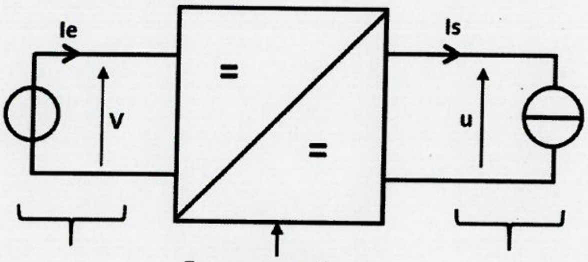
Convertisseurs statiques : Hacheurs

I. Introduction

Avec le développement des composants électroniques capables de tenir des courants et des tensions de plus en plus élevés, une nouvelle façon de gérer l'énergie électrique s'est développée depuis quarante ans. On la dénomme « électronique industrielle » ou « électronique de puissance ».

Il existe plusieurs types de convertisseurs statiques, ils sont utilisés pour moduler une énergie à une autre suivant un cahier des charges. Un hacheur est un convertisseur statique continu-continu de valeur moyenne de sortie variable, il est utilisé pour certain application comme la variation de vitesse des machines à courant continu et ainsi un élément essentiel dans la régulateur solaire MPPT pour adapter l'énergie à la batterie.

Source d'entrée source de tension



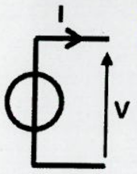
Source d'sortie source de courant

La commande α

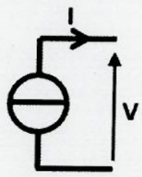
La commande α est un coefficient varie entre 0 et 1, il est dénommé « le rapport cyclique », leur changement fait varier la sortie : si $\alpha = 0 \Rightarrow u(t) = 0$ et si $\alpha = 1 \Rightarrow u(t) = V$

II. Notions de base

1. Source électrique



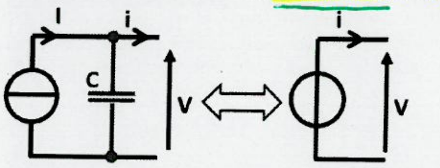
Source de tension : la tension V constante malgré le changement du courant I



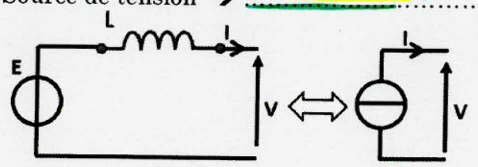
Source de courant : le courant I est constant malgré le changement de la tension

2. Transformation des sources

Source de courant → "I" // "C" ⇒ source de tension

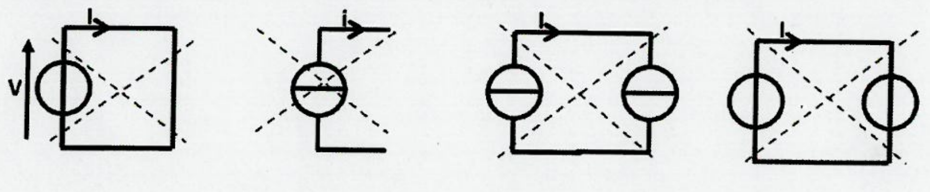


Source de tension → "E" + "L" ⇒ source de courant



3. Les règles d'association des sources

- Une source de tension ne doit jamais être court-circuitée, mais elle peut être ouverte.
- Une source de courant ne doit jamais être ouverte, mais elle peut être court-circuitée.
- Il ne faut jamais connecter entre elles deux sources de même nature.

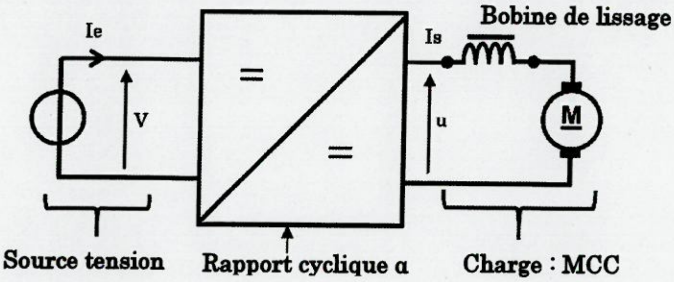


Les hacheurs à traiter et fait partie du programme de TSI en génie électrique

- Hacheur à un seul quadrant : Hacheur série et hacheur parallèle
- Hacheur quatre quadrants : commande séquentielle et commande bipolaire

III. Hacheur série

Les hacheurs réalisent une conversion continu–continu. Leur principal domaine d'application est l'alimentation des machines à courant continu (MCC), en vue d'obtenir une vitesse variable.



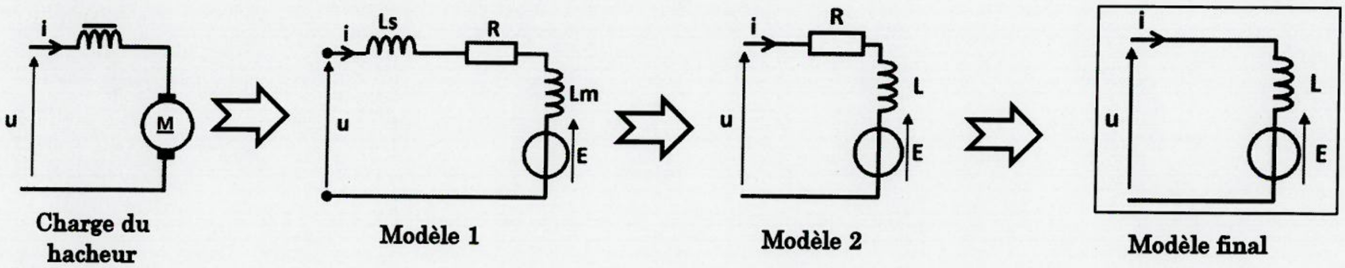
Bobine de lissage : le Hacheur genere ds ondulation de courant, Donc le bobine lissage lisse le courant pour le rendre cosiment continu

Hypothèses :

- La source d'entrée est une source de tension : **une Batterie** ou **un redresseur**.
- La charge est de type courant : induit de MCC avec une bobine de lissage ➔ **charge RLE**
- La conduction dans la charge est supposée continue : $is(t) > 0$

1. Modèle de la charge (Bobine de lissage + induit d'une MCC)

Une MCC est modélisée par une source de tension E (fcém) en série avec une résistance R et une inductance Lm (inductance totale de l'induit) et la bobine de lissage modélisée par une inductance Ls .



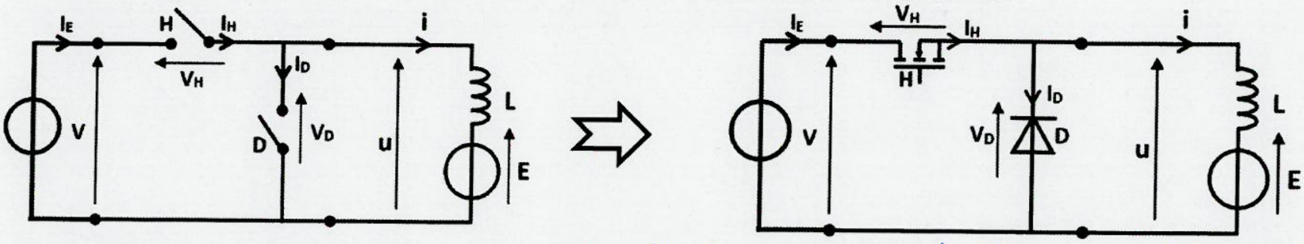
Modèle 2 : Inductance totale L : $L = L_s + L_m$, l'équation différentielle : $\frac{L}{R}\frac{di}{dt} + i = \frac{U-E}{R}$

Avec la constante de tempe de la charge τ : $\tau = \frac{L}{R}$ [s].

