

Hacheur réversible avec asservissement en courant

Montage didactique

par Yves VIDAL
Lycée Rascol, 81000 Albi

Le montage* proposé ici, de réalisation aisée et peu coûteuse, permet d'illustrer expérimentalement les principales particularités de fonctionnement du hacheur réversible en courant.

Il est facile de l'équiper à peu de frais d'un système d'asservissement en courant permettant l'étude expérimentale de diverses applications, comme la protection des transistors de puissance du hacheur, le fonctionnement à courant constant d'une petite machine à courant continu, le freinage de cette machine avec récupération d'énergie. L'article décrit ce montage et envisage quelques applications.

1. HACHEUR RÉVERSIBLE EN COURANT

1.1. Principe

Le hacheur réversible en courant doit permettre d'opérer un transfert réversible d'énergie entre (figure 1) :

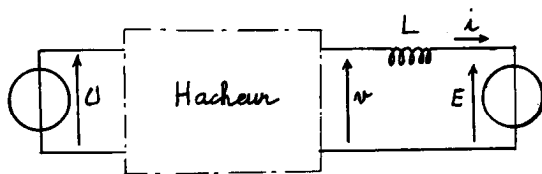


Figure 1

- une source de tension constante U d'une part,
- une charge constituée par un électromoteur de force électromotrice $E < U$, en série avec une inductance L , d'autre part.

* Ce montage doit beaucoup à mon collègue G. BIRAGUE - CAVALLIÉ, de Toulouse, que je remercie d'avoir bien voulu relire cet article qu'il a en partie inspiré.

Pour opérer le transfert d'énergie de la source vers la charge, il faut les relier par un montage dévolteur : on utilise un hacheur série (figure 2a).

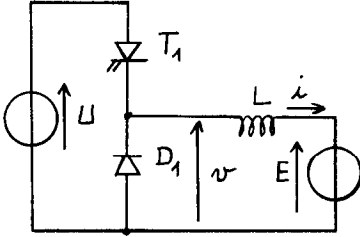


Figure 2a

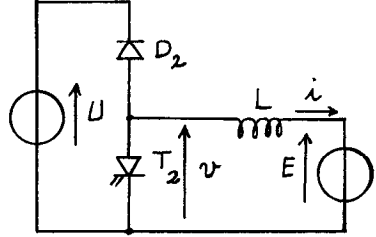


Figure 2b

Pour transférer l'énergie de la charge vers la source, il faut les relier par un montage survolteur : on utilise un hacheur parallèle (figure 2b).

Le hacheur réversible en courant combine les structures série et parallèle (figure 3).

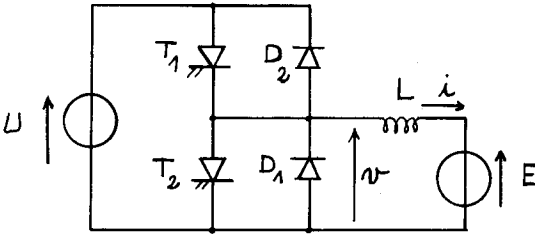


Figure 3

D_1 et D_2 sont des diodes rapides.

T_1 et T_2 des interrupteurs unidirectionnels commandés à la fermeture et à l'ouverture.

La commande de T_1 et de T_2 - alternativement fermés et ouverts, définit le fonctionnement du hacheur.

T_2 étant ouvert, le contrôle de T_1 correspond au fonctionnement en dévolteur. La diode D_1 joue alors le rôle de diode de roue libre.

T_1 étant ouvert, le contrôle de T_2 associé à la diode D_2 correspond au fonctionnement en survolteur.

Si on commande alternativement les interrupteurs T_1 et T_2 , de façon complémentaire, on pourra passer sans discontinuité du montage dévolteur - transfert d'énergie de la source vers la charge - au montage survolteur - transfert d'énergie de la charge vers la source.

