

Documents de cours - Conversion électronique de puissance

Hacheurs

Introduction

Dans ce chapitre, nous nous intéressons à la *conversion électronique de puissance*. Nous définirons la notion d'électronique de puissance, puis nous nous concentrerons sur la *conversion électronique statique continu-continu* qui permet d'alimenter une charge sous une tension de valeur moyenne réglable à partir d'une source continue, sans perte d'énergie. C'est un domaine très étendu allant de l'alimentation d'une lampe halogène à la commande des moteurs de TGV.

Nous allons voir que cette conversion peut être réalisée avec un très bon rendement avec un dispositif électronique appelé *hacheur*. Nous montrerons comment on peut utiliser un tel montage pour régler la vitesse d'un moteur à courant continu.

1 Généralités

1.1 Electronique du signal et électronique de puissance

a) Electronique du signal

L'*électronique des signaux* concerne le domaine des signaux de **faible intensité** ($i < 0.1A$), et mettant en jeu de **faibles puissances** (de l'ordre de quelques Watts). Ce type d'électronique correspond typiquement aux montages électriques réalisés en travaux pratiques.

L'électronique du signal a pour but de **transmettre ou de traiter une information** contenue dans le signal électrique. La forme du signal est très importante car c'est elle qui contient l'information.

Le **rendement est en général relativement faible** et n'est pas une priorité à cause des faibles puissances mises en jeu.

b) Electronique de puissance

Au contraire, l'*électronique de puissance* concerne le domaine des **forts courants** ($i > 0.1A$), des basses fréquences (en général celle du réseau à $50Hz$) et mettant en jeu des **puissances élevées** (de $100Watts$ pour une perceuse ou une machine à laver, à quelques MW pour des moteurs de TGV).

L'électronique de puissance a pour but de **transmettre une puissance électrique**. La forme du signal est donc relativement peu importante.

Le principal enjeu est d'avoir le **rendement le meilleur possible**, à cause des fortes puissances mises en jeu.

Afin de réaliser un transfert de puissance en limitant les pertes, sans mouvement de pièces, c'est à dire en *fonctionnement statique*, on utilise des *interrupteurs électroniques* qui sont placés entre la source en entrée et la charge en sortie.

Ces interrupteurs ne consomment quasiment aucune puissance comme nous allons le voir¹.

1. En effet, lorsque l'interrupteur est "ouvert", le courant qui le traverse est très faible même si la tension à

Nous montrerons comment tirer partie d'un régime appelé **régime de commutation** dans lequel les interrupteurs passent périodiquement de l'état passant à l'état bloqué.

1.2 Classification des convertisseurs d'électronique de puissance

Le tableau ci-dessous regroupe les différents convertisseurs statiques d'électronique de puissance, dont le rendement est généralement supérieur à 90%.

| | Source continue | Source alternative |
|--------------------|-----------------|--------------------|
| Charge continue | | |
| Charge alternative | | |

Conformément au programme de PSI, nous ne nous intéresserons dans la suite qu'à la *conversion continu-continu*, c'est à dire au *hacheur*.

2 Première approche de la conversion électronique - Intérêt du hachage

2.1 Etude d'un exemple simple : alimentation d'un radiateur électrique

Supposons que l'on dispose d'un radiateur électrique modélisé par une résistance R et d'une source de tension continue E **non réglable**.

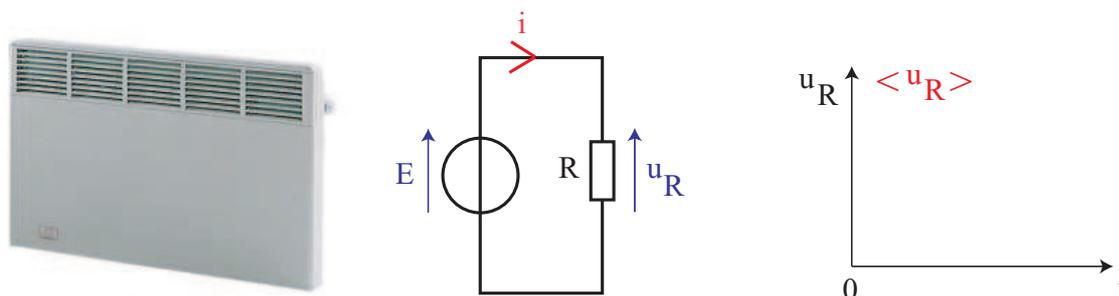


FIGURE 1: *Modélisation d'un radiateur électrique alimenté par une source de tension continue. La valeur moyenne de la tension aux bornes de la résistance s'identifie avec sa valeur instantanée.*

Si l'on branche les 2 dipôles ensemble, il s'établit un courant $i =$ et la puissance dissipée par effet Joule vaut :

(1)

Le système n'est donc **absolument pas flexible** du point de vue du transfert de puissance entre la source et la charge, et ne permet donc **pas de régler la température de la pièce**.

ses bornes est élevée. Lorsque l'interrupteur est "fermé", la tension à ses bornes est très faible même si le courant qui le traverse est important. Dans les deux cas, l'interrupteur consomme une puissance quasiment nulle.

2.2 Amélioration du montage - Hachage de la tension d'alimentation

Supposons maintenant que l'on introduise un quadripôle ou un dipôle entre la source et le radiateur, qui permette de couper l'alimentation pendant un temps T réglable. La valeur moyenne de la tension d'alimentation est ainsi potentiellement réglable, comme le montre la figure ci-dessous. La puissance moyenne dissipée est donc également réglable.

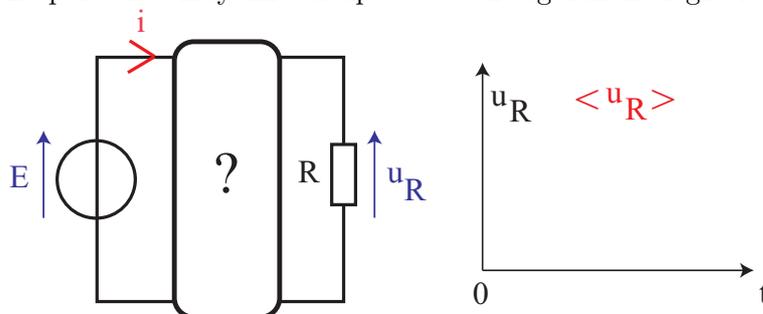


FIGURE 2: Amélioration du montage d'alimentation d'un radiateur électrique : un "hachage" de la tension d'alimentation permet de régler la valeur moyenne de la tension aux bornes de la résistance.

La fonction recherchée n'est autre que celle d'un interrupteur. Nous allons donc développer les différents types d'interrupteurs qui sont couramment utilisés afin de réaliser ce que l'on appelle le **hachage** de la tension d'alimentation.

3 Interrupteurs électroniques

3.1 Présentation

On n'utilise pas d'interrupteurs mécaniques dans les hacheurs à cause de leur grande inertie : ils ne peuvent commuter à fréquence élevée. Comme nous allons le voir, la performance du hacheur augmente avec la fréquence de commutation qui peut atteindre 20000Hz . A partir des années 1960, on utilise des interrupteurs électroniques réalisés à partir de semi-conducteurs. La mise au point de semi-conducteurs et d'interrupteurs électroniques supportant des courants forts a permis un essor considérable de l'électronique de puissance.

3.2 Définitions dans le cas d'un interrupteur idéal

a) Convention et caractéristiques

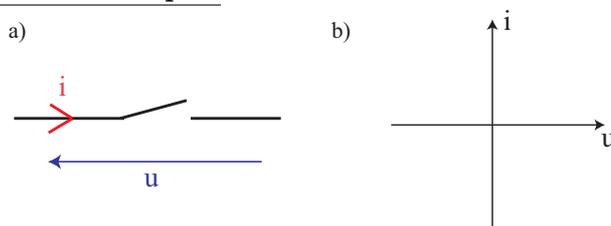


FIGURE 3: Interrupteur idéal : a) symbole, b) caractéristique.

Un interrupteur idéal présente une caractéristique qui fait apparaître deux états stables :

- état *ouvert* ou *bloqué* :

$$i = 0 \quad \text{et} \quad u \neq 0 \quad \text{interrupteur ouvert}$$

- état *fermé* ou *passant* :

$$i \neq 0 \quad \text{et} \quad u = 0 \quad \text{interrupteur fermé}$$

Comme les interrupteurs sont parfaits, i et u ne peuvent être nuls simultanément. L'une des deux grandeurs est toujours nulle de sorte que la puissance reçue reste nulle à tout instant :

$$\mathcal{P} = ui = 0 \quad \forall t$$

b) Commutation

Une transition entre les 2 états stables est appelée *commutation*. On parle :

- d'*amorçage* lorsque l'interrupteur se ferme ou devient *passant*.
- de *blocage* lorsque l'interrupteur s'ouvre ou devient *bloqué*.

