

## **CHAPITRE 1 : Les Hacheurs**

### 1.1 Machine à courant continu

1.1.1 Équations de fonctionnement.

1.1.2 Réversibilité d'une machine à courant continu

### 1.2 Hacheur série

1.2.1 Structure et schéma de principe du hacheur série

1.2.2 Hacheur série avec charge RLE

### 1.3 Hacheur parallèle

1.3.1 Structure et schéma de principe du hacheur parallèle

1.3.2 Hacheur parallèle avec générateur RLE

### 1.4 Hacheur réversible

1.4.1 Hacheur réversible en courant

1.4.2 Hacheur réversible en tension

1.4.3 Hacheur réversible en courant et en tension

# Les Hacheurs

Les hacheurs opèrent une *conversion continu-continu*. Placés entre un générateur et un récepteur, tous deux à courant continu, ils permettent de régler la tension appliquée au récepteur ou le courant qui y circule.

Il permet, partant d'une tension continue fixe, d'obtenir une tension continue de valeur moyenne variable. L'application principale des hacheurs est la variation de vitesse des machines à courant continu.

On distingue principalement deux types de hacheurs, série (Buck) et parallèle (Boost) ou leurs dérivés tels que le hacheur buck-boost, et les hacheurs réversibles en tension et/ou en courant. Cependant, il existe d'autres topologies selon qu'ils sont isolés (tels que les alimentations à découpage).

## 1.1 Machine à courant continu

### 1.1.1 Équations de fonctionnement

Le fonctionnement général d'une machine à courant continu (MCC) accouplée à une charge mécanique peut être traduit par quatre équations :

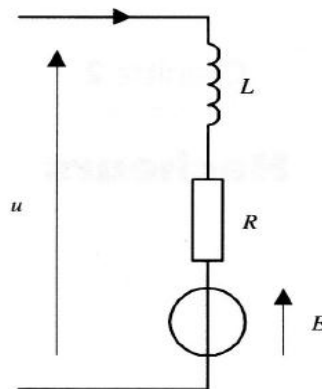
— *L'équation mécanique :*

$$J \frac{d\Omega}{dt} = C_{moteur} - C_{resistant}$$

— *L'équation électrique :*

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

Cette équation provient de l'équation de maille sur le circuit de la figure 1.1.



**FIGURE 1.1** -Modèle électrique de la machine à courant continu.

— *L'équation électro-mécanique :*

$$E = k \cdot \phi \cdot \Omega$$

$$C_{moteur} = k \cdot \phi \cdot i$$

Où  $\Omega$  est la vitesse de rotation de la machine en  $\text{rad.s}^{-1}$  et  $\phi$  le flux inducteur en Wb. Nous supposons le flux constant, c'est le cas des MCC à excitation indépendante ou parallèle. La constante  $k$  est fixée une fois la machine construite.

En régime permanent, la vitesse  $\Omega$  est constante et le courant  $i$  est périodique avec :  $L di/dt=0$ . Les équations de fonctionnement se réduisent à :

$$C_m = C_r \quad (1.1)$$

$$\langle u \rangle = E + R \cdot \langle i \rangle \quad (1.2)$$

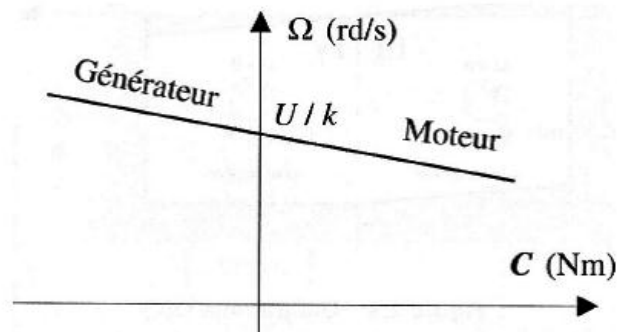
$$E = k \cdot \phi \cdot \Omega \quad (1.3)$$

$$C_m = k \cdot \phi \cdot \langle i \rangle \quad (1.4)$$

Les quatre relations précédentes peuvent être combinées pour donner l'équation de la caractéristique mécanique de la MCC en régime permanent (relation liant vitesse et couple) :

$$\Omega = \frac{\langle u \rangle}{k \cdot \phi} - \frac{R}{(k \cdot \phi)^2} \cdot C \quad (1.5)$$

En désignant par  $C$  la valeur commune au couple électromagnétique  $C_e$  et résistant  $C_{résistant}$  en régime permanent. L'équation (1.5) se traduit par une droite de pente négative représentée sur la figure 1.2 dans le plan  $\Omega(C)$ .



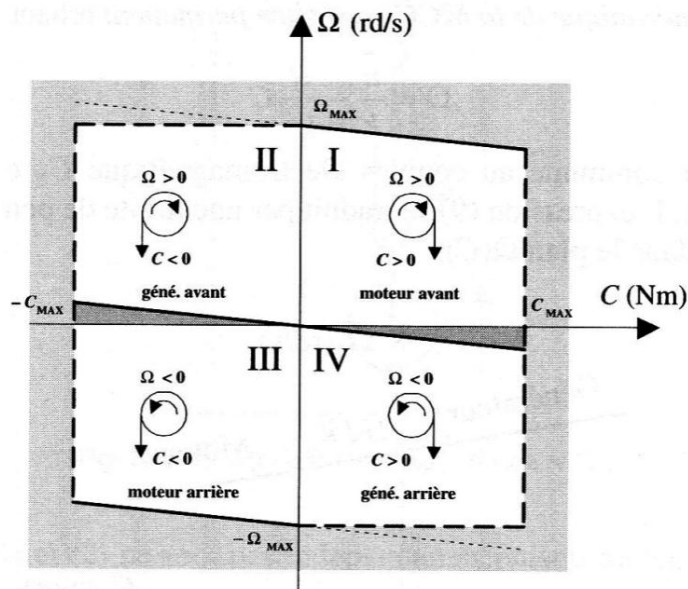
**FIGURE 1.2** - Caractéristique mécanique d'une machine à courant continu.

Si la résistance de l'induit est négligée, l'équation 1.5 se résume à  $\Omega = \frac{\langle u \rangle}{k \cdot \phi}$ , la vitesse ne dépend plus que de la tension aux bornes de l'induit et la caractéristique mécanique  $\Omega(C)$  est une droite horizontale.

### 1.1.2 Réversibilité d'une machine à courant continu

À partir d'un fonctionnement donné, la réversibilité d'une MCC peut intervenir de deux manières :

- par inversion du sens de rotation, ce qui se traduit par un changement de signe de la f.é.m.  $E$  ;
- par inversion du couple électromagnétique, c'est à dire par changement du signe du courant  $i$ .



**FIGURE 1.3** – Les quatre quadrants de fonctionnement d'une machine à courant continu.

Les points des quadrants I et III correspondent à des fonctionnements en *moteur* puisque la vitesse ( $\Omega$ ) et le couple ( $C$ ) sont de même signe, et que les points des quadrants II et IV correspondent à des fonctionnements en *génératrice* car  $\Omega$  et  $C$  sont de signes contraires.

L'ensemble des fonctionnements en régime permanent est résumé sur le diagramme de la figure 3.3. La vitesse est limitée par construction à une valeur  $\Omega_{\max}$  correspondant à la valeur maximale de la tension applicable  $u_{\max}$ . Le couple est limité à la valeur  $C_{\max}$  qui correspond au courant  $i_{\max}$ .

