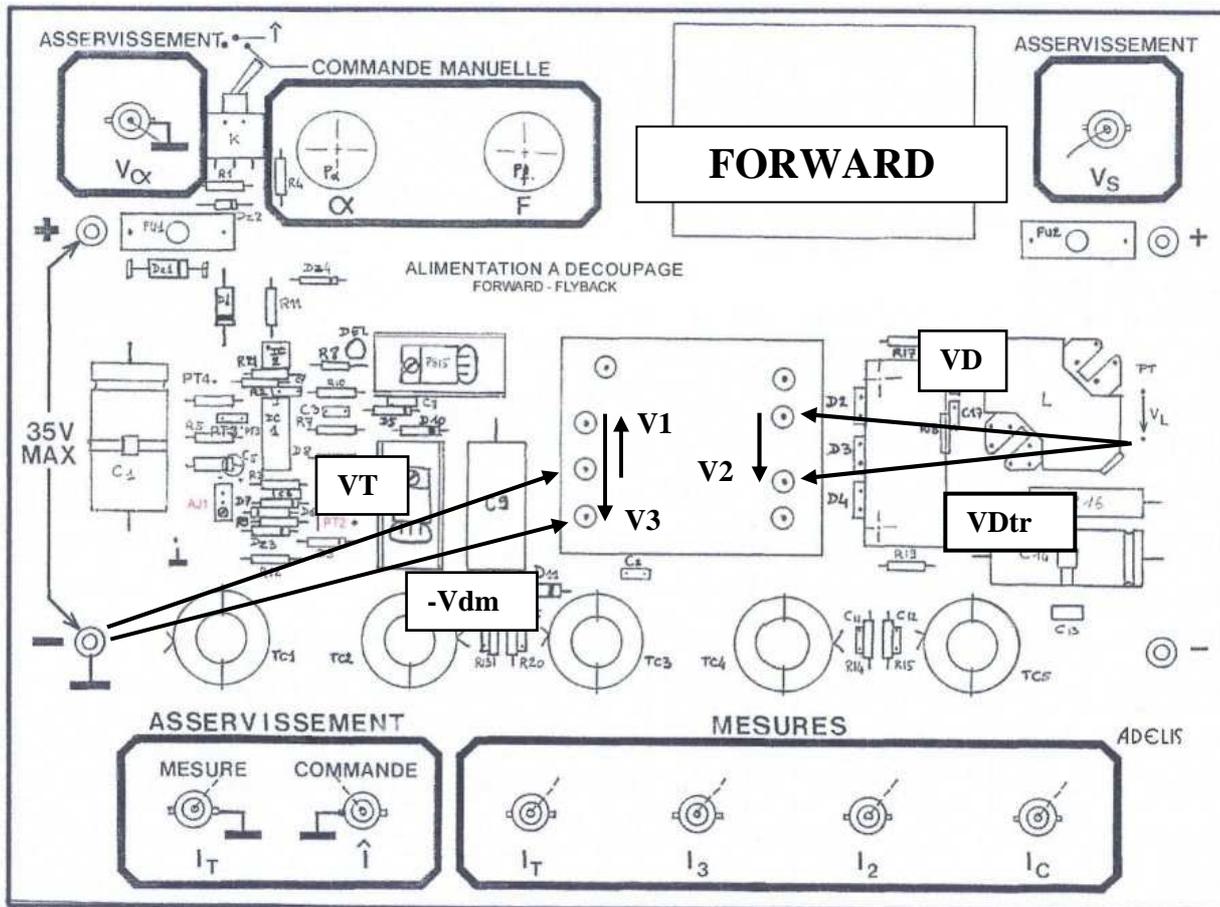


Figure 3.6. Vue d'ensemble de la maquette AD60 en configuration FORWARD.

