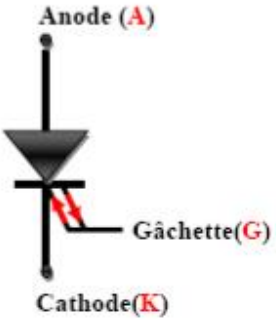
4. Thyristor GTO :

4.1 Présentation :

Le thyristor GTO (Gate Turn Off) est une évolution du thyristor classique qui a la propriété de pouvoir **être bloqué à l'aide de la gâchette**, contrairement aux thyristors classiques. Il est utilisé pour les commutations des fortes puissances.

« Symbole du thyristor GTO »



4.2 Principe de fonctionnement :

- **L'état passant (ON) :**

Un GTO s'amorce par la gâchette (avec $V_{gK}>0$) comme un thyristor ordinaire. Le courant de gâchette peut être de quelques ampères. Une fois la conduction amorcée, elle se maintient.

- **L'état bloqué (OFF) :**

Le mode de blocage spécifique du GTO consiste à détourner le quasi totalité du courant d'anode dans la gâchette. En pratique, on applique donc **une tension négative sur la gâchette** (Vgk<0) pour détourner le courant. L'opération doit avoir une durée minimale pour assurer un blocage fiable.

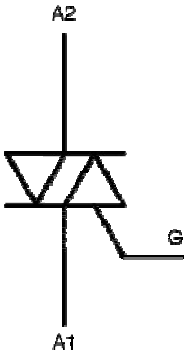
« Thyristor de puissance GTO »

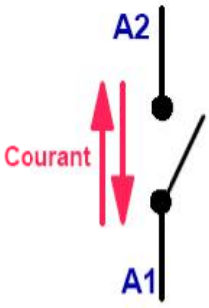
5. Triac :

5.1 Présentation :

Le Triac est un composant électronique **bidirectionnel** (le courant passe dans les deux sens) **commandé à la fermeture**, C'est l'équivalent de deux thyristors montés tête-bêche et commandés par une seule gâchette.

« Symbole de triac »





5.2 Principe de fonctionnement :

- **L'état passant (ON) :**

Pour commander le triac, un courant doit passer par la gâchette (une impulsion pour des valeurs positives ou négatives).

- **L'état bloqué (OFF) :**

Une fois amorcé, il reste passant. Pour le désamorcer, il faut annuler le courant Anode1/Anode2.

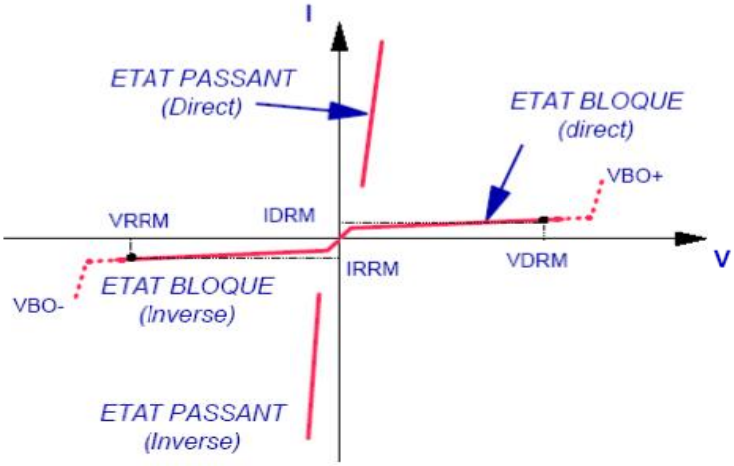
5.3 Caractéristique Tension-Courant :

Valeurs maximales admissibles :

IFmax : courant direct ou inverse maximal admissible.

VDRM: tension maximale directe répétitive.

VRRM : tension maximale inverse répétitive.



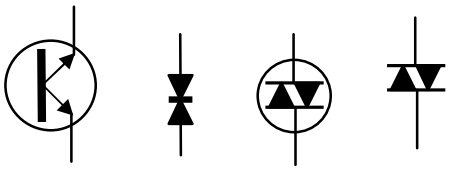
« Caractéristiques Tension-Courant du triac»

6. Le diac :

6.1 Présentation :

Le diac (Diode Alternatif Current) est un élément semi conducteur à deux électrodes. C'est un composant électronique à amorçage **bidirectionnel** par la tension à ses bornes. Il est souvent utilisé en électronique de puissance pour déclencher les triac et les thyristors (circuits de commande).

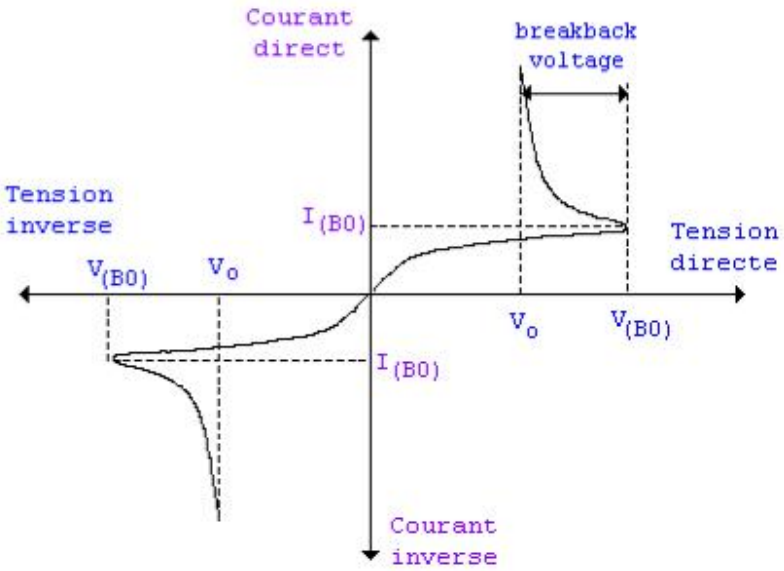
« Symbole de diac »



6.2 Principe de fonctionnement :

Le diac ne conduit pas le courant tant qu'une tension appliquée à ses bornes est inférieure à une certaine valeur notée V_{BO} (Break over voltage) souvent comprise entre 20 et 35 volts dans les deux sens.

