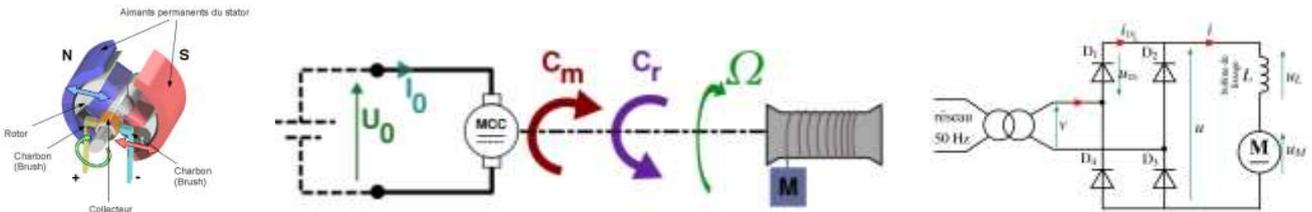


Cycle 5: Etude et modélisation des chaînes de conversion électromécanique

Chapitre 1 : Rappels sur le moteur à courant continu et le hacheur



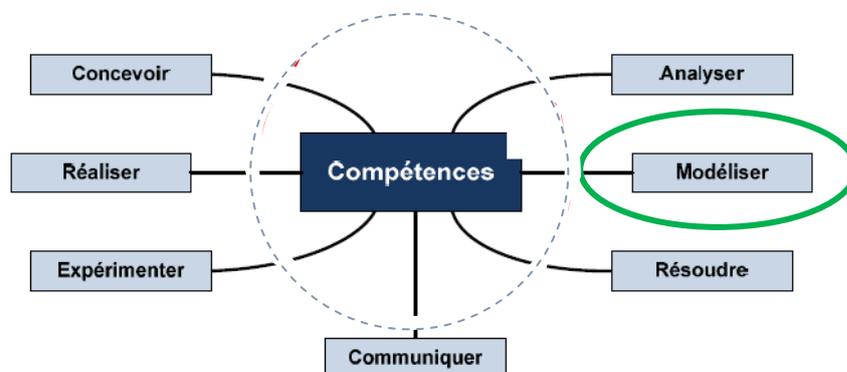
Problématique

Au sein d'un système complexe pluri-technologique, l'ingénieur doit être capable de caractériser l'association convertisseur statique et machine en vue de sa modélisation puis sa conception. Quels sont les modèles des machines CC, synchrone et asynchrone ? Comment piloter ces machines en couple et en vitesse ?

Savoir

B. Modéliser

- Caractériser le comportement de l'association convertisseur-machine et charge
- Caractériser la réversibilité de la chaîne d'énergie
- Identifier les quadrants de fonctionnement d'une chaîne d'énergie
- Définir les modèles de connaissance et comportement des machines à CC, asynchrone et synchrone

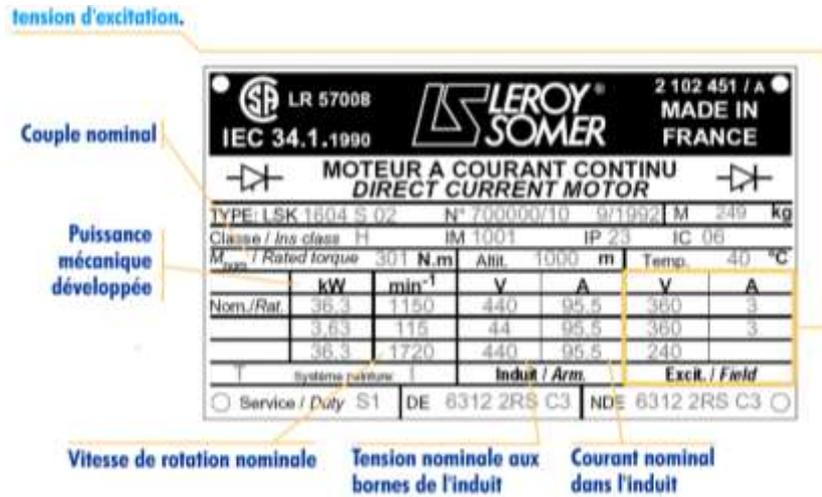




Etude de la chaîne de conversion électromécanique: moteur à courant continu

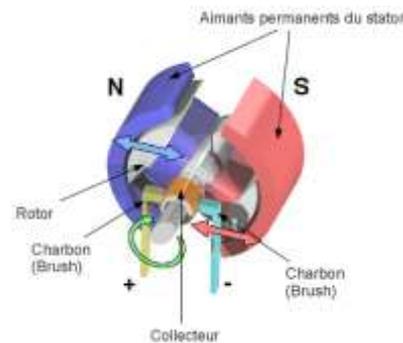
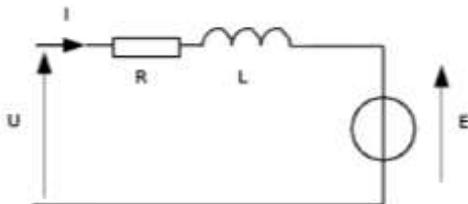
1. Caractéristique d'un moteur à courant continu

- * **Puissance mécanique développée**
- * **Courant nominal** (régime stabilisé)
- * **Tension nominale** bornes induit
- * **Couple nominal** ($C_n = C_u$)
- * **Vitesse de rotation nominale**



2. Les équations électriques et mécaniques : modélisation en régime dynamique

Dans le cas du régime dynamique, le moteur est équivalent à une résistance **R** (environ = 1Ω), créée par les spires bobinées de l'induit, à une fêm **E**, et une inductance **L** issue du bobinage de l'induit montées en série.



