Chapitre 2 :

Mécanisme de commutation des convertisseurs statiques. Méthodes de conception des convertisseurs statiques à commutation naturelle

I.Mécanisme de commutation des convertisseurs statiques.

La commutation est le passage d'un composant semi-conducteur d'un état de conduction (état passant, ON) à un état de blocage (état bloqué, OFF), ou inversement.

La fermeture d'un interrupteur à semi-conducteur connecte les bornes qu'il relie, alors que son ouverture interrompt cette connexion.

Durant les commutations, il convient d'assurer la *continuité de l'énergie* au sein du montage dans lequel les interrupteurs sont insérés. En pratique cela revient généralement à vérifier que les commutations n'entraînent pas :

- Une discontinuité de la tension aux bornes d'un ou plusieurs condensateurs,
- Une discontinuité du courant dans une ou plusieurs inductances.

I.1 Nature de commutation :

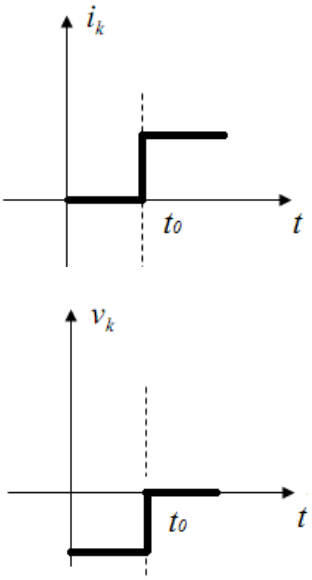
La commutation d'un interrupteur semi-conducteur peut être spontanée (naturelle) ou commandée.

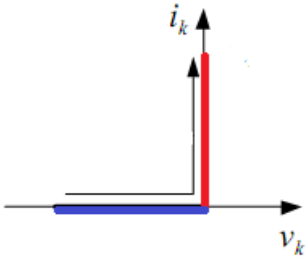
- ✓ ***Commutation naturelle (on conduction ou en blocage)*** : le changement d'état est imposé par les variables de circuit de puissance.
- ✓ ***Commutation commandée (on conduction ou en blocage)*** : le changement d'état est assuré par in signal de commande.

I.1.1 Principe de commutation naturelle

Comportement courants – tensions en fonction du temps lors d'une commutation naturelle

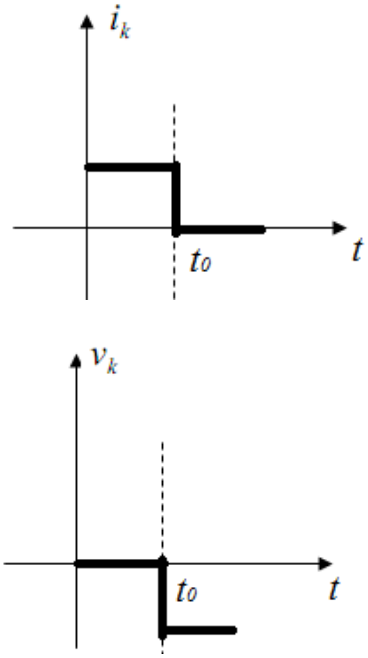
Si on suppose que la ***durée des commutations nulles***, et on considère que le changement de l'interrupteur *k* d'état correspond à *l'instant* t_0