Lorsque cette tension d'avalanche est atteinte, le diac entre en conduction (amorçage), il serait assimilé à un interrupteur fermé, dans ce cas la tension entre ses deux électrodes serait pratiquement nulle.

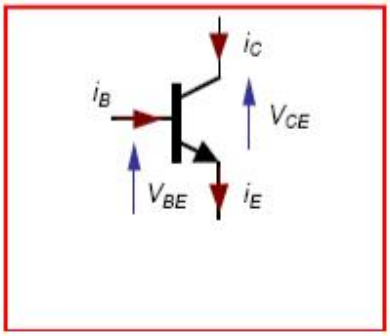


« Caractéristiques Tension-Courant du diac»

7. Transistor bipolaire de puissance :

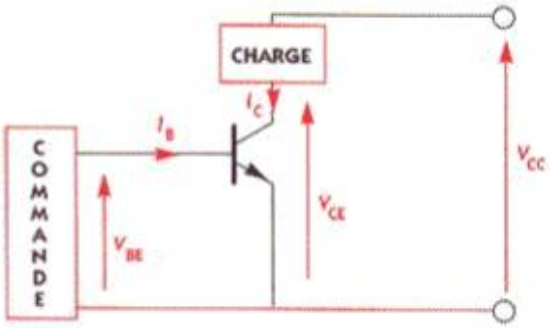
7.1 Présentation :

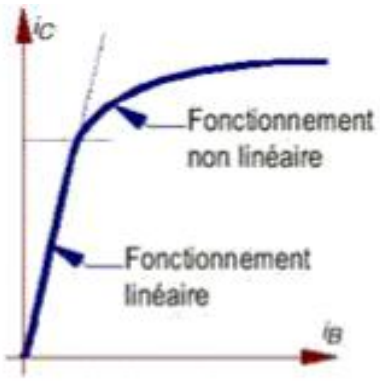
Parmi les deux types, NPN et PNP, le transistor de puissance existe essentiellement dans la première catégorie. Le transistor est un composant **totalement commandé** : à la fermeture et à l'ouverture. Il n'est pas réversible en courant, ne laissant passer que des courants de collecteur i_c positifs. Il n'est pas réversible en tension, n'acceptant que des tensions V_{CE} positives lorsqu'il est bloqué.



7.2 Principe de fonctionnement :

- **Transistor bloqué (B) ou OFF :** état obtenu en annulant le courant i_B de commande, ce qui induit un courant de collecteur nul et une tension V_{CE} (tension de source). L'équivalent d'un commutateur ouvert.
- **Transistor saturé (S) ou ON :** ici, le courant i_B est tel que le transistor impose une tension V_{CE} nulle tandis que le courant i_C atteint une valeur limite dite de saturation, i_{Csat}. L'équivalent d'un commutateur fermé.





Modes de fonctionnement du transistor :

$I_B = 0$	$I_C = 0$ (commutateur ouvert)
$I_B > 0$	$I_C = ß . I_B$ (Amplificateur)
$I_B = I_{Bsat}$	$I_C = I_{Cmax}$ (commutateur fermé)

7.3 Critères de choix d'un transistor :

Après avoir établi les chronogrammes de fonctionnement (V_{CE} et i_C), on calcule les valeurs extrêmes prises par :

- la tension V_{CE} (à l'état bloqué) ;
- le courant max i_C (à l'état saturé).

« Transistor de puissance »

7.4 Protection du transistor :

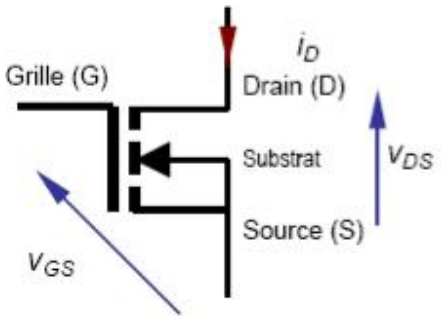
La protection est assurée par l'intermédiaire d'un circuit électronique qui mesure i_C ou i_E et interrompe la commande en cas de danger.

8. Transistor MOS de puissance :

8.1 Présentation :

Le transistor MOS est un composant **totalement commandé** : à la fermeture et à l'ouverture. Il est rendu passant grâce à une tension **V_{GS} positive** (de l'ordre de quelques volts). La grille est isolée du reste du transistor, ce qui procure une impédance grille-source très élevée. La grille n'absorbe donc aucun courant en régime permanent. La jonction drain-source est alors assimilable à une résistance très faible **(interrupteur fermée).** On le **bloque** en annulant la tension V_{GS}.

« Symbole de transistor MOS»



8.2 Principe de fonctionnement :

- **Transistor bloqué ou OFF :** L'équivalent d'un commutateur ouvert.

  $V_{GS}=0$ $I_D=0$

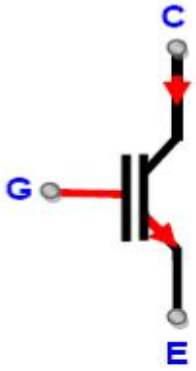
- **Transistor saturé ou ON :** L'équivalent d'un commutateur fermé.

  $V_{GS}>0$ $I_D>0$

9. Transistor IGBT :

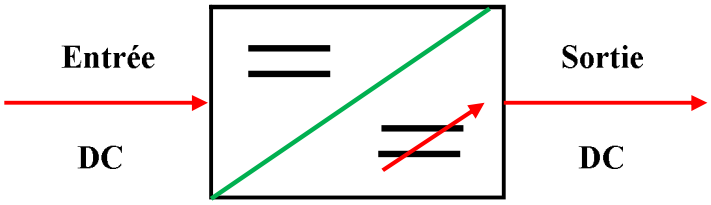
Transistor bipolaire à grille isolée est le mariage du bipolaire et du MOS, Le transistor bipolaire assure une chute de tension à l'état passant (V_{CE}) plus favorable que le MOS. Par contre, c'est le MOS qui est plus avantageux en raison de sa commande en tension. Un transistor hybride, commande MOS en tension et circuit de puissance bipolaire, permet de meilleures performances : c'est le transistor IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor).

