

MODULATION D'ENERGIE : CONVERSION DC-DC

PROBLEMATIQUE :



De nombreuses applications nécessitent d'être alimentées par une tension continue qui puissent varier en fonction des besoins. Le cas la plus fréquent est la commande de vitesse des moteurs à courant continu.

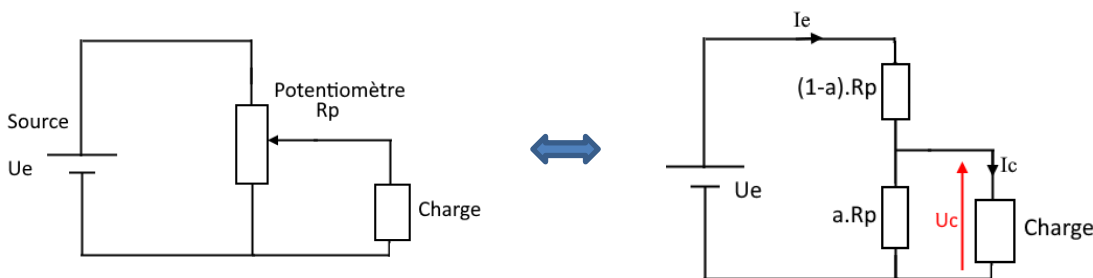
Par exemple : Pour des raisons de facilité de conception, le chariot de golf est mu par un moteur à courant continu. Pour faciliter son utilisation, le chariot doit pouvoir être commandé en vitesse par l'utilisateur. Il faut donc un montage permettant de faire varier la tension appliquée au moteur.

Dans d'autres situations, il peut s'agir au contraire de fournir une tension fixe, mais à partir d'une source de tension qui peut-elle varier (dans onduleur de panneaux photovoltaïques) ou stabiliser la tension lorsque la consommation de la charge varie et entraîne des chutes de tension inacceptable. Exemple : alimentation de PC



A) PRINCIPE DE BASE

Une première idée permettant de faire une tension continue serait d'utiliser un simple montage potentiométrique.



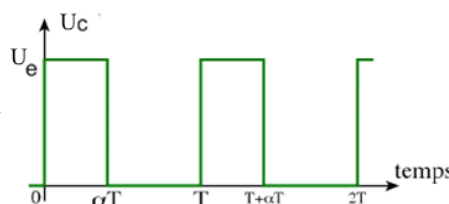
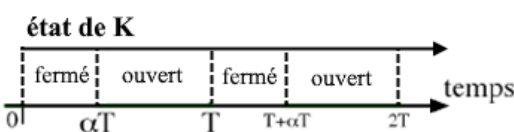
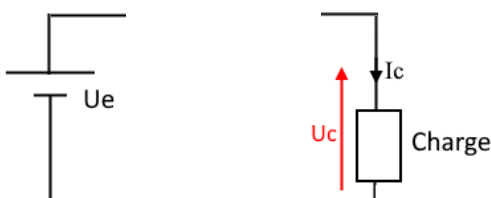
En jouant sur le rapport a via le curseur du potentiomètre, on peut effectivement régler la tension aux bornes de la charge, mais ce montage 2 obstacles majeurs qui le rendent inutilisable :

- Les courants circulant dans le potentiomètre entraînent des _____ (d'autant plus gênant que ces courants sont de même ordre que le courant utile consommé par la charge)
- La tension U_c dépend du réglage a mais aussi de _____ (un simple diviseur entre $(1-a).R_p$ et $a.R_p$ ne peut s'appliquer ici car présence _____)

La solution choisie est de procéder à un découpage de la tension : on laisse tout simplement passer, une plus ou moins grande partie du temps, l'énergie de la source vers la charge grâce à des "interrupteurs".

Afin de rendre le montage fonctionnel, 2 précautions :

- Si la charge est inductive : nécessité de prévoir une _____ pour assurer la continuité du _____
- Avoir un interrupteur qui s'ouvre et se ferme à une _____ afin que la charge "ne voit" que la _____



Valeur moyenne de la tension : $\langle U_c \rangle = \frac{1}{T} \times \int_0^T u_c(t). dt = \frac{1}{T} \times \text{aire sous la courbe} =$

Rq : Ce montage ainsi réalisé est appelé : hacheur série. Nous l'étudierons plus en détail dans un chapitre ultérieur.