1.2. Réalisation (figure 4)

Les interrupteurs T_1 et T_2 sont deux transistors de puissance complémentaires - ou deux montages Darlington - respectivement NPN (T_1) et PNP (T_2). Par exemple BDX 53 et BDX 54, TIP 111 et TIP 116 ou encore 2N 3055 + 2N 1711 et BDX 18 + 2N 2905. On veillera à assurer une éventuelle dissipation thermique.

Ils sont commandés de façon complémentaire par un générateur de tension rectangulaire alternative G à fréquence f et rapport cyclique α réglables.

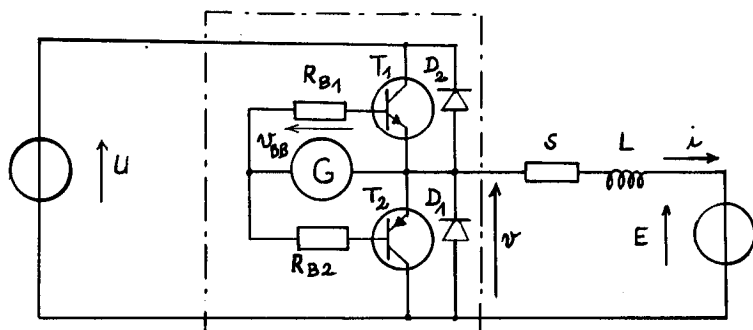


Figure 4

R_{B1} et R_{B2} sont choisies en fonction de l'amplitude de la tension de commande pour permettre le fonctionnement de T_1 et de T_2 en régime saturé lorsqu'ils sont passants.

La source U , réversible en courant, est une batterie d'accumulateurs 12 volts.

L'électromoteur E , réversible en courant, est soit une batterie 6 volts, soit un petit moteur à courant continu.

L'inductance L doit permettre le fonctionnement en conduction ininterrompue aux fréquences de fonctionnement du montage (quelques kilohertz). Une bobine sans fer, de transformateur démontable de 250 spires, convient ($L \approx 10$ mH).

S est une résistance de faible valeur connue avec précision, permettant entre autres de visualiser le courant i à l'oscilloscope.

1.3. Fonctionnement à fréquence constante

La f.é.m. E étant constante (batterie 6 volts), on commande le hacheur par un signal v_{BB} d'amplitude 15 volts, de fréquence $f = 1$ kHz.

On observe à l'oscilloscope les signaux v_{BB} , i et v . Pour différentes valeurs du rapport cyclique α , les oscillogrammes, ainsi que les séquences de conduction des interrupteurs unidirectionnels sont donnés figure 5.

Le cas a correspond au fonctionnement en dévolteur, le cas c au fonctionnement en survolteur. Le cas b combine les deux modes de fonctionnement.

Les oscillogrammes montrent que, en régime permanent, les valeurs instantanées de i restent comprises entre deux valeurs extrêmes :

I_{max} , atteinte aux instants $\alpha T + kT$

I_{min} , atteinte aux instants $T + kT$

(k entier).

Suivant les valeurs de α , la valeur moyenne \bar{I} de i peut être positive, négative ou nulle.

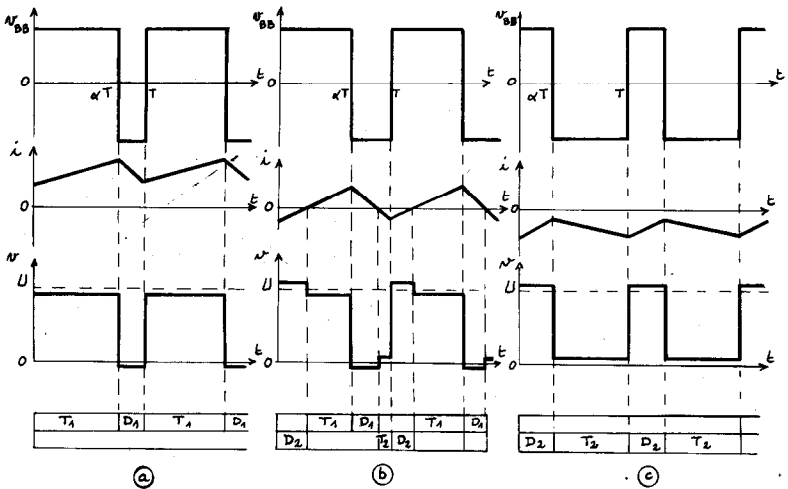


Figure 5

La tension instantanée v est pratiquement :

- égale à U quand $v_{BB} > 0$;
- nulle quand $v_{BB} < 0$.

