5

LES REDRESSEURS DC/DC: LES HACHEURS

Objectifs :

- Connaître les différents types de hacheur,
- Connaître leurs principes de fonctionnement et leurs applications.

1. Généralités

1.1.Définitions

Un convertisseur à courant continu permet la conversion de continu à continu sans liaison avec une source à courant alternatif.

L'hacheur est un commutateur électronique à fonctionnement périodique qui, alimente à partir d'une source à tension continue fixe, peut fournir à une charge une tension continue variable.

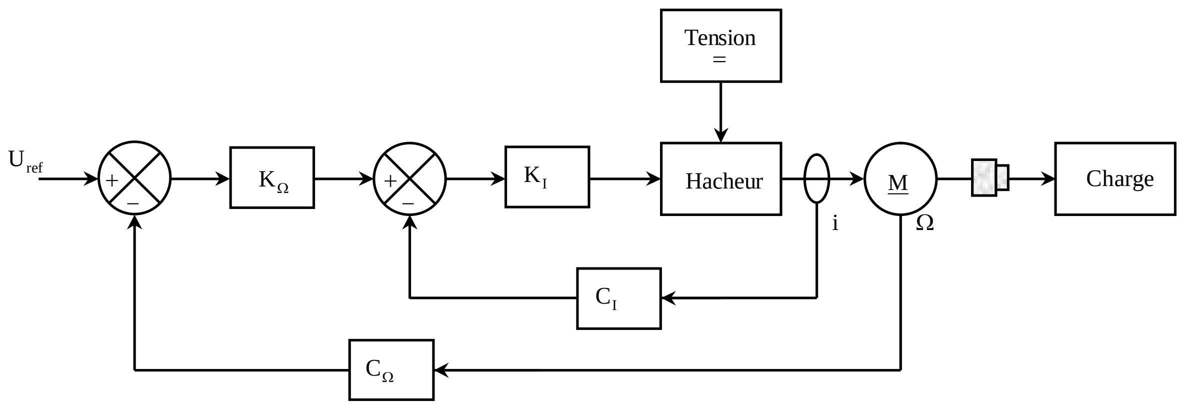

Fig.5.1: Schéma synoptique d'une chaîne de commande d'un M_{CC}

1.2. Utilisations

Leur utilisation permet le contrôle de la puissance électrique dans des circuits fonctionnant-en courant continu avec une très grande souplesse et un rendement élevé.

En forte puissance, il intervient comme organe de réglage de la puissance électrique en continu. Généralement dans les systèmes de contrôle de vitesse ou de couple de machines électriques. En petite et moyenne puissance, ils sont utilisés comme une alimentation (Alimentations à découpages).

2. Structures fondamentales

Ces convertisseurs autorisent le transfert d'énergie d'une source vers une charge, celles-ci sont :

- Soit de nature capacitive (source de tension),
- Soit de nature inductive (source de courant).

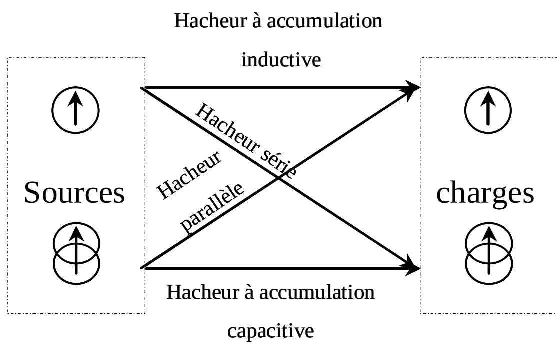

Fig.5.2: Différentes structures de conversion (DC/DC)

3. Hacheur série

Il permet de transférer l'énergie d'une source de tension constante de valeur fixe vers un récepteur de type courant, c'est le plus rudimentaire, il permet donc d'obtenir une tension de valeur moyenne réglable unidirectionnelle. Le schéma de principe est donné par la figure suivante.

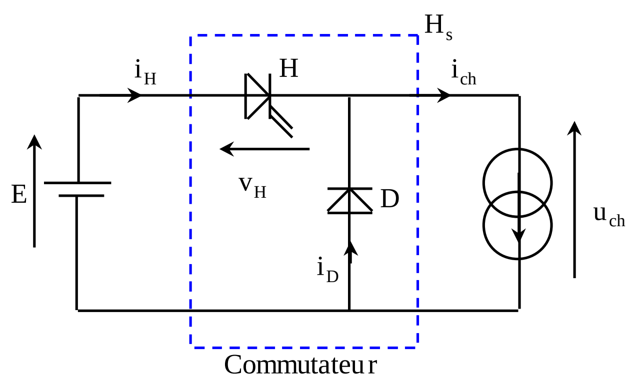

Fig.5.3: Hacheur dévolteur

L'interrupteur électronique (H) peut être un transistor de puissance (bipolaire, MOS, ou IGBT) ou un thyristor accompagné d'un circuit auxiliaire d'extinction ou un GTO, il est commandé par un signal périodique de rapport cyclique α avec ($0 \leq \alpha < 1$), élaboré par un circuit de commande isolé d'hacheur, donné par la figure ci dessous.

