

LES HACHEURS

1 / GENERALITES

Les hacheurs sont des convertisseurs directs du type continu-continu. Leur utilisation permet le contrôle de la puissance électrique dans des circuits fonctionnant en courant continu avec une très grande souplesse et un rendement élevé.

D'un point de vue circuit, le hacheur apparaît comme un quadripôle (figure 1a), jouant le rôle d'organe de liaison entre deux parties d'un réseau. On peut le considérer comme un "transformateur" de grandeurs électriques continues.

Si v_e et i_e sont les grandeurs d'entrée du quadripôle, v_s et i_s les grandeurs de sortie, le hacheur introduit des relations entre ces grandeurs par l'intermédiaire de paramètres variables. Ces relations ne sont pas linéaires. Toutefois il sera possible d'établir des relations linéaires entre les valeurs moyennes de ces grandeurs qui permettront de caractériser l'échange de puissance moyenne contrôlée par le hacheur.

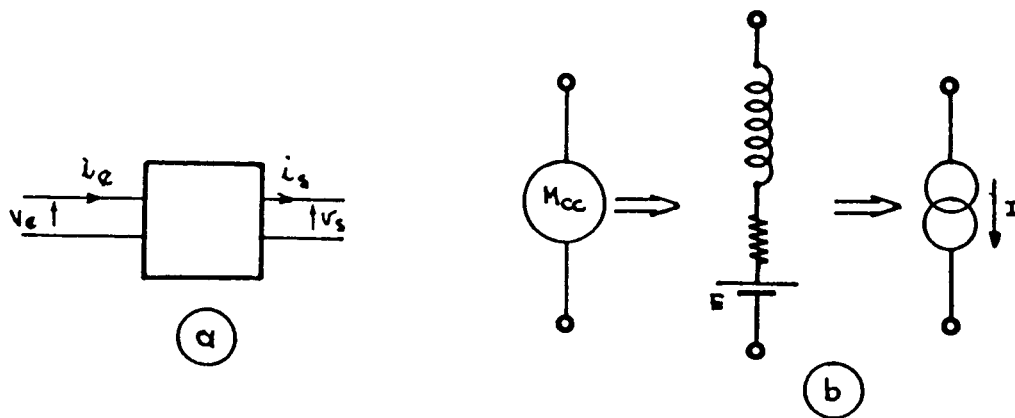


Figure 1: a) Hacheur = quadripôle
b) Moteur à courant continu = Source de courant

Les différentes structures de hacheurs dépendent du cahier des charges imposé au système.

Dans une première approche, les caractéristiques à prendre en compte pour établir les structures portent sur la nature des réseaux d'entrée et de sortie, identifiés comme des sources de tension ou de courant et sur les réversibilités qui peuvent être demandées à ces sources.

Dans un deuxième temps, il est possible, une fois la structure établie, de prendre comme modèle

des sources, un réseau électrique plus proche des propriétés réelles de ces sources.

Par exemple, tout réseau électrique présentant une inductance série sera préalablement identifié à une "source de courant", tout réseau électrique comportant une capacité en parallèle sera identifié à une "source de tension".

Ainsi un moteur à courant continu dont le modèle électrique est représenté par le dipôle actif de la figure 1b sera-t-il assimilé dans un premier temps à une source de courant (le courant moyen I dans le dipôle est proportionnel au couple C imposé sur l'arbre du moteur). Cette source de courant sera réversible en tension si la f.e.m. E est réversible (réversibilité de vitesse ou du flux inducteur). Elle sera réversible en courant si le couple est réversible (traction /freinage). Dans un deuxième temps on tiendra effectivement compte des éléments électriques qui constituent le dipôle.

Les applications des hacheurs sont nombreuses.

