

Convertisseur Continu - Continu
Les montages hacheurs

Lycée Richelieu
TSI 1
Année scolaire 2006 - 2007
Sébastien GERGADIER

11 avril 2007

Table des matières

1	Les hacheurs	3
1.1	Introduction - Intérêt des hacheurs	3
1.2	Hacheur série à conversion directe	6
1.2.1	Principe de fonctionnement	6
1.2.2	Fonctionnement à courant ininterrompu	7
1.2.3	Fonctionnement à courant interrompu	11
1.2.4	Conclusion sur le hacheur série	15
1.2.5	Dimensionnement du filtre passe-bas LC	16
1.3	Hacheur parallèle à conversion directe	19
1.3.1	Principe de fonctionnement	19
1.3.2	Fonctionnement à courant de source ininterrompu	20
1.3.3	Dimensionnement des éléments l et C	22
1.4	Hacheurs à conversion indirecte	24
1.4.1	Hacheur à stockage inductif	24
1.4.2	Hacheur à stockage capacitif	27
1.5	Hacheurs à absorption sinusoïdale de courant	30

Préambule

Dans ce cours, nous adopterons les notations suivantes :

- Grandeurs dépendantes du temps : lettres minuscules $x(t)$
- Grandeurs constantes (moyenne, mini, maxi, efficace,...) : lettres majuscules X
- Grandeurs complexes : lettres majuscules soulignées \underline{X}

Chapitre 1

Les hacheurs

1.1 Introduction - Intérêt des hacheurs

Les hacheurs sont des convertisseurs statiques continu-continu permettant de fabriquer une source de tension continue variable à partir d'une source de tension continue fixe. La figure 1.1 rappelle le schéma de principe du hacheur.

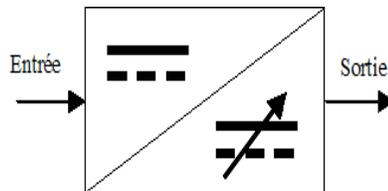


FIG. 1.1 – Schéma de principe du hacheur.

Il est évident que le procédé le plus simple pour transformer une tension continue fixe en une tension continue réglable est le montage en potentiomètre diviseur de tension décrit sur la figure 1.2.

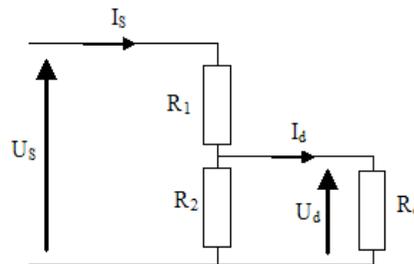


FIG. 1.2 – Montage potentiométrique.

Le réglage de α permet de faire varier la tension disponible aux bornes de la charge U_s :

$$U_s = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U_e = (1 - \alpha) U_e \quad \text{a vide} \quad (R_c = \infty)$$

Pour $\alpha=0$, on a $U_s = U_e$;

Pour $\alpha=1$, on a $U_s=0$.

L'inconvénient de ce montage est son rendement médiocre, ce qui s'avère critique pour des applications faisant intervenir des puissances non négligeables (quelques centaines de watt à plusieurs kilowatt).

Le rendement s'écrit :

$$\eta = \frac{P_s}{P_e}$$

avec :

$$P_s = U_s I_s \quad \text{et} \quad P_e = U_e I_e$$

Soit après calculs :

$$\eta = \frac{R_c R_2^2}{(R_c + R_2)((R_c + R_2)R_1 + R_c R_2)}$$

ou encore :

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

Le rendement η est maximum pour :

$$R_c = R_2 = (1 - \alpha) R$$

Par exemple, pour $R_1 = R_2 = R_c$ soit $\alpha = \frac{1}{2}$, on obtient :

$$\eta = \frac{1}{6} = 16\%$$

Soit 84% de la puissance gaspillée inutilement !

Ainsi les montages potentiométriques sont utilisés uniquement en électronique de faible puissance (quelques Watts au maximum).

En électronique de puissance, on fera systématiquement appel à des hacheurs. Ceci est le cas, pour l'alimentation des machines à courant continu de quelques Watts à plusieurs kilowatt, ainsi que pour les alimentations dans une gamme de puissance de quelques centaines de Watts plusieurs dizaines de kilowatt.

On distingue plusieurs types de hacheurs en fonction de l'application désirée, 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 1.3.

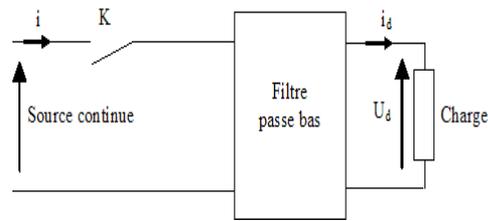


FIG. 1.3 – Principe du hacheur série.

L'interrupteur commandable K hache la tension d'alimentation U . Après filtrage, on obtient une tension de sortie U_s constante.

En faisant abstraction du filtre passe-bas (généralement inutile), on peut comparer ce montage au montage potentiométrique de la figure 1.4.

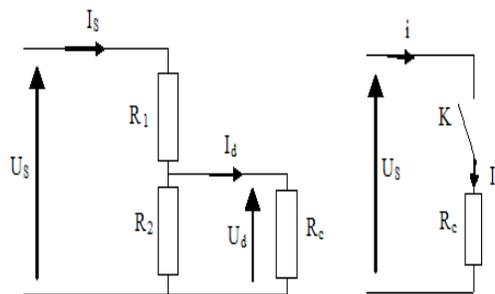


FIG. 1.4 – Comparaison du hacheur série avec le montage potentiométrique.

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 très peu en pratique) de puissance.

L'interrupteur commandable K pouvant être fermé (passant) ou ouvert (bloqué), on peut définir la notion de rapport cyclique. Le rapport cyclique α est défini comme le temps t_{ON} pendant lequel l'interrupteur K est fermé divisé par la période de fonctionnement du montage T , soit :

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

On définit également le temps pendant lequel l'interrupteur K est ouvert (bloqué) par :

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

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 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 statiques unidirectionnels. Dans la suite, seul le régime permanent est étudié.

1.2 Hacheur série à conversion directe

Ce montage hacheur série est aussi appelé hacheur abaisseur de tension ou dévolteur. Le schéma de principe d'un hacheur série est donné à la figure 1.5. On considère que l'interrupteur commandable K et la diode D comme étant parfaits. La charge doit être une source de courant (par exemple un moteur à courant continu). L'utilisation de ce montage est essentiellement destinée pour la commande en vitesse (ou en position) des machines à courant continu. Elle peut aussi servir comme source d'alimentation, on parle alors d'alimentation à découpage du type série. La connexion de la charge est donc réalisée par l'intermédiaire d'un filtre LC afin de satisfaire les règles d'interconnexion des sources.

