

# Conversion de puissance 4

## Conversion électronique statique

### COMPÉTENCES

A la fin de ce chapitre, je saurai :

- Citer des exemples illustrant la nécessité d'une conversion de puissance électrique.
- Décrire l'architecture générale d'un convertisseur électronique de puissance : générateur, récepteur, processeur de puissance utilisant des interrupteurs électroniques, commande des fonctions de commutation.
- Décrire la caractéristique idéale courant-tension de la diode.
- Décrire la caractéristique idéale courant-tension du transistor.
- Définir les notions de sources de courant et de tension.
- Expliquer le rôle des condensateurs et des bobines comme éléments de stockage d'énergie assurant le lissage de la tension ou de l'intensité à haute fréquence.
- Caractériser les sources par leur réversibilité en tension, en intensité, en puissance et citer des exemples.
- Citer les règles d'interconnexions entre les sources.
- Expliquer le fonctionnement d'une cellule élémentaire à deux interrupteurs assurant le transfert d'énergie entre une source de courant et une source de tension.
- Tracer des chronogrammes.
- Exploiter le fait que la moyenne d'une dérivée est nulle en régime périodique établi.
- Calculer des moyennes de fonctions affines par morceaux.
- Utiliser un bilan de puissance moyenne pour établir des relations entre les tensions et les intensités.
- Justifier le choix des fonctions de commutation pour un hacheur série assurant l'alimentation d'un moteur à courant continu à partir d'un générateur idéal de tension continue.
- Exprimer les valeurs moyennes des signaux.
- Calculer l'ondulation en intensité dans l'approximation d'un hachage haute fréquence réalisant une intensité affine par morceaux.
- Décrire la structure en pont à quatre interrupteurs et les séquences de commutation permises pour un onduleur.
- Étudier, pour un générateur de tension continue et une charge (R,L), la réalisation d'une intensité quasi-sinusoidale par modulation de largeur d'impulsion.
-  Mettre en œuvre un convertisseur statique.

# RÉSUMÉ DU COURS

## 1 L'énergie électrique

L'énergie électrique peut se présenter sous plusieurs formes.

### 1.1 Présentation alternative

En présentation alternative, le courant et la tension sont de moyenne nulle  $\langle u(t) \rangle = 0$  ;  $\langle i(t) \rangle = 0$ . La puissance moyenne peut être non nulle  $\langle u(t)i(t) \rangle$  peut être non nulle.

#### EXEMPLE

L'électricité produite par les centrales nucléaires et hydroélectriques est produite par des alternateurs, elle est donc en présentation alternative.

#### EXEMPLE

L'électricité du secteur et donc reçue par tous les appareils électroménagers est en présentation alternative.

### 1.2 Présentation continue

En présentation continue  $\langle u(t) \rangle \neq 0$  ou  $\langle i(t) \rangle \neq 0$ .

#### EXEMPLE

Les piles, accumulateurs et panneaux photovoltaïques produisent de l'électricité en présentation continue.

#### EXEMPLE

Les voitures, électrolyseurs et certains TGV consomment de l'électricité en présentation continue.

### 1.3 Ordres de grandeurs

#### APPLICATION

Associer les ordres de grandeurs de puissances et les émissions de CO<sub>2</sub> aux systèmes de production suivante.

400 W	•	•	barrage	•	•	< 10 gCO <sub>2</sub> éq/kWh
2 MW	•	•	centrale au charbon	•	•	< 10 gCO <sub>2</sub> éq/kWh
100 MW	•	•	centrale au gaz	•	•	< 10 gCO <sub>2</sub> éq/kWh
100 MW	•	•	éolienne	•	•	55 gCO <sub>2</sub> éq/kWh
100 MW	•	•	panneau solaire (1 m <sup>2</sup> )	•	•	400 gCO <sub>2</sub> éq/kWh
1 GW	•	•	réacteur nucléaire	•	•	1000 gCO <sub>2</sub> éq/kWh

## 2 Convertisseur électronique statique de puissance

### 2.1 Structure générale

Un convertisseur électrique statique est constitué d'interrupteurs intégrés dans un circuit de puissance. Les interrupteurs peuvent être commandés par un circuit de commande.

Le circuit de commande fonctionne avec des petites tensions (de l'ordre de 5 V) et des petits courants (de l'ordre de 10 mA).