Hypothèse : supposons que : $\tau \gg T$ **(T : période de hachage).** On se ramène au **modèle final présenté en haut.**

2. Structure de hacheur série

Le schéma final d'un hacheur série alimente une machine à courant continu est le suivant:

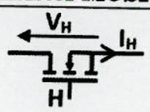
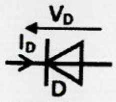
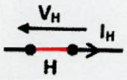
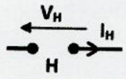
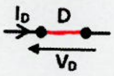
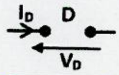


La diode D dite « **la diode de roue libre** » a pour but : la diode D permet d'assurer la continuité de courant dans la charge (MCC) et d'éviter le C.O de la source de courant

La commande de transistor MOSFET H : $t \in [0\ ,\ \alpha T]$ **H passant** donc la diode D : bloquée Et de $t \in [\alpha T\ ,\ T]$ **H bloqué** donc D : passante

3. Interrupteurs de puissance

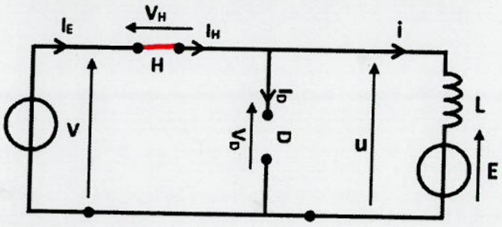
Les interrupteurs étudiés sont supposés idéals (la puissance consommée est nulles), dans cette partie, on s'intéresse à la tension et au courant aux bornes d'un interrupteur de puissance à l'état **passant** puis à l'état **bloqué**.

Transistor MOSFET		Diode de puissance	
			
Passant	**Bloqué**	**Passante**	**Bloquée**
			
$V_H = 0$	$V_H \neq 0$	$V_D = 0$	$V_D \neq 0$ ....
$I_H \neq 0$	$I_H = 0$	$I_D \neq 0$	$I_D = 0$ ....

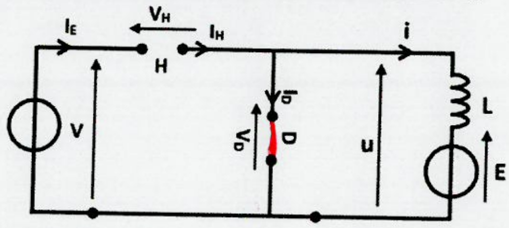
4. Etude du hacheur série

4.1. Etude des tensions V_H, V_D et u

Phase motrice active pour $t \in [0\ ,\ \alpha T]$



Phase de roue libre pour $t \in [\alpha T\ ,\ T]$

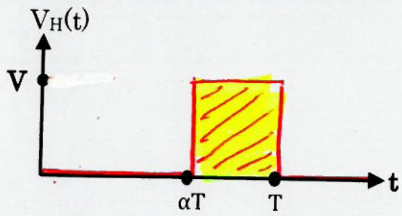


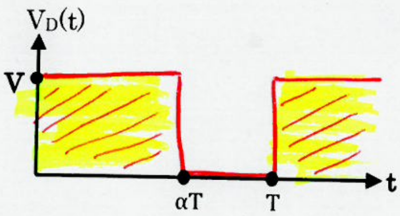
Expressions :

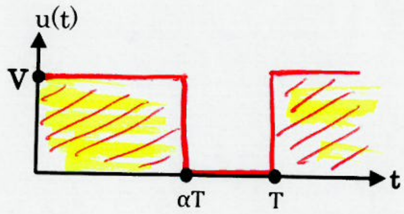
Toutes les expressions seront en fonction de la tension d'entrée **V** :

Intervalle	$V_H(t)$	$V_D(t)$	u(t)
$t \in [0\ ,\alpha T]$	......0......	......V......	......V......
$t \in [\alpha T\ ,T]$	......V......	......0......	......0......

Allures de $V_H(t)$, $V_D(t)$ et u(t)







La valeur moyenne de $V_H(t)$, $V_D(t)$ et u(t)

Par définition : $< u >= \frac{1}{T}\int_0^T u(t)\,dt$, mais, on préfère d'utilisé cette méthode : $< u >= \frac{\text{Surface}}{T}$ car les signaux sont de type carré.

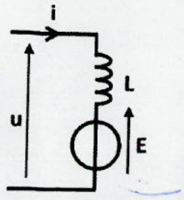
- La valeur moyenne de $V_H(t)$: $\langle V_H(t) \rangle = \frac{(1-\alpha)TV}{T} \Rightarrow \boxed{\langle V_H \rangle = (1-\alpha)V}$
- La valeur moyenne de $V_D(t)$: $\langle V_D \rangle = \frac{\alpha T V}{T} \Rightarrow \boxed{\langle V_D \rangle = \alpha V}$
- La valeur moyenne de u(t) : $\langle u \rangle = \frac{\alpha T V}{T} \Rightarrow \boxed{\langle u \rangle = \alpha V}$

La relation entre E et V

Montrer que : E = α V ? On a : $u(t) = E + L\frac{di(t)}{dt} \Rightarrow \langle u \rangle = \langle E \rangle + \langle L\frac{di}{dt} \rangle$

$\langle u \rangle = \alpha V$, $\langle E \rangle = E$ (car continue) , $\langle L\frac{di}{dt} \rangle = 0$ (tjr)

d'où : $\boxed{E = \alpha V}$



4.2. Etude des courants $i_D(t)$, $i_H(t)$ et $i(t)$

Le but de cette partie est de faire une résolution des équations différentielles régissant l'évolution du courant et en déduire les expressions des courants $i_D(t)$, $i_H(t)$ et $i(t)$ et enfin les tracer.

Hypothèse : le courant dans la charge ne s'annule jamais et varie entre I_m et I_M, tel que : $0 < I_m < i(t) < I_M$

L'expression de courant dans l'intervalle $t \in [0, \alpha T]$

Question 1 : Montrer que le courant dans cet intervalle, peut s'écrit : $i(t) = \frac{(1-\alpha).V}{L} t + I_m$ avec $i(0) = I_m$

- La valeur de la tension u(t) : $\boxed{u(t) = V}$
- l'équation de maille entre u(t), $v_L(t)$ et E : $\boxed{u(t) = V_L(t) + E}$
- l'équation différentielle régissant l'évolution de i(t) : $u(t) = L\frac{di(t)}{dt} + E \Rightarrow \boxed{\frac{di(t)}{dt} = \frac{V-E}{L} > 0}$

Résolution :

- L'expression de i(t) (on note la constante d'intégration Cte) : $\boxed{i(t) = \frac{(1-\alpha)V}{L} t + cte}$
- A t=0, i(0) = Im, la constante Cte, s'écrit : $i(0) = 0 + Cte = I_m \Rightarrow \boxed{I_m = cte}$
- L'expression du courant i(t) est donc : $\boxed{i(t) = \frac{(1-\alpha)V}{L} t + I_m}$

