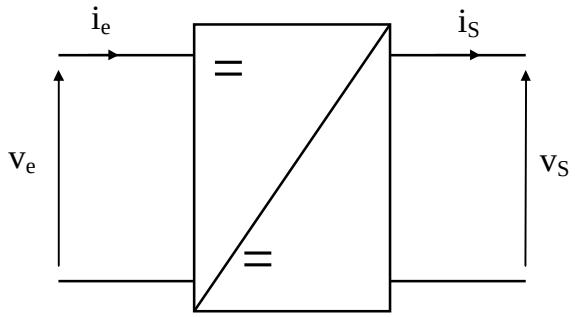
Les HACHEURS

I. INTRODUCTION.

Un hacheur permet d'obtenir une tension unidirectionnelle de valeur moyenne réglable à partir d'une source de tension continue. C'est un convertisseur continu-continu (tension v_e continue - courant i_S continu) dont le symbole est :



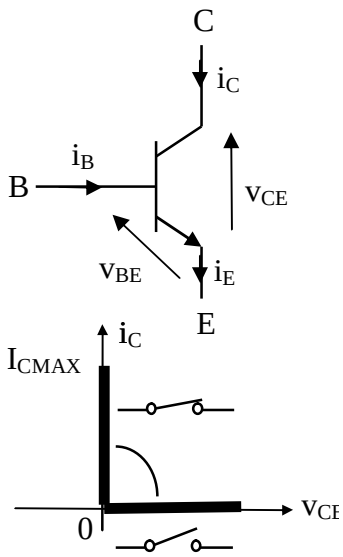
Un hacheur peut être réalisé à l'aide d'interrupteurs électroniques commandables à l'ouverture et à la fermeture tels que les thyristors GTO ou les transistors bipolaires ou à effet de champ à grille isolée.

- Transistors bipolaires :

Ils sont robustes, mais leur mise en conduction nécessite un courant à travers leur circuit base-émetteur. La commande consomme une énergie telle que l'on doit écarter ce type de transistor dans certains cas :

Si $i_B = 0 \Rightarrow i_C = 0$, le transistor est bloqué, il se comporte comme un interrupteur ouvert vu des points E et C.

Si $i_B \geq i_{BSAT} = \frac{i_{CSAT}}{b}$ (et $v_{BE} \neq 0$) $\Rightarrow i_C = i_{CSAT} > 0$ et $v_{CE} = 0$, le transistor est saturé et se comporte comme un interrupteur fermé vu des points E et C et le circuit de base consomme la puissance $p_B = v_{BE}.i_B$.



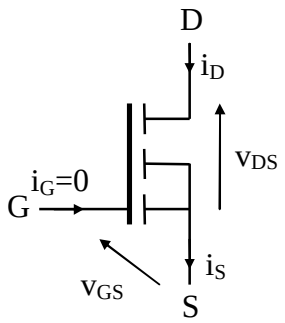
La commande se fait par le courant i_B :

Transistors MOSFET :

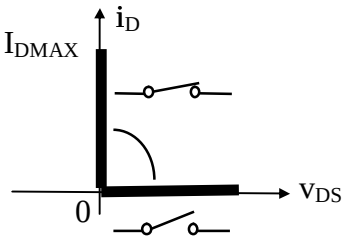
Ils sont plus fragiles que les transistors bipolaires, mais leur commande ne nécessite qu'une faible énergie, car, la grille étant isolée, l'intensité du courant de commande est quasiment nul.

Si $v_{GS} = 0 \Rightarrow i_D = 0$, le transistor est bloqué, il se comporte comme un interrupteur ouvert vu des points D et S .

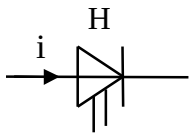
Si $v_{GS} \geq v_{GSSAT} \Rightarrow i_D > 0$ et $v_{DS} = 0$, le transistor est saturé et se comporte comme un interrupteur fermé vu des points D et S et le circuit de grille ne consomme pas de puissance.



La commande se fait par la tension v_{GS} :



Remarque :
Les interrupteurs électroniques unidirectionnels, quelle que soit leur nature, peuvent être représentés par le symbole ci-contre :

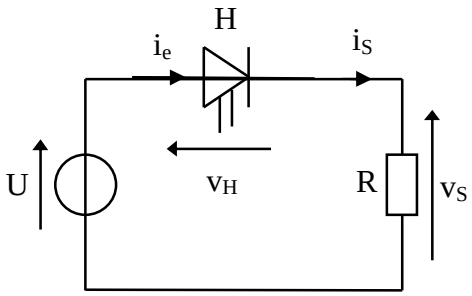


Electrodes de commande amorçage et blocage

II. HACHEUR SERIE (ABAISSEUR DE TENSION).

2.1. Principe - charge résistive.

On considère le montage:



H : interrupteur unidirectionnel parfait.

L'interrupteur électronique H est commandé par un signal v_C périodique de période T, de rapport cyclique $\alpha = \frac{t_1}{T}$ (durée de fermeture sur la période), élaboré par un circuit électronique isolé du hacheur. L'état haut de ce signal commande la fermeture de H, l'état bas, sa fermeture.

a) Analyse du fonctionnement.

- $0 < t < t_1 = \alpha.T$: H est fermé.

