

CHAPITRE 4

HACHEURS

1. Introduction - Intérêt des hacheurs

Les hacheurs sont les convertisseurs statiques continu-continu permettant de fabriquer une source de tension continue variable à partir d'une source de tension continue fixe. La figure 4-1 rappelle le schéma de principe du hacheur.

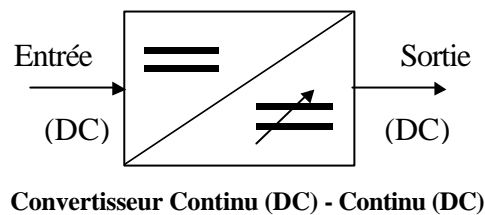


Figure 4-1. Schéma de principe du hacheur.

Il est évident que le procédé le plus simple pour transformer une tension continue de valeur fixe en une tension continue réglable est le montage en potentiomètre diviseur de tension décrit sur la figure 4-2.

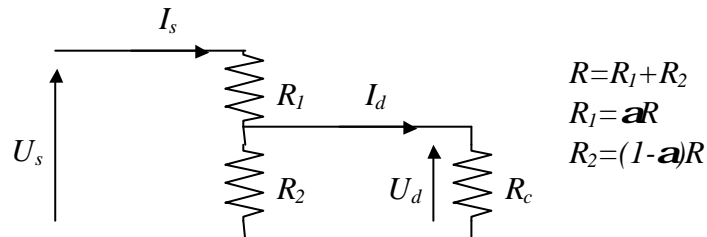


Figure 4-2. Montage potentiométrique.

Le réglage de a permet de faire varier la tension disponible aux bornes de la charge U_d :

$$U_d = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U_s = (1 - a) U_s \text{ à vide } (R_c = \infty).$$

Pour $a = 0$, on a : $U_d = U_s$

Pour $a = 1$, on a : $U_d = 0$

L'inconvénient de ce montage est son rendement médiocre, ce qui s'avère critique pour des applications faisant intervenir des puissances non négligeables.

Le rendement s'écrit : $h = \frac{P_d}{P_s}$

avec : $P_d = U_d \cdot I_d$ et $P_s = U_s \cdot I_s$

Soit après calculs : $h = \frac{R_c \cdot R_2^2}{(R_c + R_2)((R_c + R_2)R_1 + R_c R_2)}$

Ou encore :

$$h = \frac{R_c R (1-a)^2}{R_c^2 + R_c R + a R^2 - a^2 (R R_c + 2 R^2) + a^3 R^2}$$

h est maximum pour : $R_c = R_2 = (1-a)R$

Par exemple, pour $R_1 = R_2 = R_c$ (soit $a = \frac{1}{2}$), on obtient : $h = \frac{1}{6} \approx 16\%$

Soit 84% de la puissance gaspillée inutilement !

Ainsi les montages potentiométriques sont utilisés uniquement en électronique de faible puissance (quelques Watts maximum). En électronique de puissance, on fera systématiquement appel à des hacheurs.

On distingue plusieurs types de hacheurs, les deux types de base (que nous nous proposons d'étudier ici) étant le montage série et le montage parallèle.

Le principe consiste à interrompre périodiquement l'alimentation de la charge par la source. Ce principe est illustré par le schéma de la figure 4-3.

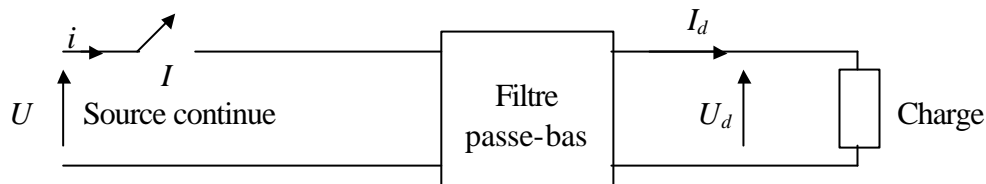


Figure 4-3. Principe du hacheur série.

L'interrupteur commandable I hache la tension d'alimentation U . Après filtrage, on obtient une tension U_d constante (avec ici : $U_d < U$).

En faisant abstraction du filtre passe-bas, on peut comparer ce montage au montage potentiométrique (figure 4-4).

