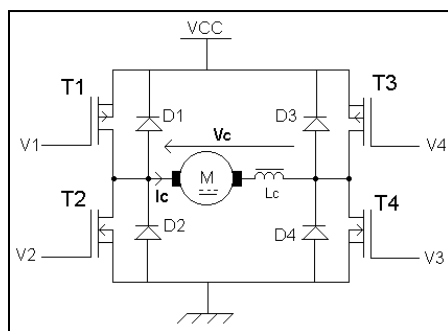


Convertisseurs Continu-Continu

Le HACHEUR



- 1 INTRODUCTION A L'ELECTRONIQUE DE PUISSANCE (ENPU).....2**
 - 1.1 CARACTERISATION DES SOURCES2
 - 1.2 CARACTERISATION DES CHARGES2
 - 1.3 EXEMPLES.....3
 - 1.4 REGLE D'ASSOCIATION DES SOURCES3
 - 1.5 CARACTERISATION DES INTERRUPTEURS4
 - 1.6 TECHNOLOGIE DES INTERRUPTEURS.....4
 - 1.7 FAMILLES DE HACHEURS5
- 2 HACHEUR SERIE OU ABASSEUR.....5**
 - 2.1 PRINCIPE DU HACHEUR SERIE5
 - 2.2 RELATIONS.....6
 - 2.3 CHOIX DES INTERRUPTEURS7
 - 2.4 ASSOCIATION HACHEUR SERIE ET MACHINE A COURANT CONTINU8
 - 2.5 CALCUL DE L'ONDULATION DE COURANT9
- 3 HACHEUR ELEVATEUR OU PARALLELE.....11**
 - 3.1 ALLURE DES SIGNAUX11
 - 3.2 RELATIONS.....11
 - 3.3 CHOIX DES INTERRUPTEURS12
- 4 HACHEUR 2 QUADRANTS13**
 - 4.1 ANALYSE DE LA COMMUTATION13
 - 4.2 ANALYSE DES INTERRUPTEURS.....14
- 5 HACHEURS 4 QUADRANTS.....14**
 - 5.1 COMMANDE UNIPOLAIRE (+U_E, -U_E).....15
 - 5.2 COMMANDE BIPOLAIRE (0+U_E, 0-U_E)15

1 INTRODUCTION A L'ELECTRONIQUE DE PUISSANCE (ENPU)

L'électronique de puissance permet de distribuer l'énergie électrique délivrée par une source sous une forme donnée (continue, alternative, basse ou haute tension, etc..) à une charge en une autre forme (continue, alternative, basse ou haute tension, etc..). Les applications couvrent toute la gamme de puissance des actionneurs électriques :



Dans le cadre de ce cours, on se limitera aux transformations continu-continu.

L'électronique de puissance est une électronique de commutation : idéalement, un interrupteur ouvert ou fermé ne dissipe pas d'énergie. Ainsi, il est possible de transférer de l'énergie entre une source d'entrée et une charge de sortie en contrôlant son transfert à moindre coût. A chaque cycle de commutation, un quantum d'énergie est donc transféré (ou stocké si un dispositif existe dans la structure) entre la source d'entrée et la sortie. C'est le rôle du **modulateur statique**.

1.1 Caractérisation des sources

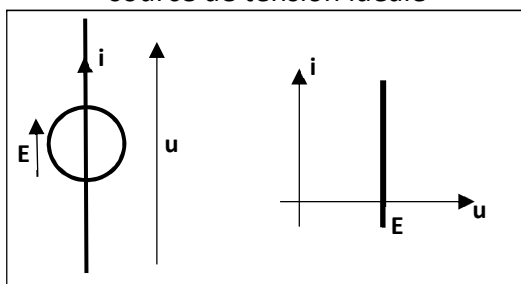
Les sources électriques existantes sont des générateurs de tension ou de courant continus ou alternatifs.

Par définition, on parle de **sources statiques** :

Une source de tension idéale impose une tension indépendamment du courant qui la parcourt,

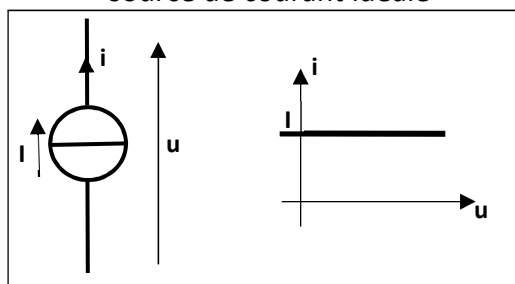
Une source de courant idéale impose un courant indépendamment de la tension à ses bornes.

source de tension idéale



La tension est constante quelle que soit la valeur du courant

source de courant idéale



Le courant est constant quelle que soit la valeur de la tension







Une **source réelle** comporte une résistance interne, représentée en série sur la source de tension et en parallèle sur la source de courant.

1.2 Caractérisation des charges

Par extension, on parlera de **sources dynamiques de tension ou de courant** pour les charges (des dipôles) tels que respectivement la tension et le courant ne peuvent varier instantanément à leurs bornes. Ce comportement est observé pour un condensateur (source dynamique de tension) ou une inductance (source dynamique de courant).

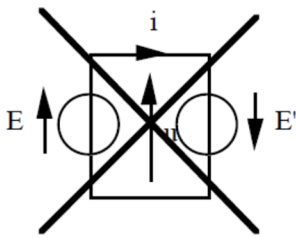
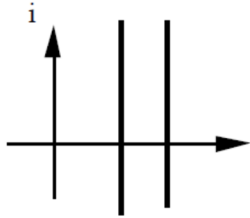
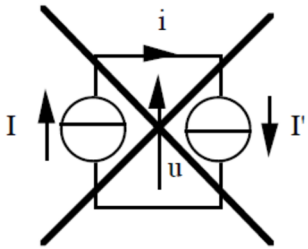
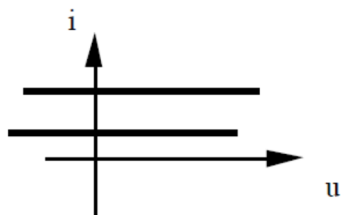
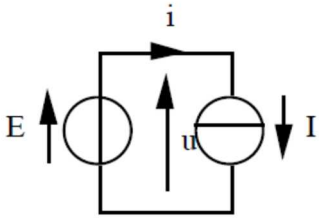
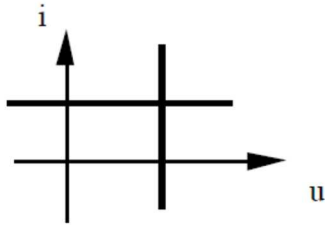
Un autre exemple : la machine à courant continu est considérée comme une source de courant (on dira à comportement « source de courant »), car elle a un comportement dynamique source de courant (le courant d'induit ne pouvant pas varier instantanément à cause de l'inductance).