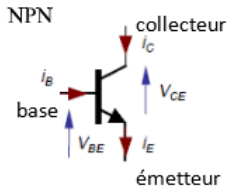
B) INTERRUPTEURS COMMANDES



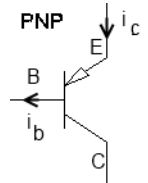
La commutation (ouverture et fermeture d'un contact) est réalisé par des composants électroniques semi-conducteurs : les transistors. Plusieurs composants peuvent être utilisés suivant la gamme de fréquence, courant et tension de l'application. Nous allons ici présenter le transistor bipolaire, le transistor MOS et le transistor IGBT.



a) Le transistor bipolaire



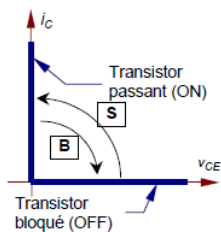
Il existe deux types de transistors bipolaires : NPN et PNP. Le transistor NPN est plus utilisé, nous n'allons étudier que ce type. (Le transistor PNP a un fonctionnement similaire, mais le sens de i_B et i_C inversé)



Le transistor est un composant totalement commandé : à la fermeture et à l'ouverture, grâce au courant de base i_B . Comportement du transistor parfait :

- Si $i_B=0$, le transistor est . Il se comporte comme un interrupteur .
- Si $i_B > i_{Bsat} = \frac{i_C}{\beta}$, (β ou h_{fe} : gain en courant, paramètre caractéristique propre à chaque bipolaire), le transistor est . Il se comporte comme un interrupteur .

La caractéristique du transistor bipolaire parfait est donné ci-dessous.



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.

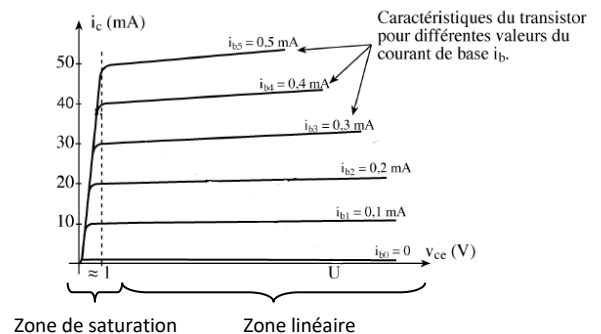
On dit que c'est un **composant deux segments**

Paramètres de choix d'un transistor bipolaire :

- La tension maximale V_{ce}
- Le courant moyen I_C
- Le courant maximal dans le collecteur à l'état passant I_{Cmax} .

Remarques (pour plus loin) :

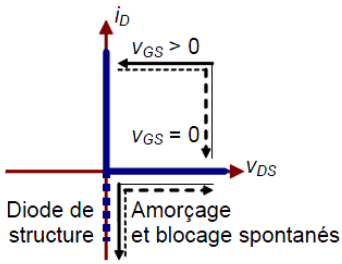
- Le bipolaire possède en fait deux modes de fonctionnement :
 - **Le mode saturé** : (lorsque $i_B > \frac{i_C}{\beta}$) Le transistor se comporte comme un interrupteur commandé en courant.
 - **Le mode linéaire (pas au programme cette année)** : (pour des courants de base faibles) Le courant à travers la charge est proportionnel au courant de base, on a la relation $i_C = \beta \cdot i_B$. Le transistor fonctionne comme un amplificateur de courant. Ce mode de fonctionnement est utilisé en électronique de petits signaux. (β varie entre 100 et 500)



- A l'état passant, un transistor bipolaire **réel** peut être assimilé à une fem $V_{ce} = V_{ce_{sat}}$. (de l'ordre de 0,5V)

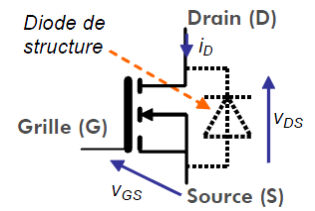
b) Le transistor MOS

Le transistor MOS est un composant commandé à l'ouverture et à la fermeture. Comme pour le transistor bipolaire, il existe deux types : canal N et canal P.



En regardant la caractéristique idéalisée du MOS, on se rend compte que le transistor MOS est un composant 3 segments. Le courant peut être négatif.

(Rq: la diode en anti-parallèle, présente par constitution, est une diode lente. Si on veut réellement utiliser un composant bidirectionnel en courant, on rajoute une diode rapide aux bornes du MOS)



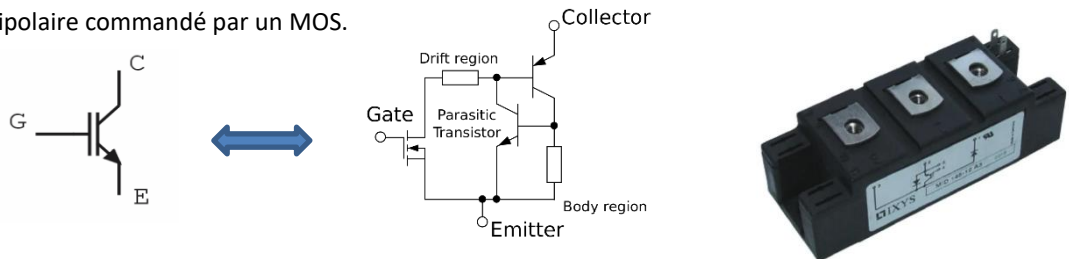
Le MOS est commandé en tension :

- Si V_{GS} est supérieure à une certaine valeur dépendant du composant uniquement (V_{GSth}), le transistor est équivalent à un interrupteur fermé (cas idéalisé). (On prendra donc plutôt le courant efficace comme critère de choix pour un transistor MOS)
- Si $V_{GS} = 0$, le transistor est à l'état bloqué, équivalent à un interrupteur ouvert.