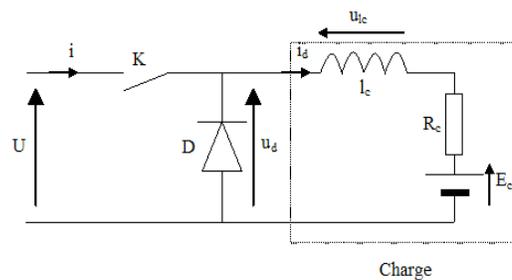


FIG. 1.5 – Schéma de principe d'un hacheur série pour la commande d'une MCC.

1.2.1 Principe de fonctionnement

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

Phase 1 : à $t=0$, l'interrupteur K est commandé (passant) pendant un temps αT , on a alors $u_d(t) = U$;

Phase 2 : entre αT et T , l'interrupteur K est ouvert (bloqué), on a alors $i(t) = 0$ et le courant circule à travers la diode D (appelée diode de roue libre). Donc $u_d(t) = 0$, tant que la diode conduit, soit tant que le courant $i_d(t)$ est non nul.

Phase 3 : 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 $i_d(t)$ s'annule ou non.

1.2.2 Fonctionnement à courant ininterrompu

On parle de fonctionnement du hacheur série à courant ininterrompu lorsque le courant $i_d(t)$ ne passe jamais par zéro. Par conséquent, seules les deux premières phases persistent.

Nous allons donc étudier les signaux des tensions et des courants lors de ces deux phases.

Phase 1 : $0 < t < \alpha T$

Durant cette première phase, l'interrupteur K est commandé et est donc passant ($v_K = 0$). La diode D est bloquée ($u_d = -v_D = U$).

Le schéma équivalent lors de cette phase est donc celui de la figure 1.6.

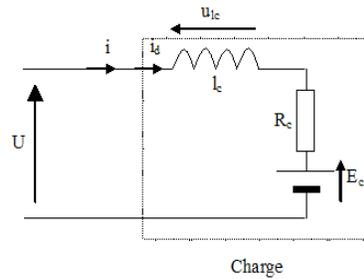


FIG. 1.6 – Schéma équivalent du hacheur série lors de la phase 1.

L'équation reliant le courant $i_d(t)$ aux sources de tension mises en jeu dans le système est donnée par la loi des mailles :

$$U = l_c \frac{di_d(t)}{dt} + R_c i_d(t) + E_c$$

Cette équation est une équation différentielle du premier ordre à coefficient constant. La solution de cette équation différentielle est :

$$i_d(t) = Ae^{-\frac{t}{\tau}} + B$$

Pour déterminer les constantes A, B et τ , il faut écrire les conditions initiale et finale. En effet, à $t=0$, $i_d(t) = I_{min}$ (régime permanent), et en $t = +\infty$, $i_d(t) = \frac{U-E_c}{R_c}$.

D'où :

$$\begin{cases} A = I_{min} - \frac{U-E_c}{R_c} \\ B = \frac{U-E_c}{R_c} \\ \tau = \frac{l_c}{R_c} \end{cases}$$

Par conséquent, on obtient :

$$i_d(t) = \left(I_{min} - \frac{U - E_c}{R_c} \right) e^{-\frac{R_c}{l_c}t} + \frac{U - E_c}{R_c} \quad (1.1)$$

Récapitulatif des données pour la première phase :

$$\begin{cases} v_K = 0 \\ u_D = -v_D = U \\ i(t) = i_d(t) = \left(I_{min} - \frac{U-E_c}{R_c} \right) e^{-\frac{R_c}{l_c}t} + \frac{U-E_c}{R_c} \\ i_D(t) = 0 \end{cases}$$

Phase 2 : $\alpha T < t < T$

Durant cette seconde phase, l'interrupteur K est bloqué et est donc ouvert ($i_K = 0$). La diode D est passante ($u_d = -v_D = 0$).

Le schéma équivalent lors de cette phase est donc celui de la figure 1.7.

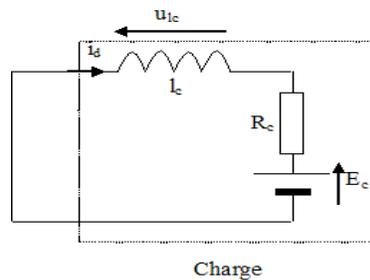


FIG. 1.7 – Schéma équivalent du hacheur série lors de la phase 2.

L'équation reliant le courant $i_d(t)$ aux sources de tension mises en jeu dans le système est donnée par la loi des mailles :

$$0 = l_c \frac{di_d(t)}{dt} + R_c i_d(t) + E_c$$

Cette équation est une équation différentielle du premier ordre à coefficient constant. La solution de cette équation différentielle est :

$$i_d(t) = De^{-\frac{t}{\tau}} + E$$

Pour déterminer les constantes D et E, il faut écrire les conditions initiale et finale. En effet, à $t = \alpha T$, $i_d(t) = I_{max}$, et en $t = +\infty$, $i_d(t) = -\frac{E_c}{R_c}$.

D'où :

$$\begin{cases} D = I_{max} + \frac{E_c}{R_c} \\ E = -\frac{E_c}{R_c} \end{cases}$$

Par conséquent, on obtient :

$$i_d(t) = \left(I_{max} + \frac{E_c}{R_c} \right) e^{-\frac{R_c}{L_c}(t-\alpha T)} - \frac{E_c}{R_c} \quad (1.2)$$

Récapitulatif des données pour la seconde phase :

$$\begin{cases} v_D = -u_D = 0 \\ v_K = -U \\ i(t) = 0 \\ i_D(t) = i_d(t) = \left(I_{max} + \frac{E_c}{R_c} \right) e^{-\frac{R_c}{L_c}(t-\alpha T)} - \frac{E_c}{R_c} \end{cases}$$

La figure 1.8 ci-dessous donne les formes d'ondes de la tension et du courant dans la charge en fonction du temps.

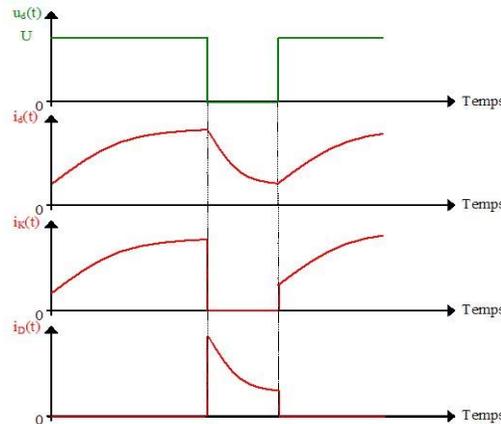


FIG. 1.8 – Formes d'onde des courants et tensions pour un hacheur série en conduction ininterrompue.

Si la fréquence de commande de l'interrupteur K est importante ($f \gg \frac{1}{T}$), les exponentielles peuvent être assimilées à des droites. La figure 1.9 donnée ci dessous donne les formes d'ondes des courants et des tensions en fonction du temps pour un hacheur série en conduction ininterrompue.