Du fait de la valeur de U (12 volts), l'influence des tensions aux bornes des interrupteurs unidirectionnels en conduction est nettement visible sur les oscillogrammes de v , en conformité avec le tableau des séquences de conduction.

Dans une première approche, négligeons cette influence.

La valeur moyenne de v a alors pour expression :

$$\bar{V} = \alpha U$$

Désignons par R la résistance totale du circuit de charge.

La valeur moyenne de i a pour expression :

$$\bar{I} = \frac{\alpha U - E}{R}$$

\bar{I} peut donc, suivant les valeurs de α , prendre les valeurs extrêmes :

$$\frac{U - E}{R} \quad \text{pour } \alpha = 1 \quad \frac{-E}{R} \quad \text{pour } \alpha = 0$$

On constate que, les valeurs de U et de E étant imposées, c'est la valeur de R qui fixe les limites du courant \bar{I} . Ainsi, pour $U = 12$ V et $E = 6$ V, avec $R = 0,1$ Ω , le courant \bar{I} varierait suivant les valeurs données à α de +60 à -60 ampères !

Pour assurer la protection des composants, il est donc indispensable de limiter le domaine de variation de α , ce qui limite les valeurs de \bar{I} .

2. COMMANDE PAR L'ONDULATION DU COURANT

2.1. Principe

Les oscillogrammes de la figure 5 montrent que, en régime permanent, les valeurs instantanées de i , et par conséquent sa valeur moyenne \bar{I} , restent comprises entre deux valeurs extrêmes que nous désignerons par I_{\max} et I_{\min} .

Tant que v_{BB} est positive, i croît. Il atteint I_{\max} à l'instant où la tension de commande bascule et devient négative.

Tant que v_{BB} est négative, i décroît. Il atteint I_{\min} à l'instant où la tension de commande bascule et devient positive.

Si on provoque les basculements de v_{BB} chaque fois que i atteint ses valeurs extrêmes, on est assuré, en régime établi, de maintenir la valeur instantanée, et par conséquent la valeur moyenne \bar{I} entre I_{\max} et I_{\min} .

Ce mode de fonctionnement s'obtient en asservissant la commande du hacheur au courant i qu'il débite.

La figure 6 représente le schéma - bloc du hacheur à asservissement de courant.

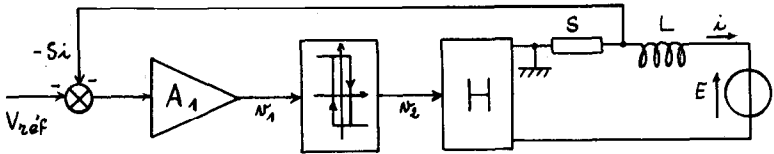
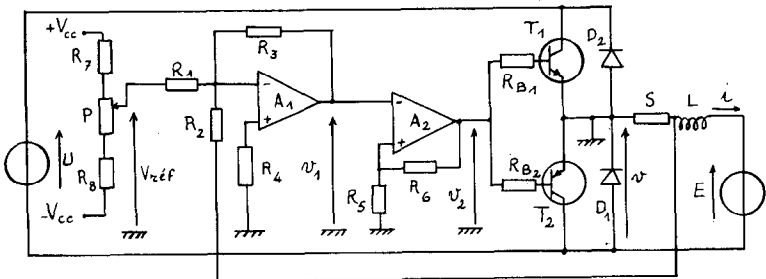


Figure 6

La tension de référence $V_{\text{réf}}$ fixe la valeur de \bar{I} . A partir de la tension v_1 obtenue par amplification du signal $S_i - V_{\text{réf}}$, le comparateur à hystérésis fournit le signal de commande v_2 du hacheur.