Rq : A l'état passant, le transistor MOS "réel" peut en fait être considéré comme une résistance R_{Dson} .

c) Le transistor IGBT

Le problème du transistor bipolaire est que sa commande en courant nécessite un courant non négligeable. Pour contourner cela, on a associé un transistor bipolaire avec un transistor pour réaliser le transistor IGBT. L'IGBT peut être vu comme un transistor bipolaire commandé par un MOS.



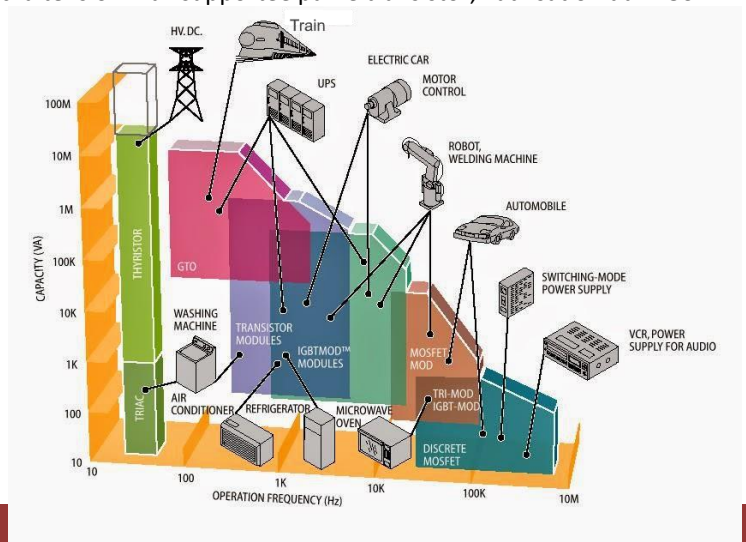
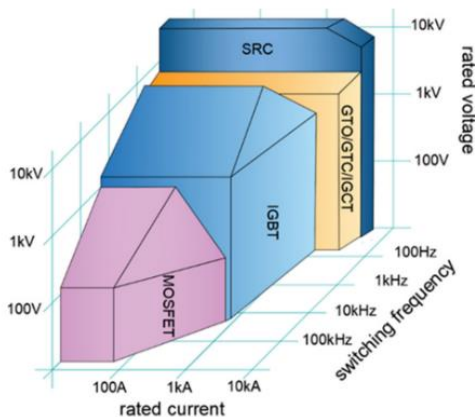
L'IGBT est devenu le transistor de référence pour les applications de fortes puissances.

d) Comparaison entre les différents composants

Le choix entre l'utilisation d'un transistor MOS, bipolaire ou autre se fera en fonction des paramètres suivants : tension, courant et fréquence de fonctionnement.

Les transistors MOS permettent une commutation plus rapide, et sont donc utilisés à des fréquences élevées.

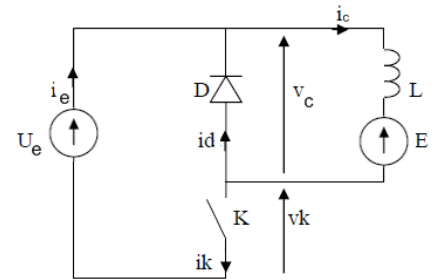
- Commandés en tension, leur commande consomme moins de puissance que pour le transistor bipolaire.
- Par contre, comme R_{Dson} augmente très fortement avec la tension max supportée par le transistor, l'utilisation du MOS est limitée aux 'faibles' tensions (500 V)



C) HACHEUR SERIE ALIMENTANT UN MOTEUR

Dans de nombreux cas, nous allons utiliser le hacheur série afin d'alimenter un moteur à courant continu. C'est notamment le cas dans beaucoup de système du laboratoire (Chariot de golf, cordeuse, volant, imprimante....) Au fil de l'étude du montage, nous allons voir les choix constructeurs et les conséquences sur les performances du chariot de golf.

