

Conversion électronique

Chapitre V : Conversion électronique

Objectif:

- *Ordre de grandeur des puissances mises en jeu*
- *Fonctions de commutation*
- *Modélisation des générateurs et récepteurs*
- *Etude du hacheur*

1. Nécessité de la commutation et d'éléments de réserve d'énergie

1.1. Position du problème

- On cherche à transformer une puissance électrique **continu** en une puissance électrique **continue ajustable** par le convertisseur. On ne peut évidemment pas utiliser de transformateur.
 - On recherche également :
 - un encombrement et un poids faibles ;
 - une grande fiabilité ;
 - une souplesse de la commande ;
 - un faible bruit acoustique émis.
 - On rencontrera de tels convertisseurs dans :
 - les alimentations d'appareils électriques ;
 - la traction ferroviaire ;
 - l'alimentation haute tension ou fort courant ;
 - l'alimentation de secours d'installations.
- Remarque : il existe d'autres conversions électroniques statiques :
- les onduleurs : continu → alternatif;
 - les redresseurs : alternatif → continu;
 - les gradateurs : alternatif → alternatif.

1.2. Puissances mises en jeu. Principe de la conversion

1.2.1. Ordres de grandeurs

La nécessité de ne pas consommer de puissance dans le convertisseur est d'autant plus cruciale que les puissances mises en jeu sont importantes.

Pour un moteur on a les ordres de grandeurs suivants :

- d'accessoire électrique de voiture : environ 10 W ;
- de machine-outil : environ 1000 W ;
- de traction ferroviaire : environ 10^6 W.

1.2.2. Principe de la conversion

Le "montage de base" pour ce type de conversion est le pont diviseur de tension mais son rendement devient très faible lorsque la tension réglable est très inférieure à la tension d'alimentation.

On préfère utiliser :

- des inductances et capacités (puissance moyenne consommée nulle) comme réserve d'énergie ;
- **des éléments de commutation pour doser l'énergie (principe du hacheur** : un interrupteur ouvert et fermé de manière cyclique permet de « hacher » la puissance délivrée par le générateur. La puissance est alors convertie sans pertes, car un interrupteur fonctionne en « tout ou rien » : soit la tension à ses bornes est nulle (interrupteur fermé), soit l'intensité le traversant est nulle (interrupteur ouvert). Dans les deux cas, la puissance qu'il dissipe est nulle).

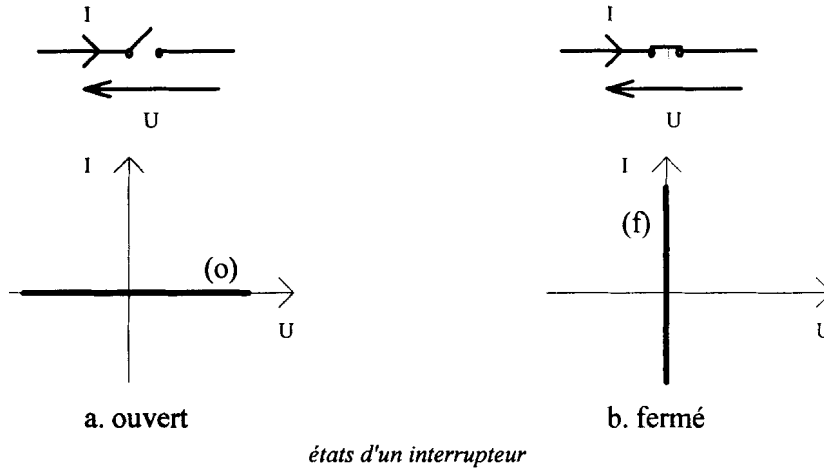
2. Fonctions de commutation

2.1. Interrupteurs idéaux

Le principe des hacheurs est donc le découpage de la puissance par des "interrupteurs".

Un interrupteur idéal est un dipôle possédant sur sa caractéristique $i = f(u)$ deux états possibles :

- ▲ un état ouvert caractérisé par $i = 0$;
- ▲ un état fermé caractérisé par $u = 0$.



Dans les deux cas la puissance consommée est nulle.

L'ouverture (ou **blocage**) est le passage de fermé à ouvert ;

La fermeture (ou **amorçage**) est le passage d'ouvert à fermé.

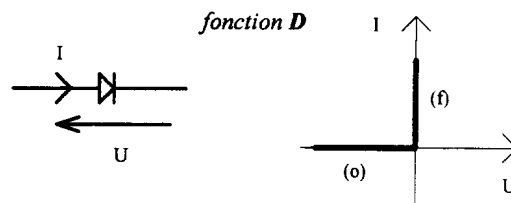
Les interrupteurs mécaniques ne sont pas utilisables à cause de leur inertie ($f < 10\text{ Hz}$) et de leur durée de vie (moins de quelques centaines de milliers de cycle).

Les fonctions d'interrupteur sont assurées par des composants électroniques. Le passage d'un état à l'autre peut être spontané ou commandé.

De plus dans les dispositifs réels, les composants ne présentent pas ces caractéristiques idéales et une partie seulement de ces caractéristiques est atteinte: on parle d'**unidirectionnalité** en tension ou en courant lorsque la tension ou le courant ne pourront changer de signe dans l'état ouvert ou dans l'état bloqué. La plupart des éléments de commutation ont une unidirectionnalité de caractéristique limitée à $(i \geq 0, u \geq 0)$ ou $(i \geq 0, u \text{ quelconque})$.