Les équations sont:

- $U(t) = E(t) + R.I(t) + L \frac{dI(t)}{dt}$
- $E(t) = K.\Omega(t)$
- $C_m(t) = K.I(t)$
- $C_v(t) = f.\Omega(t)$
- $J \frac{d\Omega(t)}{dt} = C_m(t) - C_r(t) - f.\Omega(t)$

Modélisation du moteur courant continu (schéma bloc - domaine de Laplace)

A partir des relations précédentes et de leurs transformées de Laplace, on a:

$$\begin{aligned}
 U(p) &= E(p) + RI(p) + LpI(p) \\
 E(p) &= K.\Omega(p) \\
 C_m(p) &= KI(p) \\
 Jp.\Omega(p) &= C_m(p) - C_r(p) - f.\Omega(p)
 \end{aligned}$$

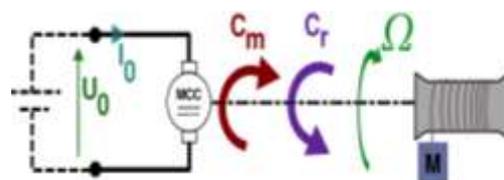
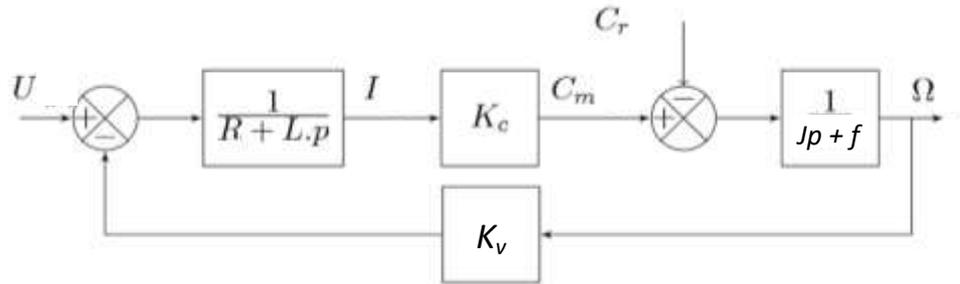


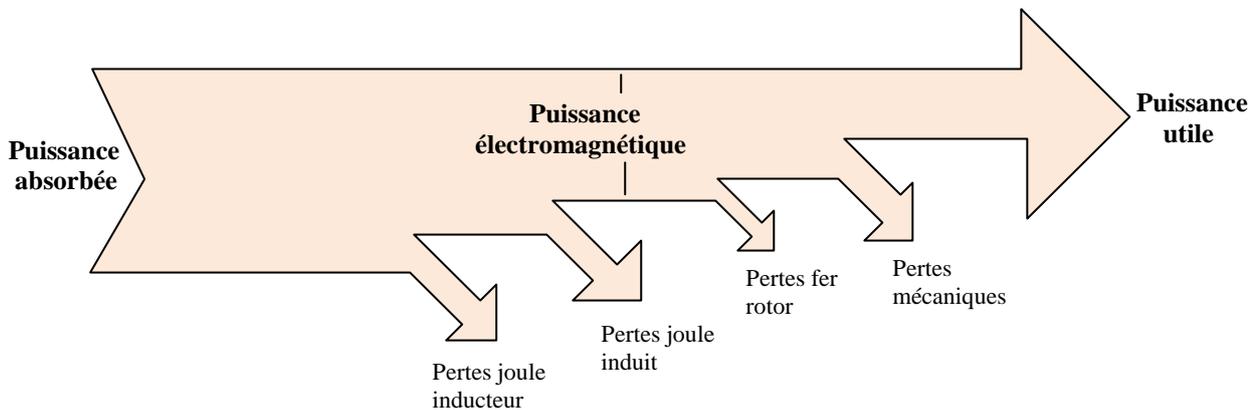


Schéma bloc du moteur CC complet:



3. Bilan des puissances et rendement

Le moteur électrique absorbe une puissance électrique (P_a) qu'il transforme en puissance utile (P_u).



- **Puissance absorbé (P_a):** somme des puissances absorbées par l'inducteur et induit

$$P_a = U.I + u_{ex}.i_{ex}$$

- **Pertes joules induit et inducteur (P_j):** puissance transformée en chaleur (courant Foucault)

$$P_j = RI^2 + r_{ex}i_{ex}^2$$

- **Pertes mécaniques et fer :** dépendent de la vitesse de rotation du moteur (indépendantes de la charge), elles sont les pertes frottements visqueux et pertes fer dû phénomènes magnétiques

- **Puissance électromagnétique (P_{em}):** puissance qui est transformée en énergie mécanique

$$P_{em} = P_a - P_j = E.I$$

- **Puissance utile (P_u):** puissance fournit de façon mécanique à la charge (indiquée sur plaque signalétique)

$$P_u = P_{em} - (\text{pertes fer} + \text{méca})$$

Le rendement :

Le rendement d'un moteur est :

$$\eta = P_u / P_a$$

Plus la puissance est élevée, meilleur est le rendement...

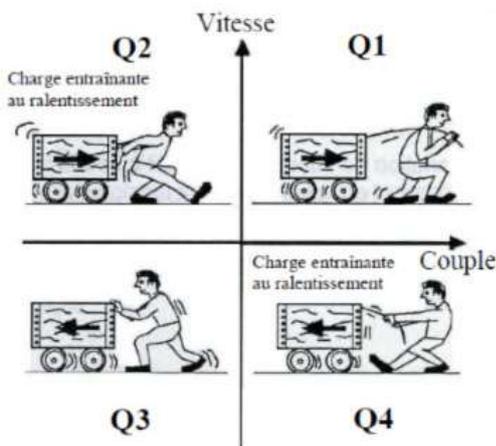


4. Fonctionnement en 4 quadrants

Les moteurs CC convertissent l'énergie électrique absorbée en énergie mécanique et sont capables de fournir une puissance mécanique suffisante pour **démarrer puis entraîner une charge en mouvement**. On dit alors qu'ils ont un **fonctionnement en moteur**.

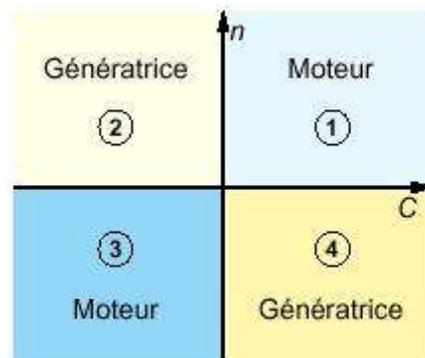
Mais ils peuvent aussi convertir l'énergie mécanique reçue en énergie électrique lorsqu'ils **subissent l'action d'une charge entraînant**. On dit alors qu'ils ont un **fonctionnement en générateur**, capable de se comporter comme un **frein**.