En forte puissance ils interviennent comme organe de réglage de puissance électrique en continu, généralement dans les systèmes de contrôle de vitesse ou de couple de machines électriques. Ils peuvent être associés à d'autres convertisseurs pour contribuer à des conversions indirectes de type alternatif-continu, continu-alternatif ou alternatif - alternatif. On peut généralement identifier les circuits d'entrée et de sortie comme ayant des natures différentes: l'un source de tension et l'autre source de courant. Les structures directes qui font l'objet de ce chapitre répondent alors au cahier des charges.

En petite et moyenne puissance les problèmes se posent de manière différente.

Dans les alimentations de tension par exemple, le cahier des charges impose à la sortie du convertisseur une tension parfaitement continue (avec un taux d'ondulation négligeable), l'entrée étant une source de tension constante. A la structure élémentaire du hacheur viennent alors s'associer des éléments linéaires (inductance, capacité) qui sont des éléments d'adaptation (transformation d'une source de tension en source de courant) et de filtrage.

Malgré des similitudes évidentes et un risque de redondance, l'étude de ces derniers convertisseurs sera reprise dans le chapitre "alimentations continu-continu non isolées".

2/ STRUCTURES FONDAMENTALES

2-1/ Première structure : hacheur dévolteur

2-1-1/ Configuration de base

Le générateur est une source de tension parfaite de f.e.m. E , unidirectionnelle en courant.

Le récepteur qui, compte tenu de la nature du générateur, doit avoir la nature d'une source de courant, est lui-même unidirectionnel en tension et en courant. Supposons que sa nature de source de courant soit suffisamment affirmée pour que le courant qui le parcourt puisse être considéré comme constant et d'amplitude I (inductance série très élevée).