2.2. Réalisation



$$R_1 = 10 \text{ k}\Omega \quad R_2 = 1 \text{ k}\Omega \quad R_3 = 50 \text{ k}\Omega \quad R_4 = 1 \text{ k}\Omega$$

$$R_5 = 1,2 \text{ k}\Omega \quad R_6 = 68 \text{ k}\Omega \quad R_7 = R_8 = 22 \text{ k}\Omega \quad P = 10 \text{ k}\Omega$$

$$R_{B1} = R_{B2} = 3,8 \text{ k}\Omega \quad S = 0,1 \Omega \quad V_{CC} = 15 \text{ V} \quad A_1 \text{ et } A_2 : \text{TL 081}$$

Figure 7

Pour maintenir i entre les valeurs extrêmes I_{\max} et I_{\min} (fourchette de courant) nous devons substituer à la tension de commande fournie par le générateur G un signal de même amplitude commandé par le courant i . Le schéma du montage complet est donné figure 7. (La commande est alimentée par un générateur de tensions continues symétriques $+15\text{ V}$, 0 , -15 V , non représenté).

La tension de commande v_2 du hacheur est fournie par l'amplificateur opérationnel A_2 monté en comparateur à hystérésis. La fonction de transfert de ce comparateur est donnée figure 8a. La figure 8b montre la tension v_2 et l'allure de la tension v_1 correspondante.

Les tensions de basculement sont symétriques ($V_{(+)} = -V_{(-)}$).

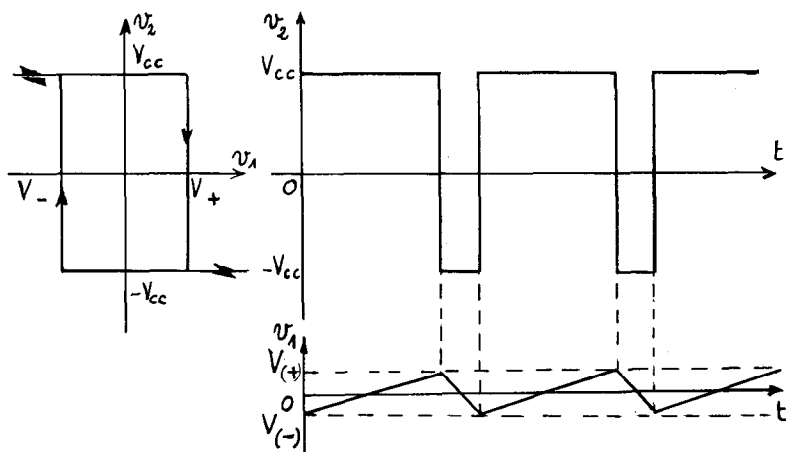


Figure 8a

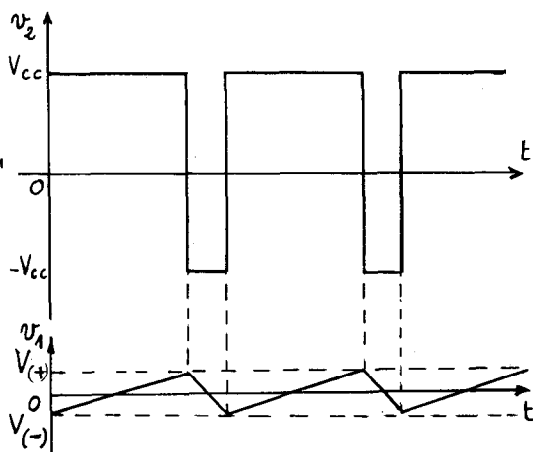


Figure 8b

La tension v_1 est fournie par l'amplificateur opérationnel A_1 monté en amplificateur inverseur (figure 7).