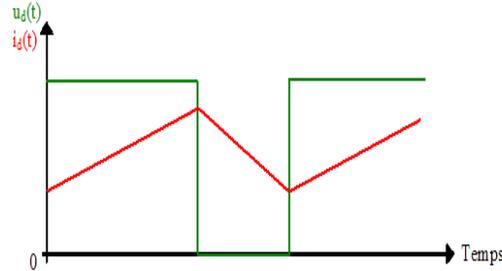


FIG. 1.9 – Formes d'onde des courants et tensions pour un hacheur série en conduction ininterrompue.

La valeur moyenne de la tension de sortie $u_d(t)$ est définie par :

$$U_{d0} = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T u_d(t) dt$$

soit dans notre cas :

$$U_{d0} = \frac{1}{T} \cdot \int_0^{\alpha T} u_d(t) dt + \frac{1}{T} \cdot \int_{\alpha T}^T u_d(t) dt$$

Tous calculs effectués, on obtient :

$$U_{d0} = \alpha U$$

Par conséquent, pour faire varier la valeur moyenne de la tension de sortie U_{d0} , il faut agir sur le rapport cyclique α .

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

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

- Si la charge est une batterie (E_c est imposée par l'état de la charge de la batterie), cette relation définit la valeur de I_{d0} .
- Si la charge est un moteur à courant continu, cette relation fixe la valeur de E_c . Et donc la valeur de la vitesse de rotation du moteur car $E_c = K\Omega$, sachant que I_{d0} dépend du moment du couple du moteur Γ .

L'ondulation du courant dans la charge $i_d(t)$ est défini par :

$$\Delta I = I_{max} - I_{min}$$

À l'aide des équations 1.4 et 1.5, et en se plaçant à $t = \alpha T$, on a :

$$I_{max} = I_{min} \cdot e^{-\frac{\alpha T}{\tau}} + \frac{U - E_c}{R_c} \cdot \left(1 - e^{-\frac{\alpha T}{\tau}}\right)$$

De la même manière, à l'aide des équations 1.4 et 1.5, et en se plaçant à $t = T$, on a :

$$I_{min} = I_{max} \cdot e^{-\frac{T-\alpha T}{\tau}} + \frac{E_c}{R_c} \cdot \left(1 - e^{-\frac{T-\alpha T}{\tau}}\right)$$

En remplaçant ces deux dernières expressions l'une dans l'autre, on obtient :

$$I_{max} = \frac{\frac{U}{R_c} \cdot \left(1 - e^{-\frac{\alpha T}{\tau}}\right)}{1 - e^{-\frac{T}{\tau}}} - \frac{E_c}{R_c}$$

$$I_{min} = \frac{\frac{U}{R_c} \cdot \left(e^{-\frac{T-\alpha T}{\tau}} - e^{-\frac{T}{\tau}}\right)}{1 - e^{-\frac{T}{\tau}}} - \frac{E_c}{R_c}$$

On obtient donc :

$$\Delta I = \frac{U}{R_c} \cdot \frac{\left(1 - e^{-\frac{\alpha T}{\tau}}\right) \left(1 - e^{-\frac{T-\alpha T}{\tau}}\right)}{1 - e^{-\frac{T}{\tau}}} \quad (1.3)$$

Remarques :

Dans l'équation 1.3 apparaît la période T de commande de l'interrupteur, par conséquent l'inverse de la fréquence f .

L'ordre de grandeur de la fréquence de commande de l'interrupteur K est de 10 à 100kHz. Par conséquent, $T \ll \tau$ et le rapport $\frac{T}{\tau}$ tend vers 0. Donc, en utilisant un développement limité en 0 et au premier ordre de l'exponentielle, il vient :

$$\Delta I = \frac{U}{R_c} \cdot \alpha \frac{T}{\tau} \cdot (1 - \alpha) = \frac{U \cdot \alpha \cdot (1 - \alpha)}{l_c \cdot f}$$

1.2.3 Fonctionnement à courant interrompu

On parle de fonctionnement du hacheur série à courant interrompu lorsque le courant $i_d(t)$ s'annule. Il est important de remarquer que ce courant ne peut pas être négatif avec la structure de la figure 1.3. Par conséquent, il faut étudier les trois séquences.

Nous allons donc étudier les signaux des tensions et des courants lors de ces trois séquences.

Phase 1 : $0 < t < \alpha T$

Durant cette première phase, l'interrupteur K est commandé et est donc passant ($v_K = 0$). La diode D est bloquée ($u_d = -v_D = U$).

Le schéma équivalent lors de cette phase est donc le même que celui de la figure 1.6.

L'équation reliant le courant $i_d(t)$ aux sources de tension mises en jeu dans le système est donnée par la loi des mailles :

$$U = l_c \frac{di_d(t)}{dt} + R_c i_d(t) + E_c$$

Cette équation est une équation différentielle du premier ordre à coefficient constant. La solution de cette équation différentielle est :

$$i_d(t) = Ae^{-\frac{t}{\tau}} + B$$

Pour déterminer les constantes A, B et τ , il faut écrire les conditions initiale et finale. En effet, à $t=0$, $i_d(t) = 0$ (régime permanent), et en $t = +\infty$, $i_d(t) = \frac{U-E_c}{R_c}$.

D'où :

$$\begin{cases} A = -\frac{U-E_c}{R_c} \\ B = \frac{U-E_c}{R_c} \\ \tau = \frac{l_c}{R_c} \end{cases}$$

Par conséquent, on obtient :

$$i_d(t) = \frac{U - E_c}{R_c} \left(1 - e^{-\frac{R_c}{l_c} t}\right)$$

Récapitulatif des données pour la première phase :

$$\begin{cases} v_K = 0 \\ u_D = -v_D = U \\ i(t) = i_d(t) = \frac{U-E_c}{R_c} \left(1 - e^{-\frac{R_c}{l_c} t}\right) \\ i_D(t) = 0 \end{cases}$$

Phase 2 : $\alpha T < t < \beta T$

Durant cette seconde phase, l'interrupteur K est bloqué et est donc ouvert ($i_K = 0$). La diode D est passante ($u_d = -v_D = 0$) et le courant $i_d(t)$ est positif.

Le schéma équivalent lors de cette phase est donc le même que celui de la figure 1.7.

L'équation reliant le courant $i_d(t)$ aux sources de tension mises en jeu dans le système est donnée par la loi des mailles :

$$0 = l_c \frac{di_d(t)}{dt} + R_c i_d(t) + E_c$$

Cette équation est une équation différentielle du premier ordre à coefficient constant. La solution de cette équation différentielle est :

$$i_d(t) = D e^{-\frac{t}{\tau}} + E$$

Pour déterminer les constantes D et E, il faut écrire les conditions initiale et finale. En effet, à $t = \alpha T$, $i_d(t) = I_{max}$, et en $t = \beta T$, $i_d(t) = 0$.

