

1 Introduction

Un convertisseur statique est un montage utilisant des interrupteurs à semiconducteurs permettant par une commande convenable de ces derniers de régler un transfert d'énergie entre une source d'entrée et une source de sortie comme le montre la figure 1.

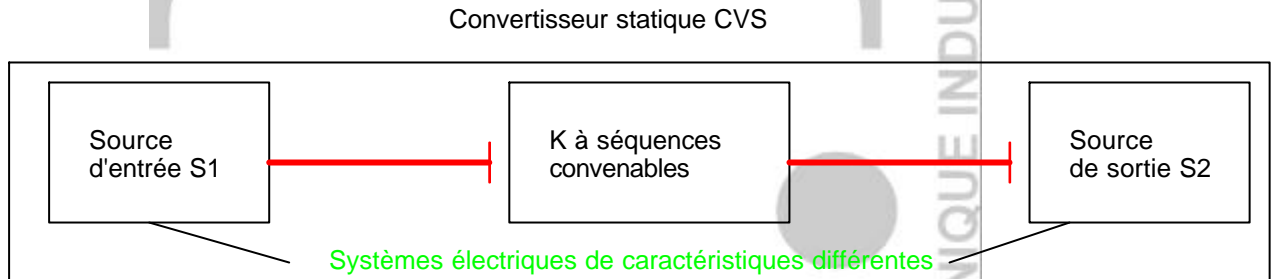


Figure 1: convertisseur statique

La source d'entrée peut être un générateur ou un récepteur (idem pour la source de sortie).

La synthèse des convertisseurs statiques repose sur les seuls éléments connus que sont les sources d'entrée et de sortie.

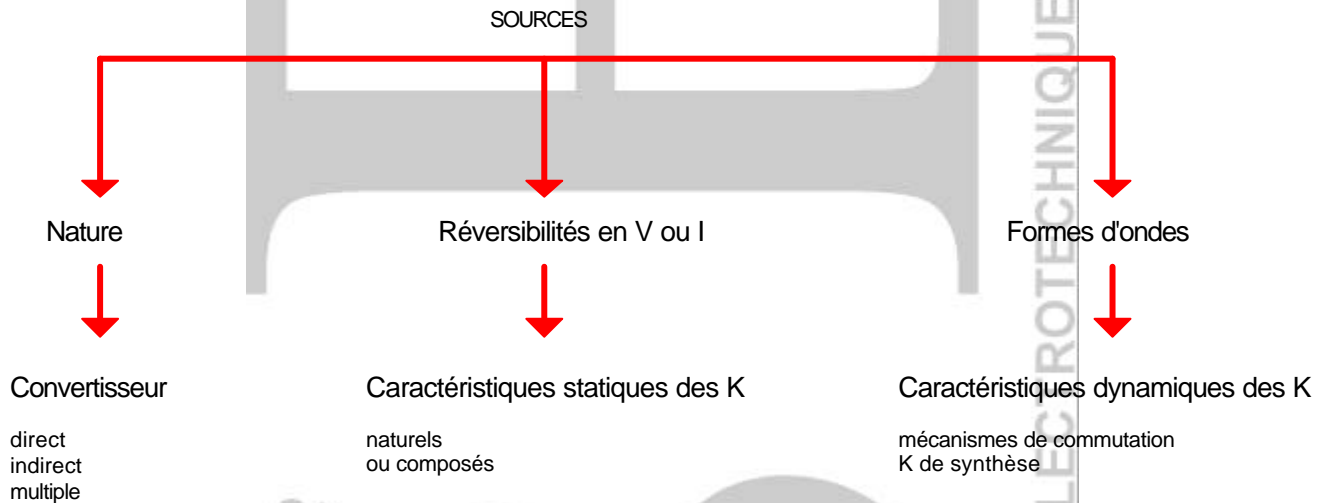


Figure 2 : synthèse des CVS

Il faut donc savoir caractériser les sources d'entrée et de sortie et bien connaître le fonctionnement des interrupteurs pour déterminer la constitution d'un convertisseur statique.

2 Sources de tension et de courant

2.1 Source de tension parfaite

Une source de tension parfaite est un dipôle actif qui présente à ses bornes une tension U indépendante du courant débité.

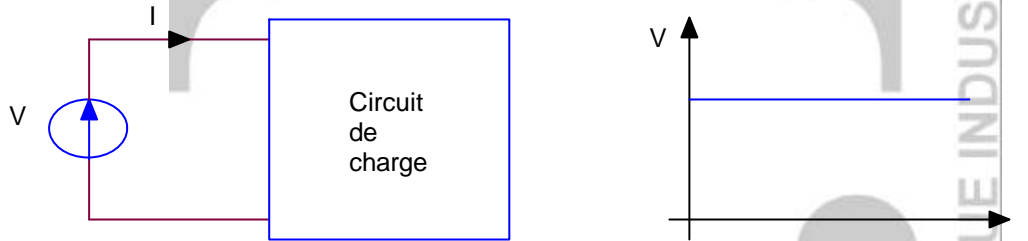


Figure 3 : source de V

Le condensateur se comporte au moment des commutations comme une source de tension car la tension ne peut pas subir de discontinuité :

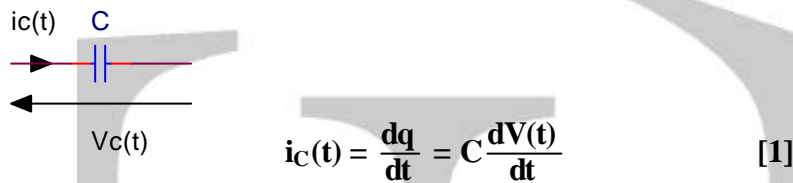


Figure 4 : condensateur

2.2 Source de courant parfaite

Une source de courant parfaite est un dipôle actif débitant un courant électrique I indépendant de la tension V apparaissant à ses bornes.