Afin de simplifier l'étude, nous allons négliger la résistance du moteur. Le MCC va donc être modélisé par une fém E en série avec une inductance L. On suppose que l'on est en conduction continu (le courant dans le moteur ne s'annule jamais)



Remarques:

- L'inductance L inclue la bobine du moteur et l'éventuelle bobine de lissage destinée à réduire l'ondulation de courant dans le moteur.
- La valeur de la fém. du moteur E ne peut pas prendre n'importe quelle valeur. En effet, la loi des mailles donne : $v_c = u_L + E$. Donc en valeur moyenne, on a : $\langle v_c \rangle = \langle L \frac{di_c}{dt} \rangle + \langle E \rangle$

Or $\langle L \frac{di_c}{dt} \rangle =$ -----

soit $\langle v_c \rangle = E =$ -----

Dans le cas d'un moteur, le hacheur va imposer une tension moyenne $\langle v_c \rangle$ égale à E. Et cette force électromotrice va imposer la vitesse de rotation de l'arbre. La vitesse peut donc être directement réglée par le rapport cyclique : ----- C'est ainsi que la vitesse est réglé sur le chariot de golf (pas de régulation de vitesse, le potentiomètre permet un simple réglage de rapport cyclique)

a) Fonctionnement

De 0 à αT : K est fermé, donc D bloquée (car) d'où le schéma équivalent suivant :

$v_c =$, $i_d =$, $i_k =$, $v_d =$

$v_k =$

La loi des mailles donne : soit : $v_e - E =$

donc $i_c =$ (à $t=0$, i_c vaut sa valeur minimale I_{min})

En fin de séquence, à αT , i_c prend sa valeur maximale I_{max} .

De αT à T: K est ouvert, D est passante afin d'évacuer l'énergie emmagasinée dans l'inductance (pour cette raison, D est appelée diode de roue libre) d'où le schéma équivalent suivant :

$v_c = 0$, $i_k = i_e = 0$, $i_d = i_c$

La loi des mailles donne : $0 = U_L + E$ soit $-E = L \times \frac{di_c}{dt}$

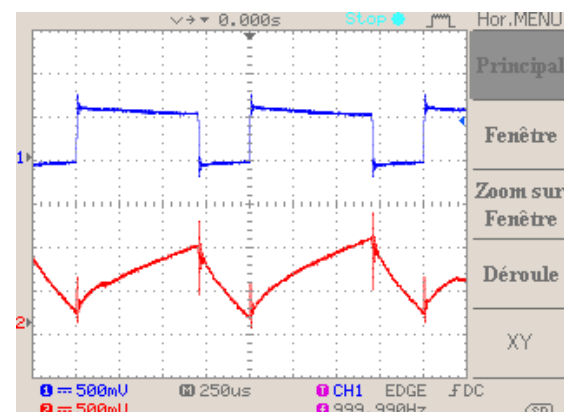
donc $i_c = -\frac{E}{L} \times t' + I_{max}$ (avec $t' = t - \alpha T$, afin de placer

l'origine des temps au début de la séquence)

Remarque :

Dans un circuit réel, les formes d'ondes pourront être différentes, car les conditions seront éloignées de ce cadre d'étude théoriques (Résistance de l'induit non négligeable si R est important ou si la fréquence de découpage est faibles, la présence de condensateur de lissage pourra entrainer des régimes transitoires pseudo périodiques....)

Par exemple, voici les formes d'ondes obtenues sur le chariot de golf pour une fréquence de découpage de 2kHz.



b) Caractéristiques du montage

A partir des équations trouvées précédemment, on obtient alors les formes d'ondes suivantes :

A partir des formes d'ondes, on peut calculer les grandeurs caractéristiques du montage :

$$\langle V_c \rangle = \frac{1}{T} \times (\alpha T \cdot V_e + 0) = \alpha \cdot V_e$$

La valeur moyenne est inchangée par rapport au cas où la charge était une source de courant.

Ondulation de courant :

$\Delta i = \dots\dots\dots$

$\dots\dots\dots$

Soit $\Delta i = \dots\dots\dots$

Cette ondulation est maximale pour α tel que $d \Delta i / d \alpha = 0$ soit pour $\alpha = \dots\dots\dots$. On a alors : $\Delta i_{\max} = \dots\dots\dots$

Conséquences constructives de l'étude sur l'ondulation de courant :

Le courant moteur n'est donc pas lissé. Cette ondulation de courant va être à l'origine d'harmoniques de couple qui vont générer des vibrations. Ces harmoniques de courant vont également se retrouver dans le circuit magnétique du moteur et provoquer des échauffements par courants de Foucault et par hystérésis. Ces échauffements et vibrations peuvent entraîner une diminution de la durée de vie du moteur. (conséquences identiques pour un éventuel transformateur en amont du hacheur)

Pour cette raison, il est important de réduire Δi à des niveaux raisonnables. Deux méthodes peuvent être utilisées:

- Augmentation $\dots\dots\dots$. La fréquence maximale de découpage dépendra du composant utilisé et du courant à transiter (≈ 100 kHz pour un MOS de puissance, 1kHz pour un IGBT)
- Ajout d'une $\dots\dots\dots$ en série avec le moteur. Le problème est que cette solution est relativement coûteuse, il peut également se poser un problème d'encombrement de la bobine.