## 1.2 Hacheur série

Le hacheur série, dit aussi *abaisseur de tension* ou *buck converter*, commande le débit :

- d'un *générateur de tension* dont la tension est toujours positive,
- dans un *récepteur de courant* dont le courant ne peut devenir négatif.

Donc un hacheur série est l'interface entre un générateur de tension et un récepteur de courant. Il est constitué par deux commutateurs  $K$  et  $K'$  fonctionnant de manière **périodique** et **complémentaire**.

En pratique, le **dipôle de tension** est un réseau continu de tension  $U$ , et le **dipôle de courant** est un moteur à courant continu. Afin d'assurer la *continuité* du courant absorbé, une inductance est placée en série avec le moteur car l'inductance de la MCC est généralement insuffisante. Cette inductance améliore la qualité dynamique du dipôle de courant. Le commutateur  $K$  est constitué d'un composant commandable à la fermeture et à l'ouverture (transistor, IGBT, ou GTO), et le commutateur  $K'$  est une diode.

Le rapport *cyclique* de fonctionnement est défini par la fraction :

$$\alpha = \frac{\text{durée de l'état passant de } K}{\text{période de fonctionnement}} = \frac{t_{on}}{T}$$

Où  $0 < \alpha < 1$ .

### 1.2.1 Structure et schéma de principe du hacheur série

On supposera que le générateur et le récepteur sont parfaits : le premier fournit une tension  $U$  constante, le second absorbe un courant  $I$  constant.

Pour régler le transfert d'énergie, on applique aux interrupteurs une commande périodique (période de pulsation  $T$ ).

Le premier l'interrupteur permet de relier l'entrée à la sortie, et le deuxième court-circuit la source de courant si le premier est ouvert.

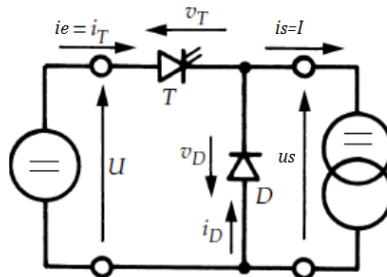


FIGURE 1.4 - Schéma de principe du hacheur série.

* $0 < t < \alpha T$ : T est fermé, D est bloquée	* $\alpha T < t < T$ : T est ouvert, D est passante
$v_T = 0, \quad v_s = U$	$v_T = +U, \quad v_s = 0$
$i_e = i_T = i_s = I$	$i_e = i_T = 0, \quad i_s = i_D = I$
$i_D = 0, \quad v_D = -U$	$v_D = 0$

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

$$v_{s\text{ moy}} = \langle u_s \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T v_{ch}(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^{\alpha T} U dt + \frac{1}{T} \int_{\alpha T}^T 0 dt = \frac{U}{T} (\alpha T) = \alpha U$$

$$\langle u_s \rangle = \alpha U$$

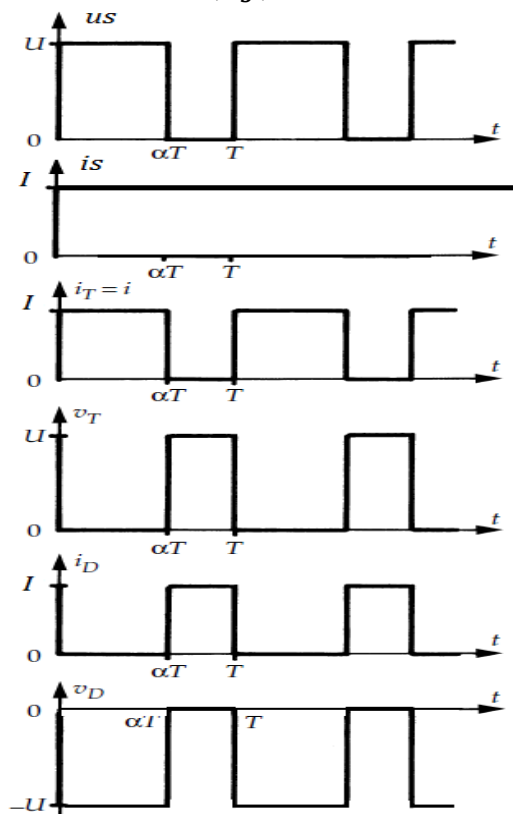
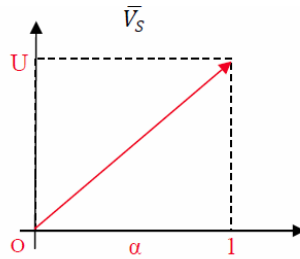


FIGURE 1.5 - Forme d'ondes des grandeurs d'un hacheur série.

La valeur moyenne  $v_{s moy}$  peut être ajustée en jouant sur la valeur du rapport cyclique  $\alpha$ .  
 Quand on fait varier  $\alpha$  de 0 à 1,  $v_{s moy}$  varie linéairement de 0 à U.

$$\langle u_s \rangle = f(\alpha)$$



- Valeur moyenne du courant :

$$i_{e moy} = \langle i_e \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T i_e(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^{\alpha T} I dt + \frac{1}{T} \int_{\alpha T}^T 0 dt = \frac{I}{T} (\alpha T) = \alpha I$$

$$\langle i_e \rangle = \alpha I$$

### 1.2.2 Hacheur série avec charge R L E :

a) conduction continue : On considère le montage :

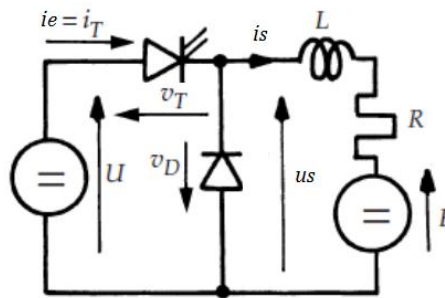


FIGURE 1.6 - Schéma d'un Hacheur série avec charge RLE.

\*  $0 < t < \alpha T$ : T est fermé, D est bloquée

$$v_T = 0, \quad v_s = U, \quad v_D = -U$$

$$i_D = 0, \quad i_e = i_T = i_s$$

Et L'intensité du courant dans la charge vérifier l'équation suivante :

$$U = Ri_s + L \frac{di_s}{dt} + E \dots\dots\dots(1.6)$$

\*  $\alpha T < t < T$ : T est ouvert, D est passante

$$v_T = +U, \quad v_s = 0, \quad v_D = 0$$

$$i_e = i_T = 0, \quad i_D = i_s$$

Et L'intensité du courant dans la charge vérifier l'équation suivante :

$$0 = Ri_s + L \frac{di_s}{dt} + E \dots\dots\dots (1.7)$$

En général les résistances de l'induit et de l'inductance sont très faibles, donc :

\* L'équation (1.6) devient ( $0 < t < \alpha T$ ):

$$U = L \frac{di_s}{dt} + E \rightarrow di_s(t) = \frac{U - E}{L} dt$$

$$i_s(t) = \frac{U-E}{L}t + I_{Min} \dots\dots\dots (1.8)$$

$$\text{Et } i_s(\alpha T) = I_{Max} = \frac{U-E}{L} \alpha T + I_{Min} \dots\dots\dots (1.9)$$

\* L'équation (1.7) devient ( $\alpha T < t < T$ ) :

$$0 = L \frac{di_s}{dt} + E \rightarrow di_s(t) = \frac{-E}{L} dt$$

$$i_s(t) = \frac{-E}{L}(t - \alpha T) + I_{Max} \dots\dots\dots (1.10)$$

$$\text{Et } i_s(T) = I_{Min} = \frac{-E}{L}(T - \alpha T) + I_{Max} \Rightarrow I_{Min} = \frac{-E}{L}(1 - \alpha)T + I_{Max} \dots\dots\dots (1.11)$$