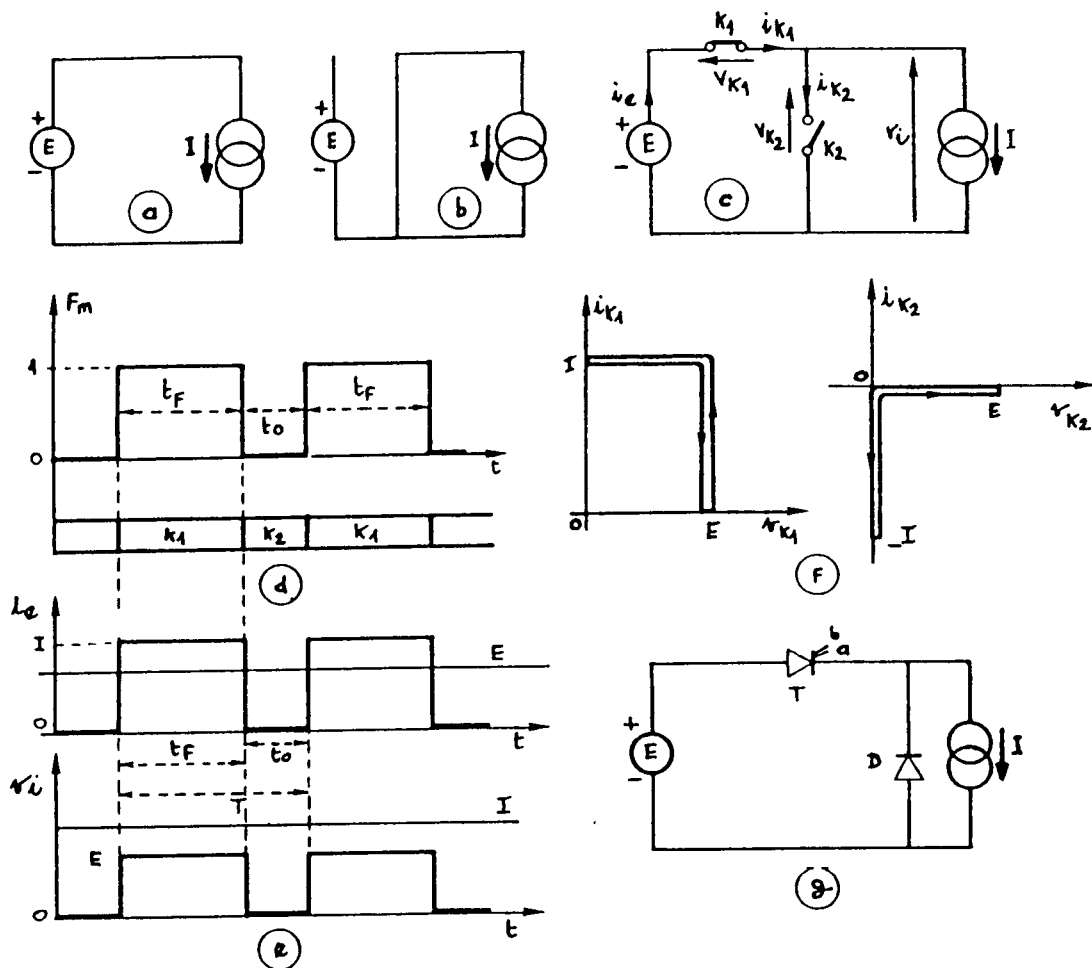


Figure 2: Hacheur dévolteur, structure et formes d'onde

Les deux éléments peuvent être, soit connectés suivant le schéma de la figure 2a, soit déconnectés (schéma 2b). Dans ce dernier cas, le récepteur doit être court-circuité pour assurer la continuité du courant I (roue libre).

La modulation de la puissance électrique échangée entre les deux éléments sera réalisée en modifiant périodiquement leur interconnexion:

- pendant un temps t_F : état 2a: phase active
- pendant un temps t_0 : état 2b: phase de roue libre avec une période $T = t_0 + t_F$

Ce fonctionnement peut être réalisé à partir d'un convertisseur direct élémentaire dont la structure à deux interrupteurs est représentée sur la figure 2c.

Il est évident que le passage de l'un à l'autre des deux états est obtenu par la commutation des deux interrupteurs K_1 et K_2 , c'est-à-dire par leur changement d'état simultané et complémentaire.

K_1 et K_2 constituent la **cellule de commutation** du convertisseur.

2-1-2/ Grandeurs d'entrée et de sortie

Soient : i_e le courant dans la source de tension E

v_i la tension aux bornes de la source de courant I

p la puissance instantanée

Pendant la phase active (temps t_f) :

K_1 est passant : $i_e = I$ et K_2 est bloqué : $v_i = E$; on a $p = EI$

Pendant la phase de roue libre (temps t_0) :

K_1 est bloqué : $i_e = 0$ et K_2 est passant : $v_i = 0$; on a $p = 0$

Si nous définissons une fonction F_m , dite fonction de modulation (figure 2d) telle que :

$F_m = 1$ pendant le temps t_f , temps pendant lequel les deux sources sont interconnectées.

$F_m = 0$ pendant le temps t_0 , durée de la roue libre, on a :

$$i_e = F_m I \quad v_i = F_m E \quad \text{et} \quad p = F_m EI$$

Cette fonction de modulation est donc une fonction périodique, de valeur discrète 1 ou 0, dont la valeur ne dépend que de l'état passant de l'un ou l'autre des interrupteurs K_1 et K_2 .

La sortie du convertisseur peut être considérée comme une source de tension parfaite, imposant aux bornes du récepteur une tension $v_i = F_m E$ qui est une tension périodique de valeur moyenne :

$$v_i(\text{moy}) = E t_f / T = E \alpha \quad \text{avec } T = t_f + t_0$$

La grandeur $\alpha = t_f / T$, nombre compris entre 0 et 1 est une grandeur réglable par modification du temps relatif de conduction des deux interrupteurs. C'est la *valeur moyenne de la fonction de modulation*, elle porte généralement le nom de *rapport cyclique*.

Si l'on raisonne sur la valeur moyenne, cette structure de hacheur apparaît comme un *"transformateur de tension" de rapport variable, abaisseur de tension*, d'où son nom fréquent de *"hacheur dévolteur"*.