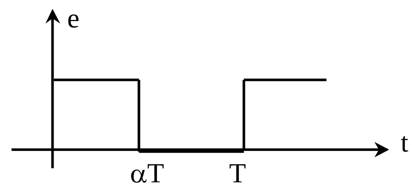

Fig.5.4: Signal de commande du H_s

3.1.Moteur à courant continu commandé par un hacheur série

On se place dans le cas la conduction continue (c'est à dire que le courant dans la charge ne s'annule pas), on ferme l'interrupteur (H) avant que le curant de roue libre soit nul.

❖ **Analyse de fonctionnement et mise en équations:**

Pour $t \in [0, \alpha T]$, on commande H à la fermeture et la diode D sera automatiquement bloquée, on peut écrire : $u_{ch} = U = Ri_{ch} + L\frac{di_{ch}}{dt} + E$ ❶ , $i_T = i_{ch}$, $v_D = -U$ et $v_H = 0$

La résolution de cette équation différentielle aboutit à : $i_{1ch}(t)=\frac{U-E}{R}+(I_0-\frac{U-E}{R}).e^{-\frac{(t)}{\tau}}$, avec une condition initiale $i_{1ch}(0) = I_0$

Pour $t \in [\alpha T, T]$, on commande H à l'ouverture et la diode D sera passante, on peut écrire :

$u_{ch} = 0 = Ri_{ch} + L\frac{di_{ch}}{dt} + E$ ❷ , $i_T = 0$, $i_D = i_{ch}$, $v_D = 0$ et $v_H = U$

La résolution de cette équation différentielle aboutit à : $i_{2ch}(t)=-\frac{E}{R}+(I_1+\frac{E}{R}).e^{-\frac{(t-\alpha T)}{\tau}}$, avec la condition $i_{1ch}(\alpha T) = I_1$.

❖ **Diagrammes de tension et courants:**

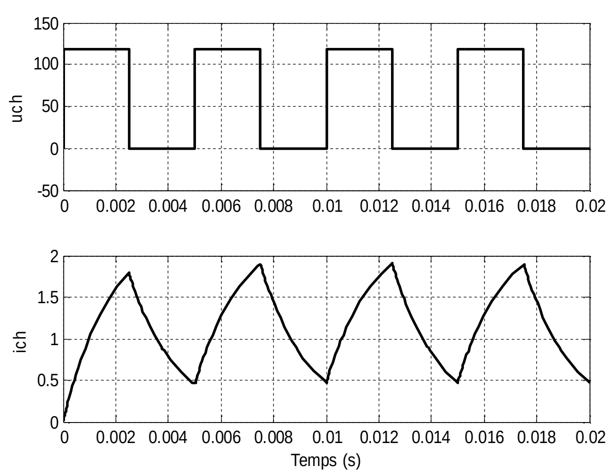

Fig.5.4 : Allures de u_{ch} et i_{ch}

❖ **Expressions des courants (I_0 et I_1):**

On part de deux relations suivantes :

$$\begin{cases} i_{1ch}(\alpha T)=I_1=(\frac{U-E}{R}).(1-e^{-\frac{\alpha T}{\tau}})+I_0.e^{-\frac{\alpha T}{\tau}} \\ i_{2ch}(T)=I_0=-\frac{E}{R}+(I_1+\frac{E}{R}).e^{-\frac{(1-\alpha)T}{\tau}} \end{cases}$$

La résolution de ces deux équations en I_0 et I_1, donne:

$$I_1=\frac{U}{R}\left[\frac{1-e^{-\alpha\frac{T}{\tau}}}{1-e^{-\frac{T}{\tau}}}\right]-\frac{E}{R}\ ;\ I_0=\frac{U}{R}\left[\frac{e^{-\frac{(1-\alpha)T}{\tau}}-e^{-\alpha\frac{T}{\tau}}}{1-e^{-\frac{T}{\tau}}}\right]-\frac{E}{R}$$

Ceci permet de déterminer l'ondulation de courant: $\Delta i=I_1-I_0=\frac{U}{R}.\frac{(1-e^{-\alpha\frac{T}{\tau}}).(1-e^{-\frac{(1-\alpha)T}{\tau}})}{1-e^{-\frac{T}{\tau}}}$.

❖ **Valeurs moyennes du courant et tension:** $(u_{ch})_{moy}=\alpha.U;\ (i_{ch})_{moy}=\alpha.\frac{U}{R}$

Constatation :

On peut constater que l'ondulation du courant ne dépend que de (R, L, T, U et α).

L'hacheur série est abaisseur de tension.

3.2.Etude de la conduction discontinue

❶ **Conduction critique :**

C'est le cas particulier de fonctionnement d'un hacheur dévolteur ou le minimum du courant de charge est nulle (I_0= 0), mais sans discontinuité.

