

4.2 Étude du hacheur abaisseur/élevateur (Buck/Boost)

Le convertisseur abaisseur/élevateur (buck/boost) est appelé ainsi car il possède l'aptitude à fournir une tension en sortie plus ou moins élevée que celle appliquée en son entrée. Cela dépend de la valeur du rapport cyclique α .

Le montage considéré est illustré sur la figure 4.16.

Rappelons que les mêmes hypothèses sont précédentes adoptés,

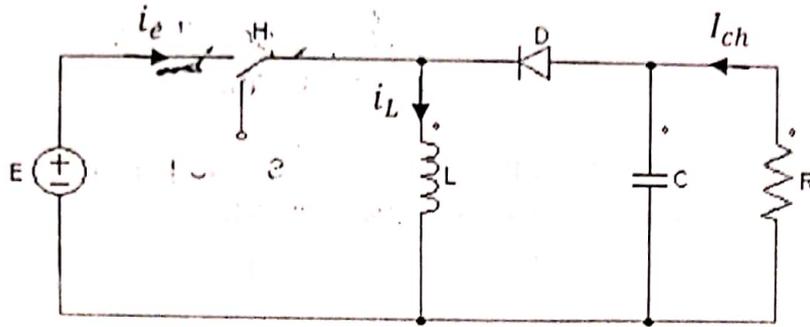


Figure 4.16 Hacheur Buck/Boost

Les démarches pour l'analyse théorique de ce montage est la même que déjà vue lors de l'étude des hacheurs précédant, c'est pourquoi on va s'en tenir qu'à la démonstration de la relation fondamentale liant les grandeurs d'entrées et de sorties.

➤ Quand $0 < t < \alpha T$

L'interrupteur H est commandé à la fermeture, la bobine emmagasine alors de l'énergie.

$$v_L = -E$$

➤ Quand $0 < t < \alpha T$

À $t = \alpha T$ l'interrupteur H est ouvert, la diode D devient alors conductrice.

$$v_L = V_{ch}$$

On peut ainsi calculer l'expression de la valeur moyenne de v_L :

$$\begin{aligned} \langle v_L \rangle &= \frac{1}{T} \int_0^T v_L dt \\ \langle v_L \rangle &= \frac{1}{T} \left[\int_0^{\alpha T} -E dt + \int_{\alpha T}^T V_{ch} dt \right] = -\alpha E + (1 - \alpha)V_{ch} \end{aligned}$$

Et sachant que $\langle v_L \rangle = 0$ on déduit :

$$V_{ch} = \frac{\alpha}{1 - \alpha} E \quad (4.11)$$

Etant donné que tous les éléments sont supposés parfaits, le rendement théorique de ce convertisseur est égal à l'unité. On peut ainsi écrire:

$$E i_e = V_{ch} I_{ch}$$

En combinant avec l'équation (4.11), on détermine l'expression du courant d'entrée:

$$i_e = \frac{\alpha}{1-\alpha} I_{ch}$$

D'après l'expression (4.11) on constate que le hacheur buck/boost permet d'obtenir en sortie une tension qui sera, selon le rapport cyclique α , plus faible (pour $\alpha < 0,5$) ou plus élevée (pour $\alpha > 0,5$) que la tension en entrée.

4.3 Hacheurs réversibles.

Les hacheurs étudiés précédemment permettent au flux d'énergie de passer uniquement dans un seul sens. Or, dans pas mal d'applications (l'entraînement électrique en est un exemple) on a recours au transfert d'énergie dans les deux sens, comme dans le cas du freinage par récupération d'énergie.