2.2. Fonction diode

Symbole électrique, conventions et caractéristique idéalisée sont rappelées ci-dessous:

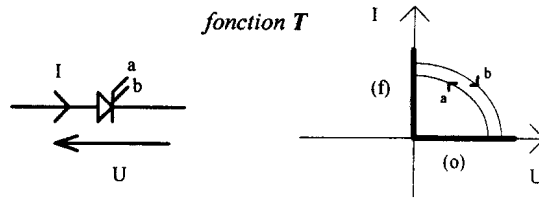


On notera que dans l'état bloqué, la tension aux bornes de l'élément doit rester négative (unidirectionnalité en tension) tandis que dans l'état de conduction, c'est le courant qui doit rester positif (unidirectionnalité en courant). En fait, le passage d'un état à l'autre (la commutation) se fait par l'inversion du courant ou de la tension sans intervention d'un dispositif annexe : on parle alors de commutation spontanée. Les caractéristiques précédentes définissent la **fonction diode "D"**. On notera qu'aucune électrode de commande n'apparaît sur le symbole, pour signifier le caractère spontané des commutations.

2.3. Fonction transistor

Contrairement au cas précédent, on rencontre des composants présentant une ou des électrodes de commande permettant à un dispositif électronique annexe de déclencher le changement d'état. Quelle que soit la structure réelle du composant ou

de l'association utilisée pour réaliser la fonction, on parlera de fonction transistor "T" dans le cas où les caractéristiques idéalisées sont celles indiquées ci-dessous. Le symbole électrique et les conventions sont également indiqués.



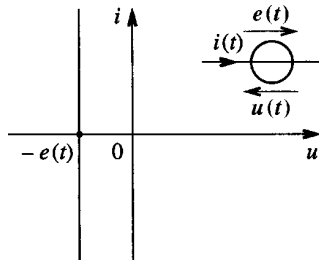
On distingue :

- tout d'abord deux états :
 - état ouvert la tension doit rester positive (unidirectionnalité en tension) ;
 - état fermé le courant doit rester positif (unidirectionnalité en courant) ;
- et deux électrodes de commande :
 - "a" : permettant de déclencher l'amorçage (mise en conduction du composant) lorsque les conditions nécessaires (intensité positive) sont réunies ;
 - "b" : déclenchant le blocage (interruption du courant), lorsque la tension est positive.

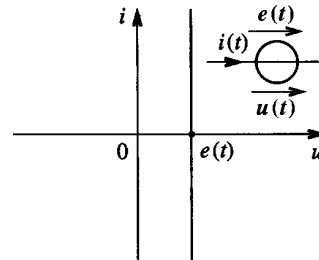
3. Modélisation des générateurs et récepteurs

3.1. Sources parfaites

- Une **source indépendante de tension** est un dipôle linéaire actif qui maintient entre ses bornes une tension constante quel que soit le courant qui le traverse.
 Selon la convention choisie on obtient l'une des deux caractéristiques possibles.
 $e(t)$ est la force électromotrice (f.e.m.) de la source. *Unités* : $[e] = \text{volt}$; *symbole*: V.
Pour une telle source $u(t)$ ne dépend que de la source alors que $i(t)$ dépend du circuit extérieur.

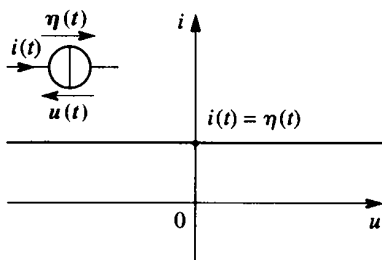


Convention récepteur: $\forall i \ u(t) = -e(t)$

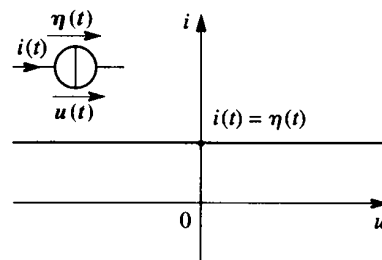


Convention générateur: $\forall i \ u(t) = e(t)$

- Une **source indépendante de courant** est un dipôle linéaire actif qui débite un courant d'intensité indépendante de la tension appliquée à ses bornes.
 Selon la convention choisie on obtient l'une des deux caractéristiques possibles.
 $\eta(t)$ est le courant électromotrice (c.e.m.) de la source. *Unités*: $[\eta] = \text{ampère}$; *symbole*: A.
Pour une telle source $i(t)$ ne dépend que de la source alors que $u(t)$ dépend du circuit extérieur.



Convention récepteur: $\forall u \ i(t) = \eta(t)$



Convention générateur: $\forall u \ i(t) = \eta(t)$

3.2. Les sources réelles

3.2.1. Définition

Un électromoteur est un composant dipolaire non symétrique dont les bornes sont repérées par les symboles + (borne positive) et - (borne négative).

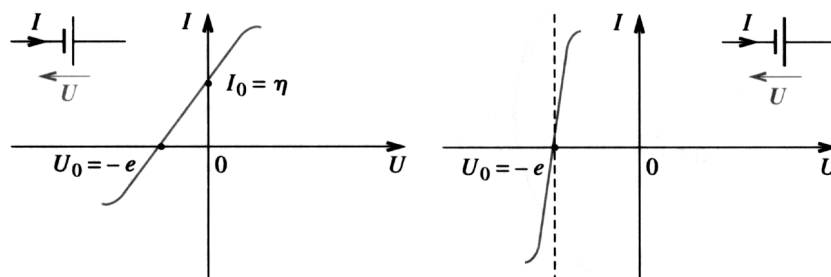
La fonction d'un électromoteur est de réaliser des conversions d'énergie.

Un électromoteur est récepteur lorsqu'il reçoit de l'énergie électrique d'un circuit pour la transformer en énergie mécanique (moteur), chimique (accumulateurs, électrolyseur, etc).

Un électromoteur est générateur lorsqu'il fournit de l'énergie électrique au circuit en consommant de l'énergie mécanique (dynamos, alternateurs), chimiques (piles, accumulateurs), lumineuse (photopiles).