❖ **Diagrammes de tension et courant:**

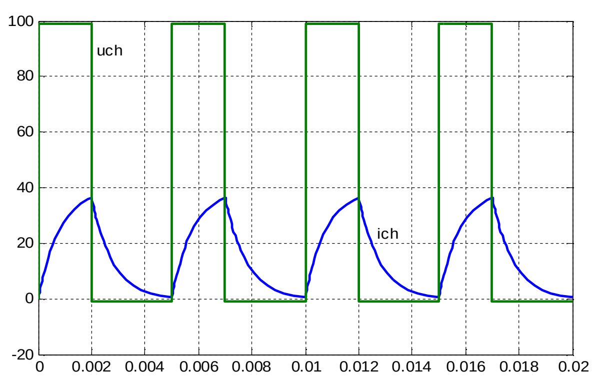

Fig.5.5: Allures des grandeurs u_{ch} et i_{ch}

❖ **Relation de la conduction critique:**

Cette relation est obtenue en écrivant (I_0= 0), on aboutit à : $\alpha_c=\frac{\tau}{T}.\mathrm{Log}\left(1+\frac{E}{U}.(e^{+\frac{T}{\tau}}-1)\right)$.

❷Conduction discontinue:

Pendant la séquence de roue libre, en régime de conduction discontinue, l'inductance restitue toute l'énergie accumulée et le courant de charge s'annulé ou bout d'un temps inférieur au temps d'ouverture.

❖ **Diagrammes de tension et courant:**

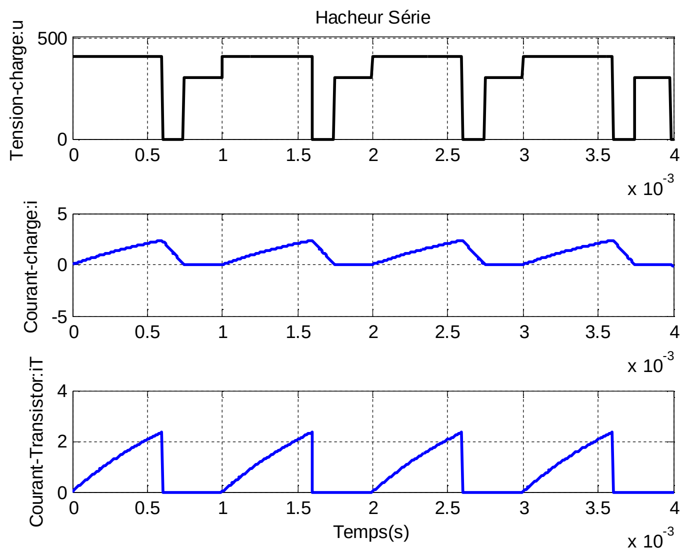

Fig.5.6 : Allures des grandeurs u_{ch} et i_{ch}

On définit le rapport cyclique de conduction discontinue par (β), ou ($0 \leq \beta < 1$). Il est définit par: $\beta=\frac{\tau}{T}\mathrm{Log}\left(1+\frac{U}{E}(e^{+\frac{\alpha T}{\tau}}-1)\right)$.

Si on fait un développement limité arrêté au premier ordre, on obtient: $\beta=\alpha.\frac{U}{E}$.

❖ **Valeur moyenne de la tension de charge :**

$$\begin{cases}(u_{ch})_{moy}=\alpha.U+(1-\beta).E \\ (i_{ch})_{moy}=\dfrac{\alpha.U-\beta.E}{R}\end{cases}$$

3.3. Caractéristiques de charges

Elles représentent l'évolution de la tension moyenne en fonction du courant de charge moyen: $(u_{ch})_{moy}=f((i_{ch})_{moy})$, d'un hacheur dévolteur pour différentes valeurs de rapport cyclique « α ». Pour simplifier le calcul, on suppose que la résistance de charge est très faible.

❖ **Expressions du courant de charge:**

$$i_{ch(t)}=\begin{cases}(\frac{U-E}{L}).t & ;\ 0\le t\le \alpha T\\ -\frac{E}{L}.(t-T) & ;\ \alpha T\le t\le \beta T\end{cases}$$

Le courant maximum vaut: $i_{ch}(\alpha T)=I_1=(\frac{U-E}{L})\alpha T$.

❖ **Courant et tension moyens:**

$$\begin{cases}(u_{ch})_{moy}=\alpha U+(1-\beta)E=E\\ (i_{ch})_{moy}=\beta\frac{I_1}{2}\end{cases}.$$

Comme le courant de charge s'annule à l'instant (t = βT), on aura donc: $\alpha U=\beta E$

Si on pose de plus $\frac{(u_{ch})_{moy}}{U}=\frac{E}{U}=\frac{\alpha}{\beta}=a$ la valeur du courant moyen peut s'écrire:

$$(i_{ch})_{moy}=\alpha^2\frac{T}{2.L.a}(U-E)=\frac{U}{2.L.f}(\frac{1}{a}-1).\alpha^2.$$

En posant $\gamma=(\frac{2L}{UT})(i_{ch})_{moy}$. On obtient alors $a=\frac{\alpha^2}{\alpha^2+\gamma}$. Cette relation traduit la conduction discontinue. Pour (α) donné, la variation $(u_{ch})_{moy}$ en fonction de $(i_{ch})_{moy}$.