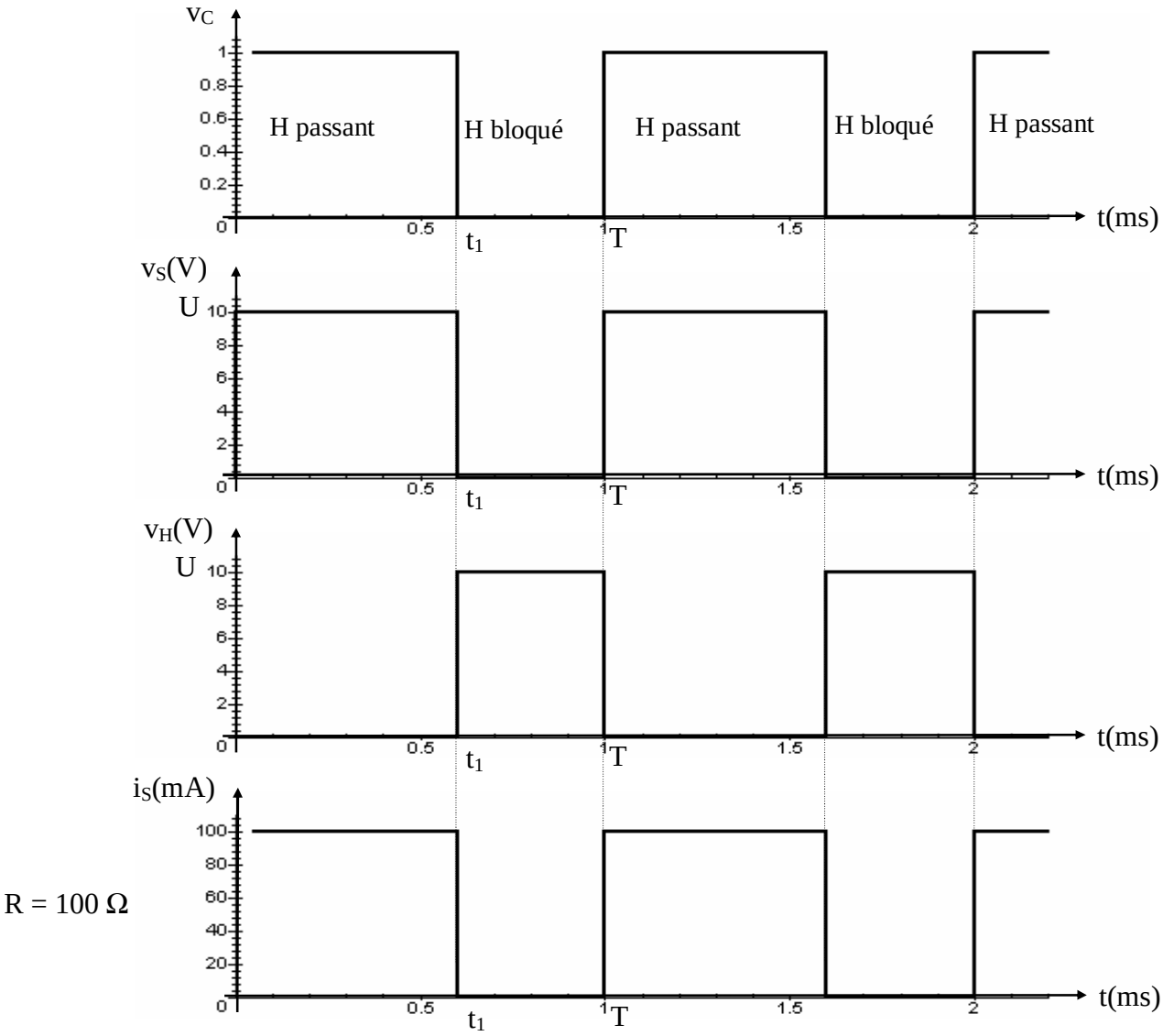
$v_H = 0$;
$v_S = U = R.i_S = R.i_e$;
$i_S = \frac{U}{R}$.

- $t_1 < t < T$: H est ouvert.

$i_S = i_e = 0$;
$v_S = 0 = R.i_S = R.i_e$;
$v_H = U$.

b) Chronogrammes.

U = 10 V ; R = 100 Ω ; α = 0,6 et T = 1 ms.



c) Valeur moyenne de la tension v_S.

Calculons la valeur moyenne $\overline{V}_S$ de $v_S(t)$:

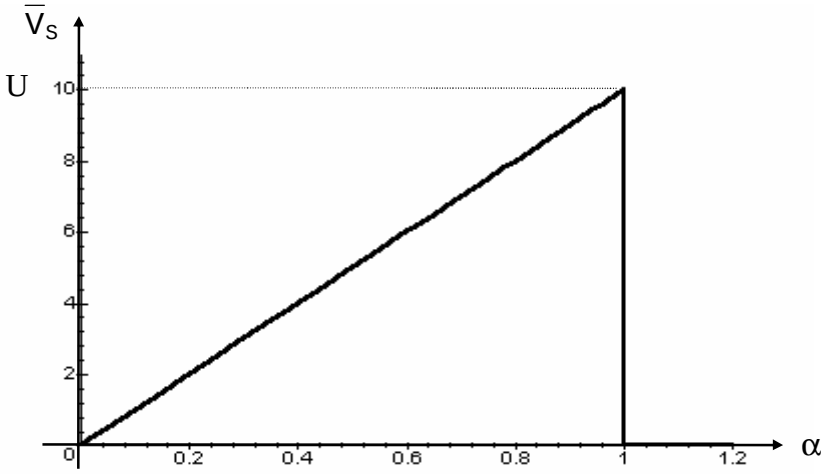
$$\overline{V_S} = \frac{1}{T}\int_{t_0}^{t_0+T} v_S(t).dt = \frac{1}{T}\int_0^{t_1} U.dt = \frac{U}{T}\int_0^{t_1} dt = \frac{U}{T}.[t]_0^{t_1}$$