« Symbole de transistor IGBT»



Composant	Symbole	Commande	Source	Fonctionnement
Diode	A K	Non commandable	Alternative	A Courant K
Thyristor	A G K	Commande à la fermeture par impulsion positive	Alternative	A Courant K
Thyristor GTO	A G K	Commande à la : - fermeture par impulsion positive - l'ouverture par impulsion négative	Alternative ou continu	A Courant K
Triac	A1 G A2	Commande à la fermeture par impulsion positive ou négative	Alternative	A1 Courant A2
Transistor bipolaire	C B E	Commande à la : - fermeture par un courant positive - l'ouverture par annulation du courant	Continu	C Courant E
Transistor IGBT	C G E	Commande à la : - fermeture par une tension positive - l'ouverture par annulation de tension	Continu	C Courant E

1-Définition : L'hacheur est un dispositif permettant d'obtenir une tension continue de **valeur moyenne réglable** à partir d'une source de tension continue fixe (batterie d'accumulateurs ou bien pont redresseur - alimenté par le réseau de distribution).



« Symbole du hacheur »

Un hacheur peut être réalisé à l'aide des interrupteurs électroniques commandables à la fermeture et à l'ouverture telle que les transistors bipolaires ou IGBT ou les thyristors GTO.

Commande du transistor :

Pour alimenter la base du transistor, il faut réaliser un montage électronique délivrant un signal en créneaux avec un rapport cyclique réglable. Il s'agit d'un oscillateur.

Exemple d'application : le hacheur permet de faire varier et de régler la vitesse des moteurs à courant continu.

Commande de vitesse pour moteur à courant continu

1.1-Principe de fonctionnement :

Le principe du hacheur consiste à établir puis interrompre périodiquement la liaison source- charge à l'aide d'un interrupteur électronique.

1.2-Le rapport cyclique : α

Le rapport cyclique est défini comme le temps t_F pendant lequel l'interrupteur est fermé divisé par la période de fonctionnement du montage **T**.

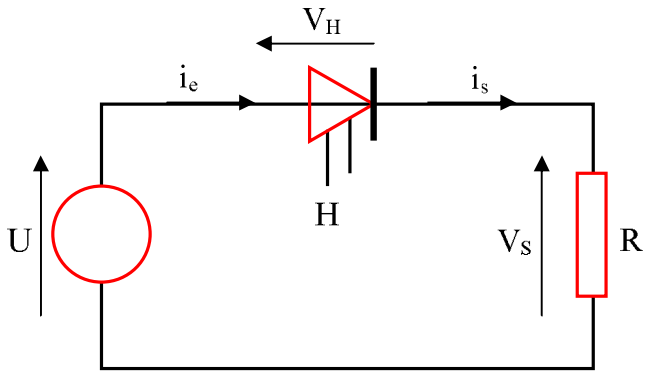
$$\alpha = \frac{t_F}{T}$$

La valeur de rapport cyclique : $0 \leq \alpha \leq 1$

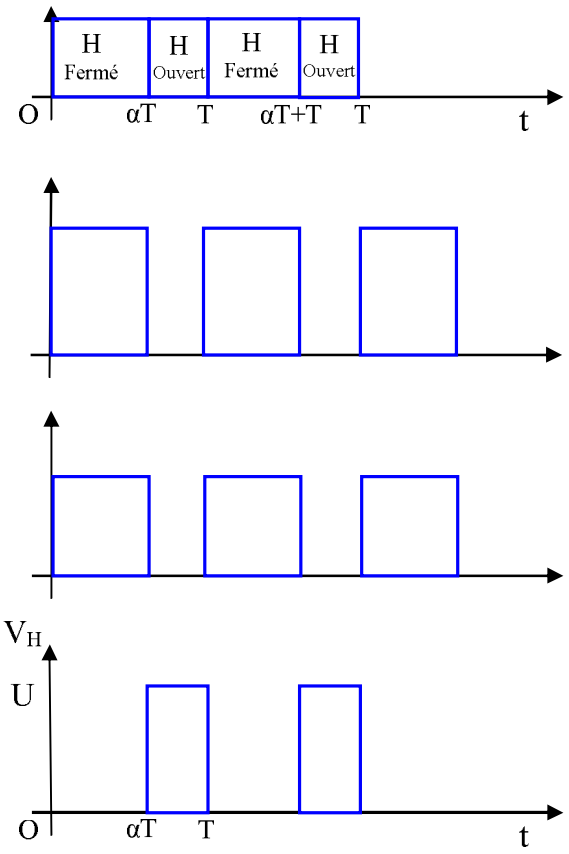
2-Le hacheur série(buck):

2.1-

Soit le montage suivant :



H : Interrupteur unidirectionnel parfait



1)-Analyse du fonctionnement :

- $0 < t < \alpha T$: H est fermé.

$v_H = 0$

$v_s = U$

$i_s = \frac{U}{R}$

$i_s = i_e$

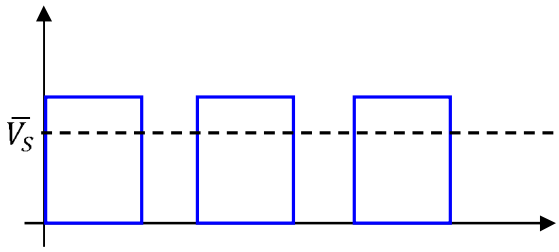
- $\alpha T < t < T$: H est ouvert.