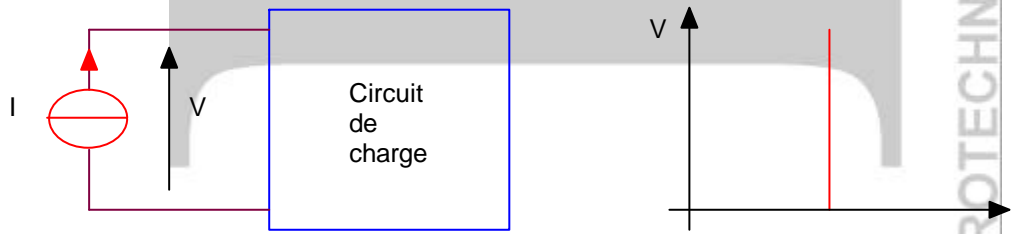


Figure 5 : source de I

L'inductance se comporte au moment des commutations comme une source de courant car le courant ne peut pas subir de discontinuité :

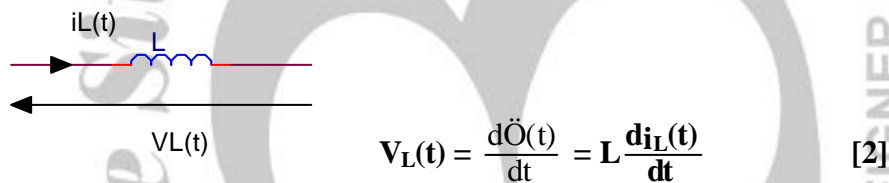
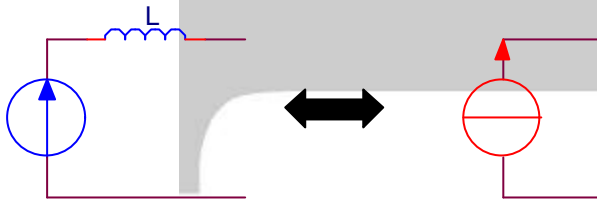
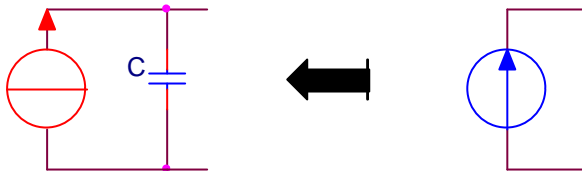


Figure 6 : inductance

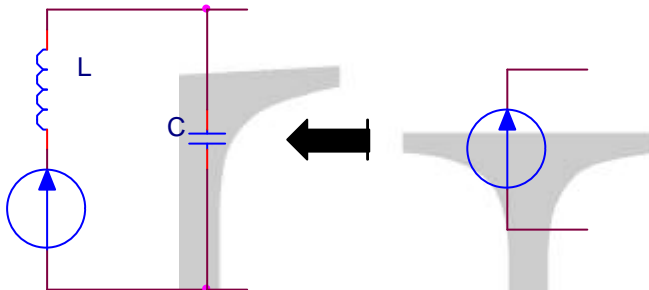
2.3 Remarques



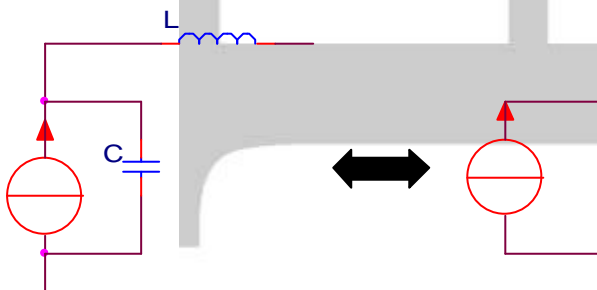
une source de tension en série avec une inductance est équivalent à une source de courant.



une source de courant en parallèle avec un condensateur est équivalent à une source de tension.



pour affirmer une source de tension, on disposera d'un condensateur en parallèle.



Pour affirmer une source de courant, on disposera d'une inductance en série.

2.4 Influence d'une inductance sur une source de tension

On considère une batterie d'accumulateurs (supposés bien chargés) reliée à une charge par une câble cf figure 7.

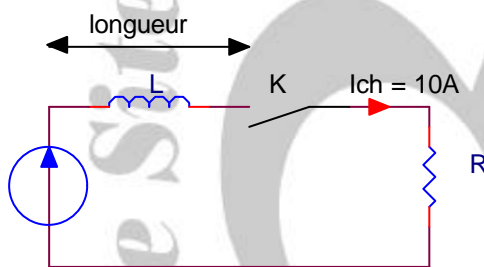


Figure 7 : batterie d'accumulateurs

L'inductance moyenne du câble est de $1 \mu\text{Hm}^{-1}$ et le temps d'ouverture t_{bn} de l'interrupteur est 100 ns.

Dispose-t-on d'une source de tension ou de courant pour une longueur de 1 m ou de 0,1 m ?

Si la longueur est de 1 m, la surtension provoquée à l'ouverture de l'interrupteur est

$$- L \frac{di}{dt} = 10^{-6} \frac{10}{100 \cdot 10^{-9}} = 100 \text{ volts ;}$$

- A cause des câbles de liaison, la charge ne peut être alimentée par une source de tension.

Si la longueur est de 0,01 m, la surtension provoquée à l'ouverture de l'interrupteur est

$$- L \frac{di}{dt} = 0,01 \cdot 10^{-6} \frac{10}{100 \cdot 10^{-9}} = 1 \text{ volt ;}$$

- Si la f.e.m est de quelques dizaines de volts, on pourra considérer la batterie comme une source de tension (si $E_{\text{bat}} = 24 \text{ V}$, on a 4% de chutes de tension).