Fonctionnement des machines à courant continu dans les **4 quadrants** : le variateur sait gérer des accélérations et décélérations, ainsi que des freinages dans toutes les situations disponibles



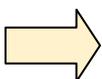
- Les **quadrants Q1 et Q3** traduisent un fonctionnement de la machine en **moteur** dans les deux sens de rotation
- Les **quadrants Q2 et Q4** traduisent un fonctionnement de la machine en **générateur** dans les deux sens de rotation.

Le nombre de quadrants de fonctionnement est exclusivement limité par le système de commande pilotant le moteur.



A condition que la chaîne cinématique le permette, pour passer des quadrants **1->4** ou **2->3** le dispositif d'alimentation devra être **réversible en courant**.

A condition que la chaîne cinématique le permette, pour passer des quadrants **1->2** ou **4->3** le dispositif d'alimentation devra être **réversible en tension**.

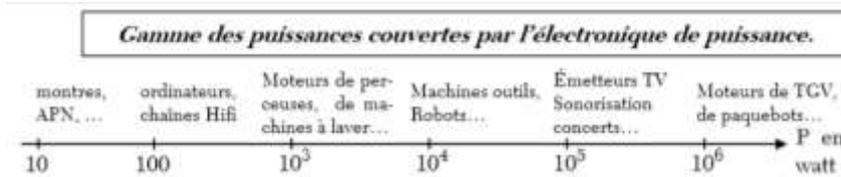


La commande dans les différents quadrants d'un MCC se fait via un **HACHEUR**.



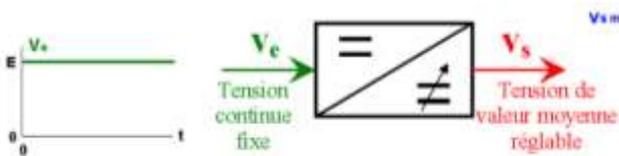
5. Conversion continu-continu : HACHEUR

Pour information:



Le hacheur permet d'alimenter une charge sous une **tension continue réglable** à **partir d'une source continue fixe**. Cette source peut être par exemple une batterie d'accumulateurs ou provenir d'une autre conversion préalable comme un redresseur à diodes (*bloc alimentation stabilisée*).

On obtient une tension de valeur moyenne variable en **établissant et interrompant périodiquement l'alimentation** de la charge par la source grâce à des **interrupteurs électroniques**.



5.1. Le hacheur SERIE (abaisseur de tension) sur charge RESISTIVE

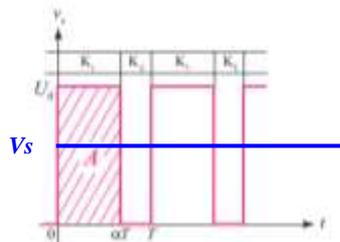
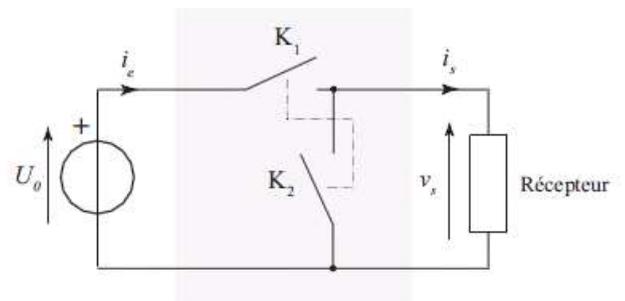
Pour faire **varier la valeur moyenne de la tension V_s** aux bornes du récepteur, on réalise l'équivalent du montage simplifié suivant.

* *Schéma:*

Les interrupteurs K₁ et K₂ sont complémentaires:

- K₁ fermé, K₂ ouvert: V_s=U₀
- K₁ ouvert, K₂ fermé: V_s=0

et sont actionnés périodiquement (période T de fonctionnement du hacheur). K₁ est fermé durant **α.T**



Nota : le rapport cyclique α est proportionnel à la tension de commande u_c de K.

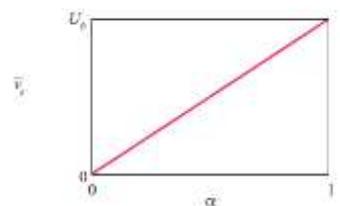
La quantité sans unité **α** constitue le **rapport cyclique** de la tension V_s (compris entre 0 et 1). La valeur moyenne de V_s est donnée par: V_s = A/T, A étant l'aire comprise entre V_s et l'axe des abscisses V_s=0. Avec A = α.T.U₀, il vient:

$$\langle V_s \rangle = 1/T * \int v_s(t) dt = 1/T [V_s t]$$

d'où:

$$\langle V_s \rangle = \alpha \cdot U_0$$

$$i_s = \alpha (\langle V_s \rangle / R)$$



Quand on fait varier α de 0 à 1, V_s varie linéairement de 0 à U₀.

<http://petitjeand.free.fr/fonctionnement%20hacheur.html>



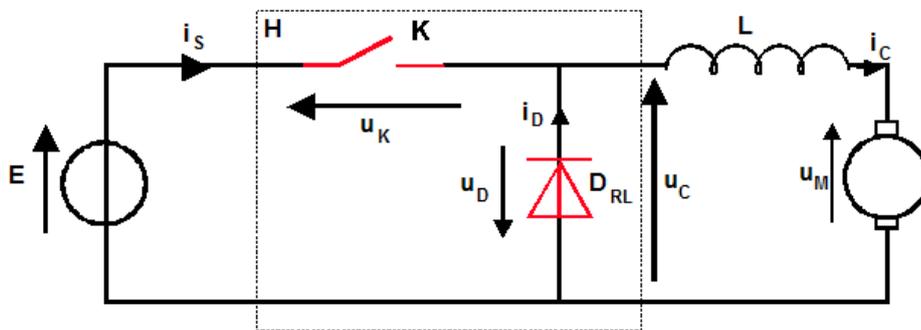
5.2. Le hacheur SERIE sur charge INDUCTIVE (ex: MCC)

Pour faire varier la vitesse de rotation d'un moteur à courant continu, il faut faire **varier la valeur de sa tension d'alimentation**. Une solution pour réaliser cela consiste à alimenter le moteur par l'intermédiaire d'un **hacheur série**, puisque le hacheur permet la variation de la valeur moyenne de la tension aux bornes de la charge.