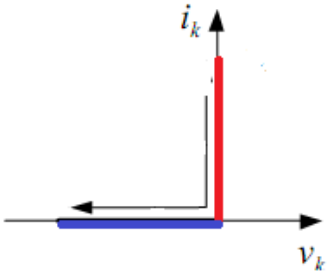




Fermeture ou conduction naturelle

Conduction à l'instant t_0



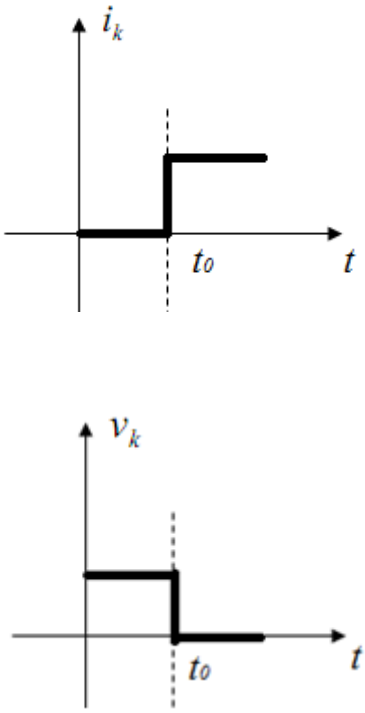


Ouverture ou blocage naturel

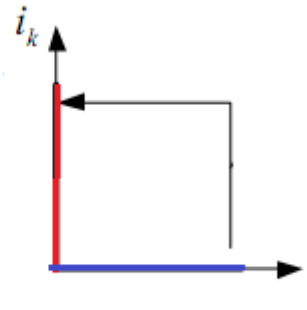
Blocage à l'instant t_0

I.1.2 Principe de commutation forcée,

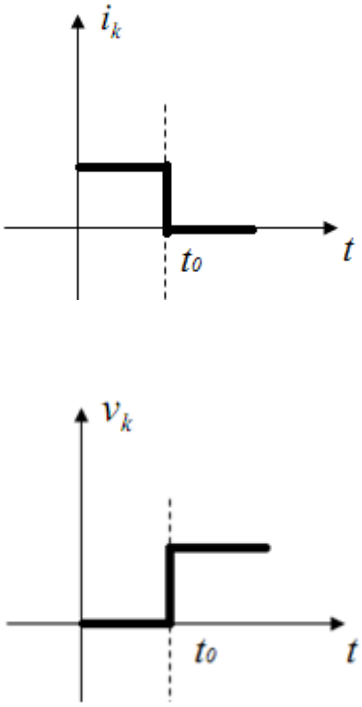
Comportement courants – tensions en fonction du temps lors d'une commutation Commandée :



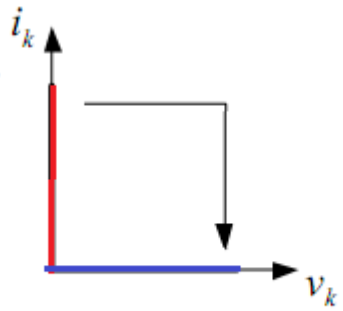
Conduction à l'instant t_0



Fermeture ou conduction commandée



Blocage à l'instant t_0



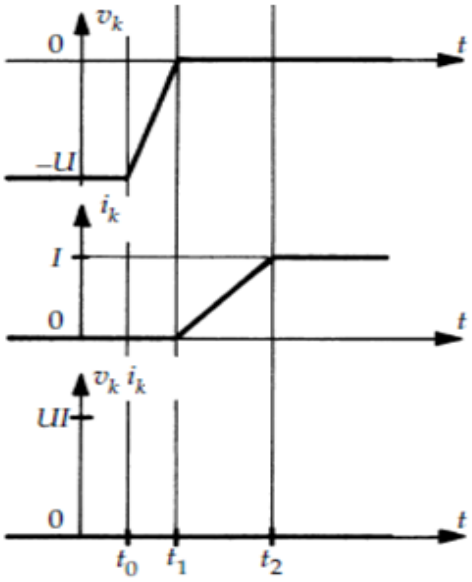
Ouverture ou blocage commandé

D'après les allures, on peut reconnaitre donc la nature des commutations par rapport à la forme d'onde de courant et des tensions.

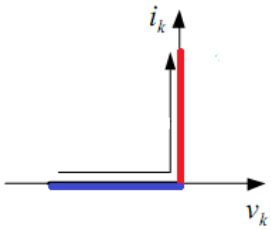
En effet :

- Dans une *commutation commandée* le courant dans l'interrupteur lorsqu'il est fermé et la tension à ces bornes lorsqu'il est ouvert sont de même signe.
- Dans une *commutation spontanée* ce courant dans l'interrupteur et cette tension sont de signe opposé (contraire).

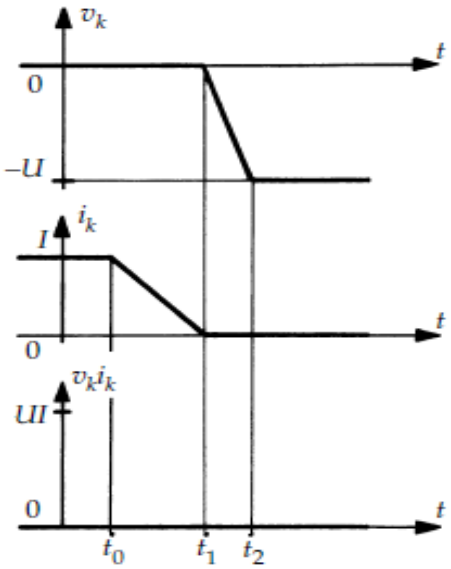
Dans le cas où la durée de commutation t_c n'est pas négligée avec $t_c=t_2-t_0$