## SCHÉMA Structure générale d'un convertisseur

Les convertisseurs portent des noms différents en fonction de la présentation en entrée et en sortie.

## SCHÉMA Nommage des convertisseurs statiques

## 2.2 Exemple introductif : conversion continu/continu

Dans cet exemple, on souhaite faire varier la tension aux bornes d'un résistor à partir d'un générateur de tension idéal.

### EXEMPLE

On souhaite faire varier le rétroéclairage du tableau de bord d'une voiture qui est alimenté par la batterie.

### 2.2.1 Première idée : potentiomètre

On pourrait penser utiliser un montage un potentiomètre pour faire varier la tension. Un potentiomètre est l'association en série de deux résistors de résistances  $kR$  et  $(1 - k)$  avec  $k$  réglable entre 0 et 1.

### SCHÉMA Montage avec le potentiomètre

### APPLICATION

Exprimer  $u$  en fonction de  $E$ ,  $k$ ,  $R$  et  $r_0$ . Quelles sont les valeurs maximales et minimales atteintes par  $u$ ? Pour quelle valeur de  $k$  sont-elles atteintes?

Ce système remplit son rôle mais il consomme de l'énergie.

### 2.2.2 Deuxième idée : utiliser un composant ne recevant pas de puissance

Afin d'avoir un bon rendement, on peut envisager d'utiliser un dipole ne recevant pas de puissance ( $u = 0$  ou  $i = 0$ ).

Un dipole ne recevant jamais de puissance est un interrupteur.



## SCHÉMA Caractéristique d'un interrupteur

## SCHÉMA Montage avec un interrupteur

Pour faire varier la tension aux bornes du résistor, on ouvre et on ferme périodiquement l'interrupteur.

La puissance arrivant au résistor peut être modulée grâce à la **modulation de la largeur d'impulsion** : l'interrupteur est fermé une plus ou moins grande partie du temps.

## Raport cyclique

*Hypothèses* L'ouverture et la fermeture de l'interrupteur est périodique

*Avec*

$$\alpha = \frac{\Delta t_f}{T}$$

- $\alpha$  le rapport cyclique (sans unité)
- $\Delta t_f$  la durée durant laquelle l'interrupteur est fermé à chaque période (en s)
- $T$  la période (en s)

Le rapport cyclique est la proportion du temps où l'interrupteur est fermé.

## APPLICATION

Tracer le chronogramme de la tension aux bornes du résistor pour  $\alpha = 0$ ,  $\alpha = 0,2$ ,  $\alpha = 0,5$  et  $\alpha = 1$ .

## APPLICATION

Exprimer la valeur moyenne de la tension aux bornes du résistor en fonction de  $E$  et  $\alpha$ .

Ce système permet de faire varier la tension moyenne aux bornes du résistor sans perte de puissance.

## 2.3 Cahier des charges et structure d'un convertisseur

Le cahier des charges d'un convertisseur est le suivant.

- Pas de consommation d'énergie, donc un rendement  $\eta = 1$ .
- Fonctionnement périodique.

Un convertisseur électrique statique est constitué d'interrupteurs, de bobines et de condensateurs.

Les interrupteurs régulent le flux énergétique.

Les condensateurs et les bobines stockent l'énergie puis la restitue périodiquement. Les condensateurs et les bobines servent à lisser la tension ou le courant.

## 3 Dipôles de types sources de tension ou de courant

### 3.1 Dipôles de type source de tension

#### 3.1.1 Source de tension idéale

Une source de tension idéale produit une tension indépendante du courant. Cette tension peut être continue ou alternative.



### SCHÉMA Caractéristique d'une source de tension idéale

### 3.1.2 Générateur de Thévenin

Dans le modèle de Thévenin, le générateur de tension comporte une résistance interne.

### SCHÉMA Générateur de Thévenin

### APPLICATION



Déterminer la caractéristique du générateur de Thévenin.

### APPLICATION



Si le courant augmente en passant de  $i$  à  $i + \Delta i$ , la tension passe de  $u$  à  $u + \Delta u$ . Déterminer  $\Delta u$  en fonction de  $R$  et  $\Delta i$ .