### 3.1.2 Précautions à prendre

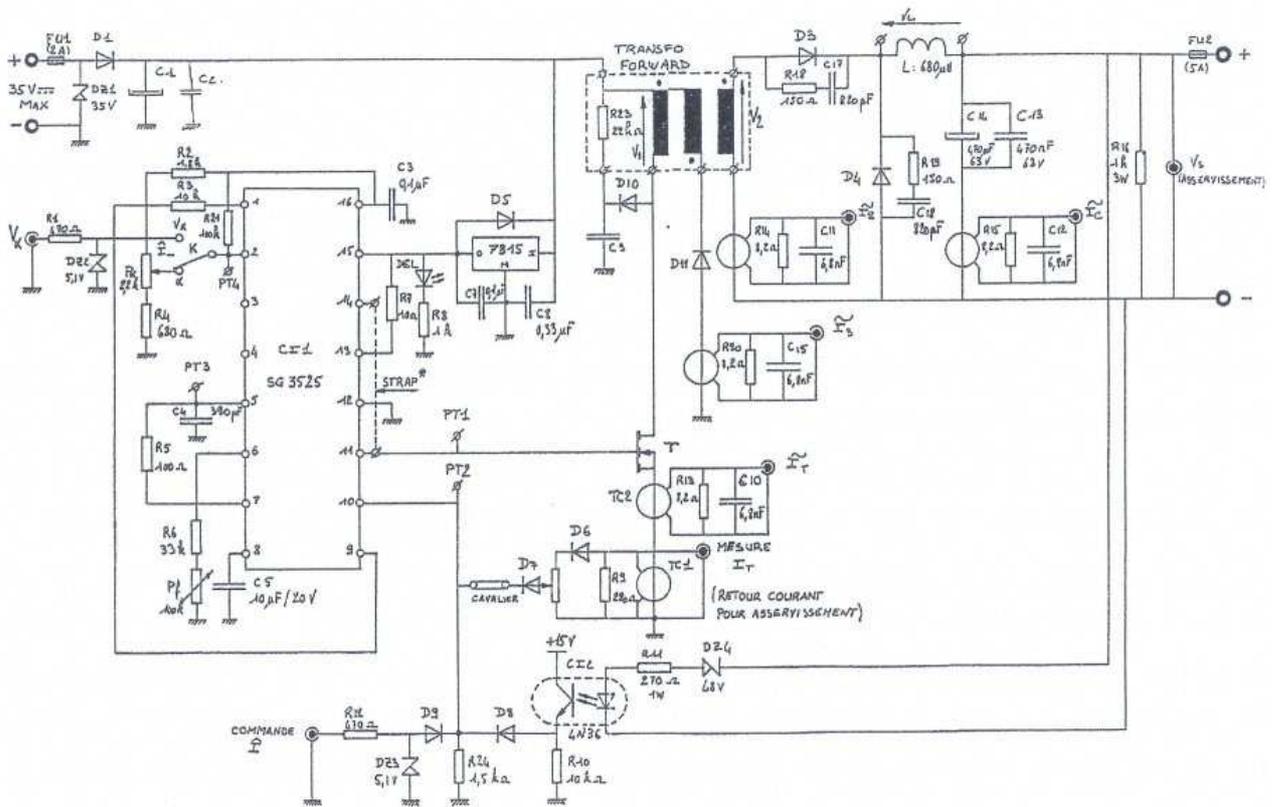
Pour visualiser plusieurs tensions simultanément, il faut impérativement que celles-ci aient un point commun (la masse de l'oscilloscope).

Attention, il ne faut pas dépasser la tension d'entrée maximale admissible,  $V_e = 35 \text{ V}$ .

La mesure des courants s'effectue par tore (transformateur) : il n'y a donc pas de composante continue en sortie. On obtient la transformation suivante :  $0,1 \text{ V/A}$ .

La fréquence de découpage se règle à l'aide du bouton "F".

### 3.1.3 Schéma complet – Alimentation FORWARD AD60



## 3.2 Etude de l'alimentation FORWARD

### 3.2.1 Présentation

L'alimentation FORWARD (voir figure 3.7) est issue de la structure hacheur série. Comme pour le montage précédent, le circuit magnétique fonctionne dans un seul quadrant dans le plan  $B(H)$ . Comme on doit avoir une tension purement alternative aux bornes du transformateur, on est amené à introduire des éléments supplémentaires, à savoir :

- un troisième enroulement (3) associé à la diode  $D_m$  permettant la démagnétisation du transformateur constitué par les enroulements 1 et 2 ;
- une diode  $D_{tr}$  isolant l'étage de sortie (diode de roue libre  $D$  et filtre LC) lorsque la tension aux bornes de l'enroulement 2 est négative.

