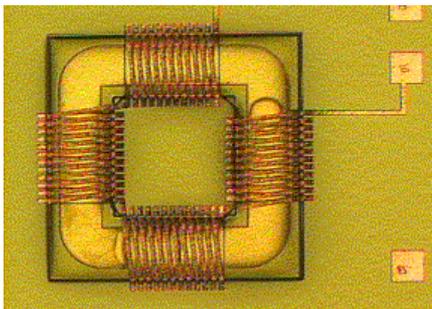


Chapitre 1

Principes de base de la conversion statique Synthèse des convertisseurs statiques

OBJECTIFS ET APPLICATIONS DE L'ELECTRONIQUE DE PUISSANCE

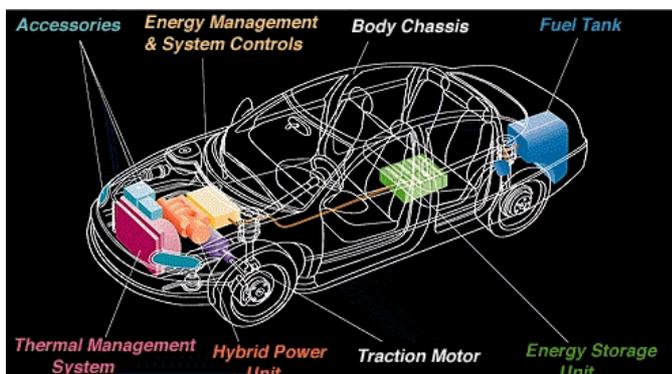
L'électronique de puissance concerne le **traitement de l'énergie électrique**. Elle permet de convertir cette énergie disponible sous une forme donnée (continue, alternative, basse ou haute tension, etc..) en une autre. Dans ce contexte, ce n'est pas le niveau de puissance ou d'énergie traitée qui détermine ses spécificités, ce sont les applications et leurs contraintes d'usage. Ainsi, nous considérerons comme relevant du champ de la conversion statique d'énergie électrique, donc relevant de ses méthodes de description et d'analyse, un dispositif qui serait logé dans une montre bracelet (niveau de puissance de l'ordre de $10\mu\text{W}$) au même titre qu'un système d'alimentation d'une locomotive de plusieurs MW. Les quelques exemples suivants illustrent ces propos.



Micro-transformateur pour alimentation intégrée sur silicium : $100\mu\text{W}$



lampes fluorescentes alimentées par un onduleur résonnant : 15W



véhicule hybride : 35kW

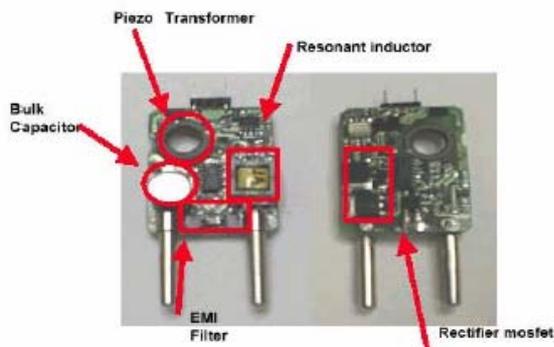


locomotive FRET : 4,2MW

Une spécificité forte de ce domaine réside dans les rendements de conversion recherchés, ils doivent être typiquement très proche de 100%, de telle sorte que les pertes ne doivent représenter qu'une fraction minimale de l'énergie convertie. Cela impose donc l'usage d'une électronique de commutation pour laquelle les interrupteurs doivent présenter des pertes minimales en commutation

et dans leurs états passants ou bloqués. L'amélioration continue de leurs performances est un leitmotiv très fort de la recherche dans ce domaine, des progrès continus se font, des nouveaux matériaux sont mis en œuvre : carbure de silicium, arséniure de gallium, diamant. Des travaux importants concernent les semi-conducteurs, leur structure, les matériaux utilisés, leurs procédés de fabrication, leur fiabilité.

Le corollaire de ce principe de commutation est la nécessaire association d'éléments réactifs destinés à filtrer des grandeurs fortement découpées ou à stocker transitoirement de l'énergie. On voit donc un second grand domaine d'intérêt autour des composants passifs qui doivent être adaptés au fonctionnement à haute fréquence et aux fortes contraintes électriques, magnétiques et diélectriques tout en ayant des niveaux de pertes extrêmement faibles. Les performances des convertisseurs statiques dépendent largement des propriétés physiques de ces composants et, in fine, des matériaux les constituant. Aussi, la recherche dans le domaine des matériaux (magnétiques, diélectriques, électro-actifs) est-elle fondamentale pour la conversion statique ; les besoins se situent dans des matériaux à faibles pertes lorsque les contraintes électromagnétiques et thermiques s'accroissent.

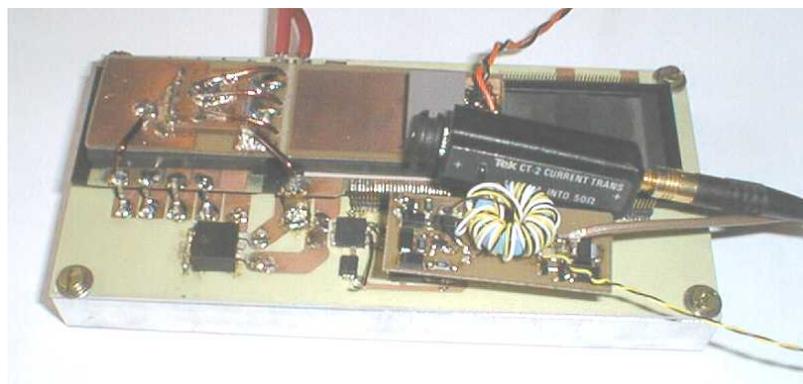


bloc d'alimentation utilisant un transformateur piézoélectrique



génération et stockage d'énergie utilisant des matériaux polymères piézoélectriques

Enfin, ces dispositifs de traitement de l'énergie électrique doivent posséder de bonnes caractéristiques d'usage : compacité, coût d'industrialisation réduit, fiabilité. Ceci constitue un troisième grand domaine de recherche dans lequel des contraintes multi-physiques apparaissent : comment, dans un volume réduit maîtriser des problèmes d'assemblage, de thermique, de fiabilité et de compatibilité électromagnétique ? On aborde là le problème de l'environnement des semi-conducteurs, du packaging et de l'intégration en électronique de puissance.