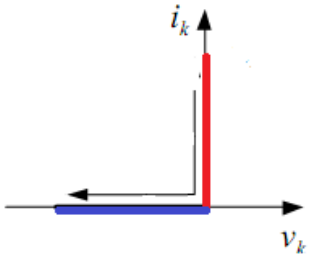
Fermeture spontannée



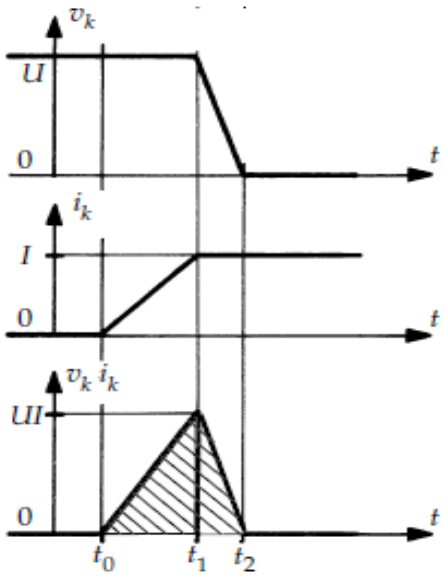
Fermeture ou conduction naturelle



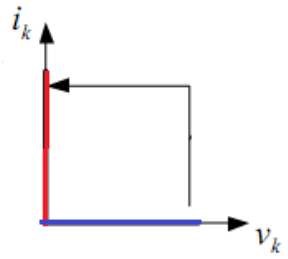
Blocage spontannée



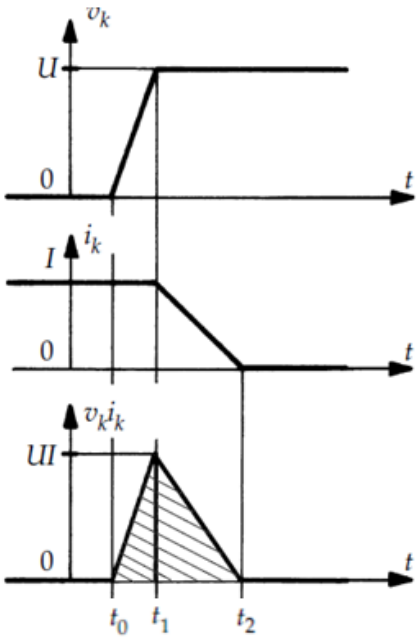
Ouverture ou blocage naturel



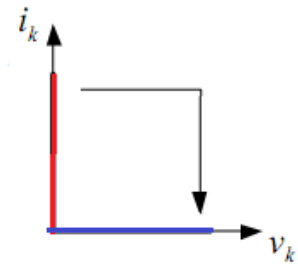
Fermeture commandée



Fermeture ou conduction commandée



Ouverture commandée



Ouverture ou blocage commandé

Les <u>*surfaces hachurées*</u> sur les figures précédentes montrent <u>*l'énergie dissipée*</u> dans l'interrupteur qui effectue une commutation commandée.

Lors de l'ouverture commandée, i_K est égal à I pendant toute la montée de v_K. Mais lors de la fermeture commandée, v_K est égal à U pendant toute la montée de i_K.

VI. Estimation des pertes dans les convertisseurs statiques :

Dans le cas **d'un interrupteur** réel on considère une **chute de tension** non nulle à l'état ON, un **courant de fuite** non nul à l'état OFF, un **temps de commutation** (passage de l'état ON à l'état OFF ou l'inverse) non nul aussi.

Dans un semi-conducteur de puissance, on distingue principalement deux types de pertes :

Les pertes par conduction P_{cond} : dues au passage du courant qui est accompagné d'une chute de tension aux bornes du S.C.

Les pertes par commutation P_{com} : dues au fait que chaque fermeture ou ouverture de l'interrupteur S.C s'accompagné d'une certaine quantité d'énergie.

Ces deux types de pertes correspondent aux valeurs moyennes des puissances associées :