Ainsi, dans le chariot de golf, il a été choisi une fréquence de découpage de 20kHz, ce qui avec les paramètres du moteur ($L=0,2$ mH, et $U_{bat}=13$ V) une ondulation de courant théorique maximale de :

Puissance transmise :

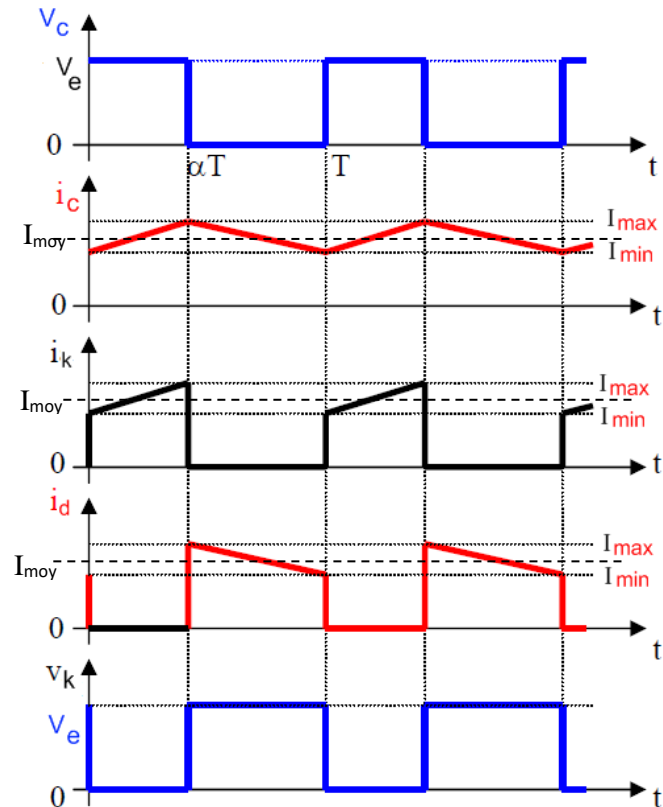
$$P_c = \langle p_c \rangle = \langle V_c \cdot i_c \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T V_c \times i_c \cdot dt = \frac{1}{T} \int_0^{\alpha T} V_e \times i_c \cdot dt = \frac{1}{T} \times V_e \times I_{moy} \times \alpha T = \alpha \cdot V_e \cdot I_{moy}$$

A cause de la diode de roue libre (unidirectionnelle en courant), le courant dans la charge ne peut être que positif. On constate donc que la puissance est toujours positive ($0 < \alpha < 1$ et $I_{moy} > 0$).

Conclusion sur le calcul de puissance

Dans un hacheur série, la puissance est toujours transmise de la source vers la charge. Le courant dans la charge ne peut être que positif. Il en est de même pour la tension V_c . Le hacheur série ne permet de ne fonctionner que dans un seul quadrant (quadrant moteur, vitesse positive) et ne peut donc être associé à un moteur fonctionnant en générateur !

Rq: Pour les hacheurs, si on considère les composants parfaits, le facteur de puissance est unitaire ($P=S$).



Conclusion pour le chariot de golf dont le moteur est alimenté par un hacheur série :



Contraintes sur les composants :

$$V_{k_{\max}} = V_{d_{\max}} = V_e$$

$$\langle I_k \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T i_k \cdot dt = \dots\dots\dots$$

$$\langle I_D \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T i_D \cdot dt = \frac{1}{T} \int_{\alpha T}^T i_c \cdot dt = \frac{1}{T} \times I_{\text{moy}} \times (1 - \alpha) T = (1 - \alpha) \cdot I_{\text{moy}}$$

$$\text{Donc } \langle I_k \rangle_{\max} = \langle I_D \rangle_{\max} = I_{\text{moy}}$$

$$P_{\text{keff}} = \frac{1}{T} \int_0^T i_k^2 \cdot dt = \frac{1}{T} \int_0^{\alpha T} i_c^2 \cdot dt = \frac{1}{T} \int_0^{\alpha T} \left(\frac{V_e - E}{L} \times t + I_{\text{min}} \right)^2 \cdot dt = \frac{1}{T} \times \left[\frac{1}{3} \times \frac{L}{V_e - E} \left(\frac{V_e - E}{L} \times t + I_{\text{min}} \right)^3 \right]_0^{\alpha T} =$$

$$\frac{L \cdot f}{3 \times (1 - \alpha) V_e} \times \left[\left(\frac{V_e - E}{L} \times \alpha T + I_{\text{min}} \right)^3 - I_{\text{min}}^3 \right] = \frac{L \cdot f}{3 \times (1 - \alpha) V_e} \times [I_{\text{max}}^3 - I_{\text{min}}^3]$$

Rq : Si on néglige l'ondulation de courant, on a : $P_{\text{keff}} = \frac{1}{T} \int_0^T i_k^2 \cdot dt = \dots\dots\dots$