Alimentation à découpage intégrée sur substrat SMI

Ainsi, l'ensemble des domaines rapidement balayés dans cette introduction constituent-ils le champ d'étude et de recherche de l'électronique de puissance actuelle.

PRINCIPES DE BASE DE L'ÉLECTRONIQUE DE PUISSANCE

Intérêt de la commutation pour les échanges d'énergie

L'électronique de puissance est une électronique de commutation : idéalement, un interrupteur ouvert ou fermé ne dissipe pas d'énergie. Ainsi, il est possible de transférer de l'énergie entre une source d'entrée et une charge de sortie en contrôlant son transfert. A chaque cycle de commutation, un quantum d'énergie est donc transféré (ou stocké si un dispositif existe dans la structure) entre la source d'entrée et la sortie.

LES SOURCES STATIQUES ET DYNAMIQUES

Les sources électriques existantes sont des générateurs de tension ou de courant, continus ou alternatifs. Par définition et en régime statique, une source de tension idéale impose une tension indépendamment du courant qui la parcourt ; une source de courant idéale impose un courant indépendamment de la tension à ses bornes.

Par extension, on parlera de **sources dynamiques de tension ou de courant** des dipôles tels que respectivement la tension et le courant ne peuvent varier instantanément à leurs bornes. Ce comportement est observé pour un condensateur (source dynamique de tension) ou une inductance (source dynamique de courant).

La réalité technologique diffère de ces descriptions idéales. Si on prend le cas d'un accumulateur électrochimique débitant sur une charge résistive via quelques mètres de câble, la tension est effectivement imposée à ses bornes : c'est donc une source de tension quasi-parfaite. Si la charge est très non-linéaire et que le courant peut fluctuer très rapidement, l'inductance parasite des câbles va empêcher toute variation instantanée du courant à l'échelle temporelle de cette variation : le générateur électrochimique et son câble sont alors assimilables à une source de courant sur cette échelle temporelle. Ainsi, l'impédance interne d'une source joue t'elle un rôle fondamental pour caractériser sa nature. Il sera souvent nécessaire, compte tenu d'impédances parasites de connexion ou de l'impédance interne du générateur de placer à l'entrée du convertisseur un élément qui « renforce » le caractère de cette source : par exemple, on placera une capacité de forte valeur à l'entrée d'un convertisseur de tension alimenté par une batterie, un panneau solaire ou une machine à courant continu.

La réversibilité en puissance d'une source est une caractéristique très importante à connaître. En effet, elle conditionne très directement la structure de conversion, son mode de contrôle et les interrupteurs qui la constituent. Un accumulateur électrochimique est une source de tension réversible en puissance (le courant peut être bidirectionnel) mais évidemment unidirectionnelle en tension. Toutes les machines tournantes (MCC, machine synchrone et asynchrone) possèdent une réversibilité en puissance ; la MCC est réversible en tension et en courant.

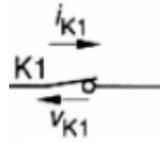
Le convertisseur statique placé entre une source et une charge doit être conçu selon les réversibilités souhaitées ; si la charge est réversible (elle peut par exemple restituer de l'énergie : un train en descente) et qu'on souhaite récupérer cette énergie, la source d'entrée et le convertisseur devront l'être aussi. Il peut être dangereux d'associer une source non réversible avec un convertisseur et une charge réversibles : en cas de changement de sens du flux d'énergie, la non-réversibilité de la source entraîne généralement un accroissement d'énergie dans un composant de stockage (condensateur d'entrée) et un accroissement des contraintes électriques (surtension) avec des conséquences souvent destructrices !

LES INTERRUPTEURS

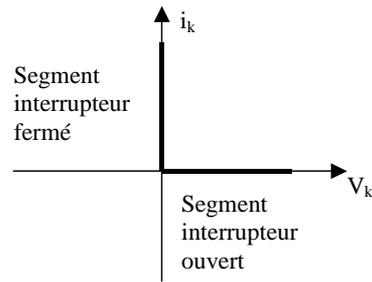
nombre de segments, régime statique et dynamique,

Un interrupteur idéal est considéré comme un dipôle orienté en convention récepteur, comme représenté sur la figure suivante. Sa caractéristique statique est donc composée des différents segments situés sur les axes du repère (v_k, i_k) . Ainsi, on peut envisager des interrupteurs à 2, 3 ou 4

segments qui seront adaptés à la nature et aux réversibilités des sources et des charges. Noter que pour un interrupteur idéal, la **caractéristique statique est non dissipative**.



orientation de l'interrupteur : convention récepteur



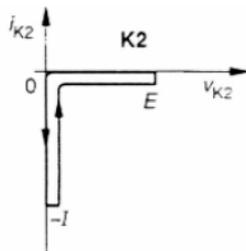
caractéristique statique : interrupteur 2 segments