$$P_{cond} = \frac{1}{T}\int_T p_{kcond}\,dt = \frac{1}{T}W_{cond}$$

$$P_{com} = \frac{1}{T}\int_T p_{kcom}\,dt = \frac{1}{T}W_{com}$$

Avec

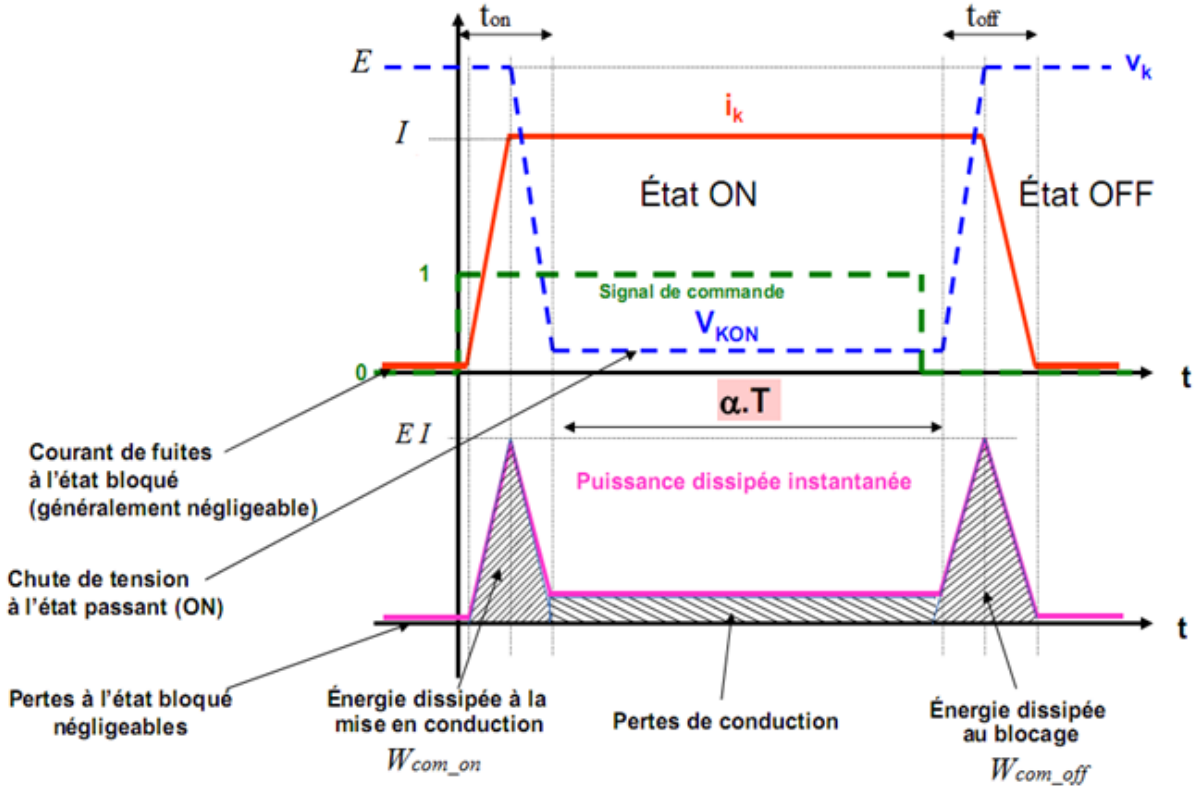
$P_{com} = f\ W_{com}$

Avec f fréquences de découpage $(f = \frac{1}{T})$

W_{cond} : énergie consommée par le composant lors de la conduction.

W_{com} : énergie consommée par le composant lors de la commutation (fermeture ou ouverture)

Dans le cas de la cellule de commutation, les pertes par commutation du transistor sont estimées comme suit :



$$W_{com_on} \approx \frac{1}{2} E\ I\ (t_{on})$$

$$W_{com_off} \approx \frac{1}{2} E\ I\ (t_{off})$$

$$P_{com} = f\ W_{com}$$

$$P_{com} = \frac{1}{2} f\ E\ I\ (t_{on} + t_{off})$$

Et les pertes par conductions sont estimées :

$$P_{cond} = \frac{1}{T} \int_{\alpha T} V_{kon}\ I\ dt = \ \alpha\ V_{kon}\ I$$

αT : Durée de conduction du transistor dans une période T.

Avec α est le rapport cyclique ($0 < \boldsymbol{\alpha} < 1$)

Aussi P_{cond} dans le transistor peut être estimé par la relation :

$$P_{cond_T} = R_{DS-ON}\ I^2_{Teff}$$

R_{DS-ON} : résistance du transistor à l'état passant et I_{Teff} son courant efficace.

- **Dans une diode les pertes par conduction peuvent être <u>estimées</u> par :**

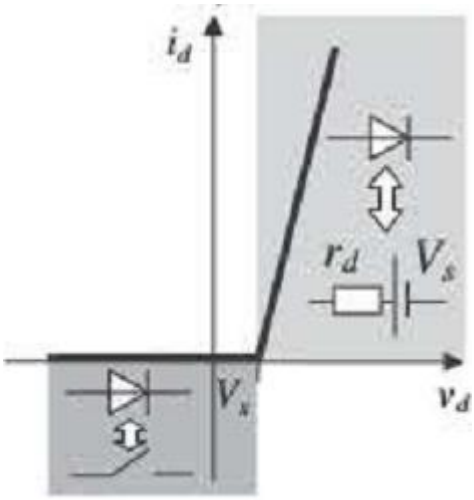
$$P_{cond_D} = V_s \; I_{Dmoy} + r_d \, I^2_{Deff}$$

Avec : V_s : tension de seuil

r_d : résistance dite « dynamique»

I_{Dmoy} est le courant moyen traversant la diode.

I_{Deff} est le courant efficace de la diode.



<u>Approximativement</u> ses pertes correspondent aussi :

$$P_{cond_D} \approx V_f \; I_{Dmoy}$$

Avec V_f: chute de tension à l'état passant (correspondant au courant nominal)

- ***Le rendement :***

Le rendement dans les convertisseurs statiques s'exprime :

$$\eta = \frac{P_s}{P_s + \sum pertes}$$

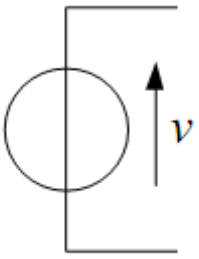
II. Méthodes de conception des convertisseurs statiques à commutation naturelle

II.1 Connexion des sources et charges en électronique de puissance :

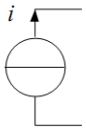
Un convertisseur statique contient des générateurs et récepteurs entre lesquels sont montés des interrupteurs à SC. Ces sources d'énergie et ces récepteurs doivent être compatibles pour assurer l'opération de conversion.

On distingue deux types de sources de puissance :

- **Source de tension :** considérer comme un dipôle assurant la continuité de la tension dans le cadre d'une commutation.



- **Source de courant :** considérer comme un dipôle imposant la continuité du courant dans le cadre d'une commutation.