De même, si nous supposons le courant I parfaitement continu, ce qui correspond à un fonctionnement idéal, nous pouvons écrire :

$$i_e(\text{moy}) = \alpha I, \text{ ce qui fait apparaître ce montage comme un "élevateur de courant".}$$

La fonction de modulation concerne les valeurs instantanées. Le rapport cyclique α , valeur moyenne de F_m , concerne les valeurs moyennes. On a les relations suivantes :

$$\begin{aligned} i_e &= F_m I & v_i &= F_m E & \text{et} & p &= F_m EI \\ i_e(\text{moy}) &= \alpha I & v_i(\text{moy}) &= \alpha E & \text{et} & P &= \alpha EI \end{aligned}$$

La figure 2e représente l'évolution des grandeurs d'entrée et de sortie.

2-1-3/ Identification des interrupteurs

L'état de chaque interrupteur correspondant à chaque séquence permet de tracer les cycles de fonctionnement $i_k(v_k)$ des interrupteurs (figure 2f). L'observation de ces cycles permet d'identifier ces interrupteurs :

- K_1 : Interrupteur unidirectionnel en tension et en courant commandé à l'amorçage et au blocage, placé dans le sens direct. Ce sera par exemple un transistor. Pour le représenter sur les figures, nous utiliserons un symbole purement fonctionnel.
- K_2 : Interrupteur unidirectionnel en tension et en courant, à amorçage et blocage spontané, placé dans le sens inverse. C'est une **diode**.

On en déduit le schéma fonctionnel du hacheur dévolteur représenté sur la figure 2g. Cette structure est souvent appelé *"hacheur série"*, compte tenu de la position de l'interrupteur commandé.

Remarques :

1/ La nécessité d'une commutation par commande au blocage impose de manière rigoureuse la nature de source de tension du générateur ; d'où un découplage systématique de la cellule de commutation par un condensateur.

2/ La commande au blocage peut être réalisée par la commutation forcée, si l'application considérée ne permet pas la mise en oeuvre d'un interrupteur à double commande (forte puissance par exemple).

2-2/ Deuxième structure : hacheur survolteur

2-2-1/ Configuration de base

Les rôles de générateur et de récepteur sont inversés entre la source de tension et la source de courant.

Le générateur a la nature d'une source de courant continu constant d'amplitude I ; il est unidirectionnel en tension.

Le récepteur a la nature d'une source de tension unidirectionnelle en courant et sa structure est telle que la tension à ses bornes peut être considérée comme constante et d'amplitude E (cette condition est généralement assurée par un condensateur en parallèle de valeur élevée).

Les différentes possibilités d'interconnexion de ces deux sources sont représentées sur la figure 3a. On en déduit le schéma fonctionnel du hacheur survolteur représenté sur la figure 3b.