Comme son nom l'indique, un moteur à courant continu doit être alimenté par un courant continu. En effet, le couple électromagnétique est proportionnel au courant ($T_{em} = K \cdot \Phi \cdot I$), si le courant est haché, le couple électromagnétique aussi ce qui est inacceptable car cela cause des vibrations au moteur et une usure prématurée. Pour éviter cela, il convient de « **lisser** » le **courant** dans le moteur : on rajoute en série avec le moteur une **inductance dites de « lissage »**.

On supposera par la suite, que la valeur de l'inductance est telle que le courant est parfaitement continu dans la charge : l'ondulation du courant est négligeable.

Schéma du montage :



La charge est constituée d'un moteur à courant continu et de son inductance de lissage. Afin d'assurer la continuité de conduction du courant à travers la charge, il convient d'assurer la circulation de celui-ci même quand l'interrupteur K est ouvert : c'est le rôle de la diode **D_{RL}**, appelée « **diode de roue libre** ».

Le hacheur est maintenant constitué d'un interrupteur K commandable à l'ouverture et à la fermeture, comme un **thyristor** ou transistor, son circuit de commande et de la diode de roue libre D_{RL}.

E est une source de tension continu idéale.

Le courant dans la charge est nommé i_c ; le courant délivré par la source de tension est nommé i_s ; le courant circulant dans la diode de roue libre est nommé i_D .

Fonctionnement :

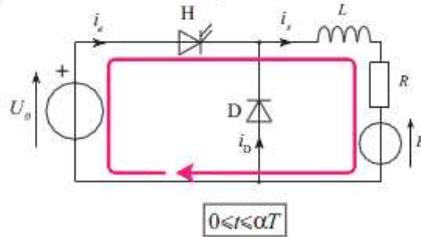
Quelle que soit l'état de la commande, on a fait l'hypothèse du lissage parfait du courant. Donc le courant dans la charge est continu : $i_c(t) = I_c$. Ce qui signifie qu'il faut toujours un interrupteur conducteur pour assurer la conduction du courant, soit K, soit la diode de roue libre.

- K est fermé, $u_{K(t)} = 0$
Alors, d'après la loi des mailles, $u_C(t) = E$
La tension aux bornes de la diode, $u_{D(t)} = -u_C(t) = -E$. La diode est polarisée en inverse, elle est donc bloquée : $i_D(t) = 0$
Le courant circule par K : $i_s(t) = I_c$
- K est ouvert, $i_s(t) = 0$:
Le courant circule par la diode : $i_D(t) = I_c$. La diode est donc passante : $u_D(t) = 0$
Tension aux bornes de la charge : $u_C(t) = -u_D(t) = 0$
Loi des mailles : $u_K(t) = E$

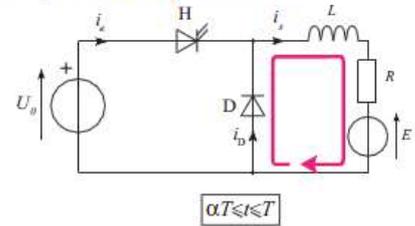


Etude de la chaîne de conversion électromécanique: moteur à courant continu

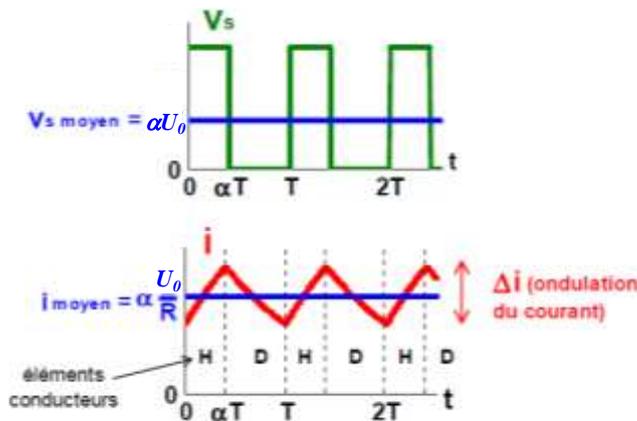
- De 0 à αT , H est passant et D est bloquée.



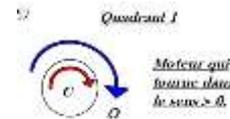
- De αT à T , H est bloqué et D est passante.



* Chronogrammes:



Nota: On voit donc que l'ondulation du courant dans le récepteur est d'autant plus faible que la période T de fonctionnement du hacheur est petite devant la constante de temps $\tau=L/r$ du récepteur, d'où l'intérêt pratique d'utiliser une fréquence de hachage élevée. L'inductance n'a pas d'influence sur la valeur moyenne du courant, mais plus elle est importante, plus elle "lisse" le courant d'où son nom: lissage (cf MCC)



On analyse:

- de 0 à αT : H se ferme et le courant augmente (exponentielle) à travers H, donc, l'énergie provient de la source de tension U_0 ,
- de αT à T : H s'ouvre et le courant décroît à travers la diode de roue libre D, donc l'énergie provient de l'inductance.

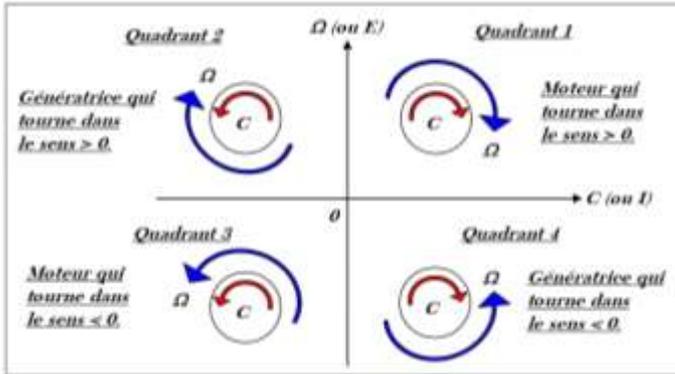
<http://petitjeand.free.fr/fonctionnement%20hacheur.html>

Conclusion : avec un hacheur SERIE on peut faire varier la vitesse de rotation d'une MCC mais que dans 1 seul sens \Rightarrow 1 quadrant de fonctionnement