### 3.1.3 Générateur de type source de tension

Afin d'améliorer le générateur de Thévenin, on peut lui associer en parallèle un condensateur.

### SCHÉMA Amélioration d'un générateur de Thévenin

### APPLICATION



En régime stationnaire, exprimer  $u$  en fonction de  $i$ ,  $R$  et  $E$ . Si le courant passe de  $i$  à  $i + \Delta i$  en une petite durée  $\Delta t$ , quelle est la variation de tension  $\Delta u$  ?

Si la capacité du condensateur est suffisamment grande<sup>1</sup>, la tension aux bornes de la source est quasiment constante.

On appelle **dipole de type source de tension** un dipole qui présente à ses bornes une capacité de forte valeur. La tension aux bornes d'un dipole de type source de tension varie peu autour de sa valeur moyenne.

### EXEMPLE

### SCHÉMA Dipôles de type source de tension

<sup>1</sup>Précisément, si  $RC \gg \Delta t$ .



#### EXEMPLE

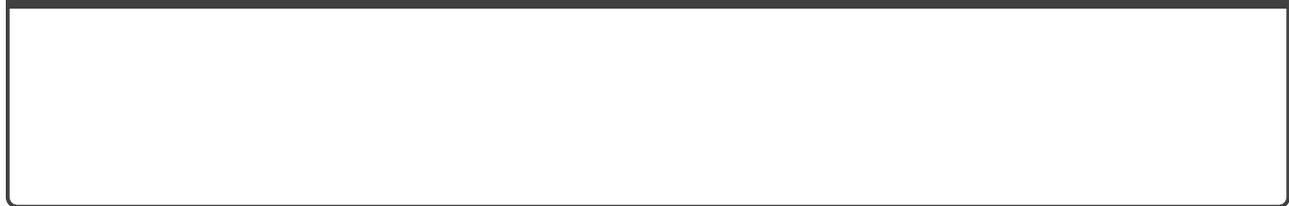
Les piles et les batteries sont des dipôles de type source de tension.

### 3.2 Dipole de type source de courant

Par analogie avec la partie précédente, un **dipole de type source de courant** est un dipole qui présente, en série, une inductance de forte valeur. Le courant dans un dipole de type source de courant varie peu autour de sa valeur moyenne.

#### EXEMPLE

##### SCHÉMA Dipôles de type source de courant



#### EXEMPLE

Les machines à courant continu, et les machines synchrones sont des dipôles de type source de courant.

### 3.3 Réversibilité des sources

#### 3.3.1 Réversibilité en tension

Une source est **réversible en tension** si, pour un courant donné, la tension à ses bornes peut être positive ou négative.

#### EXEMPLE

Dans une machine à courant continu, le couple étant fixé, la machine peut tourner dans un sens ou dans l'autre suivant si elle est en fonctionnement moteur ou générateur. Une machine à courant continu est donc réversible en tension.

Une source de courant idéale est réversible en tension.

#### 3.3.2 Réversibilité en courant

Une source est **réversible en courant** si, pour une tension donnée, le courant la traversant peut être positif ou négatif.

#### EXEMPLE

Dans une machine à courant continu, la vitesse angulaire étant fixée, la machine peut subir un couple moteur ou résistant suivant si elle est en fonctionnement moteur ou générateur. Une machine à courant continu est donc réversible en courant.

Une source de tension idéale est réversible en courant.

#### 3.3.3 Réversibilité en puissance

Une source est **réversible en puissance** si la puissance qu'elle reçoit peut être positive ou négative.

#### EXEMPLE

Une machine à courant continu peut fonctionner en moteur (récepteur de puissance électrique) ou en générateur (générateur de puissance électrique).

Une source de tension idéale et une source de courant idéale sont réversibles en puissance.



### 3.4 Règles d'interconnexion des sources

Il n'est pas possible d'associer deux sources de tension en parallèle car chacune va « essayer » d'imposer sa tension ce qui peut conduire à la destruction d'une ou des deux sources.

Il n'est pas possible d'associer deux sources de courant en série car chacune va « essayer » d'imposer son ce qui peut conduire à la destruction d'une ou des deux sources.

Il est possible de connecter directement une source de tension et une source de courant.

#### SCHÉMA Interconnexion des sources

### 3.5 Structure d'un convertisseur direct

Un **convertisseur direct** est un convertisseur ne comportant que des interrupteurs.