1.3 Exemples

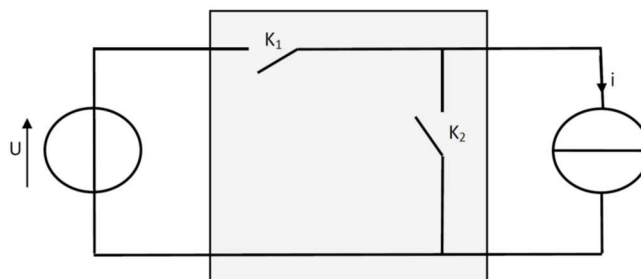
Sources de tension			
	Condensateur	batterie	réseau de distribution
sources de courant			
	Electro-aimant	Mcc	self

Un modulateur statique connectant une source d'entrée à une charge (source de sortie compte tenu de sa réversibilité potentielle), toutes les associations de sources ne sont pas permises :

1.4 Règle d'association des sources

<p>Règle n°1 : On ne doit pas interconnecter deux sources de tension différentes. Le courant échangé deviendrait alors très grand et l'on aboutirait à une destruction.</p> <p>Règle n°2 : il ne faut jamais court-circuiter une source de tension.</p>	 
<p>Règle n°3 : On ne doit pas interconnecter deux sources de courant différentes. La tension à leurs bornes deviendrait alors très grande et l'on aboutirait à une destruction.</p> <p>Règle n°4 : Il ne faut jamais laisser une source de courant en circuit ouvert.</p>	 
<p>Il reste donc comme association permise deux sources de nature différente :</p> <p>une source de tension associée à une source de courant</p>	 

On ajoute des interrupteurs pour permettre le contrôle de l'échange d'énergie entre ces deux sources. Le respect des règles énoncées précédemment conduit donc à devoir utiliser deux interrupteurs : le premier connecte les sources entre elles, le second assure le respect de la règle 4 vis-à-vis de la source de courant.



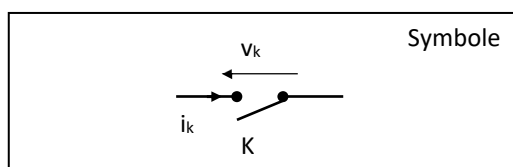
La structure de conversion la plus simple met donc en œuvre obligatoirement 2 interrupteurs dont les fonctionnements sont liés : leurs états sont nécessairement complémentaires. Cette structure de base est nommée « cellule de commutation » elle est la brique élémentaire de tout convertisseur statique.

1.5 Caractérisation des interrupteurs

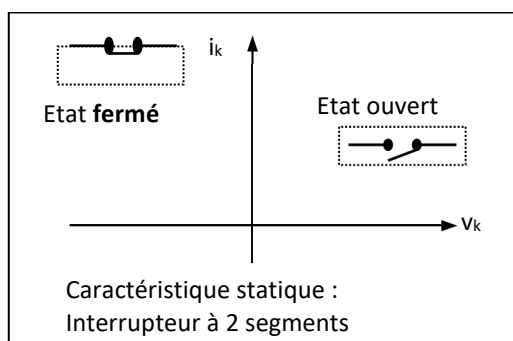
Nombre de segments

Un interrupteur idéal **K** est considéré comme un dipôle orienté en convention récepteur (cf. symbole). Il possède deux états :

- **Etat ouvert (O)** (caractérisé par $i_k=0$)
- **Etat fermé (F)** (caractérisé par $v_k=0$)



La caractéristique statique d'un interrupteur est composée des segments sur lesquels son point de fonctionnement (v_k, i_k) peut se déplacer. Ces segments de droite sont confondus avec les axes pour un interrupteur idéal.



1.6 Technologie des interrupteurs

Trois composants sont couramment utilisés, seuls ou combinés, pour réaliser un interrupteur.

Diode	IGBT	Transistor MOS
Amorçage et blocage spontanés	Amorçage et blocage commandés par v_{GS}	Amorçage et blocage commandés par v_{GE}

1.7 Familles de hacheurs

Les hacheurs sont des convertisseurs continu - continu qui procèdent par découpage d'une grandeur d'entrée continue, tension ou courant et dont la grandeur de sortie est également continue ou à faible ondulation.

On distingue deux familles de convertisseurs continu / continu.

- Les hacheurs à liaison continue (continuité électrique entre entrée et sortie),

Charge rapide et contrôlée de batteries d'accumulateurs, et typiquement entraînement de moteurs à courant continu à vitesse variable,



Shield Arduino L298

- Les alimentations à découpage avec isolation galvanique.

Les alimentations à découpage se sont fortement développées pour remplacer les alimentations linéaires de poids élevé et faible rendement. Elles sont utilisées désormais dans tous les appareils électroniques « grand public ».



Alimentation à découpage
MW 3 à 12V/ 1.5A max. 100-
240V

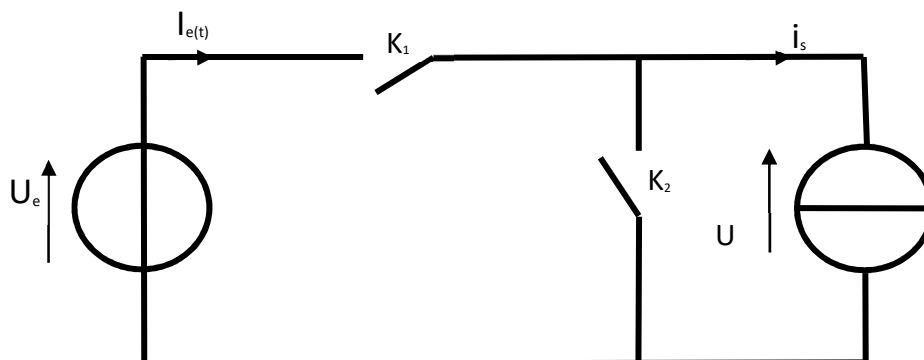
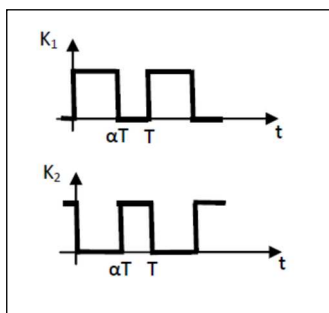
Dans le cadre de ce cours, on se limitera aux hacheurs à liaison continue.

2 HACHEUR SERIE OU ABAISSEUR

2.1 Principe du hacheur série

Le hacheur série connecte une source de tension sur une charge à comportement source de courant (par exemple un circuit inductif).

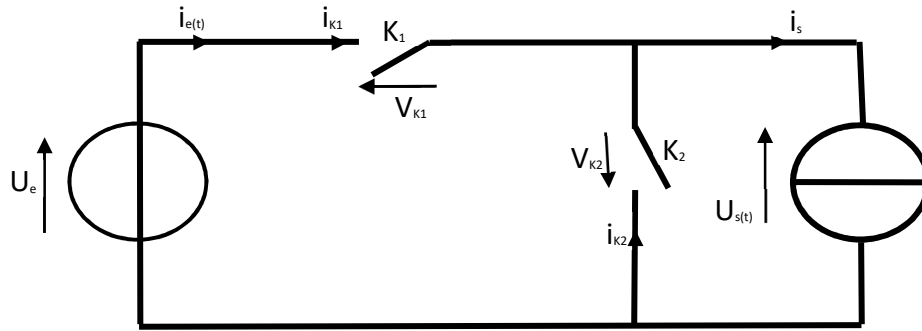
Pour respecter les règles d'association des sources, les interrupteurs K_1 et K_2 sont commandés de manière complémentaire.