Quand $V_{\text{réf}} = 0$, v_1 est au signe près proportionnelle à la tension appliquée à R_2 puisque e^+ est reliée à la masse par la résistance R_4 . Comme ce signal d'entrée est prélevé aux bornes de S, donc proportionnel à $-Si$, la valeur moyenne \bar{I} du courant dans la charge est nulle. En effet comme les tensions de basculement du comparateur $V_{(+)}$ et $V_{(-)}$ sont symétriques, les valeurs correspondantes de i , I_{\max} et I_{\min} , dont elles

sont les images, le sont également. On a alors $I_{\max} = -I_{\min}$ ce qui entraîne :

$$\bar{I} = \frac{I_{\max} + I_{\min}}{2} = 0$$

Pour obtenir \bar{I} non nul, on doit ajouter au signal d'entrée proportionnel à $-Si$ un signal continu fourni par la tension de référence réglable $V_{\text{réf}}$.

La tension v_1 a alors pour expression :

$$v_1 = A Si - B V_{\text{réf}}$$

avec $A = \frac{R_3}{R_2} = 50$ et $B = \frac{R_3}{R_1} = 5$

Désignons par j l'ondulation instantanée de i . Nous pouvons écrire :

$$i = \bar{I} + j \quad \text{et} \quad v_1 = ASj + AS\bar{I} - BV_{\text{réf}}$$

v_1 est l'image de l'ondulation j , donc :

$$v_1 = ASj$$

et sa valeur moyenne est nulle, donc :

$$AS\bar{I} - B V_{\text{réf}} = 0$$

La tension de référence $V_{\text{réf}}$ règle la valeur du courant moyen

$$\bar{I} = \frac{B}{AS} \cdot V_{\text{réf}} \quad (\text{ici, } \frac{B}{AS} = 1 \text{ A/V})$$

Pour limiter les valeurs de I , et assurer ainsi la protection des composants, il suffit de limiter les valeurs de $V_{\text{réf}}$. C'est le rôle assigné aux résistances R_7 et R_8 .

Le montage maintient également l'ondulation de crête à crête $\Delta I = I_{\max} - I_{\min}$ constante.

En effet :

$$\text{quand } i = I_{\max}, v_1 = V_{(+)}$$

$$\text{quand } i = I_{\min}, v_1 = V_{(-)}$$

Donc :

$$V_{(+)} = ASI_{\max} - BV_{\text{réf}}$$

$$V_{(-)} = ASI_{\min} - BV_{\text{réf}}$$

$$V_{(+)} - V_{(-)} = AS(I_{\max} - I_{\min})$$

$$\Delta I = \frac{V_{(+)} - V_{(-)}}{AS}$$

Les tensions de basculement étant constantes, ΔI est constante quelle que soit la valeur de \bar{I} .

$$\text{Avec } V_{CC} = 15 \text{ V} \quad , \quad V_{(+)} = V_{CC} \cdot \frac{R_5}{R_5 + R_6} = 0,26 \text{ V}$$

$$\text{et } \Delta I = \frac{0,52}{50 \times 0,1} = 0,12 \text{ A}$$

2.3. Particularités de fonctionnement

L'ondulation ΔI a pour expression :

$$\Delta I = \frac{U}{L} T \cdot \alpha (1 - \alpha)$$

$T = \frac{1}{f}$ est la période de tension de commande, α le rapport cyclique, U et L sont constantes.

Le fonctionnement à ondulation ΔI constante entraîne la constance du produit.

$$T \times \alpha (1 - \alpha) = \frac{L}{U} \Delta I$$

suivant les valeurs imposées à \bar{I} , donc à α , lié à \bar{I} par la relation :

$$I = \frac{\alpha U - E}{R} \quad (\S 1.3.)$$

la fréquence de fonctionnement du hacheur varie suivant la loi :

$$f = K \cdot \alpha \cdot (1 - \alpha) \quad \text{où} \quad K = \frac{U}{L \Delta I}$$

La fréquence de fonctionnement est maximale pour $\alpha = 0,5$ et vaut alors :

$$f_m = \frac{U}{4 L \Delta I}$$

Avec $U = 12 \text{ V}$, $\Delta I = 0,12 \text{ A}$ et $L = 7 \text{ mH}$ on trouve $f_m \approx 3 \text{ 500 Hz}$.