❖ **Allures de $(u_{ch})_{moy}$ en fonction de $(i_{ch})_{moy}$:**

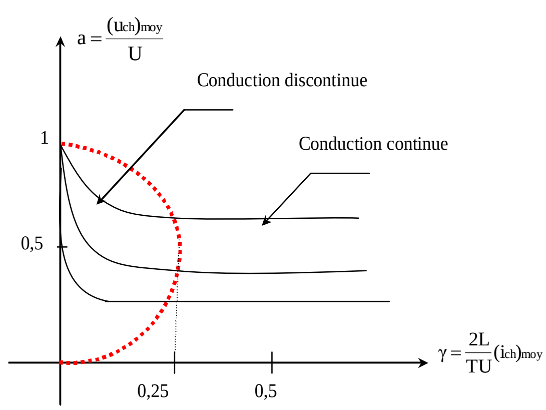

Fig.5.7 : Allures des grandeurs (u_{ch} et i_{ch})

En conduction continue, on a donc $\frac{(u_{ch})_{moy}}{U} = \frac{\alpha}{\beta} = a$, on obtient des droites parallèles à « γ ».

En conduction discontinue, on $a = \alpha$ d'où $\gamma = a(1-a)$, on obtient un demi-cercle.

4. Hacheur parallèle

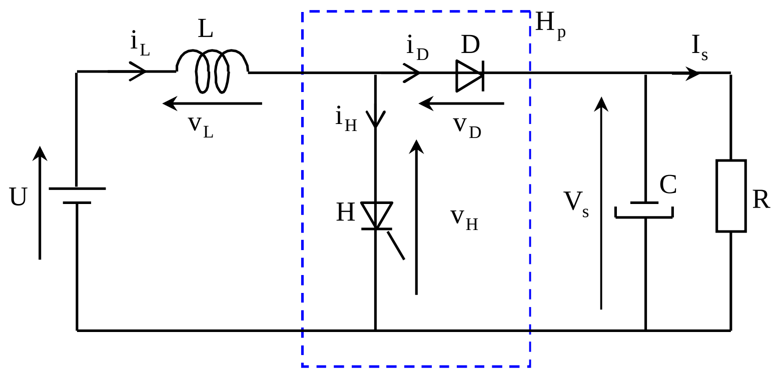

Fig.5.8: Hacheur survolteur

❖ **<u>Hypothèses:</u>**

On suppose que la tension (V_s) est sensiblement constante, et que la conduction est continue :

L'interrupteur H est fermé pendant le temps (αT), l'énergie est stockée dans la bobine, la diode D est bloquée. Le blocage de H entraîne la décharge de l'inductance dans la charge, cette décharge n'est possible que pour (V_s>U).

❖ **<u>Mise en équations</u> :**

Pour t∈ [0, α T], on a: $v_L = U = L\frac{di_L}{dt}$; $v_H = 0$, $i_L = i_h$, $i_D = 0$, $v_D = -Vs$

Pour t∈ [α T, T], on a : $v_L = U - Vs = L\frac{di_L}{dt}$; $v_H = Vs$, $i_L = i_D$, $i_H = 0$, $v_D = 0$.

❖ **<u>Expressions du courant i_L :</u>**

$$i_{ch}(t) = \begin{cases} \frac{U}{L}t \quad ; \quad 0 \le t \le \alpha T \\ \frac{(U-Vs)}{L}(t-\alpha T) \quad ; \quad \alpha T \le t \le T \end{cases}$$

❖ **Allures des grandeurs courant et tension dans l'inductance:**

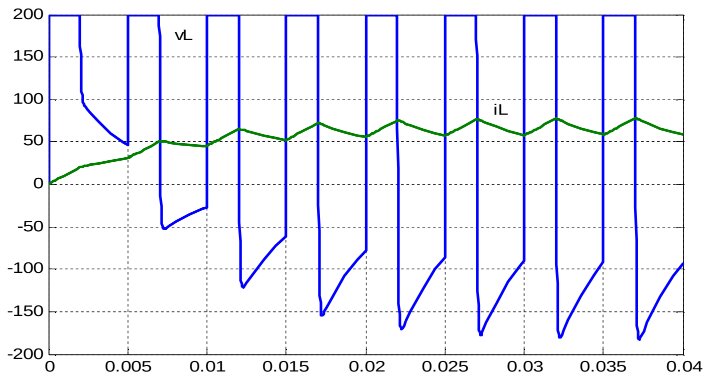

Fig.5.9: Allures de v_L et i_L

❖ **Expressions de la tension de sortie:**

La condition $(v_L)_{moy} = 0$, en régime permanent impose que $Vs = \frac{U}{1-\alpha}$.

On remarque que la tension de sortie est toujours supérieure à U, le montage est élévateur de tension.

❖ **Ondulation du courant dans la bobine:** Elle est définie par $\Delta I = \frac{UT}{L}\alpha$.

❖ **Puissances et rendement:**

La puissance fournie par la source est : $(P_1)_{moy} = U(i_L)_{moy} = UI_L$

La puissance moyenne reçue par la charge est : $(P_2)_{moy} = VS.(i_D)_{moy} = Vs(1-\alpha)I_L$

Le rendement vaut : $\eta = \frac{(P_2)_{moy}}{(P_1)_{moy}} = \frac{Vs(1-\alpha)}{U} = 1$

5. Hacheurs à accumulation d'énergie

Les hacheurs à accumulation d'énergie permettent le transfert d'énergie entre deux sources dynamiques de même nature. L'énergie est dans un premier temps transférée de la source vers l'élément de stockage (condensateur ou inductance), et qui la restitue à la charge dans un deuxième temps. On distingue deux types d'hacheurs :

- Hacheurs à accumulation inductive
- Hacheurs à accumulation capacitive.