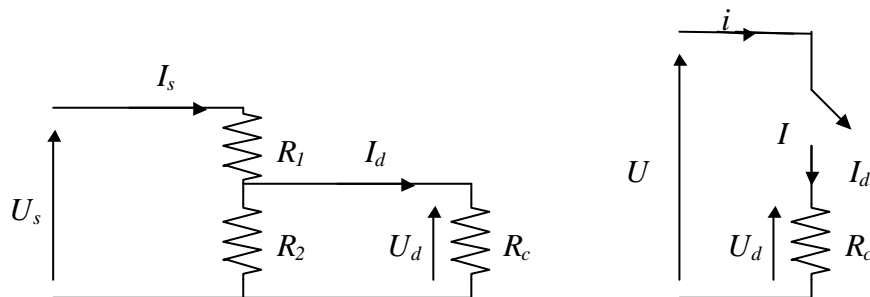


Figure 4-4. Comparaison du hacheur série avec le montage potentiométrique.

Le pont constitué par R_1 et R_2 est remplacé par l'interrupteur qui contrairement à $R = R_1 + R_2$ ne dissipe pas (ou peu en pratique) de puissance.

2. Définition du rapport cyclique

Le rapport cyclique est défini comme le temps t_{ON} pendant lequel l'interrupteur est fermé divisé par la période de fonctionnement du montage T , soit :

$$a = \frac{t_{ON}}{T}$$

On définit également le temps pendant lequel l'interrupteur est fermé par :

$$t_{OFF} = T - t_{ON}.$$

3. Hacheurs série et parallèle

Comme on l'a dit en introduction, les hacheurs sont des convertisseurs statiques qui sont alimentés par des sources de tension continue et produisent aux bornes d'une charge une tension unidirectionnelle de valeur moyenne réglable. On peut imaginer un grand nombre de dispositifs électroniques réalisant cette fonction. On se contentera ici d'indiquer les types de montages les plus utilisés ainsi que quelques applications. Ces montages utiliseront des interrupteurs unidirectionnels statiques qui seront représentés par le symbole de la figure 4-5.

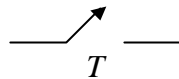


Figure 4-5. Symbole de l'interrupteur unidirectionnel. T est la période du signal de commande.

Dans la suite, seul le régime permanent est étudié.

3.1 Hacheur série (abaisseur de tension)

Le schéma de principe du hacheur série est donné à la figure 4-6. On considère l'interrupteur I et la diode D parfaits. La charge est par exemple un moteur à courant continu.

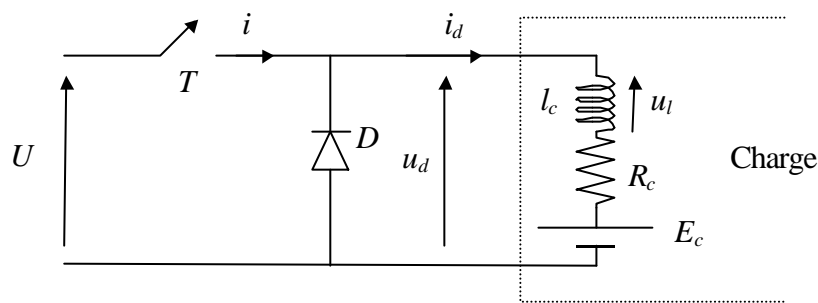


Figure 4-6. Hacheur série.

Le fonctionnement du convertisseur se déduit de l'analyse du comportement de l'interrupteur I .

- à $t=0$, I est enclenché (passant) pendant un temps aT , alors : $u_d(t) = U$
- entre aT et T ($aT < t < T$), I est ouvert.
On a alors : $i=0$ et le courant i_d circule à travers la diode D (diode de « roue libre »).
Donc : $u_d(t) = 0$ tant que la diode D conduit, soit tant que le courant $i_d(t)$ est non nul.
- Lorsque $i_d(t)$ s'annule, la diode D se bloque et : $u_d(t) = E_c$

On distingue donc deux types de fonctionnement selon que le courant $i_d(t)$ est interrompu ou non.

3.1.1 Fonctionnement à courant ininterrompu (figure 4-7)

La valeur moyenne de $u_d(t)$ vaut : $U_{d0} = \int_0^{aT} U \cdot dt = aU$.

L'expression de $i_d(t)$ sera établie en TD.

