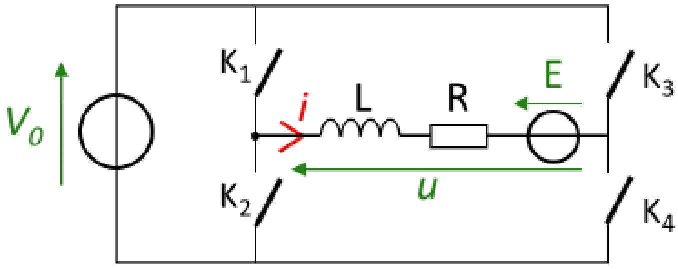
TD hacheur en H bipolaire

A/ Pont en H à commande bipolaire [Difficulté 2/3]

L'électronique de commande, que nous introduisons ici avec les hacheurs, sert régulièrement pour contrôler des moteurs. Intéressons-nous ici à l'entraînement moteur d'une voiture radio-commandée (RC). Nous assimilerons le moteur (machine synchrone pilotée par un variateur en boucle ouverte en réalité) à une MCC, ce qui est assez réaliste au niveau modèle équivalent.



Les équations de couplage de la MCC s'écrivent :

- $C_m = k\,\langle i(t)\rangle$, avec C_m le couple moteur
- $\langle E\rangle = k\,\omega_m$, avec E la *fem* et ω_m la vitesse moteur.

Sur plat, quand le véhicule n'est pas à l'arrêt, le comportement mécanique ramené à l'arbre moteur s'écrit : $J\frac{d\omega_m}{dt} = C_m - \mathrm{sgn}(\omega_m)C_0$

- C_0 représente le couple de frottement, toujours opposé au mouvement. C'est pourquoi :
  - si $\omega_m > 0$, $\mathrm{sgn}(\omega_m) = +1$, et on a alors $C_m - C_0 = J\frac{d\omega_m}{dt}$
  - si $\omega_m < 0$, $\mathrm{sgn}(\omega_m) = -1$, auquel cas $C_m + C_0 = J\frac{d\omega_m}{dt}$
  - si $|C_m| < C_0$ le moteur ne démarre pas ($\omega_m = 0$).

La séquence de conduction du hacheur est :

- Phase A : $0 \le t < \alpha T$: K_1 et K_4 passants, K_2 et K_3 bloqués
- Phase B : $\alpha T \le t < T$: K_1 et K_4 bloqués, K_2 et K_3 passants

On admet que cette alternance des commutation est très rapide devant les constantes de temps mécaniques, si bien que tout ce qui importe est l'effet moyen. De plus, on admet qu'en régime périodique, la moyenne d'une dérivée est nulle. Si bien que :

$$\langle u(t)\rangle = \langle L\frac{di}{dt} + Ri + E\rangle = L\underbrace{\langle \cancel{\frac{di}{dt}}\rangle}_{=0} + R\langle i(t)\rangle + \langle E\rangle$$

Q1 – Tracer le chronogramme de $u(t)$, et en déduire l'expression de la tension moyenne $\langle u(t)\rangle$ en fonction de la tension de la batterie V_0 et du rapport cyclique α.

Dans la suite de cette étude, on étudie le régime permanent, établi (donc en dehors des périodes d'accélération ou de décélération du véhicule), où ω_m et C_m sont constantes. L'appui sur le joystick de la télécommande transmet un ordre de modification du rapport cyclique α. La vitesse du véhicule ω_m peut être comprise entre $\omega_{\min}$ et ω_{MAX}.

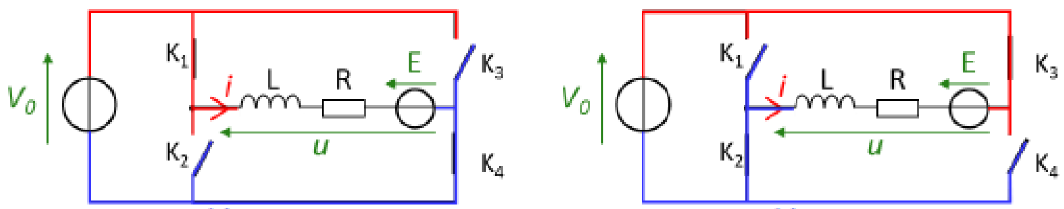
Q2 – Donner la plage de α sur laquelle le véhicule reste à l'arrêt à cause des frottements.