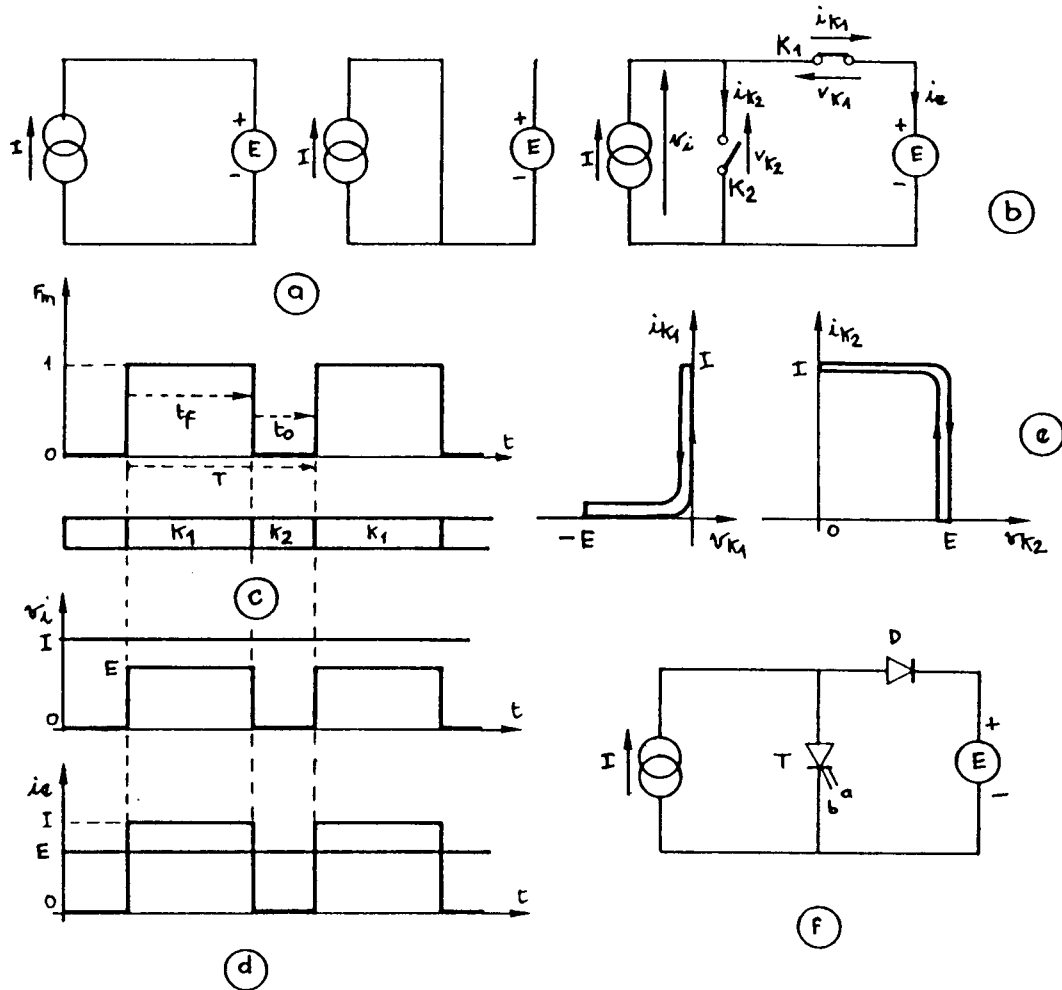


Figure 3: Hacheur survolteur, structure et formes d'onde

2-2-2/ Grandeurs d'entrée et de sortie

Le fonctionnement sur une période se décompose en deux séquences :

Pendant la phase active (temps t_f) :

K_1 est conducteur : $v_i = E$ et K_2 est bloqué : $i_e = I$; on a $p = E I$

Pendant la phase de roue libre (temps t_o) :

K_1 est bloqué : $v_i = 0$ et K_2 est conducteur : $i_e = 0$; $p = 0$

Soit F_m la fonction de modulation définie en fonction des temps de conduction de K_1 et K_2 et représentée sur la figure 3c. Nous pouvons écrire :

$$v_i = F_m E \quad i_e = F_m I \quad \text{et} \quad p = F_m E I$$

Les relations sur les valeurs moyennes de la tension v_f et du courant i_e sont alors :

$$v_f(\text{moy}) = \alpha E \quad i_e(\text{moy}) = \alpha I \quad P = \alpha E I$$

avec $\alpha = t_f / (t_f + t_0)$ qui est la *valeur moyenne de la fonction de modulation* et que l'on appelle "*rapport cyclique*".

Si l'on raisonne sur les valeurs moyennes, cette structure de hacheur apparait comme un transformateur de tension de rapport variable, élévateur de tension, d'où son nom de "*hacheur survolteur*".

Nous voyons qu'il est abaisseur de courant.

La figure 3d représente les formes d'onde des grandeurs d'entrée et de sortie.