C'est pourquoi on a préféré d'analyser quelques montages hacheurs dit réversibles. Il est alors préférable de définir les quadrants de fonctionnement selon le signe de la tension et du courant de la charge comme sur la figure 4.17 :

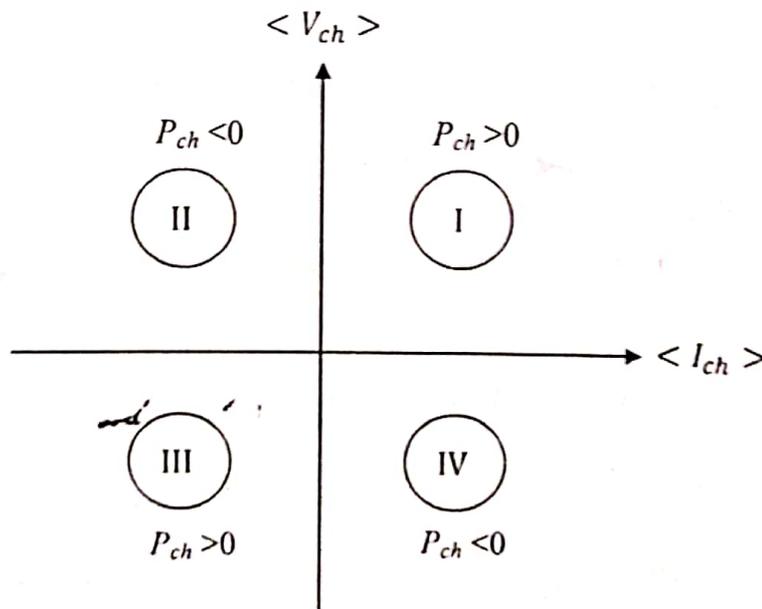


Figure 4.17 Quadrants de fonctionnement des convertisseurs

4.3.1 Hacheurs réversibles deux quadrants

Les convertisseurs deux quadrants sont ceux qui permettent la réversibilité (donc le changement de signe) soit du courant ou de la tension.

4.3.1 Hacheurs réversibles en courant

L'application type de ce hacheur est dans la traction électrique avec une machine à courant continu (MCC) lors du freinage par récupération d'énergie.

Le montage du convertisseur est représenté sur la figure 4.18.

Les transistors IGBT sont rendus bidirectionnels en courant par l'adjonction d'une diode montée en antiparallèle.

L'induit de la MCC est modélisé une charge R-L-E représentant respectivement la résistance des enroulements statorique, la force contre électromotrice, et l'inductance du bobinage statorique.

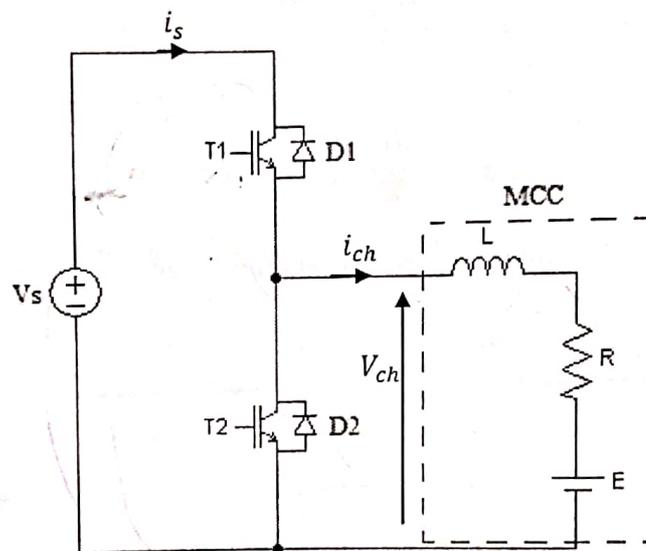


Figure 4.18 Hacheur réversible en courant.

➤ Analyse de fonctionnement

Notons que les séquences de commande de T_1 et T_2 doivent être impérativement complémentaires pour éviter tout risque de court circuit de la source d'entrée.

Deux phases distinctes de fonctionnement sont envisagées :

- La phase de fonctionnement en moteur (quadrant I).
- La phase de fonctionnement en génératrice ou phase de freinage (quadrant II).

Première phase : Fonctionnement dans le quadrant I

Le courant étant toujours positif, seuls les interrupteurs T_1 et D_2 sont concernés par cette phase de fonctionnement.