On définit également une commutation :

- *commandée* ou *forcée* si on agit directement sur l'interrupteur par l'intermédiaire d'une électrode de commande pour le faire basculer.
- *spontanée* ou *naturelle* si le changement d'état se fait sans intervention extérieure au circuit. Le basculement se fait par exemple lors d'une chute de courant ou de tension dans le circuit.

c) Directionnalité

Les interrupteurs permettant :

- des courants positifs ou négatifs sont appelés *bidirectionnels en courant*.
- des courants seulement positifs ou seulement négatifs sont appelés *unidirectionnels en courant*.
- des tensions positives ou négatives sont appelés *bidirectionnels en tension*.
- des tensions seulement positives ou seulement négatives sont appelés *unidirectionnels en tension*.

3.3 Exemples

a) Diode (ou interrupteur à commutation spontanée)

La *diode* idéale correspond à un interrupteur² :

- **unidirectionnel en courant et en tension** : le courant ne peut jamais être négatif, et la tension ne peut jamais être positive
- **à commutation spontanée à l'amorçage et au blocage** : la diode se bloque spontanément ($i = 0$) dès que $u < 0$, et s'amorce ($i \neq 0$) dès que $u \geq 0$.

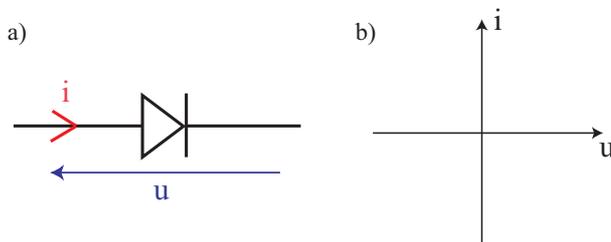


FIGURE 4: Diode idéale : a) symbole, b) caractéristique.

2. Une diode correspond à une association PN ou NP de semi-conducteurs dopés.

b) Transistor idéal (ou interrupteur idéal commandé à l'amorçage et au blocage)

Le *transistor* idéal correspond à un interrupteur :

- **unidirectionnel en courant et en tension** : le courant et la tension ne peuvent jamais être négatifs.
- **à commutation commandée à l'amorçage et au blocage** :
 - si $u \leq 0$, une impulsion sur l'électrode *a* autorise $u = 0$ et $i \geq 0$ (amorçage).
 - si $i \leq 0$, une impulsion sur l'électrode *b* autorise $u \geq 0$ et $i = 0$ (blocage).

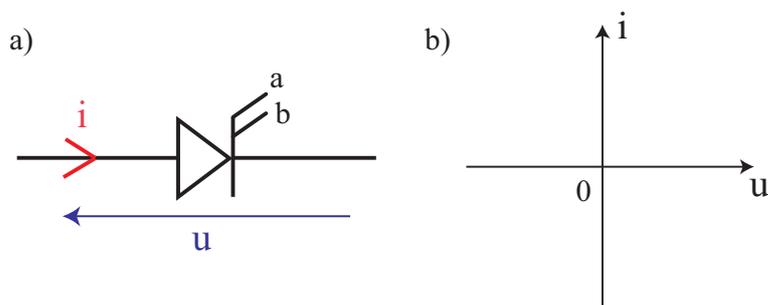


FIGURE 5: *Transistor idéal commandé à l'amorçage et au blocage* : a) *symbole*, b) *caractéristique*.

Remarque : il existe deux principaux types de transistors :

- les *transistors bipolaires* : la commande se fait en intensité à l'aide d'une seule électrode appelée *base* B. Les deux autres électrodes correspondent au *collecteur* C et à l'*émetteur* E. Ce type de transistor correspond à une association NPN ou PNP de semi-conducteurs dopés.
- les *transistors à effet de champ* : la commande se fait en tension entre deux électrodes appelées *grille* G et *source* S. La troisième électrode correspond au *drain* D. Ce type de transistor correspond à un seul type de semi-conducteur dopé N ou P, entouré en son milieu d'un anneau de semi-conducteur dopé inversement, P ou N.

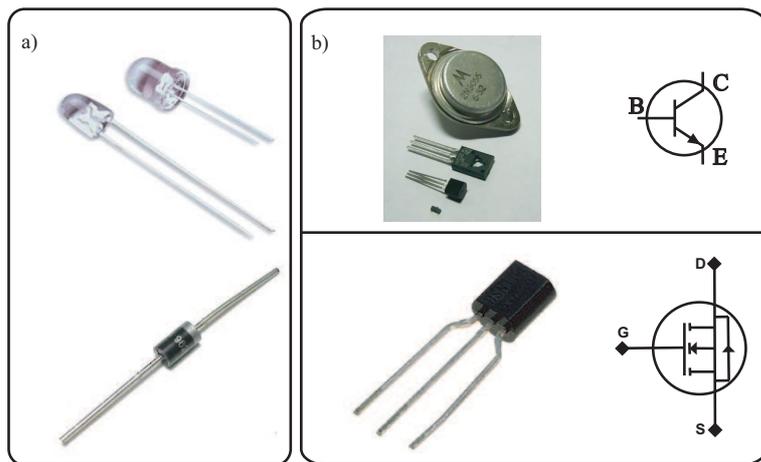


FIGURE 6: a) *Diodes* b) *Transistors (bipolaires et à effet de champ) ainsi que leurs représentations conventionnelles*.

4 Sources

4.1 Définitions

Notamment à cause du caractère réversible des machines électromécaniques, les termes de *générateur* et *récepteur* utilisés en électronique du signal sont remplacés par les termes de *source d'entrée* et *source de sortie* en électronique de puissance.

On appelle ainsi *source d'entrée* celle qui, en moyenne, fournit la puissance électrique et *source de sortie* celle qui la reçoit.

4.2 Sources de tension

a) Source idéale de tension

Une *source idéale de tension* impose à ses bornes un f.e.m. constante quelle que soit l'intensité du courant qui la traverse.

Son impédance interne est nulle (caractéristique de pente $\frac{1}{R}$ infinie).

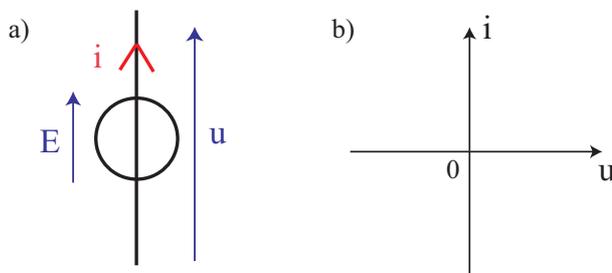


FIGURE 7: a) Symbole et b) caractéristique d'une source de tension idéale.

b) Source réelle de tension

En réalité, une source réelle de tension possède une résistance interne R , de sorte que sa caractéristique n'est plus une droite verticale³. La pente de la caractéristique est négative car

$$u = E - Ri, \text{ et donc } i = \frac{E - u}{R}.$$

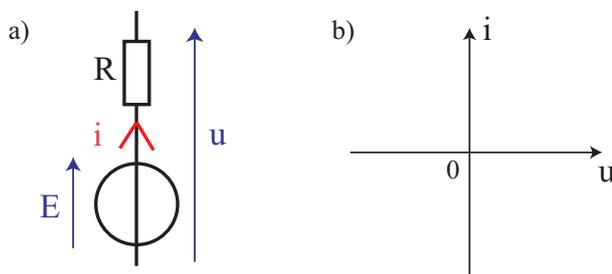


FIGURE 8: a) Symbole et b) caractéristique d'une source de tension réelle.

3. Une telle source possède également une petite inductance propre qui impose la continuité du courant.

Remarque : Si on fait subitement varier le courant i de Δi dans le circuit (par exemple par l'ouverture ou la fermeture d'un interrupteur), la tension à ses bornes ne reste donc pas constante et varie de $\Delta u = -R\Delta i$.

c) Amélioration de la source

Afin d'éviter la discontinuité de tension évoquée précédemment lors de l'utilisation d'interrupteurs, on place aux bornes de la source de tension un condensateur de capacité C .