NB :

Les inductances et les condensateurs sont considérés comme des *sources instantanées*. En effet :

- L'inductance (source de courant instantanée) avec $u = L\frac{di}{dt}$: interdit tout discontinuité du courant (s'oppose aux variations brusques du courant), sinon la tension u tend vers l'infinie. Elle est utilisée pour lisser le courant.

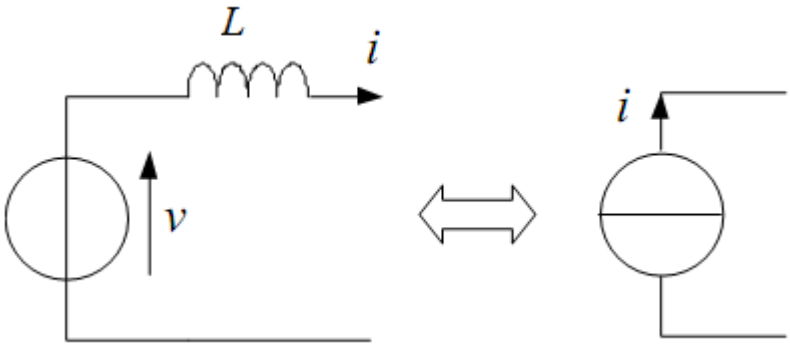
- Le condensateur (source de tension instantanée) avec $i = C\frac{du}{dt}$: assure la continuité de la tension (s'oppose aux variations brusques de tension). Elle est utilisée pour lisser la tension.

N.B : Les deux sources instantanées sont limitées à une certaine dynamique.

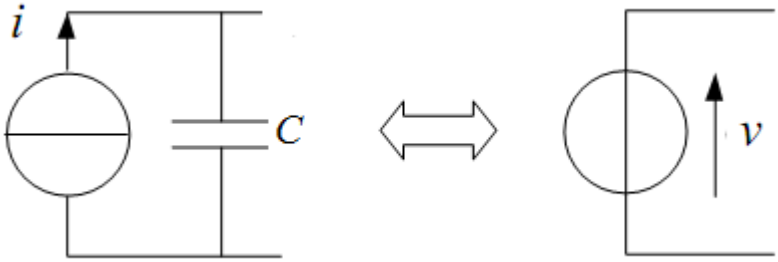
✓ **Changement de nature des sources :**

Pour pouvoir réaliser des CS convenablement on peut effectuer les changements de nature suivants :

- une inductance de valeurs ***L suffisante*** placée en série avec une source de tension est l'équivalent d'une source de courant.



- un condensateur de **capacité C** suffisante placée en parallèle avec une source de courant est l'équivalent d'une source de tension.



Remarque :

- Une source est *réversible en tension* si la tension à ses bornes peut changer de signe.
- Une source est *réversible en courant* si le courant qui la traverse peut s'inverser.

Exemples de réversibilité

— Une batterie d'accumulateurs se comporte en récepteur lors de la charge, en générateur lors de la décharge; on dit que c'est une *source de tension réversible en courant.*

— Le circuit de l'induit d'une machine à courant continu est assimilable à une f.é.m. en série avec une résistance et une inductance ; c'est donc *une source de courant réversible en tension et en courant.*

II.2. Règle d'interconnexion des sources

Pour établir une configuration des convertisseurs statique, il faut respecter les trois règles suivantes

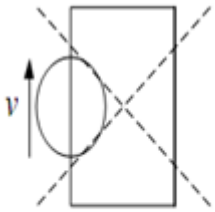
1/ Une source de tension ne doit jamais être court-circuitée mais elle peut être ouverte *(pour éviter les surintensités)*.

2/ Une source de courant ne doit jamais être ouverte mais elle peut être court-circuitée (*pour éviter les surtensions)*.

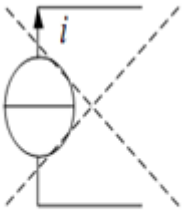
3/ Il ne faut jamais connecter deux sources de même nature. Cela revient à dire qu'il est possible de connecter deux sources de natures différentes.

Cela conduit à respecter les configurations assurant le transfert continu de l'énergie comme suit :

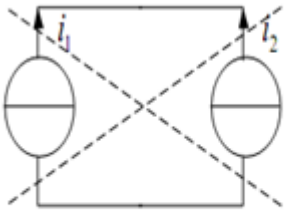
- **Configurations interdites**

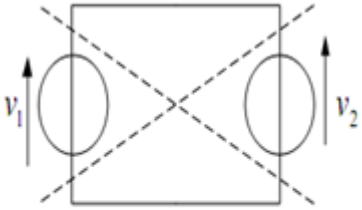


Ne pas cout-circuiter une source de tension



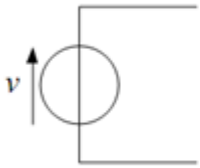
Ne pas ouvrir une source de courant

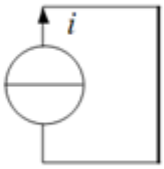




Ne pas connecter deux sources de même nature

- **Configurations autorisées**







Aussi ;

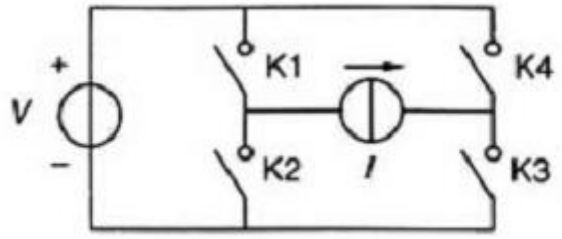
Il faut noter que pour connecter **deux sources de tension**, le convertisseur doit contenir un **élément inductif**. De même, pour connecter **deux sources de courant**, le convertisseur doit contenir un **élément capacitif**.