Remarque : la FEM E_c de la charge et la valeur moyenne I_{d0} du courant $i_d(t)$ sont liés par :

$$U_{d0} = E_c + R_c I_{d0}.$$

- Si la charge est une batterie (E_c est imposé par la charge), cette relation définit I_{d0} .

- Si la charge est un moteur à courant continu, cette relation fixe E_c (et donc la vitesse du moteur car $E_c = K\Omega$ (Ω en rad/s)), sachant que I_{d0} dépend du moment du couple du moteur M ($M = KI$ si l'on néglige les pertes mécaniques et les pertes par hystérésis et courants de Foucault).

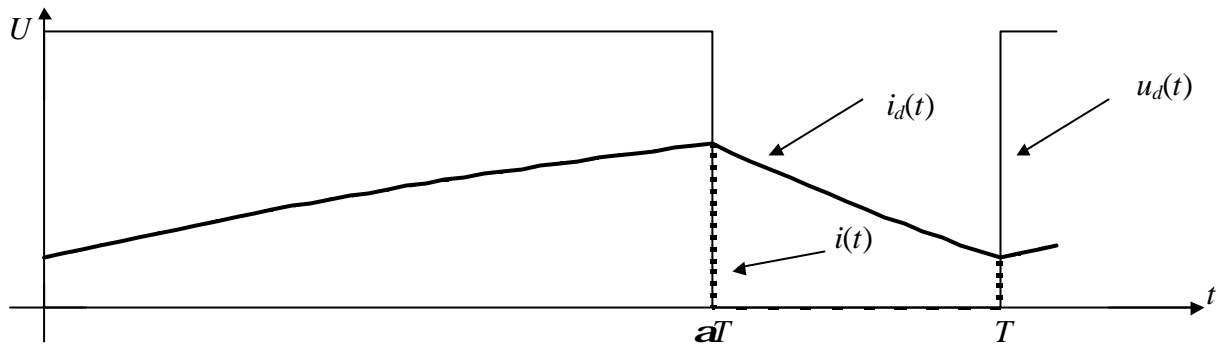


Figure 4-7. Hacheur série. Fonctionnement à courant ininterrompu dans la charge.

3.1.2 Fonctionnement à courant dans la charge interrompu (figure 4-8)

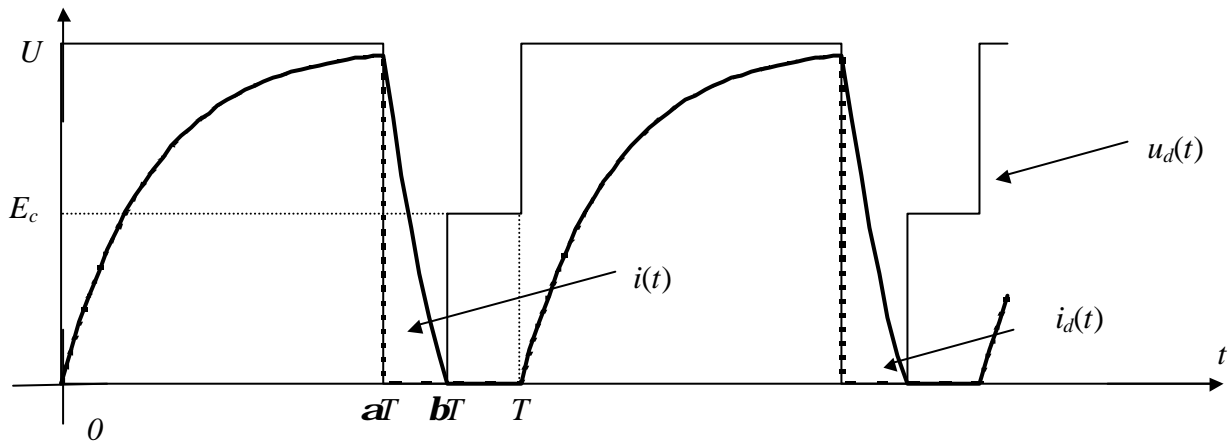


Figure 4-8. Hacheur série. Fonctionnement à courant interrompu dans la charge.