5.1.Hacheurs à stockage inductif

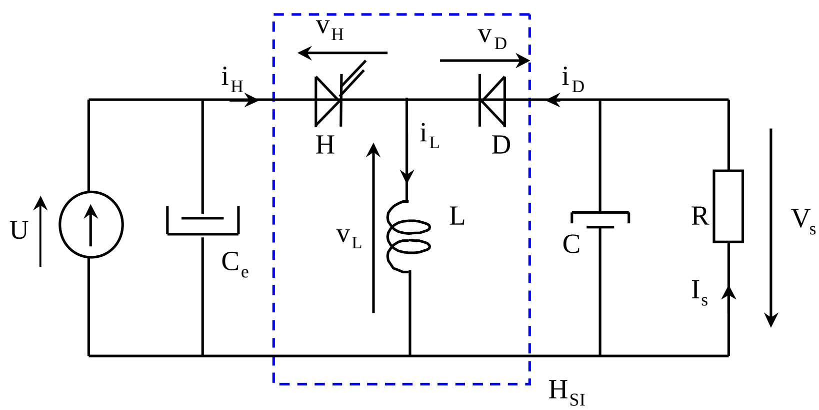

Fig.5.10 : Hacheur à accumulation inductive

L'interrupteur H est fermé pendant le temps (αT) l'énergie est stockée dans la bobine L et la tension de sortie est négative par rapport aux points communs : la diode est bloquée.

Le blocage de H provoque la décharge de l'inductance dans la charge R. Cette décharge peut être totale ou partielle.

❖ **<u>Mise en équations:</u>**

Les deux phases de fonctionnement sont

1^{ere} Phase, H est fermé et la diode D est ouverte,

2^{ere} Phase, H est ouvert et la diode D est fermée.

Les équations correspondantes sont respectivement :

$$\begin{cases} U = L\dfrac{di_L}{dt}; \quad 0 \le t \le \alpha T \\ Vs + L\dfrac{di_L}{dt} = 0; \quad \alpha T \le t \le T \end{cases}$$

On déduit les deux expressions de i_L en fonction de temps:

$$i_L = \frac{U}{L}t + I_0 ;\ 0 \le t \le \alpha T$$
$$i_L = -\frac{Vs}{L}(t-\alpha T) + I_1 ;\ \alpha T \le t \le T$$

❖ **Allures des grandeurs courant et tension dans l'inductance:**

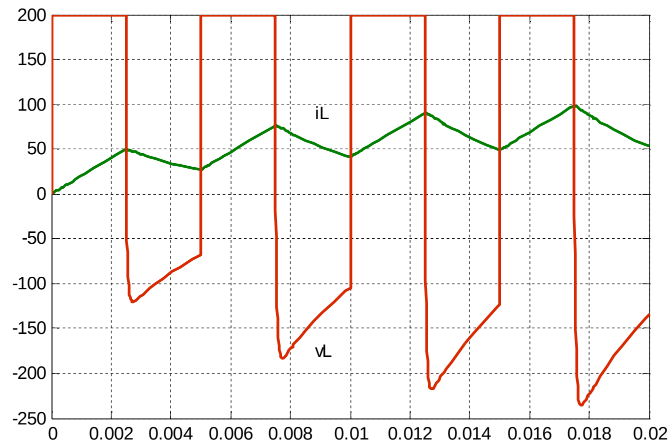

Fig.5.11: Allures des grandeurs de v_L et i_L

❖ **Expressions de la tension de sortie:**

La nullité de $(v_L)_{moy}$, en régime permanent impose : $Vs=\frac{\alpha}{1-\alpha}U$

Conclusion: Ce montage peut abaisser ou élever la tension d'entrée en agissant sur le rapport cyclique. La tension de sortie est négative «montage inverseur ».

5.2.Hacheurs à stockage capacitif

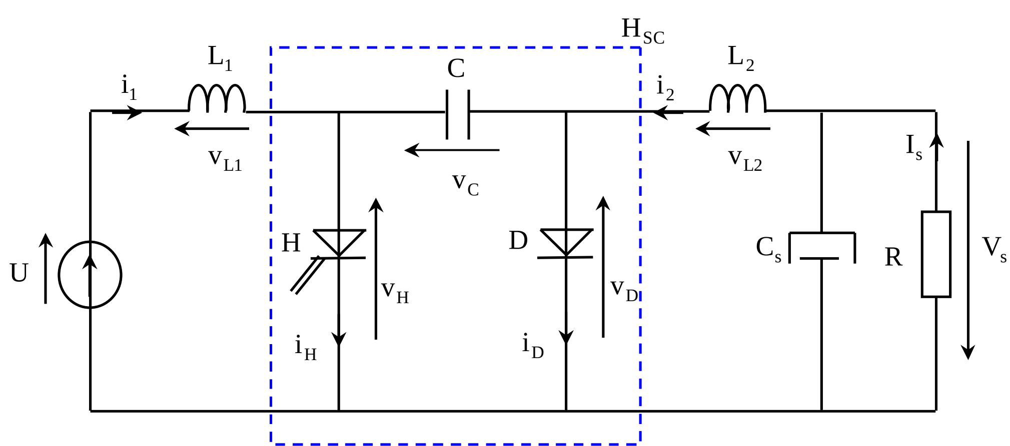

Fig.5.12: Hacheur à accumulation capacitive

❖ **Hypothèses:**

On suppose que les inductances de lissages (L_1 et L_2) sont grandes pour considérer les courants ($i_1 = I_1$ et $i_2 = I_2$) comme constants ; et on aborde que la conduction continue.