Un convertisseur direct s'utilise nécessairement entre un dipole de type source de tension et un dipole de type source de courant.

#### APPLICATION

En distinguant les cas, montrer qu'il n'est pas possible de concevoir un convertisseur direct ne comportant qu'un seul interrupteur.

Un convertisseur direct utilise au minimum deux interrupteurs. Le convertisseur direct à deux interrupteurs s'appelle cellule élémentaire de commutation.

#### SCHÉMA Cellule élémentaire de commutation

#### APPLICATION

Montrer que lorsqu'un interrupteur est fermé, l'autre est nécessairement ouvert.

Dans la cellule élémentaire de commutation, les interrupteurs ont un fonctionnement **complémentaire** : lorsqu'un est ouvert, l'autre est fermé.

## 4 Interrupteurs électroniques

Les interrupteurs constituant les convertisseurs ne sont pas des interrupteurs manuels mais des interrupteurs électroniques.

### 4.1 Interrupteur idéal

Un interrupteur idéal ne reçoit pas de puissance.



Lorsqu'un interrupteur est fermé, on dit qu'il est **passant**, le courant peut passer et la tension à ses bornes est nulle. Lorsqu'un interrupteur est ouvert, on dit qu'il est **bloqué**, le courant est nul.

Une interrupteur à **commutation spontanée** devient spontanément passant ou bloqué en fonction du courant ou de la tension dans le circuit de puissance.

Un interrupteur à **commutation commandée** peut devenir passant ou bloqué sur commande d'un circuit de commande<sup>2</sup>.

## 4.2 La diode



FIG. 1 : Photographies de 3 diodes.

La **diode** est un interrupteur **unidirectionnel** (elle ne laisse passer le courant que dans un sens) à commutation spontanée.

## 4.3 Le transistor

Le transistor est un interrupteur **unidirectionnel** à commutation commandée à l'amorçage et au blocage<sup>3</sup>.

<sup>2</sup>La commande peut se faire en tension, par exemple pour un MOSFET ou en courant, par exemple pour un transistor bipolaire.

<sup>3</sup>On peut lui commander de passer de l'état passant à l'état bloqué et de l'état bloqué à l'état passant.



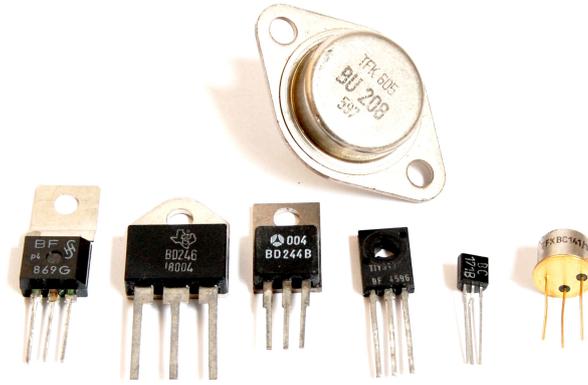


FIG. 2 : Photographies de transistors

SCHÉMA Symbole et caractéristique du transistor



## 5 Hacheur série

### 5.1 Présentation

Le hacheur série (ou hacheur dévolteur) est un convertisseur direct dont la source est une source de tension et la charge une source de courant. Le hacheur série est constitué d'une cellule élémentaire de commutation.

SCHÉMA Hacheur dévolteur



Les deux interrupteurs ont un fonctionnement complémentaire et sont commandés de façon périodique par un circuit de commande qui ne sera pas étudié.

	$K_1$	$K_2$
$0 \leq t < \alpha T$	Fermé	Ouvert
$\alpha T \leq t < T$	Ouvert	Fermé

### 5.2 Étude avec des sources idéales

On s'intéresse ici au cas où la source de tension et la source de courant sont des sources continues idéales.



### 5.2.1 Chronogrammes

#### APPLICATION

10

Déterminer  $u_1$ ,  $u_s$ ,  $i_e$ , et  $i_2$  en fonction de  $E$  et  $I$  entre 0 et  $\alpha T$  puis entre  $\alpha T$  et  $T$ .