Lorsque l'interrupteur s'ouvre, à $t = aT$, le courant $i_d(t)$ décroît. Si la constante de temps $\tau = \frac{l_c}{R_c}$ est suffisamment faible devant T , ce courant s'annule avant que l'interrupteur ne redevienne passant à $t=T$. En considérant (voir figure 4-8) que le courant $i_d(t)$ est nul entre les instants bT et T , la valeur moyenne de $u_d(t)$ vaut alors :

$$U_{d0} = \frac{1}{T} \left\{ \int_0^{aT} U \cdot dt + \int_{bT}^T E_c \cdot dt \right\} = aU + (1-b)E_c$$

3.1.3 Conclusion sur le hacheur série

Dans les deux types de fonctionnement, on voit que la valeur moyenne U_{d0} de la tension disponible aux bornes de la charge est fonction du rapport cyclique a . On réglera la valeur de U_{d0} en modifiant le rapport cyclique a :

- soit en modifiant la durée de conduction de l'interrupteur I sans modifier la période T de commande (Modulation de Largeur d'Impulsion, MLI).

2. soit en modifiant la fréquence de commande ($f = \frac{1}{T}$) sans modifier la durée de conduction de l'interrupteur.

La solution 1. est de loin la plus utilisée en pratique car elle permet un filtrage aisé de la tension $u_d(t)$ par un filtre passe-bas comme le décrit la figure 4-9. Ce filtre passe-bas permet d'éliminer les harmoniques élevés de $u_d(t)$. L'étude de ce circuit sera effectuée en TP.

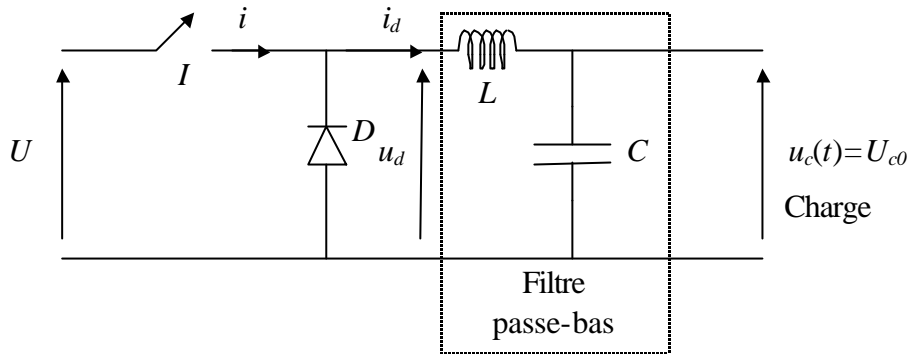


Figure 4-9. Hacheur série avec filtre passe-bas en sortie permettant d'obtenir une tension $u_c(t)$ quasi constante et égale à U_{c0} .

3.2 Hacheur parallèle (élévateur de tension)

Le hacheur parallèle est aussi appelé hacheur survolteur. Ce montage permet de fournir une tension moyenne U_{d0} à partir d'une source de tension continue $U < U_{d0}$. Le montage étudié est donné à la figure 4-10.

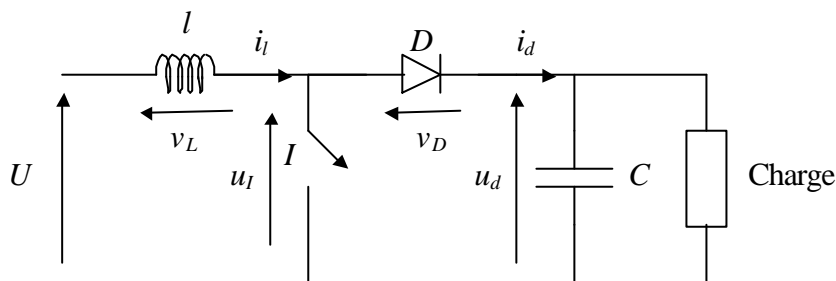


Figure 4-10. Hacheur parallèle.

Les applications principales du hacheur parallèle sont les alimentations de puissance régulées et le freinage par récupération des moteurs à courant continu (voir §5). On distingue 2 phases de fonctionnement:

- Lorsque l'interrupteur I est fermé, la diode est polarisée en inverse ($v_D = -u_d$); la charge est donc isolée de la source. La source fournit de l'énergie à l'inductance l .
- Lorsque l'interrupteur I est ouvert, l'étage de sortie (C + charge) reçoit de l'énergie de la source et de l'inductance l .