➤ Pour : $0 < t < \alpha T$

T_1 est commandé à la fermeture, le courant circule alors de la source vers la charge on a alors :

$$v_{ch} = V_s \text{ et } i_s = i_{ch}$$

Le courant de la charge a pour expression :

$$L \frac{di_{ch}}{dt} + Ri_{ch} = V_s - E$$

➤ Quand $\alpha T < t < T$

À $t = \alpha T$ l'interrupteur T_1 est ouvert et, la diode D_2 devient alors conductrice. C'est une séquence de roue libre.

$$v_{ch} = 0 \text{ et } i_s = 0$$

L'équation du courant est alors :

$$L \frac{di_{ch}}{dt} + Ri_{ch} = -E$$

Les tracés de la figure 4.19 montrent l'évolution du courant et de la tension de la charge.

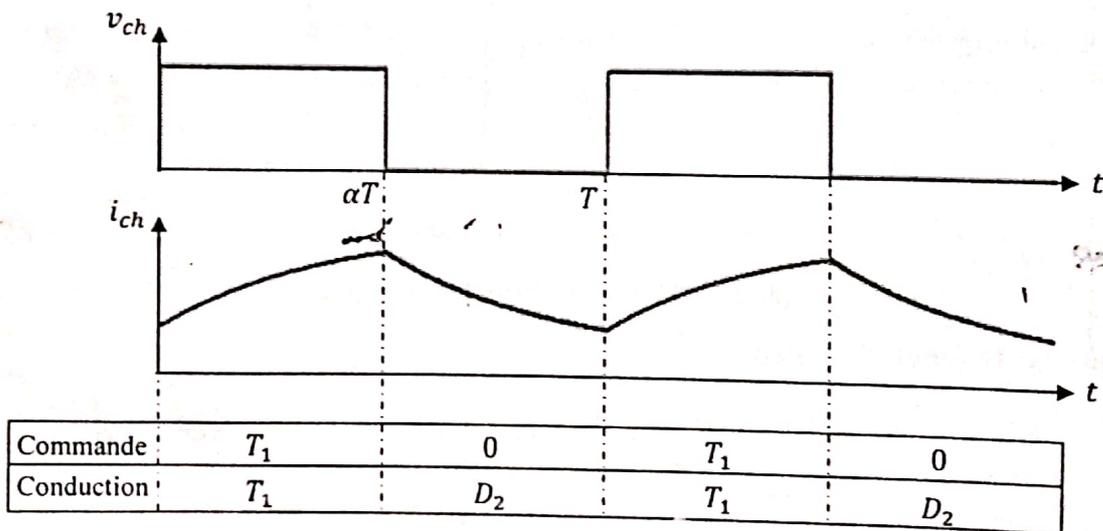


Figure 4.19 Fonctionnement dans le quadrant I.

La valeur moyenne aux bornes de l'induit de la MCC est :

$$\langle v_{ch} \rangle = \frac{1}{T} \int_0^{\alpha T} V_s dt \Rightarrow \langle v_{ch} \rangle = \alpha V_s$$

On remarque que le fonctionnement dans cette phase est semblable à l'hacheur série précédemment étudié. La valeur moyenne de la tension et du courant de la charge sont de signe positif, le transfert d'énergie s'effectue alors de la source vers la charge.

Deuxième phase : Fonctionnement dans le quadrant II

Le courant est toujours négatif, seuls les interrupteurs T_2 et D_1 sont concernés. La topologie du montage ressemble alors à un hacheur parallèle.

Notons que dans cette phase le courant change de signe. La MCC fonctionne en génératrice. La source V_s doit donc être nécessairement réversible (exemple : batterie d'accumulateurs ou condensateur).

➤ Pour : $0 < t < \alpha T$

La machine étant en mode génératrice, le courant circule alors de la charge vers la source.

T_2 est commandé à la fermeture, c'est une séquence de roue libre, donc :

$$v_{ch} = 0 \text{ et } i_s = 0, i_{ch} < 0$$

Le courant de la charge a pour expression :

$$L \frac{di_{ch}}{dt} + Ri_{ch} = -E < 0$$

Le courant i_{ch} est donc décroissant.