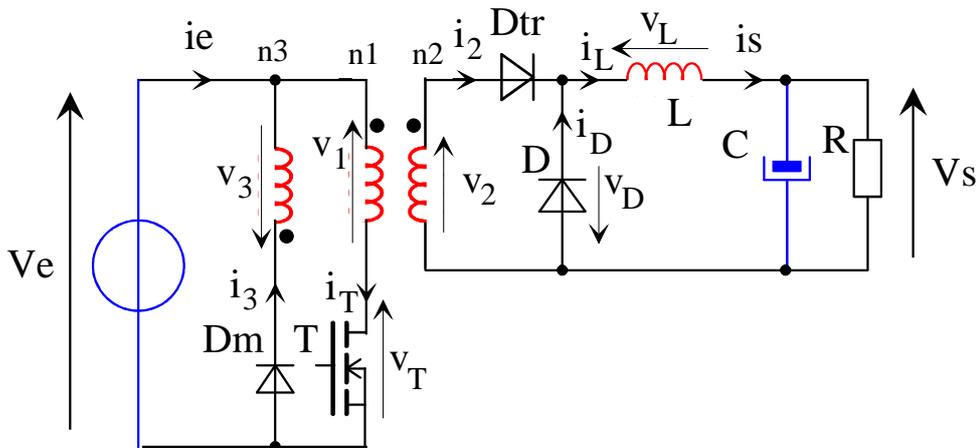


Figure 3.7. Schéma de principe d'une alimentation FORWARD à 3 enroulements.

On considèrera pour l'étude théorique que le circuit magnétique ne sature pas, que le couplage entre les bobinages est parfait et que le courant  $I_L$  est constant et égal à sa valeur moyenne.

### 3.2.2 Etude théorique

Le schéma développé complet de l'alimentation FORWARD est donné dans l'annexe A.2.3.

Le montage fonctionne à fréquence fixe et le transistor  $T$  est commandé entre  $0$  et  $\alpha T$ .

**Q1)** Sur  $[0, \alpha T]$ , donner l'expression de  $i_1(t)$  en fonction de  $V_e$ ,  $L_1$ ,  $m$  et  $i_L$ .

**Q2)** Tracer les grandeurs suivantes : les courants  $i_{10}(t)$ ,  $i_2(t)$ ,  $i_1(t)$  et  $i_3(t)$ , les tensions  $V_1(t)$ ,  $V_2(t)$ ,  $V_3(t)$  puis  $V_T(t)$ ,  $V_D(t)$ ,  $V_{Dm}(t)$ ,  $V_{Dtr}(t)$  ainsi que le flux  $\phi(t)$ .

**Q3)** Sur  $[\alpha T, \beta T]$ , donner l'expression de  $i_3(t)$  en fonction de  $V_e$ ,  $L_1$  et  $\alpha T$ . Quelle est la condition de démagnétisation complète ? Quelle valeur maximale  $\alpha$  peut-il prendre ?

**Q4)** Tracer les courants  $i_1(t)$ ,  $i_2(t)$  et  $i_3(t)$ , les tensions  $V_1(t)$ ,  $V_2(t)$ ,  $V_3(t)$  puis  $V_T(t)$ ,  $V_D(t)$ ,  $V_{DM}(t)$ ,  $V_{Dtr}(t)$  ainsi que le flux  $\phi(t)$  dans le circuit magnétique.

**Q5)** Calculer  $V_s$  en fonction de  $\alpha$ ,  $V_e$  et  $m$ .

**Q6)** Calculer les contraintes maximales en courant et en tension pour l'interrupteur  $T$ .

### 3.3 Etude pratique

Les tensions  $V_1$  et  $V_2$  sont mesurées directement aux bornes du transformateur en utilisant des sondes différentielles.

La tension  $V_3 + V_e$  est mesurée entre la cathode de D11 et la masse du primaire.

Le passage d'une structure à une autre se fait simplement en remplaçant le transformateur, cette manipulation se fait HORS TENSION.