2.5 Remarques

- En électronique de puissance, il faudra être vigilant au câblage qui introduit des inductances parasites.
- La présence d'inductances parasites conduit à ajouter un condensateur en parallèle avec la source de tension.
- Il faudra être aussi vigilant aux vitesses de commutation des interrupteurs.

2.6 Réversibilité des sources d'entrée et de sortie

La détermination des réversibilités des sources d'entrée et de sortie est fondamentale car elle permet de déduire les caractéristiques statiques des interrupteurs.

Une source est dite **réversible en tension** si la tension à ses bornes peut changer de signe.

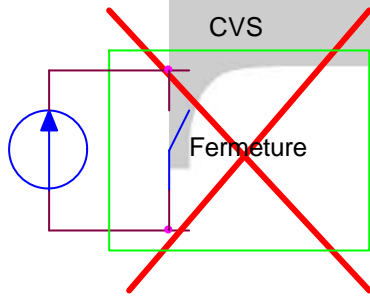
Une source est dite **réversible en courant** si le courant qui la traverse peut s'inverser.

Exemple :

- Le circuit d'induit d'une machine à courant continu est équivalent à une source en courant à cause de l'inductance dus aux bobinages. Si on dispose d'une inversion de la vitesse et d'un freinage électrique (inversion du courant d'induit), la source sera réversible en tension et en courant.
- Une batterie est une source de tension non réversible en tension et réversible en courant (charge et décharge).

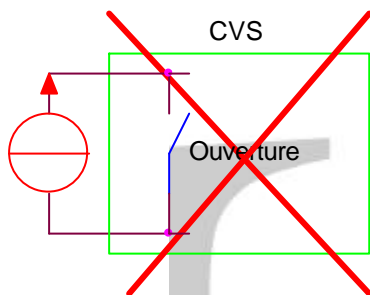
2.7 Règles d'interconnexion des sources

2.7.1 Règle n°1



Une source de tension ne doit jamais être court-circuitée mais elle peut être ouverte. Sinon le courant serait destructeur.

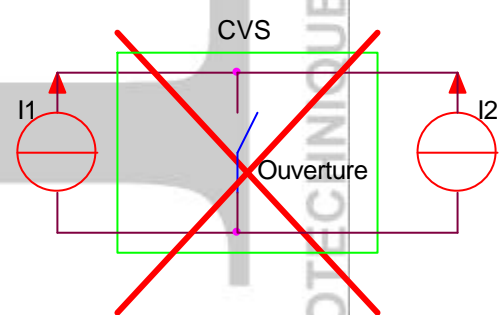
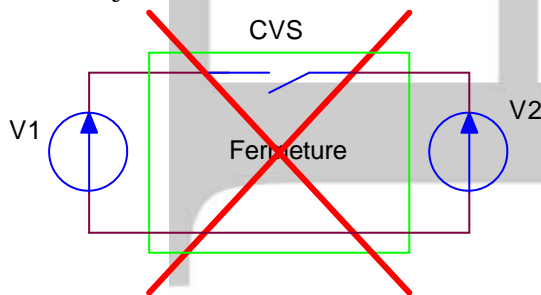
2.7.2 Règle n°2



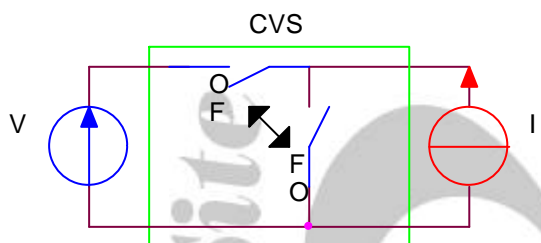
Le circuit d'une source de courant ne doit jamais être ouvert mais il peut être court-circuité. Sinon l'ouverture provoque une surtension

2.7.3 Règle n°3

Il ne faut jamais connecter entre elles deux sources de même nature.



2.7.4 Règle n°4



On ne peut connecter entre elles qu'une source de courant et une source de tension
Les deux interrupteurs doivent être rigoureusement complémentaires.

2.8 Conclusion

- Si le convertisseur statique dispose des interrupteurs seulement, on ne sait que connecter des sources de natures différentes.
- Le plus petit convertisseur a au moins deux interrupteurs.

- Le fonctionnement de ces deux interrupteurs doit être rigoureusement complémentaires.
- On peut alors parler de cellule élémentaire de commutation :

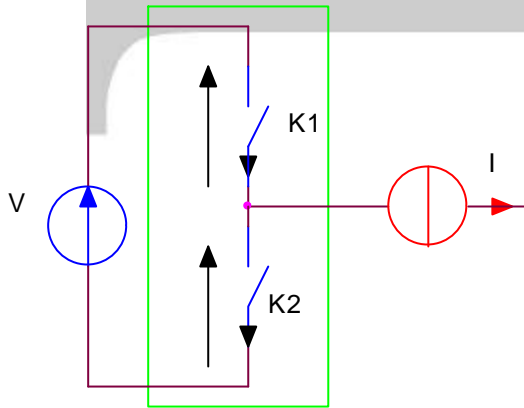


Figure 8 : cellule de commutation

3 Les interrupteurs

3.1 Interrupteur parfait

Un interrupteur possède deux états : ouvert ou fermé :

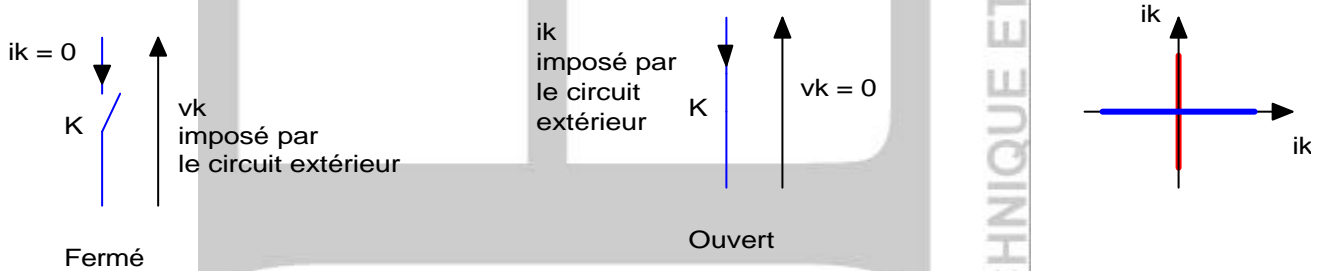


Figure 9 : interrupteur parfait

Dans l'état fermé, on dit que l'interrupteur est passant ou ON. Dans l'état ouvert, on dit que l'interrupteur est ouvert ou OFF.