D'où :

$$\begin{cases} D = I_{max} - \frac{E_c}{R_c} \\ E = \frac{E_c}{R_c} \end{cases}$$

Par conséquent, on obtient :

$$i_d(t) = -\frac{E_c}{R_c} \left(1 - e^{-\frac{R_c}{l_c}(t-\alpha T)} \right) + I_{max}$$

Récapitulatif des données pour la seconde phase :

$$\begin{cases} v_D = -u_D = 0 \\ v_K = -U \\ i(t) = 0 \\ i_D(t) = i_d(t) = -\frac{E_c}{R_c} \left(1 - e^{-\frac{R_c}{l_c}(t-\alpha T)} \right) + I_{max} \end{cases}$$

La valeur de β est donnée en écrivant que en $t = \beta T$, le courant $i_d(t)$ s'annule, c'est à dire :

$$i_d(t) = -\frac{E_c}{R_c} \left(1 - e^{-\frac{R_c}{l_c}(\beta T)} \right) + I_{max} = 0$$

soit :

$$\beta = -\frac{\tau}{T} \ln \left(1 - \frac{R_c}{E_c} I_{max} \right)$$

Phase 3 : $\beta T < t < T$

Durant cette dernière phase, l'interrupteur K est toujours bloqué ($i_K = 0$). La diode D est aussi bloquée ($u_d = -v_D = E_c$) car le courant $i_d(t)$ est nul.

Le schéma équivalent lors de cette phase est donc celui de la figure 1.10.

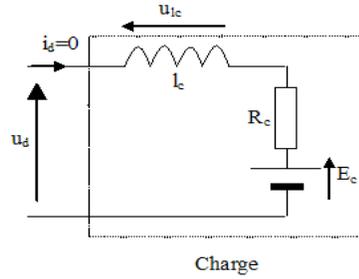


FIG. 1.10 – Schéma équivalent du hacheur série lors de la phase 3.

Récapitulatif des données pour la troisième phase :

$$\begin{cases} i_K = 0 \\ u_d = -v_D = E_c \\ i(t) = i_d(t) = 0 \\ i_D(t) = 0 \end{cases}$$

Si la fréquence de commande de l'interrupteur K est importante ($f \gg \frac{1}{\tau}$), les exponentielles peuvent être assimilées à des droites. La figure 1.11 donnée ci dessous donne les formes d'ondes des courants et des tensions en fonction du temps pour un hacheur série en conduction interrompue.

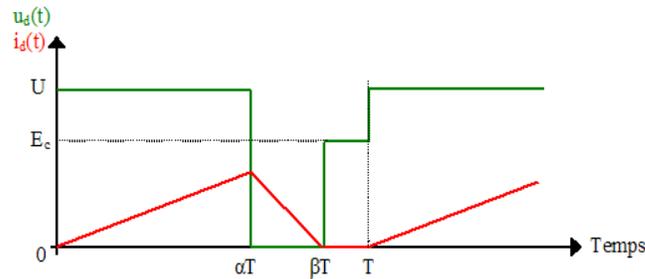


FIG. 1.11 – Formes d'onde des courants et tensions pour un hacheur série en conduction interrompue.

La valeur moyenne de la tension de sortie $u_d(t)$ est toujours définie par :

$$U_{d0} = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T u_d(t) dt$$

soit dans notre cas :

$$U_{d0} = \frac{1}{T} \cdot \int_0^{\alpha T} u_d(t) dt + \frac{1}{T} \cdot \int_{\alpha T}^{\beta T} u_d(t) dt + \frac{1}{T} \cdot \int_{\beta T}^T u_d(t) dt$$

Tous calculs effectués, on obtient :

$$U_{d0} = \alpha U + (1 - \beta)E_c$$

Par conséquent, pour faire varier la valeur moyenne de la tension de sortie U_{d0} , il faut agir sur le rapport cyclique α . En effet, la valeur de β ne dépendant que des éléments constitutifs du montage, seule la variable α est modifiable.

1.2.4 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 α .

On règle la valeur de U_{d0} en modifiant le rapport cyclique α :

- Solution 1 : Soit en modifiant la durée de conduction de l'interrupteur K sans modifier la période T de commande. On parle alors de Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI) ou PWM (Pulse Wave Modulation).
- Solution 2 : Soit en modifiant la fréquence de commande ($f = \frac{1}{T}$) sans modifier la durée de conduction de l'interrupteur K.

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 1.12. Ce filtre passe-bas permet d'éliminer les harmoniques élevés de $u_d(t)$.

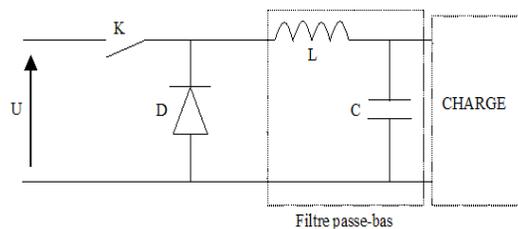


FIG. 1.12 – Hacheur série avec filtre passe-bas permettant d'obtenir une tension de sortie quasi-constante.

Dans le cas où la source de sortie est une source de courant (machine à courant continu par exemple), la présence du filtre passe-bas n'est pas obligatoire. En effet, en raison des règles d'interconnexion des sources (notamment la règle 3, voir cours Synthèse des convertisseurs statiques), il n'est pas possible d'interconnecter des sources de mêmes natures. Dans ce cas, le filtre n'est pas nécessaire, mais l'ajout d'une inductance L seule en série avec la charge, permet de s'assurer que la source de sortie se comporte bien

comme une source de courant, et permet de plus, de limiter l'ondulation du courant dans la charge.

Dans les autres cas, la présence d'un filtre passe-bas du type LC est indispensable. On parle alors plutôt d'alimentation à découpage. Nous allons dans le sous chapitre suivant proposer une méthode permettant de dimensionner les éléments L et C du filtre passe-bas.

1.2.5 Dimensionnement du filtre passe-bas LC

Le rôle du filtre passe-bas est de limiter les ondulations du courant dans la charge, ainsi que les ondulations de la tension aux bornes de la charge. On rappelle que lorsque la charge est du type source de courant (Machine à courant continu par exemple), seule une inductance L est nécessaire.

La valeur de cette inductance est déterminée par la relation 1.2.2.

Dans le cas des alimentations à découpage, il est nécessaire de placer un filtre LC du type passe-bas. Cela signifie, que ce filtre doit laisser passer la composante continue, ainsi que certains harmoniques de fréquences faibles. En général, on laisse passer les 2 ou 3 premiers harmoniques non nuls.

Il existe plusieurs méthodes qui permettent de dimensionner l'inductance L et le condensateur C. Mais seulement 3 sont couramment utilisées. Dans ce cours, nous en présenterons seulement 2, la troisième sera présentée lors du cours sur le filtrage.