On doit également préciser la caractéristique dynamique d'un interrupteur : c'est la trajectoire suivie par le point de fonctionnement pour passer d'un point situé sur un segment à un point situé sur un autre segment : cette trajectoire peut passer dans un des 1/4 de plan ou suivre les axes comme on le verra plus loin. L'aspect dynamique est important car il permet de mettre en évidence la notion de **pertes par commutation**. En effet, lors d'une commutation (i.e. le point de fonctionnement parcourt une certaine trajectoire), l'énergie dissipée s'écrit :

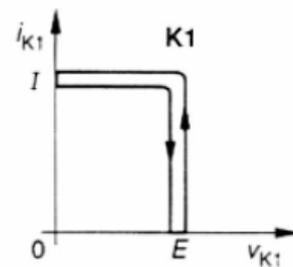
$$W = \int_{\text{commutation}} v_k(t) i_k(t) dt$$

Cette énergie ne peut être que >0 ou nulle (interrupteur nécessairement dissipatif), ce qui a pour conséquences que :

- Soit le point de fonctionnement se déplace le long des axes dans des quadrants où les segments sont de signes opposés (quadrants 2 et 4) : $W=0$, ce type de commutation est nommée « **commutation spontanée** ».
- Soit il se déplace dans un 1/4 de plan où les segments sont de mêmes signes : quadrants 1 et 3, $W>0$, on parle alors de **commutation commandée** à l'amorçage ou au blocage .



commutation spontanée d'un interrupteur : $W = 0$



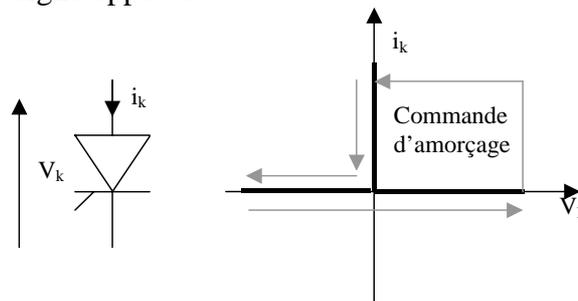
commutation commandée d'un interrupteur : $W > 0$

Ainsi, si un interrupteur idéal n'est pas dissipatif au repos, il le devient lors des commutations sauf si la trajectoire s'effectue en longeant les axes. Ce caractère dissipatif, qui entraîne nécessairement une élévation de température du dispositif est d'autant plus important que la fréquence de commutation s'accroît : ceci constitue donc une limitation structurelle à la montée en fréquence de fonctionnement, sauf à effectuer les commutations sur des trajectoires non dissipatives, comme on le verra au chapitre 3 (commutation douce).

Quelques exemples d'interrupteurs

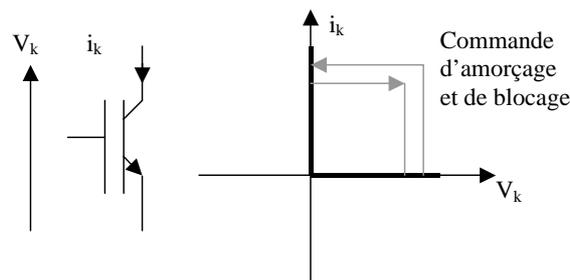
La diode : c'est un interrupteur à 2 segments de signe opposés. Idéalement, elle ne peut donc commuter que sans pertes. Ceci n'est technologiquement pas réalisé à cause de son mécanisme de conduction par diffusion : il en résulte une charge stockée qui doit s'évacuer et peut être à l'origine de pertes par commutation.

Le thyristor : c'est un interrupteur à 3 segments et à commande d'amorçage. La trajectoire du point de fonctionnement ne peut être que celle représentée sur la figure suivante, compte tenu de la présence de 2 segments de signe opposés.



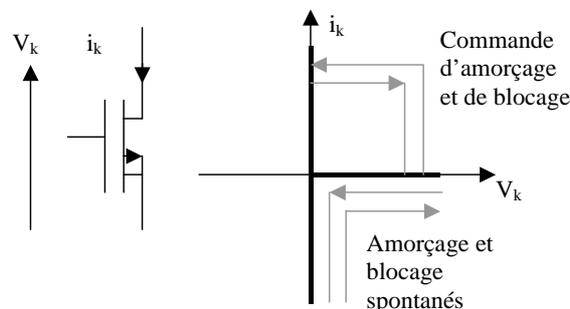
caractéristique statique et dynamique d'un thyristor

l'IGBT : c'est un interrupteur à 2 segments commandable à l'amorçage et au blocage.



caractéristique statique et dynamique d'un IGBT

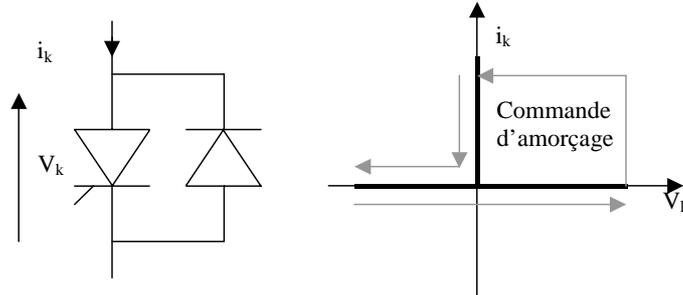
Le MOSFET : c'est un interrupteur à 3 segments, commandable à l'amorçage et au blocage. Le 3^{ème} segment ($I_k > 0$) est dû à la diode de structure de ce composant. Si le composant n'a pas été spécifié pour pouvoir l'utiliser, il faut éviter de la faire fonctionner. Dans certaines application (commutation douce, voir chapitre 3), on peut toutefois l'utiliser quelque soit la technologie du composant.



caractéristique statique et dynamique d'un MOSFET

Ces exemples correspondent aux interrupteurs « naturels » existants. Si on a besoin d'une caractéristique statique et dynamique autre, il faut donc la synthétiser par association de composants et les commander spécifiquement selon la trajectoire dynamique voulue. Un exemple d'interrupteur

de synthèse est donné ci-dessous pour constituer un interrupteur bidirectionnel en courant à simple commande d'amorçage.