La caractéristique statique, qui est une propriété intrinsèque d'un interrupteur est donc formée de quatre segments confondus avec les axes v et i .

3.2 Interrupteur à semi-conducteur

On considère l'interrupteur comme un dipôle avec des conventions récepteurs

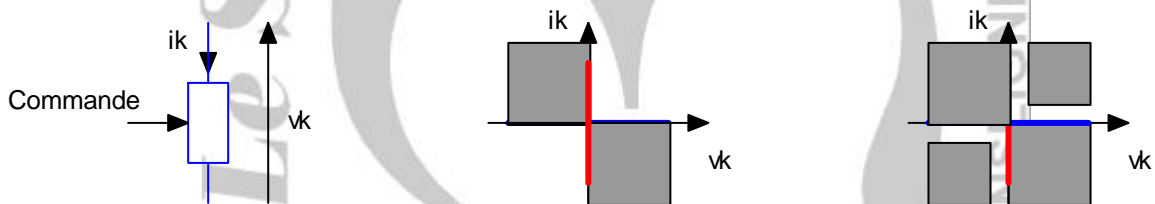


Figure 10 : interrupteur à semi-conducteur

Un interrupteur à semi-conducteur est formé par un ou plusieurs composants semi-conducteurs. Sa résistance r_k peut varier entre une valeur très élevée (état ouvert ou bloqué) et une valeur très faible (état fermé ou passant).

3.3 Les différents types de composants semiconducteurs possibles

3.3.1 Interrupteur à 2 segments

L'interrupteur est unidirectionnel en tension et en courant. On distingue deux caractéristiques statiques à 2 segments comme le montre la figure 11.

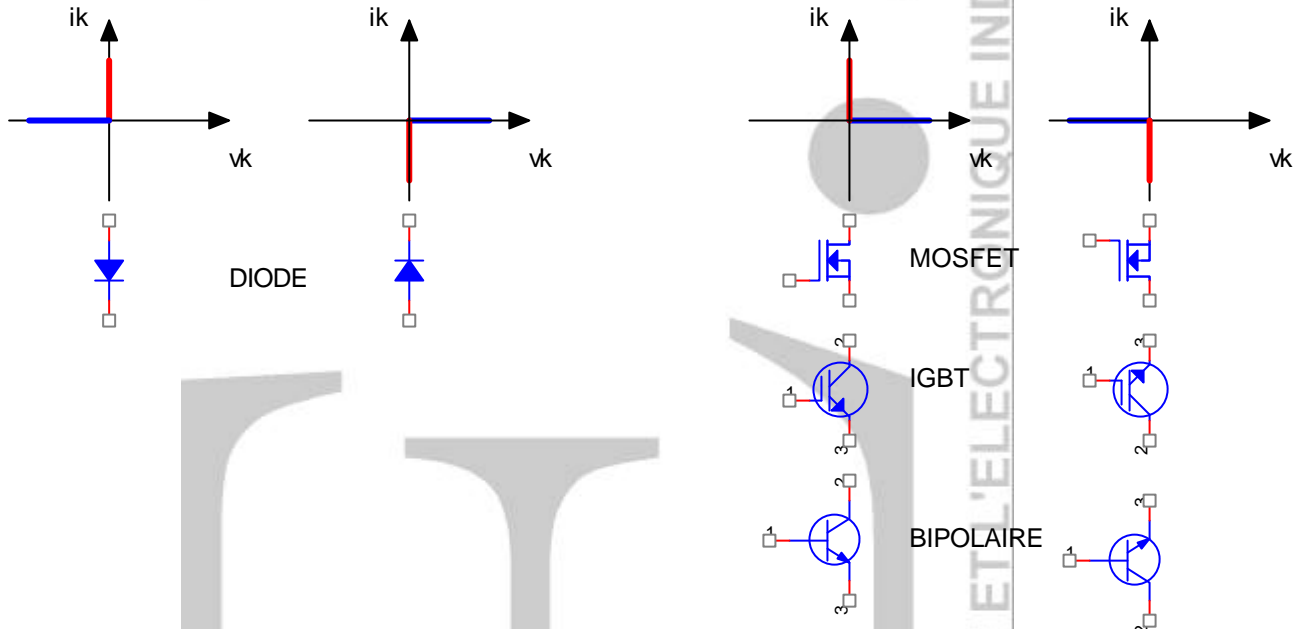


Figure 11 : interrupteur à 2 segments

3.3.2 Interrupteur à 3 segments

L'interrupteur est bidirectionnel en tension ou en courant comme le montre la figure 12. Il n'existe donc que deux caractéristiques statiques à trois segments.