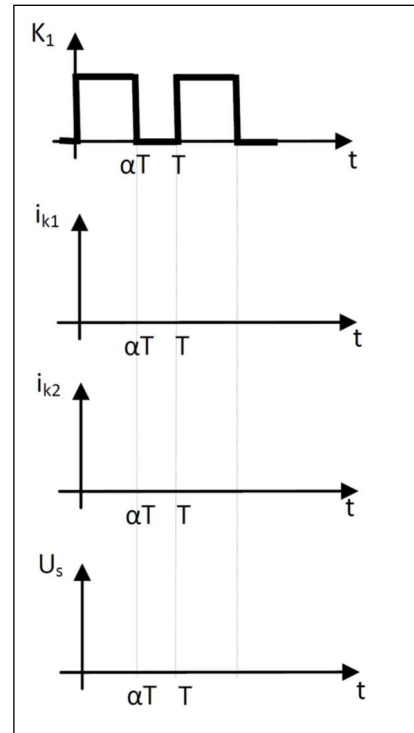
La source de tension est continue et prend la valeur U_e .

La charge a un comportement source de courant et prend la valeur $i_s > 0$.

2.2 Relations

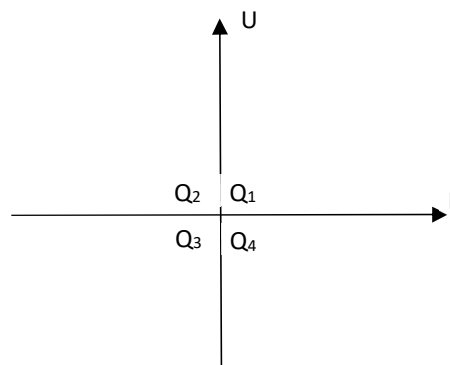
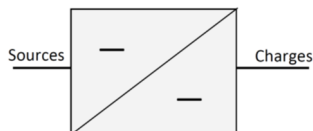


- Tracer les allures des signaux i_{k1} , i_{k2} et U_s
- calculer la valeur moyenne de la tension de sortie $U_s = f(U_e, \alpha)$



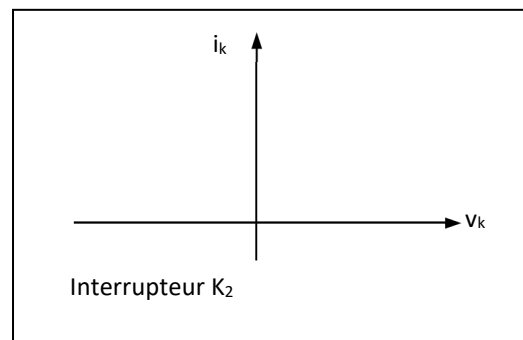
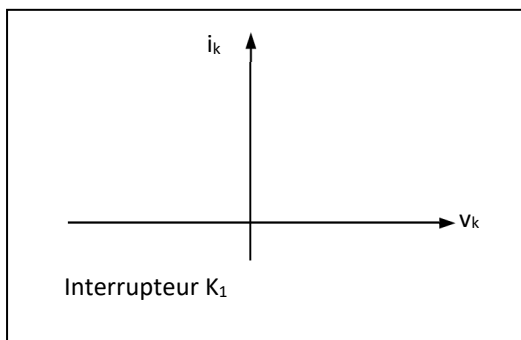
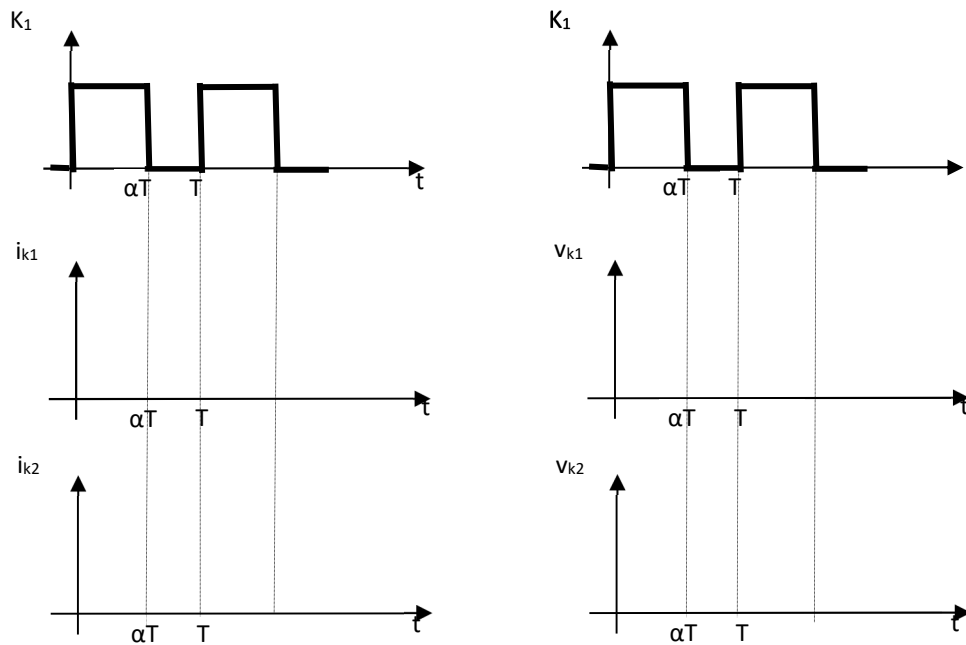
On retiendra : le hacheur série permet de diminuer la valeur de la tension moyenne, le rapport cyclique α est variable entre 0 et 1.

Applications : hachez le quadrant utilisable avec cette structure ($i > 0$)

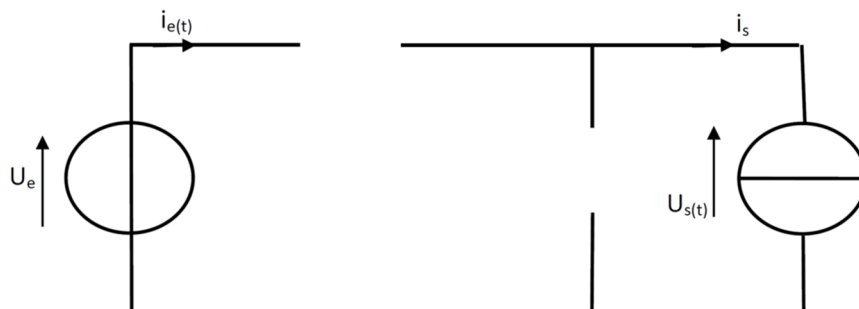


2.3 Choix des interrupteurs

Après avoir complété les graphes, dessiner les segments utilisés pour les interrupteurs K_1 et K_2 .