3.2.2. Caractéristiques statiques

Les caractéristiques statiques des électromoteurs ne passent pas par l'origine. Cette particularité confère aux électromoteurs la propriété de posséder une tension U_o en circuit ouvert non nulle, et un courant I_o de court circuit non nul: l'électromoteur est un dipôle actif.



Caractéristique statique tension-courant d'une pile.

Caractéristique statique tension-courant d'un accumulateur au plomb. Le courant de court-circuit I_0 est très élevé ; son obtention conduit à la destruction de l'accumulateur.

3.2.3. Modélisation

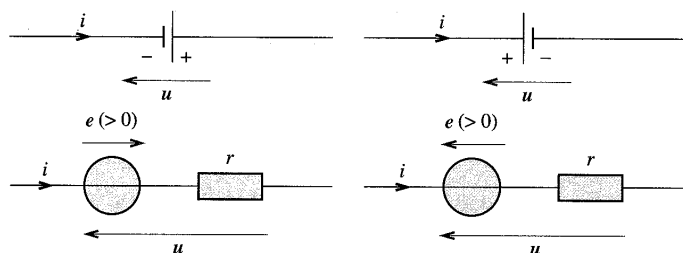
La modélisation des électromoteurs s'effectue en linéarisant (éventuellement par morceaux) leurs caractéristiques. La relation entre l'intensité i du courant à travers l'électromoteur et la tension u entre ses bornes est de la forme :

$$\frac{u}{U_o} + \frac{i}{I_o} = 1$$

Cette relation peut s'écrire de deux façons :

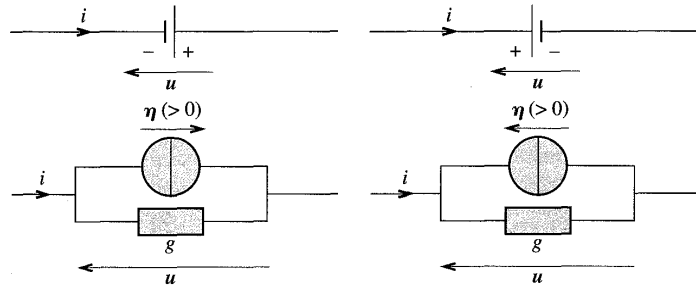
- **Modélisation de Thévenin :**

On peut l'écrire sous la forme: $u = U_o - \frac{U_o}{I_o} i$. Il apparaît que le dipôle peut être réalisé par l'association en série d'une source de tension de f.e.m $e = |U_o|$ et d'un résistor de résistance dynamique $r = -\frac{U_o}{I_o}$. Le dipôle ainsi réalisé est un électromoteur de Thévenin de f.e.m. e et de résistance interne r :



• **Modélisation de Norton :**

On peut aussi l'écrire sous la forme: $i = I_o - \frac{I_o}{U_o} u$. Le dipôle équivalent résulte de l'association parallèle d'une source de courant de c.e.m $\eta = |I_o|$ et d'un résistor de conductance dynamique $g = -\frac{I_o}{U_o}$. Le dipôle ainsi réalisé est un électromoteur de Norton de c.e.m. η et de conductance interne g :



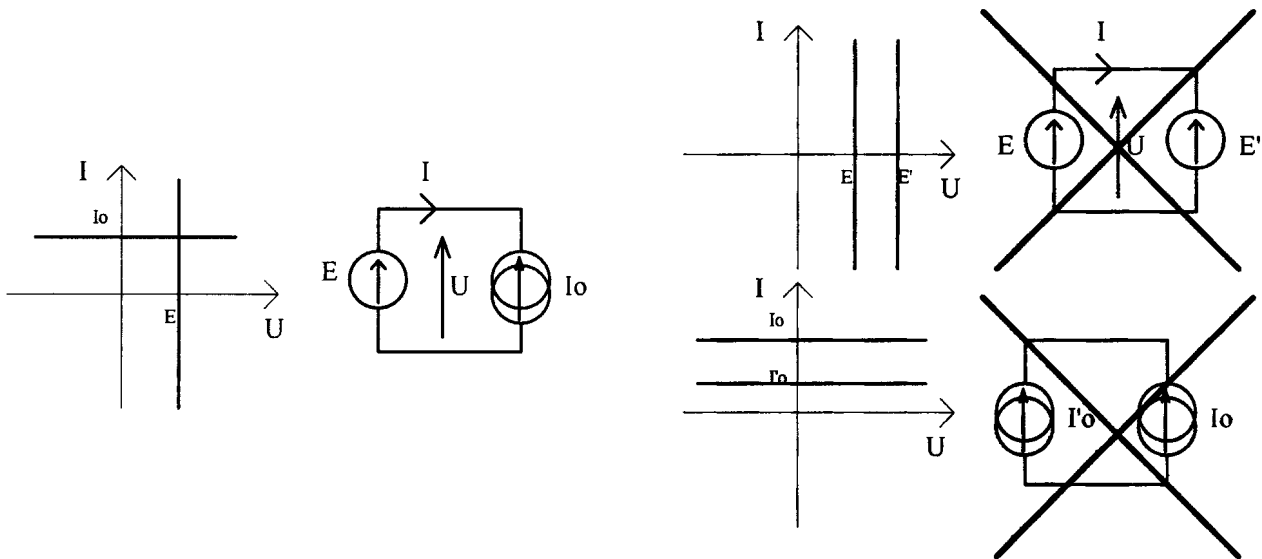
3.3. Règles d'association

On rappelle que lors de l'association de deux sources en série, le point de fonctionnement est donné par l'intersection de deux caractéristiques :

- Pour l'association de deux sources de courant: le point de fonctionnement se situera en dehors de la limite de fonctionnement.
- Pour l'association de deux sources de tension: le point de fonctionnement se situera en dehors de la limite de fonctionnement.

