

Chap2 – Conversion électronique de puissance : Hacheurs

1. Principe de la conversion électronique de puissance

- 1.1. Ordres de grandeurs en électronique de puissance
- 1.2. Intérêt des convertisseurs électroniques à interrupteurs
- 1.3. Hacheurs, un cas particulier de conversion électronique

2. Sources d'entrée et de sortie impliquées dans la conversion

- 2.1. Source de tension – Source de courant – Sources idéales
- 2.2. Source réelle + (L ou C) = source presque idéale
- 2.3. Règles d'association des sources idéales
- 2.4. Structures possibles des hacheurs

3. Les interrupteurs électroniques

- 3.1. Interrupteur idéal
- 3.2. Interrupteur à commutation spontanée : fonction diode
- 3.3. Interrupteur à commutation commandée : fonction transistor
- 3.4. Unidirectionnalité des interrupteurs

4. Hacheur série (convertisseur direct)

- 4.1. Phases de fonctionnement – Chronogrammes
- 4.2. Identification de la nature des interrupteurs
- 4.3. Valeurs moyennes de tension, courant et puissance
- 4.4. Un mot sur le hacheur parallèle

5. Application à la commande en vitesse d'un moteur CC

- 5.1. Chronogrammes
- 5.2. Lien entre vitesse angulaire et rapport cyclique
- 5.3. Rendement
- 5.4. Ondulation du courant de sortie

6. Un mot sur les hacheurs à accumulation

Intro : Ce chapitre traite de la *conversion électronique de puissance*. L'idée est de transformer un signal électrique en un autre signal électrique, en modifiant au passage une des caractéristiques du signal (amplitude, fréquence, valeur moyenne, etc.). Lors de cette transformation, le but est d'obtenir le meilleur rendement possible en puissance.

1. Principe de la conversion électronique de puissance

1.1. Ordres de grandeurs en électronique de puissance

Jusqu'à présent, on a surtout étudié l'électronique de commande. Le but était de former ou transformer un signal de faible puissance (un AO délivre moins de 1W). Lors d'une amplification, on recherchait un fort gain, sans s'intéresser au rendement en puissance.

L'objectif premier de la conversion de puissance est d'assurer un rendement maximal, les gains réalisés étant généralement moindres qu'en électronique de signal. Pour alimenter les moteurs électriques des appareils électroménagers, il faut fournir des puissances de l'ordre de qq 100 W.

Pour l'alimentation des moteurs électriques d'un train, la puissance peut atteindre le Mégawatt...

1.2. Intérêt des convertisseurs électroniques à interrupteurs

Considérons un cas simple : une alimentation continue délivre 12V, mais on souhaite abaisser cette tension à 3V pour alimenter une ampoule (résistance R) ne pouvant supporter une tension supérieure. L'idée la plus simple consiste à insérer en série une résistance 3R.

➤ Calculer le rendement de ce convertisseur (adaptateur de tension continue). Conclure.

Pour obtenir de bons rendements, la *conversion statique de puissance* (par opposition à électromécanique, où il y a mouvement mécanique) repose sur l'utilisation d'interrupteurs, et l'absence d'éléments résistifs. En effet, un interrupteur fermé est presque assimilable à un fil, et consomme alors une puissance nulle. Ouvert, il ne consomme pas de puissance non plus. Il est alors possible d'atteindre des rendements proches de 100%.

1.3. Hacheurs, un cas particulier de conversion électronique

Un signal « de nature continue » est un signal de valeur moyenne non nulle.

Un signal « de nature alternative » est un signal de valeur moyenne nulle.

On peut distinguer 4 classes de convertisseurs statiques de puissance :

- les redresseurs : d'alternatif à continu
- **les hacheurs** : de continu à continu
- les onduleurs : de continu à alternatif
- les gradateurs : d'alternatif à alternatif

Seuls les hacheurs sont au programme. L'idée consiste à « découper » une *tension continue d'entrée* pour la transformer en une *tension de sortie créneau dissymétrique*, dont la valeur moyenne peut être réglée en jouant sur le rapport cyclique.

L'exemple d'application au programme est l'étude d'un « hacheur série » permettant de convertir une tension continue d'entrée délivrée par un générateur (type Thévenin), en une tension « hachée » qui alimente un moteur à courant continu. Le convertisseur permet alors de commander le moteur en vitesse.