$$\overline{V_S} = \frac{U}{T}.[t_1 - 0] = \frac{t_1}{T}.U = \alpha.U$$

Remarques :

- la valeur moyenne de la tension v_S peut être ajustée en jouant sur la valeur du rapport cyclique α donc sur la commande de H.
- $\overline{I_S} = \frac{\overline{V_S}}{R} = \frac{\alpha}{R}.U$.

Traçons l'allure de $\overline{V}_S = f(\alpha)$ pour U = 10 V et $0 \leq \alpha \leq 1$.



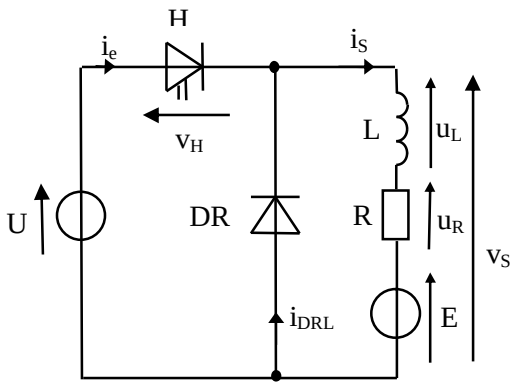
$$0\ V \leq \overline{V}_S \leq U$$

d)Conclusion.

Quelle que soit la nature de la charge, on aura $\overline{V}_S = \alpha.U \leq U$. Le hacheur série est bien abaisseur de tension ou « hacheur dévolteur ».
Si la charge est résistive, le courant i_S est interrompu.
L'ajout d'une inductance L de valeur suffisante en série avec la charge permettra le lissage du courant.

2.2. Charge active : R, L, E.

On suppose H et DRL parfaits.
DRL : diode de roue libre.
L suffisamment grande pour avoir i_S ininterrompu.



E est capable de recevoir i_S (batterie ou moteur à courant continu).
H est commandé par un signal v_C tel que :

$$\begin{cases} 0 < t < \alpha.T : v_C \text{ à l'état haut} \Rightarrow \text{H fermé} \\ \alpha.T < t < T : v_C \text{ à l'état bas} \Rightarrow \text{H ouvert} \end{cases}$$

a) Analyse du fonctionnement.

- $0 < t < \alpha.T$: H est fermé.
- la diode de roue libre DRL est polarisée en inverse ⇒ DRL bloquée ⇒ $i_{DRL} = 0$;
- $i_e = i_S$;
- $v_H = 0$;
- $U = v_S$;

L'intensité du courant dans la charge $i_S(t)$ vérifie l'équation différentielle suivante :

$$U = E + R.i_S + L.\frac{di_S}{dt} \quad (1)$$

- $\alpha.T < t < T$: H est ouvert.
- la diode de roue libre DRL assure la continuité du courant dans la charge et protège H contre les surtensions ⇒ DRL passante ⇒ $i_{DRL} = i_S$;
- $i_e = 0$;
- $v_H = U$;
- $U = 0$;

L'intensité du courant dans la charge $i_S(t)$ vérifie l'équation différentielle suivante :

$$0 = E + R.i_S + L.\frac{di_S}{dt} \quad (2)$$

Hypothèse simplificatrice : en général, R est très faible et on suppose la chute de tension u_R nulle.

Ainsi :

- l'équation (1) devient : $U = E + L.\frac{di_S}{dt}$

  soit : $di_S = \frac{U - E}{L} dt$

  on intègre membre à membre :

$$\int di_S = \frac{U - E}{L} \int dt$$

$$i_S(t) = \frac{U - E}{L}.t + \hat{I}_S \quad \Rightarrow i_S \text{ augmente}$$

  $\hat{I}_S$: valeur de l'intensité dans la charge lors de la fermeture de H en régime établi.