#### SCHÉMA Chronogrammes de $u_s$ et $i_e$

### 5.2.2 Nature des interrupteurs

#### APPLICATION

11

Placer  $u_1$  et  $i_e$  sur une caractéristique et en déduire la nature de  $K_1$ . Faire de même pour  $K_2$ .

$K_1$  est un transistor.  $K_2$  est une diode en convention inverse.

#### SCHÉMA Hacheur

### 5.2.3 Valeurs moyennes

#### Valeur moyenne

12

*Hypothèses* Le régime est périodique

*Avec*

$$\langle s \rangle = \frac{\mathcal{A}}{T}$$

- $\langle s \rangle$  la valeur moyenne de  $s$
- $\mathcal{A}$  l'aire sous la courbe de  $s(t)$  sur une période
- $T$  la période de  $s$

#### APPLICATION

12

Déterminer la valeur moyenne de  $i_e$  et de  $u_s$ .

Le hacheur série s'appelle hacheur dévolteur car la valeur moyenne de la tension de sortie est inférieure à  $E$ .



## 5.2.4 Bilan de puissance

### APPLICATION

13

Déterminer la valeur moyenne de la puissance en entrée. Faire de même pour la puissance en sortie.

Le hacheur série ne consomme pas de puissance en moyenne. Le rendement du hacheur série est  $\eta = 1$ .

## 5.3 Application à la commande d'une machine à courant continu

On s'intéresse ici au cas où la source de tension est continue et idéale et la source de courant est un moteur à courant continu dont on néglige la résistance interne.

### SCHEMA Moteur à courant continu alimenté par un hacheur

On se place dans le cas d'une conduction continue ( $i_s(t) > 0$ ). On suppose la vitesse angulaire  $\Omega$  constante, la force contre-électromotrice  $E_{cem}$  est donc constante elle-aussi.

### 5.3.1 Chronogrammes

#### APPLICATION

14

Déterminer l'équation différentielle vérifiées par  $i_s$  entre 0 et  $\alpha T$  puis entre  $\alpha T$  et  $T$ . Tracer le chronogramme de  $u_s$ ,  $u_L$ ,  $i_s$  et  $i_e$ .

### 5.3.2 Valeurs moyennes

#### Valeur moyenne d'une dérivée

15

*Hypothèses* En régime périodique.

$$\left\langle \frac{ds}{dt} \right\rangle = 0$$

#### APPLICATION

16

Déterminer la valeur moyenne de  $i_s$ ,  $i_e$ ,  $u_s$ ,  $u_L$  et  $E_R$  en fonction de  $\alpha$ ,  $E$ ,  $i_{\max}$  et  $i_{\min}$ . En déduire la vitesse angulaire du moteur  $\Omega$  en fonction de  $\Phi_0$ ,  $\alpha$  et  $E$ .



### 5.3.3 Ondulation du courant de sortie

#### Ondulation

$$\Delta s = s_{\max} - s_{\min}$$

Avec

- $\Delta s$  l'ondulation de  $s$
- $s_{\max}$  la valeur maximale de  $s$
- $s_{\min}$  la valeur minimale de  $s$

L'ondulation du courant peut poser des problèmes, notamment des vibrations causant du bruit et une usure prématurée.

#### APPLICATION

Exprimer l'ondulation du courant de sortie en fonction de  $\alpha$ ,  $E$ ,  $T$  et  $L$ .

Afin de réduire l'ondulation du courant, on travaille avec des fréquences élevées. On peut aussi ajouter une bobine en série avec le moteur afin de lisser le courant.

### 5.3.4 Rendement

#### APPLICATION

Déterminer le rendement du hacheur.

## 6 Onduleur

### 6.1 Cahier des charges et architecture

L'onduleur est un convertisseur prenant en entrée une source de tension continue et alimentant, en sortie, une source de courant alternatif.

#### EXEMPLE

Un onduleur est utilisé dans une voiture électrique pour convertir la tension continue fournie par la batterie en tension alternative utilisable par le moteur synchrone.

L'onduleur est constitué d'un pont à 4 interrupteurs.

#### SCHÉMA Schéma de l'onduleur

### 6.2 Séquence de commutation

#### APPLICATION

Lister les 16 états pour les interrupteurs et dire s'ils sont possibles et s'ils permettent de transférer de l'énergie entre la source et la charge.