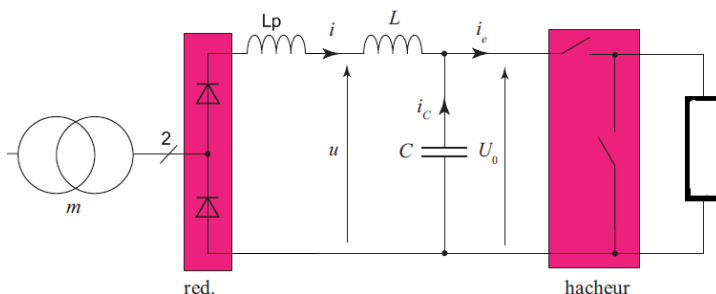
soit $I_{\text{keff}} = \dots\dots\dots$

Donc, au pire, le courant efficace dans K est I_{moy} .

Nature de la source

Vu la forme d'onde de $i_k = i_e$, la source délivrant la tension continue U_e doit pouvoir débiter un courant i_e subissant des sauts brutaux à l'ouverture et à la fermeture de K. Cette discontinuité pose donc un problème si la source de tension continue est inductive, présence d'une inductance parasite L_p . Lors de la fermeture de K, il y a un pic de courant qui va passer dans L_p et donc apparition d'un pic de tension $U_{Lp} = L \times di/dt$.

A priori ce n'est pas le cas pour une batterie d'accumulateur. En revanche, lorsqu'on utilise un pont redresseur pour obtenir une source de tension continue à partir du réseau alternatif qui est par nature inductif, il faut intercaler entre le pont et le hacheur un filtre LC rendant le courant i débité par le pont à peu près constant. Exemple :

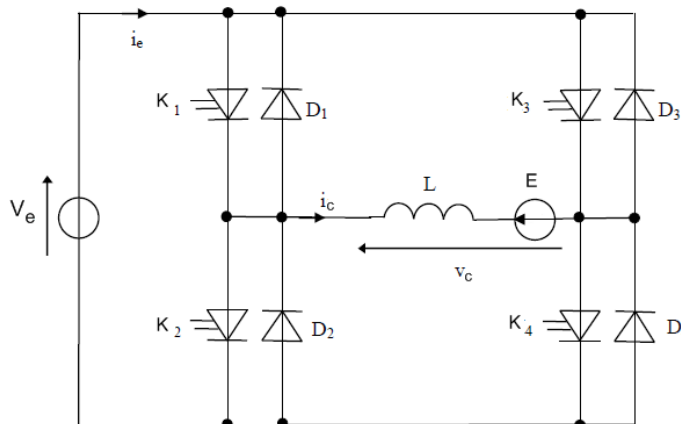


Pour un bon fonctionnement des montages électroniques, on doit respecter l'alternance source de tension (ou circuit capacitif) / source de courant (circuit inductif). Ce qui est bien le cas sur le circuit ci-dessus.

Dans le chariot de golf , la source est une batterie (comportement source de tension), en sortie du hacheur, on a un moteur (comportement source de courant , car circuit inductif). L'alimentation directe par le hacheur série ne pose donc pas de problème.

B) HACHEUR EN PONT

Le hacheur en pont est utilisé lorsque l'on veut travailler dans les quatre quadrants. Pour cela, on va utiliser des interrupteurs bidirectionnels en courant (MOS ou bipolaire avec diode en anti parallèle). Le montage du hacheur en pont est le suivant :



Nous allons étudier le fonctionnement du hacheur en pont sur une charge E+L.

Les interrupteurs K_1 et K_2 doivent être commandés en opposition (de même pour K_3 et K_4).

K_1 et K_4 sont commandés simultanément (de même pour K_2 et K_3). K_1 et K_4 sont commandés de 0 à αT . (commande bipolaire, imposé une tension négative de αT à T)

Rq : Une autre stratégie de commande est possible pour ce type de hacheur. Si on désire une tension >0 , on commande en permanence K_4 , puis on découpe la tension à l'aide de K_1 . On retrouve ainsi le fonctionnement du hacheur série. Si on veut $V_c < 0$, on ferme K_2 en permanence et on commute K_3 . L'avantage de ce mode de commande est de réduire le nombre de commutations des transistors. (commande unipolaire)

1. Fonctionnement

Le fonctionnement du montage va en partie dépendre du signe du courant de charge.

$i_c > 0$

- $0 < t < \alpha T$, on commande la fermeture de K_1 et K_4 et on bloque K_2 et K_3 .

Le courant i_c étant positif, le courant passe par ... et ...
... On a alors $V_c = \dots$

L'évolution du courant i_c est régie par l'équation :

$$V_e = L \frac{di_c}{dt} + E \text{ soit } \frac{di_c}{dt} = \frac{V_e - E}{L}$$

$$\text{Donc : } i_c = \frac{V_e - E}{L} \times t + I_{min}$$

- $\alpha T < t < T$, on commande K_2 et K_3 et on bloque K_1 et K_4 .