- l'équation (2) devient : $0 = E + L.\frac{di_S}{dt}$

  soit : $di_S = -\frac{E}{L} dt$

  on intègre membre à membre :

$$\int di_S = -\frac{E}{L} \int dt$$

$$i_S(t) = -\frac{E}{L}.(t - \alpha.T) + \hat{I}_S \quad \Rightarrow i_S \text{ diminue}$$

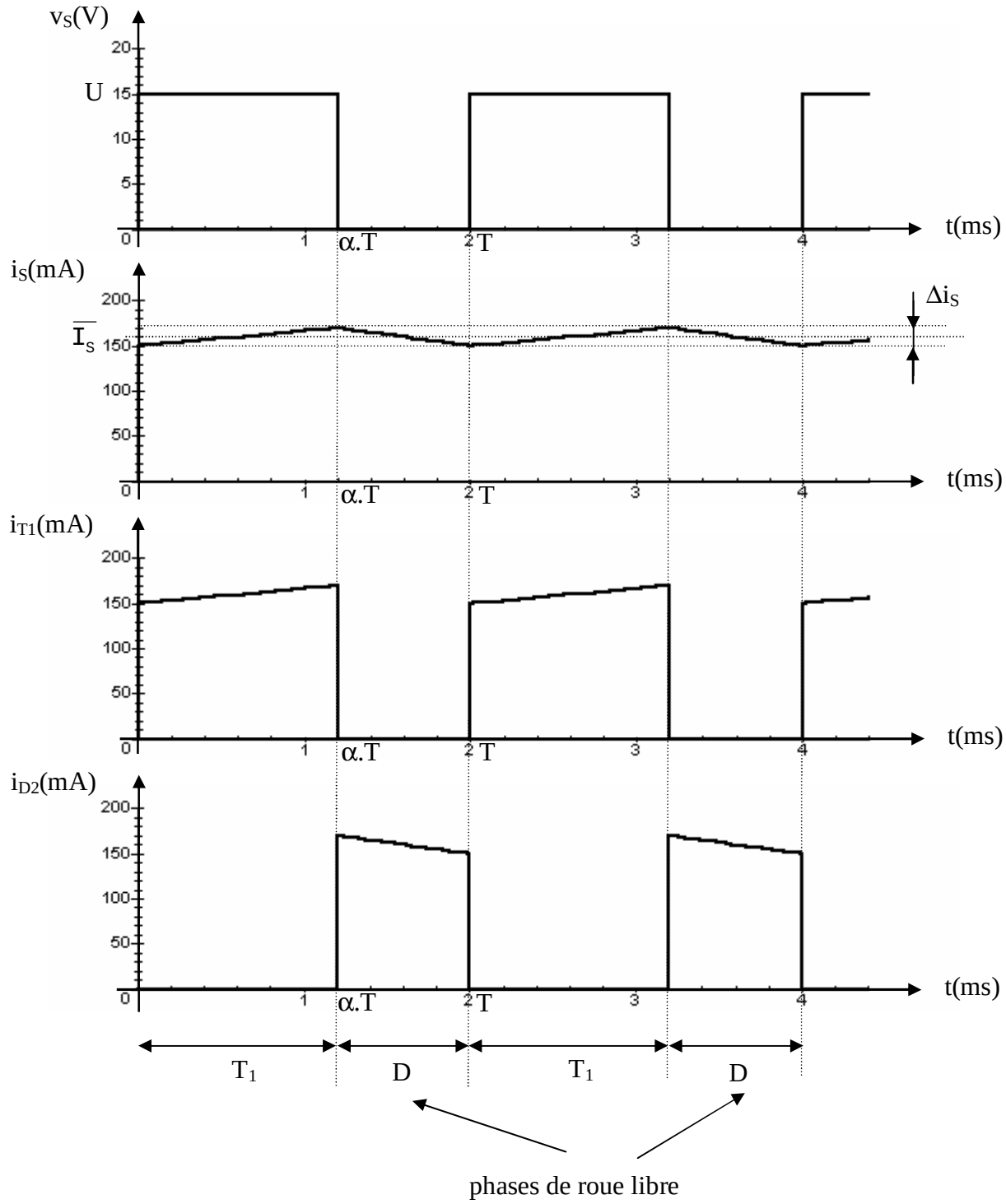
  $\hat{I}_S$: valeur de l'intensité dans la charge lors de l'ouverture de H en régime établi.

Remarque : si on néglige R, on assimile les portions de courbes réelles (exponentielles) à des droites.

b) Chronogrammes.

Pour E = 6 V ; R ≈ 1 + 12 Ω ; L = 0,4 H ; U = 15 V et f = 500 Hz. Pour α = 0,6,

Allure des courbes :



Remarques :

- Plus L augmente, plus Δi_S diminue ;
- Plus f augmente, plus Δi_S diminue ;

c) Valeur moyenne du courant dans la charge.

On a la relation suivante entre les valeurs moyennes : $\overline{V_S} = R.\overline{I_S} + E + L.\overline{\frac{di_S}{dt}}$

Or $\overline{V_S} = \alpha.U$ et sur une période $L.\overline{\frac{di_S}{dt}} = 0$, donc : $\overline{I_S} = \frac{\alpha.U - E}{R} = \frac{\hat{I}_S + \check{I}_S}{2}$

d) Ondulation du courant dans la charge.

L'ondulation du courant est $\Delta i_S = \frac{\hat{I}_S - \check{I}_S}{2}$.

On montre à partir des relations du a) que : $\Delta i_S = \frac{\alpha.(1 - \alpha).U}{2.L.f}$

Elle peut être mesurée à l'oscilloscope.

Elle est maximale pour $\alpha = 0,5$: $\Delta i_{SMAX} = \frac{U}{8.L.f}$.

2.3. Exemple d'application : variation de vitesse d'un moteur DC.

Pour U = 12 V, placer directement comme charge un petit moteur DC de 12 V.