5.3. Le hacheur en pont (2 ou 4 QUADRANTS)

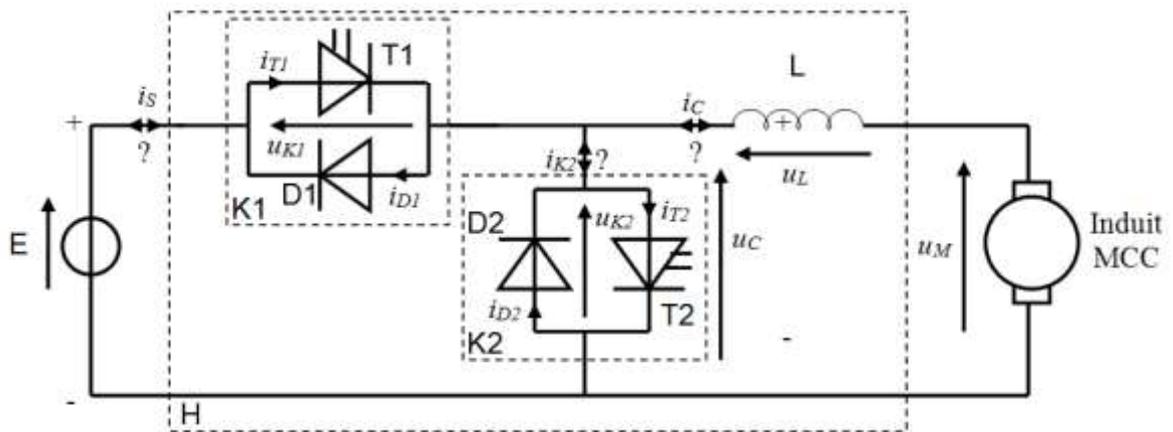
Les convertisseurs que l'on vient d'étudier présentent, en pratique, un inconvénient notable lorsqu'ils sont destinés à contrôler le fonctionnement d'une MCC. En effet, ils ne permettent pas le fonctionnement à la fois en moteur et en génératrice, ce qui est très contraignant.

Dans la plupart des cas, il faut permettre à la MCC de fonctionner au moins dans deux quadrants, selon que l'on a $I > 0$ et $E > 0$ (moteur), ou $I < 0$ et $E > 0$ (génératrice). Différents types de hacheurs répondent à cette exigence.



- Exemples :
- Quadrant 1 :** moteur perceuse , aspirateur...
 - Quadrant 4 :** éolienne
 - Quadrants 1-3 non réversibles :** lève vitre, viss-dévis
 - Quadrants 1-2 réversibles courant :** treuil
 - Quadrants 1-4 réversibles tension :** scooter électrique

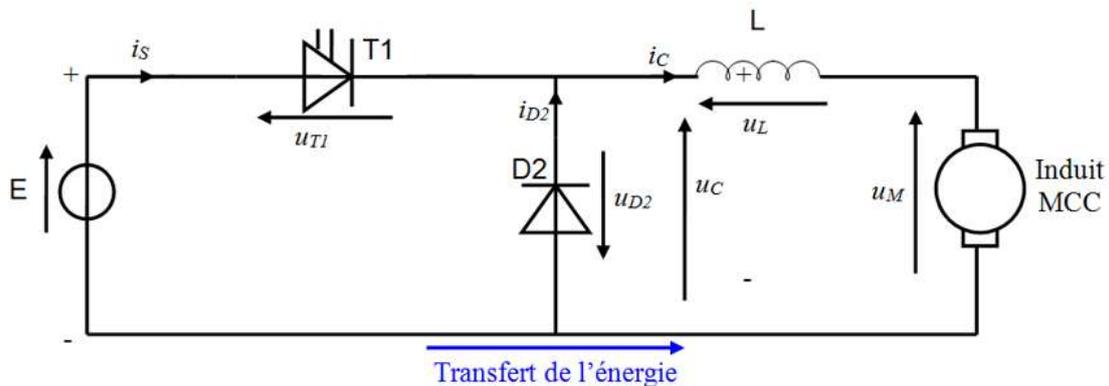
5.3.1. Hacheur REVERSIBLE en COURANT (quadrants 1-2)



M

1er cas : le transfert de l'énergie s'effectue de la source vers la charge. **Fonctionnement moteur.**

La conduction du courant est assurée par les interrupteurs T1 et D2. Le montage fonctionne alors selon le schéma suivant



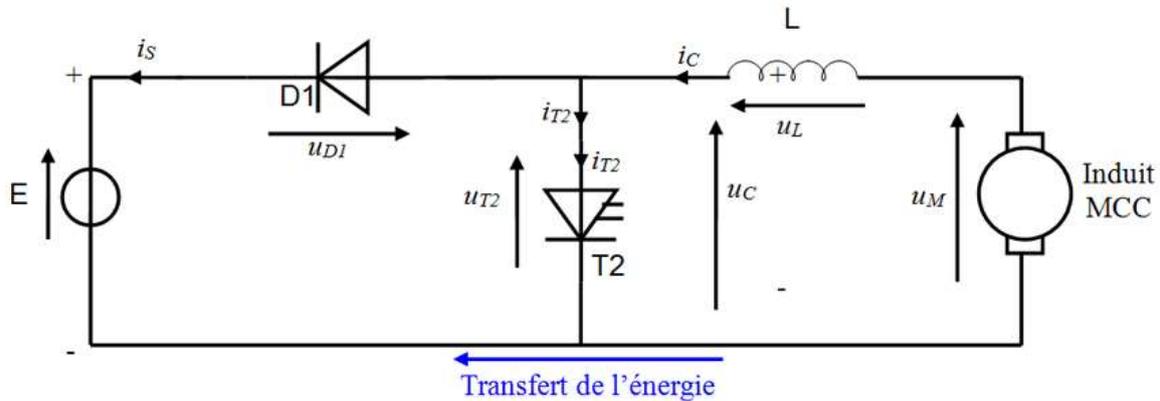
On reconnaît le montage du **hacheur série**. Il suffit donc de se ramener à l'étude du hacheur série pour décrire le fonctionnement du montage



Etude de la chaîne de conversion électromécanique: moteur à courant continu

2ème cas : le transfert de l'énergie s'effectue de la charge vers la source. **Fonctionnement génératrice.**

La conduction du courant est assurée par les interrupteurs D1 et T2. Le montage fonctionne alors selon le schéma suivant :