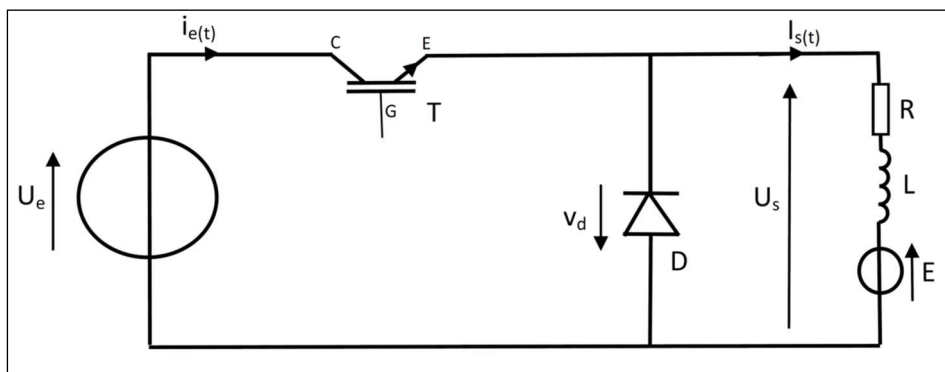


Choisir les composants qui constituent K_1 et K_2 et dessiner la structure complète d'un hacheur série.



2.4 Association Hacheur série et machine à courant continu

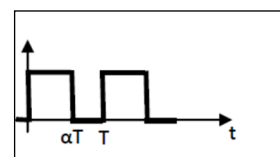
Un exemple très classique d'utilisation du hacheur série est l'entraînement à vitesse variable de la machine à courant continu.



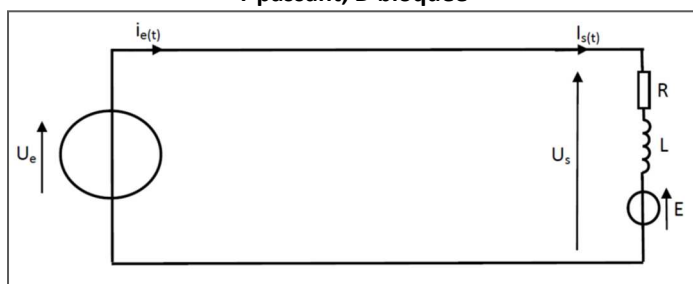
2.4.1 Calcul de $U_{s\text{moyen}} = \langle U_s \rangle$

La commande de l'interrupteur T est assurée par le réglage du paramètre α :

Le séquençage des interrupteurs modifie la topologie du circuit. Il est nécessaire de tracer un schéma pour chacune des phases de ce séquençage :

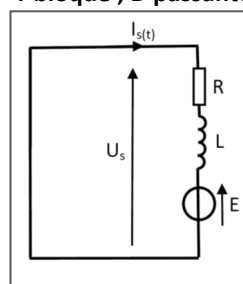


T passant, D bloquée



$$U_s = U_e$$

T bloqué ; D passante



$$U_s = 0$$

U_s prend la valeur U_e entre les instants 0 et αT de manière périodique,

$$\text{Alors } U_{s\text{moyen}} = \frac{1}{T} \cdot U_e \cdot (\alpha T - 0) = \alpha U_e$$

$$U_{s\text{moyen}} = \alpha U_e$$

2.4.2 Calcul de $i_{s(t)}$

L'équation électrique est obtenue par la loi des mailles : $U_{s(t)} - R \cdot i_{s(t)} - L \cdot \frac{di_s}{dt} - E = 0$

Hypothèses de calcul :

- La fem E de la machine est proportionnelle à sa vitesse et à son excitation selon la relation : $E = k \cdot \Omega$ (à flux constant). A l'échelle d'une période de fonctionnement du hacheur, on suppose E constant ; en effet la constante de temps mécanique est souvent très supérieure à la constante de temps électrique $\tau_{em} \gg \tau_e$. On admet alors que la vitesse Ω donc E ne peuvent pas changer durant une période de commutation de l'interrupteur.
- On néglige $R \cdot i_{s(t)}$ devant le terme E .
- On considère le régime de courant continu, ce qui signifie que le courant dans la charge n'est jamais nul au cours d'une période. (vrai si la constante de temps électrique est petite devant la constante de temps mécanique) $\tau_e \ll \tau_{em}$.

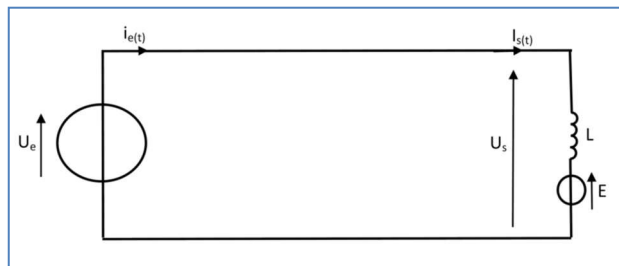
$$\text{Alors } U_{s(t)} - L \cdot \frac{di_s}{dt} - E = 0 \text{ soit } di_s = \frac{U_{s(t)} - E}{L} \cdot dt$$

il faut donc distinguer deux cas :

$$\boxed{0 < t < \alpha T} \quad \mathbf{T \text{ passant, D bloqué}} \quad U_{s(t)} = U_e$$

$$\text{alors } di_s = \frac{U_e - E}{L} \cdot dt$$

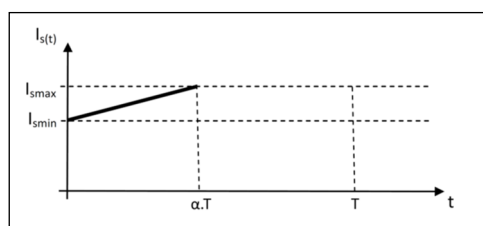
$$\text{soit } i_{s(t)} = \left(\frac{U_e - E}{L} \right) \cdot t + cst$$



Le régime de conduction est considéré comme continu, alors $i_{s(t)}$ évolue entre deux valeurs que l'on notera $I_{s \min}$ et $I_{s \max}$ soit la condition initiale $\boxed{i_{s(0)} = I_{s \min}}$

$$\text{Alors } i_{s(0)} = \left(\frac{U_e - E}{L} \right) \cdot 0 + cst = I_{s \min} \text{ soit } i_{s(0)} = cst = I_{s \min}$$

$$\boxed{i_{s(t)} = \left(\frac{U_e - E}{L} \right) \cdot t + I_{s \min}} \\ 0 < t < \alpha T$$



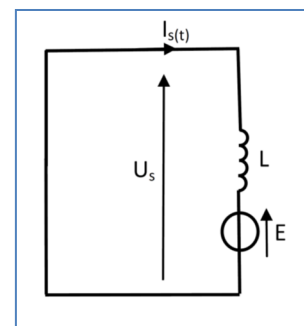
$$\boxed{\alpha T < t < T} \quad \mathbf{T \text{ bloqué ; D passante}} \quad U_{s(t)} = 0$$

$$\text{alors } di_s = -\frac{E}{L} \cdot dt \quad \text{soit} \quad i_{s(t)} = \left(-\frac{E}{L} \right) \cdot t + cst$$