#### **Pour tous les essais, on fixera $V_e = 30$ V et $f = 40$ kHz.**

- Q7)** Pour un fonctionnement sans charge et avec  $\alpha = 0,4$ , tracer toutes les grandeurs du montage. Comparer les formes d'ondes avec la théorie. Déduire des mesures l'allure de  $i_{10}(t)$ , le courant magnétisant vu du primaire.
- Q8)** **Attention dans cet essai, le courant de sortie ne doit pas dépasser 2 A.**  
Faire varier la charge afin de tracer la caractéristique de sortie dans le plan  $V_s = f(I_s)$  pour  $\alpha = 0,4$ .
- Q9)** Renouveler l'essai pour  $\alpha = 20\%$ . Sur ces deux courbes, il est utile de reporter la limite de la conduction continue-discontinue. Pour cela, il faut mesurer précisément le point correspondant à la limite de fonctionnement en conduction continue.
- Q10)** Pour  $I_s = 1,5$  A, tracer toutes les grandeurs du montage et montrer l'évolution des grandeurs par rapport au fonctionnement à vide.
- Q11)** Identifier la valeur de l'inductance vue du primaire  $L_1$ .
- Q12) Conclusion : Conclure sur les avantages et les inconvénients de cette structure, en incluant le circuit magnétique.**

### 3.4 Caractéristiques de la maquette AD60 FORWARD

#### 3.4.1 *Caractéristiques du circuit magnétique FORWARD*

Pot RM14 en ferrite N41	Section effective du noyau : $A_e = 200 \text{ mm}^2$ .
Longueur moyenne de la ligne de champ : 70mm	Perméabilité effective : $\mu_e = 1890$ .
Entrefer $e \approx 0$ mm	Perméance (1/Reluctance) $A_L = 6800 \text{ nH} \pm 30\%$

#### 3.4.2 *Caractéristiques du transformateur*

Nb de spires primaires	$N_1 : 20$ spires.	Nb de spires secondaires	$N_2 = 20$ spires.
Inductance vue du primaire	$L_1 (N_1^2 A_L) = 2,72$ mH (théorique).		xx mH mesurée à 1kHz.
Inductance propre secondaire	$L_2 (N_2^2 A_L) = 2,72$ mH (valeur théorique).		xx mH mesurée à 1kHz.
Résistance de l'enroulement primaire	$R_p : 0,105\Omega$ .	Résistance secondaire	$R_s : 0,095\Omega$ .

### ***3.4.3 Caractéristiques des transformateurs d'intensité***

Les transformateurs d'intensité sont réalisés à partir d'un tore en ferrite sur lequel sont bobinés les enroulements primaire et secondaire et chargé par une résistance. Ces transformateurs permettent de visualiser les différents courants à l'oscilloscope.

**Les composantes continues des courants sont supprimées.**

Nombre de spires primaires  $N_1 = 1$

Nombre de spires secondaires  $N_2 = 82$

Rapport de transformation  $m = 82$

Résistance de charge :  $8,2\Omega$  **Calibre lecture : 0,1V/A**

### ***3.4.4 Points de mesure des courants délivrant 0,1V/A sur prises BNC***

$I_T$  : Mesure du courant primaire (courant du transistor)

$I_2$  : Mesure du courant secondaire

$I_3$  : Mesure du courant dans l'enroulement de démagnétisation en Forward

$I_c$  : Mesure du courant dans le condensateur de sortie.

### ***3.4.5 Points-tests sur la carte pour la mesure des tensions***

$V_s$  : Mesure de la tension de sortie, sur prise BNC

$V_L$  : Mesure de la tension aux bornes de l'inductance de sortie en Forward,

$Pt_1$  : Mesure de la tension de grille du transistor  $V_{gs}$

$Pt_2$  : Mesure de la tension de contrôle du courant (broche 10 du 3525)

$Pt_3$  : Mesure de la dent de scie (broche 5 du 3525)

$Pt_4$  : Mesure de la tension de commande (broche 2 du 3525).

### ***3.4.6 Prises de mesure sur les enroulements des transformateurs***

$V_1$  : Mesure de la tension au primaire.

$V_2$  : Mesure de la tension au secondaire.

### ***3.4.7 Prises BNC pour l'asservissement***

Une deuxième sortie sur BNC de  $I_T$  (image du courant dans le transistor) et une entrée sur BNC de contrôle du courant  $I_T$ , permettent d'envisager l'asservissement des deux types d'alimentation.

## TP 4 - Simulation avec Simcad PSIM demo version 5.0

### 4.1 Etude du hacheur inverseur de type Buck-Boost

Le schéma du hacheur inverseur de type Buck-Boost est donné à la figure 4.1. Les éléments  $K_1$  (le transistor) et  $K_2$  (la diode) sont considérés comme étant parfait. La valeur moyenne de la tension de sortie  $v_s$  est égale à  $V_s$ .