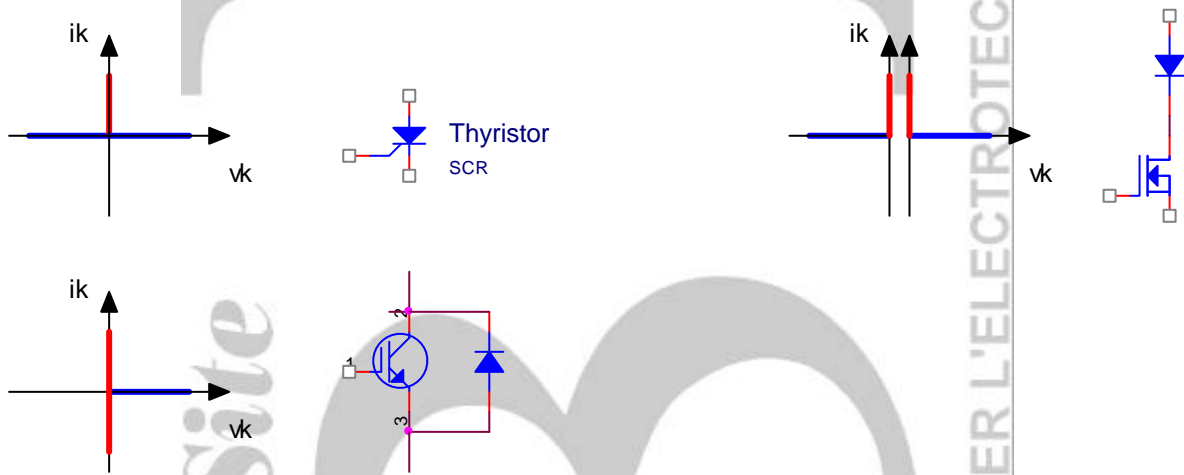


Figure 12 : interrupteur à 3 segments

3.3.3 Interrupteur à 4 segments

L'interrupteur est bidirectionnel en tension et en courant comme le montre la figure 13. La caractéristique statique est obtenue par association des deux types précédents.

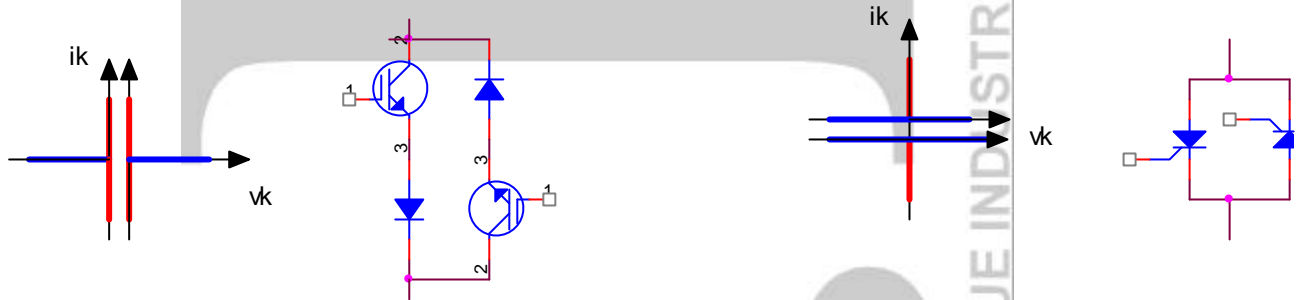


Figure 13 : interrupteur à 4 segments

3.4 Régime dynamique / Mode de commutation

La caractéristique statique courant tension d'un interrupteur est insuffisante pour décrire ses propriétés dynamiques, c'est à dire la manière selon laquelle l'interrupteur passe de l'état bloqué à l'état passant et réciproquement.

La trajectoire suivie par le point de fonctionnement constitue **la caractéristique dynamique de commutation**.

L'interrupteur étant un élément dissipatif, la caractéristique dynamique ne peut être incluse que dans les quadrants tels que le produit $v_k \cdot i_k > 0$.

3.4.1 La commutation spontanée d'un interrupteur

Elle est identifiable dans son principe à celle d'une jonction PN (diode). La commutation spontanée ne dépend que du circuit extérieur ; l'interrupteur commute naturellement car le point de fonctionnement se déplaçant sur la caractéristique statique passe par zéro comme le montre la figure 14.

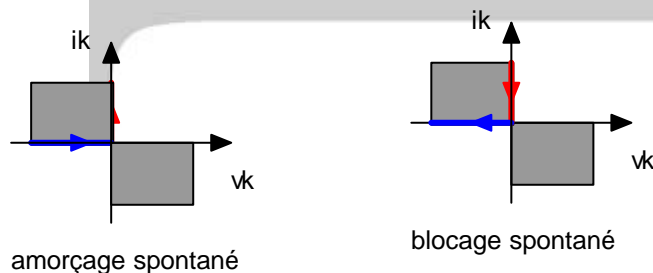


Figure 14 : commutation spontanée

L'amorçage spontané s'effectue au passage par zéro de la tension v_k (tension du circuit extérieur).

Le blocage spontané s'effectue au passage par zéro du courant i_k (courant imposé par le circuit extérieur).

Ce mode de commutation s'effectue avec un minimum de pertes Joule puisque le point de fonctionnement suit les axes.

3.4.2 La commutation commandée d'un interrupteur

L'interrupteur possède, en plus de ses électrodes principales, une électrode de commande sur laquelle il est possible d'agir pour provoquer son changement d'état de manière quasi instantanée.

La figure 15 montre la caractéristique dynamique pour ce mode de commutation.

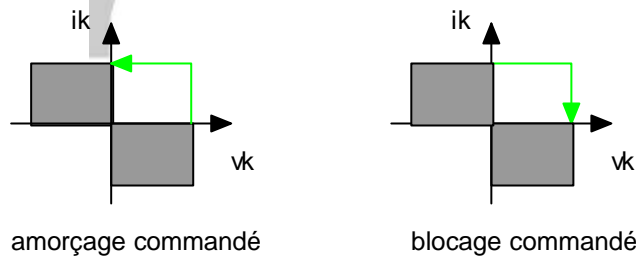


Figure 15 : commutation commandée

Ce mode de commutation peut faire apparaître des contraintes sévères en terme de dissipation d'énergie sur l'interrupteur. Si le temps de commutation est rapide, ainsi que la fréquence de commande de l'interrupteur, les pertes joules peuvent être importantes et il faudra doter l'interrupteur d'un dissipateur à convection naturelle ou forcée !