On retiendra les règles suivantes :

- On peut interconnecter une source de tension et une source de courant.
- On ne doit pas interconnecter deux sources de tension, donc en particulier on ne doit pas court-circuiter une source de tension.
- On ne doit pas interconnecter deux sources de courant, donc en particulier on ne doit pas laisser une source de courant en circuit ouvert.



a. Interconnexion autorisée

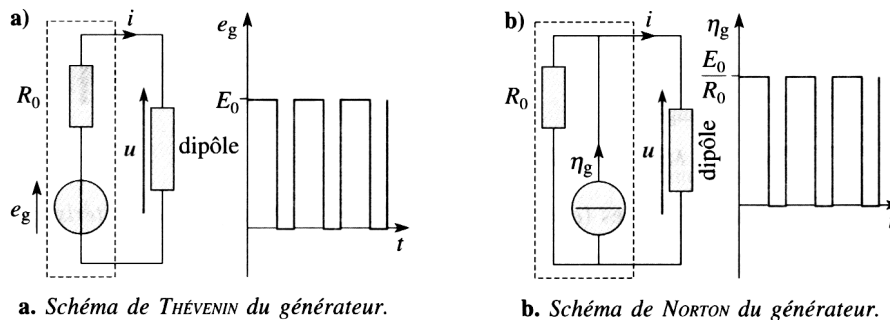
b. Interconnexions interdites

3.4. Modélisation des générateurs et récepteurs par des sources

Dans une conversion électronique l'aspect dynamique est primordial: les commutation dans le convertisseur se faisant à fréquence très élevée, et les phénomènes étant périodiques, on peut faire en sorte que les variations de courant ou de tension soient faibles. On généralise donc la notion de source de tension ou de courant :

- Une **source de courant** est un dipôle dont le courant qui le traverse varie peu devant les variations de tension.
- Une **source de tension** est un dipôle aux bornes duquel la tension varie peu devant les variations de courant.

Pour illustrer ces nouvelles définitions on peut réaliser l'expérience ci-dessous : un générateur de créneau de période T et de rapport cyclique α alimente différents dipôles. On étudie la tension u et l'intensité i dans quelques cas particuliers. Les résultats obtenus sont donnés en annexe.



3.5. Sources non parfaites

D'après le paragraphe précédent, on a les résultats suivants :

3.5.1. Utilisation d'une bobine en série pour parfaire ou modifier une source

- La mise en série d'une inductance avec une source de tension transforme l'ensemble en source de courant en « lissant » le courant qui le traverse. La bobine « absorbe » les surtensions.
- La mise en série d'une inductance avec une source de courant non idéale l'améliore.

Remarque : on retrouve ces résultats en raisonnant sur :

- ▲ l'aspect temporel : la bobine assure la continuité du courant.
- ▲ l'aspect fréquentiel : pour des fréquences élevées, l'impédance équivalente du dipôle tend vers l'infini.

3.5.2. Utilisation d'un condensateur en parallèle pour parfaire ou modifier une source

- La mise en parallèle d'un condensateur avec une source de courant la transforme en une source de tension. Le condensateur « lisse » la tension aux bornes de la source de courant. Le condensateur « absorbe » alors les surintensités.
- La mise en parallèle d'un condensateur avec une source de tension non idéale l'améliore.

Remarque : on retrouve ces résultats en raisonnant sur :

- ▲ l'aspect temporel : le condensateur assure la continuité de la tension.
- ▲ l'aspect fréquentiel : pour des fréquences élevées, l'impédance équivalente du dipôle tend vers 0.

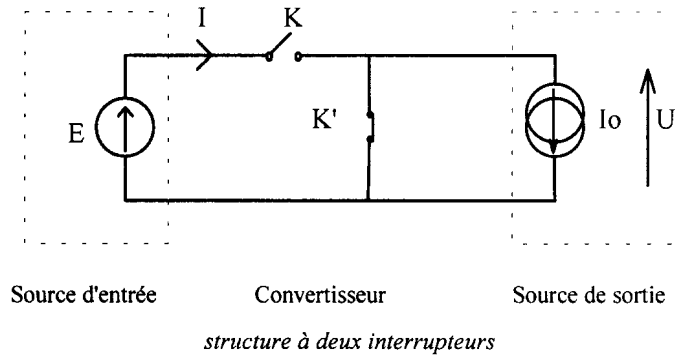
4. Structures générales des convertisseurs

4.1. Convertisseurs directs

4.1.1. Définition

On parle de **convertisseur direct** lorsque les sources d'entrée et de sortie du convertisseur sont de nature différente: en effet, on peut utiliser une structure ne comportant que des interrupteurs car il est possible d'envisager des phases au cours desquelles les deux sources sont interconnectées.

On règle la puissance moyenne transférée en jouant sur les durées respectives des phases d'interconnexion et des phases où les deux sources n'échangent aucune puissance instantanée.



La structure de base est celle de la figure ci-dessus (il est possible d'inverser la figure pour obtenir la structure dans le cas d'une source de courant en entrée et de tension en sortie).

On remarque que le respect des règles du paragraphe 3.3. impose de n'avoir à aucun moment les deux interrupteurs dans le même état. En effet :

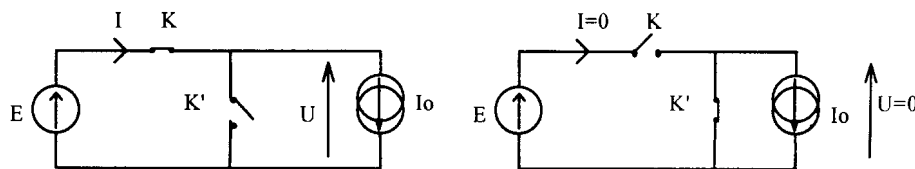
- ▲ l'état $\{K \text{ et } K' \text{ tous deux ouverts}\}$ laisse la source de courant ouverte,
- ▲ l'état $\{K \text{ et } K' \text{ tous deux fermés}\}$ court-circuite la source d'entrée.