➤ Pour $\alpha T < t < T$

À $t = \alpha T$ l'interrupteur T_2 est commandé à l'ouverture ce qui va rendre D_1 conductrice. On a alors :

$$v_{ch} = V_s \text{ et } i_s = 0, i_{ch} < 0$$

L'équation du courant est alors :

$$L \frac{di_{ch}}{dt} + Ri_{ch} = V_s - E > 0$$

Le courant i_{ch} est croissant (car $V_s > E$).

Les tracés de la figure 4.20 montrent l'évolution du courant et de la tension de la charge.

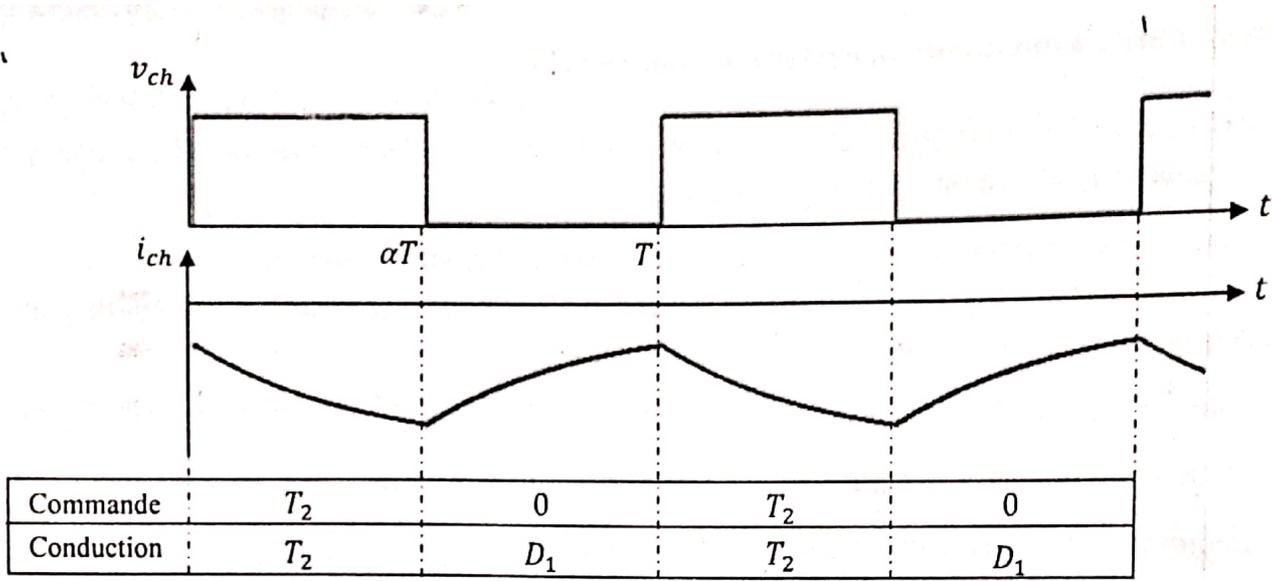


Figure 4.20 Fonctionnement dans le quadrant II.

On calcule la valeur moyenne de la tension aux bornes de la charge en négligeant la résistance de l'induit de la MCC est :

$$\langle v_{ch} \rangle = E \Leftrightarrow \frac{1}{T} \int_0^{\alpha T} -E dt + \frac{1}{T} \int_{\alpha T}^T (V_s - E) dt = E \Rightarrow V_s = \frac{\langle v_{ch} \rangle}{1 - \alpha} = \frac{E}{1 - \alpha}$$

$\langle v_{ch} \rangle = (1 - \alpha) V_s$

On remarque que le fonctionnement dans cette phase est semblable à l'hacheur parallèle qu'on a étudié auparavant.

La valeur moyenne de la tension est toujours positive et celle du courant de la charge est de signe contraire, le transfert d'énergie s'effectue alors de la charge vers la source.

Cas particulier de fonctionnement :

Si la machine fonctionne périodiquement en moteur et en génératrice, le courant change alors de signe d'une manière périodique. Les interrupteurs sont alors commandés à tour de rôle.