3.4.3 Le cycle de fonctionnement d'un interrupteur

Pour caractériser complètement un interrupteur, il faut donc connaître d'une part sa caractéristique statique et d'autre part ses modes de commutation à l'amorçage et au blocage.

Au cours d'une période de fonctionnement, le point de fonctionnement (v_k, i_k) de l'interrupteur décrit un cycle.

La figure 16 montre le cycle idéalisé d'un thyristor.

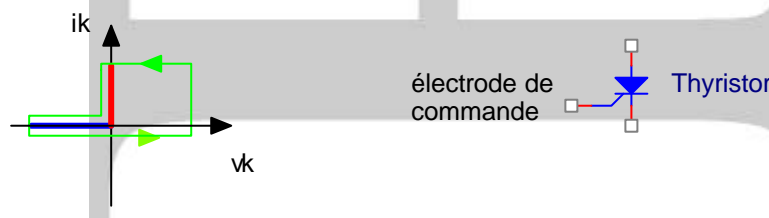


Figure 16 : cycle de fonctionnement

3.5 Classification des interrupteurs

Les interrupteurs utilisés dans les convertisseurs statiques peuvent être classés en fonction de leurs caractéristiques statiques à deux, trois ou quatre segments et de la nature de leurs commutations.

3.5.1 Interrupteur à 2 segments

On distingue 2 interrupteurs dont les caractéristiques possèdent 2 segments, à savoir la diode ou le transistor.



Figure 17 : cycle de fonctionnement

3.5.2 Interrupteur à 3 segments

On distingue 2 groupes d'interrupteurs suivant qu'ils sont bidirectionnels en courant et unidirectionnel en tension, ou bidirectionnels en tension et unidirectionnel en courant.

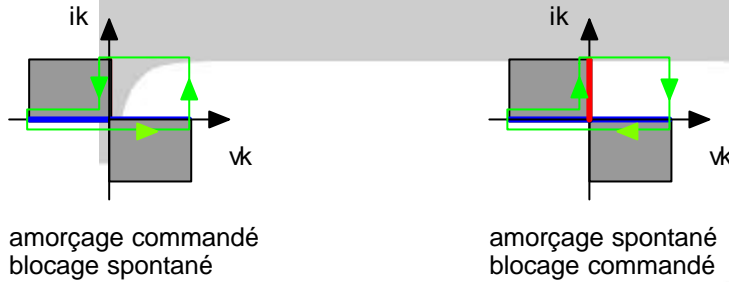


Figure 18 : interrupteur bidirectionnel en tension

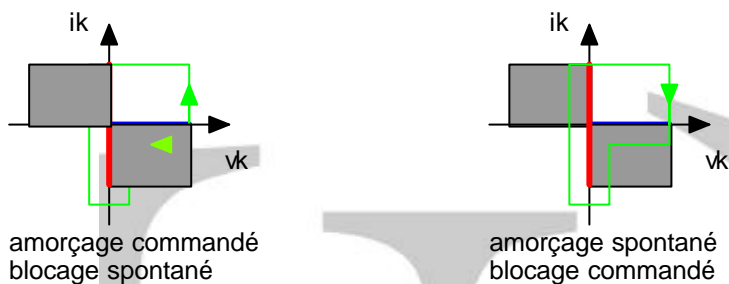


Figure 19 : interrupteur bidirectionnel en courant

3.5.3 Interrupteur à 4 segments

Tous les interrupteurs à 4 segments possèdent la même caractéristique statique, ils ne diffèrent que par les modes de commutation.

L'interrupteur naturel 4 segments est le triac.

4 Synthèse des convertisseurs

4.1 Structure des convertisseurs

4.1.1 Convertisseur direct tension-courant

On considère une conversion associant une source de tension à une source de courant. Il existe trois types de connexions possibles entre ces deux sources comme le montre la figure 20.

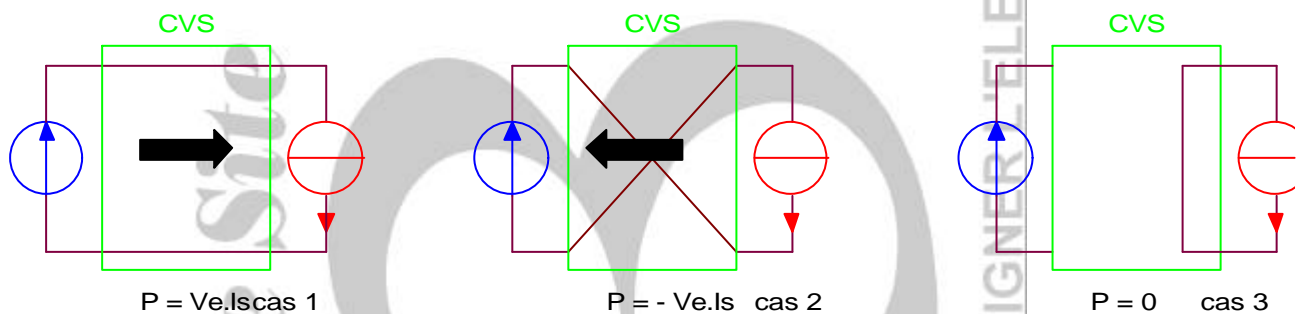


Figure 20 : Interconnexion d'une source V et I

On notera que ces trois types d'interconnexions sont nécessaires pour permettre tous les échanges et les réglages d'énergie entre la source de tension et la source de courant.

La solution plus simple est un montage en pont à quatre interrupteurs comme le montre la figure 21.