2-2-3/ Identification des interrupteurs

L'évolution des grandeurs d'entrée et de sortie pendant une période permet de tracer les cycles de fonctionnement $i_k(v_k)$ des interrupteurs (figure 3e). L'observation de ces cycles permet de les identifier :

- K_1 est un interrupteur unidirectionnel en tension et en courant, à amorçage et blocage spontané, c'est donc une diode.
- K_2 est un interrupteur unidirectionnel en tension et en courant, commandé à l'amorçage et au blocage (par exemple un transistor).

On en déduit le schéma fonctionnel du hacheur survolteur représenté sur la figure 3f. Cette structure est souvent appelé "*hacheur parallèle*", compte tenu de la position de l'interrupteur commandé.

Remarques :

- 1/ Comme pour le hacheur dévolteur, l'existence d'une commutation au blocage impose que le récepteur soit effectivement une source de tension, d'où nécessité d'un découplage par condensateur.
- 2/ Si la commutation au blocage ne peut pas être mise en oeuvre, on a recours à la commutation forcée.
- 3/ Les deux structures de base, hacheur survolteur et hacheur dévolteur sont duales l'une de l'autre.

3/ REVERSIBILITE DES HACHEURS

3-1/ Hacheur réversible en courant

3-1-1/ Configuration de base

Les sources d'entrée et de sortie sont toujours de nature différente mais la structure recherchée doit permettre une réversibilité en puissance moyenne du dispositif. Cette réversibilité sera obtenue par