**Valeur moyenne du courant :**

$$\langle v_s \rangle = R \langle i_s \rangle + L \left\langle \frac{di_s}{dt} \right\rangle + E$$

Avec  $\langle v_s \rangle = \alpha U$  et  $L \left\langle \frac{di_s}{dt} \right\rangle = 0$

$$\alpha U = R \langle i_s \rangle + E \rightarrow \langle i_s \rangle = \frac{\alpha U - E}{R} = \frac{I_{Max} + I_{Min}}{2} \dots\dots\dots (1.12)$$

**- Ondulation du courant**

Elle est simplifiée par la relation :

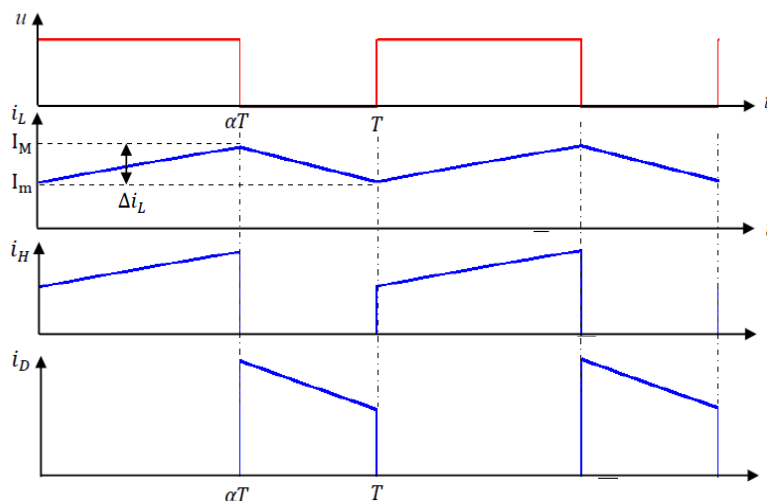
$$\Delta i = I_{Max} - I_{Min} = \frac{U-E}{L} \alpha T = \frac{T}{L} (1 - \alpha) \alpha U \dots\dots\dots (1.13)$$

L'ondulation  $\Delta i$  est maximale pour :

$$\frac{d\Delta i}{d\alpha} = 0 \rightarrow \alpha = 0.5 \Rightarrow \Delta i_{Max} = \frac{TU}{4L}$$

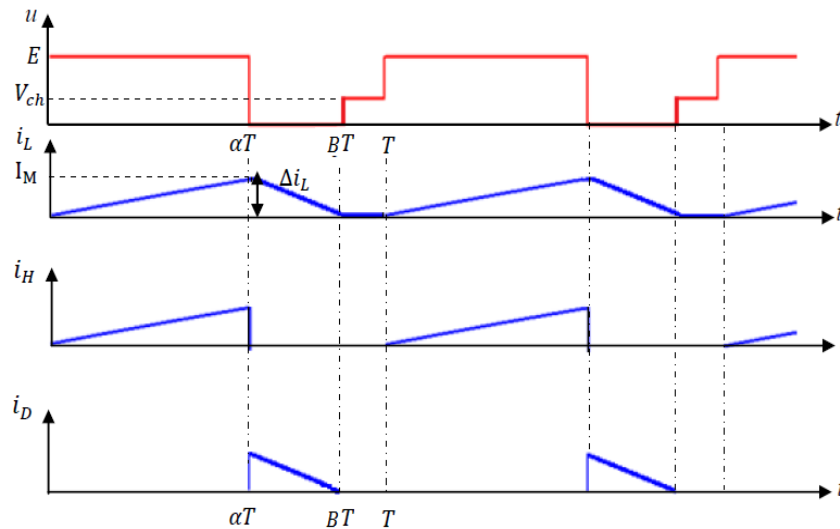
Pour diminuer  $\Delta i$ , il faut augmenter l'inductance L ou/et la fréquence  $f=1/T$ .

Donc l'allure des tensions et courants :



**FIGURE 1.7** – Forme d’ondes des grandeurs d’un hacheur série pour une charge RLE (conduction continue).

## b) Conduction discontinue



**FIGURE 1.8** – Forme d'ondes des grandeurs d'un hacheur série pour une charge RLE (conduction discontinue).

## 1.3 Hacheur parallèle

Le hacheur parallèle ou *élévateur* ou *boost converter* commande le débit

- d'un *générateur de courant* dont le courant  $i_e$  est toujours positif,
- dans un *récepteur de tension* dont la tension  $v_s$  ne peut devenir négative.

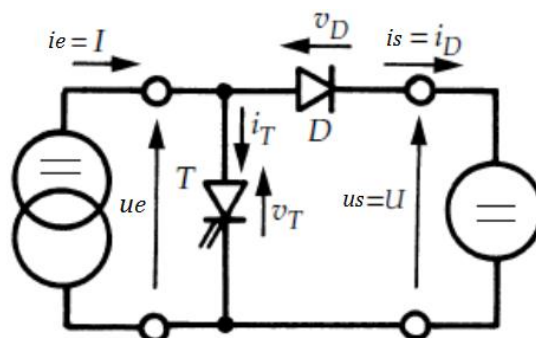
Le hacheur parallèle permet d'obtenir une tension continue de valeur moyenne plus élevée que la tension continue de départ.

— **le dipôle de tension** est un réseau à tension continu  $U$ . Il doit pouvoir fonctionner en récepteur, c'est à dire absorber de l'énergie ;

— **le dipôle de courant** peut être une machine à courant continu fonctionnant en génératrice en phase de freinage. Une inductance de lissage en série améliore les caractéristiques dynamiques de ce dipôle ;

### 1.3.1 Structure et schéma de principe du hacheur parallèle

Le hacheur parallèle est constitué d'un interrupteur à ouverture commandée en parallèle avec le récepteur et d'un interrupteur à fermeture et ouverture spontanée entre la source et le récepteur.



**FIGURE 1.9** – Schéma de principe du hacheur parallèle.



\*  $0 < t < \alpha T$ : T est fermé, D est bloquée.

$$v_T = 0, \quad v_D = -U$$

$$v_S = U, \quad v_e = 0$$

$$i_e = i_T = I, \quad i_S = i_D = 0$$

\*  $\alpha T < t < T$ : T est ouvert, D est passante

$$v_T = +U, \quad v_D = 0$$

$$v_S = 0, \quad v_e = U$$

$$i_e = i_D = i_S = I$$

- La tension d'entrée  $v_e$  a pour valeur moyenne :

$$\langle u_e \rangle = (1 - \alpha)U \dots\dots\dots (1.14)$$

- Le courant de sortie  $i_s$  a pour valeur moyenne :