- Visualiser v_S et i_S à l'oscilloscope. Choisir une fréquence de fonctionnement permettant d'obtenir un courant convenable dans le moteur.
  Quelle est l'influence de α sur le fonctionnement du moteur ? Justifier.

- Charger le moteur avec un rhéostat de 100 Ω.
  Que constate-t-on ? Que faudrait-il faire pour maintenir la vitesse constante ?

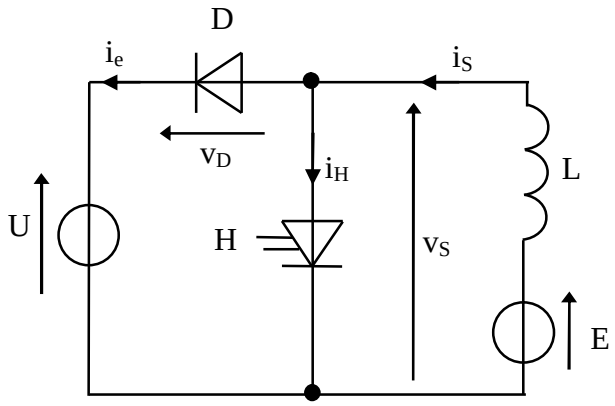
III. HACHEUR PARALLELE (ELEVATEUR DE TENSION).

3.1. Intérêt du hacheur élévateur.

Si on considère un moteur DC entraînant une lourde charge (train par exemple). Lors d'une phase de freinage il est intéressant de récupérer l'énergie mécanique en la transformant en énergie électrique au lieu de la transformer en chaleur pour être dissipée dans l'atmosphère.

Lors de la phase de freinage, la machine DC fonctionne en génératrice mais sa f.é.m. E (qui décroît car la vitesse diminue) est inférieure à la tension U qui alimentait le moteur. Pour assurer le transfert d'énergie électrique de la génératrice vers le réseau, il faut un convertisseur continu-continu élévateur de tension c'est-à-dire un hacheur parallèle.

3.2. **Analyse du fonctionnement.**



On suppose que D, H et L sont parfaits (r = 0 Ω).

H est commandé périodiquement par un signal tel que :

$$\begin{cases} \text{H fermé pour } 0 \le t \le \alpha.T \\ \text{H ouvert pour } \alpha.T \le t \le T \end{cases}$$

a) Pour 0 £ t £ a.T.

H est fermé et D est bloquée donc : $\begin{cases} i_e = 0 \\ i_H = i_S \\ v_S = 0 \end{cases}$

La loi d'ohm se traduit par la relation : $E = L.\dfrac{di_S}{dt}$

Equa. diff. du premier ordre de solution : $i_S = \dfrac{E}{L}.t + \check{I}_S$

L'intensité i_S croît de sa valeur minimale $\check{I}_S$ à sa valeur maximale $\hat{I}_S$.
L'inductance L accumule de l'énergie.

b) Pour a.T £ t £ T.

H est ouvert et D est passante donc : $\begin{cases} i_e = i_S \\ i_H = 0 \\ v_S = U \end{cases}$

On peut écrire : $v_S = U = E - L.\dfrac{di_S}{dt} > E$

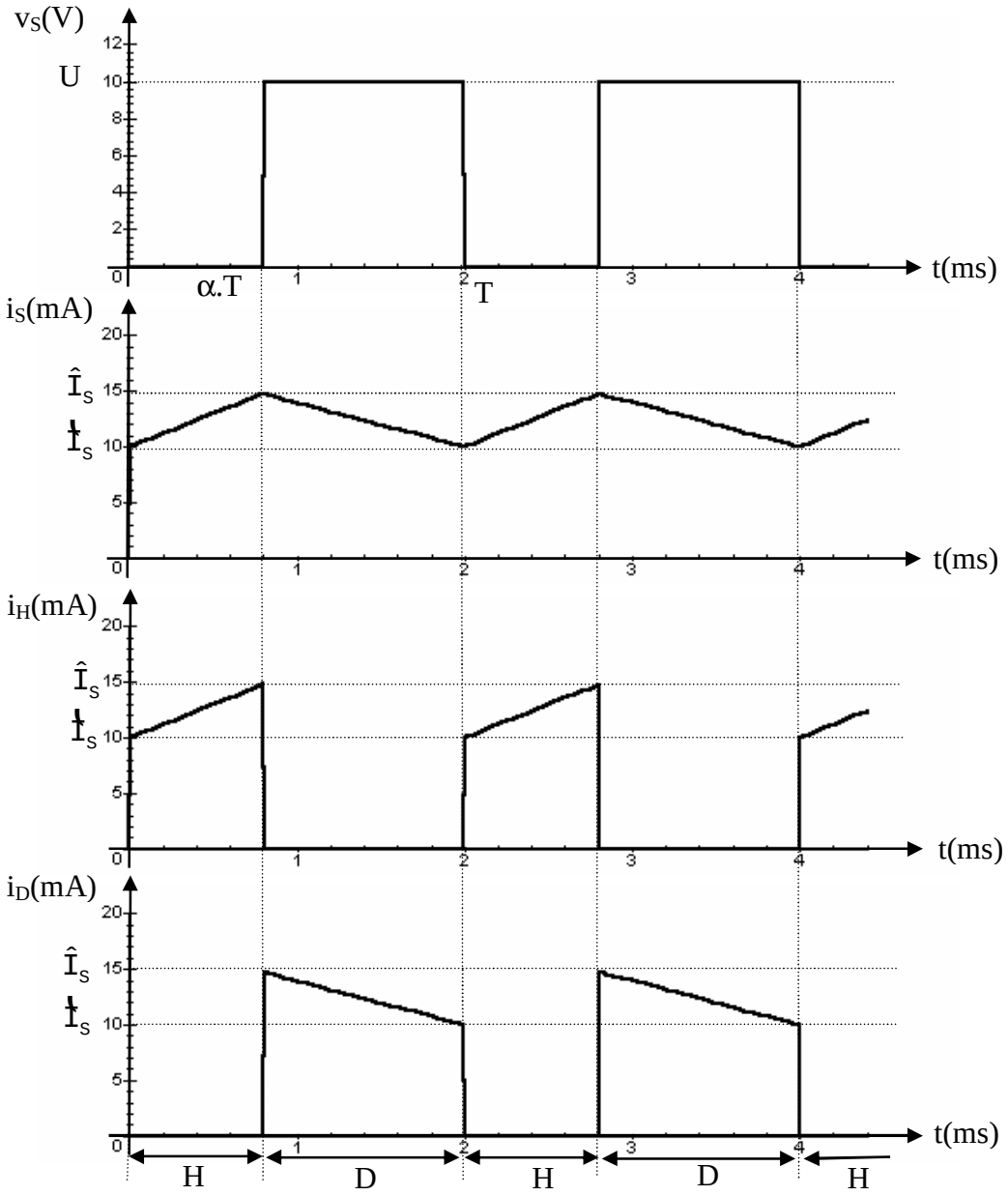
et : $\dfrac{di_S}{dt} = -\dfrac{U - E}{L} < 0$