L'expression de courant dans l'intervalle $t \in [\alpha T, T]$

Question 2 : Montrer que le courant dans cet intervalle, peut s'écrit : $i(t) = -\frac{\alpha.V}{L}(t - \alpha T) + I_M$ avec $i(\alpha T) = I_M$

- La valeur de la tension u(t) : $\boxed{u(t) = 0}$
- l'équation de mail entre u(t), $v_L(t)$ et E : $u(t) = V_L(t) + E \Rightarrow \boxed{V_L(t) + E = 0}$
- l'équation différentielle régissant l'évolution de i(t) : $L\frac{di}{dt} + E = 0 \Rightarrow \boxed{\frac{di(t)}{dt} = -\frac{E}{L}}$

Résolution :

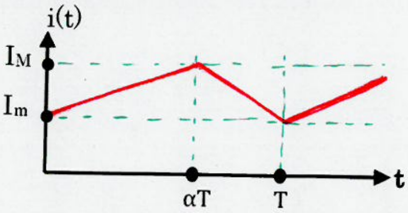
- L'expression de i(t) (on note la constante d'intégration Cte') : $i(t) = -\frac{E}{L} t + cté$
- A t= αT, i(αT) = I_M, la constante Cte', s'écrit : $i(\alpha T) = -\frac{E}{L}\alpha T + Cté \Rightarrow \boxed{cté = I_M + \frac{E}{L}\alpha T}$
- L'expression du courant i(t) est donc : $i(t) = -\frac{E}{L}(t - \alpha T) + I_M \Rightarrow \boxed{i(t) = -\frac{\alpha V}{L}(t - \alpha T) + I_M}$

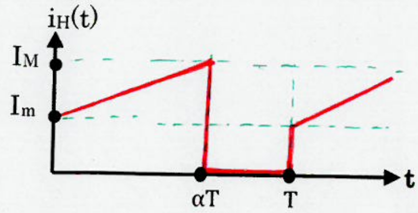
Expressions :

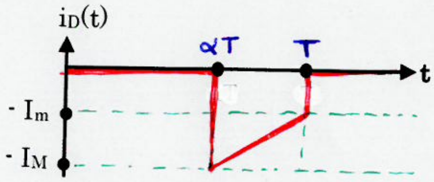
Toutes les expressions seront en fonction du courant de sortie **i(t)** (voir la partie 4.1) :

Intervalle	$i_H(t)$	$i_E(t)$	$i_D(t)$
$t \in [0, \alpha T]$	$i(t)$	$i(t)$	0
$t \in [\alpha T, T]$	0	0	$-i(t)$

Allures de $i_H(t)$, $i_D(t)$ et $i(t)$



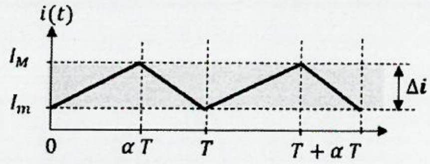




La valeur moyenne de $i_H(t)$, $i_D(t)$ et $i(t)$

- La valeur moyenne de i(t): $\boxed{\langle i(t) \rangle = \frac{I_m + I_M}{2}}$
- La valeur moyenne de $i_D(t)$: $\boxed{\langle i_D(t) \rangle = -(1-\alpha)\langle i(t) \rangle}$
- La valeur moyenne de $i_H(t)$: $\boxed{\langle i_H(t) \rangle = \alpha \langle i(t) \rangle}$

4.3. L'ondulation de courant $\Delta i(t)$



L'ondulation crête à crête du courant i(t) a pour expression : $\Delta i = I_M - I_m$

Son expression peut être déterminée à partir de l'une des deux relations précédentes de i(t).

Prenons l'intervalle : $t \in [0, \alpha T]$

$$\begin{cases} i(t) = \frac{(1-\alpha).V}{L}t + I_m \\ i(\alpha T) = I_M \end{cases}$$

L'ondulation s'écrit alors : $i(\alpha T) = I_M = \frac{(1-\alpha)V}{L}\alpha T + I_m$

$\Delta i = \frac{(1-\alpha)V}{L}\alpha T \Rightarrow \boxed{\Delta i = \frac{\alpha(1-\alpha)V}{LF}}$

4.4. Conséquences de l'ondulation de courant

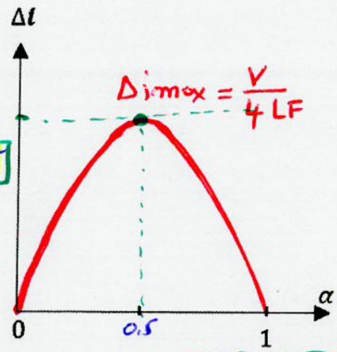
Une augmentation de l'ondulation Δi, entrainra :

- Augmentation du courant efficace Ieff $\left(I_{eff} = \sqrt{<i>^2 + I_{ond}{}^2}\right)$
- Les pertes joule de l'induit augmentent (échauffement de la machine) donc faible rendement
- Les pertes de commutation augmentent
- La vibration de la machine (création d'un contre couple)

On a intérêt à réduire l'ondulation crête à crête Δi du courant pour se rapprocher d'un facteur forme $F = \frac{I_{eff}}{<i>}$ égal à l'unité.

Question : Comment peut-on alors réduire l'ondulation du courant ?

4.5. Diminution de l'ondulation de courant



Question : Montrer que pour $\alpha = 0.5$, l'ondulation de courant est maximal et tracer Δi en fonction α.

$\frac{d\Delta i}{dt} = 0 \Rightarrow \frac{V}{LF}(\alpha - \alpha^2)' = 0 \Rightarrow 1 - 2\alpha = 0 \Rightarrow \boxed{\alpha_{max} = 0,5}$

$\Delta i_{max} = \Delta i(0,5) \Rightarrow \boxed{\Delta i_{max} = \frac{V}{4LF}}$

Solutions :

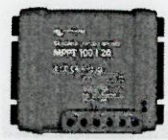
Pour réduire l'ondulation de courant, on doit agir sur :

- **Augmentation** de la valeur de la **bobine de lissage** (solution limitée par l'encombrement et au coût) $L_S \nearrow \Rightarrow L \nearrow$
- **Augmentation** de la **fréquence de hachage** (solution limitée par les performances des interrupteurs de puissances).

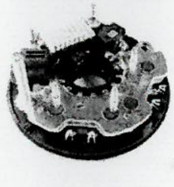
IV. Hacheur parallèle

Un hacheur parallèle ou hacheur survolteur est un convertisseur continu-continu dont la valeur moyenne de sortie est supérieure à la valeur moyenne de l'entrée (Pour cette raison, on l'appelle le survolteur).

Le survolteur est utilisé dans plusieurs domaines, on site :

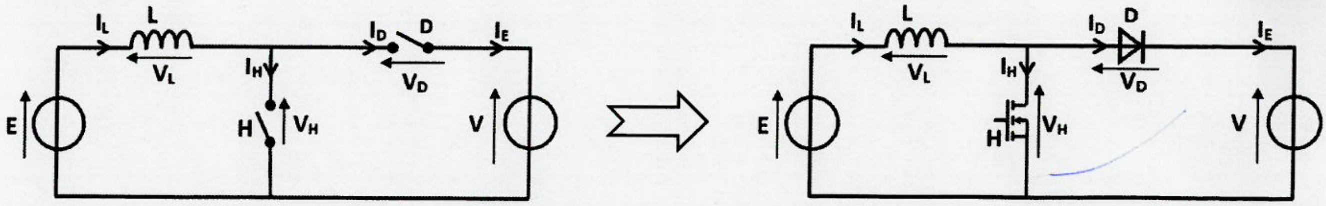


- **Régulateur à MPPT pour un PV (panneau solaire photovoltaïque)**
  Poursuite du point de la puissance maximale en augmentant au maximum la tension U (par un hacheur parallèle) sans faire baisser l'intensité I.