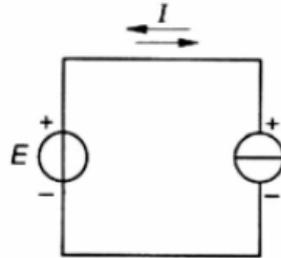
interrupteur de synthèse constitué par l'association anti-parallèle d'une diode et d'un thyristor

règles d'association des sources et des interrupteurs

Un convertisseur statique est donc constitué d'interrupteurs qui connectent séquentiellement une source d'entrée à une charge (encore dénommée source de sortie compte tenu de sa réversibilité potentielle). On constate aisément que toutes les associations de sources ne sont pas permises :

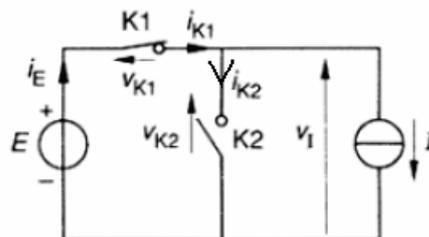
- 1- On ne peut mettre en parallèle deux sources de tension de valeurs différentes. La conséquence en serait un courant de circulation infini,
- 2- On ne peut mettre en série deux sources de courant de valeurs différentes (tension infinie),
- 3- On ne peut court-circuiter une source de tension (courant infini de court-circuit),
- 4- On ne peut ouvrir une source de courant (tension infinie d'ouverture).

Il reste donc comme association permise deux sources de natures différentes : une source de tension associée à une source de courant comme représenté ci-dessous.



Association d'une source de tension à une source de courant

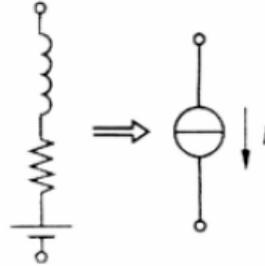
L'introduction d'interrupteurs permet donc le contrôle de l'échange d'énergie entre ces deux sources. Le respect des règles énoncées précédemment conduit donc à devoir utiliser deux interrupteurs : le premier connecte les sources entre elles, le second assure le respect de la règle 4 vis-à-vis de la source de courant. La structure de conversion la plus simple met donc en œuvre **obligatoirement 2 interrupteurs dont les fonctionnements sont liés** : leurs états sont nécessairement complémentaires. Cette structure de base est nommée « cellule de commutation » elle est la brique élémentaire de tout convertisseur statique.



structure de conversion élémentaire

Si les sources d'entrée et de sortie sont de natures différentes (donc non directement connectables entre elles), on peut alors :

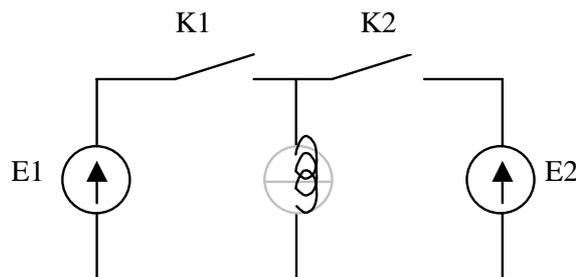
-modifier la nature d'une d'entre elles en lui associant un élément réactif qui lui donnera le caractère voulu, comme représenté ci-dessous : on ajoute une inductance à une source de tension pour lui donner un caractère de source de courant dynamique.



source de tension + inductance = source de courant

-utiliser un composant réactif dans la structure qui permettra un transfert indirect d'énergie : dans une première phase de fonctionnement la source d'entrée transfère de l'énergie au composant réactif qui la restitue dans la seconde phase à la source de sortie, comme représenté ci-dessous.

Le contrôle de l'énergie dans ce type de structure s'effectuant en deux temps, elle est moins efficace qu'une structure à transfert direct : celui-ci ne peut s'effectuer au mieux que sur une fraction de la période de découpage. Cette solution est réservée aux applications de puissance faibles (en pratique < quelques 100W).

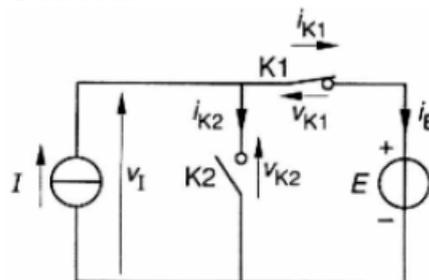


exemple de structure de conversion indirecte entre deux sources de tension via un stockage intermédiaire (inductance = source de courant)