$$\langle i_s \rangle = (1 - \alpha)I \dots\dots\dots (1.15)$$

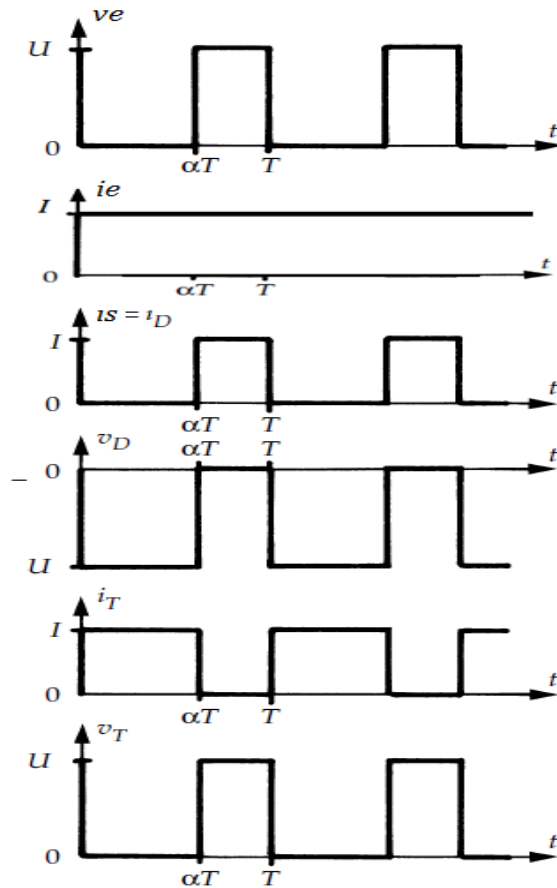


FIGURE 1.10 - Forme d'ondes des grandeurs d'un hacheur parallèle.

### 1.3.2 Hacheur parallèle avec générateur RLE :

a) **conduction continue** : On considère le générateur est un circuit  $R, L, E$  série, lorsque la conduction est continue (figure 1.11) :

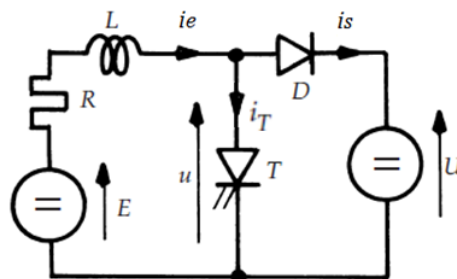


FIGURE 1.11 - Schéma d'un Hacheur série avec générateur R L E.

\*  $0 < t < \alpha T$ : T est fermé, D est bloquée

$$v_T = 0, \quad v_D = -U$$

$$i_D = 0, \quad i_T = i_e$$

Et L'intensité du courant dans la charge vérifier l'équation suivante :

$$E = Ri_e + L \frac{di_e}{dt} \quad (1.16)$$

\*  $\alpha T < t < T$ : T est ouvert, D est passante

$$v_T = +U, \quad v_D = 0$$

$$i_T = 0, \quad i_e = i_D$$

Et L'intensité du courant dans la charge vérifier l'équation suivante :

$$E = Ri_e + L \frac{di_e}{dt} + U \quad (1.17)$$

Si on néglige les résistances de l'induit et de l'inductance, donc :

\* L'équation (1.16) devient ( $0 < t < \alpha T$ ):

$$E = L \frac{di_e}{dt} \rightarrow di_e(t) = \frac{E}{L} dt$$

$$i_e(t) = \frac{E}{L} t + I_{Min} \quad (1.18)$$

$$\text{Et } I_{Max} = i_e(\alpha T) = \frac{E}{L} \alpha T + I_{Min}$$

\* L'équation (1.17) devient ( $\alpha T < t < T$ ):

$$E = L \frac{di_e}{dt} + U \rightarrow di_e(t) = \frac{E - U}{L} dt$$

$$i_e(t) = \frac{E - U}{L} (t - \alpha T) + I_{Max} \quad (1.19)$$

$$\text{Et } I_{Min} = i_e(T) = \frac{E - U}{L} (T - \alpha T) + I_{Max} \Rightarrow I_{Min} = \frac{E - U}{L} (1 - \alpha) T + I_{Max} \dots\dots\dots (1.20)$$

**Valeur moyenne du courant :**

Le courant moyen débité par le générateur est calculé par :

$$\langle E \rangle = R \langle i_e \rangle + L \left\langle \frac{di_e}{dt} \right\rangle + \langle u \rangle$$

Avec  $\langle E \rangle = E$ ,  $\langle u \rangle = (1 - \alpha)U$  et  $L \left\langle \frac{di_e}{dt} \right\rangle = 0$

$$E = R \langle i_e \rangle + (1 - \alpha)U \rightarrow \langle i_e \rangle = \frac{E - (1 - \alpha)U}{R} \dots\dots\dots(1.21)$$

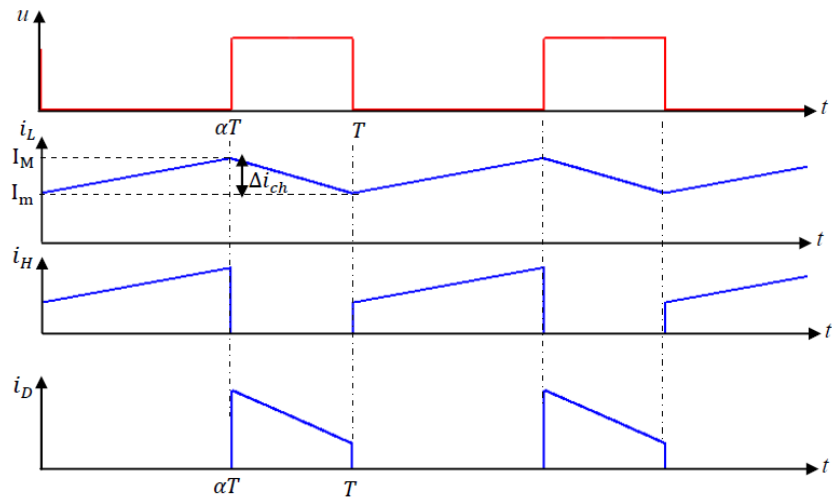
**- Ondulation du courant**

Elle est simplifiée par la relation :

$$\Delta i = I_{Max} - I_{Min} = \frac{E}{L} \alpha T = \frac{U}{L} (1 - \alpha) \alpha T \dots\dots\dots (1.22)$$

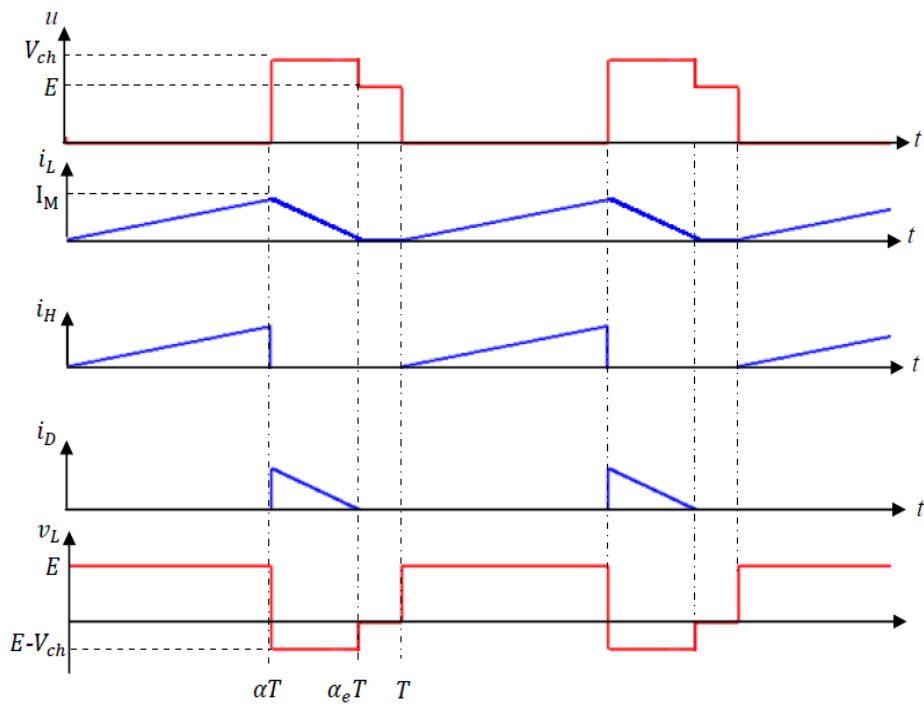
L'ondulation  $\Delta i$  est maximale pour :

$$\frac{d\Delta i}{d\alpha} = 0 \rightarrow \alpha = 0.5 \Rightarrow \Delta i_{Max} = \frac{TU}{4L}$$