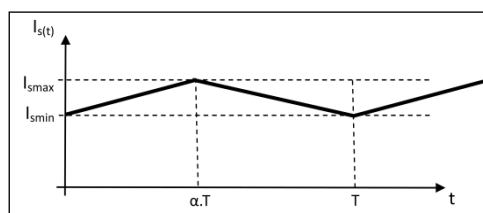
$$\text{Condition initiale } \boxed{i_{s(\alpha T)} = I_{s \max}}$$

$$\text{Alors } i_{s(\alpha T)} = \left(-\frac{E}{L} \right) \cdot \alpha T + cst = I_{s \max} \quad \text{soit} \quad cst = I_{s \max} + \left(\frac{E}{L} \right) \cdot \alpha T$$

$$\text{et } i_{s(t)} = \left(-\frac{E}{L} \right) \cdot t + I_{s \max} + \left(\frac{E}{L} \right) \cdot \alpha T$$



$$\boxed{i_{s(t)} = \left(-\frac{E}{L} \right) \cdot (t - \alpha T) + I_{s \max}} \\ \alpha T < t < T$$



2.5 Calcul de l'ondulation de courant Δi_s

La conséquence d'une association machine à courant continu – hacheur est l'ondulation de courant définie par

$$\Delta i_s = I_{s \max} - I_{s \min} \cdot \text{En effet, comme le couple électromagnétique de la machine est } C_{em} = k \cdot i_{s(t)} \text{ (à flux constant), la}$$

variation de $i_{s(t)}$ entraîne des variations rapides de couple qui provoquent :

- un couple pulsatoire sur la machine,
- des phénomènes de résonance vibratoire sur une structure mécanique,
- un risque de passage en régime discontinu avec contrôle difficile de la machine,
- le surdimensionnement des interrupteurs pour $I_s = I_{s \max}$,
- des pertes supplémentaires dues aux harmoniques de l'ondulation de courant.

On s'attachera donc à connaître et maîtriser la valeur de Δi_s .

Calcul de Δi_s

En reprenant l'équation $i_{s(t)} = \left(\frac{U_e - E}{L}\right)t + I_{s\min}$ pour $0 < t < \alpha T$

$$i_{s(\alpha T)} = I_{s\max} = \left(\frac{U_e - E}{L}\right).\alpha T + I_{s\min} \text{ alors } \Delta i_s = I_{s\max} - I_{s\min} = \left(\frac{U_e - E}{L}\right).\alpha T$$

D'autre part, il est possible d'exprimer E en fonction de U_e :

En reprenant la loi des mailles $U_{s(t)} - L.\frac{di_s}{dt} - E = 0$ et en l'exprimant en valeur moyenne :

$$\left\langle U_{s(t)} - L.\frac{di_s}{dt} - E \right\rangle = 0 = \langle U_{s(t)} \rangle - \langle L.\frac{di_s}{dt} \rangle - \langle E \rangle$$

Le terme $\langle L.\frac{di_s}{dt} \rangle$ est toujours nul dans un régime périodique de courant.

$$\text{démonstration : } \langle L.\frac{di_s}{dt} \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T L.\frac{di_s}{dt}.dt = \frac{1}{T} \int_0^T L.di_s = \frac{L}{T} [i_{s(T)} - i_{s(0)}] = \frac{L}{T} [I_{s\min} - I_{s\min}] = 0$$

$$\text{alors } 0 = \langle U_{s(t)} \rangle - \langle E \rangle = \langle U_{s(t)} \rangle - E \text{ soit } \langle U_{s(t)} \rangle = E$$

d'autre part on a calculé $\langle U_s \rangle = \alpha.U_e$ alors

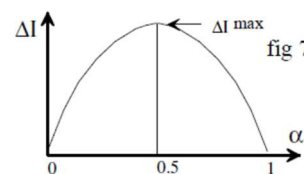
$$E = \alpha.U_e$$

$$\begin{aligned} & \text{avec } T = \frac{1}{f} \\ \Delta i_s = I_{s\max} - I_{s\min} &= \left(\frac{U_e - E}{L}\right).\alpha T = \left(\frac{U_e - \alpha.U_e}{L}\right).\alpha T = U_e \left(\frac{1 - \alpha}{L}\right).\alpha T = \frac{\alpha.(1 - \alpha)}{L.f}.U_e \end{aligned}$$

On retiendra que l'ondulation de courant est influencée par la fréquence du hacheur et la valeur de l'inductance de l'induit de la machine. Si cela est nécessaire dans une application, pour respecter le cahier des charges, on ajoutera une inductance de lissage pour minimiser l'ondulation de courant due au hacheur dans la machine.

le maximum de l'ondulation est atteint pour $\frac{d\Delta i_s}{d\alpha} = 0$,

$$\frac{d\Delta i_s}{d\alpha} = \frac{d}{d\alpha} \frac{\alpha.(1 - \alpha)}{L.f}.U_e = \frac{U_e}{L.f} \cdot \frac{d(\alpha.(1 - \alpha))}{d\alpha} = \frac{U_e}{L.f} \cdot \frac{d(\alpha - \alpha^2)}{d\alpha} = \frac{U_e}{L.f} \cdot (1 - 2\alpha)$$



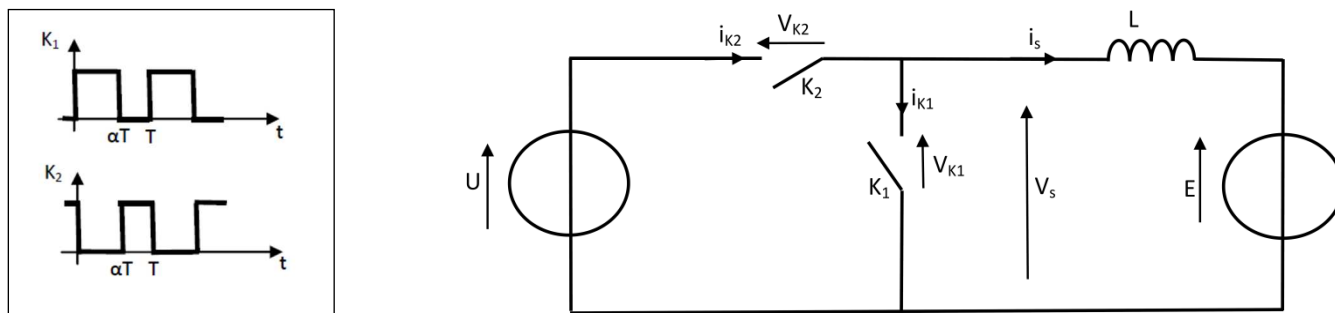
$$\frac{d\Delta i_s}{d\alpha} = \frac{U_e}{L.f} \cdot (1 - 2\alpha) = 0 \quad \text{L'ondulation } \Delta i_s \text{ est maximum pour } \alpha = \frac{1}{2} \text{ et } \Delta i_{s\max} = \frac{U_e}{4.L.f}$$

3 HACHEUR ELEVATEUR OU PARALLELE

Il s'agit d'une structure permettant le **transfert direct d'énergie entre une source de courant et une source de tension**.