Conversion directe, exemple de synthèse d'un hacheur élévateur

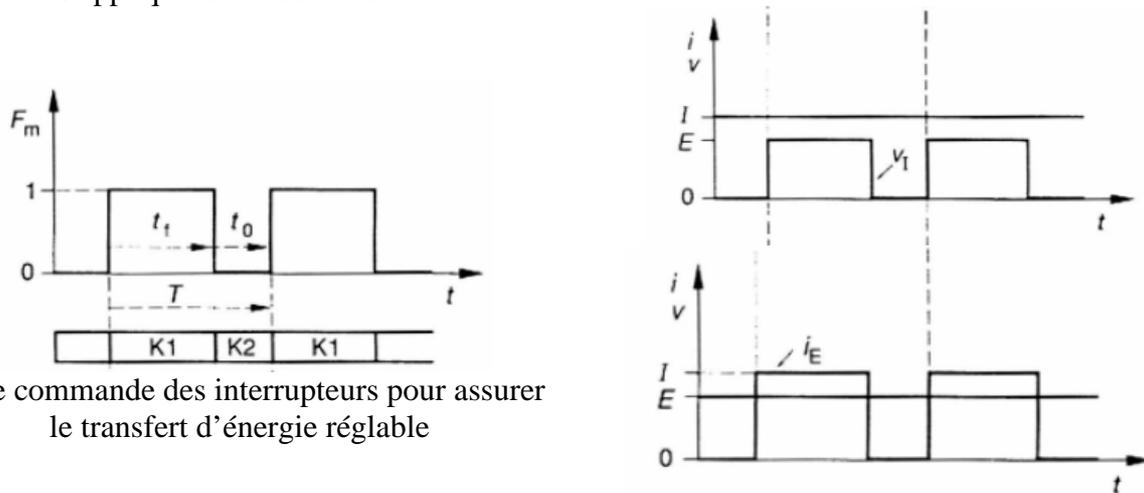
La méthode de synthèse consiste donc à partir de l'examen des grandeurs électriques appliquées aux interrupteurs et résultantes d'un fonctionnement souhaité du convertisseur, d'identifier la structure de conversion, la nature des interrupteurs et leur commande.

L'exemple ci-dessous illustre ce principe. On souhaite transférer de l'énergie entre une source de courant et une source de tension. On a vu plus haut que la structure adaptée met en œuvre 2 interrupteurs comme représenté ci-dessous.



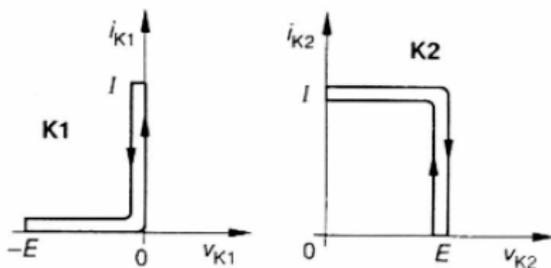
organisation des interrupteurs permettant le transfert d'énergie entre les sources

Il faut alors définir les formes d'onde temporelles représentatives du fonctionnement voulu : à savoir la transmission (ou connexion) séquentielle réglable d'énergie entre les deux sources. La courbe suivante représente les états correspondants des interrupteurs et les contraintes électriques temporelles appliquées aux sources.

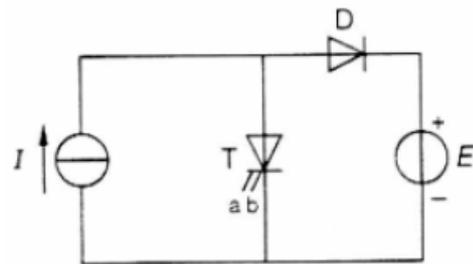


loi de commande des interrupteurs pour assurer le transfert d'énergie réglable

Ces courbes permettent alors de déterminer l'évolution temporelle des grandeurs électriques appliquées aux interrupteurs puis de définir leurs caractéristiques statique et dynamique et enfin d'aboutir à la structure complète comme représentée ci-dessous.



identification des caractéristiques statique et dynamique des interrupteurs



finalisation de la structure de conversion

La structure étant définie ainsi que son mode de contrôle, on peut alors déterminer ses caractéristiques électriques externes et affiner progressivement le dimensionnement : choix du calibre des composants, dimensionnement des composants de filtrage en entrée et en sortie selon la fréquence de découpage, estimation des pertes, etc...

METHODE DE SYNTHÈSE D'UN CONVERTISSEUR

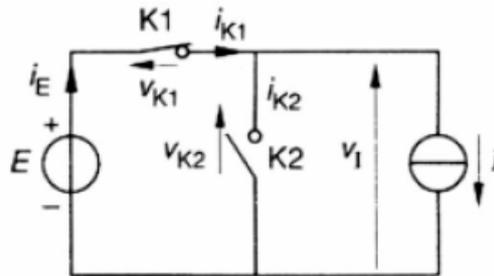
L'objectif de la méthode de synthèse des convertisseurs statiques consiste, partant de la description aussi complète que possible de l'évolution désirée des grandeurs externes du convertisseur, de déterminer la topologie (structure) du convertisseur et d'identifier la nature des interrupteurs. A noter que la stratégie de commande doit être précisée selon la nature de la source d'entrée :

- si elle est continue, il sera nécessaire d'avoir un dispositif qui séquence la commutation des interrupteurs : base de temps ou système qui détermine l'état des interrupteurs par comparaison avec des grandeurs extrêmes,
- si elle est alternative, on peut synchroniser la commande des interrupteurs par rapport aux passages à zéro de la tension.

LA CELLULE DE COMMUTATION

Structure, orientation des grandeurs, notion de signe de commutation

On a constaté que compte tenu des règles d'association des sources et des interrupteurs ceux-ci ne pouvaient être qu'associés par deux, d'où la notion fondamentale de **cellule de commutation**. Aux extrémités, on trouve une source de tension, à son point milieu, on trouve une source de courant, comme représenté sur la figure suivante. On rappelle que les interrupteurs sont orientés en convention récepteur.



Représentation et orientation d'une cellule de commutation

L'état des interrupteurs étant complémentaire, il suffit donc d'en étudier un seul pour connaître le fonctionnement de la cellule. La tension V_{K2} est représentative de la tension de sortie de la cellule de commutation. On choisit arbitrairement d'orienter positivement le courant sortant de la cellule (cas de la figure) et positivement la tension appliquée à l'entrée (tension E sur la figure). Ainsi, la connaissance de la tension de sortie (V_{K2}) et du courant permettent de caractériser entièrement le fonctionnement de la cellule.