Pendant la fermeture de l'interrupteur H ; nous avons stockage de l'énergie dans l'inductance L_1, transfert d'énergie du condensateur C vers l'inductance L_2 et vers la charge.

En conduction continue, la tension aux bornes du condensateur C ne s'annule pas et la diode D est alors bloquée. Le blocage de H entraîne la conduction de la diode de roue libre D, et le condensateur se recharge.

❖ **Mise en équations:**

Pour $t \in [0, \alpha T]$, on a $i_H = I_1 + I_2$ et $i_C = C\frac{dv_C}{dt} = -I_2$, d'où on trouve $v_C = -\frac{I_2}{C}t + v_{C1}$.

Pour $t \in [\alpha T, T]$, on a $i_D = I_1 + I_2$ et $i_C = C\frac{dv_C}{dt} = -I_1$, d'où on trouve $v_C = \frac{I_1}{C}(t-\alpha T) + v_{C2}$.

❖ **Ondulation de tension de la capacité:**

Elle est définie par : $\Delta v_C = v_{C1} - v_{C2} = \frac{I_1}{C}(1-\alpha)T = \frac{I_2}{C}\alpha T$.

A partir de cette relation, découle une relation entre les courants (I_1 et I_2): $\frac{I_1}{I_2} = \frac{\alpha}{1-\alpha}$.

❖ **Valeur moyenne de la tension de sortie:**

La condition $(v_{L1})_{moy} = 0$ et $(v_{L2})_{moy} = 0$, en régime permanent donne $U = (v_H)_{moy} = (1-\alpha)V_C$ et $V_s = (V_D)_{moy} = \alpha V_C$, on obtient : $V_s = \frac{\alpha}{1-\alpha}U$.

❖ **Puissances et rendement:**

Il est claire que la puissance d'entrée est donnée par : $P_1 = U.I_1 = (\frac{1-\alpha}{\alpha}V_s).(\frac{\alpha}{1-\alpha}I_2) = I_2V_s = P_2$

D'où le rendement vaut 1tout en négligeant les chutes dans les convertisseurs et les résistances des bobines (L_1 et L_2) : $\eta = \frac{P_2}{P_1} = 1$.

❖ **Allures de différentes grandeurs en courants et tensions:**

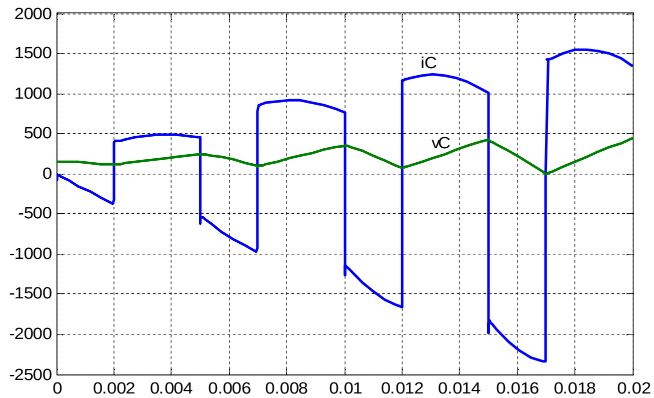

Fig.5.13: Allures des grandeurs v_L et i_L

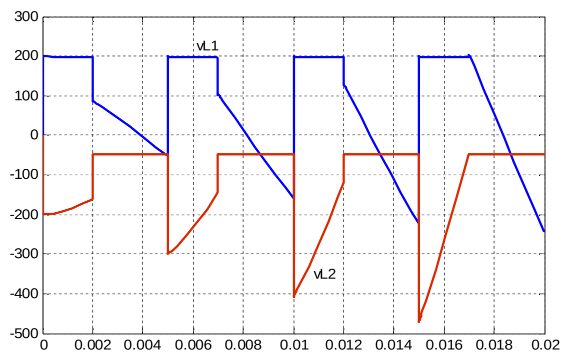

Fig.5.14: Allures des grandeurs v_{L1} et v_{L2}

Conclusions :

Le gain en tension est identique à celui du montage dual à stockage inductif, il s'agit également d'un montage e inverseur de tension qui peut abaisser ou élever la tension d'entrée en agissant sur le rapport cyclique (α).

6. Hacheurs réversible en puissance

Un hacheur est réversible en puissance s'il fonctionne au minimum dans deux quatre quadrants de la caractéristique $u_{ch}=f(i_{ch})$.