**FIGURE 1.12** – Forme d’ondes des grandeurs d’un hacheur parallèle pour une charge RLE (conduction continue).

**b) Conduction discontinue**



**FIGURE 1.8** – Forme d’ondes des grandeurs d’un hacheur parallèle pour une charge RLE (conduction discontinue).

## 1.4 Hacheur réversible

### 1.4.1 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.

#### 1.4.1.2 Hacheur réversible 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.

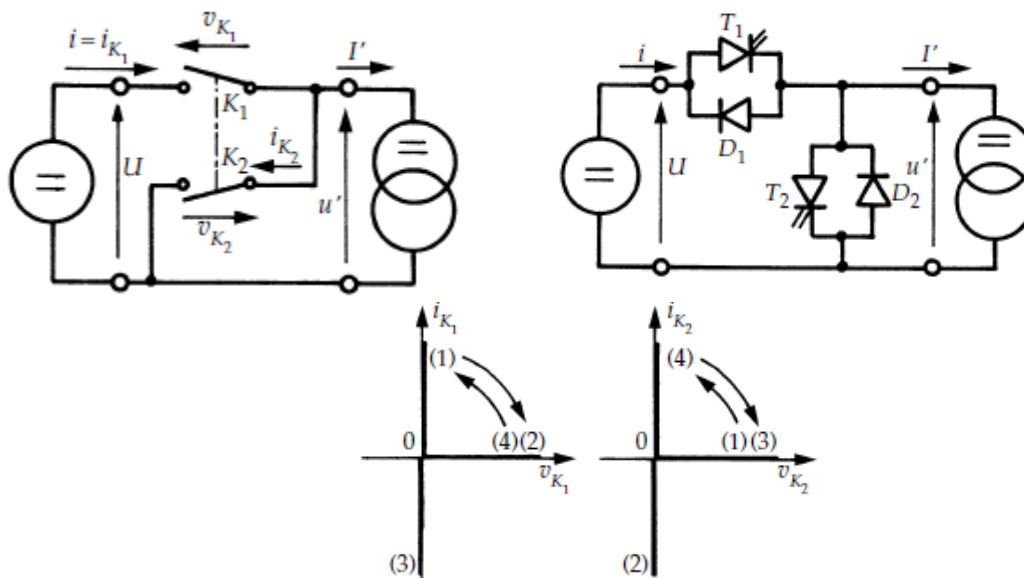
Notons que les séquences de commande de  $K_1$  et  $K_2$  (deux semi-conducteurs à fermeture et ouverture commandées) doivent être **impérativement complémentaire** pour éviter tout risque de court-circuit de la source d'entrée.

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).

Avec un schéma à deux interrupteurs on peut commander le transfert de l'énergie dans les deux sens :

$K_1$  permet de relier l'entrée et la sortie,  $K_2$  court-circuite la source de courant quand  $K_1$  est ouvert.



On en déduit les branches de caractéristiques utilisées et les semi-conducteurs devant être substitués aux interrupteurs mécaniques :

- $K_1$  doit être remplacé par un transistor  $T_1$  avec une diode  $D_1$  en parallèle inverse.
- de même  $K_2$  doit être remplacé par le transistor  $T_2$  avec la diode  $D_2$  en parallèle inverse.

□ Quand  $I'$  est positif (quadrant I) :

si  $K_1$  est fermé ( $K_2$  est ouvert) (état 1) :

$$v_{k1} = 0, \quad i_{k1} = I' > 0$$

$$v_{k2} = +U, \quad i_{k2} = 0$$

si  $K_1$  est ouvert ( $K_2$  est fermé) (état 2) :

$$v_{k1} = +U, \quad i_{k1} = 0$$

$$v_{k2} = 0, \quad i_{k2} = -I' < 0$$

□ *Quand I est négatif (quadrant II) :*  
si K1 est fermé (K2 est ouvert) (état 3) :

$$v_{k1} = 0, \quad i_{k1} = I' < 0$$

$$v_{k2} = +U, \quad i_{k2} = 0$$

si K1 est ouvert (K2 est fermé) (état 4) :

$$v_{k1} = +U, \quad i_{k1} = 0$$

$$v_{k2} = 0, \quad i_{k2} = -I' > 0$$

On en déduit les branches de caractéristiques utilisées et les semi-conducteurs devant être substitués aux interrupteurs mécaniques :

– K1 doit être remplacé par un transistor T1 avec une diode D1 en parallèle inverse.

– de même K2 doit être remplacé par le transistor T2 avec la diode D2 en parallèle inverse.

\_ On voit que ce convertisseur résulte de l'association d'un hacheur série, formé par T1 et D2, et d'un hacheur parallèle, formé par T2 et D1.

• Pour I' positif, il fonctionne en hacheur série ; le courant I' passant tantôt par T1, tantôt par D2. Si  $\alpha_1$  est la durée relative de la fermeture de T1 pendant chaque période, u' a pour valeur moyenne :

$$U' = \alpha_1 U.$$

• Pour I' négatif, il fonctionne en hacheur parallèle : le courant I' passant tantôt par T2, tantôt par D1. Si  $\alpha_2$  est la durée relative des intervalles de fermeture de T2, u' a pour valeur moyenne :

$$U' = (1 - \alpha_2) U.$$

Tout ce qui a été dit, pour le hacheur série et pour le hacheur parallèle, sur l'ondulation du courant de sortie due à la valeur limitée de l'inductance de la source de courant reste valable.

Il en est de même de l'éventuelle nécessité de corriger la source de tension.

### b) Lois de commande

Si on passe de  $I'$  positif à  $I'$  négatif sans discontinuité dans la commande des transistors, la commande est dite continue. S'il faut changer de loi de commande quand on veut changer le signe du courant, on dit que la commande est discontinue.

► En commande *discontinue*, pour  $I'$  positif, le transistor  $T_2$  est ouvert en permanence,  $T_1$  est fermé pendant  $\alpha_1 T$  à chaque période :  $U'$  égal à  $\alpha_1 U$  va de  $U$  à 0 quand  $\alpha_1$  va de 1 à 0.

Pour  $I'$  négatif,  $T_1$  est ouvert en permanence,  $T_2$  fermé pendant  $\alpha_2 T$  : la tension  $U'$  va de  $U$  à 0 quand  $\alpha_2$  va de 0 à 1.

► En commande *continue*, on commande la fermeture de  $T_1$  de 0 à  $\alpha_1 T$  et la fermeture de  $T_2$  pendant tout le reste de la période. Cela revient à imposer

$$\alpha_1 + \alpha_2 = 1,$$

la tension  $U'$  est égale à  $\alpha_1 U$  quel que soit le signe du courant  $I'$ .