À partir des courbes de la figure 4.21 on peut faire l'analyse de fonctionnement de ce mode de fonctionnement :

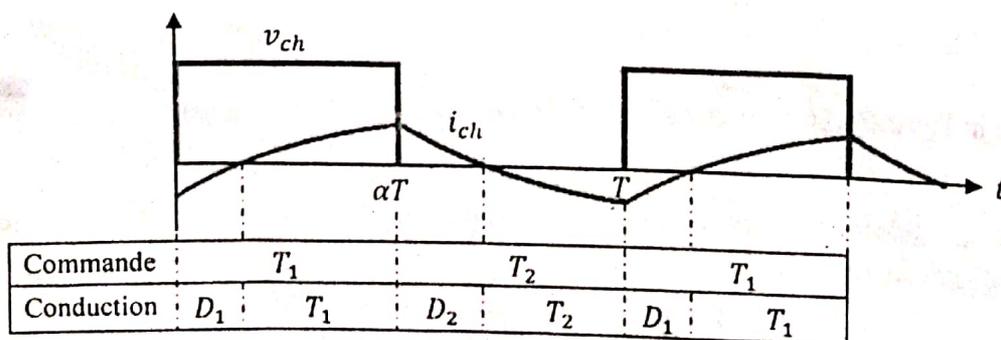


Figure 4.21. Courbes des grandeurs en sortie du hacheur réversible en courant

Le fait que le courant i_{ch} change de signe lors d'une période de commutation implique la conduction de chacun des quatre interrupteurs :

- Quand $i_{ch} > 0$: La conduction de T_1 correspond à une phase de croissance de i_{ch} , et quand T_1 est commandé à l'ouverture, la continuité du courant doit être assurée par un autre interrupteur. La diode D_2 entre alors en conduction ce qui correspond à une phase de décroissance de i_{ch} , (malgré que T_2 est commandé à la fermeture il ne peut être traversé par un courant dans ce sens).
- Quand $i_{ch} < 0$: La conduction de T_2 correspond à une phase décroissance de i_{ch} , et quand il est commandé à l'ouverture, D_1 conduit, ce qui correspond à une phase de croissance de i_{ch} .

4.3.1 Hacheurs réversibles en tension

D'après le schéma de la figure 4.22, on voit que la tension aux bornes de la charge peut prendre les valeurs V_{dc} ou $-V_{dc}$, cela conduit à une valeur moyenne positive ou négative. Quant au courant il est évident qu'il garde le même sens quelque soit les interrupteurs passants car ils sont non réversible.

La forme de la tension et du courant de sortie sont donc les suivants :

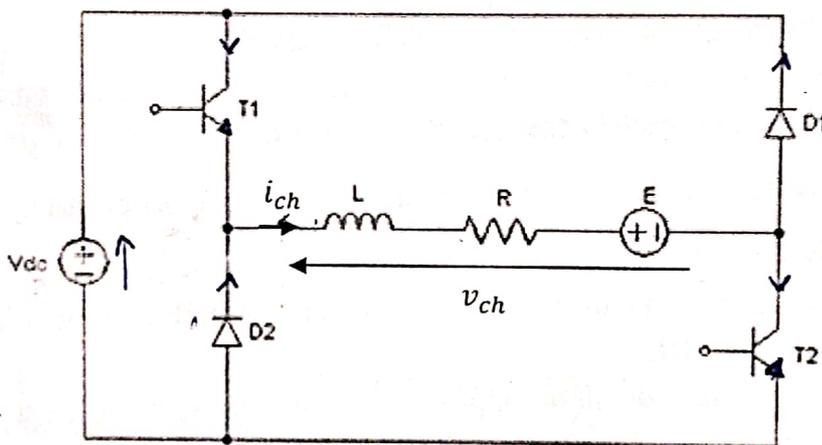
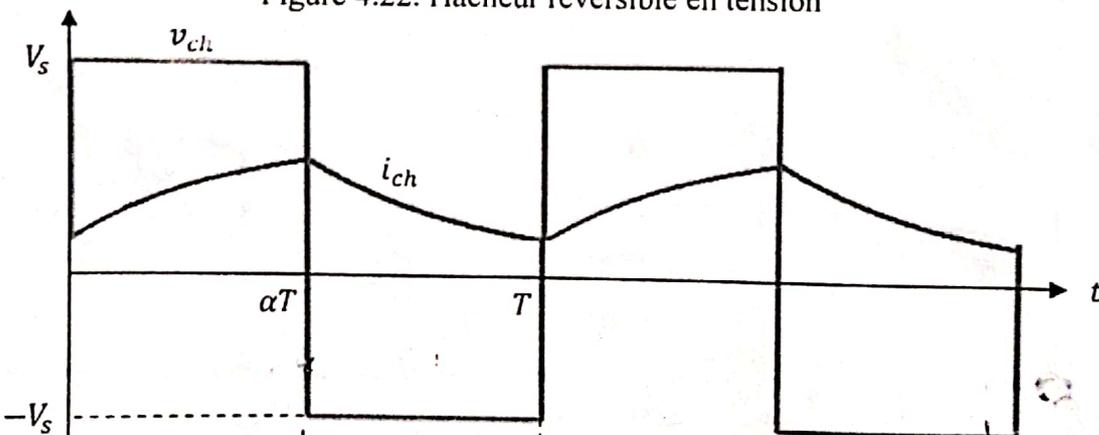