4.1.2. Phases de fonctionnement

On étudie la structure précédente dans le cas d'un fonctionnement T -périodique.

Rappel : On appelle **rapport cyclique** le nombre réel compris entre 0 et 1 tel que :

- pour $0 \leq t \leq \alpha.T$ les deux sources sont interconnectées (K fermé et K' ouvert) : on a alors $I = I_o$ et $U = E$ donc une puissance instantanée débitée par la source d'entrée égale à la puissance instantanée absorbée par la source de sortie, soit $p(t) = E.I_o$;
- pour $\alpha.T \leq t \leq T$ les deux sources sont déconnectées (K ouvert et K' fermé) : on a alors $I = 0$ et $U = 0$ donc une puissance instantanée débitée par la source d'entrée nulle ainsi que la puissance instantanée absorbée par la source de sortie.



les deux états de fonctionnement

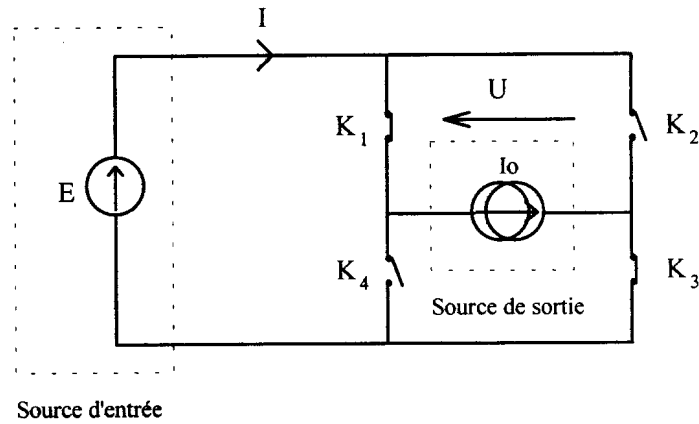
La **puissance moyenne** transférée par le convertisseur entre la source d'entrée et la source de sortie est

$$P = \alpha.E.I_o$$

Le choix des fonctions de commutations réalisées par les interrupteurs K et K' (parmi D , T , $D+T$) devra tenir compte des caractéristiques réelles des sources, notamment d'une possibilité de changement de signe de I_o (bidirectionnalité en courant).

4.1.3. Structure à 4 interrupteurs

Le montage précédent ne permet pas d'inverser la tension aux bornes de la source de sortie. Pour permettre cette inversion on adopte le montage suivant :



structure à quatre interrupteurs

3 phases de fonctionnement sont envisageables (respectant les règles d'association de sources) :

▲ K_1 et K_3 fermés, K_2 et K_4 ouverts: $U = E$;

▲ K_1 et K_3 ouverts, K_2 et K_4 fermés: $U = -E$;

▲ K_1 et K_2 ouverts avec K_3 et K_4 fermés, ou bien K_1 et K_2 ouverts avec K_3 et K_4 fermés : $U = 0$.

La puissance instantanée absorbée par la source de sortie peut donc être $E \cdot I_o$, $-E \cdot I_o$ ou 0.

Ce convertisseur fonctionne dans les **4 quadrants** du plan (U, I) .

4.2. Convertisseurs à accumulation

4.2.1. Principe

On cherche maintenant la structure du convertisseur dans le cas de sources d'entrée et sortie de même nature (tension-tension ou courant-courant).

Lorsque les sources d'entrée et de sortie ont même nature (2 sources de tension par exemple), on ne peut plus envisager de phase d'interconnexion si bien qu'il faut introduire un élément de stockage d'énergie qui ne doit absorber aucune puissance active (puissance moyenne): on utilisera une bobine ou un condensateur. C'est un **convertisseur à accumulation**.

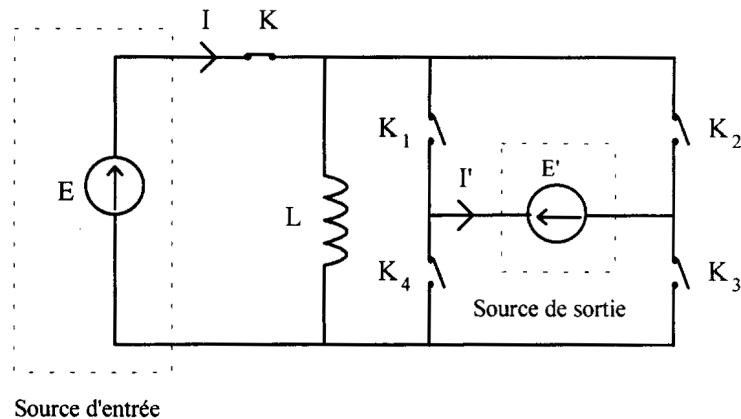
Cet élément de stockage permet de transformer la nature de la source d'entrée (cf. § 3.5.). On retiendra que :

- Un condensateur sera utilisé comme élément de stockage dans un convertisseur dont les sources d'entrée et sortie sont des sources de courant;
- une bobine sera utilisée comme élément de stockage dans un convertisseur dont les sources d'entrée et sortie sont des sources de tension.

4.2.2. Convertisseur entre sources de tension

On doit connecter alternativement la bobine à chaque source de tension en veillant à ne jamais interrompre le courant.