Equa. diff. du premier ordre de solution : $i_S = -\dfrac{U - E}{L}.(t - \alpha.T) + \hat{I}_S$

L'intensité i_S décroît de sa valeur maximale $\hat{I}_S$ à sa valeur minimale $\check{I}_S$.
L'inductance L restitue de l'énergie à la source U (qui doit être réversible !).
*

3.3. Chronogrammes.

U = +10 V, L = 1 H et E = 6 V (accumulateur).
Pour α = 0,4 et f = 500 Hz, relever en concordance de temps v_S, i_S, i_{T2} et i_{alim}.



3.4. Valeur moyenne de la tension v_S.

On a d'une part : $v_S = E - L.\frac{di_S}{dt}$, ce qui s'écrit, en moyenne sur une période : $\overline{V_S} = E$.

Or, $\overline{V_S} = (1 - \alpha).U$, donc : $U = \frac{E}{1-\alpha} \geq E$

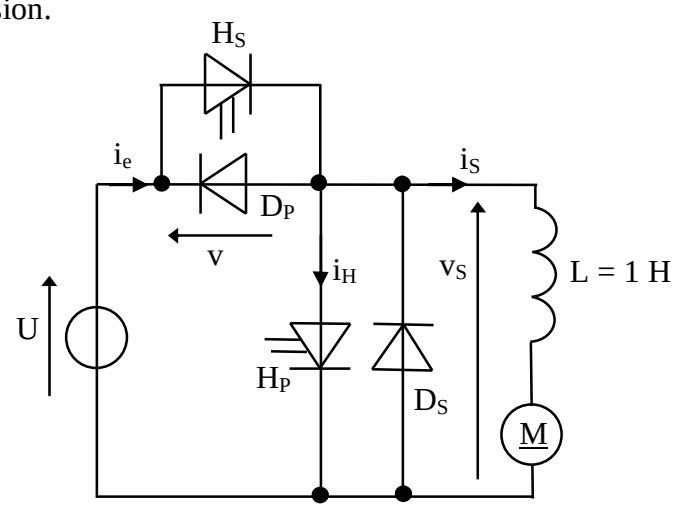
Remarques :

- Il y a bien transfert de l'énergie de l'accumulateur de f.é.m. E (ou du moteur) vers le récepteur de tension U fixe > E.
- L'intensité i_S du courant est limitée par les résistances négligées.

IV. HACHEUR REVERSIBLE EN COURANT.

4.1. Schéma - principe.

Ce dispositif rassemble un hacheur série (H_S, D_S) abaisseur de tension et un hacheur parallèle (H_P, D_P) élévateur de tension.



Quand on commande le hacheur série, le hacheur parallèle étant inactif, la machine à courant continu fonctionne en moteur ($i_S > 0$), il y a transfert d'énergie électrique de la source U vers la charge.

Quand on commande le hacheur parallèle, le hacheur série étant inactif, c'est la machine à courant continu fonctionnant en génératrice qui débite dans la source ($i_S < 0$) , permettant ainsi la récupération d'énergie lors des phases de freinage.