- **Régulateur d'alternateur des voitures**
  Le régulateur d'alternateur est un appareil électrique dont le rôle est de permettre à la batterie d'éviter une surcharge et de contrôler la puissance échangée entre l'alternateur et la batterie.

1. Structure



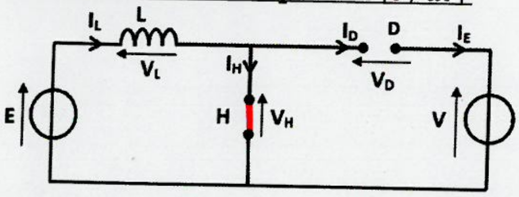
La commande de transistor MOSFET H : $t \in [0\ ,\ \alpha T]$ **H passant** donc la diode D : ...bloquée... Et de $t \in [\alpha T\ ,\ T]$ **H bloqué** donc D : ...passante...

Hypothèse : Supposons que la tension de sortie V est supérieur à E : $V > E$

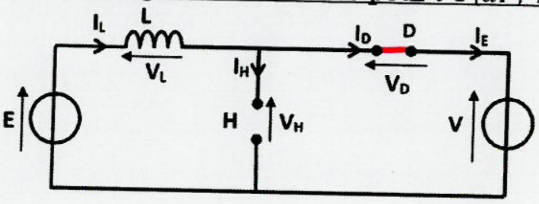
2. Etude du hacheur série

2.1. Etude des tensions V_H, V_D et V_L

Phase de roue libre pour $t \in [0\ ,\ \alpha T]$



Phase génératrice active pour $t \in [\alpha T\ ,\ T]$

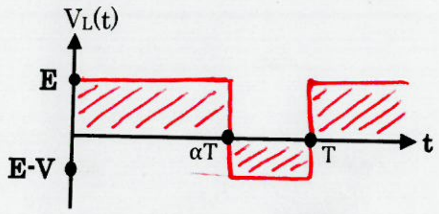


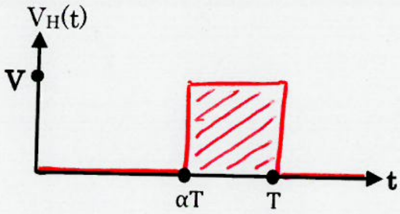
Expressions :

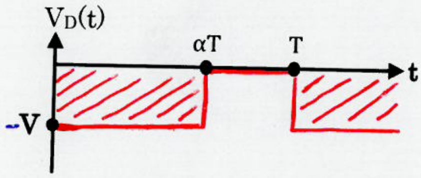
Toutes les expressions seront en fonction de la tension d'entrée **V** :

Intervalle	$V_L(t)$	$V_H(t)$	$V_D(t)$
$t \in [0\ ,\alpha T]$	E	0	$-V$
$t \in [\alpha T\ ,T]$	$E-V$	V	0

Allures de $V_H(t)$, $V_D(t)$ et $u(t)$







La valeur moyenne de $V_H(t)$, $V_D(t)$

- La valeur moyenne de $V_H(t)$: $\langle V_H \rangle = \frac{(1-\alpha)TV}{T} \Rightarrow \boxed{\langle V_H \rangle = (1-\alpha)V}$
- La valeur moyenne de $V_D(t)$: $\langle V_D \rangle = \frac{-(\alpha T V)}{T} \Rightarrow \boxed{\langle V_D \rangle = -\alpha V}$

La loi entrée/sortie entre E et V :

Méthode 1 : la valeur moyenne aux bornes d'une inductance est toujours nulle : $< v_L(t) > = 0$, en utilisant la méthode du surface, calculer la valeur moyenne de V (t) : $\langle V_L \rangle = \alpha E + (1-\alpha)(E-V) = 0$

$\Leftrightarrow \alpha E + (1-\alpha)E - V(1-\alpha) = 0 \Rightarrow E - V(1-\alpha) = 0$

Donc la relation entre E et V : $\boxed{V = \frac{E}{1-\alpha}}$ donc $\boxed{V \geqslant E}$

Méthode 2 :

- Exprimer $V_H(t)$ en fonction E et $V_L(t)$: $V_H(t) = E - V_L(t)$
- Appliquer la valeur moyenne pour cette expression, et déduire $< v_L(t) >$ et E : $\langle V_H \rangle = \langle E \rangle - \langle V_L \rangle$

  $\langle V_L \rangle = 0 \Rightarrow \boxed{\langle V_H \rangle = E}$ 1
- Faire une égalité entre la valeur moyenne trouver précédemment (à partir de l'allure) et celui trouver maintenant de la méthode 2. Trouver la relation entre E et V : on $\boxed{\langle V_H \rangle = (1-\alpha)V}$ 2

  $1 = 2 \Rightarrow (1-\alpha)V = E \Rightarrow \boxed{V = \frac{E}{1-\alpha}}$

2.2. Etude des courants $i_D(t)$, $i_H(t)$ et $i_L(t)$

Le but de cette partie est de faire une résolution des équations différentielles régissant l'évolution du courant et en déduire les expressions des courants $i_D(t)$, $i_H(t)$ et $i_L(t)$ et enfin le traçage de ses courants.

Hypothèse : le courant dans la charge ne s'annule jamais et varie entre I_m et I_M tel que : $0 < I_m < iL(t) < I_M$

L'expression de courant dans l'intervalle $t \in [0, \alpha T]$

Question 1 : Montrer que le courant dans cet intervalle, peut s'écrit : $i_L(t) = \frac{E}{L}t + I_m$ avec $i_L(0) = I_m$

Dans cet intervalle $\Rightarrow V_H(t) = 0$

$-V_L(t) + E = 0 \Rightarrow -L\frac{di}{dt} + E = 0$

$\Leftrightarrow \frac{di_L}{dt} = \frac{E}{L} > 0$

Dmc : $i_L(t) = \frac{E}{L}t + cte$

à $t = 0 \Rightarrow i_L(0) = I_m = 0 + Ck$

Dmc : $Ck = I_m$

d'où : $\boxed{i_L(t) = \frac{E}{L}t + I_m}$

L'expression de courant dans l'intervalle $t \in [\alpha T, T]$

Question 2 : Montrer que le courant dans cet intervalle, peut s'écrit : $i_L(t) = \frac{E-V}{L}(t - \alpha T) + I_M$ avec $i_L(\alpha T) = I_M$

Dans cet intervalle $E = V_L(t) + V$

$\Leftrightarrow V_L(t) = E - V < 0$

$\Leftrightarrow \frac{di_L(t)}{dt} = \frac{E-V}{L}$

$i_L(t) = \frac{E-V}{L}t + cté$

à $t = \alpha T \Rightarrow i(\alpha T) = I_M = \frac{E-V}{L}\alpha T + Cté$

$\Rightarrow Cté = I_M - \frac{E-V}{L}\alpha T$

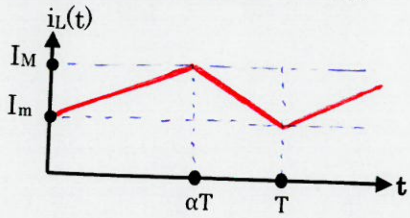
d'où : $\boxed{i(t) = \frac{E-V}{L}(t - \alpha T) + I_M}$