$v_H = U$

$v_s = 0$

$i_s = i_e = 0$

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



Exprimons la valeur moyenne de *v* en fonction du rapport cyclique.

$$\overline{v_s} = \frac{1}{T}\int_0^T v_s(t)d(t) = \frac{1}{T}\int_0^{\alpha T} Ud(t) + \frac{1}{T}\int_{\alpha T}^{T} 0.d(t)$$

$$\overline{v_s} = \frac{U}{T}(\alpha T - 0) = \alpha U$$

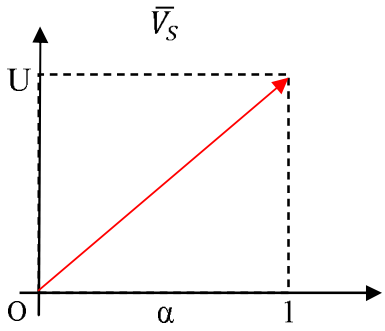
Pour cela nous calculons sa valeur moyenne sur une période :

Valeur moyenne de la tension: $\overline{v_s} = \alpha U$

La valeur moyenne de la tension $\overline{v_s}$ peut être ajustée en jouant sur la valeur du rapport cyclique α.

Quand on fait varier α de 0 à 1, $\overline{v_s}$ varie linéairement de 0 à U.

$\overline{V_S} = f(\alpha)$



<u>3)-Conclusion</u> : Quelle que soit la nature de la charge, on aura $\overline{V_S} = 0 \leq \alpha U \leq U$. Le hacheur série est bien abaisseur de tension (hacheur dévolteur).

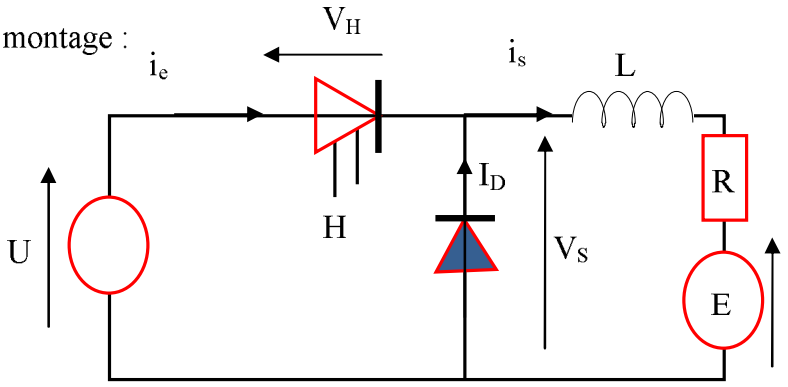
Commentaires :

La tension de sortie du hacheur n'est pas continue mais toujours positive. Lorsque la période est assez faible (fréquence de 100 à 1000 Hz) la charge ne « voit » pas les créneaux mais la valeur moyenne de la tension.

Valeur moyenne du courant : $\overline{i_s} = \alpha U/R$

Calcul de puissance : $U.i_e = \overline{v_s}.i_s \rightarrow i_s = \frac{i_e}{\alpha}$

On considère le montage :



1)-Analyse du fonctionnement :

- $0 < t < \alpha T$: H est fermé.

$i_e = i_s$

$v_H = 0$

$v_s = U$

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

$U = E + R.i_s + L\frac{di_s}{dt}$ ……(1)

$\alpha T < t < T$: H est ouvert.

Le courant imposé par la bobine pourra passer par la diode de roue libre.

Donc la diode assure la continuité du courant dans la charge.

$i_e = 0$

$v_H = U$

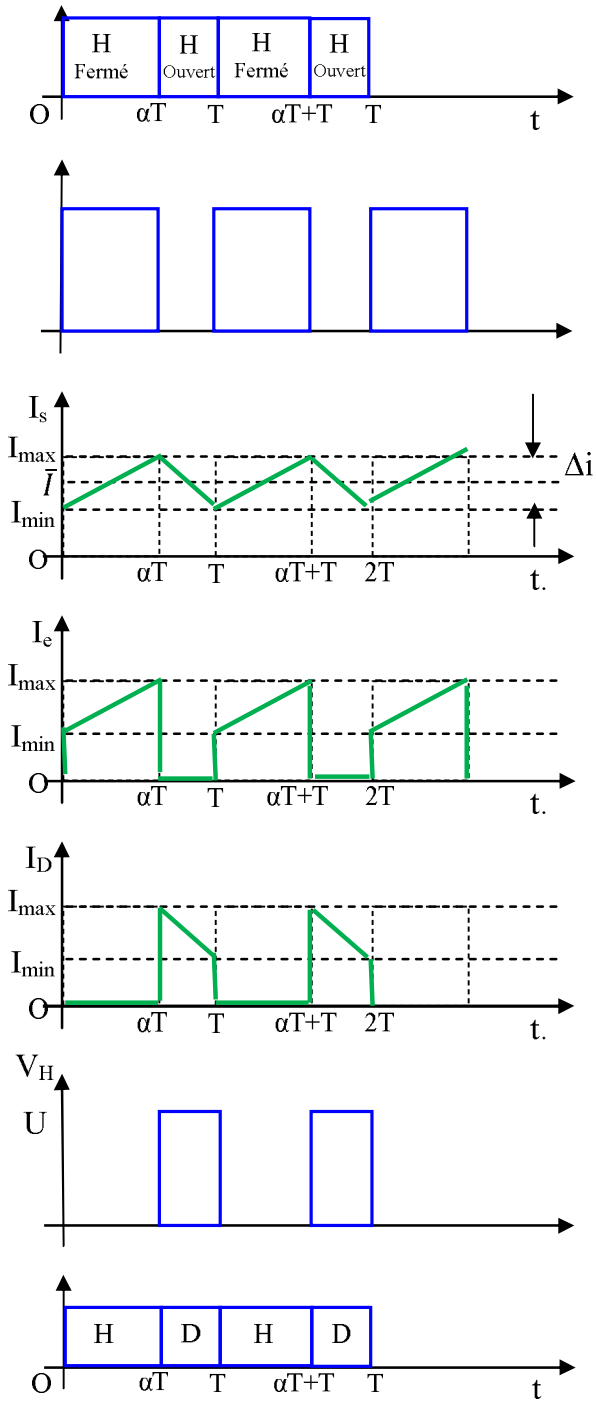
$v_s = 0$

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

$$0 = E + R.i_s + L\frac{di_s}{dt} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (2)$$

_____ en général les résistances de l'induit et l'inductance sont très faibles, donc on suppose que la chute de tension $R.i_s$ est nulle.