Pour l'analyse en régime permanent présentée ici, le condensateur de filtrage C a une valeur de capacité suffisamment élevée pour que l'on puisse considérer la tension disponible en sortie constante :

$$u_d(t) = U_{d0}$$

Enfin on distingue deux modes de fonctionnement selon que le courant dans l'inductance l ($i_l(t)$) est interrompu ou non.

3.2.1 Fonctionnement à courant de source ininterrompu

- Pour $0 < t < aT$, l'interrupteur I est fermé et l'intensité $i_l(t)$ croît linéairement :

$$U = l \frac{di_l}{dt} \text{ donc } i_l(t) = \frac{1}{l} \int U dt = \frac{U}{l} t + i_l(0)$$

On a : $u_l = 0$; $i_d = 0$; $v_l = U$

- Pour $aT < t < T$, l'interrupteur I est ouvert, l'inductance l se démagnétise et le courant $i_l(t)$ décroît :

$$U = l \frac{di_l}{dt} + U_{d0} \text{ donc } i_l(t) = \frac{U - U_{d0}}{l} (t - aT) + i_l(aT)$$

avec : $i_l(aT) = \frac{U}{l} aT + i_l(0)$

et : $U < U_{d0}$ car $i_l(t)$ doit décroître.

On a : $u_l = U_{d0}$; $i_d = i_l$; $v_l = U - U_{d0}$

On déduit les caractéristiques de la figure 4-11.

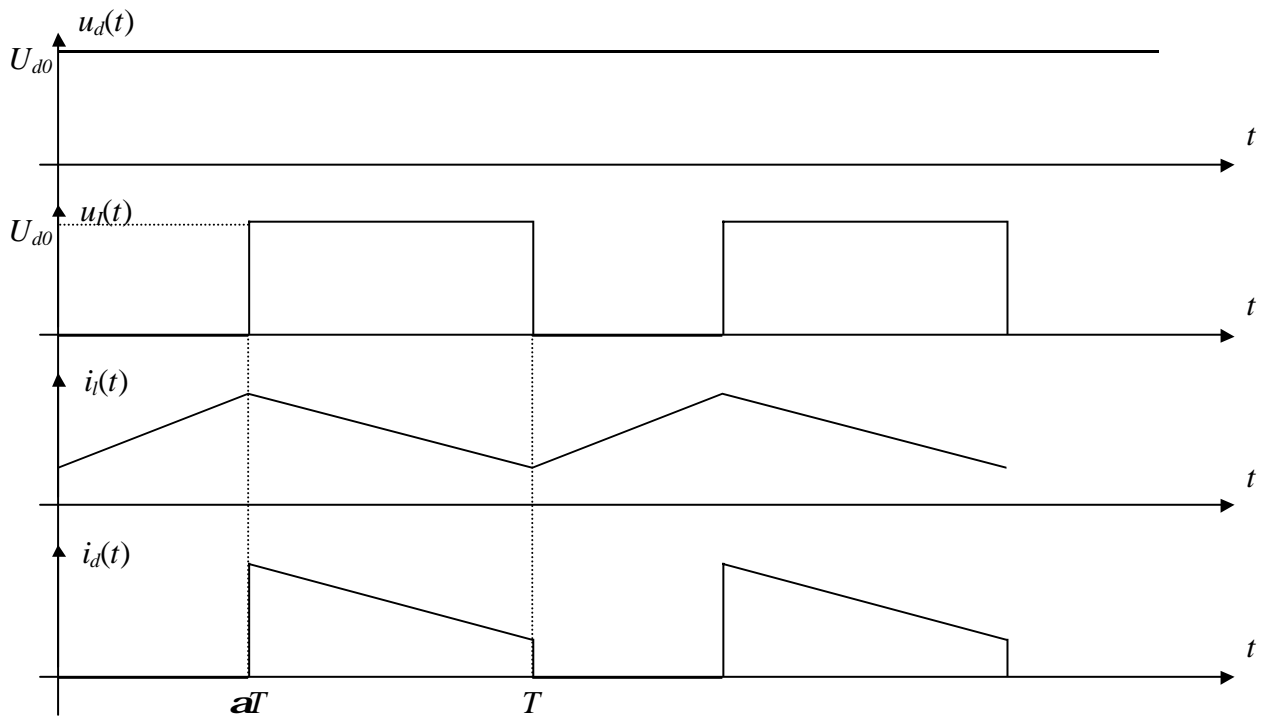


Figure 4-11. Hacheur parallèle. Fonctionnement à courant de source ininterrompu.