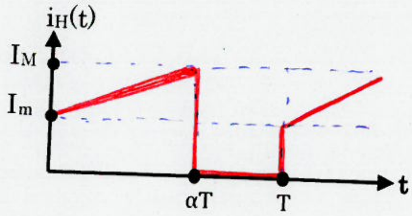
Expressions :

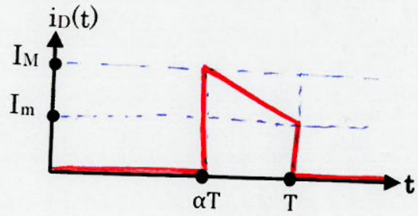
Toutes les expressions seront en fonction du courant de sortie $i_L(t)$ (voir la partie 4.1) :

Intervalle	$i_H(t)$	$i_E(t)$	$i_D(t)$
$t \in [0, \alpha T]$	$i_L(t)$	0	0
$t \in [\alpha T, T]$	0	$i_L(t)$	$i_L(t)$

Allures de $i_H(t)$, $i_D(t)$ et $i_L(t)$





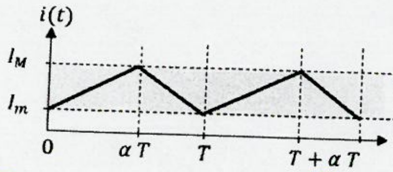


La valeur moyenne de $i_H(t)$, $i_D(t)$ et $i(t)$

- La valeur moyenne de $i_L(t)$: $\boxed{\langle i_L(t) \rangle = \frac{I_M + I_m}{2}} \Rightarrow$
- La valeur moyenne de $i_D(t)$: $\boxed{\langle i_D(t) \rangle = (1-\alpha)\langle i_L(t) \rangle}$
- La valeur moyenne de $i_H(t)$: $\boxed{\langle i_H \rangle = \alpha \langle i_L(t) \rangle}$

8.1. L'ondulation de courant $\Delta i(t)$

L'ondulation crête à crête du courant $i(t)$ a pour expression : $\Delta i = I_M - I_m$



Prenons l'intervalle : $t \in [0, \alpha T]$

$$\begin{cases} i_L(t) = \frac{E}{L}t + I_m \\ i(\alpha T) = I_M \end{cases}$$

L'ondulation s'écrit alors : $i_L(\alpha T) = \frac{E}{L}\alpha T + I_m = I_M$ et $V = \frac{E}{1-\alpha}$

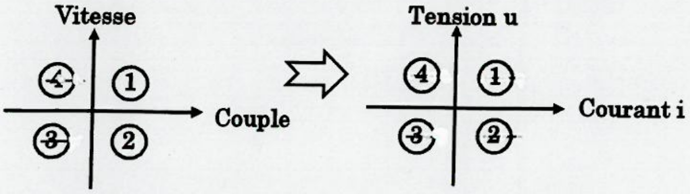
D'où $\boxed{\Delta i = I_M - I_m = \frac{\alpha(1-\alpha)V}{LF}}$

La relation l'ondulation du courant maximal : $\frac{d\Delta i}{dt} = 0 \Rightarrow 1 - 2\alpha_{max} = 0$

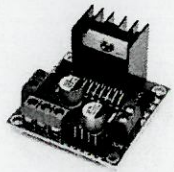
$\boxed{\alpha_{max} = \frac{1}{2} = 0.5} \Rightarrow \boxed{\Delta i = \frac{V}{4LF}}$

V. Hacheur quatre quadrants

Le hacheur 4 quadrants permet de faire fonctionner le moteur dans les quatre (4) quadrants possibles : il est possible de le faire fonctionner aussi bien en moteur qu'en génératrice, et ce dans les sens de rotation.

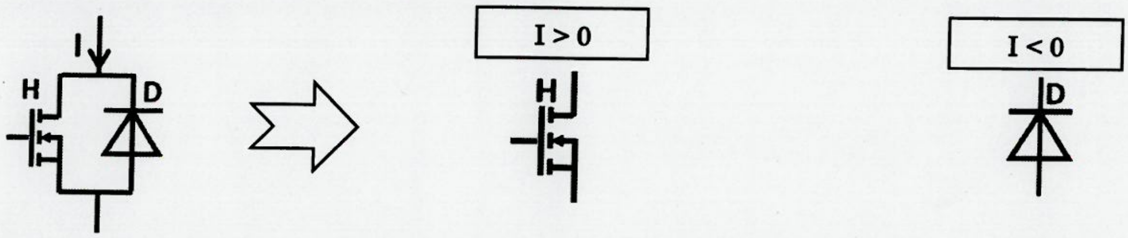


- $u.i > 0$: fct moteur
- $u.i < 0$: fct générateur



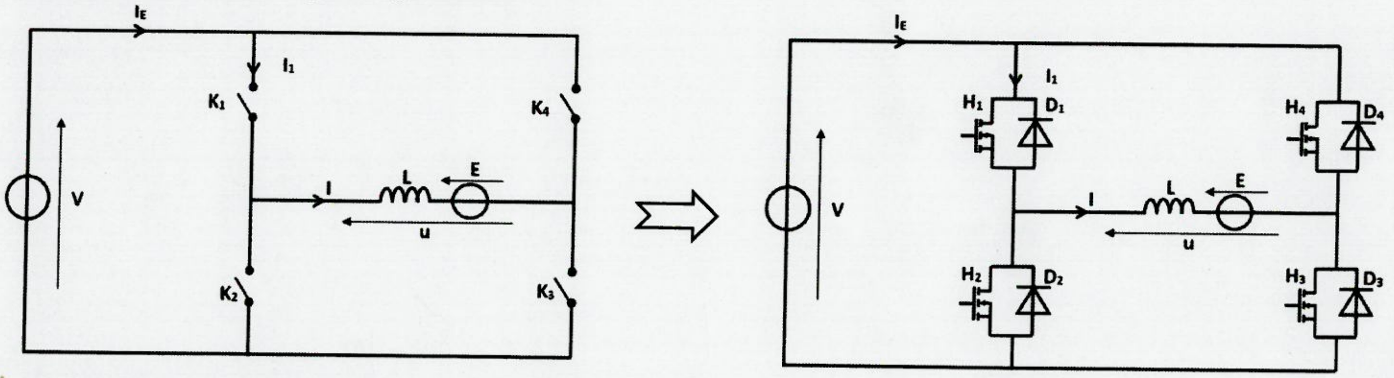
1. Les interrupteurs de puissance utilisés

Le hacheur 4 quadrants est un pont en H est constitué de quatre interrupteurs de puissance (MOSFET en parallèle avec une diode) qui permet d'assurer la réversibilité en courant.



N.B : le transistor MOSFET reste **bloqué** même si l'ordre de commande est lui appliqué tant que le courant qui le traverse est négatif.

2. Structure de hacheur quatre quadrants



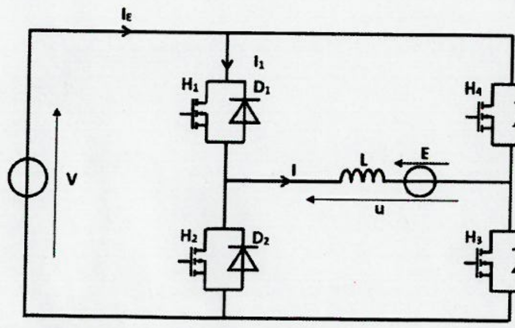
Il existe plusieurs stratégies de commande des transistors :

- **La commande séquentielle**
- **La commande bipolaire**

3. La commande séquentielle

Les stratégies de pilotage des transistors sont basées sur le maintien permanent dans l'état passant d'un transistor.