Figure 4.22. Hacheur réversible en tension



Commande	$T_1 T_2$	0	$T_1 T_2$	0
Conduction	$T_1 T_2$	$D_1 D_2$	$T_1 T_2$	$D_1 D_2$

Figure 4.22. Hacheur réversible en tension

- Dans l'intervalle $[0, \alpha T]$, les interrupteurs T_1 et T_2 sont fermés et D_1, D_2 sont ouverts. La charge est sous tension $+V_s$.
- Dans l'intervalle $[\alpha T, T]$, les interrupteurs commandés sont ouverts et les diodes passantes.
- La charge est sous tension $-V_s$.

Le courant garde toujours le même sens.

On peut ainsi calculer la valeur moyenne de la tension aux bornes de la charge:

$$\langle v_{ch} \rangle = \frac{1}{T} \int_0^{\alpha T} V_s dt + \frac{1}{T} \int_{\alpha T}^T -V_s dt = V_s(2\alpha - 1)$$

A partir de cette dernière expression on peut déduire que :

- Pour : $1/2 < \alpha < 1 \Rightarrow \langle v_{ch} \rangle > 0 \Rightarrow$ Le fonctionnement est en mode moteur.
- Pour : $0 < \alpha < 1/2 \Rightarrow \langle v_{ch} \rangle < 0 \Rightarrow$ Le fonctionnement est en mode génératrice.

3.1-Equations du circuit :

$$V = E + R \cdot i + L \frac{di}{dt}$$

- $0 < t < \alpha T$: K_1 et K_2 sont fermés. (Transfert de l'énergie vers la charge)

$$V = U$$

$$U = E + L \frac{di}{dt}$$

En intègre l'équation précédente :

$$i(t) = \frac{U - E}{L} (t) + i_{min}$$

- $\alpha T < t < T$: K_1 et K_2 sont ouverts (Récupération de l'énergie)

Le blocage de K_1 et K_2 impose la circulation du courant emmagasiné dans la bobine à travers les diodes. Comme $i = I_2 \neq 0$ dans L , celui-ci ne peut varier spontanément. La seule solution à la continuité de i est $i = i_{d1} = i_{d2} = -i_a = I_2$.

Alors : $V = -U$

$$-U = E + L \frac{di}{dt}$$

En intègre l'équation précédente :

$$i(t) = -\frac{U + E}{L} (t - \alpha T) + i_{max}$$

3.2-Valeur moyenne de la tension aux bornes de la charge :

$$\bar{V} = \frac{1}{T} \int_0^T V(t) d(t) = \frac{1}{T} \int_0^{\alpha T} U d(t) + \frac{1}{T} \int_{\alpha T}^T -U \cdot d(t)$$

$$\bar{V} = (2\alpha - 1)U$$

Le convertisseur est réversible deux quadrants car $i > 0$ et $\bar{V} > 0$ ou < 0 .