Remarque : Il peut paraître surprenant d'alimenter un moteur à courant *continu* par une tension créneau dissymétrique. On s'arrange en fait pour que la période du hachage soit nettement inférieure au temps caractéristique de mise en rotation du moteur. *Le moteur agit donc comme un passe-bas, et seule la valeur moyenne du créneau est importante.*

2. Sources d'entrée et de sortie impliquées dans la conversion

2.1. Source de tension – Source de courant – Sources idéales

Le rôle d'une « source de tension » est d'imposer entre ses bornes une tension indépendante du courant qui la traverse. Le rôle d'une « source de courant » est d'imposer dans sa branche un courant indépendant de la tension à ses bornes. En pratique, les sources ne réalisent ces objectifs que dans un domaine de fonctionnement limité.

Définition d'une source idéale de tension

Une source idéale de tension impose une tension à ses bornes indépendamment du courant qui la traverse.

Définition d'une source idéale de courant

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

Attention : *Une source ne fournit pas nécessairement de la puissance, elle peut aussi en recevoir.*

L'idée principale derrière la notion de source de tension (de courant) étant l'indépendance de la tension (du courant) vis-à-vis du courant (de la tension), tout dipôle réalisant cette fonction de manière approximative pourra être modélisé par une source.

En ayant toujours en tête que la période de hachage sera toujours choisie plus courte que les temps de réponse des circuits étudiés, on peut alors donner une définition des sources plus adaptée à l'étude des hacheurs.

*Une source de tension est un dipôle ne subissant pas de discontinuité de tension (lors discontinuité de courant)
Une source de courant est un dipôle ne subissant pas de discontinuité de courant (lors discontinuité de tension)*

- Quel composant faudrait-il ajouter (en série, ou en //) à une résistance pour en faire une source de courant ?
- Idem pour en faire une source de tension ?
- Expliquer alors pourquoi l'induit d'une MCC peut être modélisé par une source de courant.

2.2. Source réelle + (L ou C) = source presque idéale

Les alimentations continues sont généralement modélisables par un générateur de Thévenin (ou de Norton).

- Dans le cas du générateur de Thévenin, montrer qu'une discontinuité en courant (imposée par le reste du circuit) provoque une discontinuité de la tension délivrée par le générateur. Conclure.
- Montrer qu'en insérant un condensateur en parallèle sur le générateur, on tend à faire du générateur une source de tension « plus idéale ».

Pour parfaire un générateur de Norton, il suffit de placer une inductance en série avec le générateur.

2.3. Règles d'association des sources idéales

- Démontrer les assertions suivantes.

Règle de connexion entre sources de tension

Deux sources de tensions ne doivent pas être branchées en parallèle l'une sur l'autre.

Corollaire: une source de tension ne doit pas être mise en court-circuit.

Règle de connexion entre sources de courant

Deux sources de courant ne doivent pas être branchées en série l'une avec l'autre.

Corollaire: une source de courant ne doit pas être mise en circuit ouvert

2.4. Structures possibles des hacheurs

Le convertisseur de puissance est un quadripôle inséré entre une *source d'entrée* et une *source de sortie*.

On peut distinguer deux types de hacheurs : les *convertisseurs directs* et les *convertisseurs à accumulation*.

Les premiers ne sont constitués que d'interrupteurs. Lors de la phase de transfert de puissance, la source d'entrée et la source de sortie sont directement reliées en série. Ces hacheurs ne permettent donc de relier que des sources de nature différente :

- tension – courant : hacheur série
- courant – tension : hacheur parallèle

- Dans le cas du hacheur série, expliquer pourquoi au moins deux interrupteurs sont nécessaires (un montage avec un simple interrupteur en série ne suffit pas).

Les seconds relient des sources de même nature : tension – tension ; courant – courant. La liaison entre les sources ne pouvant être directe, il faut ajouter aux interrupteurs un dispositif de stockage d'énergie : une inductance L ou un condensateur C. Lors de la phase 1, L ou C stocke de l'énergie délivrée par l'entrée. Lors de la phase 2, L ou C fournit cette énergie à la source de sortie.

3. Les interrupteurs électroniques

Les interrupteurs électroniques sont des composants à base de semi-conducteurs. On notera que ces derniers permettent de réaliser des fonctions plus complexes que ceux fabriqués à partir de conducteurs ohmiques (R, L, C par exemple). L'AO est constitué de composants à semi-conducteurs.