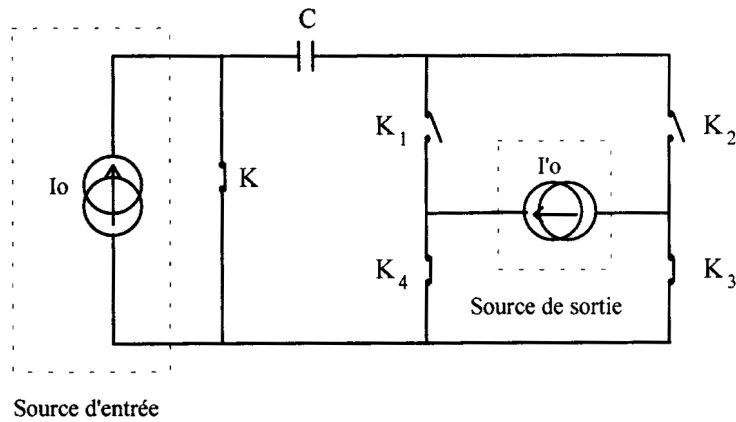
On peut utiliser la structure générale ci-dessous dans laquelle une structure en pont à quatre interrupteurs a été placée pour permettre les deux sens de connexion.



convertisseur tension - tension à 5 interrupteurs

4.2.3. Convertisseur entre sources de courant.

Pour une conversion courant-courant l'élément de stockage est le condensateur. On peut utiliser la structure ci-dessous:



convertisseur courant - courant à 5 interrupteurs

4.2.4. Phases de fonctionnement d'un convertisseur à accumulation

On étudie le cas particulier du convertisseur tension-tension à 5 interrupteurs du paragraphe 4.2.2.. Le principe de fonctionnement est d'alterner des phases de transfert d'énergie entre la source d'entrée et l'élément de stockage avec des phases de transfert entre l'élément de stockage et la source de sortie.

- **1^{ère} phase:** K est fermé, les autres interrupteurs sont ouverts.

L'intensité du courant traversant la bobine satisfait à l'équation

$$L \frac{di}{dt} = E$$

i est donc une fonction linéaire croissante de t , donc l'énergie emmagasinée augmente:

$$p_e = E \cdot i = \frac{d\left(\frac{1}{2}Li^2\right)}{dt}$$

- **2^{ème} phase:** K est ouvert, la bobine est connectée à la source de sortie par deux interrupteurs fermés par exemple K_2 et K_4 .

L'intensité du courant traversant la bobine obéit à

$$L \frac{di'}{dt} = -E'$$

i' est donc une fonction linéaire décroissante de t , donc l'énergie emmagasinée diminue: la source de sortie reçoit de l'énergie:

$$p_s = E' \cdot i' = -\frac{d\left(\frac{1}{2}Li'^2\right)}{dt}$$

En régime permanent, sur une période, l'énergie cédée par la source d'entrée est restituée à la source de sortie. Sinon, la différence correspond à un accroissement de l'énergie emmagasinée par la bobine (pertes exclues ici), le fonctionnement n'est alors plus périodique.

5. Applications

5.1. Transfert de puissance entre un générateur de tension continue et un récepteur de courant continu par à une cellule à deux interrupteurs

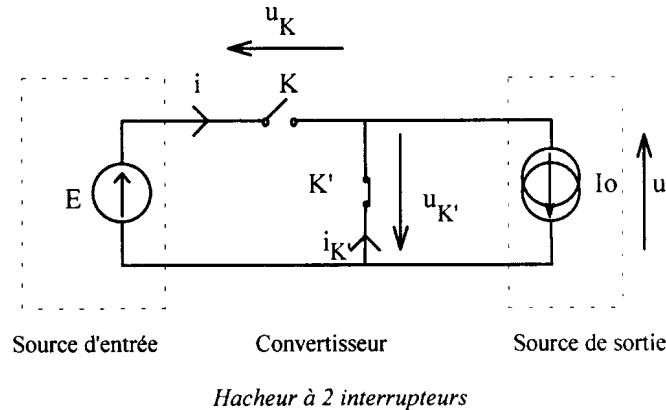
5.1.1. Position du problème

- ▲ La source d'entrée est une source de tension continue idéale ;
 - ▲ la source de sortie est une source de courant (machine à courant continu) ;
 - ▲ on cherche à transférer une puissance moyenne réglable.

5.1.2. Phase de traction - hacheur non réversible

Les sources étant de natures différentes, on peut utiliser un convertisseur direct.

De plus, dans un premier temps on suppose que la source de courant est unidirectionnelle et on désire un transfert de puissance uniquement de la source d'entrée vers la source de sortie, on peut donc utiliser un hacheur à deux interrupteurs.



D'après le paragraphe 4.1.2. :

- pour $0 \leq t \leq \alpha.T$ les deux sources sont interconnectées (K fermé et K' ouvert): on a alors $I = I_o$ et $U = E$ donc une puissance instantanée reçue par le moteur $p(t) = E.I_o$;
- pour $\alpha.T \leq t \leq T$ les deux sources sont déconnectées (K ouvert et K' fermé): on a alors $I = 0$ et $U = 0$ donc une puissance instantanée reçue par le moteur $p(t) = 0$; c'est la phase de **roue libre** ;

La **puissance moyenne** transférée par le convertisseur entre la source d'entrée et la source de sortie est

$$P = \alpha.E.I_o$$

avec α rapport cyclique. Dans un tel cas, la loi de commande est linéaire: l'utilisateur choisit la puissance transférée de façon linéaire en jouant sur α .