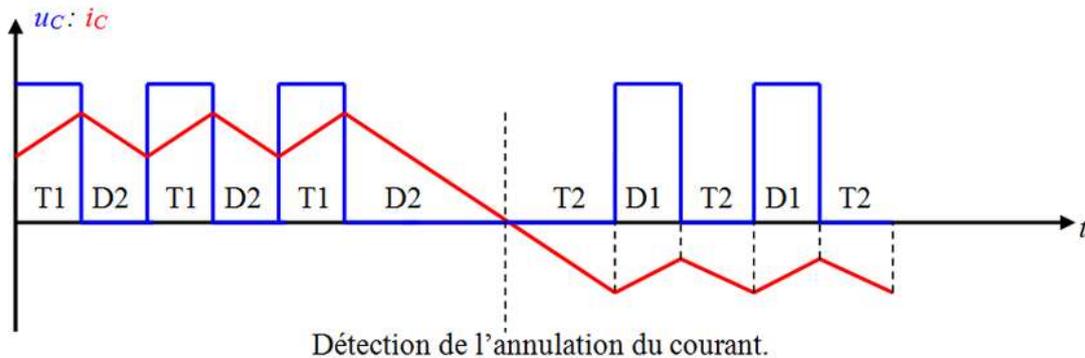


Passage d'un mode de fonctionnement à l'autre.

Il existe deux modes de commandes : commande symétrique et commande alternée :

En commande alternée, tant que le courant i_c est positif, T1 et D2 assurent le fonctionnement du hacheur en conduisant à tour de rôle comme nous l'avons expliqué précédemment.

Si i_c vient à s'annuler puis changer de signe, alors, dès que l'on détecte le passage par 0, on lance la commande de T2. C'est alors T2 et D1 qui assurent à tour de rôle la conduction.



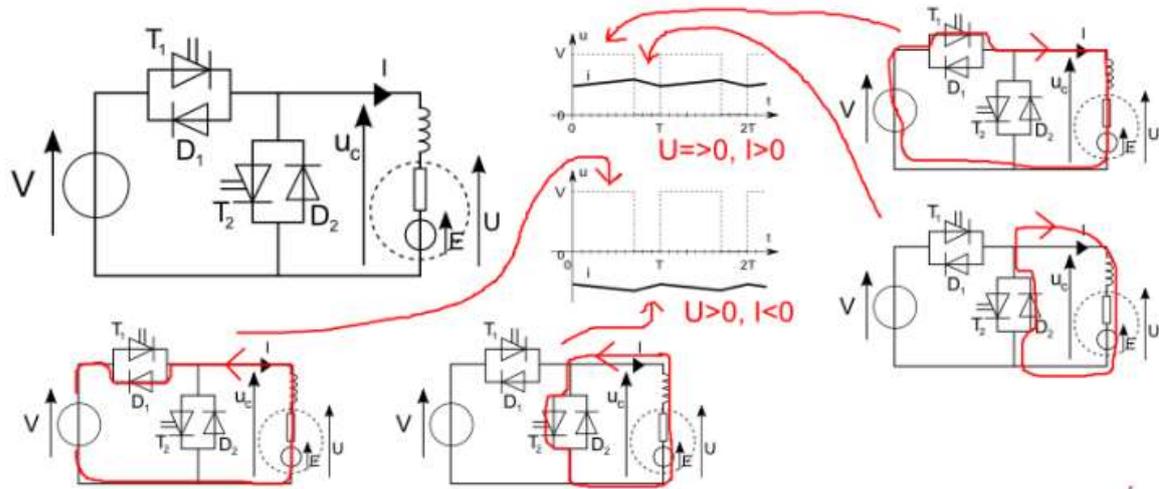
Le passage d'un mode de fonctionnement à l'autre implique un basculement de la commande d'un transistor à l'autre. Ce basculement impose à la commande de réaliser une détection de l'annulation du courant dans la charge.

En commande symétrique, le transistor T1 est commandé de 0 à αT et T2 est commandé de αT à T . On passe alors d'un mode de fonctionnement à l'autre de façon automatique. Si la source fournit plus d'énergie électrique que la charge n'a accumulée d'énergie cinétique alors le montage fonctionne en hacheur série et T1 et D2 assure la conduction du courant. Si la source fournit moins d'énergie électrique que la charge n'a accumulée d'énergie cinétique alors le montage fonctionne en hacheur parallèle et T2 et D1 assure la conduction du courant.



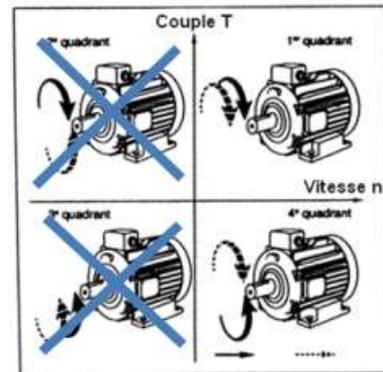
Etude de la chaîne de conversion électromécanique: moteur à courant continu

Synthèse :



On a alors $\langle u_c \rangle = \alpha \times V$

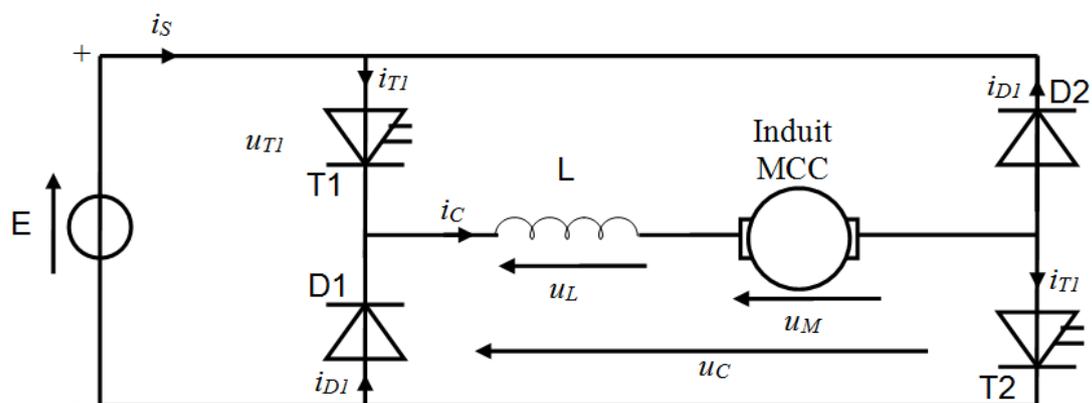
Ce montage permet un fonctionnement en moteur et freinage avant.