Pour les méthodes proposées ci dessous, on se place dans le cas, d'une conduction continue (ininterrompue) du courant dans la charge. Le cahier des charges imposera une ondulation maximale du courant dans la charge ΔI et une ondulation maximale ΔV_s de la tension de sortie. Le schéma de principe du filtre passe-bas LC est donné sur la figure 1.13.

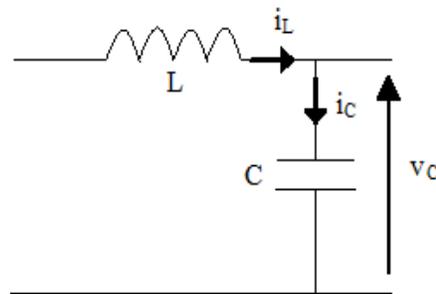


FIG. 1.13 – Schéma de principe du filtre passe-bas LC.

Tout signal variable $x(t)$, peut se représenter comme la somme d'un signal continu X (valeur moyenne) et d'un signal alternatif noté \tilde{x} .

Première Méthode :

Avec les conventions définies sur la figure 1.13, on a :

$$i_C = C \cdot \frac{dv_C}{dt}$$

Le courant circulant dans le condensateur C, est composé uniquement de la composante alternative du courant i_L . En effet, l'impédance Z_C d'un condensateur est $Z_C = \frac{1}{jC\omega}$. Cette impédance est infinie pour la composante continue ($\omega = 0$), par conséquent, seule la composante alternative circule dans le condensateur.

On a donc :

$$i_C = \tilde{i}_L$$

Si l'on suppose une fréquence de hachage suffisamment importante pour que les formes du courant soient composées de portions de droite, la tension aux bornes du condensateur (égale aussi à la tension aux bornes de la charge) est composée de portions de parabole.

En effet,

$$V_s(t) = \frac{1}{C} \cdot \int i_C(t) \cdot dt$$

La forme d'onde de la tension de sortie est donc illustrée par la figure 1.14 ci-dessous.

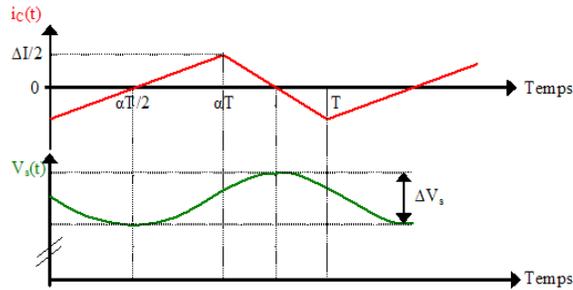


FIG. 1.14 – Allure de la tension de sortie avec filtre LC.

L'ondulation crête à crête sera prise entre deux instants successifs où le courant i_C s'annule. Soit par exemple, entre $\frac{\alpha}{2}T$ et αT et entre αT et $\frac{\alpha+1}{2}T$. On a donc :

$$\Delta V_s = \frac{1}{C} \cdot \left[\int_{\frac{\alpha T}{2}}^{\alpha T} \tilde{i}_L \cdot dt + \int_{\alpha T}^{\frac{\alpha+1}{2}T} \tilde{i}_L \cdot dt \right]$$

Ce qui revient à :

$$\Delta V_s = \frac{1}{C} \cdot \left[\left(\frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta I}{2} \cdot \frac{\alpha T}{2} \right) + \left(\frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta I}{2} \cdot \frac{(1-\alpha)T}{2} \right) \right]$$

Soit :

$$\Delta V_s = \frac{\Delta I}{8.C.f} = \frac{\alpha.(1-\alpha).U}{8.L.C.f^2}$$

Remarques :

- L'ondulation de la tension de sortie dépend de l'ondulation du courant.
- L'ondulation de la tension de sortie est inversement proportionnelle à la capacité C.
- L'ondulation de la tension de sortie décroît plus rapidement avec la fréquence que l'ondulation du courant. (Variation en $\frac{1}{f^2}$).

Deuxième Méthode :

À l'aide de la figure 1.15 ci-dessous, on s'aperçoit que pour chaque demi-période de durée T ($T = \frac{1}{f_{hachage}}$), le condensateur emmagasine ou restitue une charge Q conduisant à une variation de la tension à ses bornes.

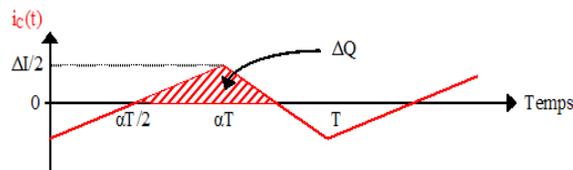


FIG. 1.15 – Quantité de charge accumulée et restituée par le condensateur C.

En reprenant l'hypothèse que la fréquence de hachage est suffisamment importante pour que les portions de courant soient assimilés à des droites, il vient, en raison de :

$$\Delta Q = C.\Delta V_s$$

Soit :

$$\Delta V_s = \frac{1}{C} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta I}{2} \cdot \frac{T}{2} = \frac{\Delta I}{8.C.f} = \frac{\alpha.(1-\alpha).E}{8.L.C.f^2}$$

1.3 Hacheur parallèle à conversion directe

Le hacheur parallèle est aussi appelé hacheur survolteur ou élévateur de tension. Ce montage permet de fournir une tension moyenne U_{d0} à partir d'une source de tension $U < U_{d0}$. La source d'entre est une source de courant en raison de la présence de l'inductance l . Le montage étudié est donné à la figure 1.16.

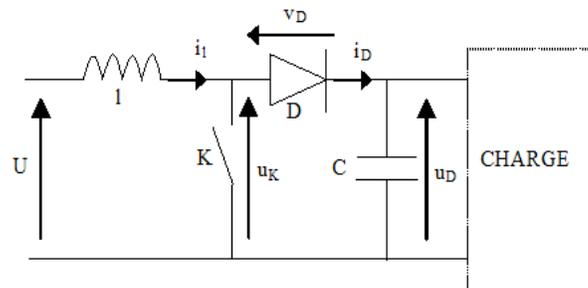


FIG. 1.16 – Schéma de principe d'un hacheur parallèle.

Les applications principales du hacheur parallèle sont les alimentations à découpage de puissance régulées.

1.3.1 Principe de fonctionnement

On se placera dans le cas où la fréquence de commande de l'interrupteur K est suffisamment importante pour considérer les portions exponentielles à des droites. On distingue deux phases de fonctionnement qui sont :

- Phase 1 : Lorsque l'interrupteur K est fermé, la diode D 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 .
- Phase 2 : Lorsque l'interrupteur K est ouvert, l'étage de sortie (condensateur + 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 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. Le montage hacheur parallèle n'est que très rarement utilisé en conduction discontinue (fonctionnement à courant de source interrompu), on ne fera pas l'étude de ce mode de fonctionnement.