Les deux états retenus sont ceux qui permettent de connecter la source à la charge dans un sens ou dans l'autre.



## SCHÉMA États utilisés pour un onduleur

Pour avoir une présentation alternative en sortie, on choisi un rapport cyclique  $\alpha = \frac{1}{2}$ .

### 6.3 Utilisation avec une charge R-L

L'onduleur peut être utilisé pour alimenter un dipole inductif modélisé par une charge R-L.

## SCHÉMA Onduleur alimentant une charge R-L

## APPLICATION



Pour chaque demi-période, déterminer une équation différentielle vérifiée par le courant de sortie de l'onduleur.

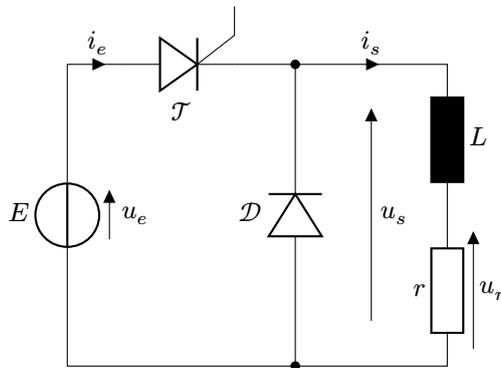
Pour obtenir un courant de sortie environ sinusoïdal, il est possible d'utiliser la MLI.





# TD

## 1 Hachage sur charge inductive

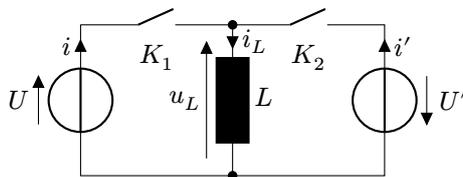


Le hacheur ci-contre sert à transférer de la puissance électrique depuis un générateur de tension  $E$  continu vers un récepteur inductif de résistance  $r$  et d'inductance  $L$ .

Le fonctionnement est périodique de fréquence  $f = 2,0 \text{ kHz}$ . L'interrupteur commandé est fermé sur  $[0, \alpha T]$ , ouvert sur  $[\alpha T, T]$ , avec  $\alpha = 0.3$ . On précise  $E = 100 \text{ V}$  et  $r = 10 \Omega$ .

1. Dans quel état est la diode sur  $[0, \alpha T]$ ? sur  $[\alpha T, T]$ ?
2. Établir les équations différentielles qui régissent l'évolution du courant  $i_s$ , sur  $[0, \alpha T]$  et  $[\alpha T, T]$ .
3. Décrire l'allure de la forme d'onde de  $i_s$ , sans résoudre les équations différentielles. À quelle condition sur les valeurs de  $r$ ,  $L$ , et  $T$ , l'évolution du courant dans la charge est-elle affine par morceau? On répondra qualitativement à la question.
4. Établir l'expression de la valeur moyenne de l'intensité du courant dans la charge en fonction de  $\alpha$ ,  $E$  et  $r$ . Application numérique.

## 2 Hachage à stockage inductif

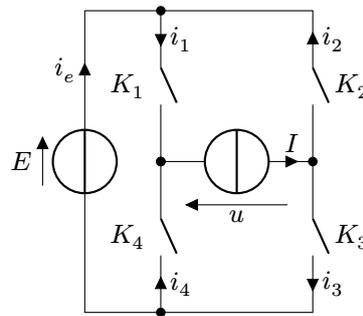


Dans le convertisseur ci-contre, l'entrée est la source de tension  $U$  et la sortie est celle de tension  $U'$ .  $U$  et  $U'$  sont des composantes positives, alors que  $i$ ,  $i'$ ,  $i_L$  et  $u_L$  dépendent du temps; toutefois l'intensité  $i_L$  dans la bobine est toujours positive.

1. Montrer que la commande des deux interrupteurs doit être complémentaire (ni ouverts ni fermés tous les deux en même temps).
2. Identifier les interrupteurs à utiliser en traçant leur caractéristique courant-tension. Dans toute la suite, l'interrupteur commandé est fermé sur  $[0, \alpha T]$  et ouvert sur  $[\alpha T, T]$ .
3. Tracer la forme d'onde de la tension aux bornes de la bobine. En déduire une relation entre  $U$ ,  $U'$  et  $\alpha$ .
4. Tracer les formes d'ondes des courants dans la bobine et dans les sources d'entrée et de sortie. On ne cherchera pas à identifier les constantes.