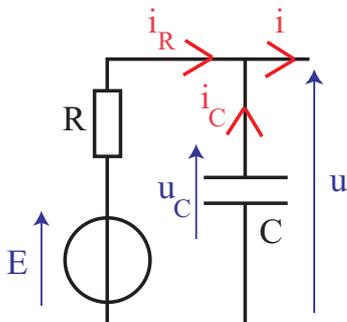


FIGURE 9: Amélioration d'une source imparfaite de tension par l'ajout d'un condensateur en parallèle.

En appliquant la loi des noeuds et la loi des mailles, on obtient :

(2)

On montre donc que la tension u et le courant i sont reliés par la relation suivante :

(3)

Etudions le comportement de ce système soumis à une brusque variation d'intensité décrite par un échelon d'intensité tel que pour $t < 0$, $i = 0$ et pour $t > 0$, $i = \Delta i$.

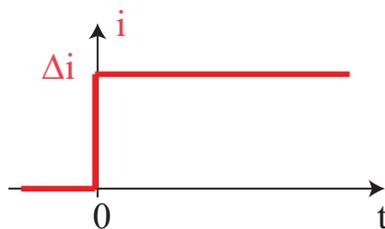


FIGURE 10: Echelon de courant.

Par continuité de la tension aux bornes du condensateur C initialement chargé,

(4)

La dérivée de u par rapport au temps à $t = 0^+$ est :

(5)

Si la valeur de la capacité C est suffisamment grande, les variations de la tension u sont faibles.

Propriété : Pour améliorer une source de tension imparfaite, il faut placer entre ses bornes un condensateur de capacité suffisante. Le condensateur empêche les discontinuités de la tension et joue le rôle de réservoir d'énergie : il fournit de l'énergie lorsque u diminue et en absorbe lorsque u augmente de manière à réduire les variations de u .

4.3 Sources de courant

a) Source idéale de courant

Une *source idéale de courant* impose entre ses bornes un courant constant quelle que soit la tension appliquée à ses bornes.

Son impédance interne est infinie (caractéristique de pente $\frac{1}{R}$ nulle).

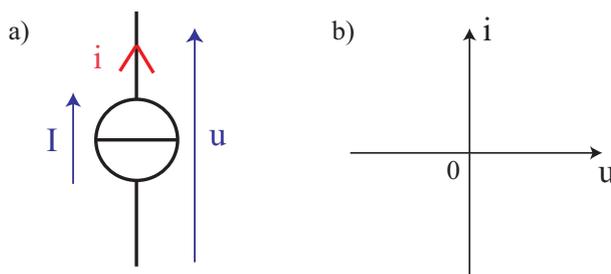


FIGURE 11: a) Symbole et b) caractéristique d'une source de courant idéale.

b) Source réelle de courant

En réalité, une source réelle de courant possède une résistance interne R , de sorte que sa caractéristique n'est plus une droite horizontale⁴. La pente de la caractéristique est négative car

$$i = I - \frac{u}{R}.$$

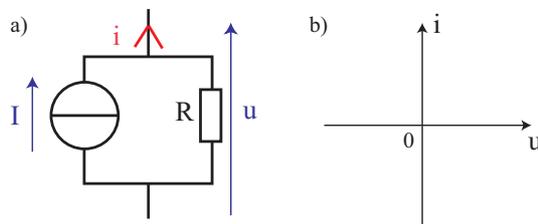


FIGURE 12: a) Symbole et b) caractéristique d'une source de courant réelle.

4. Une telle source possède également une petite capacité propre qui impose la continuité de la tension.

Si on fait subitement varier la tension u de Δu dans le circuit (par exemple par l'ouverture ou la fermeture d'un interrupteur), le courant dans la source ne reste donc pas constant et varie de $\Delta i = -\frac{\Delta u}{R}$.

c) Amélioration de la source

Afin d'éviter la discontinuité du courant évoquée précédemment, on place en série avec la source de courant une bobine d'inductance L .

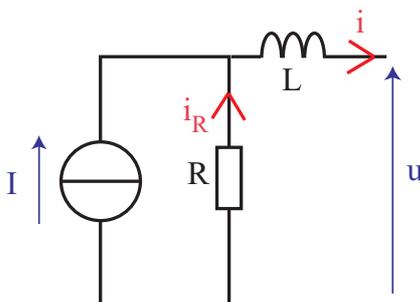


FIGURE 13: Amélioration d'une source imparfaite de courant par l'ajout d'une bobine en parallèle.

En appliquant la loi des noeuds et le loi des mailles, on obtient :

(6)

On montre donc que la tension u et le courant i sont reliés par la relation suivante :

(7)

Etudions le comportement de ce système soumis à une brusque variation de tension décrite par un échelon de tension tel que pour $t < 0$, $u = 0$ et pour $t > 0$, $u = \Delta u$.

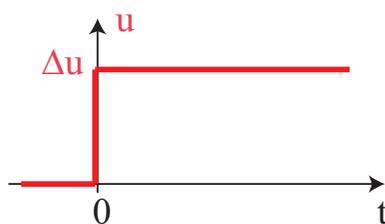


FIGURE 14: Echelon de tension.

Par continuité du courant traversant une bobine,

(8)

La dérivée de i par rapport au temps à $t = 0^+$ est :

(9)

Si la valeur de l'inductance L est suffisamment grande, les variations du courant i sont faibles.

Propriété : Pour améliorer une source de courant imparfaite, il faut placer en série une bobine d'inductance suffisante. La bobine empêche les discontinuités du courant et joue le rôle de réservoir d'énergie : elle fournit de l'énergie lorsque i diminue et en absorbe lorsque i augmente de manière à réduire les variations de i .

4.4 Règles d'association de sources idéales

Lors de certaines phases de fonctionnement du convertisseur, les sources vont être directement connectées entre elles. Ces connections doivent **toujours** respecter la loi des noeuds et la loi des mailles, sous peine de détériorations des sources, de sorte que :

- on ne doit pas connecter deux sources de même nature, et dont les caractéristiques sont différentes. En particulier, **une source de tension ($E \neq 0$) ne doit pas être court-circuitée**, et **une source de courant ($I \neq 0$) ne doit pas se trouver en circuit ouvert** pendant les phases de commutation.
- on peut interconnecter une source de courant et une source de tension. Il existe alors un unique point de fonctionnement dont les coordonnées sont : $u = E$ et $i = -I$ dans le schéma ci-dessous.

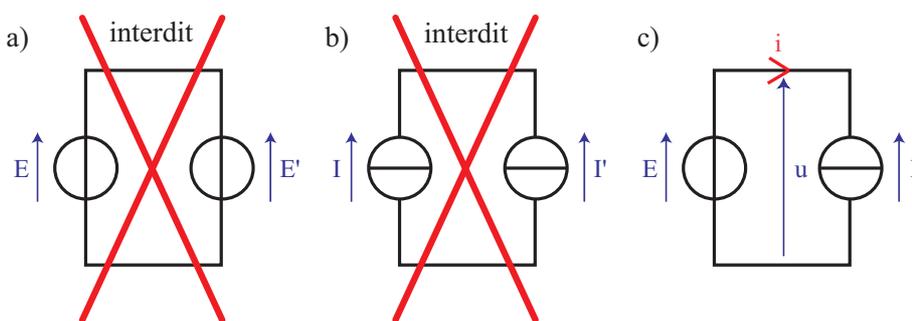


FIGURE 15: Règles d'association des sources entre elles.

5 Retour sur l'exemple du radiateur électrique - Utilisation d'un interrupteur commandé

Revenons sur l'exemple du radiateur électrique alimenté par une source de tension continue. Rajoutons donc un dipôle de commutation dans le montage initial afin d'obtenir une puissance de chauffe réglable avec le radiateur. On notera qu'une simple diode serait inefficace car, soit elle bloquerait continûment le courant, soit elle autoriserait son passage tout le temps. Il faut donc utiliser un **interrupteur commandé**.

Plaçons donc un transistor en série avec la source et la charge : un petit circuit de commande consommant très peu devant la puissance de la charge génère un **hachage de période T** . Tout hachage est caractérisé par une **séquence de commande**, c'est à dire par une suite d'amorçages et de blocages commandés au cours de chaque période.