En chaîne ouverte, le hacheur n'est plus commandé. Suivant les valeurs de $V_{\text{réf}}$, I prend les valeurs $\frac{U - E}{R}$ ou $-\frac{E}{R}$. On n'expérimentera ce mode de fonctionnement qu'après avoir vérifié que la valeur de R est suffisante pour éviter la destruction de T_1 ou de T_2 .

3.4 Expérimentation

La charge est une batterie de 6 volts. Un voltmètre et un ampèremètre permettent de mesurer les valeurs moyenne de v et de i . On visualise à l'oscilloscope les signaux, v , i , Δi , v_1 et v_2 , on relève les valeurs de α et de f . Le fonctionnement du montage est conforme aux prévisions. Les résultats des mesures vérifient correctement les relations entre les diverses grandeurs ; en particulier on constatera expérimentalement :

que I ne dépend que de la tension $V_{\text{réf}}$;

que ΔI reste pratiquement constant ;

que $f = K \cdot \alpha (1 - \alpha)$ présente un maximum f_m pour $\alpha = 0,5$.

4. APPLICATIONS

4.1. Fonctionnement à courant constant d'une machine à courant continu

Remplaçons la batterie du circuit de charge par un petit moteur à courant continu de ventilateur d'automobile. L'excitation, réalisée par aimants permanents, est supposée constante. On peut alors considérer que le couple moteur Γ_E est proportionnel à \bar{I} . Fixons, grâce à $V_{\text{réf}}$, la valeur de \bar{I} . La machine fonctionne à courant constant, et ce quelle que soit la puissance qu'on lui demande. En particulier, si on cale le moteur le courant \bar{I} garde la valeur qu'il avait à vitesse non nulle. La commande par modulation du courant protège le moteur contre les sur-intensités.

4.2. Fonctionnement à couple constant

Le couple Γ_E étant pratiquement proportionnel à \bar{I} , maintenir constant le courant dans la machine revient à la faire fonctionner à couple constant,

en génératrice comme en moteur. L'ensemble machine à courant continu - hacheur à asservissement en courant constitue donc une machine à couple résistant constant réglable par la tension de référence. Convenablement étalonné, il peut servir à relever expérimentalement la caractéristique mécanique couple - vitesse $\Gamma = f(n)$ de moteurs de petite puissance.

4.3. Freinage avec récupération d'énergie

Le montage permet d'illustrer le principe du freinage avec récupération d'énergie. Le moteur doit entraîner un système d'inertie convenable. En inversant le signe de la tension de référence, on inverse le signe du couple Γ_E qui devient alors un couple résistant, et le mode de fonctionnement de la machine, qui, de moteur, devient génératrice. La machine renvoie de l'énergie à la source U pendant la presque totalité de la phase de freinage. A partir d'un même point de fonctionnement en moteur, on mettra aisément en évidence - en inversant brusquement $V_{réf}$ - l'influence du couple de freinage et la récupération d'énergie.

5. CONCLUSION

Destiné à l'illustration expérimentale du cours d'électronique de puissance, ce montage pourra également servir en travaux pratiques où, en dépit de sa simplicité, il donnera des résultats expérimentaux convainquants.

6. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Sur les amplificateurs opérationnels et leur emploi dans l'amplificateur inverseur et le comparateur à hystérésis, nous renvoyons aux articles de :

G. LAVERTU : l'Amplificateur opérationnel ;

R. MOREAU : un montage électronique pour la classe de seconde ; publiés dans le B.U.P. n° 687, et à leur bibliographie.

Sur l'utilisation du transistor de puissance, on peut consulter les ouvrages publiés par les constructeurs par exemple :

«Le transistor de puissance dans son environnement» ; publié par THOMSON.

Sur le fonctionnement et la structure des convertisseurs statiques on trouvera une très abondante bibliographie dans l'ouvrage de :

J.L. DALMASSO : Électronique de puissance - commutation ; Collections DIA, chez BELIN (1986).