On détermine facilement la relation liant U à U_{d0} .

On a : $U = v_L + u_i$

Donc en moyenne sur une période, compte tenu du fait que la valeur de la moyenne de $v_l(t)$ est nulle, on obtient :

$$U = U_{l0} = (1-a) \frac{T}{T} U_{d0} = (1-a) U_{d0}$$

Donc :

$$\frac{U_{d0}}{U} = \frac{1}{1-a}$$

En considérant un circuit sans pertes, la puissance moyenne délivrée par la source est égale à la puissance moyenne disponible en sortie :

$$P_{source} = U \cdot I_{l0} = U_{d0} \cdot I_{d0} \quad \left(\begin{array}{l} I_{l0} = \text{moyenne de } i_l(t) \\ I_{d0} = \text{moyenne de } i_d(t) \end{array} \right)$$

et donc : $\frac{I_{d0}}{I_{l0}} = 1-a$. Cette relation permet de dimensionner les conducteurs à utiliser.

Remarque: on obtient très simplement la relation liant U_{d0} à U en considérant $V_{l0} = 0$.

En effet : $V_{l0} = \frac{U \cdot aT + (U - U_{d0})((1-a)T)}{T} = 0$

D'où directement :

$$\frac{U_{d0}}{U} = \frac{1}{1-a}$$

3.2.2 Limite entre le fonctionnement interrompu et le fonctionnement ininterrompu

La forme des courant et tension $i_l(t)$ et $v_l(t)$ est donnée sur la figure 4-12.

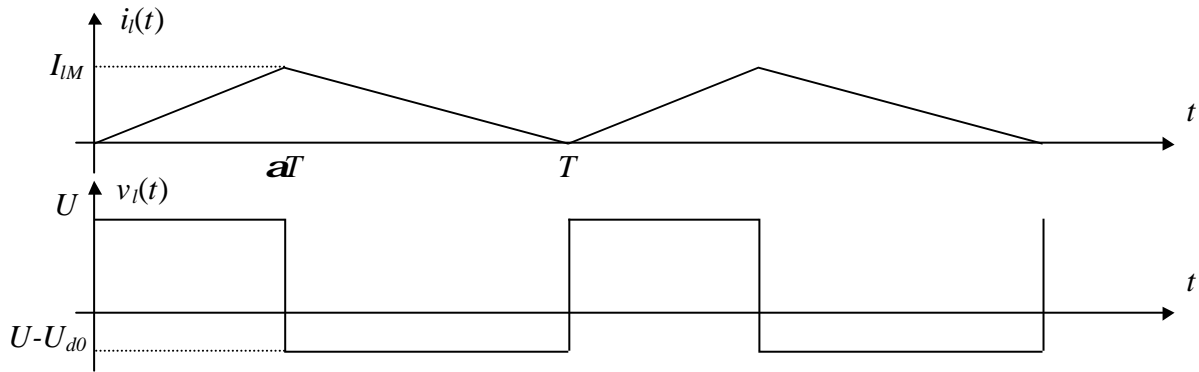


Figure 4-12. Hacheur parallèle. Limite du fonctionnement à courant de source ininterrompu.

La valeur moyenne du courant $i_l(t)$ s'écrit:

$$I_{l0} = \frac{I_{IM}}{2} = \frac{1}{2} \frac{U}{l} aT \quad (\text{car } i_l(0) = 0)$$

Donc la valeur moyenne du courant disponible en sortie I_{d0} s'écrit :

$$I_{d0} = (1-a) I_{l0} = \frac{1}{2} \frac{U}{l} aT (1-a) = \frac{1}{2} \frac{U_{d0}}{l} T a (1-a)^2$$

3.2.3 Fonctionnement à courant de source interrompu

Ce type de fonctionnement intervient lorsque U_{d0} devient tel que le courant $i_l(t)$ s'annule durant la phase où l'interrupteur est ouvert.

Ce type de fonctionnement étant peu utilisé, il ne sera pas développé dans ce cours.