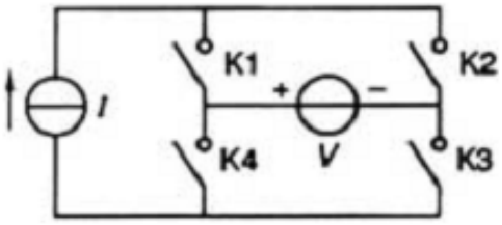
II.3 Structure des convertisseurs :

On distingue les convertisseurs *directs et indirects*.

- ✓ **Structure des convertisseurs directs :**

Les sources d'entrée et de sorties sont de nature différentes. Le convertisseur statique peut contenir, dans ce cas, que des interrupteurs à semi-conducteur.



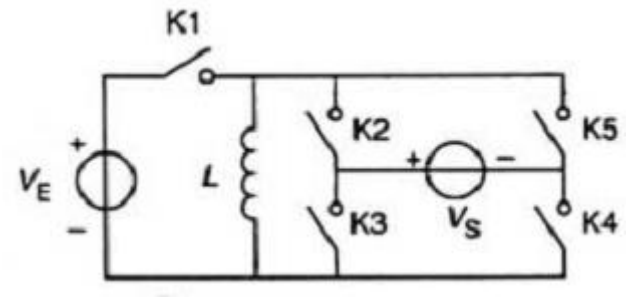


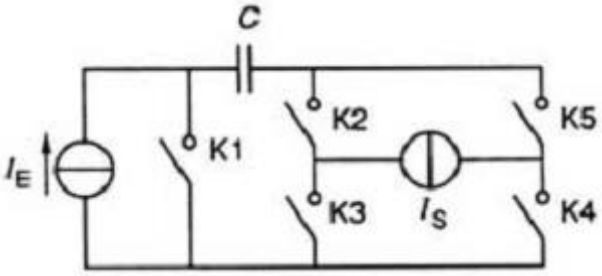
Convertisseur directe tension-courant Convertisseur directe courant-tension

Configuration de base

- ✓ **Structure des convertisseurs indirects :**

Les sources d'entrée et de sortie sont de nature identique, et pour les relier, il faut faire appel à des éléments de stockage (inductance L ou capacité C)





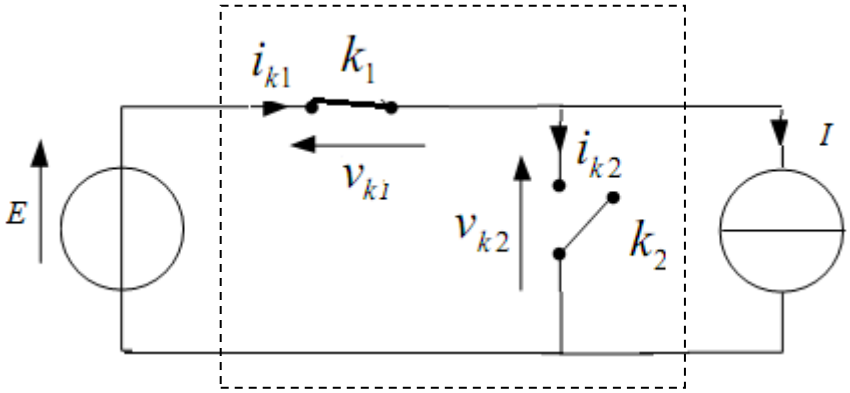
Convertisseur indirecte tension-tension Convertisseur indirecte courant-courant

Configuration de base

II.4 Cellules de commutations

Les CS de l'EP sont réalisés par des interrupteurs assurant le respect des règles d'association et d'interconnexions des sources. Cela conduit à utiliser au minimum une structure à deux interrupteurs, le 1er connecte les sources entre elles et le 2ème assure le respect des règles d'interconnexions des sources.

Une telle structure contenant deux interrupteurs est nommée « *Cellules de commutations* ». Les deux commutateurs sont **nécessairement complémentaires** (*le* 1er est ouvert lorsque le 2ème est fermé et vice versa).