### c) Exemple d'application

► Placé entre une source de tension  $U$  constante réversible en courant, une batterie d'accumulateurs par exemple, et une machine à courant continu (source de courant de constantes  $E', R, L$ ), le hacheur réversible en courant permet :

- de faire varier la vitesse de la machine ;
- que celle-ci fonctionne en moteur ( $I' > 0$ ) ou en génératrice ( $I' < 0$ ).

On verra au chapitre 8 que pour une machine à courant continu à flux inducteur constant, la vitesse  $N$  est proportionnelle à la f.é.m.  $E'$ , et le couple  $C$  au courant  $I'$ .

La marche en génératrice correspond au freinage par récupération : la machine prend alors l'énergie mécanique de la charge qu'elle freine et la transforme en énergie électrique.

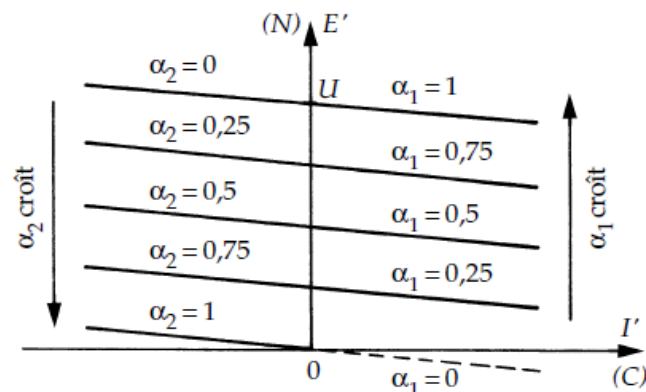
► Avec la commande continue,

$$E' = \alpha_1 U - R I',$$

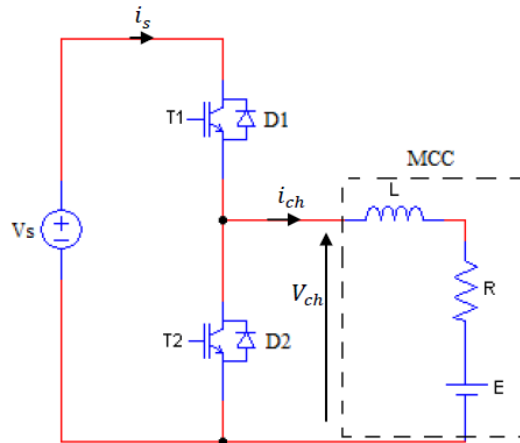
avec  $I' > 0$  en moteur,

avec  $I' < 0$  en génératrice.

La figure 4.8 donne l'allure des caractéristiques  $E'(I')$  ou  $N(C)$  obtenues pour diverses valeurs de  $\alpha_1$ . Dans un moteur à courant continu, la chute de tension ohmique dans l'induit a une valeur relative faible et la f.é.m.  $E'$  a une valeur proche de la tension moyenne aux bornes de l'induit  $U'$  ou  $\alpha_1 U$ . Ceci explique le caractère quasi horizontal des caractéristiques de la figure 4.8.



## Analyse de fonctionnement



### 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  $\alpha T < t < T$

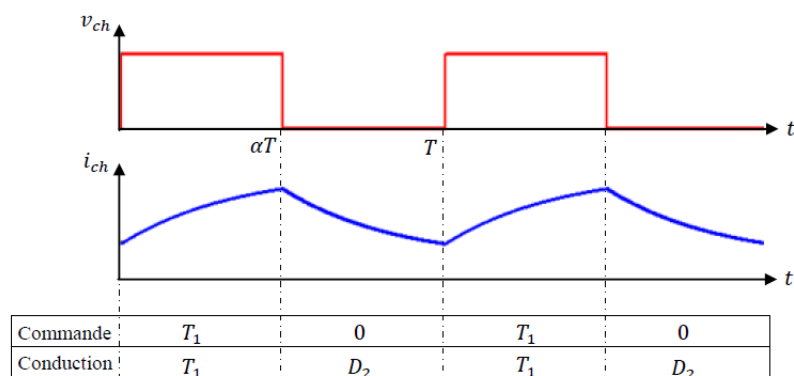
À  $t = \alpha T$  l'interrupteur  $T_1$  est ouvert et, et la diode  $D_2$  devient alors conductrice. C'est une séquence de roue libre.

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

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.



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  $T_1$  est commandé à l'ouverture ce qui va rendre  $D_1$  conductrice. On a alors :

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

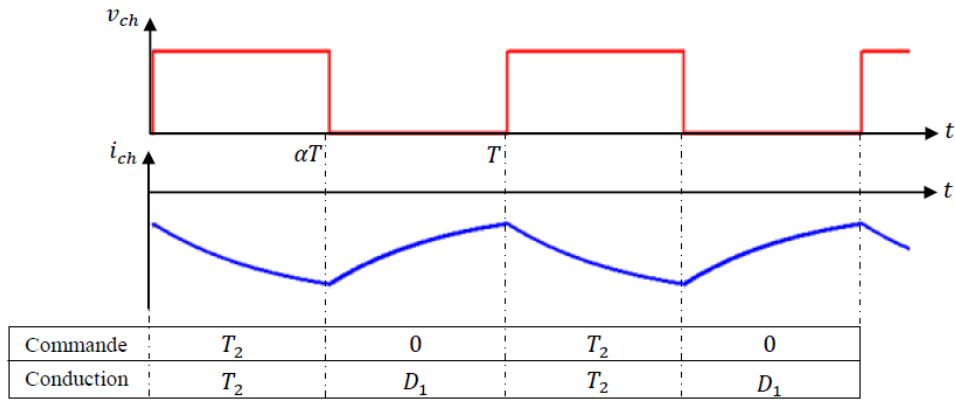
L'équation du courant est alors :

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

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.





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

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

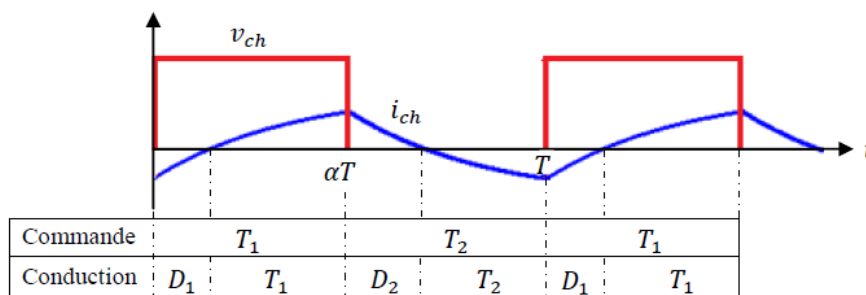
On remarque que le fonctionnement dans cette phase est semblable à l'hacheur parallèle qu'on a étudié auparavant.