4. Régulation de la tension de sortie

Remarque: on prend l'exemple du hacheur série mais cela n'enlève rien à la généralité du principe de régulation expliqué ici.

Dans les hacheurs, la tension de sortie doit en règle générale être régulée pour être constamment égale à une tension fixée, compte-tenu du fait que la tension d'alimentation U et les caractéristiques de la charge peuvent varier.

On rappelle le schéma de principe du hacheur série et le graphe de la tension de sortie avant filtrage sur la figure 4-13.

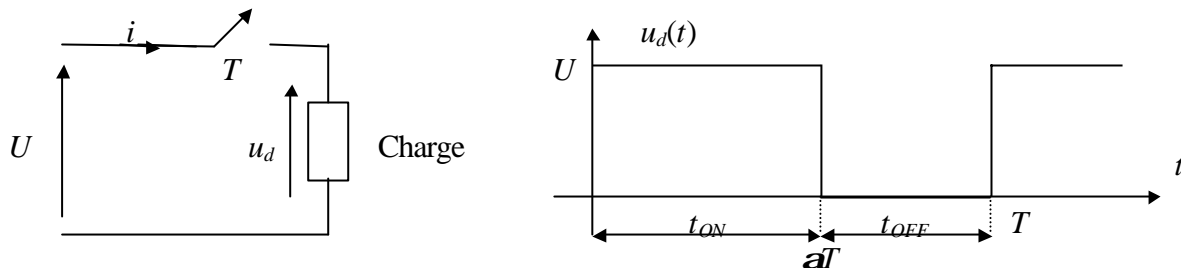


Figure 4-13. Schéma de principe du hacheur série.

Une méthode pour réguler la tension de sortie $u_d(t)$ afin d'obtenir une tension moyenne U_{d0} fixe consiste à ajuster en permanence le rapport cyclique de commande de l'interrupteur $a = \frac{t_{ON}}{T}$ sans modifier T .

Cette méthode qui consiste à faire varier la largeur des impulsions de commande de l'interrupteur est appelée méthode de Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI) ou encore PWM pour «Pulse Width Modulation».

Le signal de contrôle de l'interrupteur V_{CTRL} devra être élaboré par comparaison entre la tension effectivement disponible U_{d0} et la tension moyenne désirée U_{d0d} .

Le schéma général de la figure 4-14 sera employé.

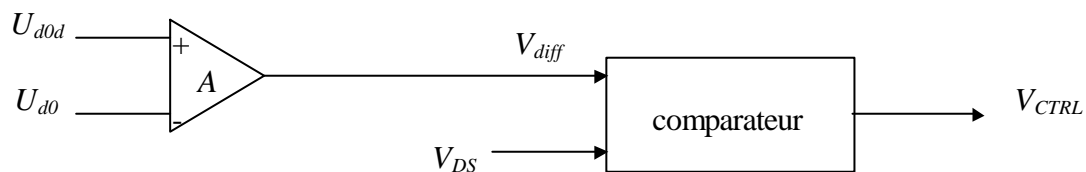


Figure 4-14. Boucle de régulation du hacheur.

A est un amplificateur différentiel qui va servir à amplifier l'écart entre la tension moyenne désirée U_{d0d} et la tension moyenne effectivement disponible.

Cette tension d'écart V_{diff} sera ensuite comparée à une tension en dent de scie de période T afin de générer la tension de commande de l'interrupteur V_{CTRL} comme le montre la figure 4-15.

- Lorsque $V_{diff} > V_{DS}$: $V_{CTRL} = +V_{cc}$, l'interrupteur I est commandé à la fermeture (état ON).
- Lorsque $V_{diff} < V_{DS}$: $V_{CTRL} = 0$, l'interrupteur I est commandé à l'ouverture (état OFF).

Le fonctionnement de la régulation est expliqué ci-dessous :

si $U_{d0} \downarrow$, alors $U_{d0d} - U_{d0} \uparrow$, donc $V_{diff} = A(U_{d0d} - U_{d0}) \uparrow$, donc $a \uparrow$. Or $U_{d0} = aU$, donc $U_{d0} \uparrow$.

Partant d'une diminution de U_{d0} , on obtient donc une augmentation de U_{d0} en jouant sur a .