La cellule de commutation

Les équations électriques correspondant au fonctionnement de la cellule de commutation associé aux deux sources :

$$V_{k1} + V_{k2} = E$$

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

C'est lois sont toujours vraies quelque soit l'état des interrupteurs à condition qu'ils soient complémentaires $K_1 = \overline{K_2}$ (quand l'un est fermé l'autre est ouvert)

Supposant le cas où ***E* > 0** et ***I* > 0**

Lorsque K_1 passant et K_2 bloqué ***(K_1 et K_2 sont parfaites)***

$$V_{k1} = 0 \text{ , } i_{k1} = I$$

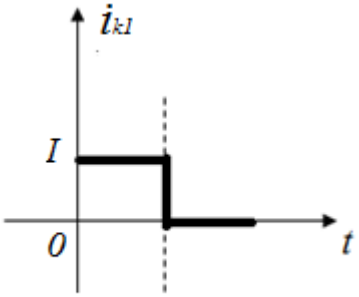
$$V_{k2}=E, \; i_{k2}=0$$

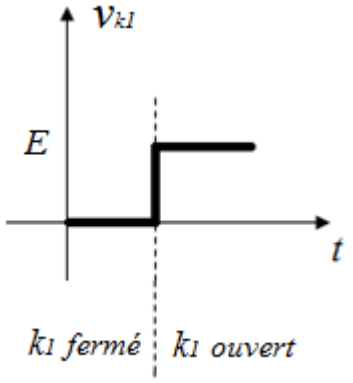
Lorsque K_1 bloqué et K_2 passant

$$V_{k1} = E \text{ , } i_{k1} = 0$$

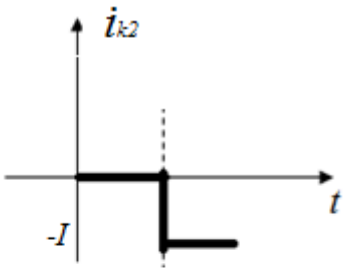
$$V_{k2}=0, \; i_{k2}=- I$$

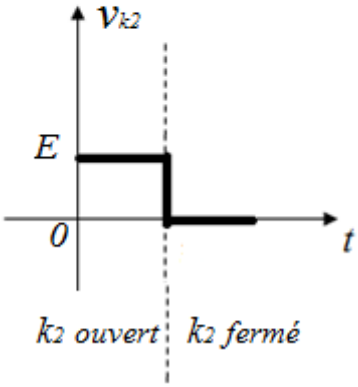
Interrupteur K_1



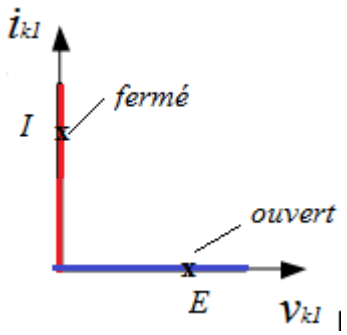


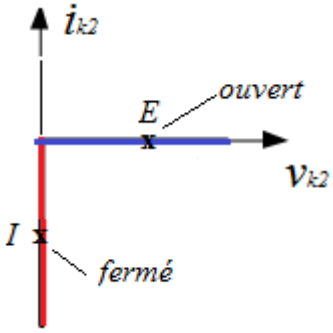
Interrupteur K_2



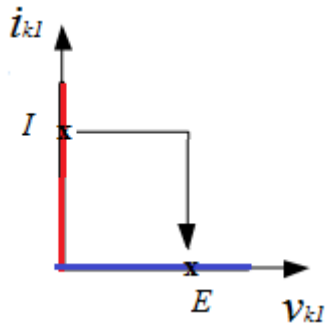


Point de fonctionnement statique (cas fermé et ouvert)

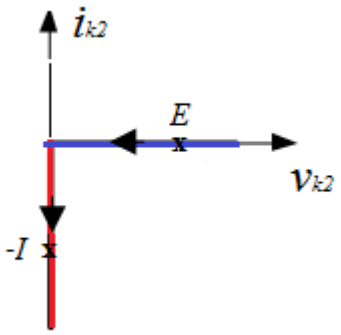




Caractéristiques dynamiques



En ouverture

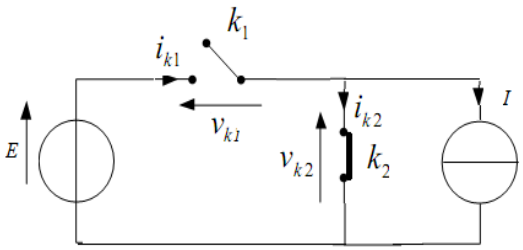


En fermeture

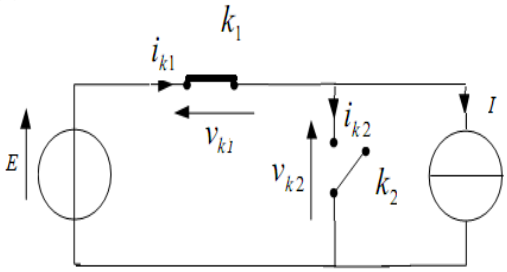
Dans ce cas (***E* > 0** et ***I* > 0)** on constate :