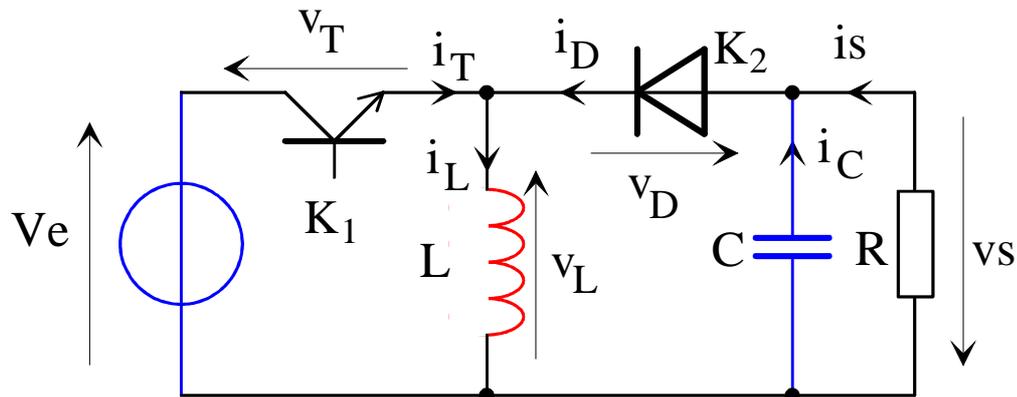


Figure 4.1. Hacheur inverseur DC-DC de type Buck-Boost (dessins\buckboo1.drw).

Les valeurs numériques correspondent à un montage fournissant une tension de sortie  $-V_s = -15\text{ V}$  à partir d'une alimentation  $V_e = +24\text{ V}$ . La résistance correspond à la charge maximale  $I_s = 500\text{ mA}$ . La fréquence de découpage vaut  $F = 50\text{ kHz}$ . L'inductance vaut  $L = 220\text{ }\mu\text{H}$ .

#### 4.1.1 Préparation du hacheur Buck-Boost

On se place en régime permanent.

- Q1) Calculer la valeur de la résistance de charge  $R$ .
- Q2) Calculer la valeur du rapport cyclique  $\alpha$ , sachant que  $V_s = V_e \cdot \frac{\alpha}{1 - \alpha}$ .
- Q3) Calculer l'ondulation du courant dans l'inductance
- Q4) Donner l'expression théorique des contraintes en courant et en tension du transistor et de la diode. Les calculer
- Q5) Calculer la valeur du condensateur pour avoir une ondulation de la tension aux bornes de la charge égale à 0,1%, 1% et 10% de la valeur moyenne de la tension  $V_s$ .

Dans la version de démonstration du logiciel de simulation Simcad PSIM, le nombre de points est limité à 6000.

- Q6) Pour un pas de simulation de 100, 10 et 1 ns, calculer le nombre de points par période ainsi que le nombre de périodes simulées.
- Q7) Calculer le pas de simulation pour avoir une durée simulée de 3 périodes de découpage.

### 4.1.2 Simulation du Buck-Boost – Etude du régime transitoire

Ouvrir le fichier « Buck-Boost0.sch » et le sauvegarder sous « Buck-Boost1.sch ». Exécuter la simulation pour vérifier le bon fonctionnement du schéma.

- Q8) Régler la valeur des composants ainsi que les paramètres de simulation. Exécuter la simulation.
- Q9) Pour les 3 valeurs de condensateur, visualiser le courant dans l’inductance et la tension de sortie. Commenter.

### 4.1.3 Simulation du Buck-Boost – Etude du régime permanent

Afin d’étudier le régime permanent, on effectue une simulation sur un grand nombre de périodes de découpage et on ne conserve que les 3 dernières (le « Total time » vaut  $T_x + 60 \mu s$  et le « Print time » vaut  $T_x$  ms).