*l'équation (1) devient :



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

Pour trouver la valeur du courant on intègre l'équation dans l'intervalle $0 < t < \alpha T$:

$$\int_0^{\alpha T} di_s = \int_0^{\alpha T} \frac{U-E}{L}dt$$

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

*l'équation (2) devient :

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

Pour trouver la valeur du courant on intègre l'équation dans l'intervalle $\alpha T < t < T$:

$$\int_{\alpha T}^{T} di_s = \int_{\alpha T}^{T} -\frac{E}{L}dt$$

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

Valeur moyenne du courant :

$$\overline{V_s} = E + R.\overline{I_s} + \overline{L\frac{dI_s}{dt}}$$

Avec : $\overline{V_s} = \alpha U$, $\overline{L\frac{dI_s}{dt}}=0$

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

$$\overline{I_s} = \frac{\alpha U - E}{R} = \frac{I_{max} + I_{min}}{2}$$

On peut déduire les valeurs moyennes des courants $\overline{I_H}$ et $\overline{I_D}$ en fonction de $\overline{I_s}$.

Intensité moyenne dans le Hacheur : $\overline{I_H} = \alpha\overline{I_s}$

Intensité moyenne dans la diode : $\overline{I_D} = (1-\alpha)\overline{I_s}$

<u>2)-Ondulation du courant dans la charge :</u>

Elle est donnée par la relation :

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

L'ondulation Δi est maximale pour $\frac{d\Delta i}{d\alpha} = 0 \Longrightarrow$ α=0.5

$$\Delta i_{max} = \frac{U}{4Lf}$$

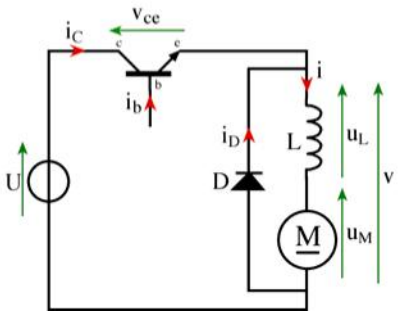
Pour diminuer Δi, il faut augmenter l'inductance L ou/et la fréquence f.

3)-Application au moteur :

Le hacheur série est souvent employé pour commander un moteur à courant continu.

On rappelle que la vitesse d'un tel moteur est proportionnelle à la tension d'alimentation.

Montage :



Commentaire :
Pour un bon fonctionnement du moteur, il est préférable que le courant soit le plus régulier possible, d'où la présence d'une bobine de lissage. Si son inductance est suffisamment grande, on pourra considérer le courant comme constant ($\Delta i \approx 0$).

Loi des mailles :

$v_s = u_L + u_M$

On passe aux valeurs moyennes : $\overline{V_s} = \overline{u_M} + \overline{u_L}$
Et comme pour un signal périodique : $\overline{u_L} = 0$
Nous obtenons pour le moteur : $\overline{V_s} = \overline{u_M} = E$

$$\overline{V_s} = E = \alpha U$$

$E = k.N.\Phi$ $\begin{cases} \text{N : La vitesse de rotation du moteur} \\ \Phi \text{ : Le flux d'inducteur (égale à constant pour le moteur à excitation séparé)} \end{cases}$

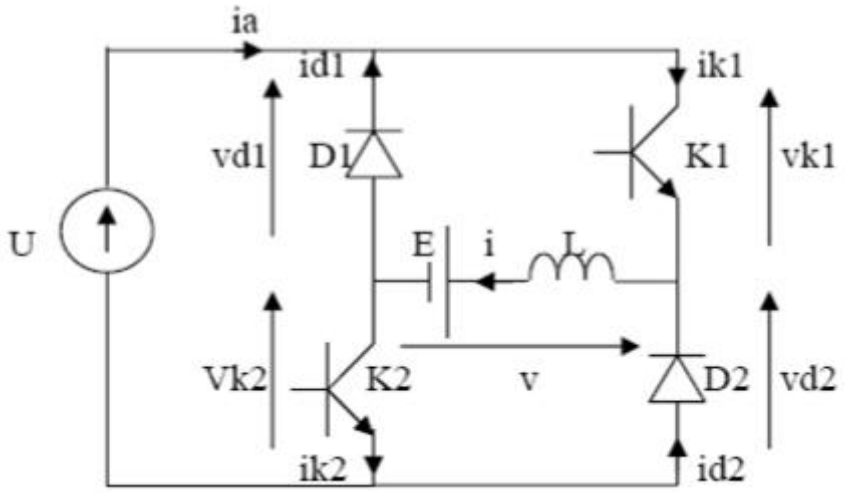
Finalement la f.é.m. du moteur peuvent être régler grâce au rapport cyclique par la relation :