Commutation commandée pour l'interrupteur K1

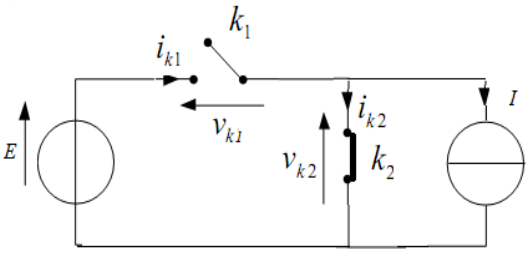
Commutation spontanée pour l'interrupteur K2



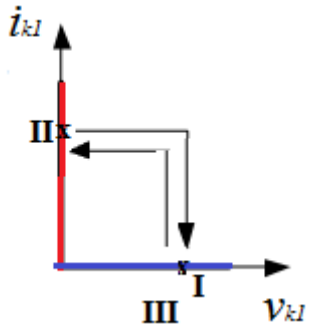
Configuration I

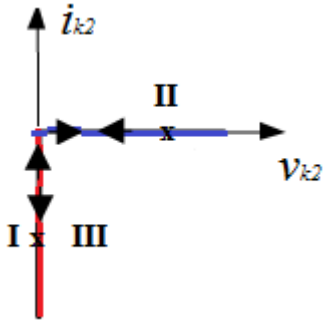


Configuration II



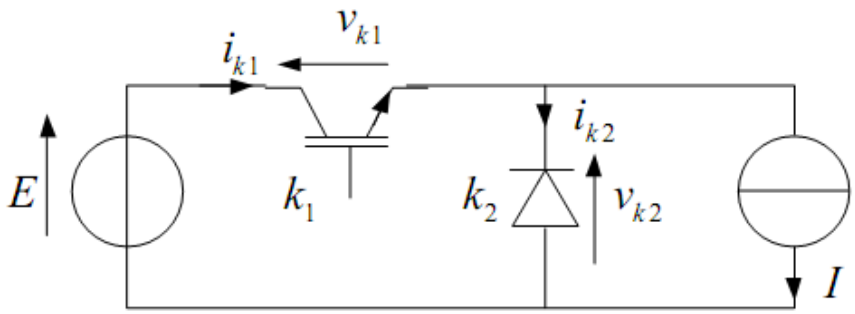
Configuration III





Ce cas (lorsque ***E* > 0** et ***I* > 0)** correspond donc à un interrupteur *unidirectionnel* commandé à la fermeture et ouverture (transistor par exemple) et un autre interrupteur *unidirectionnel* à fermeture et blocage spontanés (diode).

On peut déduire alors dans ce cas une structure de *hacheur dévolteur non réversible.*

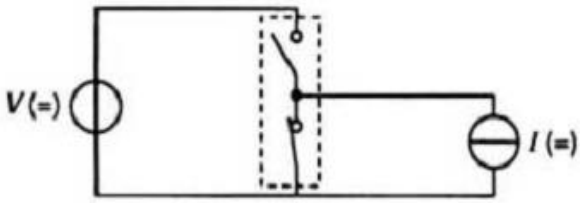


Remarque :

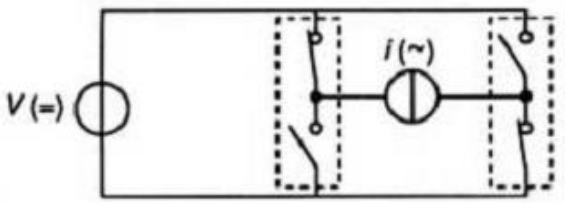
la réversibilité des interrupteurs est liée à la réversibilité des sources en tension pour une source de tension et en courant pour une source de courant.

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

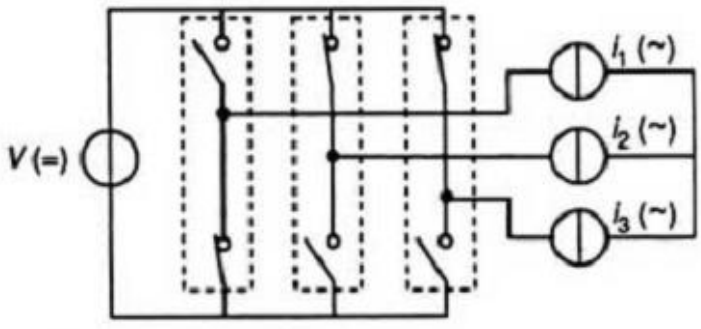
Exemple de structures avec cellules élémentaires de commutation :



Hacheur



Onduleur de tension monophasé



Onduleur de tension triphasé

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

II.5 Etapes de la synthèse d'un convertisseur statique

La démarche de synthèse des convertisseurs statiques se base ainsi tout simplement sur le '***cahier des charges***' du circuit et permet généralement une détermination totale de la structure par le suivi des étapes suivants :

1/ Nature des sources d'entrée et de sortie et réversibilité des sources. En déduit la configuration de base (direct ou indirect)

2/ Identifier les séquences de fonctionnement nécessaires.

3/ Détermination des caractéristiques statiques $i_k(v_k)$ de chaque interrupteur correspondant.

4/ Détermination des natures de commutation de chaque interrupteur

5/ En déduire les composants semi-conducteurs à utiliser.