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 :



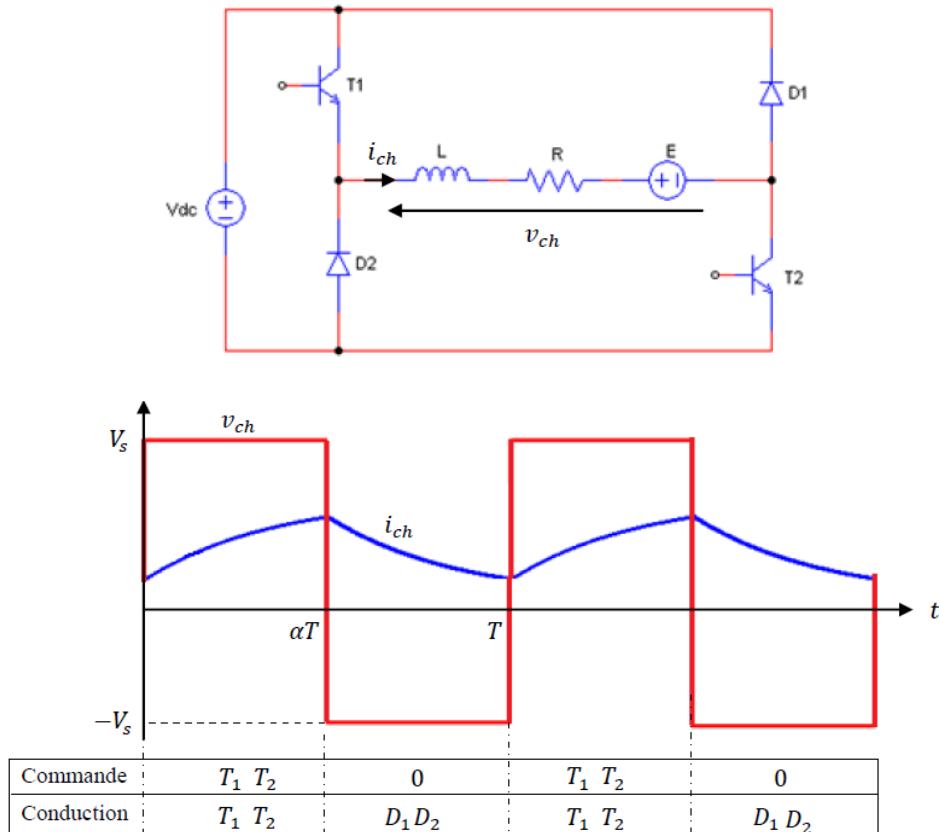
Le fait que le courant  $i_{ch}$  change de signe lors d'une période de commutation implique la conduction de chacun des quatre interrupteurs :

- 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 :



- Dans l'intervalle  $[0 \alpha T]$ , les interrupteurs  $T_1$  et  $T_2$  sont fermées 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.

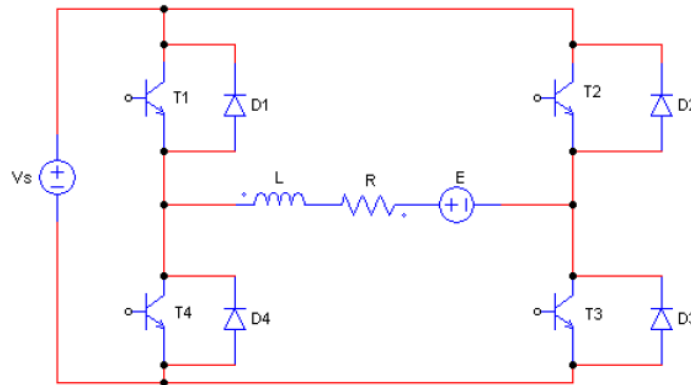


Figure 4.23 Structure d'un hacheur quatre quadrants

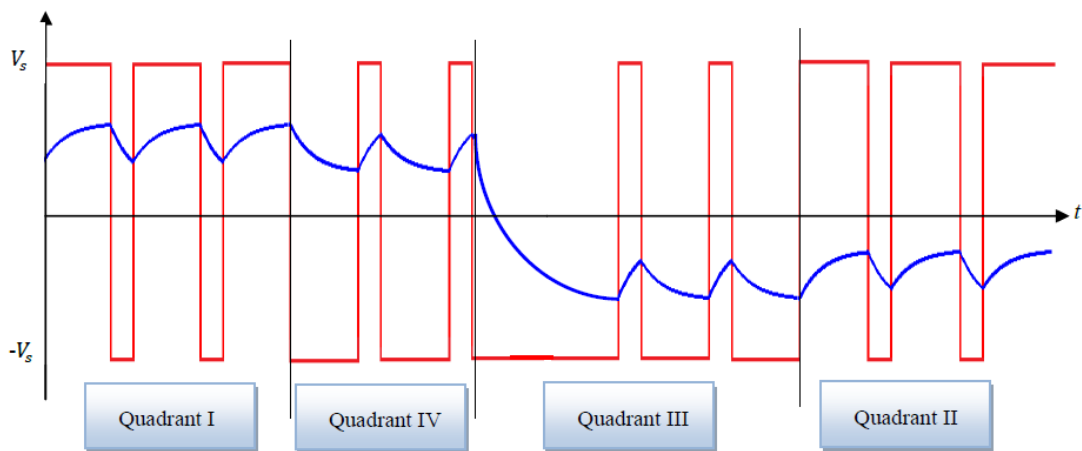


Figure 4.24 Chronogramme hacheur quatre quadrants

### 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.

## EXERCICE

### 4.2 Hacheur réversible en courant. Comparaison des commandes séparée et complémentaire

Une source de tension continue  $U$  d'impédance interne négligeable est reliée par un hacheur à deux semiconducteurs commandés  $T_1$ ,  $T_2$  et deux diodes  $D_1$ ,  $D_2$  (figure 4.34) à une source de courant de f.é.m.  $E$ , d'inductance  $L$  dont on néglige la résistance.

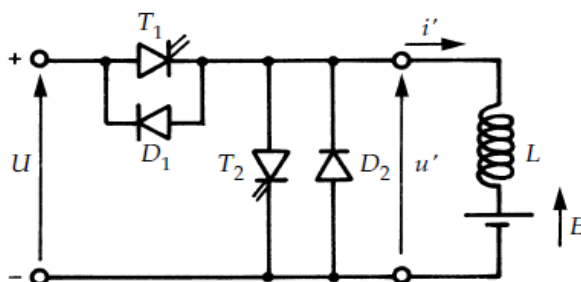


Figure 4.34

► *Hacheur série*

Le semiconducteur  $T_2$  continuellement bloqué, on rend, au cours de chaque période  $T$ , le semiconducteur  $T_1$  conducteur pendant l'intervalle  $(0, \alpha_1 T)$ .

- Calculer le rapport  $E/U$  quand le courant  $i'$  est toujours positif.
- Pour quelle valeur moyenne  $I'_1$  du courant  $i'$  apparaît au cours de chaque période un intervalle à  $i'$  nul ?
- Pour  $0 < I' < I'_1$ , en désignant par  $t = t_1$  l'instant où  $i'$  s'annule, exprimer  $E$  et la valeur moyenne  $I'$  du courant  $i'$  en fonction de  $U$ ,  $\alpha_1$ ,  $t_1$ ,  $T$  et  $L$  ; en déduire la relation liant  $E/U$  à  $\alpha_1$  et à  $I'/I'_1$ .
- Tracer les courbes  $E/U = f(I')$  pour  $\alpha_1 = 0,25$ ,  $\alpha_1 = 0,5$  et  $\alpha_1 = 0,75$ .

► *Hacheur parallèle*

Le semiconducteur  $T_1$  toujours ouvert, au cours de chaque période  $T$ , on ferme le semiconducteur  $T_2$  pendant l'intervalle  $[(1 - \alpha_2)T, T]$ .

Comme pour le hacheur série :

- Calculer le rapport  $E/U$  quand le courant  $i'$  est toujours négatif.
- Calculer la valeur moyenne  $I'_2$  de  $i'$  pour laquelle apparaît un intervalle à  $i'$  nul.
- Pour  $I'_2 < I' < 0$ , établir la relation donnant  $E/U$  en fonction de  $\alpha_2$  et  $I'/I'_2$ .
- Tracer les courbes  $E/U = f(I')$  pour  $\alpha_2 = 0,75$ ,  $\alpha_2 = 0,5$  et  $\alpha_2 = 0,25$ .