Le hachage le plus simple est le suivant entre $t = 0$ et $t = T$. On introduit $\alpha \in [0; 1]$ un nombre sans dimension appelé **rapport cyclique du hachage** tel que :

- $t \in [0; \alpha T]$, le transistor est *passant* (amorçage par une impulsion sur l'électrode a à $t = 0$)

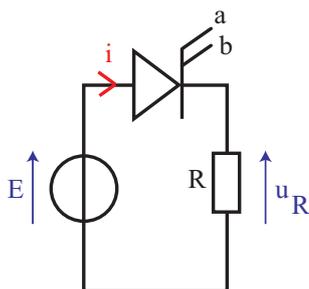


FIGURE 16: *Modélisation d'un radiateur électrique alimenté par une source de tension continue. Grâce à la présence d'un interrupteur commandé, la puissance consommée dans la résistance est réglable.*

- $t \in [\alpha T; T]$, le transistor est *bloqué* (blocage par une impulsion sur l'électrode b à $t = \alpha T$)

Idéalement, le rapport cyclique α peut être réglé par l'utilisateur. Il pourra donc générer les grandeurs électriques représentées ci-dessous, appelées *formes d'ondes* :

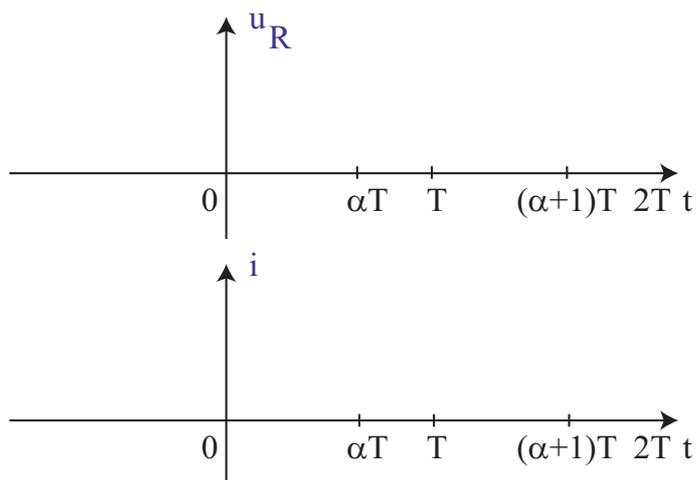


FIGURE 17: *Formes d'ondes du courant et de la tension aux bornes de la résistance.*

L'effet Joule moyen sur une période est donc donné par :

$$(10)$$

La puissance moyenne dissipée est donc proportionnelle au rapport cyclique α , et l'utilisateur peut régler continûment le chauffage d'une valeur nulle à sa valeur maximale grâce au principe du hachage.

6 Hacheur série (dévolteur)

6.1 Présentation

Nous allons maintenant nous intéresser au transfert de puissance d'une source de tension E continue vers une source de courant continu I (une machine à courant continu par exemple) à l'aide d'un *convertisseur direct*. On appelle **convertisseur direct** un convertisseur ne comportant pas d'éléments de stockage intermédiaires⁵, et ne comportant donc que des interrupteurs. En utilisant les résultats énoncés précédemment, nous allons déduire la disposition et la nature des interrupteurs à mettre en jeu.

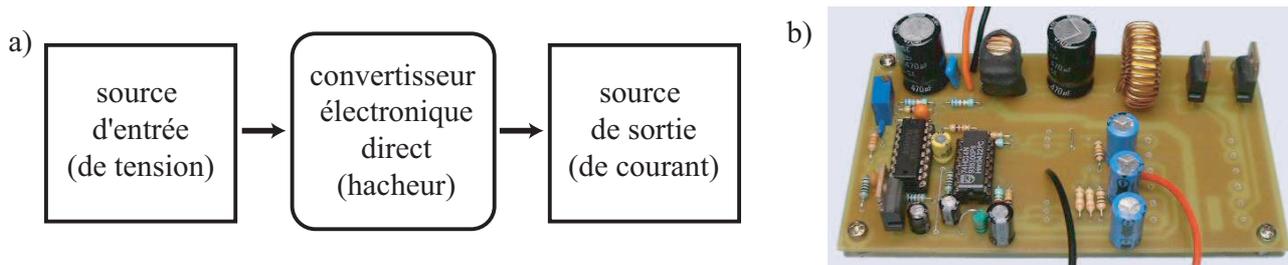


FIGURE 18: a) Exemple de convertisseur direct. b) Photo d'un hacheur.

On rappelle que d'après les règles d'association vues précédemment, ce convertisseur peut effectivement relier des sources de nature différente, mais ne pourrait pas relier des sources de même nature, car lors de la phase de commutation, les deux sources se retrouveraient se trouver en contact direct.

Cependant, ce convertisseur doit comporter nécessairement au moins deux interrupteurs, sinon cela obligerait à placer la source de courant en circuit ouvert, ce qui est interdit. Il faut donc un second interrupteur, comme le montre le schéma ci-dessous. Ce schéma correspond au cas d'une **conversion d'une source de tension vers une source de courant**⁶.

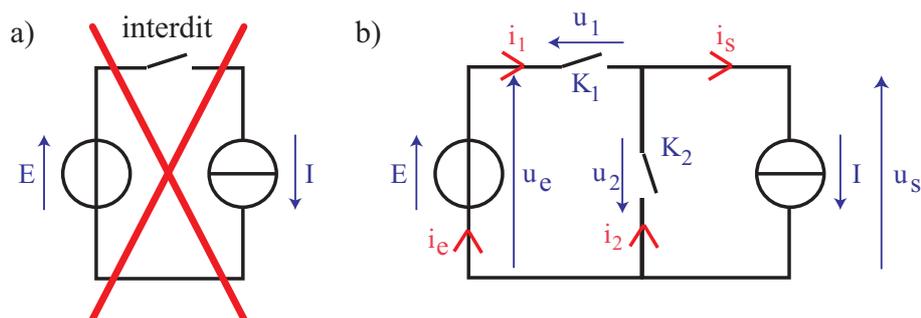


FIGURE 19: a) Impossibilité d'un convertisseur direct à un seul interrupteur. b) Un exemple de convertisseur direct à deux interrupteurs (principe du hacheur série).

5. Nous verrons en exercice deux types de *convertisseurs à liaison indirecte* dans lesquels le convertisseur comprend soit une bobine, soit un condensateur.

6. Nous détaillerons ensuite un autre cas de convertisseur direct qui convertit de l'énergie d'une source de courant vers une source de tension : le *hacheur parallèle*.

6.2 Chronogrammes des tensions et des courants au niveau des sources

Pour l'étude qui suit, nous faisons l'hypothèse que $E > 0$ et $I > 0$. Avec les orientations du schéma précédent, cela assure que la source de tension joue le rôle de *générateur*, et la source de courant le rôle de *récepteur*.

Nous nous plaçons en régime commuté, périodique de période T .

Les sources de tension et de courant étant considérées comme parfaites, $u_e = E$ et $i_s = I$ quel que soit t . Les seules inconnues dans les grandeurs de la figure précédente sont donc : u_1 , u_2 , i_1 , i_2 , u_s et i_e .

On distingue deux phases (on rappelle que α est le *rapport cyclique* du hachage et est compris entre 0 et 1) :

- **Phase 1**⁷ : On considère que l'interrupteur K_1 est fermé sur l'intervalle $[0; \alpha T]$, de sorte que l'interrupteur K_2 est nécessairement ouvert, sinon la source de tension E serait court-circuitée.

$$\text{Pour } t \in [0; \alpha T] \quad \begin{cases} K_1 \\ K_2 \end{cases}$$

- **Phase 2**⁸ : L'interrupteur K_1 est ensuite ouvert sur l'intervalle $[\alpha T; T]$, de sorte que l'interrupteur K_2 est nécessairement fermé, sinon la source de courant I serait en circuit ouvert.

$$\text{Pour } t \in [\alpha T; T] \quad \begin{cases} K_1 \\ K_2 \end{cases}$$

Les *chronogrammes* ou *formes d'ondes* des tensions et des courants sont représentés sur la figure ci-dessous.

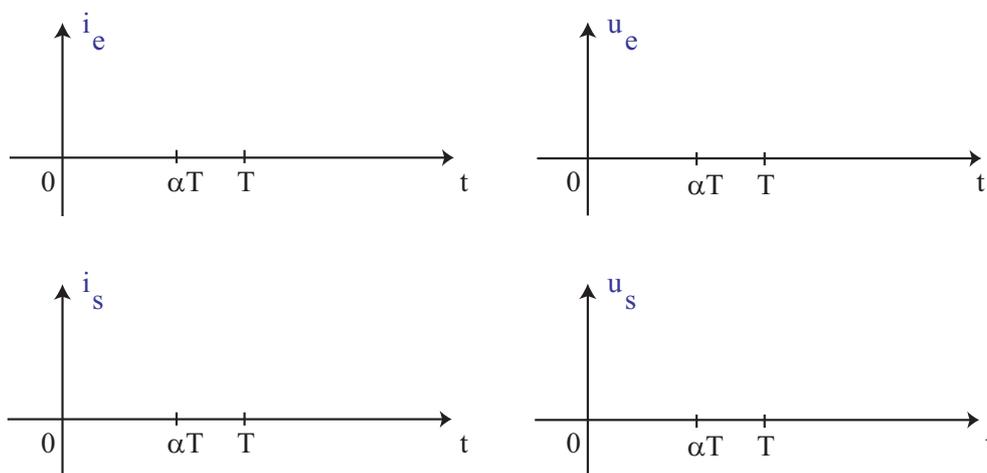


FIGURE 20: Chronogrammes dans le cas d'un hacheur série.