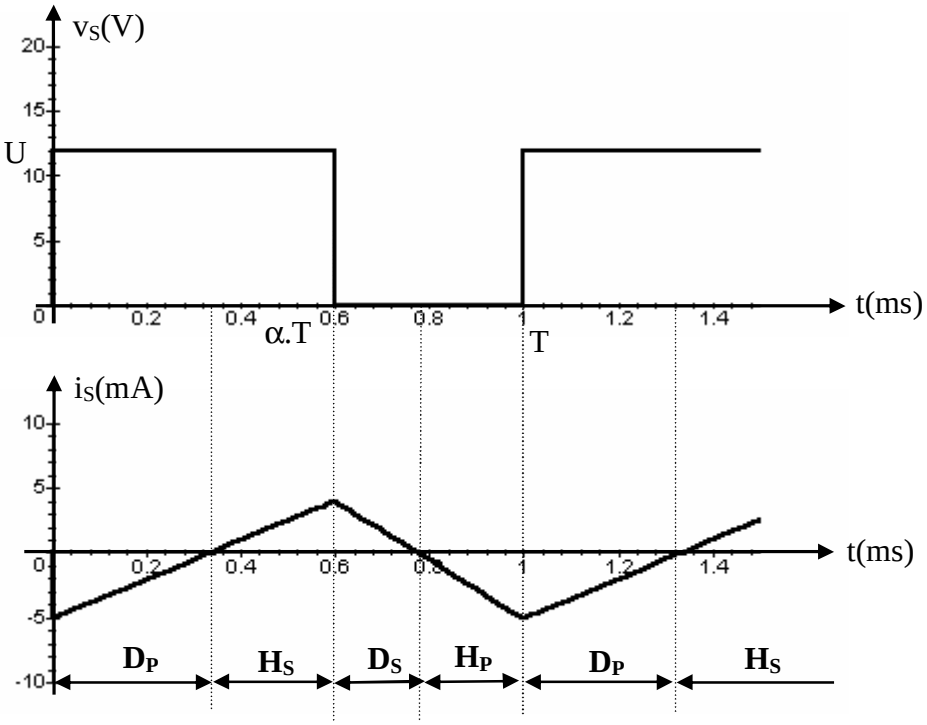
Ce type de hacheur permet des phases de traction et de freinage sans réversibilité de la vitesse (tension v_S unidirectionnelle) mais avec réversibilité de couple (réversibilité de courant) $\Rightarrow$ fonctionnement de la machine dans les quadrants 1 et 4 pour lesquels $\Omega > 0$.

4.2. Analyse du fonctionnement.

$$\begin{cases} H_S \text{ fermé durant } \alpha.T \\ H_p \text{ fermé durant } (1-\alpha).T \end{cases}$$

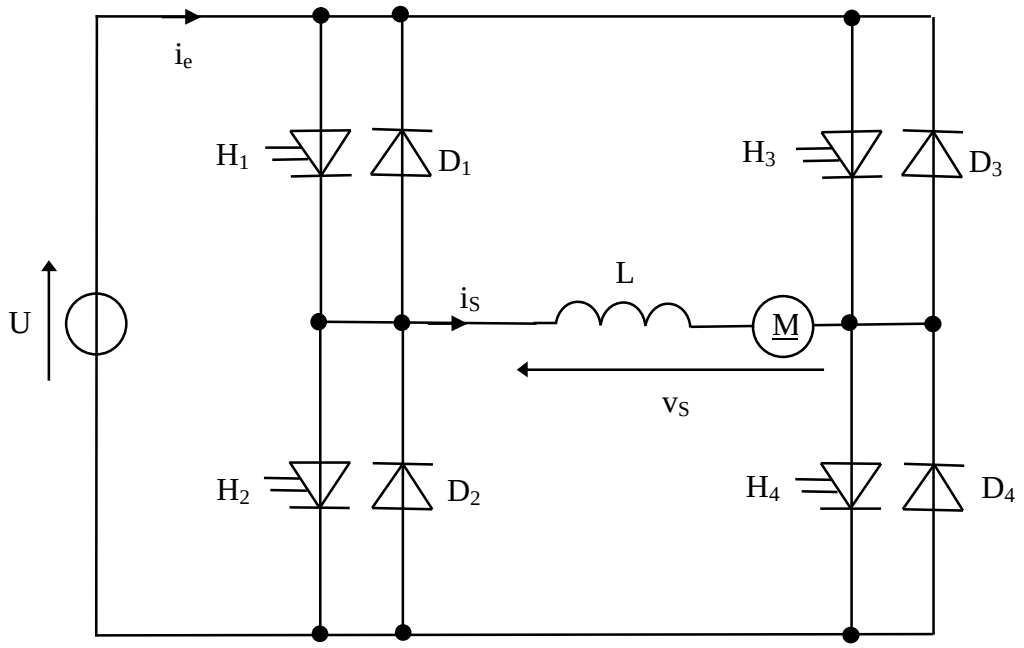
Quelque soit le courant i_S, on a : $\begin{cases} v_S = U \text{ pour } 0 < t < \alpha.T \\ v_S = 0 \text{ pour } \alpha.T < t < T \\ E = \alpha.U \end{cases}$

4.3. Chronogrammes.



V. HACHEUR EN PONT OU 4 QUADRANTS.

5.1.Schéma.



Ce hacheur est à la fois réversible en courant et en tension.
Il peut alimenter un moteur DC afin de le faire fonctionner dans les quatre quadrants du plan couple-vitesse (voir cours sur le moteur DC) c'est-à-dire, le faire tourner dans les deux sens de rotation et autoriser la récupération d'énergie pendant les phases de freinage.