Q3 – Tracer la courbe de ω_m en fonction de $\alpha \in [0, 1]$, en précisant notamment les expressions de $\omega_{\min}$ et ω_{MAX}.

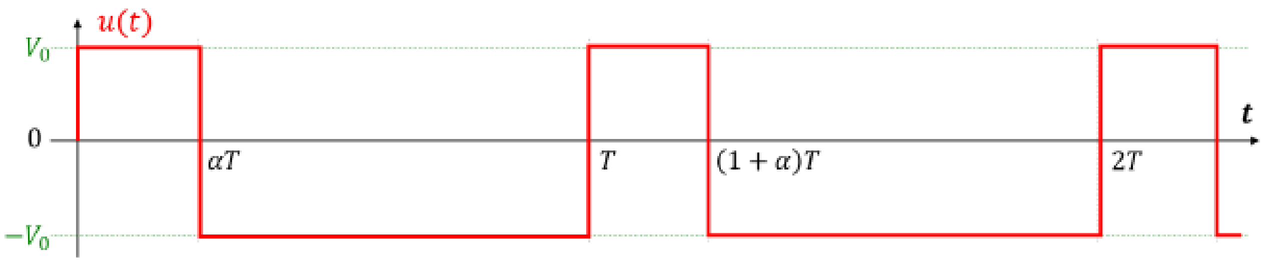
TD hacheur en H bipolaire

Q1 – On peut, pour s'aider, tracer le circuit équivalent dans les phases A et B :

$0 \leq t < \alpha T$ $\alpha T \leq t < T$



Rmq : phase A, $u(t) = V_+ - V_- = +V_0$ phase B, $u(t) = V_- - V_+ = -V_0$



La tension moyenne est donc $\langle u(t)\rangle = \frac{1}{T}[V_0\alpha T - V_0(T-\alpha T)] = V_0\alpha - V_0(1-\alpha) = V_0(2\alpha - 1)$

Note : Ce type de pilotage permet d'imposer une tension moyenne positive comme négative. Cela nous permet de pouvoir aller en marche avant ou arrière.
L'inconvénient principal (notamment par rapport au pilotage unipolaire) est que l'arrêt ($\langle u(t)\rangle = 0 \Leftrightarrow \alpha = 1/2$) correspond à forcer autant (50% du temps) dans une direction (marche avant) que dans l'autre (marche arrière) de sorte à obtenir une moyenne nulle. Or du courant est débité dans la résistance interne du moteur dans les deux cas, il y a donc des pertes Joule même à l'arrêt.

Q2 – La vitesse reste nulle tant que $|C_m| < C_0$, c'est-à-dire tant que $-C_0 \leq C_m \leq C_0$.
À l'arrêt, $\omega_m = 0$ donc $\langle E\rangle = 0$, donc $\langle u(t)\rangle = R\langle i(t)\rangle = R\,\frac{C_m}{k}$. D'après la Q1, on a donc $C_m = \frac{k}{R}V_0(2\alpha - 1)$.
Ainsi, on reste à l'arrêt tant que $-C_0 \leq \frac{k}{R}V_0(2\alpha-1) \leq C_0 \Leftrightarrow -\frac{RC_0}{kV_0} \leq 2\alpha - 1 \leq \frac{RC_0}{kV_0} \Leftrightarrow \alpha$ compris entre $\frac{1}{2} \pm \frac{RC_0}{2kV_0}$

Q3 – En régime permanent, hors de cette plage de vitesse nulle, $J\frac{d\omega_m}{dt} = 0 = C_m - \text{sgn}(\omega_m)C_0 \Rightarrow C_m = \text{sgn}(\omega_m)C_0$
Ainsi, $\langle u(t)\rangle = V_0(2\alpha-1) = R\langle i(t)\rangle + \langle E\rangle = \frac{RC_0}{k}\text{sgn}(\omega_m) + k\omega_m$, d'où $\omega_m = -\frac{RC_0}{k^2}\text{sgn}(\omega_m) + \frac{V_0}{k}(2\alpha - 1)$
Il s'agit d'un segment de droite (tant que ω_m ne change pas de signe). Entre autres, $\omega_{\text{MAX}} = \omega_m(\alpha = 1) = -\frac{RC_0}{k^2} + \frac{V_0}{k}$
Et $\omega_{\min} = \omega_m(\alpha = 0) = +\frac{RC_0}{k^2} - \frac{V_0}{k} = -\omega_{\text{MAX}}$. D'où la courbe :