7. On pourrait la noter la *phase d'entraînement* ou la *phase motrice* dans le cas de l'alimentation d'une machine à courant continu alimentée par une source de tension continue.

8. On pourrait la noter la *phase de roue libre* dans le cas de l'alimentation d'une machine à courant continu alimentée par une source de tension continue.

6.3 Nature des interrupteurs

- Pour $t \in [0; \alpha T]$:
 - ▷ K_1 :
 - ▷ K_2 :
- Pour $t \in [\alpha T; T]$:
 - ▷ K_1 :
 - ▷ K_2 :

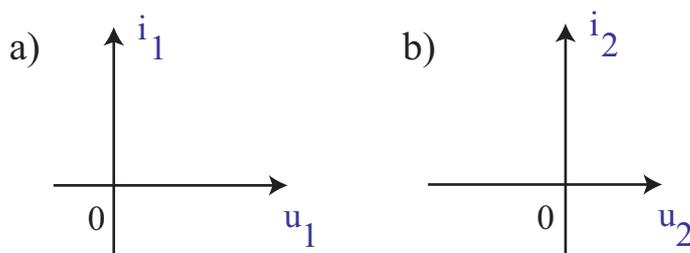


FIGURE 21: Caractéristiques des interrupteurs K_1 (a) et K_2 (b).

En traçant la caractéristique de chacun des interrupteurs, on remarque que :

- l'interrupteur K_1 présente la caractéristique d'un **transistor idéal** (interrupteur à commutation commandée).
- l'interrupteur K_2 présente la caractéristique d'une **diode idéale** (interrupteur à commutation spontanée, dont l'état dépend de l'état de l'interrupteur commandé K_1).

Le montage obtenu a la structure du **hacheur série**, car l'interrupteur commandé est en série avec la source d'entrée. La diode est appelée *diode de roue libre*. Lorsque l'interrupteur commandé est bloqué, la diode conduit et la source de sortie se trouve déconnectée de l'entrée et n'est donc pas alimentée. Elle fonctionne de manière autonome, en roue libre.

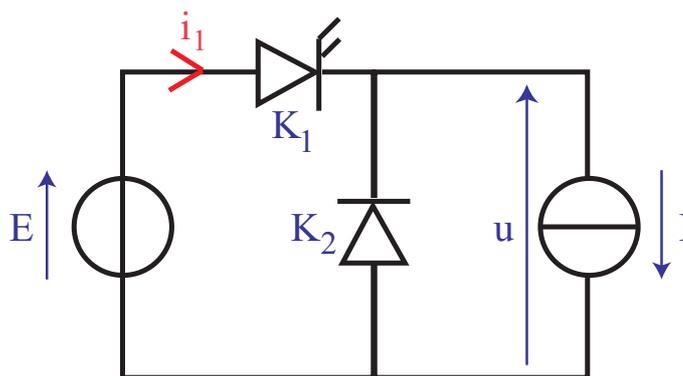


FIGURE 22: Hacheur série.

6.4 Bilan de puissance

La puissance moyenne \mathcal{P}_e fournie par la source d'entrée vérifie :

$$(11)$$

La puissance moyenne \mathcal{P}_s reçue par la source de sortie vérifie :

$$(12)$$

Le rendement $\eta = \frac{\mathcal{P}_s}{\mathcal{P}_e}$ vaut donc 100%. Ce résultat n'est pas surprenant car les interrupteurs sont idéaux et ne consomment donc aucune puissance.

6.5 Valeurs moyennes

Exprimons les valeurs moyennes $\langle i_e \rangle$ du courant d'entrée i_e et $\langle u_s \rangle$ de la tension de sortie :

$$(13)$$

Ici, les fonctions étant constantes sur une partie de l'intervalle et nulle sur l'autre, le calcul des intégrales est particulièrement simple. Ce ne sera pas toujours le cas.

Il est donc intéressant de retenir la formule suivante qui permet de calculer très aisément la valeur moyenne d'une grandeur $s(t)$ de période T :

$$(14)$$

On déduit des relations précédentes la relation :

$$(15)$$

Le rapport des tensions est l'inverse de celui des courants et est égal au rapport cyclique α . Celui-ci étant inférieur à 1, la tension moyenne en sortie est inférieure à celle de l'entrée. Le hacheur série est aussi appelé *hacheur dévolteur*.

Le rapport cyclique étant réglable, il est donc possible de régler la tension moyenne en sortie.

7 Hacheur parallèle (hacheur survolteur)

7.1 Présentation

Nous allons maintenant nous intéresser à un second type de convertisseur direct, afin de transférer une puissance électrique d'une source de courant I continue vers un récepteur de tension continue U . Cette fois encore, nous allons déduire la disposition et la nature des interrupteurs à mettre en jeu en utilisant les résultats obtenus en début de chapitre. Comme précédemment, ce convertisseur comporte nécessairement au moins deux interrupteurs.

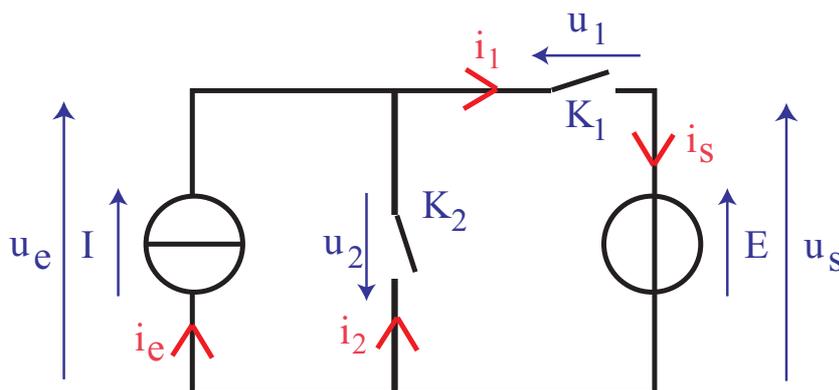


FIGURE 23: *Convertisseur direct à deux interrupteurs entre une source de courant continu I et un récepteur de tension E .*

7.2 Chronogrammes des tensions et des courants au niveau des sources

Pour l'étude qui suit, nous faisons à nouveau l'hypothèse que $E > 0$ et $I > 0$. Avec les orientations du schéma précédent, cela assure que la source de courant joue le rôle de *générateur*, et la source de tension le rôle de *récepteur*.

Comme précédemment, nous nous plaçons en régime commuté, périodique de période T .

Les sources de tension et de courant étant considérées comme parfaites, $i_e = I$ et $u_s = E$ quel que soit t . Les seules inconnues dans les grandeurs de la figure précédente sont donc : u_1 , u_2 , i_1 , i_2 , u_e et i_s .

Là encore, on distingue deux phases (on rappelle que α est le *rapport cyclique* du hachage et est compris entre 0 et 1) :

- **Phase 1**⁹ : On considère que l'interrupteur K_1 est fermé sur l'intervalle $[0; \alpha T]$, de sorte que l'interrupteur K_2 est nécessairement ouvert, sinon la source de tension E serait court-circuitée.

$$\text{Pour } t \in [0; \alpha T] \quad \begin{cases} K_1 \\ K_2 \end{cases}$$

9. On pourrait encore la noter la *phase d'entraînement* ou la *phase motrice* dans le cas de l'alimentation d'une machine à courant continu alimentée par une source de tension continue.

- **Phase 2**¹⁰ : L'interrupteur K_1 est ensuite ouvert sur l'intervalle $[\alpha T; T]$, de sorte que l'interrupteur K_2 est nécessairement fermé, sinon la source de courant I serait en circuit ouvert.

$$\text{Pour } t \in [\alpha T; T] \quad \begin{cases} K_1 \\ K_2 \end{cases}$$

Les *chronogrammes* ou *formes d'ondes* des tensions et des courants sont représentés sur la figure ci-dessous.