$$E = k'.N = \alpha U \rightarrow N = k''.\alpha$$

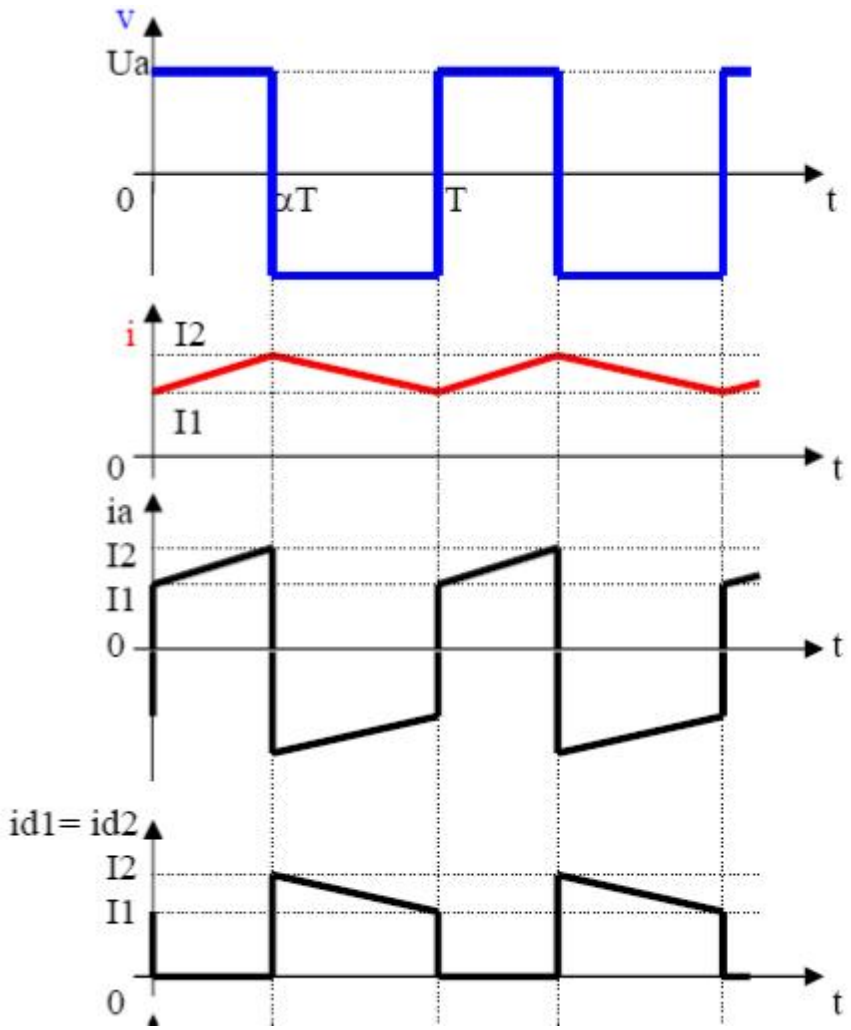
On voit ici que la vitesse varie linéairement avec le rapport cyclique α, lequel est proportionnel à la tension de commande.

Les interrupteurs électroniques sont supposés parfaits.

K1 et K2 sont commandés simultanément avec le même état à la période T.



Formes d'ondes en conduction continue :



Remarque :

Afin d'obtenir un arrêt rapide, il est nécessaire d'appliquer un couple de freinage.

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

- $0 < t < \alpha T$: 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 K1 et K2 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 :

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

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

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

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

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

α=0.5 →Arrêt ;

Soit l'équation du circuit suivante :

$$V = E + R.i + L\frac{dI}{dt}$$

$$\bar{V} = E + R.\bar{I_s} + L\overline{\frac{dI}{dt}}$$

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

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

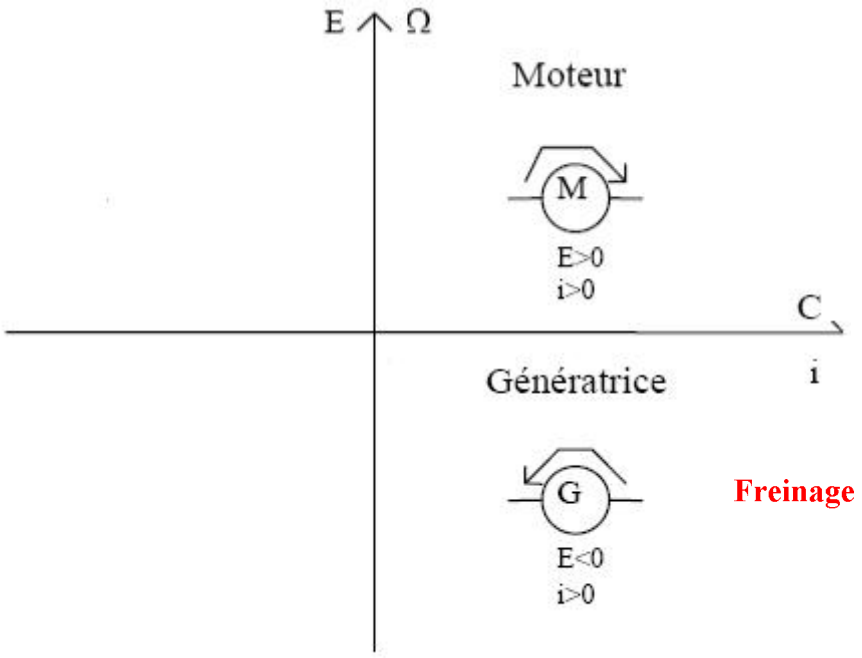
3.4-Ondulation du courant dans la charge :

Elle est donnée par la relation :

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

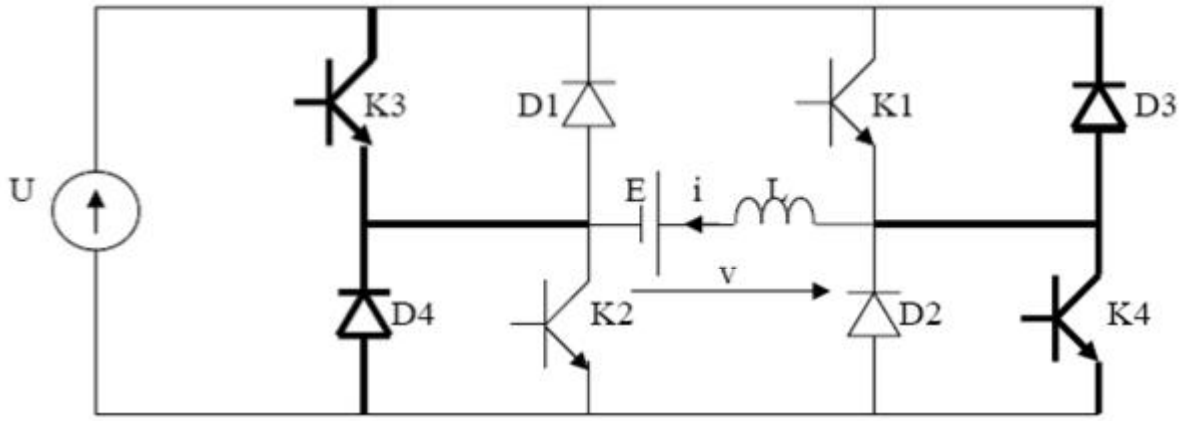
Remarque :