- Q10) Mesurer la valeur crête  $I_{Lmax}$  du courant dans l’inductance, ainsi que l’ondulation  $\Delta I_L$ .
- Q11) Comparer  $\Delta I_L$  à la valeur donnée dans l’étude théorique.
- Q12) Mesurer la valeur moyenne de la tension de sortie  $V_s$ , ainsi que l’ondulation  $\Delta V_s$ .
- Q13) Comparer  $\Delta V_s$  à la valeur donnée dans l’étude théorique.
- Q14) Mesurer les contraintes en tension et en courant du transistor.
- Q15) Comparer ces contraintes aux valeurs données en théorie.
- Q16) Mesurer les contraintes en tension et en courant de la diode.
- Q17) Comparer ces contraintes aux valeurs données en théorie.

## 4.2 Etude de l’alimentation FLYBACK

Le schéma de l’alimentation FLYBACK est donné à la figure 2.5. Les valeurs numériques correspondent à celles données dans le TP N°2 – Alimentation FLYBACK.

## 4.3 Caractéristiques de la maquette AD60 FLYBACK

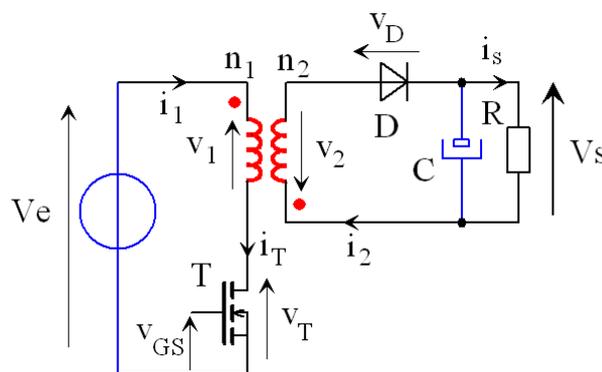


Figure 4.2. Schéma de principe de l'alimentation FLYBACK (dessins\flyback7.drw).

Le rapport cyclique est fixé à  $\alpha = 0,2$ . La tension d’entrée vaut  $V_e = 30 V$  et la résistance correspond à la charge maximale (R maximum pour la conduction discontinue et R minimum pour la conduction continue). Les nombres de spires  $n_1$  et  $n_2$  sont égaux.

Le condensateur de sortie est réduit à la valeur  $C = 10 \mu F$ .

### 4.3.1 Préparation de l'alimentation FLYBACK

- Q18)** La durée de fermeture du transistor  $\alpha T$  est programmée en angle. Calculer l'angle de conduction en degrés pour  $\alpha = 0,2$  (une période =  $360^\circ$ ).
- Q19)** Calculer la période de découpage T. Pour un pas de simulation de 10 ns, calculer le nombre maximum de périodes simulées et la durée simulée correspondante.
- Q20)** On souhaite faire une simulation d'une durée de 600  $\mu s$ , avec un pas de simulation de 10ns. Quelle valeur doit prendre « Print Step », pour ne conserver que 6000 points ?

- Q21)** En régime discontinu, la tension de sortie est donnée par  $V_s = \frac{\alpha^2 \cdot m^2 V_e^2}{2 \cdot L_2 \cdot F \cdot I_s}$ . Avec  $\alpha = 0,2$  et

$R = 50 \Omega$ , calculer la valeur de  $V_s$ .

- Q22)** Avec  $R = 5 \Omega$ , l'alimentation fonctionne en régime de conduction continue. Calculer alors la valeur moyenne de la tension de sortie

### 4.3.2 Simulation en régime discontinu

- Q23)** Ouvrir le fichier « Flyback0.sch » et le sauvegarder sous « Flyback1.sch ». Exécuter la simulation pour vérifier le bon fonctionnement du schéma.
- Q24)** Régler la valeur des composants ainsi que les paramètres de simulation.
- Q25)** Visualiser le courant dans le transistor, le courant dans la diode et la tension de sortie. Commenter.
- Q26)** Mesurer le courant maximum dans le transistor et l'ondulation de la tension de sortie. Comparer avec les valeurs théoriques

### 4.3.3 Simulation en régime continu

- Q27)** Ouvrir le fichier « Flyback1.sch » et le sauvegarder sous « Flyback2.sch ». La résistance de sortie vaut  $R = 5 \Omega$ . Initialiser la tension du condensateur de sortie à la valeur calculée lors de la préparation.
- Q28)** Exécuter la simulation pour avoir le régime permanent. Mettre l'option « Save Flag » à 1 pour enregistrer l'état du circuit à la fin de la simulation (courants, tensions...).
- Q29)** Modifier les paramètres de simulation pour faire une étude sur deux périodes en régime permanent. Pour cela, mettre l'option « Load Flag » à 1 pour recharger l'état du circuit à partir de la simulation précédente.
- Q30)** Visualiser le courant dans le transistor, le courant dans la diode et la tension de sortie. Commenter.
- Q31)** Mesurer le courant maximum dans le transistor, l'ondulation du courant magnétisant et l'ondulation de la tension de sortie. Comparer avec les valeurs théoriques.