L'application concrète correspond au fonctionnement en récupération d'une machine à courant continu (fonctionnement générateur $i_s < 0$).

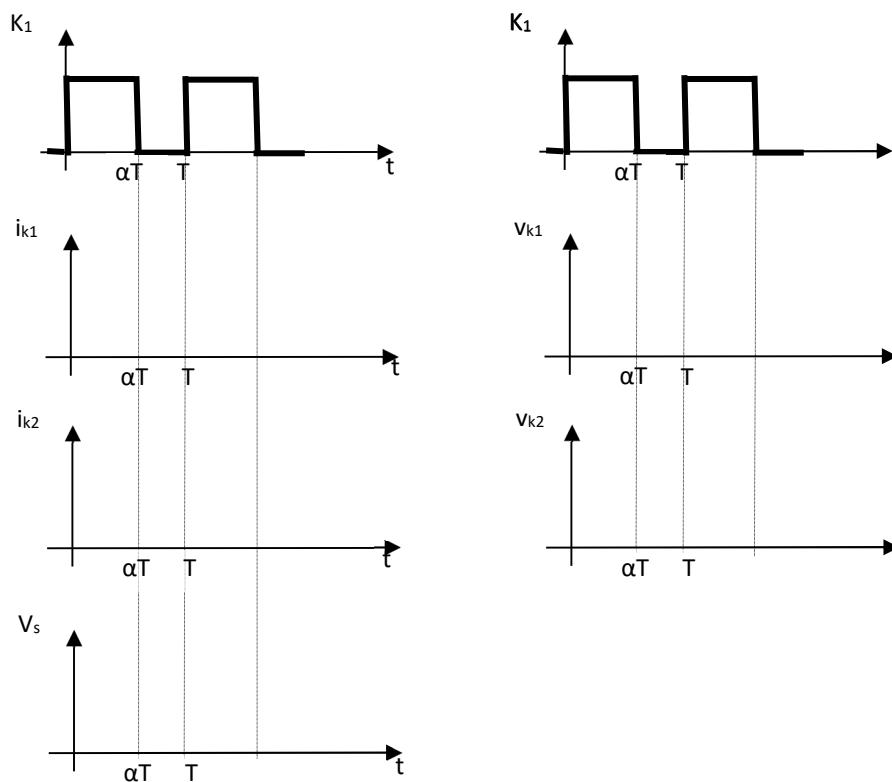
La structure de base est donnée ci-dessous (on néglige la résistance de l'induit, et $U > E$).



On notera que l'ensemble (source de tension E + inductance L) constitue une charge à comportement source de courant i_s .

3.1 Allure des signaux

Tracer les allures :



3.2 Relations

Calculer la valeur moyenne de la tension $V_s = f(U, \alpha)$

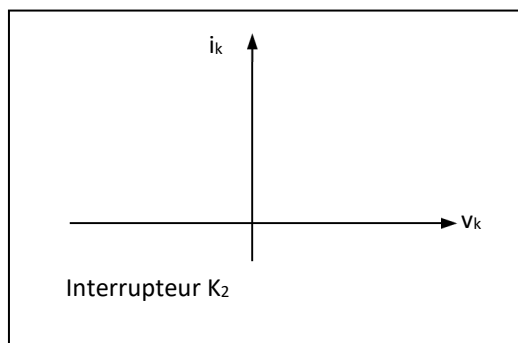
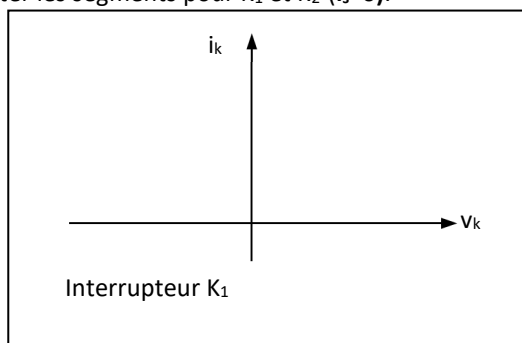
Etablir la relation entre $\langle V_s \rangle$ et E

En déduire la relation entre U et E

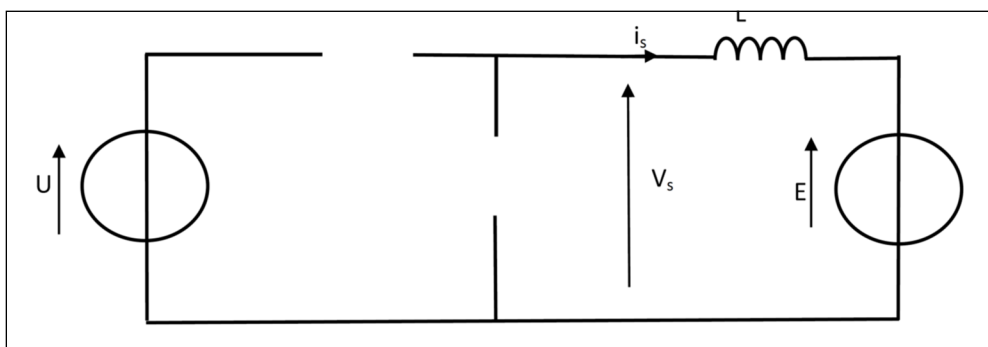
On obtient donc un rapport de $\frac{1}{1-\alpha}$..

3.3 Choix des interrupteurs

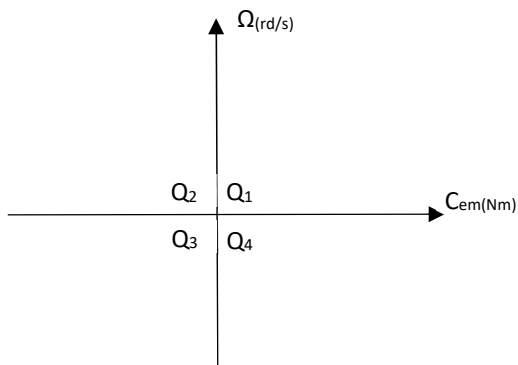
Compléter les segments pour K_1 et K_2 ($i_s < 0$).



Choisir les composants qui constituent les interrupteurs K_1 et K_2 et dessiner la structure complète d'un hacheur parallèle.

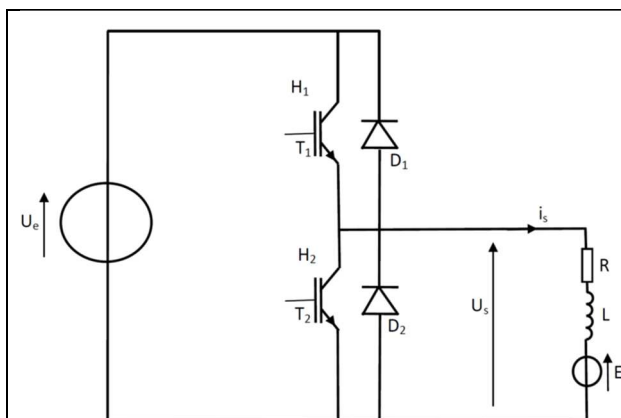


Applications : hachez le quadrant utilisable avec cette structure.