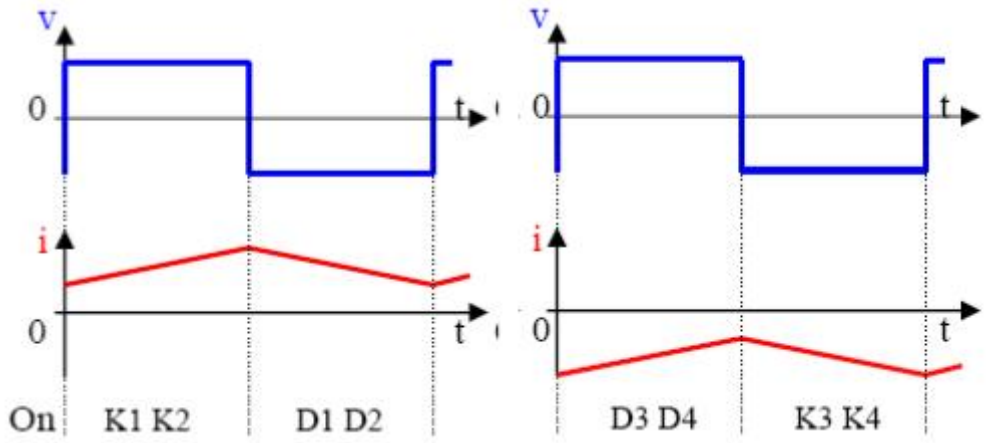
Variations de la tension de sortie deux fois plus grand, ce qui augmente l'ondulation du courant.



Pour obtenir une réversibilité quatre quadrants, il suffit d'associer tête bêche deux hacheurs réversibles deux quadrants (K1, K2, D1, D2) et (K3, K4, D3, D4).

La tension peut être négative ou positive, le courant aussi.





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

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

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

Remarque :

Maintenant on peut avoir V moy < 0 (formule), le courant pouvant également être négatif donc on peut avoir un sens de rotation négatif.

Quand α varie de 1 à 0, la tension moyenne varie de –U à +U.

4.2-Principe du fonctionnement : on dispose de 4 quadrants.

Modes de fonctionnement : $\begin{cases} V > 0 \text{ et } I > 0, \text{ Rotation dans le premier sens.} \\ V < 0 \text{ et } I > 0, \text{ Phase de freinage (récupération de l'énergie).} \\ V < 0 \text{ et } I < 0, \text{ Rotation dans le deuxième sens.} \\ V > 0 \text{ et } I < 0, \text{ Phase de freinage (récupération de l'énergie).} \end{cases}$

4.3-Stratégie de commande :

On procède ainsi :

A chaque période T :

On commande la fermeture de K_1 et K_2 pendant $0 < t < \alpha T$;

On commande la fermeture de K_3 et K_4 pendant $\alpha T < t < T$;

Pour $0 < t < \alpha T$:

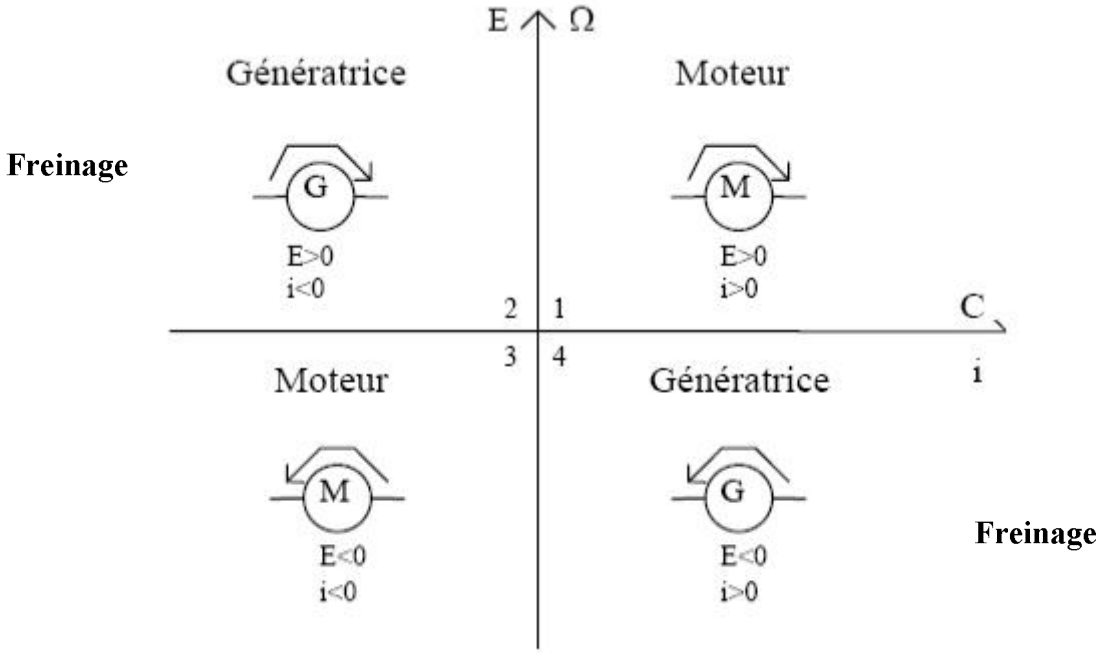
Si $I > 0$, il passe par K_1 et K_2 et $V = U$;

Si $I < 0$, il passe par D_3 et D_4 et $V = U$;

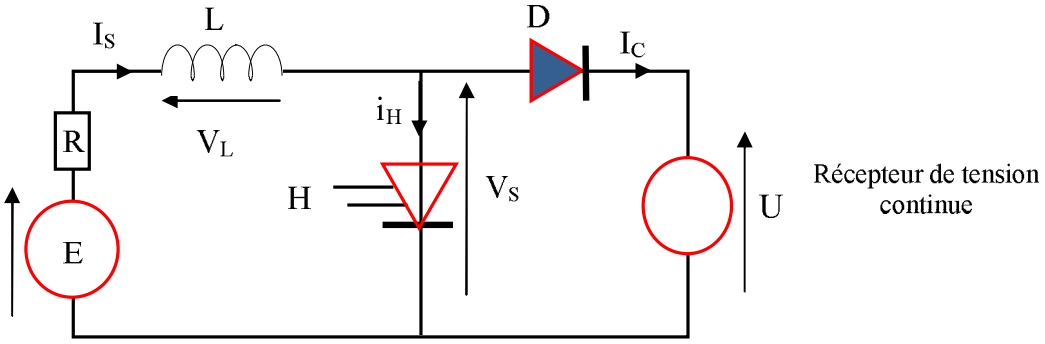
Pour $\alpha T < t < T$:

Si $I > 0$, il passe par D_1 et D_2 et $V = -U$;

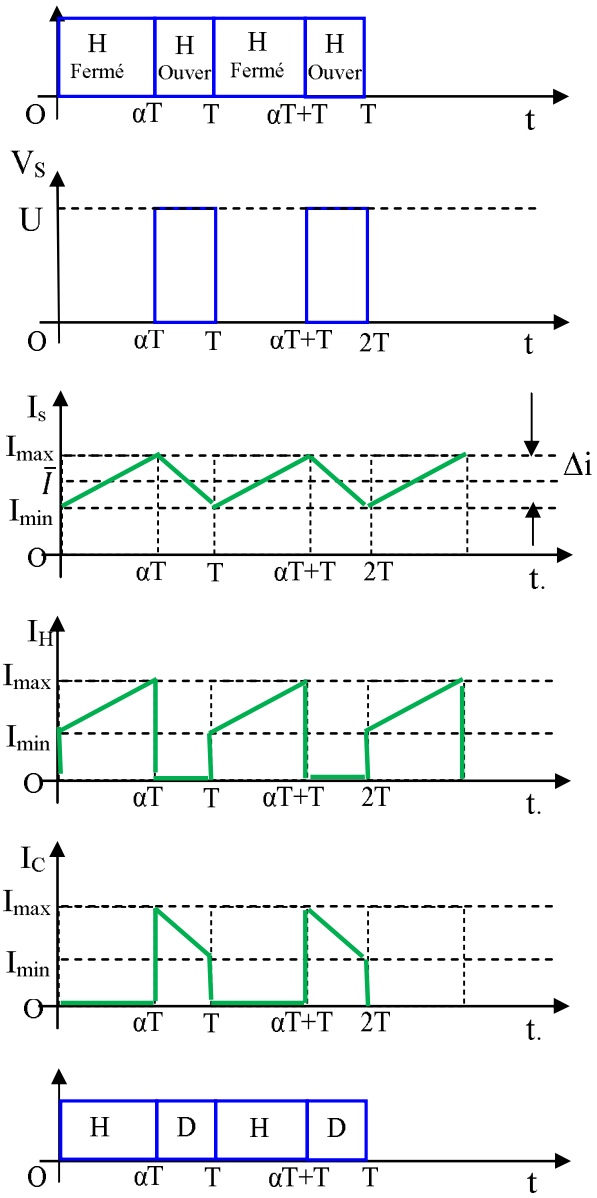
Si $I < 0$, il passe par K_3 et K_4 et $V = -U$;



Ce montage permet de produire une tension moyenne U à partir d'une source de tension continue $E<U$ (élévateur de tension) Le montage étudié est donné à la figure ci-dessous :



On donne les séquences de conduction de H et D dans le chronogramme suivant :



5.1-Analyse du fonctionnement :

Les deux interrupteurs électroniques sont supposés parfaits.

- $0 < t < \alpha T$: L'interrupteur et l'intensité $i_s(t)$ croît linéairement :

L'interrupteur H est fermé donc : $\begin{cases} i_s = i_H \\ V_s = 0 \\ i_c = 0 \end{cases}$

Remarque : en supposant la résistance R est négligeable.

$V_s = E - V_R - V_L \rightarrow E = V_L$

L'intensité du courant vérifier l'équation suivante :

$$E = L\frac{di_s}{dt} \qquad \rightarrow \qquad di_s = \frac{E}{L}dt$$

On obtienne la valeur du courant par l'intégration de l'équation précédente :

$$\int_0^{\alpha T} di_s = \int_0^{\alpha T} \frac{E}{L}dt$$

$$i_s(t) = \frac{E}{L}.t + i_{min}$$

- $\alpha T < t < T$: L'interrupteur H est ouvert, l'inductance *l* se démagnétise et le courant $i_s(t)$ décroît :

L'interrupteur H est ouvert : $\begin{cases} i_s = i_c \\ i_H = 0 \\ V_s = U \end{cases}$

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

$$V_s = U = E - L\frac{di_s}{dt}$$

$$di_s = \frac{E - U}{L}dt$$

On intègre l'équation précédente :

$$\int_{\alpha T}^{T} di_s = \int_{\alpha T}^{T} \frac{E - U}{L}dt$$

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

5.2-Valeur moyenne de la tension:

$$V_s = U = E - L\frac{di_s}{dt}$$

$$\overline{V_s} = E - L\overline{\frac{dI_s}{dt}} = E$$

La valeur moyenne de V_s vaut :

$$\overline{V_s} = \frac{1}{T}\int_0^T V_s(t)d(t) = \frac{1}{T}\int_0^{\alpha T} 0.d(t) + \frac{1}{T}\int_{\alpha T}^{T} U.d(t)$$

$$\overline{V_s} = (1-\alpha)U$$

On remplace $\overline{V_s}$ par E.

$$E = (1-\alpha)U \rightarrow U = E/(1-\alpha)$$

Comme $0 < \alpha < 1$ Le hacheur parallèle est élévateur de tension.
Le réglage de α permet de faire varier la tension disponible aux bornes de la charge U :

5.3-Ondulation du courant dans la charge :

Elle est donnée par la relation :

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

<u>Intérêt du hacheur parallèle :</u>

Si on considère un moteur à courant continu entrainant une charge lourde (train par exemple) .lors d'une phase de freinage il est intéressant du récupérer l'énergie mécanique en le transformant en énergie électrique.

La machine fonctionne en génératrice mais sa f.e.m décroit car sa vitesse diminue est inférieure à la tension du réseau qui alimente le moteur .Pour assure le transfert d'énergie vers le réseau, il faut un hacheur survolteur.