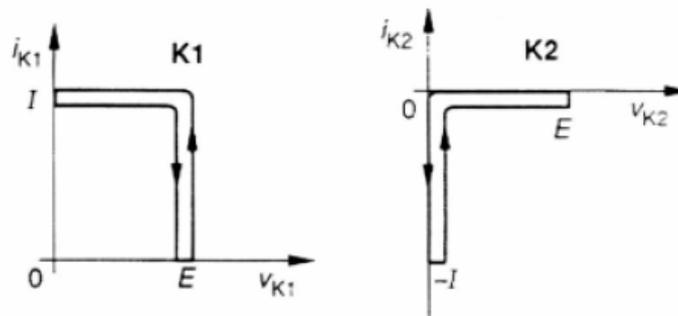
Elaboration des règles de fonctionnement de la cellule par observation des grandeurs extérieures, signe de la commutation et du courant.

Le fonctionnement de la cellule de commutation associée aux sources précédemment définies impose que :

$$V_{K1} + V_{K2} = E$$

$$I_{K1} - i_{K2} = I$$

Ces lois sont vraies quel que soit l'état des interrupteurs et notamment durant le régime transitoire de la commutation. Ainsi, si $E > 0$ et $I > 0$, la trajectoire des points de fonctionnement est celle représentée ci-dessous :



Trajectoire des points de fonctionnement des interrupteurs

On constate donc qu'à la commutation commandée (K1) qui est dissipative (trajectoire dans le premier quadrant) est obligatoirement associée une commutation spontanée (K2).

De cette remarque, on peut tirer les constatations suivantes concernant l'un quelconque des interrupteurs K_i de la cellule :

- (1) si les signes de i_{K_i} et v_{K_i} sont identiques avant et après la commutation, on a affaire à la commutation commandée de cet interrupteur,
- (2) dans le cas contraire, on a affaire à la commutation spontanée de cet interrupteur.

On adopte la convention de vocabulaire suivante :

Une commutation sera dite >0 lorsque la variation de la tension de sortie est >0 : $dV_{K2}/dt >0$

Une commutation sera dite <0 dans le cas contraire.

En observant le signe de la commutation, le signe du courant de sortie de la cellule et en appliquant les remarques précédentes (1) & (2), on en déduit que :

- (3) si la commutation et le courant I sont de mêmes signes, il y a commutation commandée à l'amorçage de l'interrupteur ouvert de la cellule de commutation.
- (4) si la commutation et le courant I sont de signes contraires, il y a commutation commandée au blocage de l'interrupteur fermé de la cellule de commutation.

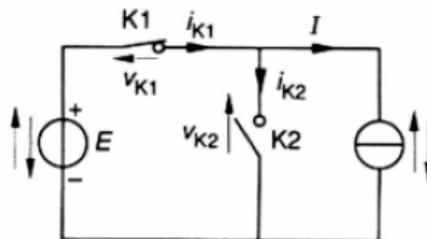
Par ailleurs, l'observation de la réversibilité des sources d'entrée et de sortie permet de déterminer le nombre de segments des interrupteurs :

I bidirectionnel et E unidirectionnel implique que K1 et K2 soient bidirectionnels en courant : interrupteurs 3 segments, 2 en courant 1 en tension

E bidirectionnel et I unidirectionnel implique que K1 et K2 soient bidirectionnels en tension : interrupteurs 3 segments, 2 en tension et 1 en courant.

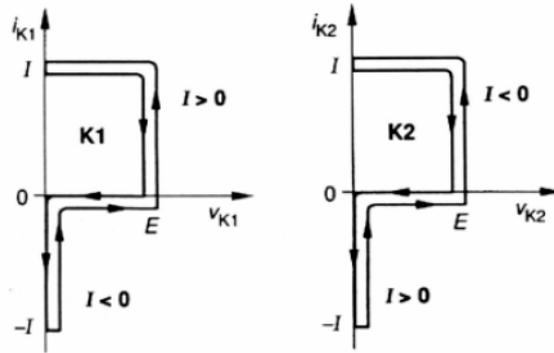
Exemple 1 :

On considère sur la figure suivante un convertisseur connectant une source de tension à une source de courant. Cette dernière est bidirectionnelle en courant mais unidirectionnelle en tension. Les flèches à côté de la source E montrent qu'elle est réversible en courant.



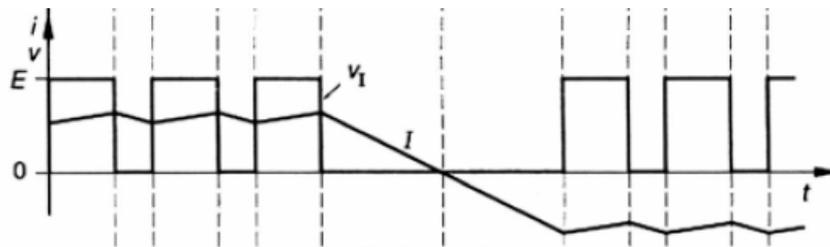
Structure bidirectionnelle en courant

La bidirectionnalité de I implique donc celle des interrupteurs, leur caractéristique est représentée ci-dessous :



Définition des trajectoires des interrupteurs

Admettons qu'on souhaite obtenir le cycle de fonctionnement représenté ci-dessous :



Cycle de fonctionnement souhaité en sortie de la cellule de commutation

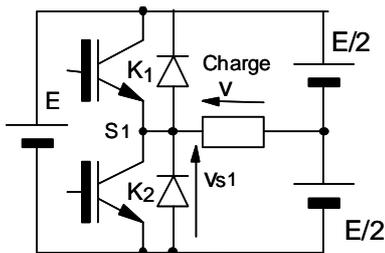
Examinons le cas où $I > 0$. la tension V_1 permet de déterminer le signe de la commutation : pour obtenir une commutation >0 , on doit donc réaliser la commutation à l'amorçage de l'interrupteur ouvert (règle (3)) dans ce cas K1, la commutation de K2 est donc spontanée ; ce cas est repéré par $I > 0$ sur les caractéristiques des interrupteurs (figure x).