Le courant i_c étant positif, le courant passe par ... et ...
... On a alors $V_c = \dots$

L'évolution du courant i_c est régie par l'équation :

$$-V_e = L \frac{di_c}{dt} + E \text{ soit } \frac{di_c}{dt} = -\frac{V_e + E}{L}$$

$i_c < 0$

$0 < t < \alpha T$, on commande la fermeture de K_1 et K_4 . (K_2 et K_3 bloqués)

Le courant i_c étant négatif, le courant ne passe pas par K_1 et K_4 mais par D_1 et D_4 . On a alors $V_c = V_e$.

L'évolution du courant i_c est régie par l'équation :

$$V_e = L \frac{di_c}{dt} + E \text{ soit } \frac{di_c}{dt} = \frac{V_e - E}{L}$$

$$\text{Donc : } i_c = \frac{V_e - E}{L} \times t + I_{min}$$

- $\alpha T < t < T$, on commande K_2 et K_3 . (K_1 et K_4 bloqués)

Le courant i_c étant négatif, le courant passe par K_2 et K_3 .
On a alors $V_c = -V_e$.

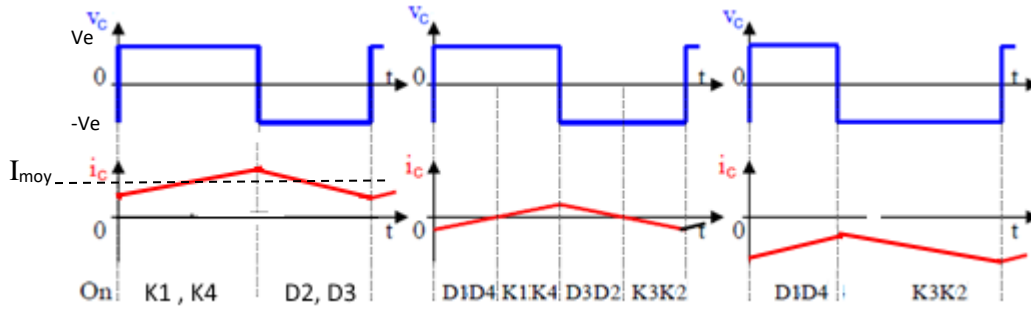
L'évolution du courant i_c est régie par l'équation :

$$-V_e = L \frac{di_c}{dt} + E \text{ soit } \frac{di_c}{dt} = -\frac{V_e + E}{L}$$

Donc :

$$i_c = -\frac{V_e + E}{L} \times t' + I_{max} \text{ avec } t' = t - \alpha T$$

On obtient les formes d'ondes suivantes (suivant le signe de I_{moy}) pour le cas $\alpha=0,5$.



2. Caractéristiques

a) Tension moyenne :

La tension moyenne en sortie du pont vaut : $\langle V_c \rangle = \dots\dots\dots$

On constate qu'avec ce montage, on peut appliquer une tension aussi bien positive que négative.

- Pour $\alpha < 0,5$: la tension moyenne est négative.
- Pour $\alpha > 0,5$: la tension moyenne est positive.

b) Ondulation de courant :

On a la relation, $V_c = U_L + E$. En valeur moyenne, (comme pour le hacheur série), on aboutit à :

$$E = \langle V_c \rangle = (2\alpha - 1) \cdot V_e$$

L'ondulation de courant est donnée par la formule :

$$\Delta i = \frac{V_e - E}{L} \alpha T = -\frac{V_e - (2\alpha - 1)V_e}{L} \alpha T = \frac{2\alpha(1 - \alpha)V_e}{L \cdot f} \dots\dots\dots$$

$$= \dots\dots\dots$$

Le maximum est obtenu pour $\alpha = 0,5$. On a alors : $\Delta i_{max} = \frac{V_e}{2L \cdot f}$

Rq : Par rapport au hacheur série, on se rend compte que l'ondulation de courant est doublée.

c) Puissance transmise à la charge :

$$P_c = \langle p_c \rangle = \langle V_c \cdot i_c \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T V_c \times i_c \cdot dt = \frac{1}{T} \left(\int_0^{\alpha T} V_e \times i_c \cdot dt + \int_{\alpha T}^T -V_e \times i_c \cdot dt \right) = \frac{V_e}{T} \left(\int_0^{\alpha T} i_c \cdot dt - \int_{\alpha T}^T i_c \cdot dt \right) =$$