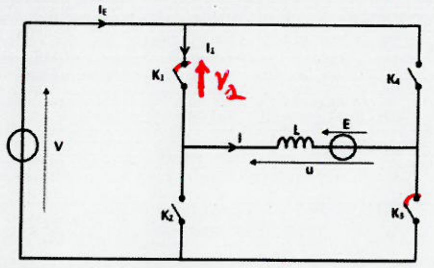
Sens de rotation	Tension u	$t \in [0, \alpha T]$	$t \in [\alpha T, T]$
Sens positif	$u \geq 0$ et $i > 0$	H1 – H3	H3
Sens négatif	$u \leq 0$ et $i < 0$	H2 – H4	H4



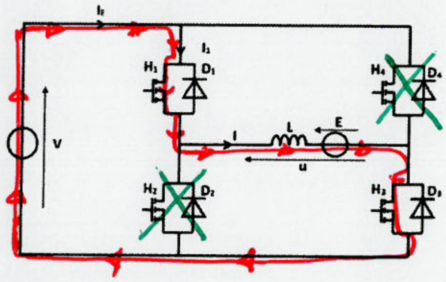
Cette stratégie de pilotage est dite séquentielle. Le couple de transistor mis en œuvre dépend du signe souhaité aux bornes du moteur

- **Etude du sens positif : $u \geq 0$ et $i > 0$**

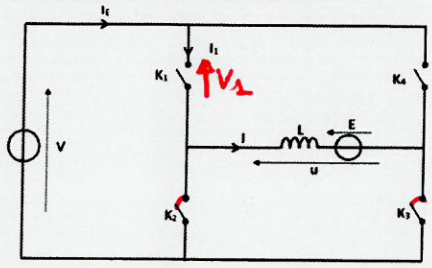
Phase active motrice pour $t \in [0\ ,\ \alpha T]$



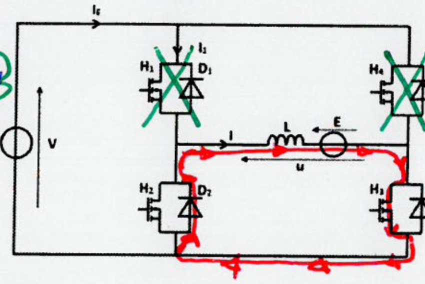
H1, H3 passant
D1 D2 D3 D4 Bloquées
H2 - H4 Bloqués



Phase de roue libre pour $t \in [\alpha T\ ,\ T]$



H3, D2 passants
• D1 D3 D4
• H1 H2 H4 bloqués

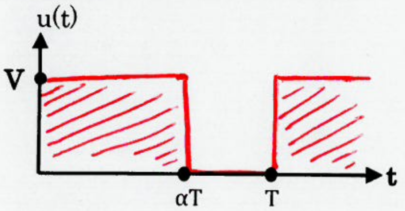


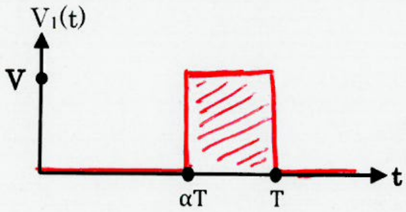
Expressions :

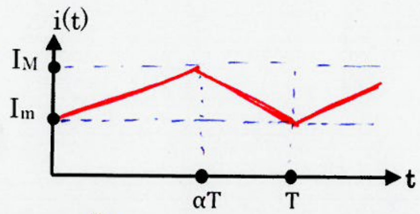
Toutes les expressions seront en fonction de la tension d'entrée **V** :

Intervalle	u (t)	V_1(t)	Les interrupteurs qui passent le courant
$t \in [0\ ,\alpha T]$	V	0	H1 — H3
$t \in [\alpha T\ ,T]$	0	V	D2 — H3

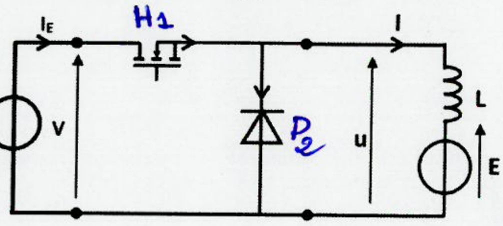
Allures de $V_H(t)$, i(t) et u(t)





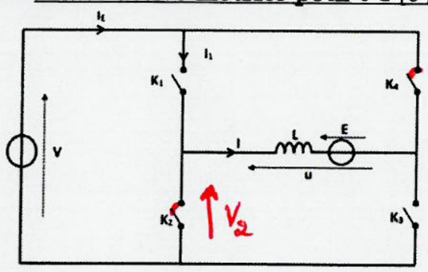


Cette stratégie de pilotage, nous ramène au même schéma du hacheur série (voir les détails dans la partie III). Compléter le schéma suivant en plaçant les notations des interrupteurs convenables.

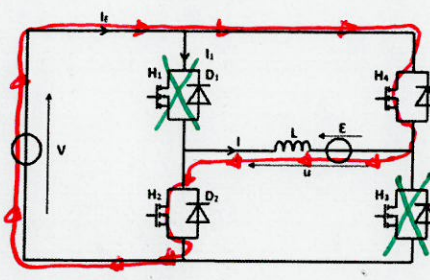


- **Etude du sens négatif: $u \leq 0$ et $i < 0$**

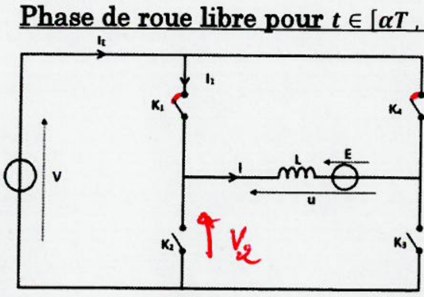
Phase active motrice pour $t \in [0\ ,\ \alpha T]$



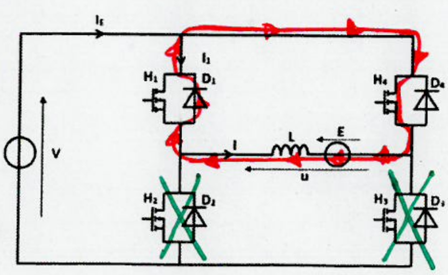
H2 - H4 passants
D1 D2 D3 D4
H1 H3 Bloqués



Phase de roue libre pour $t \in [\alpha T\ ,\ T]$



D1 - H4 passants
D2 D3 D4
H1 H2 H3 Bloqués

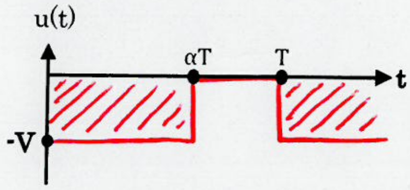


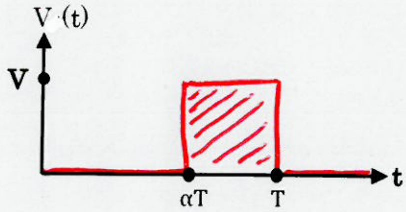
Expressions :