Lorsque I devient < 0 , à la commutation >0 correspond maintenant un courant $I < 0$, il s'agit donc d'opérer le blocage de l'interrupteur fermé, K2 en l'occurrence. Il en résulte que K1 commute spontanément ; ce cas est identifié par $I < 0$ sur la figure x.

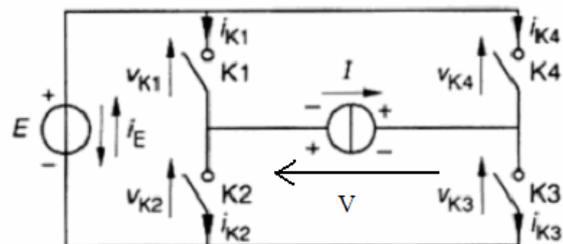
Le fonctionnement dans les deux cas implique donc que K1 et K2 soient bidirectionnels en courant, unidirectionnels en tension, commandables à l'amorçage et au blocage.

Exemple 2 :

On considère à présent une structure de conversion dans laquelle on souhaite que la tension de sortie soit bidirectionnelle en tension à partir d'une source unidirectionnelle E . La solution consiste soit à utiliser une cellule de commutation et une source à point milieu, soit à associer deux cellules de commutation comme représenté à la figure suivante :

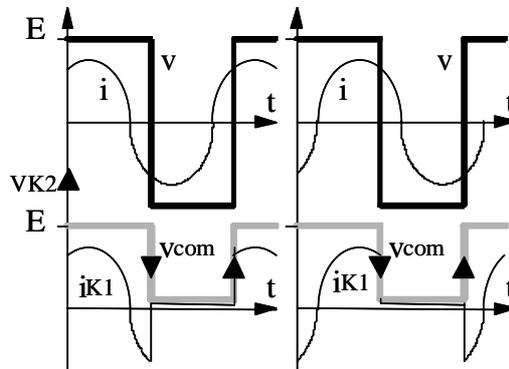


structure bidirectionnelle en tension à source à point milieu



structure bidirectionnelle en tension à deux cellules de commutation

On souhaite que les formes d'onde de la tension V sur la charge soient telles que représentées sur la figure ci-dessous, deux cas de déphasage ont été représentés.



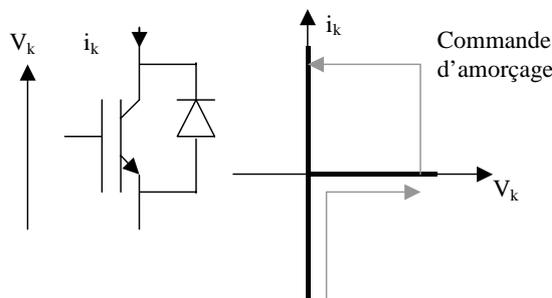
formes d'onde appliquées à la charge par le convertisseur (haut),
formes d'onde de la cellule de commutation 1

A noter que si la tension aux bornes de la source de sortie est rectangulaire et alternative, et si celle-ci est linéaire, le courant doit être également alternatif, déphasé (avance ou retard) et de forme quelconque (on a fait le choix d'une onde quasi-sinusoidale ici), dépendant de la nature de la charge et de sa capacité à filtrer les harmoniques de tension.

Les courbes inférieures sur la figure x représentent l'évolution de la tension de sortie de la cellule de commutation 1 et le courant dans l'interrupteur K1.

L'observation de $i(t)$ et $v(t)$ permet de conclure que :

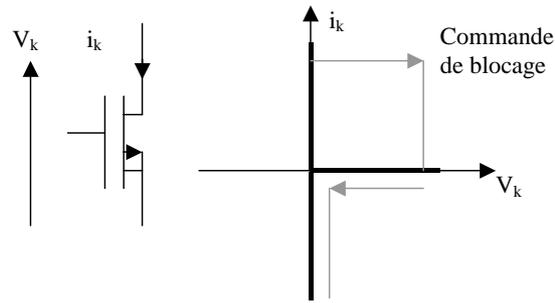
- lorsque le courant est en avance (1^{er} cas), lorsque la commutation est positive, le courant l'est aussi et de même pour la commutation négative. Dans les deux cas, nous avons à réaliser des commutations d'amorçage, les interrupteurs sont donc identiques, à 3 segments dont 2 en courant et à commande d'amorçage. L'interrupteur physique qui correspond à cette situation est le thyristor muni d'une diode anti-parallèle, ou une fonction thyristor bidirectionnelle en courant synthétisée avec tout type d'interrupteur commandé.



Caractéristique statique et dynamique de l'interrupteur adapté et choix possible

- Lorsque le courant est en retard (2^{ème} cas), lorsque la commutation est >0 , le courant i est <0 , idem pour la commutation <0 avec un courant $i >0$. Dans les deux cas, nous avons à réaliser des commutations de blocage, les interrupteurs sont à nouveau identiques, à 3 segments dont 2 en courant et à commande de blocage. Il n'existe pas de composant naturel ayant cette caractéristique dynamique, il doit être synthétisé avec tout type d'interrupteur

commandé et une logique de commande adéquate : on parle de thyristor dual bidirectionnel en courant.