De la même manière, on montre facilement qu'une augmentation de U_{d0} est corrigée par une diminution du rapport cyclique a .

Ce type de régulation est dit « proportionnel » car la tension V_{diff} est proportionnelle à la différence entre la grandeur de sortie à réguler U_{d0} et la grandeur de consigne (ou de référence) à atteindre U_{d0d} .

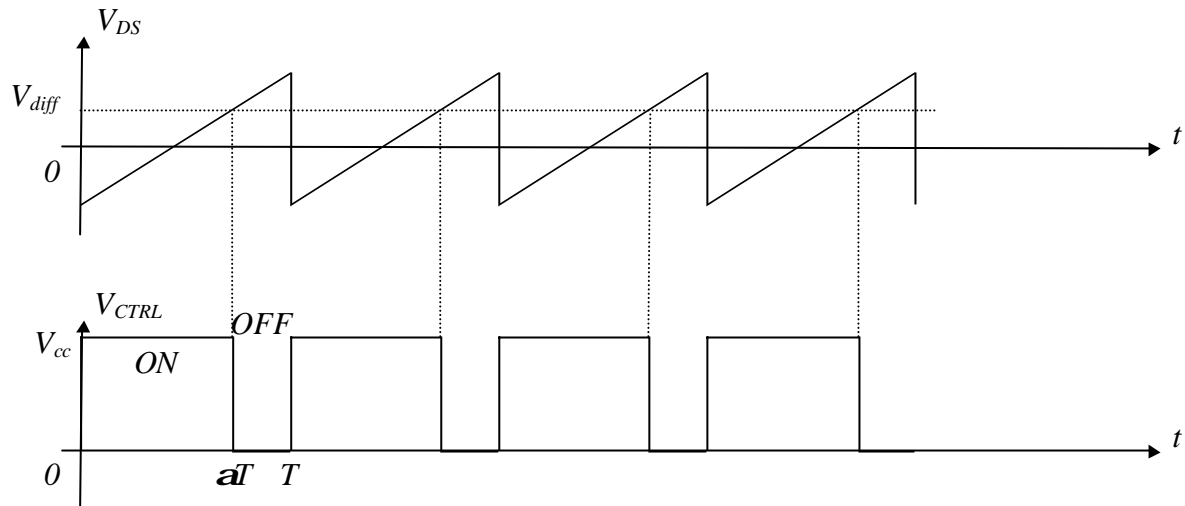


Figure 4-15. Génération de la tension de commande V_{CTRL} de l'interrupteur à l'aide d'un générateur de dent de scie.

5. Application des hacheurs série et parallèle: alimentation et freinage d'un moteur à courant continu à l'aide d'un hacheur réversible

Le montage étudié est décrit sur la figure 4-16.

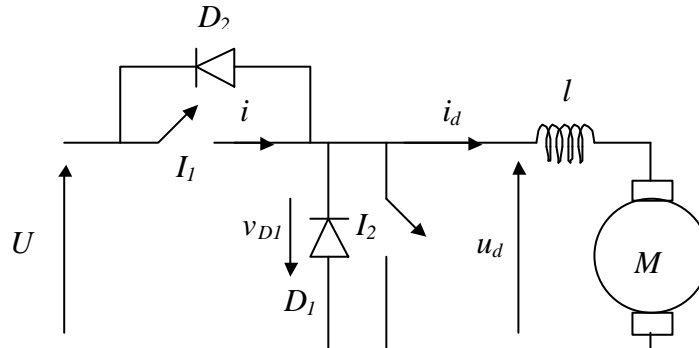


Figure 4-16.

Le hacheur série est constitué de la diode D_1 et de l'interrupteur I_1 . Le hacheur parallèle est constitué de la diode D_2 et de l'interrupteur I_2 .

La machine fonctionne en moteur lorsqu'elle est alimentée par le hacheur série (D_2 reste toujours bloquée car $U > u_d$ et I_2 est maintenu ouvert).

La machine fonctionne en génératrice (phase de freinage) et alimente la source U (batterie par exemple) lorsque le hacheur parallèle est utilisé (D_1 est toujours bloquée car lorsque I_2 est fermé $V_{D1} = 0$ et lorsque I_2 est ouvert D_2 est passante et $V_{D1} = -U$; I_1 est maintenu ouvert).