$0.5 < \alpha \leq 1$: $U > 0 \rightarrow$ Moteur ;

$0 \leq \alpha < 0.5$: $U < 0 \rightarrow$ freinage;

$\alpha = 0.5 \rightarrow$ Arrêt ;

3.3-Valeur moyenne du courant :

Soit l'équation du circuit suivante :

$$V = E + R \cdot i + L \frac{di}{dt}$$

$$\bar{V} = E + R \cdot \bar{I}_s + L \frac{d\bar{I}}{dt}$$

La valeur moyenne du courant est calculée par la formule suivante :

$$\bar{I} = \frac{\bar{V} - E}{R} = \frac{(2\alpha - 1)U - E}{R}$$

3.4-Ondulation du courant dans la charge :

Elle est donnée par la relation :

$$\Delta i = I_{max} - I_{min} = \frac{2\alpha(1 - \alpha)U}{Lf}$$

4.3.2 Hacheurs réversibles en tension et en courant (Hacheur 4 quadrants)

On va conclure cette partie consacrée aux convertisseurs DC/DC, nous allons décrire un convertisseur qui assure la réversibilité en courant et en tension. Ce convertisseur doit ainsi être en mesure de contrôler parfaitement la fluence d'énergie entre la source d'entrée et la charge.

A travers une structure comme celle de la figure 4.23, deux configurations sont possibles :

- $\langle v_{ch} \rangle$ et $\langle i_{ch} \rangle$ sont de même signe : Dans ce cas, le transfert d'énergie s'effectue de la source d'alimentation vers la charge. Le convertisseur doit donc permettre de fonctionner dans les quadrants I et III.
- $\langle v_{ch} \rangle$ et $\langle i_{ch} \rangle$ sont de signe opposé : Dans ce cas, le transfert d'énergie s'effectue de la charge vers la source d'alimentation. Le convertisseur doit donc permettre de fonctionner dans les quadrants II et IV.

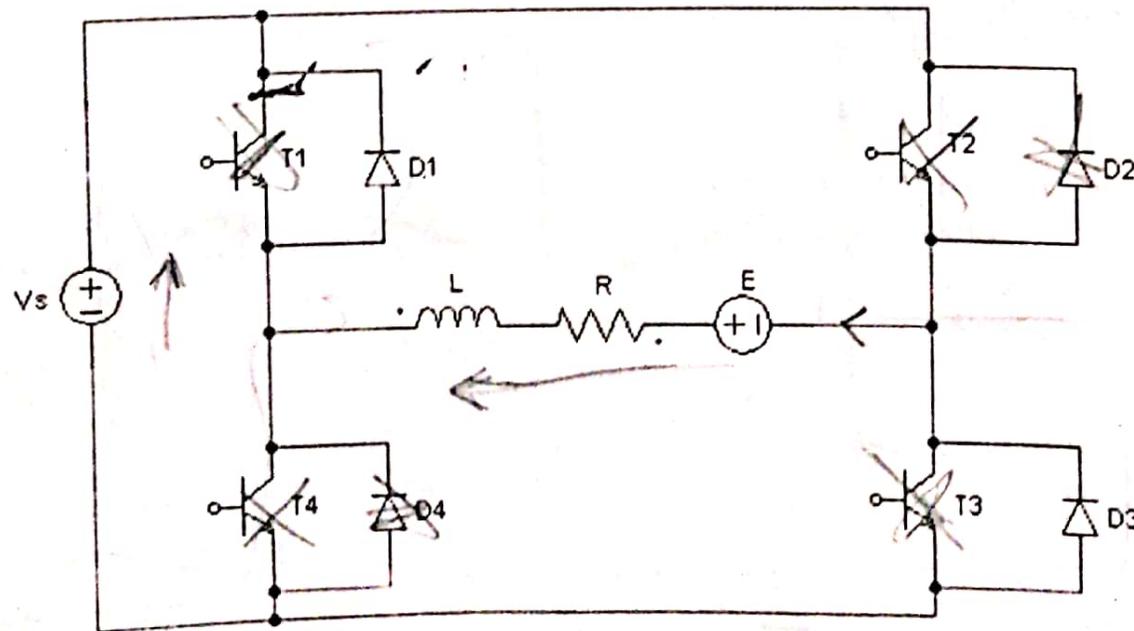


Figure 4.23 Structure d'un hacheur quatre quadrants

Avoir le contrôle sur de telle configuration revient à contrôler pour une MCC:

- Le signe du courant (et donc du couple) d'une machine à courant continu. Ce qui permet de gérer l'accélération et le freinage de la machine.
- Le signe de la tension (donc de la force électromotrice) de cette machine. Ce qui permet de commander le sens de rotation de la machine.

La forme de la tension et du courant de sortie pour les différents cas sont les suivants :

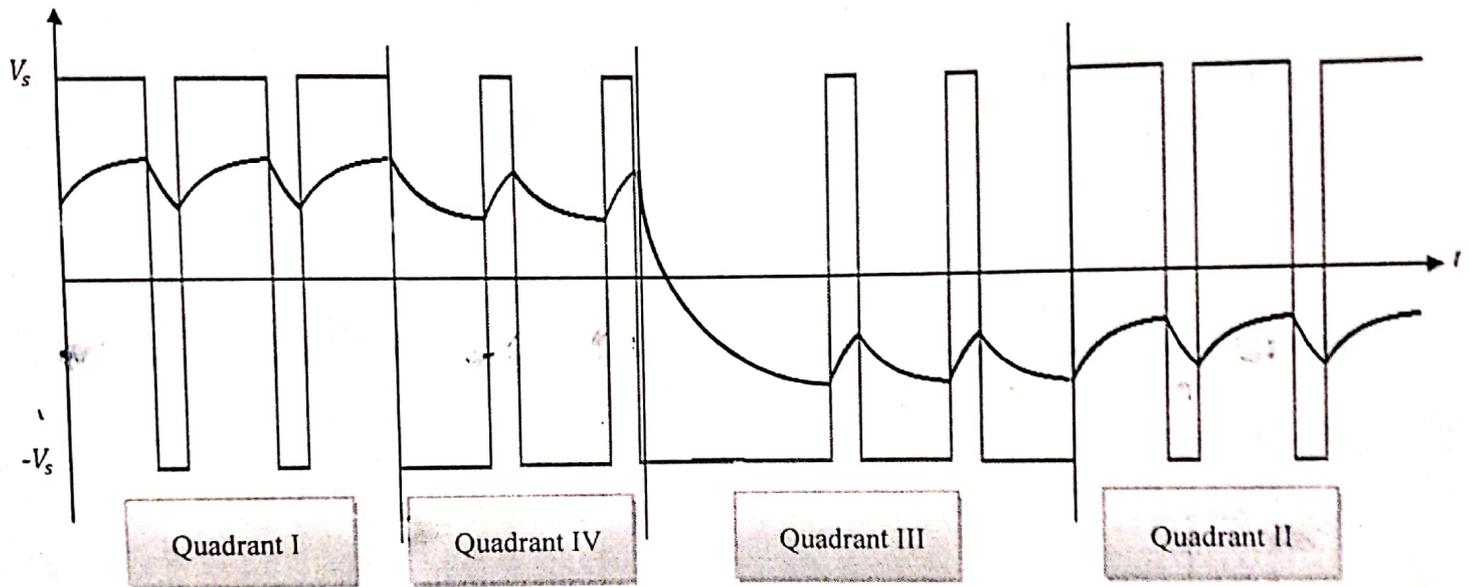


Figure 4.24 Chronogramme hacheur quatre quadrants

Conclusion du chapitre :

L'ensemble des convertisseurs DC/DC que nous avons présenté dans ce chapitre constitue une famille complète des hacheurs non isolés, dans le sens où, selon la structure mise en œuvre, on peut réaliser les fonctions suivantes :

- Abaisser la tension ou le courant.
- élever la tension ou le courant.
- élever ou d'abaisser la tension ou le courant, selon la valeur de rapport cyclique désigné.
- Garantir une réversibilité en courant et/ou en tension.