► *Commande continue*

Pour assurer la continuité du réglage de  $E/U$  quels que soient le sens et la valeur de  $i'$ , le semiconducteur  $T_1$  est commandé à la fermeture pendant tout l'intervalle  $(0, \alpha_1 T)$  et à l'ouverture pendant le reste de la période, et le semiconducteur  $T_2$  est commandé à la fermeture pendant tout l'intervalle  $(\alpha_1 T, T)$  et à l'ouverture pendant le reste de la période.

- Que devient la relation liant  $E/U$  à  $\alpha_1$  ?
- Est-il possible de tenir compte d'une façon simple de la résistance  $R$  de la source du courant  $i'$  ?

► *Hacheur série* ( $E = u'_{\text{moy}}$ )

- Si  $i'$  est toujours positif (figure 4.35a) :

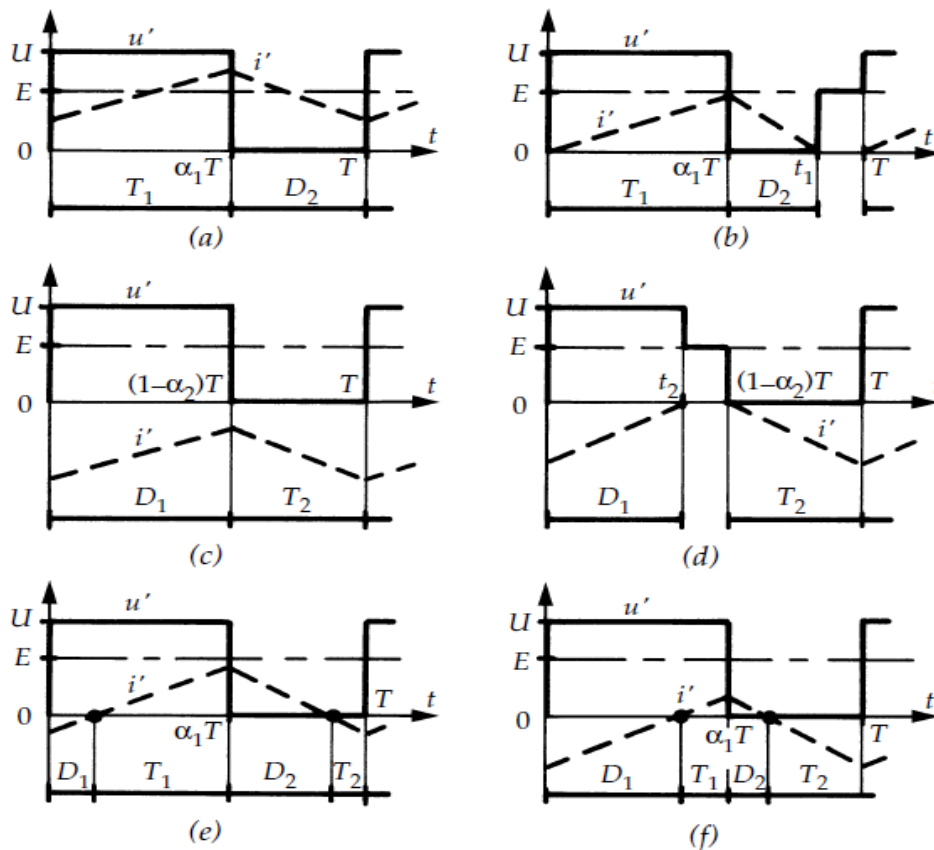
$$E = \alpha_1 U.$$

- La valeur minimum de  $i'$  égale 0 si  $I'$  a pour valeur :

$$I'_1 = \frac{UT}{2L}(\alpha_1 - \alpha_1^2).$$

- Si  $i'$  est nul pour  $t_1 < t < T$  (figure 4.35b) :

$$t_1 = \frac{U}{E} \alpha_1 T \quad \text{ou} \quad E = \alpha_1 U \frac{T}{t_1}$$



$$I' = \frac{U}{2L} \alpha_1 (t_1 - \alpha_1 T)$$

Donc :

$$\frac{E}{U} = \frac{1}{1 + \frac{1 - \alpha_1}{\alpha_1} \frac{I'}{I'_1}}$$

- Caractéristiques en traits pleins à droite de la figure 4.36.

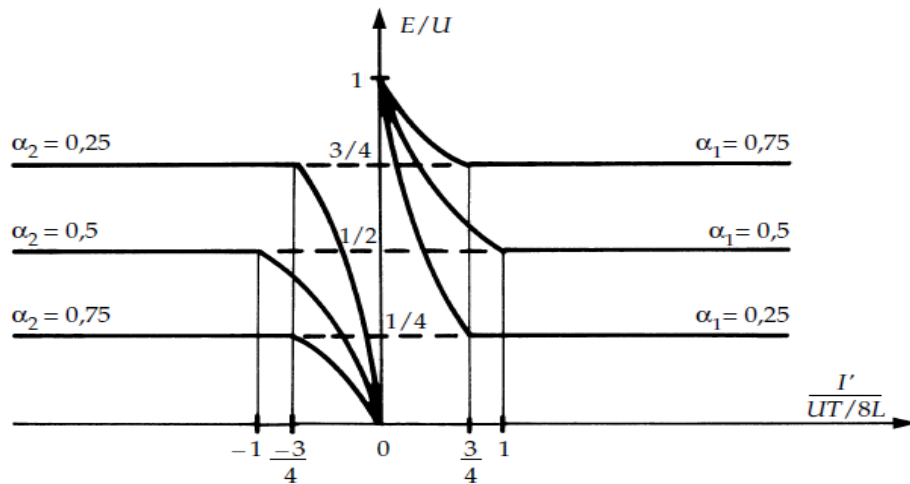
► *Hacheur parallèle* ( $E = u'_{\text{moy}}$ )

- Si  $i'$  est toujours négatif (figure 4.35c)

$$E = (1 - \alpha_2)U.$$

- Le maximum de  $i'$  égale 0 pour :

$$I'_2 = -\frac{UT}{2L}(\alpha_2 - \alpha_2^2)$$



- Si  $i'$  est nul pour  $t_2 < t < (1 - \alpha_2)T$  (figure 4.35d) :

$$t_2 = \frac{E}{U - E} \alpha_2 T \quad \text{ou} \quad E = U \frac{t_2}{t_2 + \alpha_2 T}, \quad I' = -\frac{U}{2L} \alpha_2 t_2$$

Donc :

$$\frac{E}{U} = \frac{1}{1 + \frac{\alpha_2}{1 - \alpha_2} \frac{I'_2}{I'_1}}$$

- Caractéristiques en traits pleins à gauche de la figure 4.36.

► *Commande continue* ( $\alpha_2 = 1 - \alpha_1$ )

- Quel que soit  $i'$  (figure 4.34e et f),

$$\begin{aligned} u &= U, & \text{pour } 0 < t < \alpha_1 T, \\ u &= 0, & \text{pour } \alpha_1 T < t < T, \end{aligned}$$

$$E = \alpha_1 U.$$

- Les demi-droites horizontales sont reliées par les segments en traits interrompus (figure 4.36).
- Puisque  $E = u'_{\text{moy}} - RI' = \alpha_1 U - RI'$ , les droites  $E/U = f(I')$  prennent une pente  $-R/U$ .