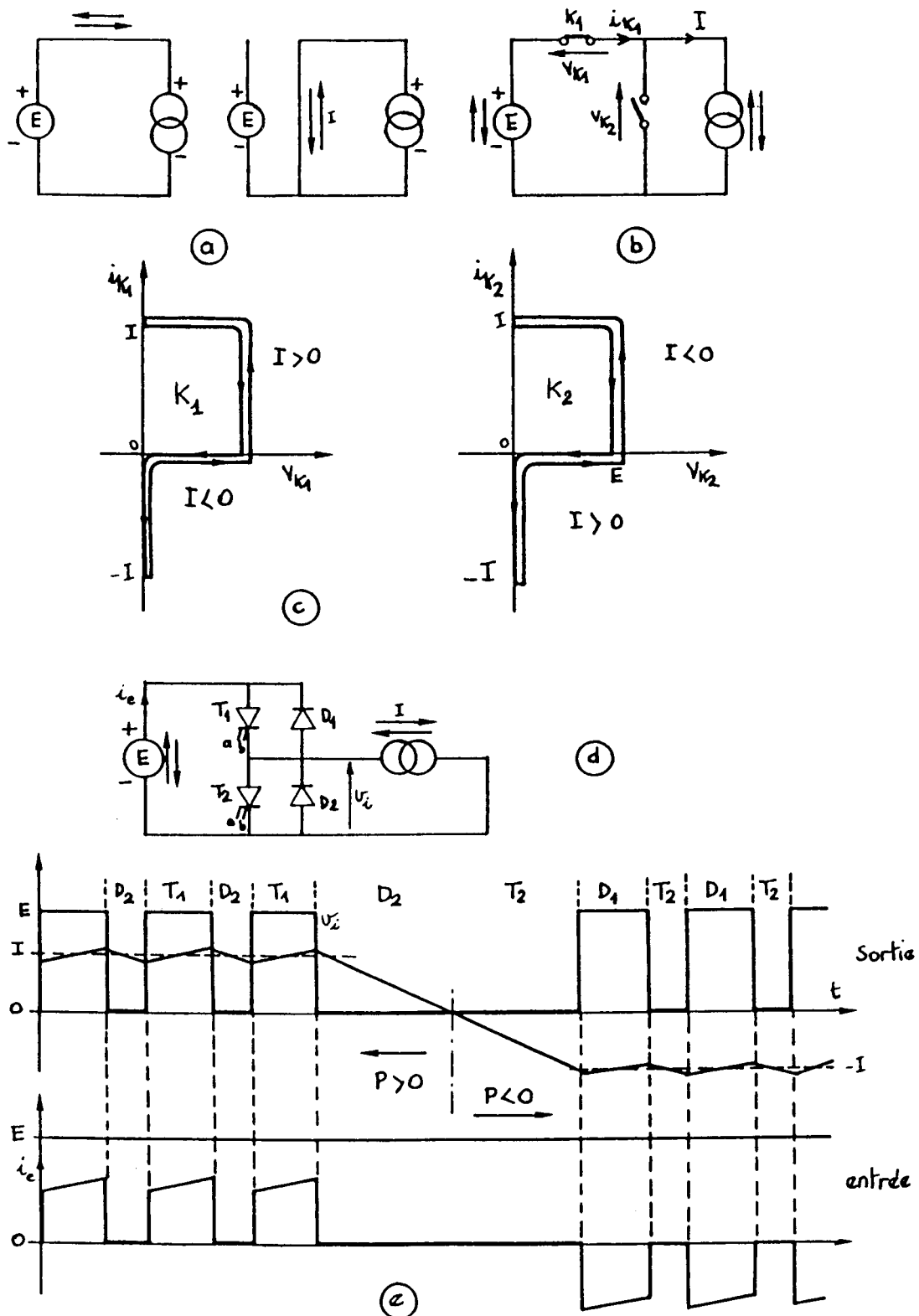


Figure 4: Hacheur réversible en courant, structure et formes d'onde

une réversibilité en courant de la source de courant qui reste unidirectionnelle en tension.

Pour fixer les idées cette structure doit pouvoir s'appliquer à l'alimentation d'une machine à courant continu par un hacheur et permettre des phases de traction et de freinage sans réversibilité de la vitesse (tension unidirectionnelle) mais avec réversibilité de couple (réversibilité de courant).

Puisqu'on n'a pas de réversibilité en tension, les modes d'interconnexion des deux sources sont représentés sur la figure 4a. Cela conduit à la structure de la figure 4b.

Il est facile de voir que la structure de la figure 4b se comporte :

- comme un hacheur dévolteur lorsque la source de courant impose un courant positif ($I > 0$)
- comme un hacheur survolteur lorsque la source de courant impose un courant négatif ($I < 0$)

3-1-2/ Grandeurs d'entrée et de sortie

Sur les grandeurs d'entrée et de sortie nous aurons toujours les relations :

$$\begin{aligned} i_e &= F_m I & v_i &= F_m E & \text{et} & p &= F_m E I \\ i_e(\text{moy}) &= \alpha I & v_i(\text{moy}) &= \alpha E & \text{et} & P &= \alpha E I \end{aligned}$$

On notera que le signe de la puissance moyenne dépend du signe de I

3-1-3/ Identification des interrupteurs

En étudiant l'évolution du courant dans l'interrupteur passant et de la tension aux bornes de l'interrupteur bloqué à chaque séquence et dans les deux cas $I > 0$ et $I < 0$, il est facile d'établir les cycles $i_k(v_k)$ de fonctionnement des interrupteurs (figure 4c).

Les interrupteurs K_1 et K_2 sont identiques, tous deux unidirectionnels en tension mais bidirectionnels en courant. Le mode de commutation dépend du signe de I .

$I > 0$ K_1 : amorçage et blocage commandés

K_2 : amorçage et blocage spontanés (commandes inhibées)

$I < 0$ K_1 : amorçage et blocage spontanés (commandes inhibées)

K_2 : amorçage et blocage commandés

Ceci conduit au schéma fonctionnel de la figure 4d

La figure 4e représente les formes d'onde des grandeurs d'entrée et de sortie dans un fonctionnement avec réversibilité de courant.

Le changement de signe du courant s'effectue de manière continue pendant une séquence de roue libre de l'interrupteur K_2 . L'interrupteur T_2 prend le relai de la diode D_2 au passage du courant par zéro.

Remarque: sur cette figure on a tenu compte de l'ondulation du courant de la source de courant de façon à justifier sa décroissance naturelle pendant la séquence de roue libre.