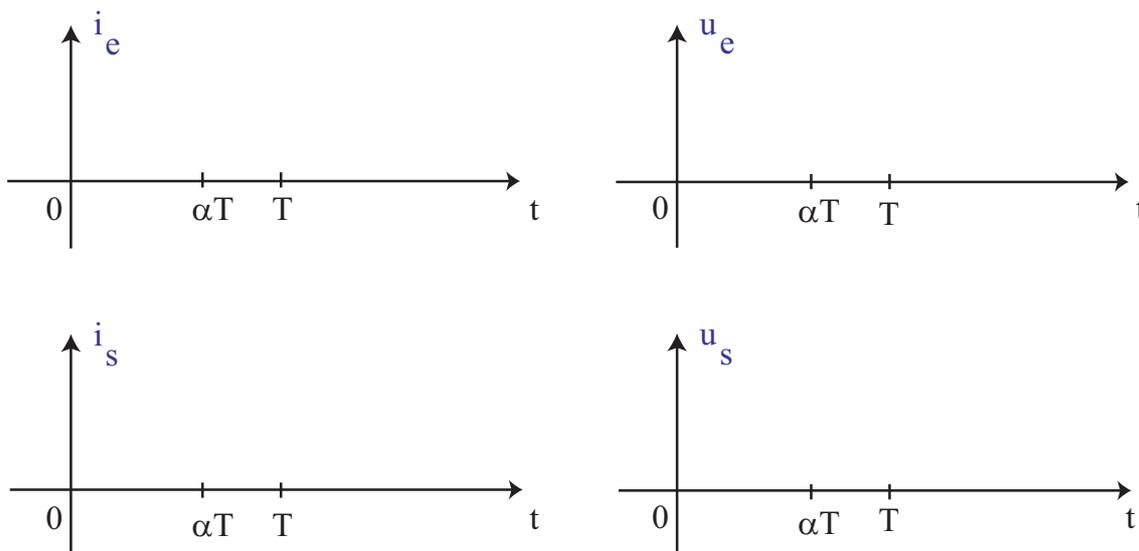


FIGURE 24: Chronogrammes dans le cas d'un hacheur parallèle.

7.3 Nature des interrupteurs

- Pour $t \in [0; \alpha T]$:
 - ▷ K_1 :
 - ▷ K_2 :
- Pour $t \in [\alpha T; T]$:
 - ▷ K_1 :
 - ▷ K_2 :

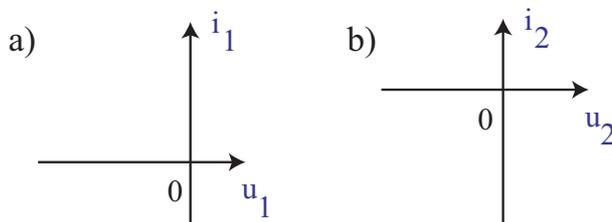


FIGURE 25: Caractéristiques des interrupteurs K_1 (a) et K_2 (b) dans le cas du hacheur parallèle.

10. On pourrait encore la noter la *phase de roue libre* dans le cas de l'alimentation d'une machine à courant continu alimentée par une source de tension continue.

En traçant la caractéristique de chacun des interrupteurs, on remarque que :

- l'interrupteur K_1 présente la caractéristique d'une **diode idéale** (interrupteur à commutation spontanée).
- l'interrupteur K_2 présente la caractéristique d'un **transistor idéal** (interrupteur à commutation commandée) en convention récepteur, mais en sens inverse de l'orientation de i_2 .

Le montage obtenu a la structure du **hacheur parallèle**, car l'interrupteur commandé est en parallèle avec la source d'entrée.

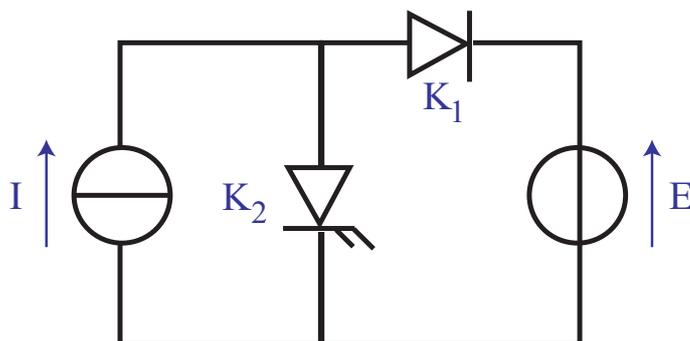


FIGURE 26: *Hacheur parallèle.*

7.4 Bilan de puissance

La puissance moyenne \mathcal{P}_e fournie par la source d'entrée vérifie :

$$(16)$$

La puissance moyenne \mathcal{P}_s reçue par la source de sortie vérifie :

$$(17)$$

Le rendement $\eta = \frac{\mathcal{P}_s}{\mathcal{P}_e}$ vaut donc 100%. Ce résultat n'est pas surprenant car les interrupteurs sont idéaux et ne consomment donc aucune puissance.

7.5 Valeurs moyennes

Exprimons les valeurs moyennes $\langle u_e \rangle$ de la tension d'entrée u_e et $\langle i_s \rangle$ du courant de sortie i_s :

$$(18)$$

On en la relation :

$$(19)$$

Le rapport des tensions est l'inverse de celui des courants et est égal au rapport cyclique α . Celui-ci étant inférieur à 1, la tension moyenne en entrée est inférieure à celle de la sortie E . Le hacheur parallèle est donc aussi appelé *hacheur survolteur*.

Le rapport cyclique étant réglable, il est donc possible de régler la tension moyenne en sortie.

8 Application à la commande d'une machine à courant continu

8.1 Cadre de l'étude

On cherche à alimenter une machine à courant continu à l'aide d'une source de tension. On souhaite également pouvoir modifier la vitesse de rotation de la machine. Il faut donc utiliser un convertisseur permettant d'alimenter la machine à courant continu avec une tension E_{MCC} réglable, qui est directement proportionnelle à la vitesse de rotation Ω du rotor¹¹.

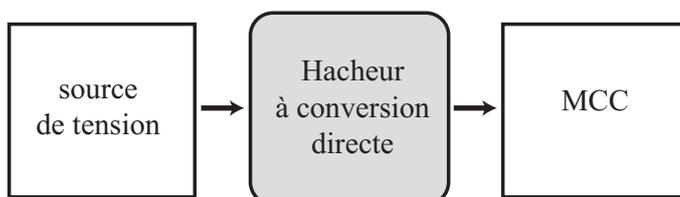


FIGURE 27: Commande d'une machine à courant continu.

Nous allons montrer que le hacheur série permet de réaliser cette conversion.

On se placera dans toute la suite dans le cas simplifié pour lequel la résistance de l'induit du moteur à courant continu est négligée. Pour renforcer l'inductance de l'induit, on rajoute une bobine en série. Nous noterons L l'inductance totale.

Etudions successivement le cas de la *traction*, dans lequel la MCC fonctionne en moteur, puis le cas du *freinage*, dans lequel la MCC fonctionne en génératrice.

Dans toute la suite, on se place en **régime stationnaire**, de sorte que la vitesse de rotation ω de la MCC est constante, ainsi que la tension à ses bornes, notée E_{MCC} .

8.2 Phase de traction

Nous nous plaçons dans le cas où le moteur est en charge, c'est à dire qu'il va consommer un courant i_{MCC} qui ne doit donc pas s'annuler. De plus, la MCC est placée en convention récepteur, de sorte que $E_{MCC} > 0$.

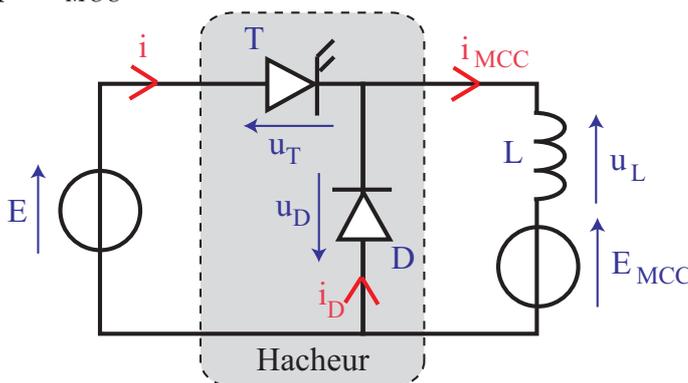


FIGURE 28: Schéma d'alimentation d'une machine à courant continu en phase de traction.

11. On rappelle que la f.e.m. aux bornes de la machine à courant continu est liée à la vitesse de rotation ω par la relation $e = -\Phi\Omega$, où Φ est une constante caractéristique de la machine à courant continu.