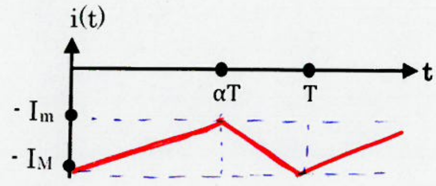
Toutes les expressions seront en fonction de la tension d'entrée **V** :

Intervalle	u (t)	$V_1(t)$	Les interrupteurs qui passent le courant
t ∈ [0 , αT]	−V	0	H_2 − H_4
t ∈ [αT , T]	0	V	D_1 − H_4

Allures de $V_H(t)$, i(t) et u(t)

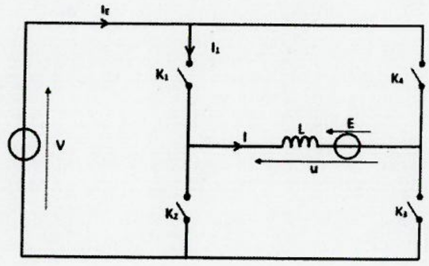






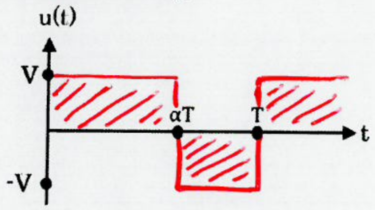
4. La commande bipolaire

Cette stratégie de commande de pilotage des transistors consiste à commander alternativement les couples {K1, K3} et {K2, H3} du hacheur 4 quadrants :



Intervalle	Les interrupteurs	u (t)
t ∈ [0 , αT]	K1 − K3	V
t ∈ [αT , T]	K2 − K4	−V

Allures de u(t)



la valeur moyenne de u(t)

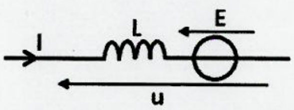
$\langle u \rangle = \alpha V - (1-\alpha)V$

$\boxed{\langle u(t) \rangle = (2\alpha - 1)V}$

Donc : ……………………… < ***Umoy*** < ……………………………

La relation entre E et V

On prend coté charge :



$u(t) = L\frac{di(t)}{dt} + E \iff \langle u(t) \rangle = \langle L\frac{di}{dt} \rangle + \langle E \rangle$

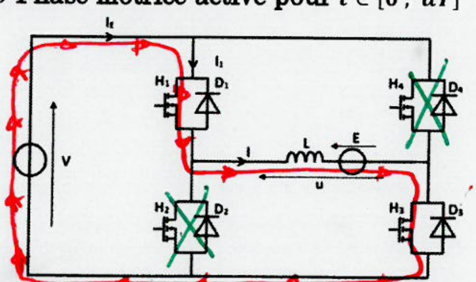
$\Rightarrow \boxed{E = (2\alpha - 1)V}$

Il existe trois cas d'étude : **i(t) > 0**, **i(t) < 0** et **i(t)=0**

4.1. Cas 1 : le courant est positif i(t) > 0

Hypothèse : le courant dans la charge ne s'annule jamais et varie entre I_m et I_M tel que : $0 < I_m < i(t) < I_M$

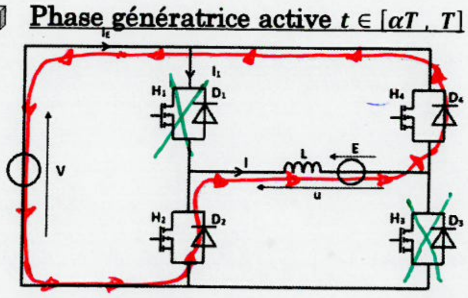
Phase motrice active pour $t \in [0\ ,\ \alpha T]$



Les interrupteurs qui passent le courant :

H_1 − H_3

Phase génératrice active $t \in [\alpha T\ ,\ T]$



Les interrupteurs qui passent le courant :

D_2 − D_4

L'expression de courant dans l'intervalle $t \in [0, \alpha T]$

Question 1 : Montrer que le courant dans cet intervalle, peut s'écrit : $i(t) = \frac{2(1-\alpha).V}{L} t + I_m$ avec $i(0) = Im$

On $u(t) = V$ et $u(t) = V_L(t) + E$

$\Leftrightarrow L\frac{di}{dt} + E = V \Rightarrow \frac{di}{dt} = \frac{V-E}{L}$

$\Leftrightarrow \frac{di}{dt} = \frac{2(1-\alpha)V}{L} > 0 \Rightarrow i(t)$ croissant

alors $i(t) = \frac{2(1-\alpha)V}{L}t + Cte$

à $t = 0 \Rightarrow i(0) = Im \Rightarrow Cte = Im$

Donc : $\boxed{i(t) = \frac{2(1-\alpha)Vt}{L} + Im}$

L'expression de courant dans l'intervalle $t \in [\alpha T, T]$

Question 2 : Montrer que le courant dans cet intervalle, peut s'écrit : $i(t) = \frac{-2\alpha V}{L}(t - \alpha T) + I_M$ avec $i(\alpha T) = I_M$

On a : $u(t) = -V$ et $u(t) = E + V_L(t)$

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

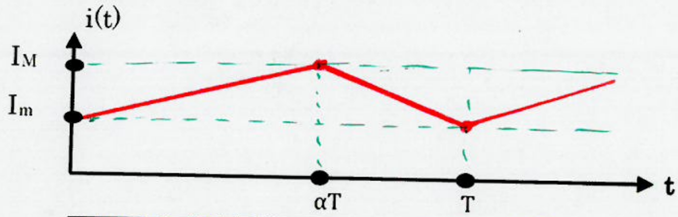
$\Leftrightarrow \frac{di}{dt} = -\frac{V+E}{L} < 0$

$\hookrightarrow i(t) = -\frac{2\alpha V}{L}t + cte$

à $t = 0 \Rightarrow Cte = \frac{2\alpha V}{L} + I_M$

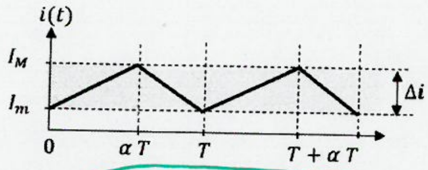
d'où : $\boxed{i(t) = -\frac{2\alpha V}{L}(t - \alpha T) + I_M}$

Allure de i(t)



$H_1 - H_3$	$D_2 - D_4$	$H_1 - H_3$

L'ondulation de courant Δi(t)



L'ondulation crête à crête du courant i(t) a pour expression : $\Delta i = I_M - I_m$

Prenons l'intervalle : $t \in [0, \alpha T]$

$$\begin{cases} i_L(t) = \frac{2(1-\alpha).V}{L} t + I_m \\ i(\alpha T) = I_M \end{cases}$$

L'ondulation de courant, s'écrit alors : $i(\alpha T) = I_M = \frac{2(1-\alpha)V}{L}\alpha T + Im$

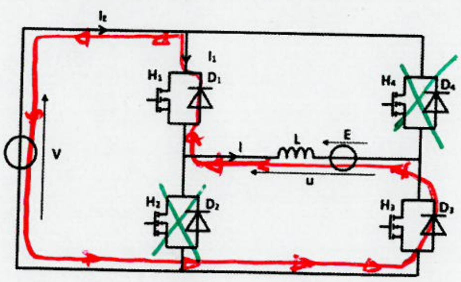
$\Delta i = I_M - I_m \Rightarrow \boxed{\Delta i = \frac{2(1-\alpha)\alpha V}{LF}}$