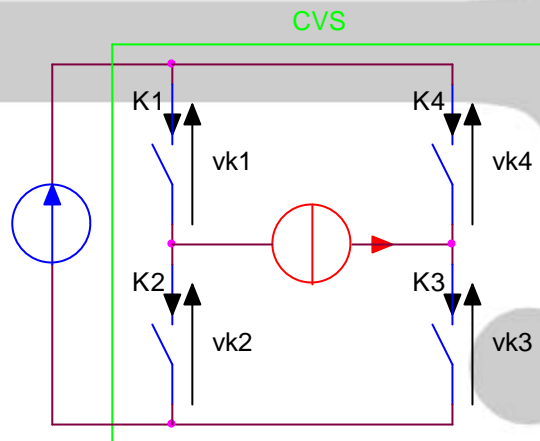


Figure 21 : Configuration de base d'un convertisseur tension-courant

- Lorsque K_1 et K_3 sont fermés, on retrouve le cas n°1.
- Lorsque K_2 et K_4 sont fermés, on retrouve le cas n°2.
- Lorsque K_1 et K_4 sont fermés ou K_2 et K_3 sont fermés, on retrouve le cas n°3.

On retrouve cette structure de base dans les hacheurs et en partie dans les onduleurs.

4.1.2 Convertisseur direct courant-tension

Ce type de convertisseur correspond au montage redresseur ou commutateur de courant selon les auteurs. On retrouve la même structure que pour le convertisseur direct tension-courant. On a pour habitude dans un montage redresseur de disposer la source de courant en sortie et la source de tension en entrée.

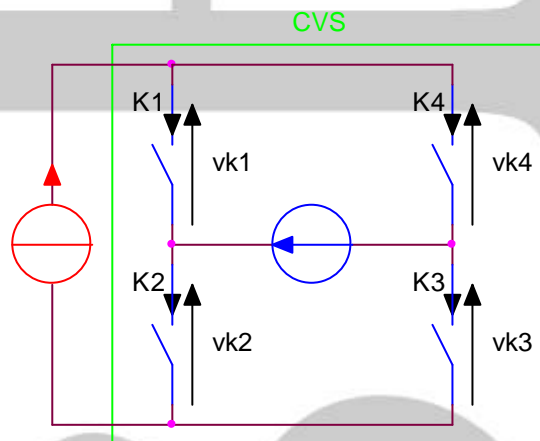


Figure 22 : Configuration de base d'un convertisseur courant-tension

4.1.3 Convertisseur indirect tension-tension

On ne peut connecter entre elles deux sources de nature différente, il faut donc convertir une des sources en source courant ou alors utiliser un élément de stockage inductif qui permet de disposer d'une source de courant dynamique comme le montre la figure 23.

Dans ce type de convertisseur les deux sources de tension ne sont jamais connectées simultanément à l'élément de stockage mais successivement.

- l'inductance stocke l'énergie fournie par la source de tension (K_1 ON, $K_2K_3K_4K_5$ OFF)

- l'inductance restitue son énergie à l'autre source de tension (K_1 OFF, K_2K_4 ON ou K_3K_5 ON).

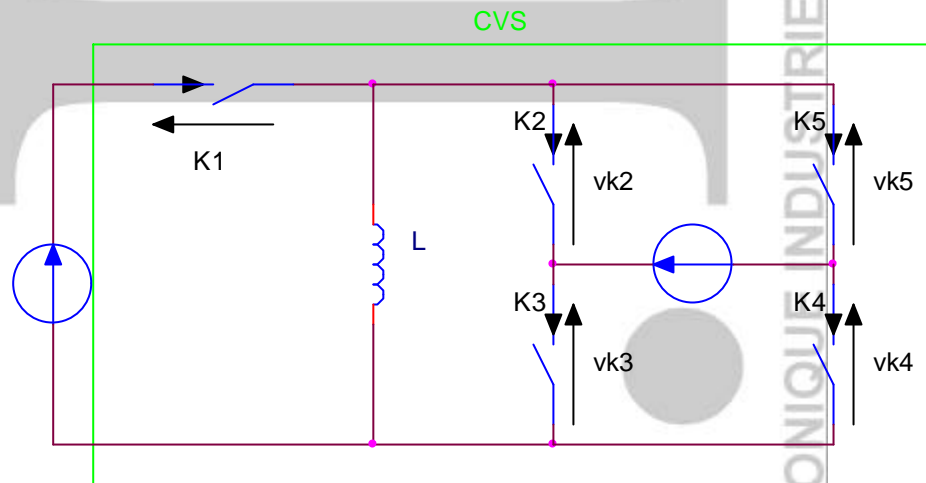


Figure 23 : Convertisseur indirect tension - tension

4.1.4 Convertisseur indirect courant - courant

Dans ce type de convertisseur les deux sources de courant ne sont jamais connectées simultanément à l'élément de stockage capacitif mais successivement cf figure 24 :

- le condensateur stocke l'énergie fournie par une source de courant (K_2K_3 ON, $K_1K_4K_5$ OFF) ;
- le condensateur restitue son énergie à l'autre source de courant soit dans un sens ($K_1K_2K_4$ ON, K_3K_5 OFF), soit dans l'autre ($K_1K_5K_3$ ON, K_2K_4 OFF).