On utilise le montage de *hacheur série* de la figure ci-dessus. D est une diode et T un transistor commandé périodiquement avec une période T , de sorte que :

- Pour $t \in [0; \alpha T]$: T est fermé, ce qui conduit au **blocage de la diode D** car
- Pour $t \in [\alpha T; T]$: T est ouvert, la diode D devient alors **passante** car

a) **Formes d'ondes**

- Pour $t \in [0; \alpha T]$: $u_T =$ et $u_D =$ D'après la loi des mailles :

- Pour $t \in [\alpha T; T]$: $u_D =$ et $u_T =$ D'après la loi des mailles :

La MCC étant utilisée en moteur, la f.e.m. E_{MCC} s'oppose au courant i_{MCC} qui lui donne naissance d'après la loi de Lenz. On retrouve ainsi que $E_{MCC} > 0$ avec la convention du schéma.

Le courant i_{MCC} décroît donc nécessairement pendant la seconde phase de commutation car $\frac{di_{MCC}}{dt} = -\frac{E_{MCC}}{L} < 0$.

Le régime étant périodique, i_{MCC} doit nécessairement croître pendant la première phase ($t \in [0; \alpha T]$), et donc nécessairement :

Le hacheur série est donc bien toujours un dispositif *dévolteur*.

Par intégration des équations précédentes, le courant i_{MCC} est donné par :

$$i_{MCC} = \left\{ \begin{array}{l} \\ \\ \end{array} \right.$$

On peut en déduire les formes d'ondes de u_D , u_T , u_L , i_{MCC} et i qui sont représentées dans la figure ci-dessous.

Remarque : notons que la tension u_L est telle que les deux aires colorées dans la figure précédente sont égales car, le courant i_{MCC} étant périodique, la moyenne temporelle $\langle u_L \rangle$ de la tension u_L est nulle. En effet :

Ce résultat classique se généralise et est extrêmement utile en électronique de puissance :

La valeur moyenne de la dérivée d'un signal périodique est toujours nulle.

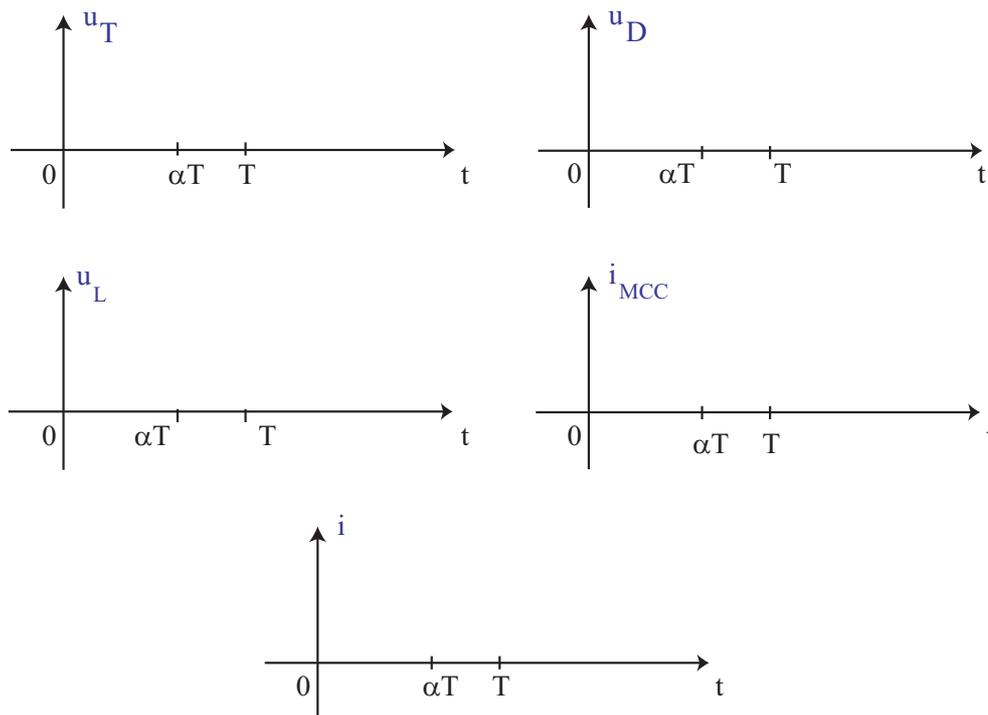


FIGURE 29: Formes d'ondes dans le cas de l'alimentation d'une machine à courant continu à l'aide d'un hacheur série.

b) Expression de E_{MCC} en fonction de E

D'après la loi des mailles :

En passant aux valeurs moyennes, on obtient simplement :

or $\langle u_D \rangle =$ et $\langle u_L \rangle =$, d'où :

On retrouve bien les propriétés de dévolteur du hacheur série. Cette relation montre que la vitesse de rotation du moteur, liée à E_{MCC} par la relation $E_{MCC} = \Phi\Omega$, est contrôlée électriquement par le rapport cyclique α .

c) Rendement

- La puissance moyenne \mathcal{P}_e fournie par la source d'entrée est donnée par :

Or la valeur moyenne $\langle i \rangle$ du courant i peut être déterminée graphiquement à partir de la forme d'onde du courant i en calculant l'aire sous la courbe pendant une période T . On obtient :

Donc finalement :

- La puissance moyenne \mathcal{P}_{MCC} reçue par la machine à courant continu est :

En utilisant à nouveau l'aire sous la forme d'onde i_{MCC} , on obtient :

$$\langle i_{MCC} \rangle =$$

Donc on en déduit :

- La puissance fournie par la source \mathcal{P}_e est donc égale à la puissance reçue par la machine à courant continu \mathcal{P}_{MCC} , et le **rendement du hacheur** vaut donc :

d) Ondulation du courant i_{MCC}

On appelle *ondulation* du courant i_{mCC} l'écart $\Delta i_{mCC} = I_{max} - I_{min}$.

D'après les équations déterminées précédemment décrivant l'évolution de i_{MCC} , on peut écrire, à $t = \alpha T$:

et on en déduit directement l'ondulation :

Plus l'ondulation de i_{MCC} est faible, plus l'induit de la machine à courant continu se comporte comme un récepteur idéal de courant. Nous constatons que :

- Δi_{MCC} est maximal lorsque le rapport cyclique vaut $\alpha =$
- Δi_{MCC} diminue si L
- Δi_{MCC} diminue si la fréquence de commutation $f = \frac{1}{T}$

Nous allons maintenant voir pourquoi il est préférable de limiter cette ondulation de courant au maximum, et donc pourquoi on rajoute en général une bobine de forte inductance dans le circuit, qui s'ajoute à l'inductance de l'induit.

e) Conduction interrompue

Notons I le courant moyen qui circule dans l'induit du moteur :

$$I = \langle i_{MCC} \rangle$$

D'après le chapitre sur la machine à courant continu, nous savons que le couple fourni par le moteur vaut :

Lorsque Γ est trop faible, par exemple lorsque le moteur fonctionne à vide, le courant moyen I peut devenir inférieur à l'ondulation du courant Δi_{MCC} , et le courant I_{min} devient négatif.

Or la diode D du hacheur interdit le changement de signe du courant i_{MCC} . Par conséquent, la diode se bloque et le courant i_L qui circule dans l'induit du moteur s'annule.

A partir d'un instant $t_1 \in [\alpha T; T]$, c'est à dire pendant la phase où la diode D est normalement passante, le courant i_{MCC} est nul et la tension u_D est égale à $-E$. Un tel régime de fonctionnement est appelé *régime de conduction discontinue*.

Les formes d'onde de i_{MCC} et u_D sont identiques à celles représentées précédemment, sauf pendant la phase de conduction discontinue, comprise entre t_1 et T , pour laquelle le courant i_{MCC} est nul, et la tension u_D vaut $-E$.

Evaluons la tension E_{MCC} :

La moyenne de la tension u_D vaut donc maintenant :

Or la moyenne de la tension aux bornes de la bobine est nulle en régime périodique, nous en déduisons :

La tension E_{MCC} est supérieure à la valeur αE obtenue en régime de conduction continue. La vitesse de rotation du moteur augmente donc, sans que celle-ci soit contrôlée par le rapport cyclique α , puisque la valeur de t_1 pour laquelle le courant dans l'induit s'annule intervient¹².

Le régime de conduction discontinu est donc à éviter car il est difficile à contrôler précisément.

8.3 Phase de freinage

En mouvement, le rotor de la machine à courant continu possède de l'énergie mécanique. Lors de la phase de freinage, cette énergie mécanique va pouvoir être convertie en énergie électrique. La machine à courant continu joue dans ce cas le rôle de génératrice. Il y a alors inversion du transfert de puissance : la machine fournit de la puissance à la source de tension en entrée.