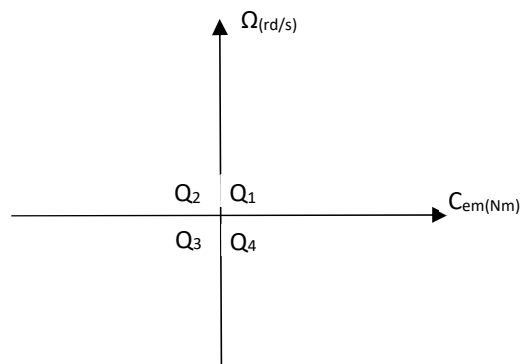


4 HACHEUR 2 QUADRANTS

L'association d'un hacheur série et d'un hacheur parallèle conduit à une **structure d'alimentation réversible en courant** qui permet la commande de la machine à courant continu dans les applications deux quadrants. L'ensemble porte le nom de bras de pont et existe sous forme intégrée.



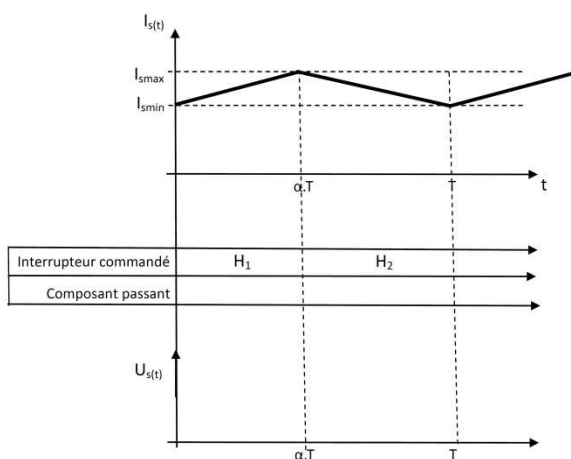
Applications : hachez les quadrants utilisables avec cette structure en précisant pour chaque quadrant le fonctionnement moteur ou générateur.



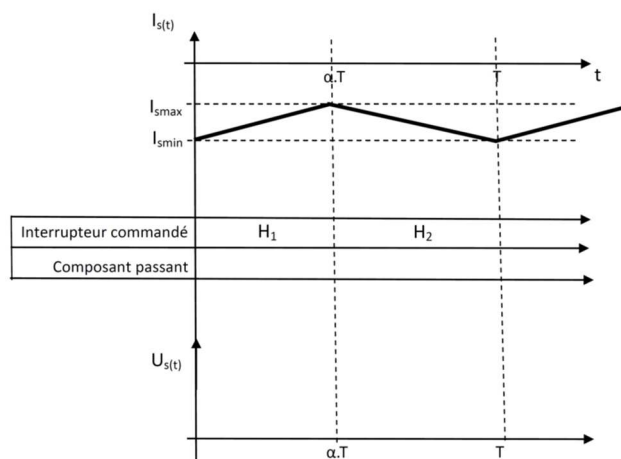
4.1 Analyse de la commutation

Le relevé des allures de $i_s(t)$ en comportement moteur et générateur est reporté ci-dessous. Compléter les allures de $U_s(t)$ et déterminer les composants qui conduisent.

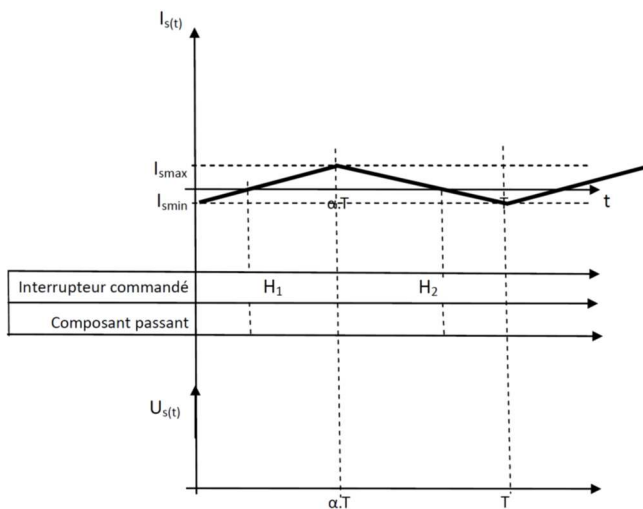
Fonctionnement en moteur $i_s > 0$



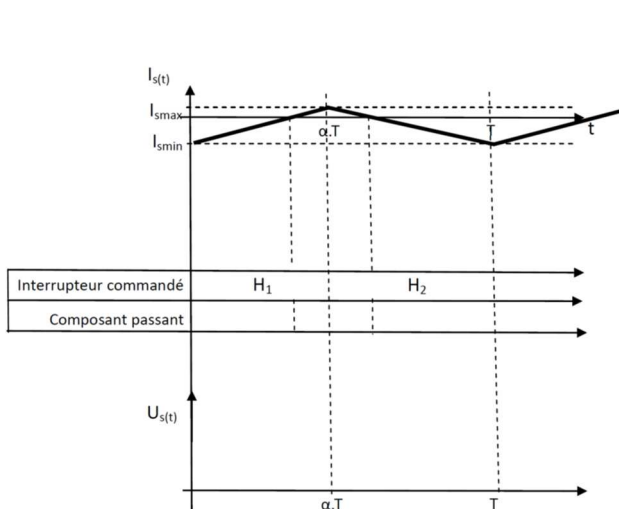
Fonctionnement en récupération $i_s < 0$



Fonctionnement en moteur $\langle i_s \rangle > 0$

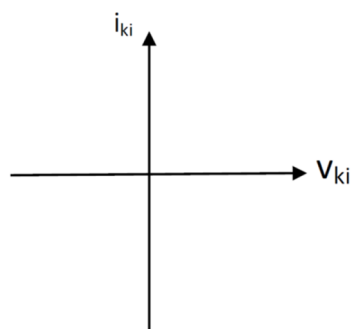
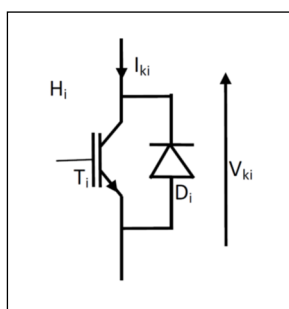