1.3.2 Fonctionnement à courant de source ininterrompu

Etude de la première phase : $0 < t < \alpha T$

Pendant cette phase, l'interrupteur K est fermé et la diode D est bloquée. Le schéma équivalent lors de cette phase est donc celui de la figure 1.17.

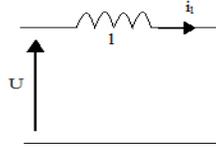


FIG. 1.17 – Schéma équivalent du hacheur parallèle lors de la première phase.

L'équation reliant le courant $i_d(t)$ aux sources de tension mises en jeu dans le système est donnée par la loi des mailles :

$$U = l \frac{di_l(t)}{dt}$$

Cette équation est une équation différentielle du premier ordre à coefficient constant. La solution de cette équation différentielle est :

$$i_l(t) = \frac{U}{l}t + i_l(0) = \frac{U}{l}t + I_{min} \quad (1.4)$$

Récapitulatif des données pour la première phase :

$$\begin{cases} v_K(t) = 0 \\ i_d(t) = 0 \\ v_l(t) = U \\ i_l(t) = \frac{U}{l}t + I_{min} \end{cases}$$

Etude de la deuxième phase : $\alpha T < t < T$

Pendant cette phase, l'interrupteur K est ouvert et la diode D est passante. Le schéma équivalent lors de cette phase est donc celui de la figure 1.18.

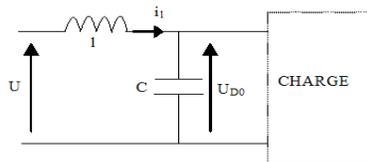


FIG. 1.18 – Schéma équivalent du hacheur parallèle lors de la seconde phase.

L'équation reliant le courant $i_d(t)$ aux sources de tension mises en jeu dans le système est donnée par la loi des mailles :

$$U = l \frac{di_l(t)}{dt} + U_{d0}$$

Cette équation est une équation différentielle du premier ordre à coefficient constant. La solution de cette équation différentielle est :

$$i_l(t) = \frac{U - U_{d0}}{l}(t - \alpha T) + I_{max} \quad (1.5)$$

avec :

$$I_{max} = i_l(\alpha T) = \frac{U}{l}\alpha T + i_l(0) = \frac{U}{l}\alpha T + I_{min}$$

Durant cette seconde phase, le courant $i_l(t)$ doit absolument décroître. En effet, si le courant ne décroissait pas, le courant tendrait vers l'infini. Par conséquent, il faut :

$$U < U_{d0}$$

Récapitulatif des données pour la seconde phase :

$$\begin{cases} v_K(t) = U_{d0} \\ v_l(t) = U - U_{d0} \\ i_l(t) = i_d(t) = \frac{U - U_{d0}}{l}(t - \alpha T) + I_{max} \end{cases}$$

La figure 1.19 donnée ci dessous donne les formes d'ondes des courants et des tensions en fonction du temps pour un hacheur parallèle en conduction ininterrompue.

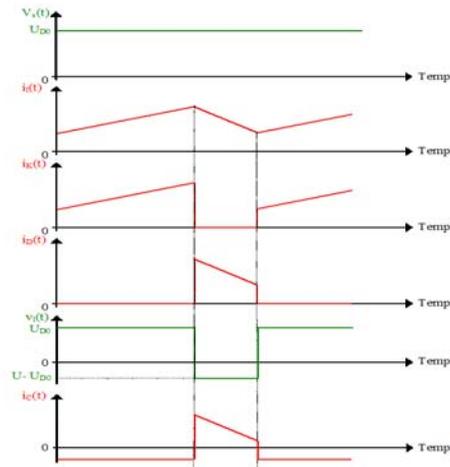


FIG. 1.19 – Formes d'onde des courants et tensions pour un hacheur parallèle en conduction ininterrompue.

On obtient très simplement la relation entre U_{d0} et U en considérant que la valeur moyenne de la tension aux bornes de l'inductance l (V_{l0}) est nulle.

En effet :

$$V_{l0} = \frac{U\alpha T + (U - U_{d0})((1 - \alpha)T)}{T} = 0$$

D'où directement :

$$\frac{U_{d0}}{U} = \frac{1}{1 - \alpha} \quad (1.6)$$

En considérant un circuit sans pertes ($\eta=1$), la puissance moyenne délivrée par la source est égale à la puissance moyenne disponible en sortie, soit :

$$P_{source} = UI_{l0} = P_{charge} = U_{d0}I_{d0}$$

Par conséquent :

$$\frac{I_{d0}}{I_{l0}} = 1 - \alpha$$

Par conséquent, pour faire varier la valeur moyenne de la tension de sortie U_{d0} , il faut agir sur le rapport cyclique α .

1.3.3 Dimensionnement des éléments l et C

Dimensionnement de l'inductance l

Remarque :

L'ondulation du courant fourni par la source d'entrée i_l à la même forme que le courant de sortie du hacheur série.

À partir des équations 1.4 et 1.5, l'ondulation du courant de la source d'entrée, s'exprime par :

$$\Delta I_l = I_{max} - I_{min} = \frac{U\alpha}{l.f}$$

Soit avec l'équation 1.6, il vient :

$$\Delta I_l = \frac{U_{d0} \cdot \alpha \cdot (1 - \alpha)}{l.f}$$

Dimensionnement de la capacité C

Première Méthode :

Le courant circulant dans le condensateur C , est composé uniquement de la composante alternative du courant i_D .

On a donc :

$$i_C = \tilde{i}_D$$

Si l'on suppose une fréquence de hachage suffisamment importante pour que les formes du courant soient composés de portions de droite, la tension aux bornes du condensateur (égale aussi à la tension aux bornes de la charge) est composée de droite et de portions de parabole.

En effet,

$$V_s(t) = \frac{1}{C} \cdot \int \tilde{i}_D(t) \cdot dt$$

La forme d'onde de la tension de sortie est donc illustrée par la figure 1.20 ci-dessous.

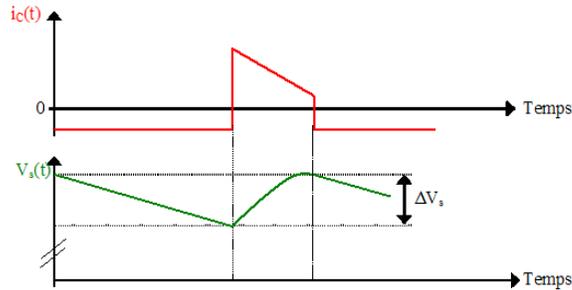


FIG. 1.20 – Allure de la tension de sortie avec un hacheur parallèle avec ondulation de sortie.

L'ondulation crête à crête sera prise entre deux instants successifs où le courant i_C s'annule. Soit par exemple, entre 0 et αT .