## 4.4 Le logiciel Simcad PSIM demo version 5.0

### 4.4.1 Configuration de la simulation

Time Step : pas d'échantillonnage de la simulation.

Total Time : durée de la simulation.

Print Time : instant de début de l'enregistrement.

Print Step : nombre de points enregistrés. Si « Print Step = 10 », alors le programme n'enregistre qu'un point sur 10.

Load Flag : recharge l'état d'une simulation précédente comme condition initiale.

Save Flag : sauvegarde l'état du circuit à la fin de la simulation.

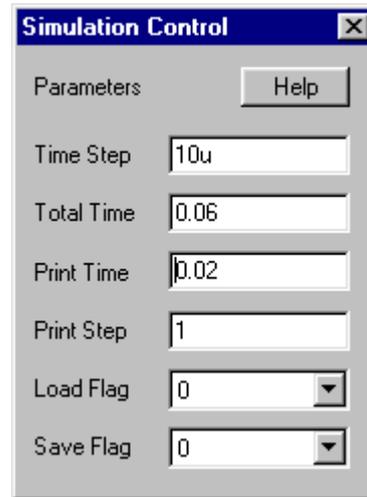


Figure 4.3. Fenêtre « Simulation Control » de Simcad PSIM demo version 5.0.

### 4.4.2 Le transformateur TF\_1F\_1

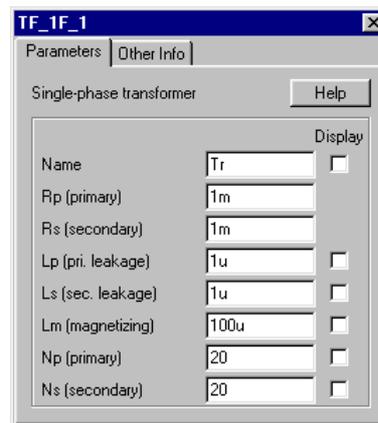
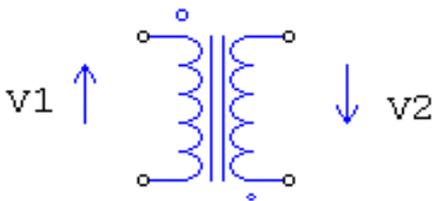


Figure 4.4. Le transformateur TF\_1F\_1 de Simcad PSIM demo version 5.0.

Le modèle de transformateur utilisé dans Simcad PSIM est un modèle complet sans la résistance  $R_F$  modélisant les pertes fer dans le circuit magnétique.

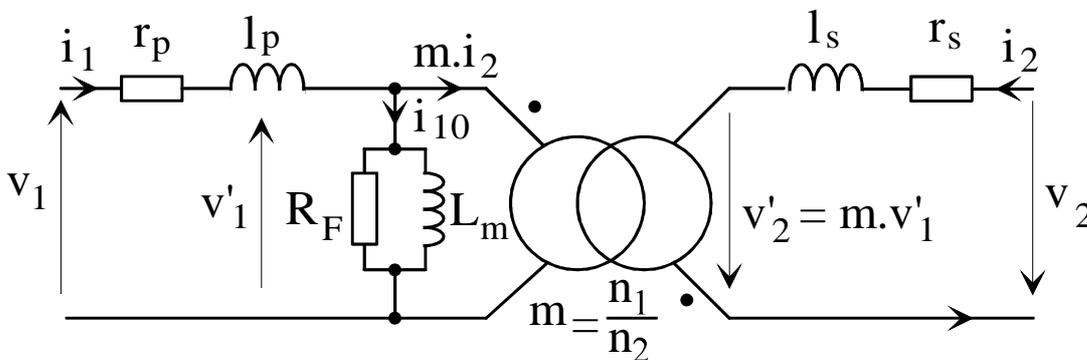


Figure 4.5. Schéma équivalent complet (dessins\transf04.drw).