3.1. Interrupteur idéal

Un interrupteur idéal ne consomme pas de puissance :

- ouvert : aucun courant ne le traverse, $i = 0$
- fermé : il est assimilé à un fil sans résistance, $u = 0$

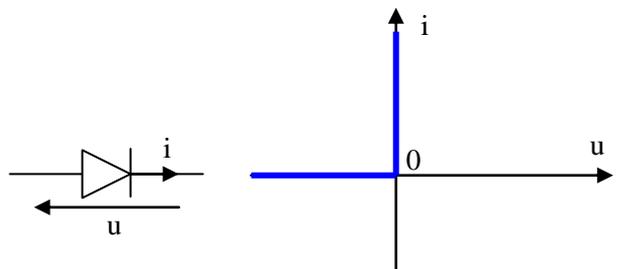
Le passage d'un état à l'autre s'appelle *commutation* :

- d'ouvert à fermé : *fermeture* ou *amorçage*
- de fermé à ouvert : *ouverture* ou *blocage*

3.2. Interrupteur à commutation spontanée : fonction diode

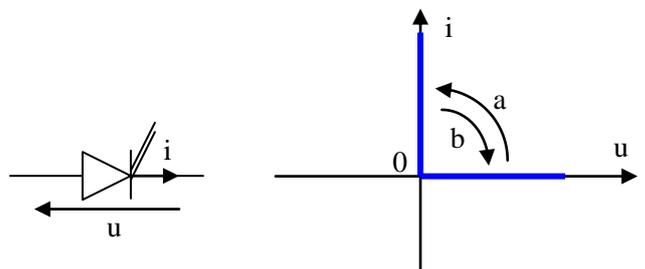
La diode est un interrupteur à commutation spontanée. C'est l'état du reste du circuit qui provoque la commutation :

- passage bloquée à passante : la tension u à ses bornes tend à devenir positive
- passage passante à bloquée : le courant i tend à devenir négatif



3.3. Interrupteur à commutation commandée : fonction transistor

Le transistor est un interrupteur à commutation commandée. C'est un 'circuit de commande' extérieur au circuit étudié qui provoque la commutation.



On notera le critère qui permet de choisir entre les deux types de commutation.

Lorsque le transistor est bloqué, la tension à ses bornes est positive ; dans le cas de la diode, elle est négative

3.4. Unidirectionnalité des interrupteurs

Les deux types d'interrupteurs sont *unidirectionnels*. Le courant ne peut les traverser que dans un sens.

Il est possible d'associer deux interrupteurs en parallèle pour réaliser un interrupteur bidirectionnel

On peut aussi concevoir des hacheurs à 4 interrupteurs (unidirectionnels) pour permettre une conversion de puissance réversible : puissance échangée de l'entrée vers la sortie, puis de la sortie vers l'entrée.

4. Hacheur série (convertisseur direct)

4.1. Phases de fonctionnement – Chronogrammes

Le hacheur série est une structure à deux interrupteurs, reliant une source de tension en entrée à une source de courant en sortie. Ces deux sources idéalisées peuvent modéliser par exemple un générateur de Thévenin en entrée (amélioré par un C en parallèle) et l'induit d'un moteur CC en sortie.

On se place *en régime commuté permanent* : les signaux sont périodiques de période T. On distingue 2 phases :

- phase 1 $[0, \alpha T]$: les sources sont connectées en série, il y a transfert de puissance
- phase 2 $[\alpha T, T]$: les sources sont déconnectées l'une de l'autre, il n'y a pas de transfert de puissance

α s'appelle le *rapport cyclique*.

- Dessiner les chronogrammes (ou « formes d'onde ») de la tension et du courant d'entrée
- Idem pour la sortie

4.2. Identification de la nature des interrupteurs

- En repérant les points de fonctionnement des deux interrupteurs lors de chaque phase, identifier leur nature

On appelle ce convertisseur un *hacheur série* car l'interrupteur commandé est en série avec la source d'entrée.

4.3. Valeurs moyennes de tension, courant et puissance

- Déterminer les valeurs moyennes des tensions et des courants, en entrée et en sortie.
- Expliquer pourquoi on qualifie ce hacheur de « dévolteur ».
- Déterminer la puissance moyenne fournie par l'entrée, et celle absorbée par la sortie. Conclure.
- Déterminer le rendement de cette conversion de puissance. Conclure.

Lecture d'une valeur moyenne sur un chronogramme

A partir des chronogrammes, on trouve la valeur moyenne d'un signal à partir de l'aire située sous la courbe.

Valeur moyenne de la dérivée d'un signal périodique

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

- Démontrer cette assertion.

4.4. Un mot sur le hacheur parallèle

Lorsque l'entrée est une source de courant et la sortie une source de tension, l'interrupteur commandé doit se trouver en parallèle sur l'entrée. Ce convertisseur direct est un *hacheur parallèle*.

5. Application à la commande en vitesse d'un moteur CC

On étudie la phase de traction d'un moteur CC, commandé en vitesse par un hacheur série : on modélise l'entrée par une source idéale de tension, et l'induit par une inductance en série avec la fêm du moteur (résistance de l'induit est négligée).

Notons qu'il est possible d'imaginer un dispositif permettant de récupérer la puissance électrique fournie par l'induit lors d'une phase de freinage : le couple de Laplace est alors résistant, et la MCC fonctionne en génératrice. Cette situation nécessite une structure en hacheur parallèle.