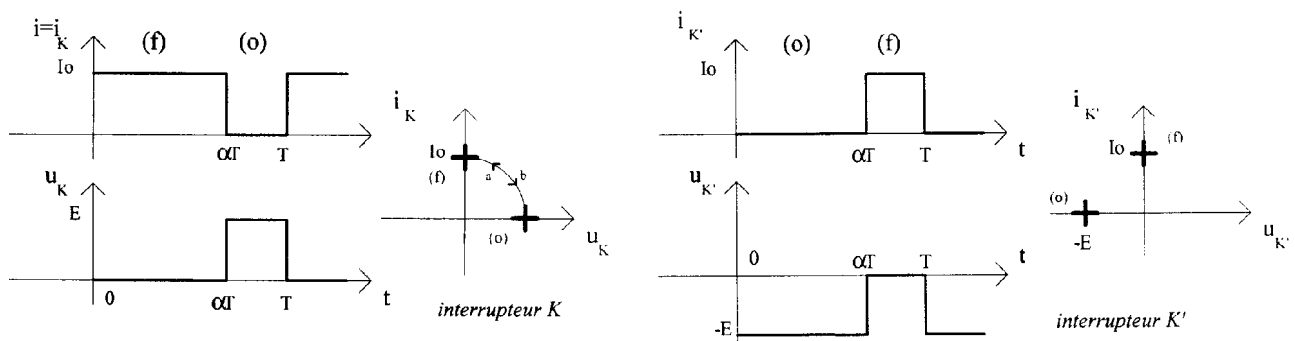
Choix du rapport cyclique α :

- *Au démarrage de la machine*, la puissance transférée au moteur permet d'accroître l'énergie cinétique de la partie mécanique; on choisira un rapport cyclique α pas trop important pour tenir compte des limitations des divers éléments (courant absorbé par le moteur par exemple);
- *En régime permanent*, la puissance transférée au moteur compense les pertes par frottement ou effet Joule: grâce à une boucle de régulation le rapport cyclique est choisi en conséquence.

Choix des interrupteurs :

Ce choix se fait en tenant compte des points de fonctionnement dans le plan tension-courant et de la nature spontanée ou forcée des commutations.

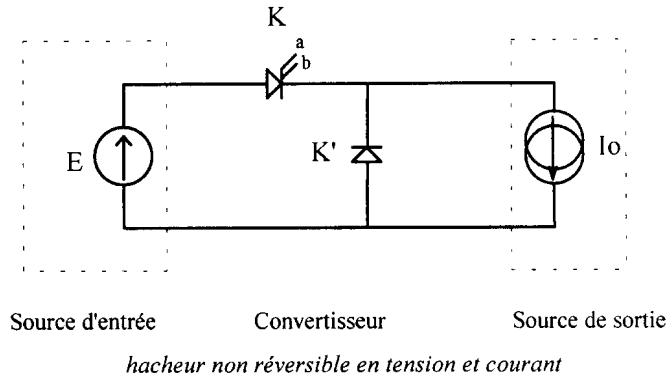
D'après l'étude précédente les interrupteurs fonctionnent de la manière suivante:



Les intensités traversant K et K' sont toujours positives ou nulles. Les interrupteurs choisis peuvent être unidirectionnels.
Caractère commandé ou non des interrupteurs K et K' :

- Supposons que K' soit une diode :
Sa conduction se produit dès que l'interrupteur K est ouvert, car l'intensité I est dans le sens passant de la diode. Son blocage se produit dès la fermeture de K , car elle est alors polarisée dans le sens bloqué.
- Supposons que K soit une diode. Si K' est fermé, elle est conductrice; le générateur est en court-circuit et le montage est endommagé.

Nous choisirons donc pour K une fonction transistor et pour K' une fonction diode:



Le montage s'appelle *hacheur série*, car l'élément commandé est en série avec le générateur (source de tension).

La diode est dite diode de *roue libre*, car elle est conductrice pendant la phase d'ouverture de l'élément commandé.

5.1.3. Phase de récupération (freinage)

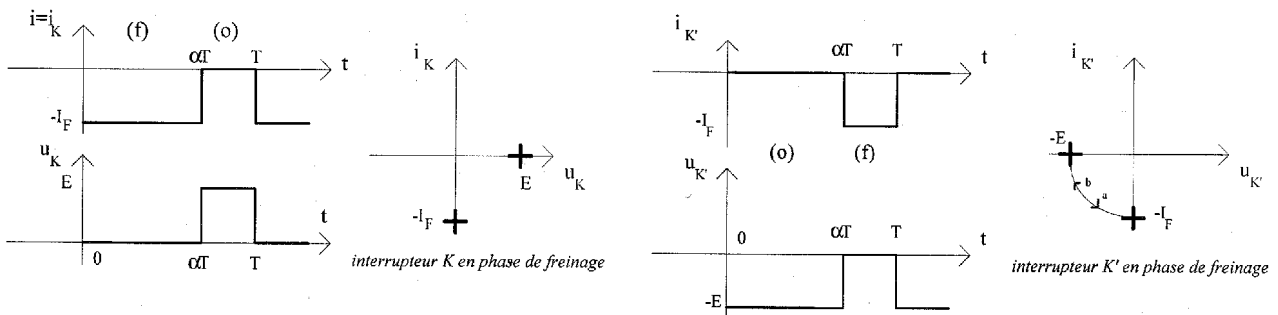
On désire maintenant inverser le sens du transfert de puissance. Cela revient à inverser le sens du courant dans la source de sortie: on note alors $I_o = -I_F$ ce nouveau courant ($I_o < 0$). Il faut de plus supposer que la source d'entrée est réversible en courant pour restituer la puissance. On reprend alors la même structure à deux interrupteurs du paragraphe 5.1.2..