5.3.2. Hacheur REVERSIBLE en TENSION (quadrants 1 et 4)

La tension appliquée à la charge peut **prendre les valeurs +E ou -E**, ce qui permet, suivant la valeur du rapport cyclique de donner une **valeur moyenne de tension de sortie positive ou négative**. En revanche, **le courant doit rester de signe constant** dans la charge, car les interrupteurs ne sont pas réversibles.

Le schéma complet du hacheur réversible en tension est le suivant :





Etude de la chaîne de conversion électromécanique: moteur à courant continu

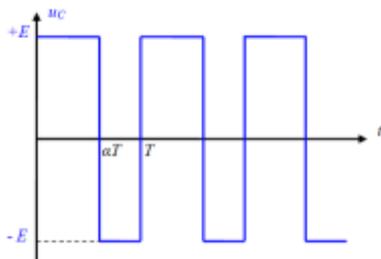
Fonctionnement :

Lors de la première phase de fonctionnement, dans l'intervalle de temps $[0, \alpha T]$ les deux interrupteurs commandés **T1 et T2 sont fermés** et les **diodes D1 et D2 ouvertes**. La charge est sous **tension +E**.

Lors de la seconde phase de fonctionnement, sur l'intervalle de temps $[\alpha T, T]$, les interrupteurs commandés sont ouverts et les diodes passantes. La charge est sous **tension -E**

Tension aux bornes de la charge :

La forme de la tension de sortie est donc la suivante :



On calcul la valeur moyenne de la tension de sortie par la méthode des aires :

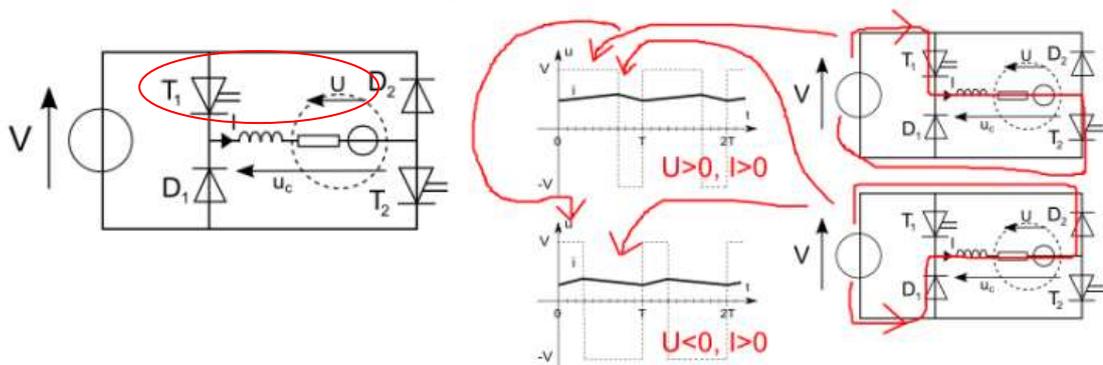
$$A_+ = E.\alpha.T \quad \text{et} \quad A_- = E.(1 - \alpha).T$$

Donc : $\langle u_c \rangle = [E.\alpha T - (E (1 - \alpha) T)] / T$ soit $\langle u_c \rangle = (2\alpha - 1).E$

Si $\alpha > 0,5$, alors, la **tension moyenne de sortie est positive** et le transfert d'énergie s'effectue de la source vers la charge (la machine à courant continu fonctionne en **moteur**).

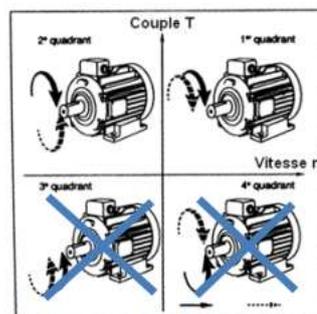
En revanche, dans le cas où $\alpha < 0,5$, la **tension moyenne de sortie est négative** et le transfert d'énergie s'effectue de la charge vers la source (la machine à courant continu fonctionne en **génératrice**).

Synthèse :



On a alors $\langle u_c \rangle = (2\alpha - 1) \times V$

Ce montage permet un fonctionnement en moteur avant et freinage arrière.



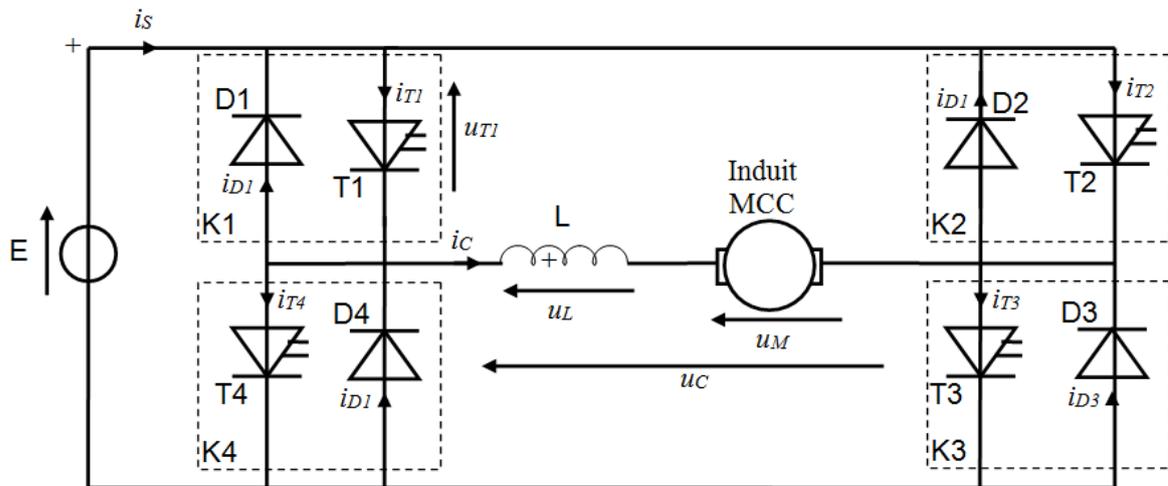


Etude de la chaîne de conversion électromécanique: moteur à courant continu

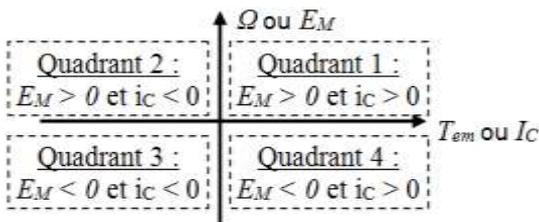
5.3.3. Hacheur REVERSIBLE en pont (4 quadrants)

Le montage est constitué d'une source de **tension continue E réversible en courant**, de l'induit d'une machine à courant continu (MCC) + son inductance de lissage L et de **4 interrupteurs électroniques K1, K2, K3, K4 commandés à l'ouverture et à la fermeture et bidirectionnels en courant**.