Fonctionnement en récupération $\langle i_s \rangle < 0$



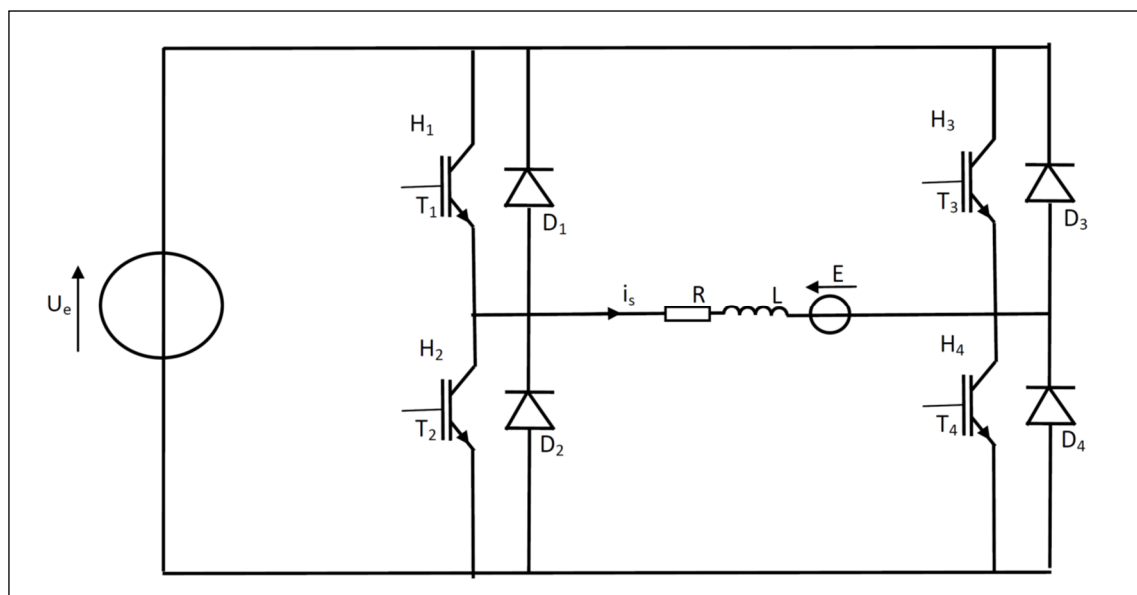
4.2 Analyse des interrupteurs

La structure est composée de deux interrupteurs identiques H_1 et H_2 , réalisés par association de deux composants : un transistor T_i et une Diode D_i . Compléter les segments pour un interrupteur H_i :

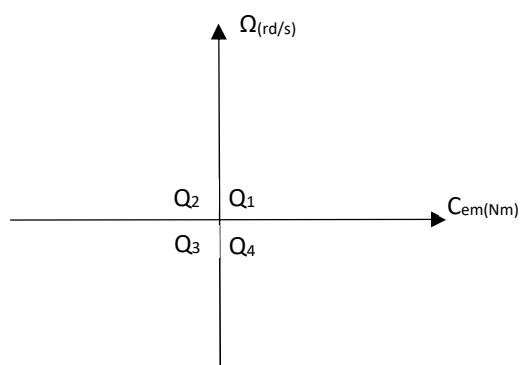


5 HACHEURS 4 QUADRANTS (PONT EN H)

L'association de deux bras de pont conduit à une structure d'alimentation réversible en courant et en tension qui permet la commande de la machine à courant continu dans les applications quatre quadrants.

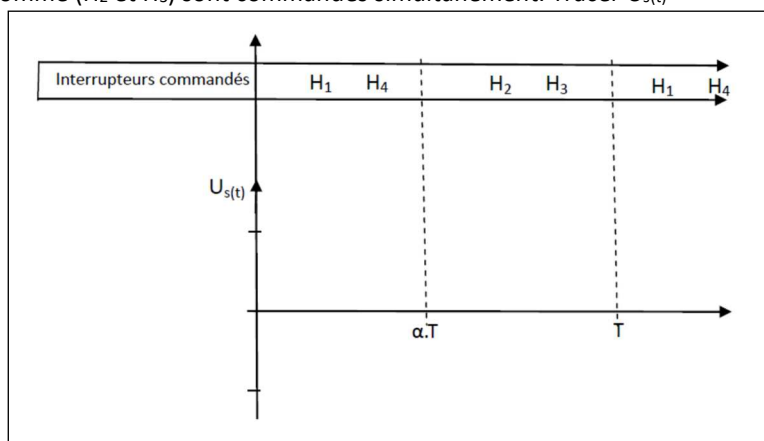


Applications : hachez les quadrants utilisables avec cette structure en précisant pour chaque quadrant le fonctionnement moteur ou générateur.



5.1 Commande unipolaire (+U_e, -U_e)

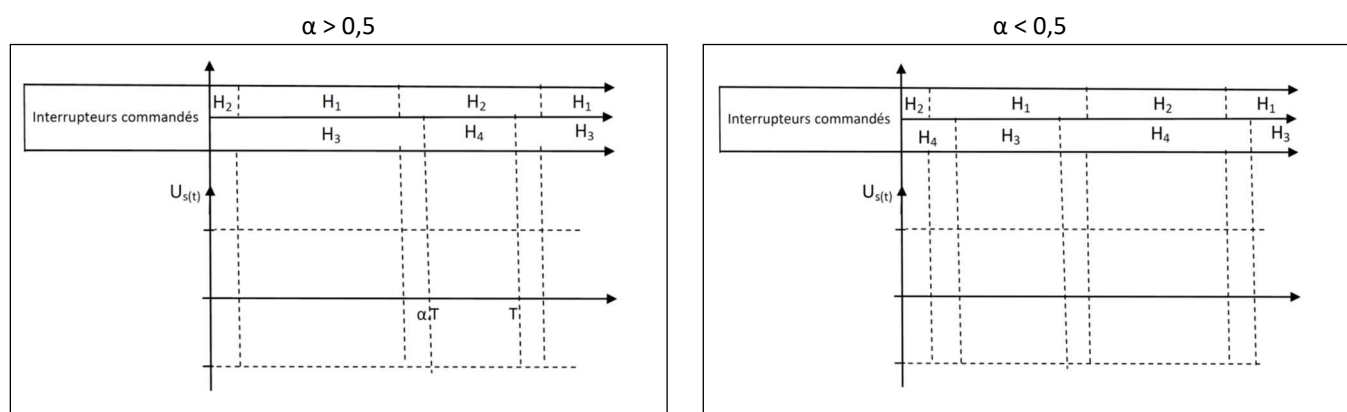
Les interrupteurs (H₁ et H₄) comme (H₂ et H₃) sont commandés simultanément. Tracer U_{s(t)}



La variation instantanée de tension en sortie est égale à 2.U_e.

5.2 Commande bipolaire (0+U_e, 0-U_e)

Pour réduire l'ondulation on modifie la commande de manière à avoir un palier intermédiaire de tension à 0, ainsi la variation instantanée de tension est réduite à U_e. Tracer U_{s(t)}



On observe les points suivants :

- La fréquence vue de la charge est double de celle des commutateurs (en sortie $T_s = T/2$).
- La variation instantanée de tension en sortie est égale à U_e.

Ce qui a pour conséquence intéressante de réduire l'ondulation de courant par quatre vis-à-vis d'une commande +U_e; -U_e de même fréquence. On peut donc au choix, réduire la valeur de L donc son encombrement et masse ou réduire la fréquence de découpage donc les pertes de commutation.

Ce type de commande est celle adoptée dans la plupart des applications pratiques.