Ceci peut se faire par inversion du courant circulant dans l'induit. Le courant algébrique i_{MCC} devient alors négatif. Le montage utilisé précédemment ne peut plus fonctionner car les interrupteurs sont unidirectionnels en courant.

Nous nous trouvons dans le cas où une source de courant alimente un récepteur de tension. Nous avons vu précédemment que le **hacheur parallèle** permettait de réaliser cette conversion.

12. On notera que $t_1 \in [\alpha T; T]$, et donc la tension aux bornes de la machine à courant continu ne diverge bien évidemment pas et reste toujours inférieure à E .

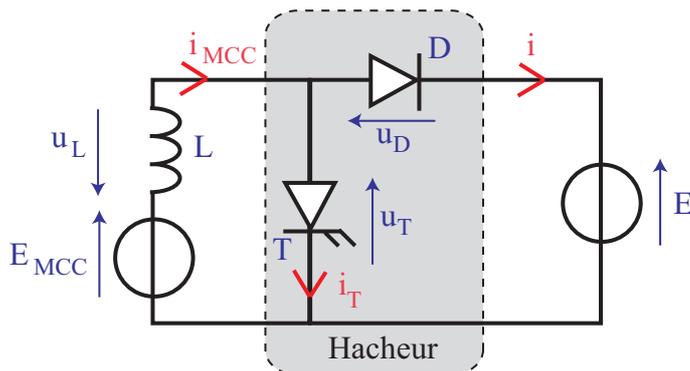


FIGURE 30: Schéma d'alimentation d'une machine à courant continu pendant la phase de freinage.

D est une diode et où T est un transistor commandé périodiquement avec une période T , de sorte que :

- Pour $t \in [0; \alpha T]$: T est fermé, ce qui conduit au blocage de la diode D .
- Pour $t \in [\alpha T; T]$: T est ouvert, la diode D devient alors passante.

a) Formes d'ondes

- Pour $t \in [0; \alpha T]$: $u_T = \quad$, $i_T = \quad$, $i = \quad$ et $u_D = \quad$. D'après la loi des mailles :

- Pour $t \in [\alpha T; T]$: $u_D = \quad$, $i = \quad$ et $u_T = \quad$. D'après la loi des mailles :

Pendant la première phase de commutation, le courant i_{MCC} croît d'après l'équation différentielle vérifiée par i_{MCC} . Comme expliqué précédemment, en régime périodique, le courant i_{MCC} diminue nécessairement pour $t \in [\alpha T; T]$. Nous avons donc nécessairement $u_L = L \frac{di_L}{dt} < 0$, et donc :

Le hacheur parallèle est bien un dispositif *survolteur*, comme nous l'avons vu précédemment.

Par intégration des équations précédentes, le courant i_{MCC} est donné par :

$$i_{MCC} = \begin{cases} \quad & \text{pour } t \in [0; \alpha T] \\ \quad & \text{pour } t \in [\alpha T; T] \end{cases}$$

On peut en déduire les formes d'ondes de u_D , u_T , u_L , i_{MCC} et i qui sont représentées dans la figure ci-dessous.

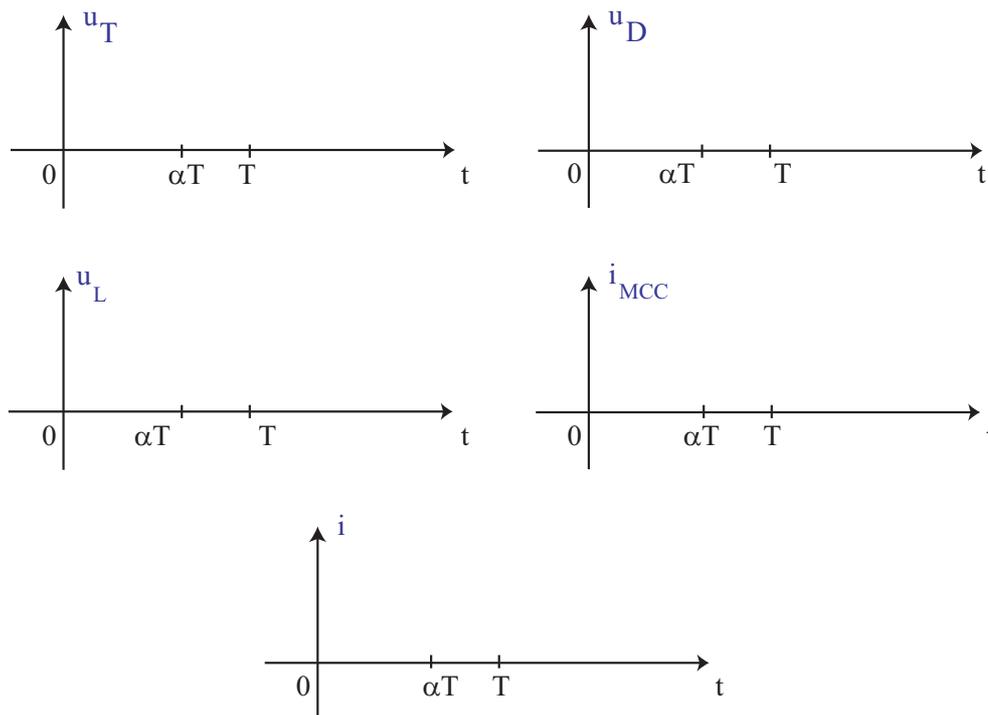


FIGURE 31: Formes d'ondes dans le cas de l'utilisation d'une machine à courant continu en génératrice lors d'un freinage, à l'aide d'un hacheur parallèle.

Remarque : notons à nouveau que la tension u_L est telle que les deux aires colorées dans la figure précédente sont égales car le courant i_{MCC} étant périodique, la moyenne temporelle $\langle u_L \rangle$ de la tension u_L est nulle.

b) Expression de E_{MCC} en fonction de E

D'après la loi des mailles :

En passant aux valeurs moyennes, on obtient simplement :

On a bien $E > E_{MCC}$, le hacheur est survolteur.

c) Rendement

• La puissance moyenne \mathcal{P}_{MCC} fournie par l'induit de la machine à courant continu est donnée par :

$$\mathcal{P}_{MCC} =$$

• La puissance moyenne \mathcal{P}_s reçue par la machine à courant continu est :

$$\mathcal{P}_s =$$

• La puissance fournie par la machine à courant continu \mathcal{P}_{MCC} est donc égale à la puissance reçue par la source de tension \mathcal{P}_s , et le **rendement du hacheur** vaut donc :

d) Taux d'ondulation

Le taux d'ondulation Δi_{MCC} du courant i_{MCC} s'obtient simplement à partir de l'expression du courant en fonction du temps lorsque $t = \alpha T$, lorsque $i_{MCC} = I_{max}$, d'où :

$$\Delta i_{MCC} = I_{max} - I_{min} =$$

Comme pour le hacheur série, il vaut mieux travailler à fréquence de commutation élevée et en rajoutant une inductance en série avec la machine à courant continu pour avoir un courant bien "lissé".

Remarque : Pendant les phases de traction et de freinage, nous avons utilisé deux convertis-

seurs différents. Dans la pratique, un seul convertisseur, réversible en courant, est employé. Il est composé d'interrupteurs bidirectionnels en courant issus de l'association en parallèle d'un interrupteur commandé et d'une diode.

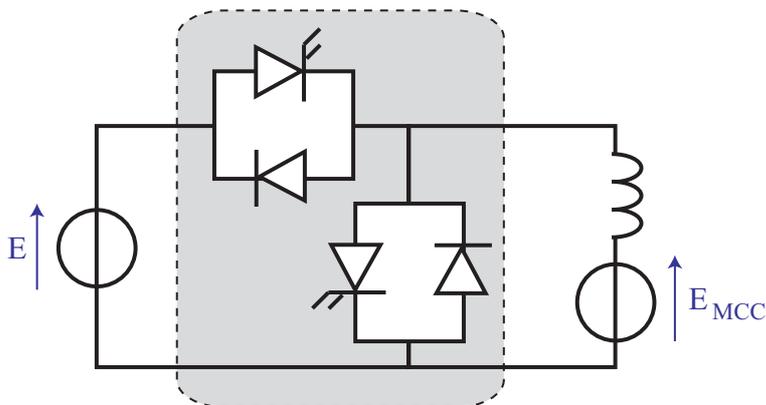


FIGURE 32: *Convertisseur réversible en courant.*