- pour $0 \leq t \leq \alpha.T$ les deux sources sont interconnectées (K fermé et K' ouvert): on a alors $I = I_o = -I_F$ et $U = E$ donc une puissance instantanée reçue par la source d'entrée $p(t) = E.I_F$;
- pour $\alpha.T \leq t \leq T$ les deux sources sont déconnectées (K ouvert et K' fermé): on a alors $I = 0$ et $U = 0$ donc une puissance instantanée reçue par la source d'entrée $p(t) = 0$; c'est la phase de **roue libre**;

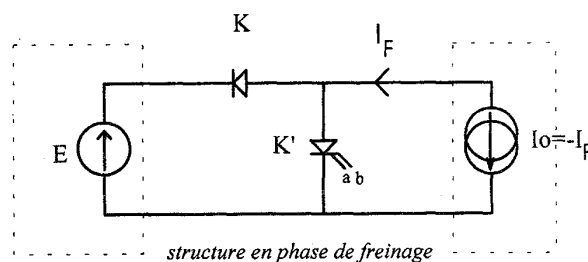
La **puissance moyenne** transférée par le convertisseur entre le moteur et la source d'entrée est

$$P = \alpha.E.I_F$$

Pour le choix des interrupteurs on procède comme précédemment :



En raisonnant comme au paragraphe 5.1.2. on aboutit au choix suivant :

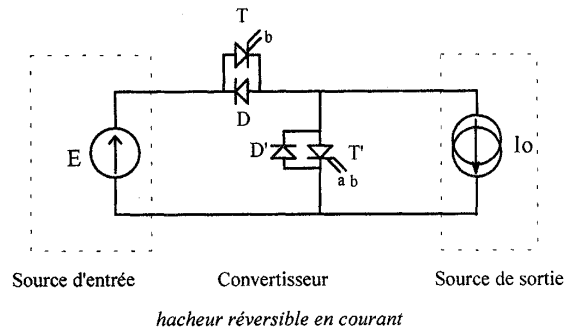


Le montage s'appelle *hacheur parallèle*, car l'élément commandé est en parallèle avec le générateur (source de courant).

5.1.4. Hacheur réversible en courant

Les hacheurs précédents sont qualifiés de "hacheur à un quadrant": E et I sont de signes constants. Ils sont non réversibles en courant et tension.

Pour remédier à ce problème on monte le hacheur parallèle en parallèle avec le hacheur série pour un transfert de puissance réversible à deux quadrants ($E > 0$ et I de signe quelconque; hacheur réversible en courant).



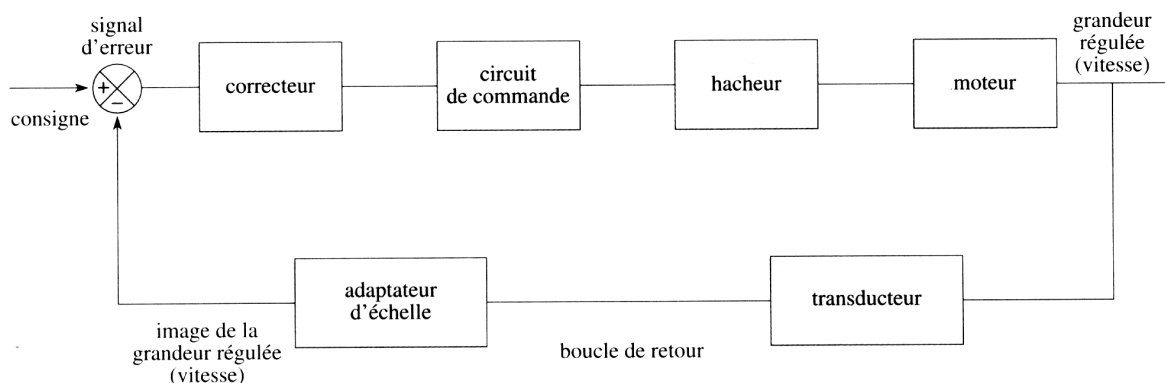
5.2. Application à la commande de vitesse d'une machine à courant continu

Le but de la régulation de vitesse d'un moteur est:

- de maintenir celle-ci à une valeur imposée (consigne) indépendamment du couple appliqué à l'axe du moteur;
- de s'assurer que le courant moteur ne dépasse pas une valeur maximale même en cas de couple important, ou au démarrage;
- de permettre un démarrage progressif du moteur pour éviter des efforts mécaniques excessifs.

Le schéma fonctionnel d'un régulateur simple de vitesse d'un moteur à courant continu est donné ci-dessous; les différents éléments sont:

- Le transducteur est une génératrice tachymétrique ou un capteur optoélectronique. Une génératrice délivre une tension proportionnelle à sa vitesse de rotation, alors que le capteur optoélectronique délivre une tension variable de fréquence proportionnelle à la vitesse de rotation. Ce dernier est donc associé à un convertisseur fréquence tension;
- L'amplitude de la tension obtenue en sortie du transducteur est adaptée à l'entrée du comparateur par l'adaptateur d'échelle;
- Le comparateur bâtit le signal d'erreur différence entre la consigne et le retour de vitesse adapté;
- Ce signal mis en forme à l'aide d'un filtre sert à fabriquer le signal de commande du hacheur alimentant le moteur.



Une seconde boucle peut être mise en cascade pour effectuer une régulation en courant avec limitation.

Comme la constante de temps électromécanique du moteur est en général grande devant la période du hacheur, le signal alternatif dû au hachage est en dehors de la bande passante du moteur et n'apparaît pas dans sa vitesse de rotation. Tout se passe comme si le moteur était alimenté par la tension moyenne délivrée par le hacheur. L'ensemble circuit de commande-hacheur est alors équivalent à un amplificateur de puissance.

- Si les éléments de la chaîne sont linéaires, nous retrouvons alors la structure bouclée classique ci-dessous:

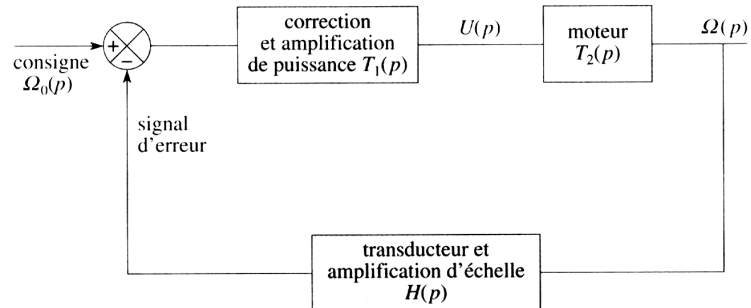


Schéma fonctionnel de régulation de vitesse d'un moteur.