Chaque interrupteur électronique est associé à une diode dite de récupération. Elles permettent la circulation du courant lorsque l'interrupteur est commandé et que le courant est dans le sens opposé au sens autorisé par l'interrupteur électronique.

Pour les interrupteurs électroniques, il faut utiliser des semi-conducteurs à ouverture et fermeture commandées (transistors, thyristors,…).

U est une source de tension réversible.

5.2. Principe de fonctionnement.

4 modes de fonctionnement : $\begin{cases} v_S > 0 \text{ et } i_S > 0 \\ v_S > 0 \text{ et } i_S < 0 \\ v_S < 0 \text{ et } i_S > 0 \\ v_S < 0 \text{ et } i_S < 0 \end{cases}$

a) Commande séquentielle.

On ne fait travailler que deux interrupteurs :

- l'un fermé en permanence, joue le rôle d'interrupteur d'aiguillage ;
- l'autre, fermé et ouvert à la fréquence de fonctionnement du hacheur assure le hachage.

Exemples :

Pour obtenir une tension $v_S > 0$, on peut commander en permanence la fermeture de H_4 :

- si $i_S > 0$, on hache par H_1 :
  H_1 fermé, i_S passe par H_1 et H_4 : $v_S = U$ et $i_e = i_S$.
  H_1 ouvert, i_S passe par D_2 et H_4 : $v_S = 0$ et $i_e = 0$.
- si $i_S < 0$, on hache par H_2 :
  H_2 fermé, $-i_S$ passe par H_2 et D_4 : $v_S = 0$ et $i_e = 0$.
  H_2 ouvert, $-i_S$ passe par D_1 et D_4 : $v_S = U$ et $i_e = -i_S$.

Pour obtenir une tension $v_S < 0$, on peut commander en permanence la fermeture de H_3 :

- si $i_S > 0$, on hache par H_1 :
  H_1 fermé, i_S passe par H_1 et D_3 : $v_S = 0$ et $i_e = 0$.
  H_1 ouvert, i_S passe par D_2 et D_3 : $v_S = -U$ et $i_e = -i_S$.
- si $i_S < 0$, on hache par H_2 :
  H_2 fermé, $-i_S$ passe par H_2 et H_3 : $v_S = -U$ et $i_e = -i_S$.
  H_2 ouvert, $-i_S$ passe par D_1 et H_3 : $v_S = 0$ et $i_e = 0$.

b) Commande continue.

On procède ainsi :

- à chaque période T, on commande la fermeture de H_1 et H_4 pendant $\alpha.T$;
- on commande la fermeture de H_2 et H_3 pendant le reste de la période.

Pour $0 < t < \alpha.T$, on commande la fermeture de H_1 et H_4 :

- si $i_S > 0$, il passe par H_1 et H_4 et $v_S = U$;
- si $i_S < 0$, il passe par D_1 et D_4 et $v_S = U$.

Pour $\alpha.T < t < T$, on commande la fermeture de H_2 et H_3 :

- si $i_S > 0$, il passe par D_2 et D_3 et $v_S = -U$;
- si $i_S < 0$, il passe par H_2 et H_3 et $v_S = -U$.

Remarque :
La valeur moyenne de la tension v_S est :

$$\overline{V}_S = \frac{1}{T}\left[\int_0^{\alpha.T} U\,dt + \int_{\alpha.T}^{T} -U\,dt\right] = \frac{1}{T}\left[U.\alpha.T - U.T + U.\alpha.T\right]$$

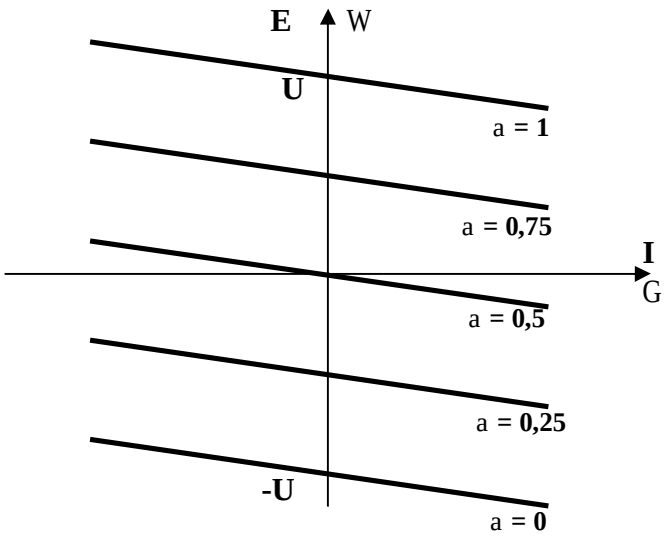
Soit :

$$\overline{V}_S = U.(2.\alpha - 1)$$

Quand α varie de 1 à 0, $\overline{V}_S$ va de U à -U.

Inconvénients :

- 2 fois plus de commutations par période ;
- variations de la tension de sortie v_S 2 fois plus grande, ce qui augmente l'ondulation du courant i_S.

Avantage : inversions rapides de la tension et du courant.

$\Rightarrow$ la figure ci-dessous montre comment α déplace les caractéristiques E = f(I) ou Ω = f(Γ).