On a donc :

$$\Delta V_s = \frac{I_{D_{moyen}} \alpha}{C \cdot f}$$

Remarques :

- L'ondulation de la tension de sortie dépend de la valeur moyenne du courant de sortie.
- L'ondulation de la tension de sortie est inversement proportionnelle à la capacité C .

Deuxième Méthode :

À l'aide de la figure 1.21, on s'aperçoit que pour chaque demi-période de durée T ($T = \frac{1}{f_{hachage}}$), le condensateur emmagasine ou restitue une charge Q conduisant à une variation de la tension à ses bornes.

En reprenant l'hypothèse que la fréquence de hachage est suffisamment importante pour que les portions de courant soient assimilées à des droites, il vient, en raison de :

$$\Delta Q = C \cdot \Delta V_s$$

Soit :

$$\Delta V_s = \frac{\alpha T \cdot I_{D_{moyen}}}{C}$$

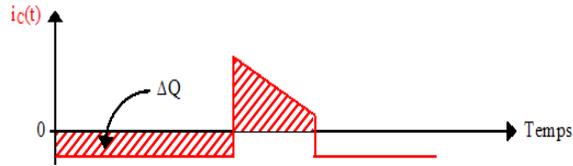


FIG. 1.21 – Quantité de charge accumulée et restituée par le condensateur C avec un hacheur parallèle.

1.4 Hacheurs à conversion indirecte

Pour commander le transfert d'énergie entre deux sources de même nature, sans changer la nature de l'une d'entre elles, il faut utiliser un hacheur à liaison indirect ou à accumulation. Celui-ci comporte donc un élément de stockage de l'énergie, inductance ou condensateur, que l'on relie, tantôt à l'entrée, tantôt à la sortie. Source d'entrée et source de sortie ne sont jamais reliées directement.

1.4.1 Hacheur à stockage inductif

Lorsque le montage hacheur est monté entre un générateur de tension et un récepteur de tension, l'élément de stockage doit être une inductance. Celle-ci joue le rôle d'une source de courant reliée à l'entrée (phase de charge), ou à la sortie (Phase de décharge). La figure 1.22 ci-dessous donne le schéma de montage avec interrupteurs statiques K_1 et K_2 de ce hacheur souvent appelé abaisseur-élévateur ou Buck-boost convertter.

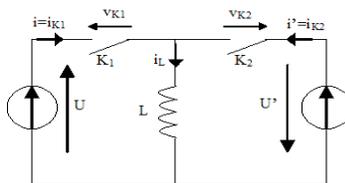


FIG. 1.22 – Schéma de principe du hacheur à stockage inductif.

Les deux interrupteurs doivent être complémentaires pour que les deux sources de tension ne soient jamais reliées directement et pour que l'inductance L ne soit jamais en court-circuit.

La tension de sortie U' doit être positive dans le sens indiqué pour que, en régime permanent, la tension aux bornes de l'inductance L ait une valeur moyenne nulle.

Phase lorsque K_1 est fermé :

$$\begin{cases} v_{K_1}(t) = 0 \\ i_{K_1}(t) = i_L \\ v_{K_2}(t) = -(U + U') \\ i_{K_2}(t) = 0 \end{cases}$$

Phase lorsque K_2 est fermé :

$$\begin{cases} v_{K_1}(t) = (U + U') \\ i_{K_1}(t) = 0 \\ v_{K_2}(t) = 0 \\ i_{K_2}(t) = i_L \end{cases}$$

Dans l'objectif de déterminer la nature et le type des interrupteurs statiques K_1 et K_2 , on peut se reporter aux caractéristiques statiques et dynamiques de la figure 1.23 ci-dessous.

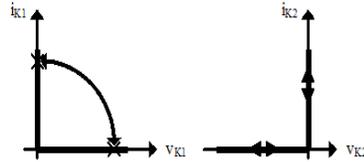


FIG. 1.23 – Caractéristiques statiques et dynamiques des interrupteurs K_1 et K_2 .

L'interrupteur K_1 doit être commandé à l'ouverture et à la fermeture, par conséquent, il doit s'agir d'un transistor IGBT (ou alors un transistor MOS). L'interrupteur K_2 doit être une diode.

Etude des formes d'ondes des courants et tensions :

On se place dans le cas d'une conduction continue. Le courant dans l'inductance L ne s'annule jamais en régime établi.

Phase lorsque K_1 est fermé : On pose que K_1 conduit pour $0 < t < \alpha T$.

On a donc :

$$\begin{cases} i = i_{K_1} = i_L \\ i' = 0 \\ v_{K_2} = -(U + U') \end{cases}$$

Pendant cette phase, l'interrupteur K_1 conduit, donc la tension aux bornes de l'inductance L vaut U . On a donc :

$$L \cdot \frac{di_L}{dt} = U > 0$$

donc, le courant dans l'inductance croît linéairement.

Phase lorsque K_2 est fermé : On pose que K_2 conduit pour $\alpha T < t < T$.

On a donc :

$$\begin{cases} i_L = i' = i_{K_2} \\ i = 0 \\ v_{K_1} = (U + U') \end{cases}$$

Pendant cette phase, l'interrupteur K_2 conduit, donc la tension aux bornes de l'inductance L vaut $-U'$. On a donc :

$$L \cdot \frac{di_L}{dt} = -U' < 0$$

donc, le courant dans l'inductance décroît linéairement.

Forme d'ondes des courants et tensions pour un hacheur abaisseur-élevateur :

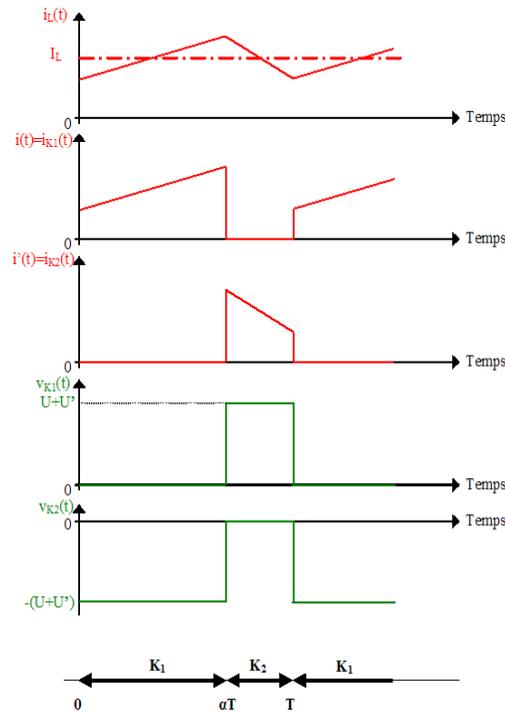


FIG. 1.24 – Forme d'ondes des tensions et courants en conduction continue pour un hacheur à stockage inductif.