❖ **Fonctionnement de la machine dans le quatre quadrants:**

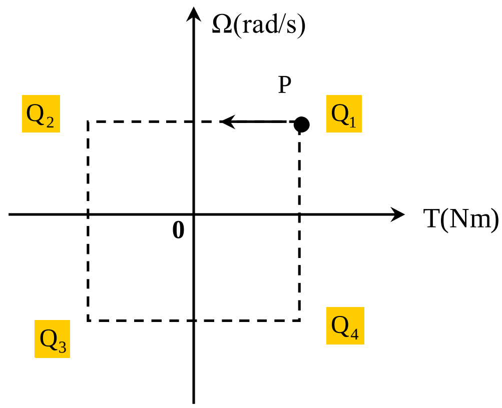

Fig.5.15: Hacheur fonctionnant dans les quatre quadrants

6.1.Hacheur réversible en courant

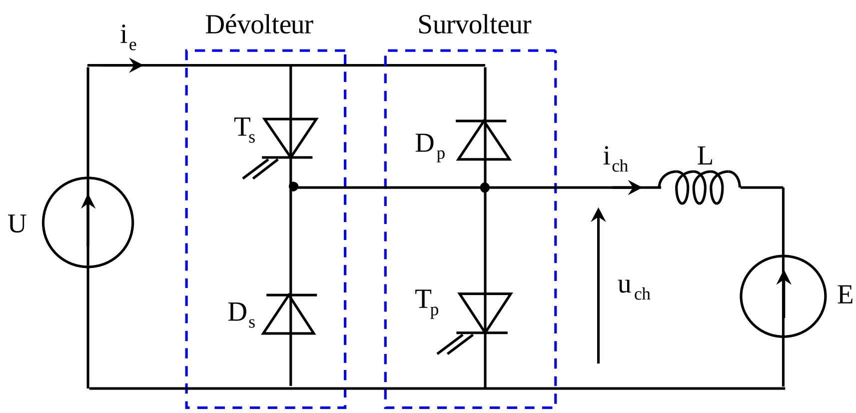

Fig.5.16 : Hacheur fonctionnant dans les quadrants 1et 2

Si les interrupteurs (T_s et D_s) sont actifs, fonctionnement du hacheur dans le quadrant (Q_1),

Si les interrupteurs (T_p et D_p) sont actifs, fonctionnement du hacheur dans le quadrant (Q_2),

- Tension moyenne **:** $(u_{ch})_{moy} = E = \alpha_1 U = (1-\alpha_2)U$

6.2.Hacheur réversible en tension

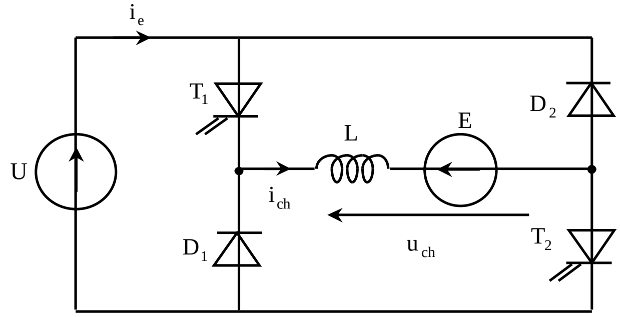

Fig.5.17: Hacheur fonctionnant dans les quadrants 1et 4

Si le rapport cyclique ($\alpha > \frac{1}{2}$), le hacheur fonctionnant dans le quadrant (Q_1). Par contre, si le rapport cyclique ($\alpha < \frac{1}{2}$), le hacheur fonctionnant dans le quadrant (Q_4).

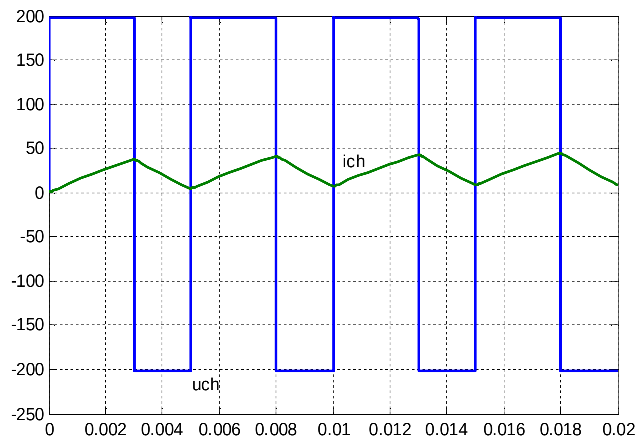

Figure 5.18 : Allures des grandeurs u_{ch} et i_{ch}

- Tension moyenne: $(u_{ch})_{moy}=E=(2\alpha-1)U$.

6.3.Hacheur réversible en courant et en tension

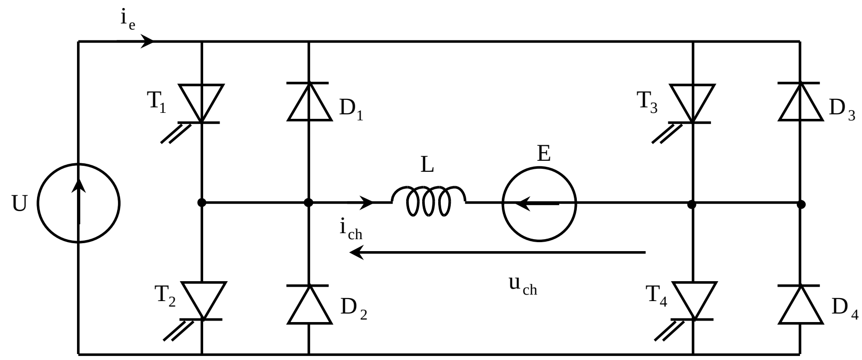

Fig.5.19 : Hacheur à quatre quadrants

• Tension moyenne : $(u_{ch})_{moy} = E = (2\alpha - 1)U$.