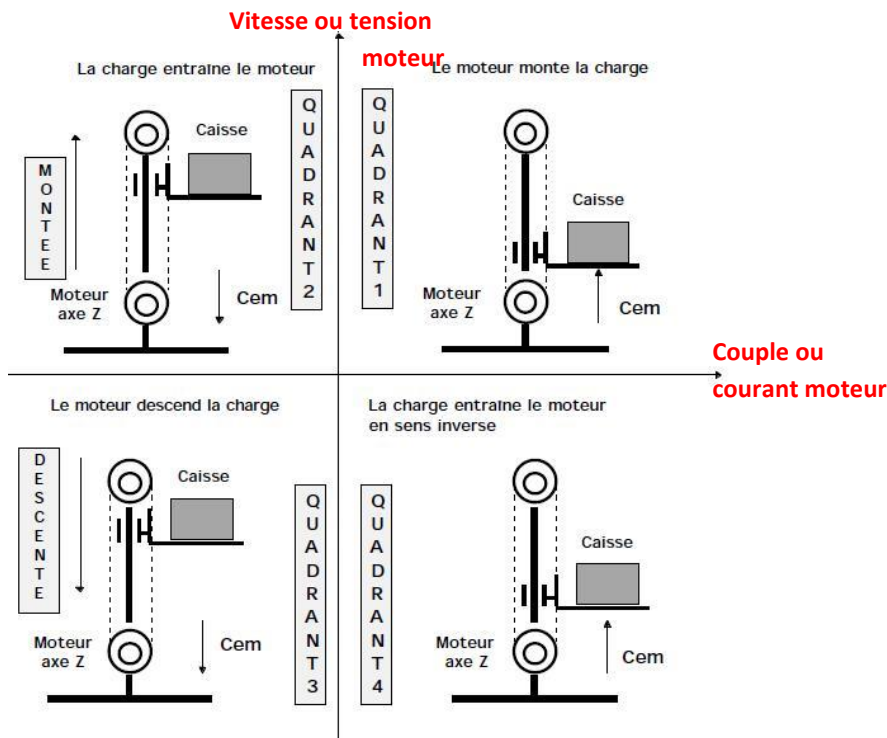
$$\frac{V_e}{T} \times (\alpha T \cdot I_{moy} - (1 - \alpha) T \cdot I_{moy}) = \frac{V_e}{T} \times (2\alpha T \cdot I_{moy} - T \cdot I_{moy})$$

On obtient donc : $P_c = (2\alpha - 1) V_e \cdot I_{moy}$

La puissance peut donc être positive ou négative. La puissance peut transiter dans les 2 sens.

La tension de sortie du hacheur peut être négative ou positive. Il en est de même pour le courant. Dans le cas d'une charge constituée d'un moteur, on peut ainsi travailler dans les quatre quadrants.

Intérêt d'un tel montage pour le chariot de golf :



d) Contraintes sur les composants:

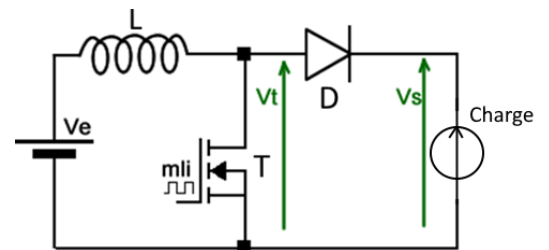
Les contraintes sont les mêmes que pour le hacheur série.

$$\langle I_k \rangle_{\max} = \langle I_d \rangle_{\max} = I_{\text{moy}}$$

$$I_{\text{keff max}} = I_{\text{moy}}$$

C) HACHEUR PARALLÈLE (PLUS DIFFICILE)

Le hacheur parallèle est un montage permettant d'obtenir des tensions en sortie qui peuvent être supérieures à la tension d'entrée. Si on considère fortement capacitive (C en // très important), on peut la représenter par une source de tension Vs. On a alors le schéma est ci-contre :



- de 0 à α.T : Le transistor est commandé. La diode est alors bloquée :

$$V_e = L \cdot \frac{di_L}{dt} ; i_L \text{ croit linéairement avec une pente } V_e/L$$

on magnétise la bobine

- de α.T à T : Le transistor est bloqué. La diode est alors passante :

$$V_e - V_s = L \cdot \frac{di_L}{dt} ; i_L \text{ décroît linéairement avec une pente } (V_e - V_s)/L$$

on démagnétise la bobine

En régime établi, on a égalité entre Δi lors de la croissance de iL et lors de la décroissance, soit :

$$\begin{aligned} \frac{V_e}{L} \times \alpha \cdot T &= -\frac{V_e - V_s}{L} \times (T - \alpha \cdot T) \\ \Leftrightarrow V_e \times \alpha &= (V_s - V_e) \times (1 - \alpha) \\ \Leftrightarrow V_e \times \alpha &= V_s - \alpha \cdot V_s - V_e + \alpha \cdot V_e \\ \Leftrightarrow V_e &= V_s \cdot (1 - \alpha) \\ \Leftrightarrow V_s &= \frac{V_e}{1 - \alpha} \end{aligned}$$