5.1. Chronogrammes

On se place en régime établi, le moteur tourne avec une vitesse angulaire constante Ω positive.

Le hacheur fonctionne donc en régime commuté établi. On distingue deux phases :

- phase 1 : l'interrupteur commandé est fermé
- phase 2 : l'interrupteur commandé est ouvert

On note I_{min} et I_{max} respectivement les valeurs minimale et maximale du courant de sortie (traversant l'induit).

- Durant la phase 1 :
 - montrer que la diode est bloquée
 - Quel est le signe de la fém de l'induit ? la MCC fonctionnant en moteur, quel est le sens réel du courant traversant l'induit ?
- Montrer que dès le début de la phase 2, la diode devient passante. Le hachage étant de 'haute fréquence', expliquer pourquoi la diode reste passante durant toute la phase 2.
- Etablir les EDiff vérifiées par le courant de sortie lors de chaque phase. Montrer que ce courant baisse lors de la phase 2 et augmente donc nécessairement lors de la phase 1. En déduire son expression mathématique lors de chaque phase, en fonction notamment de I_{min} et I_{max} .
- Tracer les chronogrammes :
 - des tensions aux bornes des interrupteurs
 - de la tension de sortie
 - des courants d'entrée et de sortie

5.2. Lien entre vitesse angulaire et rapport cyclique

- Appliquer la loi des mailles à l'induit. En prenant la valeur moyenne de l'expression, exprimer la fém (donc la vitesse angulaire) de l'induit en fonction de la tension d'entrée et du rapport cyclique. Conclure.

5.3. Rendement

- Calculer la puissance moyenne fournie par l'entrée, puis la puissance moyenne reçue par la fém de l'induit (la puissance utile, puissance électromotrice).
- En déduire le rendement. Conclure.

5.4. Ondulation du courant de sortie

Définition de l'ondulation

*L'ondulation du courant de sortie est définie par $\Delta i_s = I_{max} - I_{min}$.
Plus l'ondulation est faible, plus la sortie se comporte comme une source idéale de courant.*

- Déterminer l'expression de l'ondulation du courant de sortie, alimentant l'induit.
- Comment rendre l'ondulation minimale ?

6. Un mot sur les hacheurs à accumulation

La conversion de puissance entre sources de même nature utilise L ou C pour stocker temporairement de l'énergie.

Exemple d'un hacheur à accumulation inductive :

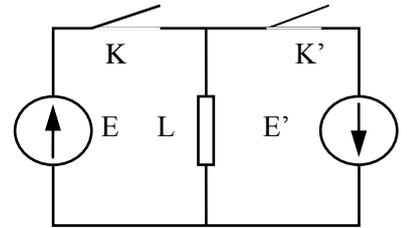
On considère le hacheur ci-contre dans lequel tous les éléments sont idéaux.

$E = 50 \text{ V}$; $T = 50 \mu\text{s}$; $\alpha = 0,7$; $L = 10 \text{ mH}$.

La commande des interrupteurs est périodique et s'effectue comme suit :

* de $t = 0$ à $t = \alpha.T$ K est fermé et K' ouvert ;

* de $t = \alpha.T$ à $t = T$ K' est fermé et K ouvert.



On suppose le régime permanent établi et on note I_m la valeur de l'intensité dans la bobine au début d'une période.

- Expliquer qualitativement le rôle de l'inductance dans le fonctionnement du hacheur.
- Exprimer, par deux relations indépendantes faisant intervenir d'une part E et d'autre part E', l'intensité I_M lors du blocage de K.
- En déduire une relation entre E, α et E'. Calculer E'.
- La puissance moyenne échangée entre les deux sources est $P = 70 \text{ W}$. Déterminer I_m et I_M .

On désire définir quelles fonctions de commutation peuvent être utilisées.

- Tracer l'évolution de l'intensité dans la bobine et dans chaque interrupteur avec les valeurs numériques. Représenter dans le plan tension-courant les zones de fonctionnement de chaque interrupteur K et K'.
- En déduire les fonctions de commutation à utiliser.

Réponses : b) $E' = \alpha E / (1 - \alpha)$; c) $I_m = 1,9 \text{ A}$; $I_M = 2,1 \text{ A}$; d) K = Tr, K' = D.

Notions clefs

Savoirs :

- Ordres de grandeurs de élec puissance + Intérêt des hacheurs
- Définition sources idéales + règles de connexion
- Comment améliorer une source non-idéale
- Définition interrupteur idéal + fonction diode et transistor (caractéristique $i = f(u)$)

Savoirs faire :

- Résoudre les exemples d'application du cours (avec énoncé)
- Calculer une valeur moyenne : avec intégrales (math) ou graphiquement (aire sous courbe)