❶ Fonctionnement de la machine à courant dans le quadrant Q_1

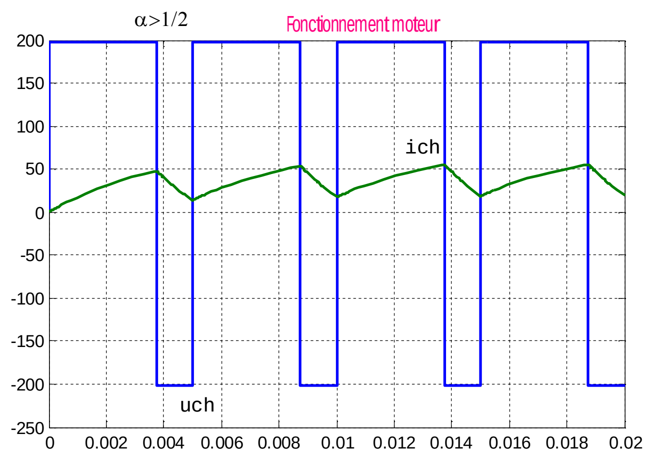

Fig.5.20: Allures des grandeurs u_{ch} et i_{ch}

❷ Fonctionnement de la machine à courant dans le quadrant Q_2

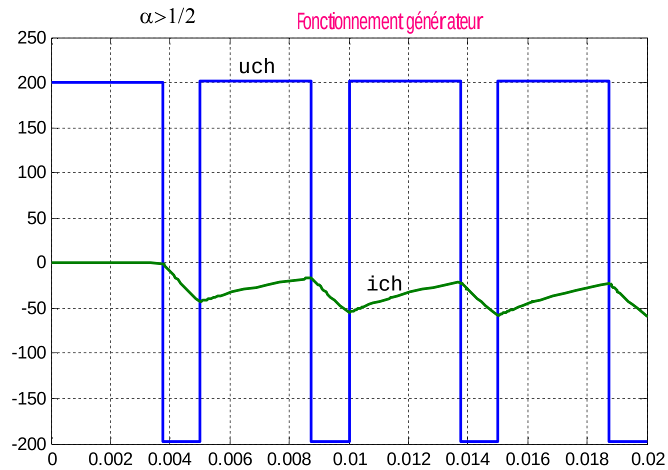

Fig.5.21 : Allures de u_{ch} et i_{ch}

❸ Fonctionnement de la machine à courant dans le quadrant Q_3

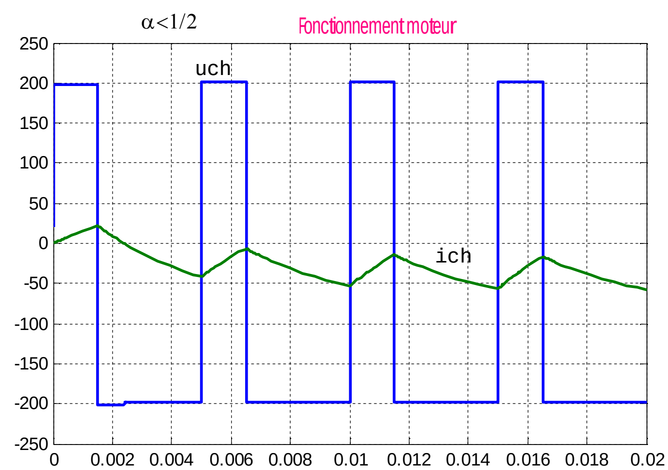

Fig.5.22 : Allures de u_{ch} et i_{ch}

❹ Fonctionnement de la machine à courant dans le quadrant Q_4

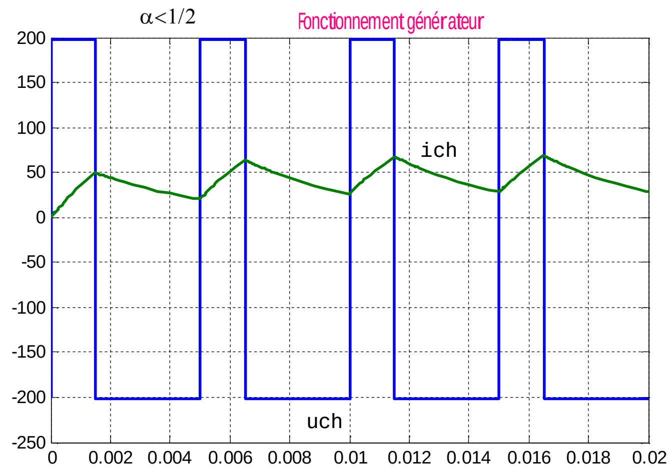

Fig.5.23: Allures de u_{ch} et i_{ch}