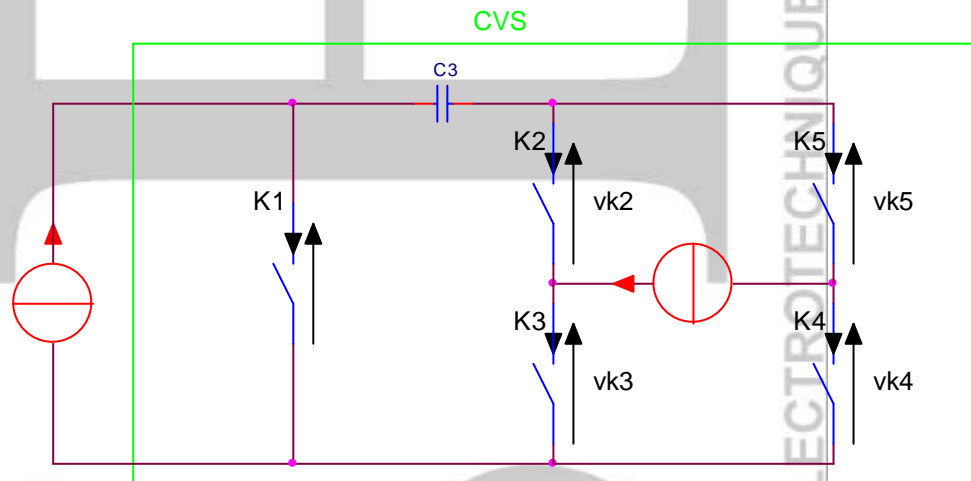


Figure 24 : Convertisseur indirect courant - courant

4.2 Liaison cellule de commutation - interrupteur

On peut établir les relations suivantes pour la figure 25 :

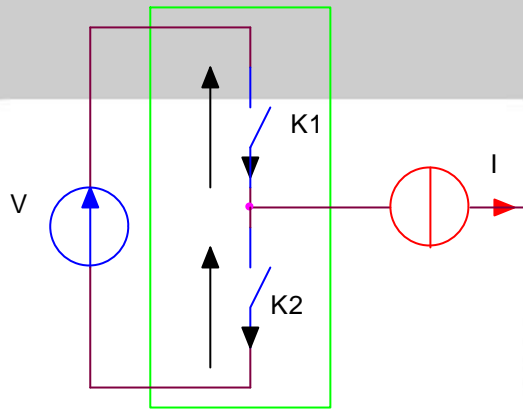


Figure 25 : cellule de commutation

$$- v_{k1} + v_{k2} = V$$

$$- i_{k1} - i_{k2} = I$$

$$v_{k2} = V \text{ si } K_1 \text{ est passant ou ON}$$

$$v_{k1} = V \text{ si } K_2 \text{ est passant ou ON}$$

$$i_{k1} = I \text{ si } K_1 \text{ est passant ou ON}$$

$$i_{k2} = - I \text{ si } K_2 \text{ est passant ou ON}$$

Dans une cellule de commutation, la tension aux bornes d'un interrupteur bloqué est égale à la tension de la source de tension.

Au signe près, le courant dans un interrupteur qui conduit est égal au courant de la source de courant.

Par conséquent si la source de tension est bidirectionnelle, l'interrupteur devra supporter une tension bidirectionnelle. De même si la source de courant est bidirectionnelle, l'interrupteur devra supporter un courant bidirectionnel !

En guise de conclusion, la réversibilité des interrupteurs est liée à la réversibilité des sources en tension pour une source de tension et en courant pour une source de courant.

Il est alors très facile d'effectuer la synthèse des convertisseurs à l'aide de la méthode développée par [H.Foch et équipe d'enseignants associée – Polycopié ENSEEIHT 1990].

5 Fonctions réalisées

5.1 Conversion DC-DC : les hacheurs

Les hacheurs sont des convertisseurs directs du type continu-continu. Ils permettent d'obtenir une tension continue réglable à partir d'une tension continue fixe. La figure 26 donne leur symbole.

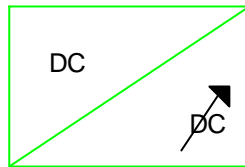


Figure 26 : conversion DC-DC

Les hacheurs sont utilisés pour la variation de vitesse des moteurs à courant continu et dans les alimentations à découpage.

5.2 Conversion AC-DC : les redresseurs

Les redresseurs permettent d'obtenir une tension de valeur moyenne non nulle à partir d'une tension alternative (monophasée ou triphasée) de valeur moyenne nulle. La figure 27 donne leur symbole.

Les redresseurs commandés permettent de régler la valeur moyenne de la tension redressée.

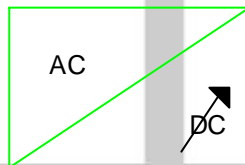


Figure 27 : conversion AC-DC

Les redresseurs sont utilisés comme étage intermédiaire dans les cartes électroniques, les fours, les électrolyses, le transport à courant continu, pour la variation de vitesse des moteurs à courant continu...

5.3 Conversion DC-AC : les onduleurs

Les onduleurs permettent d'obtenir une tension alternative (respectivement un courant) à partir d'une tension continue fixe (respectivement un courant).

On peut régler la fréquence de la tension alternative (respectivement du courant) et sa valeur efficace. La figure 28 montre le symbole d'un onduleur.

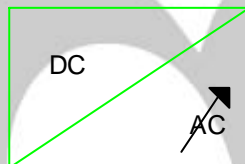


Figure 28 : conversion DC-AC

Les onduleurs sont utilisés pour la production d'une tension alternative à une fréquence fixe ou variable, l'alimentation de certains équipements indépendants de la présence du réseau (notion de continuité de service ou alimentation sans interruption)...

5.4 Conversion AC-AC : les gradateurs

Les gradateurs permettent d'obtenir une tension alternative de valeur efficace réglable à partir d'une tension alternative de valeur efficace et de fréquence fixe.

La fréquence d'un gradateur n'est pas réglable. La figure 29 montre le symbole d'un gradateur.

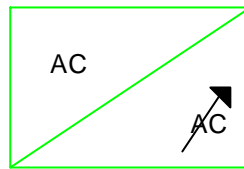


Figure 29 : conversion AC-AC

Les gradateurs sont utilisés en électrothermie, en éclairage, le démarrage progressif de moteurs asynchrones.