La machine à courant continu est susceptible de fonctionner en moteur, le transfert d'énergie s'effectue alors de la source E vers la MCC, ou en génératrice, le transfert d'énergie s'effectue alors de la MCC vers la source E. Les interrupteurs sont constitués d'un transistor ou d'un thyristor + son circuit de commande, et d'une diode branché en antiparallèle qui permet d'assurer la possibilité du retour du courant.



Les 4 quadrants :



Les 4 quadrants de fonctionnement de la machine à courant continu dans le plan $\Omega = f(T_{em})$ ou $E_M = f(I_c)$ sont donnés sur la figure ci-contre.

Quadrant 1 : la machine tourne en marche avant et fonctionne en moteur.

Quadrant 2 : la machine tourne en marche avant et fonctionne en génératrice.

Quadrant 3 : la machine tourne en marche arrière et fonctionne en moteur.

Quadrant 4 : la machine tourne en marche arrière et fonctionne en génératrice.



Etude de la chaîne de conversion électromécanique: moteur à courant continu

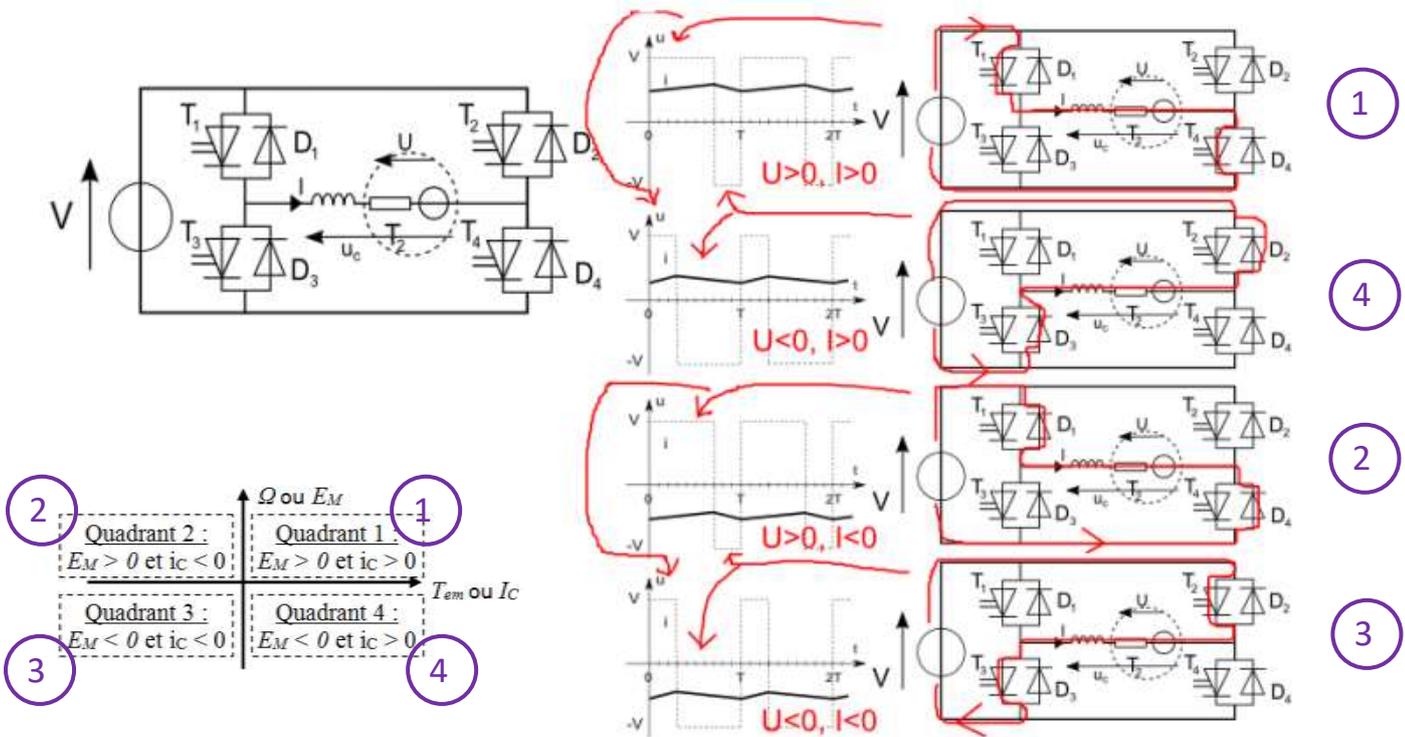
Commande séquentielle :

Les interrupteurs T_1 et T_4 sont commandés simultanément avec la période T . Ils sont commandés à la fermeture pour $t \in [0; \alpha T]$ et ouverts le reste de la période.

Les interrupteurs T_2 et T_3 sont commandés simultanément avec la période T . Ils sont commandés à la fermeture pour $t \in [\alpha T; T]$ et ouverts le reste de la période.

- lorsque i est **positive**, la machine fonctionne en **moteur** si $E > 0$, soit $\alpha > 0.5$ et en **génératrice** si $E < 0$, soit pour $\alpha < 0.5$
- lorsque i est **négative**, la machine fonctionne en **génératrice** si $E > 0$ et en **moteur** si $E < 0$

Un tel hacheur permet un fonctionnement de la MCC dans les 4 quadrants.



On a alors $\langle u_c \rangle = (2\alpha - 1) \times V$

Ce montage permet un fonctionnement dans les 4 quadrants

voir lien: http://sitelec.org/flash/hacheur_transistors.htm