3-2/ Hacheur réversible en tension

La structure recherchée doit permettre une réversibilité en puissance moyenne du dispositif liée à une réversibilité en tension de la source de courant qui reste unidirectionnelle en courant.

La source de tension est une source de tension continue constante. La réversibilité en puissance moyenne exige de cette source d'être réversible en courant.

Toujours avec l'exemple d'un moteur à courant continu, le convertisseur doit permettre un fonctionnement réversible (moteur/ génératrice) de cette machine par réversibilité du flux d'excitation.

La réversibilité n'étant pas la même dans les deux sources, les phases actives de fonctionnement dans les deux cas nécessitent un croisement de l'interconnexion des sources (figure 5a).

La structure générale du convertisseur doit donc faire appel à une structure en pont représentée sur la figure 5b .

La possibilité de trois modes différents d'interconnexion permet d'envisager plusieurs types de modulation.

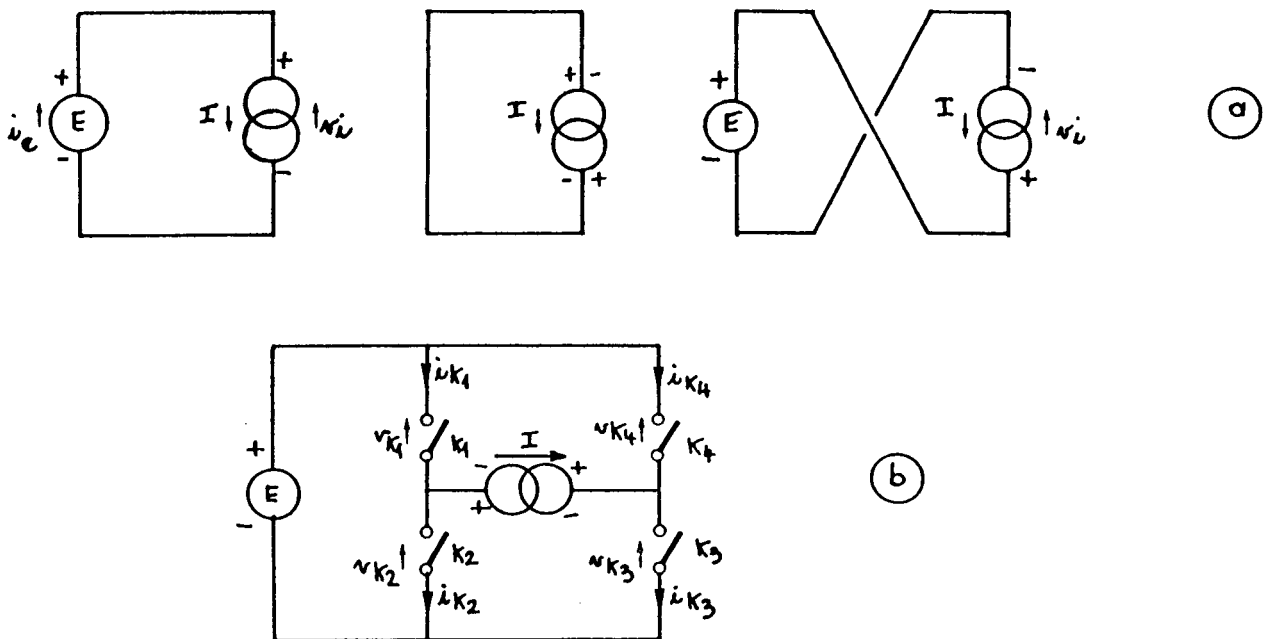


Figure 5: Configuration de base d'un hacheur réversible en tension

3-2-1/ Modulation +E 0, -E 0

Les interrupteurs sont commandés de telle façon que la structure se comporte (figure 6a):

- comme un hacheur-dévolteur lorsque la tension aux bornes de la source de courant doit être positive
- comme un hacheur survolteur lorsque la tension aux bornes de la source de courant doit être négative.