- Calculer les valeurs moyennes  $I$  et  $I'$  des courants  $i(t)$  et  $i'(t)$  en fonction de la valeur moyenne  $I_L$  du courant  $i_L(t)$  dans la bobine.
- En déduire la valeur du rapport  $I'/I$  en fonction de  $\alpha$ . Que dire du cas  $\alpha = 1$  ?
- Dresser un bilan de puissance en calculant la puissance moyenne cédée par la source de tension  $U$ , la puissance moyenne consommée par celle de tension  $U'$  et les puissances moyennes consommées par les interrupteurs et la bobine.
- Quels interrupteurs faudrait-il choisir si le courant dans la bobine était toujours négatif ?

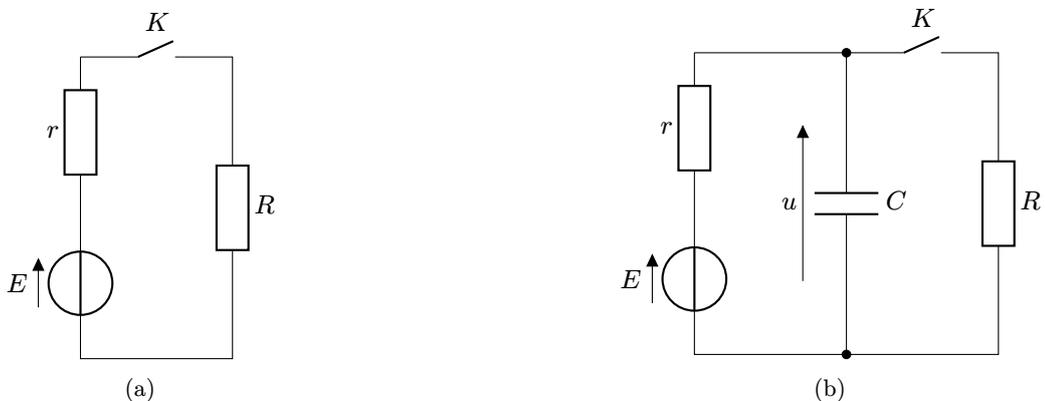
### 3 Hacheur en pont



La source d'entrée présente une tension  $E > 0$  constante, celle de sortie est parcouru par un courant d'intensité  $I > 0$  constant.  $i_e$ ,  $u$ ,  $i_1$ ,  $i_2$ ,  $i_3$  et  $i_4$  dépendent du temps.

- Dresser la liste de tous les états possibles pour les interrupteurs. Préciser les états autorisés. Dans la suite, on ne s'intéresse qu'aux états qui permettent un transfert de puissance entre l'entrée et la sortie. Quels sont-ils ?
- En étudiant les contraintes qui pèsent sur les interrupteurs, préciser quels interrupteurs choisir.
- Le hacheur fonctionne de manière périodique. Les interrupteurs commandés sont fermés sur  $[0, \alpha T]$  et ouverts sur  $[\alpha T, T]$ . Comment nomme-t-on  $\alpha$ .
- Tracer les formes d'onde de l'intensité  $i_e$  du courant en entrée et de la tension  $u$  en sortie. En déduire les valeurs moyennes  $I_e$  et  $U$ . Quelle est la particularité de ce hacheur.
- Calculer les puissances délivrées par la source d'entrée et absorbée par celle de sortie. En déduire le rendement du hacheur.

### 4 Improvement of the yield of a continuous voltage source



We want to deliver electric power from a voltage source of electromotive force  $e$  to a resistor  $R$ . We use a commandable switch  $K$  that works periodically (closed between  $nT$  and  $nT + \alpha T$ ).

The values of the components are  $r = 5 \Omega$ ,  $R = 10 \Omega$ ,  $E = 12 \text{ V}$ ,  $\alpha = 0,5$ ,  $T = 10 \text{ s}$ ,  $C = 100 \text{ F}$ .

- For the circuit (a), calculate the mean voltage on  $R$  and then the yield of the device.

2. For the circuit (b), calculate the mean voltage on the capacitor (some approximations can be made). Calculate the yield for the device.