La relation l'ondulation du courant maximal : $\frac{d\Delta i}{dt} = 0 \Rightarrow \boxed{\alpha = 0.5}$

$\boxed{\Delta i_{max} = \Delta i(0.5) = \frac{V}{2LF}}$

4.2. Cas 2 : le courant est négatif i(t) < 0

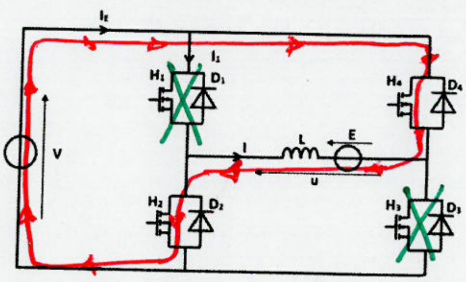
Phase motrice active pour $t \in [0, \alpha T]$



Les interrupteurs qui passent le courant :

$D_1 - D_3$

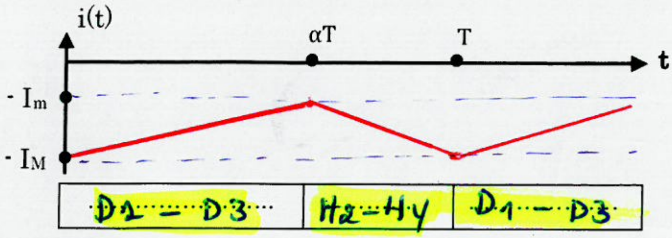
Phase génératrice active $t \in [\alpha T, T]$



Les interrupteurs qui passent le courant :

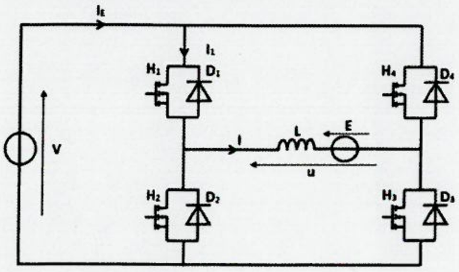
$H_2 - H_4$

Allure de i(t)



4.3. Cas 2 : le courant est négatif i(t) = 0

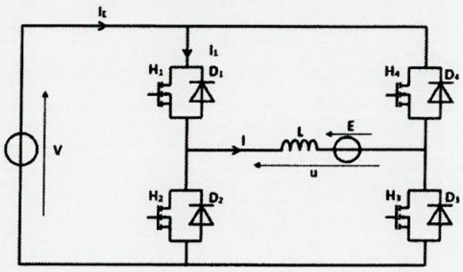
Phase motrice active pour $t \in [0\ ,\ \alpha T]$



Les interrupteurs qui passent le courant :

i > 0 H1 — H3 | i < 0 D1 — D3

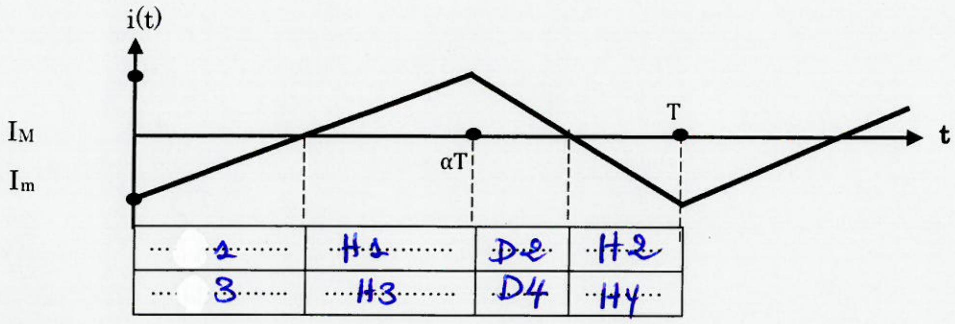
Phase génératrice active $t \in [\alpha T\ ,\ T]$



Les interrupteurs qui passent le courant :

i > 0 D2 — D4 | i < 0 H2 — H4

Allure de i(t)



5. Le transfert de l'énergie

Les hacheurs sont des lieux d'échange de l'énergie de la batterie (entrée) vers la machine à courant continu (sortie) ou inversement. Le signe de la puissance moyenne (active) permet de connaitre le sens de transfert, on la définit par la relation suivante : on choisit L très grande et même aussi la fréquence ⇒ $i(t) = I_{moy} = cte$

$P = \langle p(t) \rangle = \langle u(t) \times i(t) \rangle \Rightarrow \boxed{P = \langle u(t) \rangle\ I_{moy}}$

Supposons que le courant est parfaitement lissé et égale à sa valeur moyenne : i(t) = I

valeur moyenne de tension	Le courant I	Signe puissance	Transfert d'énergie
Positive	positif	Positive	Batterie vers MCC
Négative	Positif	Négative	MCC → Batterie
Positive	Négatif	Négative	MCC → Batterie
Négative	Négatif	Positive	Batterie → MCC

P > 0 : le transfert d'énergie batterie vers MCC

P < 0 : le transfert d'énergie MCC vers batterie

VI. Choix des composants de la chaine de puissance

Une fois que l'on a établi les signaux dans les différents composants, il faut comparer les valeurs aux valeurs indiquées par le constructeur.

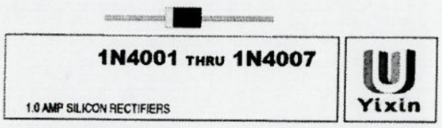
1. Dimensionnement des diodes de puissance

Les diodes du hacheur sont soumises à des courants positifs et des tensions inverses qui doivent rester compatibles avec les valeurs limites définies par le constructeur.

Le choix de la diode doit respecter les conditions suivantes :

- Le courant direct moyen de la diode I_{FAV} doit être supérieur à la valeur moyenne du courant $i_D(t)$.
- La tension inverse maximale V_{RRM} doit être supérieure à la tension maximale de $V_D(t)$.
- Le courant impulsionnel maximum I_{FSM} doit supérieure au courant maximal de $i_D(t)$.

Exemple : diode de puissance IN400X



https://pdf1.alldatasheet.com/datasheetpdf/view/1042228/YIXIN/1N4007.html

TYPE NUMBER	1N4001	1N4002	1N4003	1N4004	1N4005	1N4006	1N4007	UNITS
Maximum Recurrent Peak Reverse Voltage	50	100	200	400	600	800	1000	V
Maximum RMS Voltage	35	70	140	280	420	560	700	V
Maximum DC Blocking Voltage	50	100	200	400	600	800	1000	V
Maximum Average Forward Rectified Current .375"(9.5mm) Lead Length at Ta=75℃				1.0				A
Peak Forward Surge Current, 8.3 ms single half sine-wave superimposed on rated load (JEDEC method)				30				A

2. Dimensionnement des transistors de puissance

La différence essentielle entre les transistors (IGBT ou MOS) et les diodes concerne la tenue thermique qui pour ces transistors fait intervenir la valeur efficace du courant :

Comparaisons des valeurs effectives aux données du constructeur :

- La valeur efficace $I_{H\,eff} < I_{D_{DC}}$: critère de tenue thermique
- $V_{H\,max} < V_{c_{eo}}$: tenue des semi-conducteurs en circuit ouvert
- $I_{H\,max} < I_{FM}$: tenue des semi-conducteurs en circuit fermé