En régime établi (régime permanent), l'énergie accumulée dans l'inductance L pendant la première phase, est entièrement restituée pendant la seconde phase. Par conséquent, les valeurs moyennes du courant dans l'inductance L , pendant les deux phases sont égales.

On a donc pour les valeurs moyennes du courant d'entrée et du courant de sortie :

$$I = \alpha I_L$$

et

$$I' = (1 - \alpha) I_L$$

Si l'on néglige les pertes à l'intérieur du hacheur à stockage inductif, la puissance moyenne est la même à l'entrée et à la sortie.

Par conservation de la puissance ($P_e = UI = P_s = U'I'$), on en déduit :

$$\frac{U'}{U} = \frac{I}{I'} = \frac{\alpha}{1 - \alpha}$$

Donc, théoriquement, si α varie de 0 à 1, le rapport $\frac{U'}{U}$ varie de 0 à l'infini. Obtenir une tension de sortie U' infinie n'est pas possible dans la réalité. En effet, nous avons négligé les chutes de tension dans les interrupteurs, ainsi que la résistance interne de l'inductance L .

1.4.2 Hacheur à stockage capacitif

Si le hacheur doit relier deux sources de courant, l'élément d'accumulation doit être un condensateur. Ce montage est plus connu sous le nom de hacheur de Cük ou Cük converter.

La figure 1.25 ci-dessous donne le schéma de montage avec deux interrupteurs statiques K_1 et K_2 de ce hacheur à stockage capacitif. Ceux-ci doivent être complémentaires. Dans l'objectif de déterminer la nature et le type des

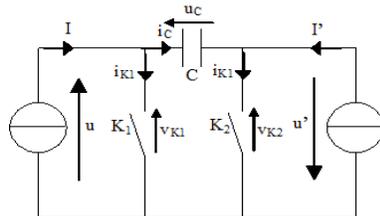


FIG. 1.25 – Schéma de principe du hacheur à stockage capacitif.

interrupteurs statiques K_1 et K_2 , on peut se reporter aux caractéristiques statiques et dynamiques de la figure 1.26 ci-dessous. L'interrupteur K_1 doit être commandé à l'ouverture et à la fermeture, par conséquent, il doit s'agir d'un transistor IGBT (ou alors un transistor MOS). L'interrupteur K_2 doit être une diode.

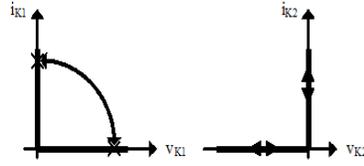


FIG. 1.26 – Caractéristiques statiques et dynamiques des interrupteurs K_1 et K_2 .

Etude des formes d'ondes des courants et tensions :

On se place dans le cas d'une conduction continue. La tension aux bornes du condensateur C ne s'annule jamais en régime établi.

Phase lorsque K_1 est fermé :

On pose que K_1 conduit pour $0 < t < \alpha T$.

On a donc :

$$\begin{cases} u = 0 \\ u' = u_C \\ i_{K_1} = (I + I') \\ v_{K_1} = 0 \\ i_{K_2} = 0 \\ v_{K_2} = -u' \end{cases}$$

Pendant cette phase, l'interrupteur K_1 conduit, donc le courant i_C dans le condensateur C vaut $-I'$. On a donc :

$$C \cdot \frac{du_C}{dt} = -I' < 0$$

donc, la tension aux bornes du condensateur décroît linéairement.

Phase lorsque K_2 est fermé :

On pose que K_2 conduit pour $\alpha T < t < T$.

On a donc :

$$\begin{cases} u = u_C \\ u' = 0 \\ i_{K_1} = 0 \\ v_{K_1} = u_C \\ i_{K_2} = I + I' \\ v_{K_2} = 0 \end{cases}$$

Pendant cette phase, l'interrupteur K_2 conduit, donc le courant i_C dans le condensateur C vaut I . On a donc :

$$C \cdot \frac{du_C}{dt} = I > 0$$

donc, la tension aux bornes du condensateur croît donc linéairement.

Forme d'ondes des courants et tensions pour un hacheur de Cük :

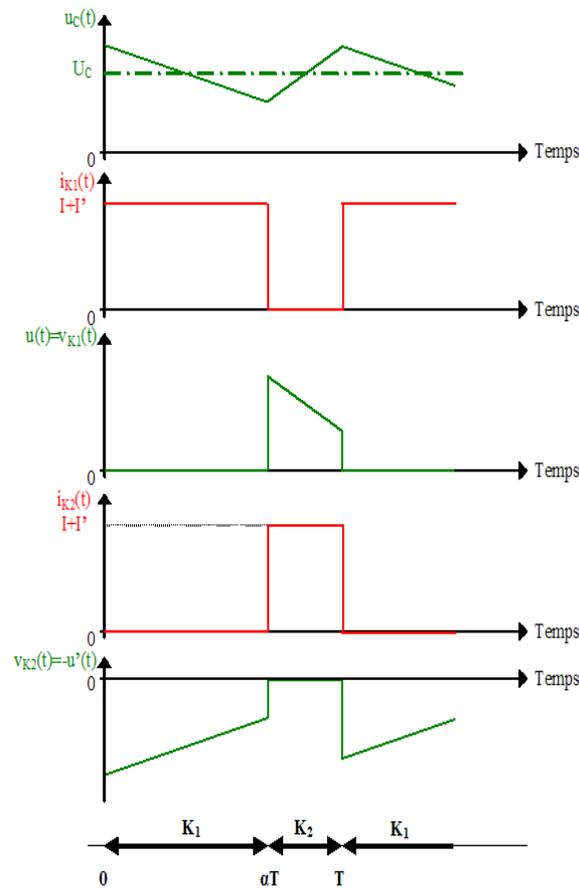


FIG. 1.27 – Forme d'ondes des tensions et courants en conduction continue pour un hacheur à stockage capacitif.

En régime établi (régime permanent), l'énergie accumulée dans le condensateur C pendant la première phase, est entièrement restituée pendant la seconde phase. Par conséquent, les valeurs moyennes de la tension U_c aux bornes du condensateur C , pendant les deux phases sont égales.

On a donc pour les valeurs moyennes des tensions d'entrée et de sortie :

$$U = (1 - \alpha)U_C$$

et

$$U' = \alpha U_C$$

Si l'on néglige les pertes à l'intérieur du hacheur à stockage inductif, la puissance moyenne est la même à l'entrée et à la sortie.

Par conservation de la puissance ($P_e = UI = P_s = U'I'$), on en déduit :

$$\frac{U'}{U} = \frac{I}{I'} = \frac{\alpha}{1 - \alpha}$$

1.5 Hacheurs à absorption sinusoïdale de courant

Ce chapitre sera étudié pendant votre deuxième année de formation (TSI2), car il met en oeuvre des compétences et des notions non vues cette année, notamment les notions d'asservissement.