Caractéristique statique et dynamique de l'interrupteur adapté et choix possible, la diode de structure du MOSFET peut être utilisée dans ce cas (blocage à tension nulle)

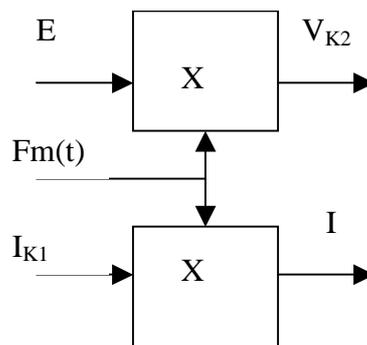
FONCTIONS DE MODULATION

On appelle fonction de modulation d'une cellule de commutation une fonction binaire $f_m(t)$ qui détermine son état en fonction du temps : lorsque la cellule connecte la source d'entrée à la source de sortie elle vaut 1 sinon 0. La fonction de modulation permet de relier les grandeurs d'entrée (I_{K1}) et de sortie (V_{K2}) de la cellule de commutation à la loi de commande et considérer son fonctionnement indépendamment de l'étude détaillée de chaque interrupteur. Ainsi on en déduit que :

$$V_{K2} = f_m(t) \cdot E$$

$$I_{K1} = f_m(t) \cdot I$$

Cette représentation permet de modéliser facilement un convertisseur statique sous forme de multiplieur, ainsi que représenté ci-dessous.



Modèle de la cellule de commutation

Dans un convertisseur composé de plusieurs cellules de commutation, on détermine facilement la tension de sortie du convertisseur par différence de tension entre les tensions issues des différentes cellules. Dans le cas du convertisseur bidirectionnel en tension à deux cellules de commutation, la tension de sortie est donc donnée par :

$$V = E \cdot [f_{m1}(t) - f_{m2}(t)] = E \cdot F_{m0}(t)$$

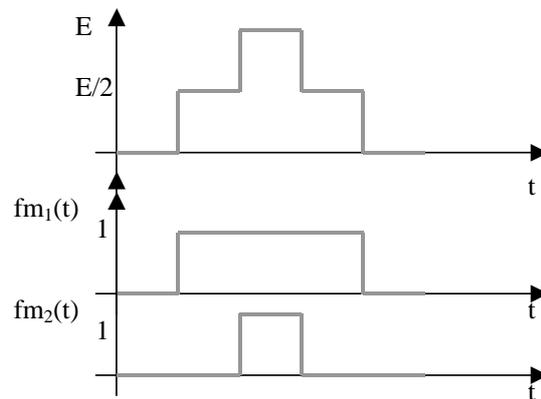
$$I_e = I \cdot [f_{m1}(t) - f_{m2}(t)] = I \cdot F_{m0}(t)$$

Il est le courant absorbé à l'entrée du convertisseur, $f_{m1}(t)$ et $f_{m2}(t)$ sont les fonctions de modulation des cellules 1 et 2, $F_{m0}(t)$ est la fonction de modulation résultante, ses valeurs peuvent être -1 , 0 et 1 ; la fonction de modulation globale n'est donc plus une fonction binaire, elle devient une **fonction à valeurs entières** dépendant de la façon dont les cellules de commutation sont agencées entre elles (différentiel, cascade, série, etc..).

En pratique, on connaît (ou on définit) les grandeurs externes du convertisseur, c'est donc la fonction $F_m(t)$ qui est déterminée. Selon le mode d'association des cellules de commutation, on doit donc identifier les fonctions élémentaires $f_{m_i}(t)$.

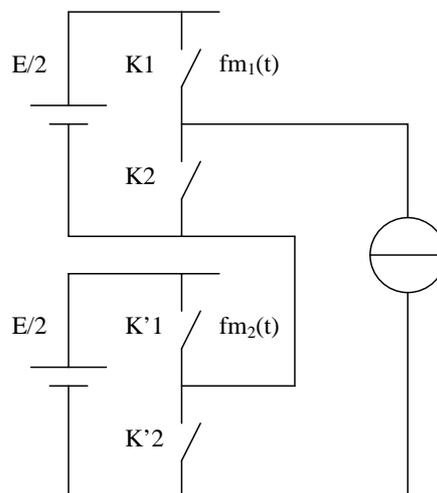
Exemple

On souhaite alimenter une source de courant constant avec l'onde de tension représentée ci-dessous (1^{ère} courbe). On constate donc la nécessité de sommer deux fonctions de modulation $f_{m1}(t)$ et $f_{m2}(t)$ comme représenté sur la figure (2^{ème} et 3^{ème} courbes).



Exemple de définition de tension de sortie d'un convertisseur

Il en résulte une structure possible du convertisseur comme représenté ci-dessous, elle nécessite la mise en série de deux cellules élémentaires alimentées par des sources de tension $E/2$:



Exemple de structure de convertisseur

On applique ensuite à chaque cellule les règles qui permettent finalement d'identifier la nature des interrupteurs ; dans ce cas $K1$ et $K'1$ sont des interrupteurs commandés à l'amorçage et au blocage et $K2$ et $K'2$ sont des diodes.

Bibliographie

H. FOCH, « Principes fondamentaux : éléments constitutifs et synthèse des convertisseurs statiques », Les Techniques de l'Ingénieur, D3152.

H. FOCH, « Principes fondamentaux : commutation dans les convertisseurs statiques », Les Techniques de l'Ingénieur, D3153.

H. FOCH, « Principes fondamentaux : dualité dans les convertisseurs statiques », Les Techniques de l'Ingénieur, D3154.